

Étude comparative
Intergénérationnelle de luminaires horticoles

par

François ROY-MOISAN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 15 MAI 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Sylvain G. Cloutier, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Boland, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Bolduc, membre du jury
Institut National d'Optique (INO)

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 5 AVRIL 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je suis reconnaissant envers mon directeur de recherche, M. Sylvain G. Cloutier, pour sa confiance et pour toute la liberté qu'il m'a accordée lors de la réalisation de ma recherche.

De plus, cette recherche n'aurait pu avoir lieu sans l'aide de M. Julien Loiseau qui a su expliquer me supporter au niveau de la croissance de plants.

Pour leur soutien moral, leur appui dans tous mes projets abracadabrants, grâce à leur patience et leurs sacrifices. Je tiens à exprimer toute la gratitude du plus profond de mon cœur à ma conjointe Geneviève et à mes enfants Henri et Luce pour m'avoir permis de matérialiser mes rêves. Sans eux, je serais encore à me demander quoi faire avec mes dix doigts.

Un remerciement à François-Xavier Fortier pour son soutien technique et émotionnel. Cette maîtrise aurait été plus longue et fastidieuse sans le soutien de mes mentors, M. Pierre Laferrière et M. Luc Giguère. Sans oublier, la chaleureuse amitié du groupe NOMAD soit : Charles Trudeau, Luis Felipe Gerlein Reyes, Jaime Benavides, Debika Banerjee et Xiaohang Guo.

Je veux remercier ma famille : Sylvie, Jean-Marc, Michelle, Claudine et Hugo pour leurs précieux encouragements qui m'ont fait mettre un pied devant l'autre.

Merci à l'École de technologie supérieure pour la qualité de ses services et de son enseignement.

Finalement, je remercie mon grand-père M. Lionel Moisan qui, tout au long de mon parcours m'a guidé.

ÉTUDE COMPARATIVE MULTI-GENERATIONNEL DE LUMINAIRES HORTICOLES

Francois ROY-MOISAN

RÉSUMÉ

L'optimisation de la croissance des plantes en milieu fermé est en pleins essors. Tous les paramètres de croissance sont maintenant optimisés, tels l'humidité, le contrôle des nutriments, etc.. Par contre, l'optimisation de l'éclairage jusqu'à l'arrivée des DEL, est resté stagnant. La DEL a ouvert de nouveaux horizons. Depuis quelques années, la recherche sur les spectres et l'influence de ceux-ci sur les plants est en accélération. Ces avancées ont permis de voir l'apparition d'une multitude de technologies sur le marché. Est-ce que ces nouvelles technologies surpassent leurs prédécesseurs? Cette recherche a comparé trois systèmes d'éclairage de génération différente, soit : le tube fluorescent horticole, la DEL blanche et un luminaire multi-DEL modulable reproduisant le soleil. Ceux-ci ont été testés pour deux de leurs aspects, soit la qualité du spectre émis et la croissance des cultivars. Les plantes mises à l'essai sont des plants de basilic (*Ocimum basilicum*), de menthe (*Mentha arvensis*), de coriandre (*Coriandrum sativum*), de laitue frisée (*Lactuca sativa*) et de ciboulette. Les tests ont été réalisés en trois (3) expérimentations consécutives d'une période de 33 jours chacune. Les critères de qualification pour la qualité spectrale sont basés sur la norme ASTM E927-10. Les tests établis visaient à comparer l'intégrale de recouvrement, le champ de vision, l'uniformité spectrale et la stabilité temporelle. Pour la croissance, la grandeur du plant et des feuilles ainsi que le diamètre de la tige ont été analysés. Les résultats obtenus démontrent qu'au niveau spectral le luminaire multi-DEL offre une qualité spectrale bien au-devant de ses prédécesseurs. Pour ce qui est de l'expérimentation de croissance, le luminaire multi-DEL offre de meilleurs résultats que les deux autres technologies. Cette recherche a permis de valider les avancées technologiques et qu'un éclairage à large spectre multi-DEL donne des résultats supérieurs par rapport à la dernière génération de DEL blanche.

Mots-clés : DEL, lampe large spectre, lampe solaire, test comparatif, croissance de plants

MULTI-GENERATIONAL COMPARATIVE STUDY OF HORTICULTURAL LUMINAIRES

Francois ROY-MOISAN

ABSTRACT

The optimization of plant growth in a closed environment is in development. All the growth parameters are now optimized, such as humidity, nutrient control, etc. On the other hand, the lighting optimization, up to the arrival of the LEDs has remained stagnant. LED has opened the last parameter to optimize. It is noted that in recent years the research on the spectral influence on the plants is accelerating. These researches have seen the emergence of a multitude of new technologies on the market. Do these new technologies outperform their predecessor? This project is designed to compare three different generation lighting systems: horticultural fluorescent tubes, white LED, and a multi-LED light fixture that reproduces the sun. These have been tested in two aspects, namely the quality of the spectrum emitted and the growth of plants. The plants tested are basil (*Ocimum basilicum*), mint (*Mentha arvensis*), coriander (*Coriandrum sativum*), leaf lettuce (*Lactuca sativa*) and chives. The tests occurred in 3 consecutive experiments of a period of 33 days. The qualification criteria for spectral quality are based on ASTM E927-10. The tests are designed to compare the spectral quality, the field of view, the spectral uniformity and the temporal stability. For growth, the size of the plant and leaves as well as the diameter of the stem were analyzed. The results obtained demonstrate that at the spectral level the multi-LED lighting system offers a spectral quality well in front of its predecessors. In terms of growth experimentation, the multi-LED offers better results than the other two technologies. This research validated the technological advances and that a broad-spectrum multi-LED lighting gives superior results compared to the latest generation of white LEDs.

Keywords: LED, broad spectrum lamp, solar lamp, comparative test, plant growth

TABLE DES MATIÈRES

Page	
INTRODUCTION	23
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	27
1.1 L'humain utilise le Lux.....	27
1.1.1 L'œil humain.....	27
1.1.2 Les bâtonnets	29
1.1.3 Les cônes.....	29
1.2 Problématique	30
1.3 Les plantes utilisent la PAR.....	32
1.3.1 Le rayonnement photosynthétique actif.....	32
1.3.2 Le rendement du flux de photons.....	34
1.3.3 La structure des feuilles	36
1.4 La lumière naturelle.....	38
1.4.1 Notion d'illuminant.....	38
1.4.2 Type d'illuminant.....	38
1.4.3 Illuminant D65 : lumière au Zénit	39
1.5 L'effet de la lumière chez les plantes	40
1.5.1 Le cycle circadien	40
1.5.2 L'éclairage à large spectre	41
1.6 Spectrométrie	42
CHAPITRE 2 MATÉRIEL	45
2.1 Lampes.....	45
2.2 Fluorescent T8 horticole	45
2.3 Luminaire à DEL blanches	46
2.4 Luminaire multi-DEL	47
2.5 Spectromètre	49
2.6 Enceinte de croissance	50
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	51
3.1 Introduction.....	51
3.2 La comparaison des spectres.....	51
3.3 La comparaison spectrale.....	52
3.3.1 L'intégrale de recouvrement spectral.....	53
3.3.2 Champ de vision des luminaires	57
3.3.3 L'uniformité spatiale de l'irradiance.....	60
3.3.4 La stabilité temporelle de l'irradiance.....	61
3.4 Résultats de la comparaison spectrale.....	63
3.5 La croissance des plantes	65
3.5.1 Le type de plante.....	65
3.5.2 Le protocole de germination	66

3.5.3	Plan de Suivis de Croissance	67
3.5.4	Le Régime d'éclairage	67
3.5.5	La caractérisation des plants	67
3.5.6	Photo des plants	68
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	69
4.1	Résultats de croissance des plantes	69
4.1.1	Les plants de basilic	69
4.1.2	Les plants de menthe	72
4.1.3	Les plants de coriandre	74
4.1.4	Les plants de laitue frisée	78
4.1.5	Les plants de ciboulette	81
4.2	Les résultats de croissance de jalapeño	83
CHAPITRE 5	ANALYSE DES RÉSULTATS	85
5.1	Analyse statistique	85
5.1.1	Introduction	85
5.1.2	Analyse en composantes principales	86
5.1.3	Validation de la qualité des résultats	88
5.2	Résumé des rendements	91
5.2.1	Analyse de croissance des jalapeños	93
CONCLUSION		95
RECOMMANDATIONS		97
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		123

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Illuminants classiques de la CIE39
Tableau 3.1	Résumé des températures de couleurs53
Tableau 3.2	Numérotation des plages.....54
Tableau 3.3	Résultats du test d'intégrale de recouvrement spectral.....56
Tableau 3.4	Résultats des angles de vue des luminaires.....60
Tableau 3.5	Résultats des surfaces d'éclairé par chaque luminaire60
Tableau 3.6	Surface en (m ²) par classe des luminaires.....61
Tableau 3.7	Pondération des sources lumineuses.....62
Tableau 3.8	Rendement des luminaires65
Tableau 3.9	Détail des plantes utilisé pour l'expérimentation.....66
Tableau 4.1	Distance et quantité de photons émis pour un luminaire multi-DEL.....83
Tableau 5.1	Compilation des résultats des fines herbes à feuilles utilisées pour l'analyse.....86
Tableau 5.2	Résultats du ratio signal sur bruit des mesures88
Tableau 5.3	Tests des étendues multiples pour les hauteurs des plants.....89
Tableau 5.4	Tests des étendues multiples pour les longueurs des feuilles90
Tableau 5.5	Tests des étendues multiples pour la surface des tiges90
Tableau 5.6	Résumé des comparatifs entre luminaires multi-DEL et DEL blancs93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Anatomie de l'œil humain28
Figure 1.2	Positionnement et quantité des bâtonnets et des cônes dans l'œil humain 29
Figure 1.3	Comparaison entre les différents types de cônes30
Figure 1.4	Comparaison de la sensibilité de l'œil humain et d'une feuille.....31
Figure 1.5	Spectre d'absorption de différents systèmes chez une plantes31
Figure 1.6	Comparaison du PPFD et du YPF35
Figure 1.7	Illustration à grande échelle de la structure d'une feuille.....36
Figure 1.8	Comparaison des illuminants de type D40
Figure 2.1	Réponse spectrale des T8-Horticole46
Figure 2.2	Réponse spectrale du T8-DEL47
Figure 2.3	Comparaison du spectre initial versus le spectre utilisé pour les tests48
Figure 2.4	Visualisation du système complet.....48
Figure 2.5	Photo d'un spectromètre Jaz.....49
Figure 2.6	Photo de l'enceinte vue de l'extérieur.....50
Figure 2.7	Schéma des divisions à l'intérieur de l'enceinte50
Figure 3.1	Superposition des spectres des luminaires testés52
Figure 3.2	Tableau de classification en fonction des tests53
Figure 3.3	Intégrale de recouvrement spectral T8 horticole 4000k55
Figure 3.4	Intégrale de recouvrement spectral T8 Del 3000k.....55
Figure 3.5	Intégrale de recouvrement spectral du luminaire multi-DEL 6500K56
Figure 3.6	Définition des axes de vue d'un luminaire57
Figure 3.7	Schéma de montage pour les tests de champ de vue57

Figure 3.8	Angle de vue horizontal et vertical des T8 horticoles.....	58
Figure 3.9	Angle de vue horizontale et verticale du luminaire à DEL blanches.....	59
Figure 3.10	Angle de vue horizontal et vertical du système d'éclairage multi-DEL	59
Figure 3.11	Comparaisons de l'uniformité temporelle	61
Figure 3.12	Distributions des résultats de variation temporelle.....	62
Figure 3.13	Détermination de la pondération.....	63
Figure 3.14	Résultats normalisés de la priorisation des critères d'évaluation.....	63
Figure 3.15	Résultats pondérés des tests spectraux en fonction des luminaires	64
Figure 3.16	Choix du meilleur luminaire en fonction des critères de tests	64
Figure 3.17	Comparaison visuelle entre deux plants	68
Figure 4.1	Variation dans le temps de la croissance des plants de basilic	69
Figure 4.2	Variation dans le temps de la hauteur des plants de basilic.....	70
Figure 4.3	Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de basilic	70
Figure 4.4	Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de basilic..	71
Figure 4.5	Variation dans le temps de la vigueur des plants de basilic.....	71
Figure 4.6	Variation dans le temps de la croissance des plants de menthe.....	72
Figure 4.7	Variations dans le temps de la hauteur des plants de menthe	72
Figure 4.8	Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de menthe ...	73
Figure 4.9	Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de menthe	73
Figure 4.10	Variation dans le temps de la vigueur des plants de menthe	74
Figure 4.11	Variation dans le temps de la croissance des plants de coriandre.....	75
Figure 4.12	Variations dans le temps de la hauteur des plants de coriandre.....	75
Figure 4.13	Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de coriandre	76
Figure 4.14	Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de coriandre	76

Figure 4.15	Variation dans le temps de la vigueur des plants de coriandre	77
Figure 4.16	Variation dans le temps de la croissance des plants de laitue frisée	78
Figure 4.17	Variations dans le temps de la hauteur des plants de laitue frisée	78
Figure 4.18	Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de laitue frisée.....	79
Figure 4.19	Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de laitue frisée.....	80
Figure 4.20	Variation dans le temps de la vigueur des plants de laitue frisée	81
Figure 4.21	Variation dans le temps de la croissance des plants de ciboulette	81
Figure 4.22	Variation dans le temps de hauteur des plants de ciboulette	82
Figure 4.23	Variation dans le temps de la vigueur des plants de ciboulette	83
Figure 4.24	Croissances de jalapeño	84
Figure 5.1	Résultats de l'analyse en composante principale	86
Figure 5.2	Résultats des poids des variables	87
Figure 5.3	Résultats de l'analyse des résidus.....	89
Figure 5.4	Résultats en fonction des luminaires.....	89
Figure 5.5	Résultats des moyennes et intervalles de confiance	91
Figure 5.6	Comparatif des rendements des plantes en fonction des luminaires horticoles.....	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analytic hierarchy process
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIE	Commission internationale de l'éclairage
DEL	diodes électroluminescente (fr)
ÉTS	École de technologie supérieure
FOV	Champ de vision (Field of view)
LED	Light Emitting Diode (ang)
PAR	Photosynthetically active radiation
PPF	Flux de photon photosynthétique
PCB	Printed Circuit Board
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
YPF	Flux de photon de rendement

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE LONGUEUR ET D'AIRE

m	mètre
μm	micromètre
nm	nanomètre
cm^2	centimètre carré
mm^2	millimètre carré
μm^2	micromètre carré

UNITÉS ÉLECTRIQUES

A	Ampère
mA	milliampère
μA	microampère
V	volt
mV	millivolt
mW	milliwatt
μW	microwatt
W	watt

UNITÉS OPTIQUES

$\mu\text{W}/\text{nm}$	microwatt par nanomètre
mW/cm^2	milliwatt par centimètre carré
mW/cm^2	milliwatt par mètre carré
W/m^2	irradiance, watt par mètre carré
cd/m^2	luminance, candela par mètre carré
λ	Longueur d'onde
K	dégré Kelvin

INTRODUCTION

La lumière artificielle a été principalement développée pour répondre à notre besoin de se sortir du noir. De la préhistoire à nos jours, plusieurs types d'éclairage ont été conçus, à partir des systèmes à combustion comme le feu de bois, la chandelle et les lampes à combustible. Dès le XVII^e siècle, l'ampoule incandescente est apparue. Ensuite, les lampes à décharge (tubes fluorescents à mercure, lampes à vapeur de sodium) ont fait leur apparition dans les années 1950. Finalement, pendant les années 1970 il y a eu l'arrivée de la première diode électroluminescente (DEL) infrarouge par son inventeur Nick Holonyak. Cependant, ce ne sera pas avant les années 1990 que la DEL blanche fera son apparition.

Depuis, les systèmes d'éclairage se perfectionnent à une rapidité exponentielle. Aujourd'hui, l'industrie est en mesure d'y introduire de l'intelligence de plus en plus sophistiquée. Il est possible d'éclairer des édifices de façons très artistiques en les illuminant de toutes les couleurs tel le pont Jacques Cartier à Montréal.

Les critères généraux qui permettent de classer ces sources lumineuses sont le coût (à l'achat, de fonctionnement et en fonction de la durée de vie), les caractéristiques de la lumière émise sur la croissance des plantes (la température de couleur et le rendu de couleur) et l'impact environnemental (rendement énergétique de conversion de l'électricité en lumière, fabrication et recyclage).

Depuis 2003, plusieurs experts scientifiques se penchent sur la question de l'impact environnemental des humains. Chaque année, ils procèdent à une estimation de date à laquelle la consommation des ressources naturelles régénérées est utilisée annuellement. Pour 2016, ce moment a été atteint le 8 août (Vergne, 2016). Ainsi à partir d'août 2016 la consommation s'effectuait au-delà de la capacité de production et régénération de la planète. Le gouvernement du Canada constatait une forte augmentation des prix des aliments de base comme les fruits et les légumes et un intérêt marquer des Canadiens de manger des produits plus sains (gouvernement du Canada, 2017). Cette augmentation est due en grande partie à la quantité

d'énergie nécessaire à la culture de ceux-ci. Comme les coûts du pétrole et de l'électricité sont en augmentation, les prix des aliments de base en sont directement affectés, car en serre, pour s'assurer d'avoir une bonne récolte il faut que l'environnement demeure toujours optimal pour les plantes cultivées.

L'évaluation de la taille du marché de l'agriculture en serre pour 2030 devrait atteindre 39 milliards de dollars canadiens avec un taux de croissance annuel de 8,8 % (Pawan Kumar, 2014). Cette augmentation annuelle représente environ cinq hectares de nouvelles serres par années en Amérique du Nord uniquement.

Cette forte croissance de la taille du marché est accompagnée d'une forte croissance au niveau des technologies favorisant l'amélioration et l'automatisation de la production. Dans une serre moderne, presque la totalité des paramètres telle que l'humidité, la température, la ventilation, etc. sont contrôlées. Par contre, l'un des facteurs les plus importants à la qualité de la production ne l'est pas... La lumière.

C'est ainsi qu'un éclairage simulant la lumière du soleil permet aux plantes d'assimiler les nutriments nécessaires à la production de fruits. (Alexandre-Tétreault et Roy-Moisán, 2013)

0.1 Motivation de la recherche

Grâce à la conception d'un système de vérification par fluorescence de la santé des plantes, nous avons compris à quel point l'éclairage joue un rôle important. Il est mal utilisé dans l'industrie et c'est pourquoi cette recherche a pour but de comparer les systèmes d'éclairage de dernière génération avec leurs prédécesseurs.

L'analyse présentée dans ce mémoire a pour but de développer une méthodologie pour faire la comparaison de luminaire de générations différentes, soit le tube fluorescent horticole, la DEL blanche et un système multi-DEL se rapprochant du spectre du soleil. Nous posons l'hypothèse que cette comparaison nous permettra de déterminer si la nouvelle génération de luminaires

est supérieure à ses prédécesseurs et si le changement dans le domaine de l'éclairage en serres est valable.

0.2 ENVIRONNEMENT DE RECHERCHE

Ce projet a été réalisé à deux endroits différents. Les comparaisons spectrales ont été accomplies en grande partie dans les laboratoires de la chaire de recherche du professeur Sylvain G. Cloutier. Quant aux expériences de croissances des plantes, les tests ont été exécutés à l'extérieur des murs de l'ÉTS, sous la supervision d'un agriculteur dans un environnement contrôlé.

0.3 Contributions Scientifiques De Ce Travail De Recherche

Les contributions clés de cette recherche sont les suivantes :

- créer une méthodologie de comparaison pour l'évaluation de lampes diverses ;
- avoir une meilleure connaissance de l'avancement technologique DEL sur la croissance des plantes ;
- comparaison entre trois générations de luminaires, soit
 - multi-DEL;
 - DEL blanches;
 - fluorescents horticoles.

0.4 Plan du mémoire

Ce mémoire est construit en cinq chapitres. Le chapitre 1 expose la revue de littérature en lien avec la compréhension de l'effet de la lumière sur les plantes. Le chapitre 2 détaille le matériel utilisé pour mener les tests. Le chapitre 3 expose la méthode expérimentale proposée pour quantifier les sources d'éclairages et être en mesure de les comparer. Également, ce chapitre présente la comparaison spectrale des luminaires. Le chapitre 4 présente les résultats obtenus lors de la croissance des plants. Finalement, le chapitre 5 développe l'analyse des résultats.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La méthode de caractérisation des systèmes d'éclairage pour l'humain est très différente de la caractérisation des systèmes d'éclairage horticole. C'est pourquoi il est important de bien comprendre les différences entre les unités lumineuses applicables pour l'humain et pour les plantes en se basant sur la littérature existante. Nous nous attarderons sur la perception de la lumière par l'œil humain en comparaison avec la perception des feuilles des plantes. Par la suite, une revue de la littérature sur la lumière naturelle du soleil et de son effet chez les plantes est présentée. Ce chapitre se termine par une vulgarisation de la spectrométrie.

1.1 L'humain utilise le Lux

1.1.1 L'œil humain

Depuis plus d'un siècle, les recherches sur la vision humaine ne se concentrent plus strictement au système optique de l'œil, mais davantage à l'étude physiologique de l'ensemble du système visuel. Le mécanisme de l'œil est très complexe et l'analyse physique de celui-ci ne permet pas d'expliquer convenablement la perception visuelle. Cette problématique a donné naissance à plusieurs branches études. L'un d'eux est plus pertinent pour la présente recherche, soit la science des couleurs, qui s'attarde à distinction des couleurs par exemple la différence entre le rouge et le violet. Celle-ci repose sur le principe de fonctionnement du système visuel et de son traitement des images (Shevell et Optical Society of America, 2003).

L'image perçue traverse d'abord l'appareil optique avant d'atteindre les photorécepteurs de la rétine. Celle-ci tapisse l'intérieur du globe oculaire sauf au niveau du nerf optique (Silbernagl, Despopoulos et Laurent, 2001). La rétine est constituée majoritairement de deux types de photorécepteurs : les « bâtonnets » et les « cônes ». Les bâtonnets et les cônes contiennent des photopigments chimiques réagissant à la lumière. Lorsque stimulés, ceux-ci émettent des

signaux électriques qui sont par la suite envoyés au nerf optique puis conduit au cerveau (Curcio *et al.*, 1990).

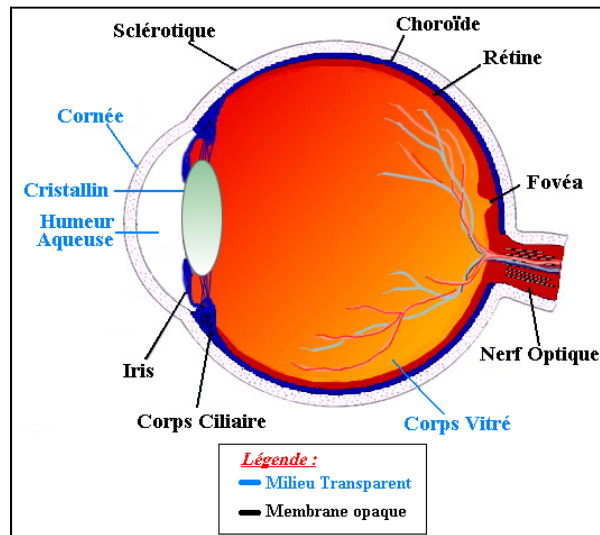


Figure 1.1 Anatomie de l'œil humain
Tirée de Bioinformatics Organization (1998)

Comme la Figure 1.2 le démontre, les cônes sont majoritairement présents dans la zone centrale de l'œil nommée fovéa visible sur la figure 1.1. La zone périphérique (parafovéa) comporte une faible quantité de cônes par rapport à la population des bâtonnets. À cet endroit, la vision de jour est moins précise, mais la vision en obscurité est excellente. À environ 20 degrés du champ visuel, il est possible de remarquer une zone de la rétine qui est dépourvue de capteurs (voir Figure 1.2). À cet endroit se situe le nerf optique qui dirige l'information vers le cerveau. Cette zone est aussi appelée « point aveugle ».

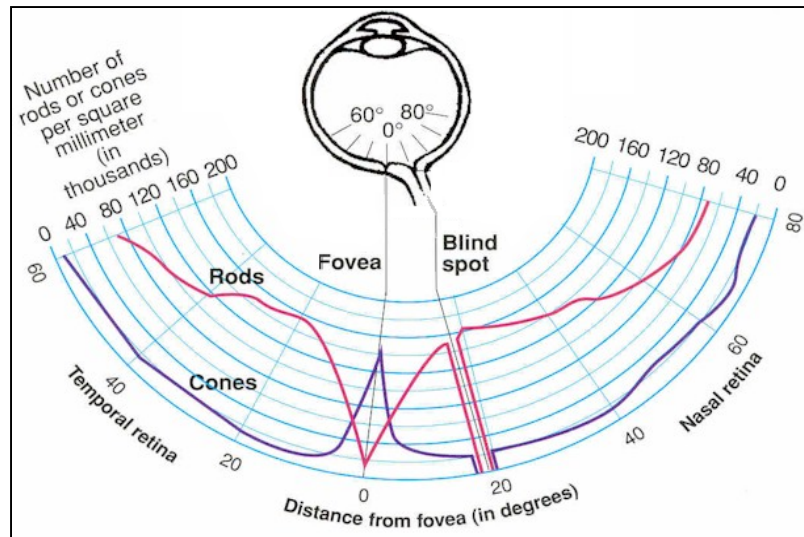


Figure 1.2 Positionnement et quantité des bâtonnets et des cônes dans l'œil humain
Adaptée de Purves (2012)

1.1.2 Les bâtonnets

Les bâtonnets sont très sensibles à la lumière et sont constitués de cellules photoréceptrices à près de 95 %. Ils sont capables de réagir à un stimulus lumineux très faible (luminance *inférieure* à $0,003 \frac{cd}{m^2}$) ils ont un maximum de sensibilité autour de 510 nm. En contrepartie, ces derniers ne fournissent qu'une réponse photométrique, à savoir, une image imprécise des objets. De plus, ils ne font pas partie du mécanisme de détection des couleurs. Ils permettent uniquement une vision en noir et blanc. Comme les bâtonnets sont très sensibles à la lumière, ils sont très réceptifs dans un environnement sombre.

1.1.3 Les cônes

Les cônes, contrairement aux bâtonnets, sont moins sensibles à la lumière (luminance *supérieure* à $3 \frac{cd}{m^2}$). Ceux-ci sont responsables de la vision photopique (diurne) et ils permettent une réponse photométrique et chromatique (Curcio *et al.*, 1990). Les cônes se divisent en trois types, tout sensible à certaines longueurs d'onde comme la Figure 1.3 le démontre. Les trois groupes de cônes sont classés en fonction de leur sensibilité, les cônes (B)

associés aux basses longueurs d'onde (maximum de sensibilité à 419 nm), les cônes (V) sensibles aux radiations de moyennes longueurs d'onde (maximum de sensibilité à 531 nm) et finalement les cônes (R) sensibles aux émissions de grandes longueurs (maximum de sensibilité à 559 nm). La Figure 1.3 démontre bien l'entrecroisement des sensibilités permettant de voir les couleurs dans tout le spectre visible. Il est à noter que les cônes sont peu sensibles aux longueurs d'onde autour de 490 nm.

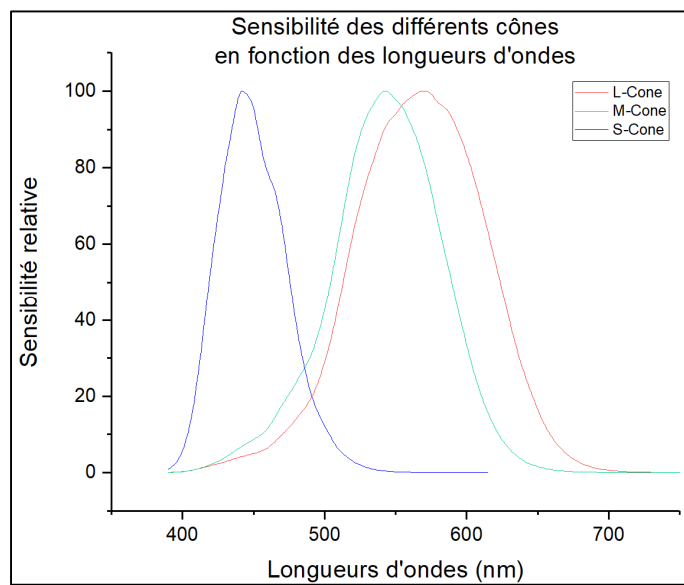


Figure 1.3 Comparaison entre les différents types de cônes
Tirée de Stiles et Burch (1959)

1.2 Problématique

Les plantes et l'humain perçoivent la lumière de façon très différente. La figure Figure 1.4 démontre la sensibilité de l'œil humain à la lumière verte alors que la plante y est beaucoup moins sensible. Les unités de mesure comme le Lux, le Candela et le Lumen sont basées sur la réponse de l'œil humain à la lumière. Le problème fondamental avec l'utilisation de ces unités de mesure en horticulture est la faible influence du bleu (400-500nm) et du rouge (600-750nm) sur ces unités (Fluence Bioengineering inc., 2016).

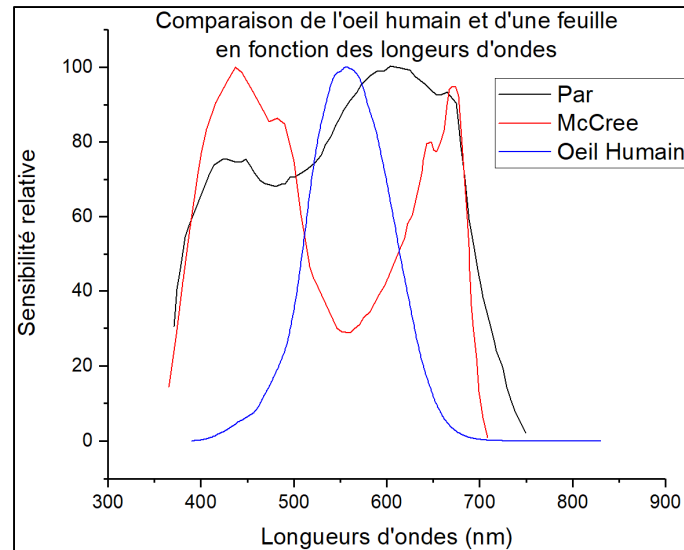


Figure 1.4 Comparaison de la sensibilité de l'œil humain et d'une feuille en fonction de la longueur d'onde

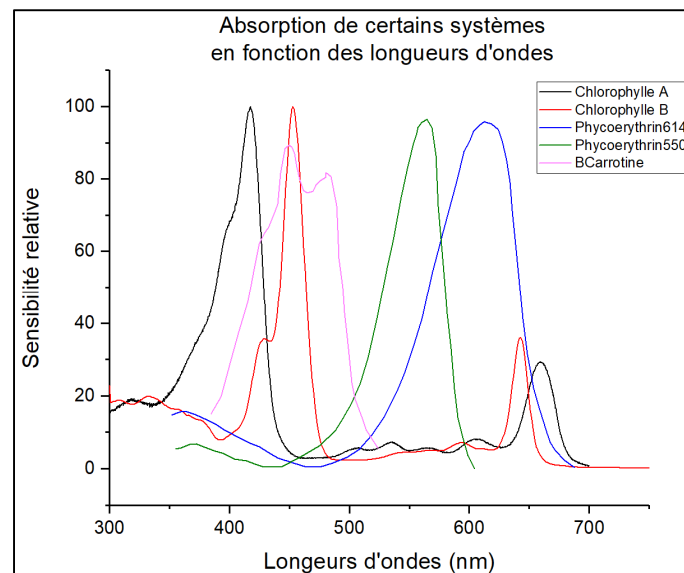


Figure 1.5 Spectre d'absorption de différents systèmes chez une plante

La Figure 1.5 permet de démontrer que l'entière des longueurs d'onde sont utiles aux divers systèmes des végétaux. Les longueurs d'ondes bleu et rouge jouent un rôle important, comme le reste de la plage visible (voir figure 1.4). Avec la figure 1.4 l'on constate la différence

fondamentale de la sensibilité visuelle entre l'humain et la plante. En comparaison, la plage dynamique de l'œil est plus étroite dans le visible que celle des végétaux (voir figure 1.5).

1.3 Les plantes utilisent la PAR

Avant tout, il est primordial de bien comprendre le système dynamique de photosynthèse chez les plantes. Les plantes sont constituées d'un système formidable d'acclimatation photosynthétique ainsi que des processus de protection qui leur permettent de faire face à une large gamme de conditions différentes. Par exemple, dans le cas d'une sur exposition de lumière, des procédés autres que la photosynthèse prendront en charge cet excès de lumière (Kato *et al.*, 2003).

1.3.1 Le rayonnement photosynthétique actif

L'irradiance du rayonnement photosynthétique actif (PAR en anglais) qui est mesurée en unités d'énergie ($\frac{W}{m^2}$) reflète la réponse de la plante à la lumière. Elle considère l'équilibre énergétique des végétaux pour la génération de la photosynthèse. Par contre, elle est un ensemble de réactions chimiques dépendant plus de la quantité de photons reçue que de l'énergie contenue dans ceux-ci. Les biologistes chiffrent le PAR en utilisant le nombre de photons contenus dans la plage visible soit de 400-700nm pour une surface et pour un temps donné (Rabinowitch et Govindjee, 1969 ; Barnes *et al.*, 1993). La densité de flux de photon photosynthétique (PPFD) est normalement mesurée en $\mu mol * m^{-2} * s^{-1}$. PPFD. Cette mesure est parfois exprimée en Einstein ($\mu E * m^{-2} * s^{-1}$), bien que cette utilisation demeure non conforme à la norme et de moins en moins utilisée (Fitter et Hay, 2012). Cette mesure permet d'évaluer la quantité de rayonnement reçue par le feuillage vert des plantes lors de la photosynthèse. Les photons contenus hors du spectre visible ne sont pas pris en compte dans le calcul : les photons de courtes longueurs d'onde sont généralement filtrés par la couche d'ozone et une quantité négligeable atteignant la surface de la Terre. Quant aux photons de longueurs d'onde élevées, ils apportent généralement peu d'énergie et sont négligeables. L'équation 1.1 permet de convertir l'irradiance absolue ($\mu W/cm^2/nm$) vers le PAR, il est

possible d'utiliser. L'irradiance absolue tient lieu de mesure standard fournie par les spectromètres (Ocean Optics Inc., 2005).

$$n_{photons} \int_{400}^{700} \frac{I * aire_{collection} * t}{E * A} \quad (1.1)$$

Où

I	Irradiance Absolue ($\frac{\mu Watts}{cm^2 \cdot nm}$)
Aire	Surface de collection du système (cm^2)
T	Temps d'intégration (secondes)
E	$\frac{Hc}{L}$
H	Constante de plank (6.626E-34 J*s)
c	Vitesse de la lumière (299792458 m/s)
L	Longueur d'onde du photon mesuré (nm)
A	Constante d'Avogadro (6.022 * 10 ²³) (mol ⁻¹)

Par la suite, une simple division de la superficie et du temps d'intégration permet de faire la transition du nombre de μmol de photon vers le PAR.

$$PAR = \frac{n_{photon}}{(aire_{collection} * t)} \quad (1.2)$$

1.3.2 Le rendement du flux de photons

Le par peut s'exprimer avec deux unités de mesures différentes soit :

- flux de photons photosynthétique (PPF);
- rendement de flux de photons (YPF).

Le PPF calcule tous les photons de 400 à 700 nm de manière égale, tandis qu'YPF prend en considération une plus grande plage de longueurs d'onde, soit entre 360 nm et 760 nm. Cette méthode permet d'appliquer une pondération en fonction de la longueur d'onde pour l'absorption d'énergie requise pour la photosynthèse (Barnes *et al.*, 1993). Le PAR exprimé en PPF ne distingue pas les longueurs d'onde différentes entre 400 nm et 700 nm et suppose que les longueurs d'onde à l'extérieur de cette plage n'ont aucun effet.

Pour atteindre le YPF, il faut connaître le flux de photons photosynthétique en fonction de la densité ou surface (PPFD) estimée en $\mu\text{mol/s}$ peut être modifiée en appliquant le facteur de pondération aux longueurs d'onde différentes. Cela aboutit à une quantité appelée le rendement de flux de photon (YPF) (Barnes *et al.*, 1993). La figure Figure 1.6 visualise la différence entre

le PPFD et le YPF au niveau de l'absorption. De plus, l'on observe les photons autour de 610 nm offrent la plus grande quantité de photosynthèse par photon.

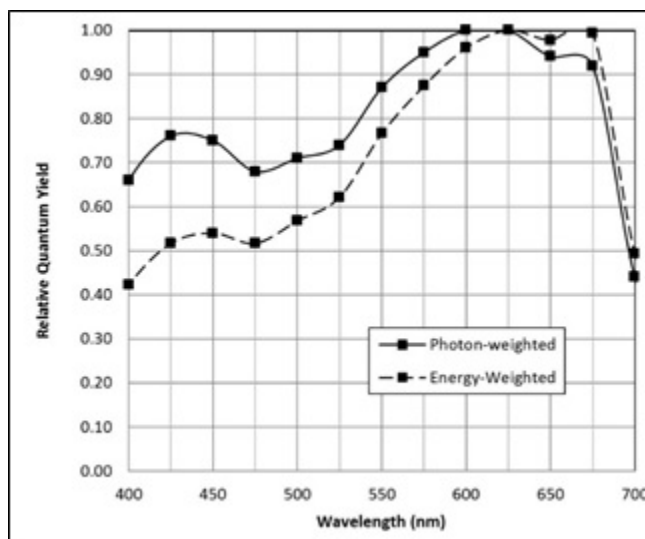


Figure 1.6 Comparaison du PPFD et du YPF
Tirée de Ashdown (2014)

Malgré la méconnaissance des effets que procure une lumière de qualité sur la croissance des plantes, une grande majorité de fabricants de luminaires proclament que cette croissance est due au ratio de couleurs émises (Nelson et Bugbee, 2014). L'évaluation de la qualité de la lumière permettant la génération de la photosynthèse vient de la courbe du YPF. Elle indique que les photons situés entre 600 et 630 nm (orange et rouges) peuvent générer entre 20 à 30 % plus de photosynthèse que les photons entre 400 et 540 nm (bleus ou cyans) (McCree, 1971). Finalement, certaines études proposent que la quantité de lumière soit plus importante que la qualité de la lumière (Tinoco-Ojanguren et Percy, 1995 ; Smart, Smith et Winchester, 1988 ; McCree, 1971).

1.3.3 La structure des feuilles

Le rayonnement capté par les feuilles est soit réfléchi, transmis ou absorbé. Le résultat dépend des propriétés de la feuille et du type de rayonnement. Le rayonnement le plus pertinent pour la photosynthèse se trouve dans la région du PAR, de 400 à 700 nm. Cette région se caractérise par une faible réflexion et transmittance due à une forte absorption par les pigments foliaires. Les pigments photosynthétiques prédominants se nomment chlorophylles A et B. Les chlorophylles extraites absorbent principalement la lumière aux intervalles violet-bleu et rouge, ce qui explique la couleur verte des feuilles. Les chlorophylles et autres pigments photosynthétiques, appelés pigments accessoires, se retrouvent dans les chloroplastes. Ces pigments comprennent divers caroténoïdes, tels que les pigments de bêta-carotène, de lutéine et de xanthophylle, qui absorbent particulièrement la lumière dans la région bleue (Kê, 2001). En raison de la présence de multiples pigments avec des spectres d'absorption superposés, l'identification et la quantification de ceux-ci dans une feuille intacte sont quasi impossibles. (Ustin *et al.*, 2009a ; Papageorgiou et Govindjee, 2004)

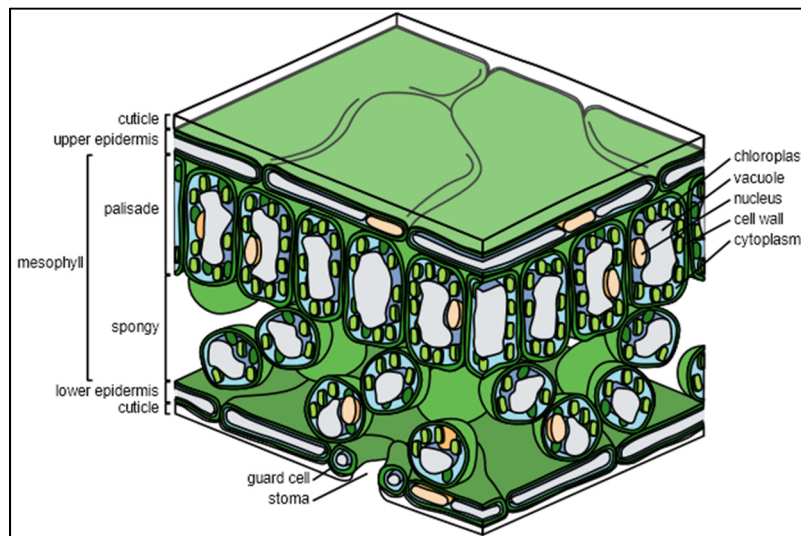


Figure 1.7 Illustration à grande échelle de la structure d'une feuille
Tirée d'un contributeur Wikipédia (2017)

La figure Figure 1.7 est une coupe transversale d'une feuille avec les principaux systèmes tissulaires présents. Les cellules épidermiques tapissent les surfaces supérieures et inférieures, protégeant celles internes de la mésophile. Il se forme souvent une membrane de cire à l'extérieur pour éviter la perte d'eau. L'épiderme inférieur est recouvert de pores appelés stomates qui contrôlent l'absorption du CO_2 et l'évaporation du H_2O . Le tissu de mésophylle contient les chloroplastes pour gérer la photosynthèse. Dans la plupart des plantes, la mésophile est divisée en couches. La couche de palissade supérieure d'une épaisseur d'une à deux cellules se compose de cellules allongées verticalement. La couche spongieuse est composée de cellules plus arrondies et moins serrées. Elle comporte plus d'espaces aériens et moins de chloroplastes par rapport à la couche de la palissade. (Walter-Shea et Norman, 1991).

1.4 La lumière naturelle

Depuis des millions d'années, les êtres vivants se sont acclimatés à leur environnement. Entre autres, ils se sont adaptés à l'énergie émise par le soleil pour en tirer le plus de bienfaits possible. Cette section abordera la revue de littérature sur les spectres solaires et le cycle circadien.

1.4.1 Notion d'illuminant

Un illuminant par définition est un spectre de lumière visible, qui est standardisé par la commission internationale d'éclairage (CIE) afin de permettre une comparaison de couleurs enregistrées sous différents éclairages. Cet élément de référence comprend les paramètres colorimétriques et le profil spectral de la lumière (internationale Beleuchungskommission, 2004).

1.4.2 Type d'illuminant

Les illuminants sont divisés en 6 catégories. Les trois premières catégories sont de type tungstène ou incandescent, celles-ci sont normalisées selon les illuminants « A », « B » ou « C ». La quatrième catégorie est nommée de série « F » (pour fluorescent) et est divisée en 12 sous-familles en fonction du type de phosphore utilisé. Il existe également l'illuminant de catégorie « E », qui est un illuminant strictement théorique. Finalement, la sixième catégorie d'illuminant est de type « D » et caractérise la couleur de la lumière du soleil (Danny Pascale, 2003).

Tableau 1.1 Illuminants classiques de la CIE
Tiré de Danny Pascale (2003) et Balázs Kránicz et János Schanda (2000)

Catégorie d'illuminant	Description	Température de couleur (°K)
A	Lampe tungstène, orangé pour éclairage domestique	2856
B	Lampe Tungstène, couleur lumière du soleil à midi	4874
C	Lampe Tungstène, couleur ciel nordique	6774
D	Lumière naturelle	5000 à 7500
E	Point blanc théorique	5454
F	Lumière fluorescent	2900 à 6500

1.4.3 Illuminant D65 : lumière au Zénit

Il est reconnu que le spectre du soleil change en fonction des saisons, de la position géographique et même du moment dans la journée. C'est pourquoi la CIE a émis des standards (illuminant) pour certains types d'éclairage ou même pour les types de lumière du jour. Dans ce mémoire, uniquement les illuminants de type « lumière du jour » seront abordés. À ce jour, l'illuminant nommé D65 représente le soleil de midi du nord de l'Europe de l'Ouest. Cela dit, en réalité, le D65 est uniquement virtuel, cet illuminant représente une moyenne de spectres (Schanda et International Commission on Illumination, 2007).

« [D65] is intended to represent average daylight and has a correlated colour temperature of approximately 6500 K. CIE standard illuminant D65 should be used in all colorimetric calculations requiring representative daylight, unless there are specific reasons for using a different illuminant. Variations in the relative spectral power distribution of daylight are known to occur, particularly in the ultraviolet spectral region, as a function of the season, time of day, and geographic location. »
(Standardization et Illumination, 1999)

Les illuminant D50, D55, D65 et D75 ont été fixés pour normaliser certains moments de la journée. Les illuminants sont faits en sorte que chaque longueur d'onde est un ratio par rapport à 555 nm (Wyszecki et Stiles, 2000). Cette longueur d'onde a été choisie, car pour l'œil humain, cette longueur d'onde est le point le plus sensible.

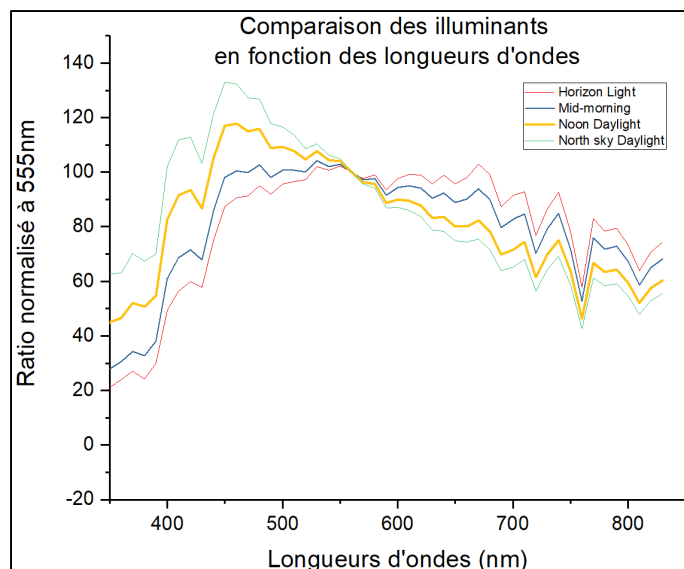


Figure 1.8 Comparaison des illuminants de type D
Adaptée de Wyszecki et Stiles (2000)

1.5 L'effet de la lumière chez les plantes

1.5.1 Le cycle circadien

Un cycle (ou rythme) circadien est une cadence biologique d'une durée d'environ 24 heures. Ce rythme veille-sommeil est le plus marquant dans nos vies. Il est présent chez la plupart des animaux, de même que chez les plantes. Au XVIII^e siècle, c'est l'astronome Jean Jacques d'Ortous de Mairan qui a mis en œuvre les recherches sur le cycle circadien des plantes. Il a utilisé des plantes de mimosa, déjà connues pour leurs feuilles thigmonaste qui se ferment la nuit et s'ouvrent le jour.

Le cycle circadien affecte le métabolisme de tout organisme vivant. En plus de leurs comportements et leur physiologie. Il a été démontré que la plupart des organismes vivants ne répondent pas au lever et au coucher du soleil, mais l'anticipe plutôt et se prépare en vue du changement (McClung, 2006). Cette horloge circadienne permet aux plantes de changer leur physiologie pour s'adapter à leur environnement et exécuter les processus biologiques les plus efficaces au bon moment dans la journée (Nohales et Kay, 2016).

Certaines études démontrent qu'en agriculture, l'altération de ce cycle affecte la santé et introduit des stress qui pénalisent la productivité de celles-ci (Sanchez et Kay, 2016). Les résultats de l'étude de Gessler *et coll.* démontrent que le cycle de veille (nuit) chez les plantes permet de s'ajuster et d'optimiser leur métabolisme pour la journée suivante (Gessler *et al.*, 2017).

Aujourd'hui, l'industrie de l'éclairage a pris un virage important avec la DEL : une grande quantité de fabricants de luminaires utilisent une approche spectrale limitée pour favoriser la croissance. Cette approche stipule que l'usage des longueurs d'onde favorisant l'absorption de la lumière associée à la photosynthèse permet une plus grande productivité (Kami *et al.*, 2010). Par contre, de plus en plus d'études démontrent que l'utilisation du vert permet une meilleure photosynthèse et permet une meilleure fixation du CO₂ (Sun, Nishio et Vogelmann, 1998 ; Terashima *et al.*, 2009).

Les couleurs vertes et jaunes pénètrent plus profondément à l'intérieur des feuilles en comparaison au bleu et au rouge. L'excédent de lumière verte est employé par les chloroplastes inférieurs de la plante. Ceci a pour conséquence de permettre aux plantes de mieux synthétiser la lumière en dessous des feuilles supérieures soit dans la canopée. Cette utilisation permet d'augmenter la photosynthèse à des niveaux beaucoup plus grands qu'avec l'utilisation unique de bleu et de rouge (Ptushenko *et al.*, 2015). La figure 1.5 démontre bien la nécessité des longueurs d'onde dans le bleu et dans le rouge pour le bon fonctionnement de la photosynthèse.

1.5.2 L'éclairage à large spectre

Pour les plantes qui poussent sur terre, la structure de leurs feuilles fait en sorte que la lumière bleu et rouge est absorbée en surface pour générer la photosynthèse due à l'absorbance de la chlorophylle. Étant donné que les longueurs d'onde vertes et jaunes peuvent transmettre à travers la chlorophylle et même toute la feuille elle-même, elles jouent un rôle crucial dans la croissance sous le couvert végétal. Parce que la lumière verte peut pénétrer plus loin dans la

feuille que la lumière rouge ou bleue (Terashima *et al.*, 2009). Avec une forte lumière blanche, toutes longueurs d'onde verte supplémentaire absorbée par les chloroplastes inférieurs permettent une augmentation de la photosynthèse des feuilles dans une mesure supérieure à celle de la lumière rouge ou bleue supplémentaire. En conséquence, la lumière verte est transmise plus profondément dans la feuille et est plus efficace que la lumière bleue ou rouge pour diriger la fixation du CO₂ sur les côtés abaxiaux (inférieurs).

Selon Hogewoning, les rayons verts sont physiologiquement importants et devraient être inclus dans les systèmes d'éclairage pour les plantes. De plus, avec l'avancement des connaissances quant à la réponse des plantes à la lumière, il est à prévoir que des systèmes d'éclairage artificiel évolueront pour émettre des spectres plus variés. Les plantes ont évolué sous la lumière du soleil depuis des millénaires et pour cette raison, elles peuvent utiliser la totalité du spectre du rayonnement solaire. De plus, Hogewoning mentionne une amélioration impressionnante de la croissance des plants de concombres illuminés avec une lumière artificielle à spectre quasi solaire par rapport à la croissance du plant de concombre lorsqu'il l'irradie avec des lampes au sodium fluorescentes ou à haute pression (Hogewoning *et al.*, 2010 ; Hogewoning *et al.*, 2012).

1.6 Spectrométrie

La spectroscopie est l'utilisation de lumière, de son ou de particules pour étudier la matière. Les émissions sont, dans de nombreux cas, capables de fournir des informations sur les propriétés de la question à l'étude. L'appareil utilisé pour une telle analyse est un spectromètre qui enregistre le spectre de la lumière émise (ou absorbée) par un matériau donné, en particulier dans les domaines de la chimie analytique et de la chimie physique, où la lumière peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une substance en raison des lignes spectrales de signature émises par des éléments connus. Historiquement, la spectroscopie était à l'origine de l'étude des interactions entre la radiation et la matière en fonction des longueurs d'onde (λ) (Douglas et Donald, 1971 ; Dybkær, 1968). Originellement, ce terme s'appliquait à la décomposition de la lumière visible émise (spectrométrie d'irradiation) ou absorbée

(spectrométrie d'absorption) par l'objet à étudier. Plus tard, le concept a été étendu pour comprendre toute mesure de quantité en fonction de longueur d'onde ou fréquence. Plus tard, la définition a ajouté la notion d'énergie (E) en tant que variable, une fois que la relation entre l'énergie et les photons a été découverte ($E = h\nu$ où h est la constante de Planck et ν est la fréquence en Hertz).

CHAPITRE 2

MATÉRIEL

2.1 Lampes

Trois types de lampes ont été employés dans le cadre de ce projet, chacune émettant des spectres différents. Les technologies utilisées sont :

- un fluorescent T8 dit horticole ;
- un fluorescent T8 de diodes électroluminescentes blanches à 3000K ;
- un luminaire à large spectre multi-DEL qui reproduit le spectre du soleil.

2.2 Fluorescent T8 horticole

Le système d'éclairage utilisé est une combinaison de deux fluorescents de type GRO-LUX de Sylvania, un modèle de « Gro-Lux » et un modèle « Gro-Lux wide Spectrum ». Les deux bulbes ont une consommation totale de 36W et offre $31 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2}$ à 30 cm. Les deux types de modèles ont été utilisés, car selon le fabricant, les deux modèles devraient être utilisés ensemble. La figure 2.1 donne la réponse spectrale du luminaire en fonctions des longueurs d'onde.

« GRO-LUX Aquarium lamps provide the right balance of red and blue wavelengths for low-energy plants such as house plants. High-energy plants such as vegetables seem to require more energy in the red portion of the spectrum. The GRO-LUX Aquarium Wide Spectrum lamps or a 50/50 mix of the two types of GRO-LUX lamps may produce the best results for the high-energy plants. » (OSRAM SYLVANIA inc., 2001)

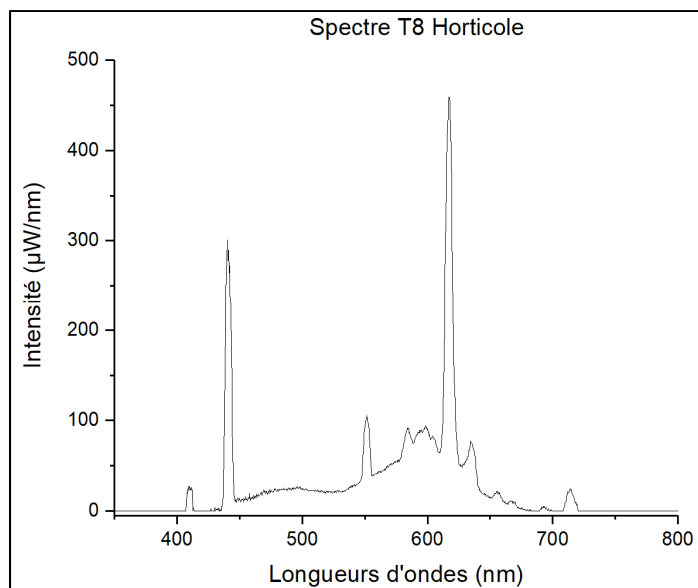


Figure 2.1 Réponse spectrale des T8-Horticole

2.3 Luminaire à DEL blanches

Le système d'éclairage à DEL blanches est un système utilisant un luminaire T8 identique au fluorescent horticole. Les deux bulbes ont une consommation totale de 36W, fournissant $50 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2}$ à 30 cm. La figure 2.2 donne la réponse spectrale du luminaire.

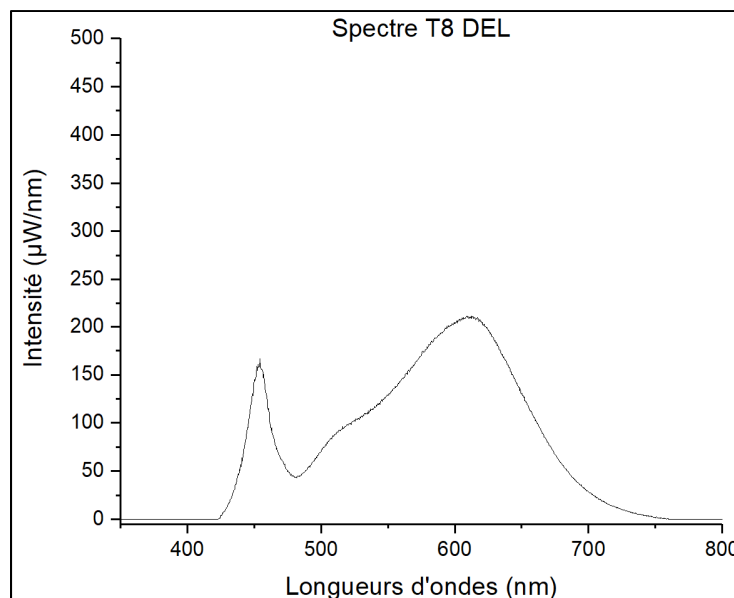


Figure 2.2 Réponse spectrale du T8-DEL

2.4 Luminaire multi-DEL

Le luminaire de la compagnie Sollum utilisé pour cette recherche est l'un de leurs prototypes permettant d'avoir un contrôle complet sur la plage de longueurs d'onde visibles. Le luminaire possède un total de 96 DEL. Chaque DEL possède 4096 plages d'intensités, ce qui permet des ajustements fins sur le spectre. La configuration utilisée pour les tests est celle d'un D65 modifié, c'est-à-dire que ses quantités de bleu et de rouge ont été augmenter. Cette modification vise à augmenter la photosynthèse des plants. La consommation électrique du luminaire est de 22W et fournis $67 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2}$ à 30 cm. La différence entre les spectres est minime, et l'ajout du bleu et du rouge ne se perçoit pas à l'œil nu, néanmoins, il est possible de bien distinguer le changement au niveau du spectre (voir figure 2.3). Pour cette recherche, Sollum a autorisé l'usage de photos et de graphiques tout en permettant l'utilisation de leur matériel. Le choix de ces lampes pour des fins de comparaison est dû au fait qu'elles sont uniques en leur genre et permettent de bien valider l'évolution technologique.

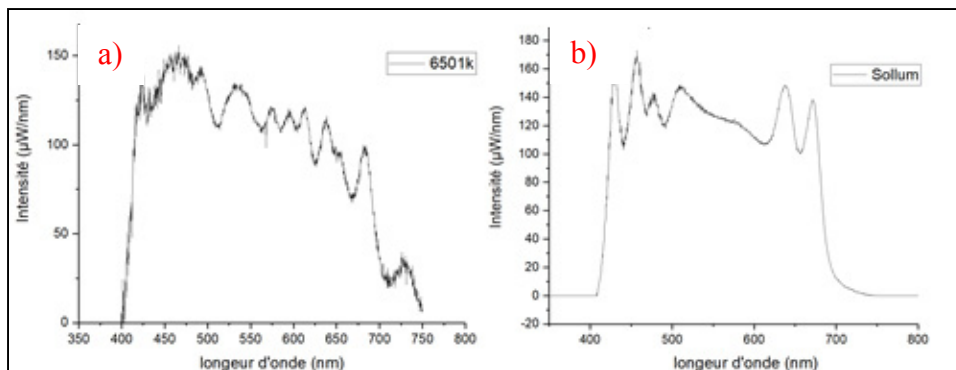


Figure 2.3 Comparaison du spectre initial versus le spectre utilisé pour les tests
 a) Spectre original D65 b) Spectre D65 modifié par ajout de bleu et rouge

La figure Figure 2.3 est une visualisation externe du prototype de Sollum technologies.

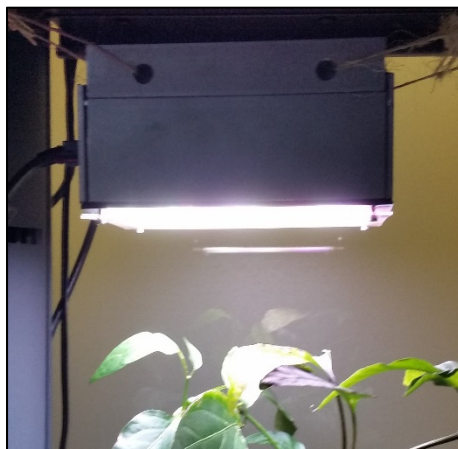


Figure 2.4 Visualisation du système complet

Dans le cadre de cette recherche, seulement l'unité lumineuse a été conçue afin d'obtenir une quantité lumière idéale. Pour le contrôle du luminaire, l'utilisation du système de contrôle propriétaire à Sollum a été utilisé. Elle a été spécialement conçue lors d'un stage dans l'entreprise pour tester l'effet d'un large spectre sur la croissance des plantes. Ce module comporte une multitude de DEL de longueurs d'ondes différente et de largeur spectrale variée. Ceci permet d'obtenir des résultats très précis et avec les caractéristiques nécessaires à cette recherche. Sollum Technologies est actuellement en instance de brevet pour ce type d'éclairage au niveau de la méthode de création de lumière naturelle et sur le contrôle de celle-ci.

2.5 Spectromètre

Pour mesurer la lumière émise par les systèmes d'éclairage, un spectromètre de marque « Ocean Optics » a été utilisé. Les mesures ont été acquises à l'aide du modèle Jaz. Ce spectromètre de haute qualité, et possède une sensibilité très élevée avec une plage dynamique dans le visible idéal pour les expérimentations (Ocean Optics Inc., 2017).



Figure 2.5 Photo d'un spectromètre Jaz

Pour les mesures, le spectromètre doit être configuré en fonction de l'application spécifique pour obtenir une performance optimale. Pour une bonne configuration, il est bon de connaître les bases de fonctionnement d'un spectromètre. Fondamentalement, la lumière entrante est diffractée par un réseau et ensuite concentrée sur un détecteur CCD, de sorte que les photons de longueurs d'onde différentes atteignent différents pixels (différent endroit sur le pixel). Chaque fois qu'un spectre est enregistré, le CCD est réinitialisé pour être ensuite exposé aux photons à nouveau. Ce laps de temps est appelé le temps d'intégration. Les photons frappent la surface du silicium du CCD et créent des électrons libres qui sont maintenus en place par une charge positive. Après le temps d'intégration, le convertisseur analogique recueille les électrons, mesure la tension et transforme l'intensité en code numérique, appelé compte. Le temps d'intégration est important pour la puissance du signal, ce qui affecte la qualité de la mesure. Un temps d'intégration long signifie que plus de photons sont collectés et le nombre de comptes devient plus grand. Dans le cas de cette recherche, le spectromètre a toujours été calibré avant chaque mesure ce qui permet une constance entre les mesures.

2.6 Enceinte de croissance

L'enceinte de croissance a été installée dans une chambre où la température peut suffisamment être contrôlée. Par contre, aucun contrôle sur l'humidité relative ambiante n'a été installé. L'enceinte a été divisée en trois sections pour éviter la pollution lumineuse entre les luminaires. Cette disposition permet de faire trois expérimentations en même temps avec les trois luminaires. En conséquence, ceci permet de soumettre les échantillons aux mêmes ambiances et uniquement changer un facteur.



Figure 2.6 Photo de l'enceinte vue de l'extérieur

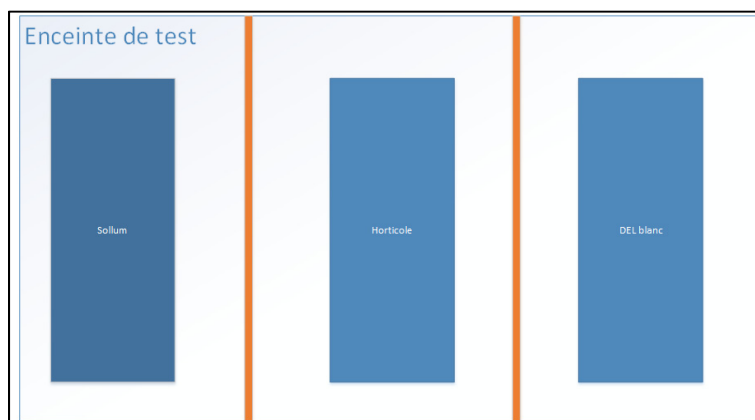


Figure 2.7 Schéma des divisions à l'intérieur de l'enceinte

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Afin de déterminer les caractéristiques de l'éclairage utilisé, les tests comparatifs se divisent en deux grandes sections, soit l'analyse spectrale et un protocole de croissance de plantes. Cela permet d'élaborer des bases connues pour l'analyse de la croissance et établir quel luminaire performe le mieux.

3.2 La comparaison des spectres

En comparant les spectres des systèmes d'éclairages, plusieurs différences sont observables. En premier lieu, le spectre du luminaire aux DEL blanches à une diminution d'énergie entre 450 nm et 550 nm soit vers la fin du bleu et le début du vert. Quant aux fluorescent horticoles, il est le seul à apporter une quantité d'énergie dans le violet, soit entre 400 nm et 410 nm. Le seul luminaire offrant une quantité d'énergie relativement complète dans le spectre du visible est le luminaire multi-DEL. Remarquons que le spectre du fluorescent horticole possède en majorité une couleur orange et une raie de bleu. La figure Figure 3.1 démontre bien les différences fondamentales entre les spectres des luminaires choisis.

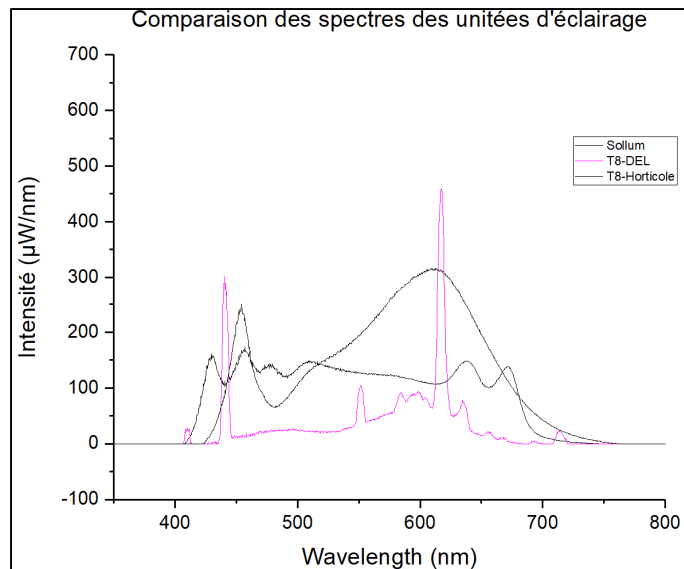


Figure 3.1 Superposition des spectres des luminaires testés

3.3 La comparaison spectrale

La problématique pour faire une comparaison spectrale de différents types de luminaire est que les spectres émis sont tous différents, par définition chacun émet une quantité d'énergie différente. C'est pourquoi cette étude s'est basée sur la norme E927-10 « Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing » de l'ASTM (« American Society for Testing and Materials »). Cette norme permet d'évaluer une source lumineuse en quatre différents tests, ce qui permettra de noter les luminaires et de les différencier. Le système d'attribution de notes retenu suit la classification de la norme. La figure Figure 3.2 le présente. Les quatre tests de qualification sont :

1. L'intégrale de recouvrement spectral ;
2. Le champ de vision des luminaires ;
3. L'uniformité spatiale de l'irradiance ;
4. La stabilité temporelle de l'irradiance.

TABLE 1 Classification of Small Area Simulator Performance			
Classification	Characteristics		
	Spectral Match to all Intervals	Spatial Non-uniformity of Irradiance	Temporal Instability of Irradiance
Class A	0.75 to 1.25	2 %	2 %
Class B	0.6 to 1.4	5 %	5 %
Class C	0.4 to 2.0	10 %	10 %

Figure 3.2 Tableau de classification en fonction des tests
Tirée de ASTM International (2015)

3.3.1 L'intégrale de recouvrement spectral

L'intégrale de recouvrement spectral est le rapport, calculé par intervalle de longueur d'onde, de la densité spectrale de l'irradiance d'un luminaire par rapport à celle d'un spectre de référence. Ce résultat permet de déterminer la conformité du spectre du luminaire. Le meilleur résultat possible est égal à 1. Dans ce cas-ci, les luminaires seront comparés aux illuminants D en fonction de leur CCT fourni par leurs fabricants. Donc les spectres des luminaires n'ont pas été comparés entre eux, mais par rapport au standard.

Tableau 3.1 Résumé des températures de couleurs de chaque luminaire

Luminaire	CCT (°K)
Horticole	4000K
DEL	3000K
Multi-DEL	6500K

Pour obtenir les spectres solaires en fonction d'un CCT, les calculs utilisés sont basés sur l'œuvre de Wyszecki (2000)

$$Daylight_{Spectrum}(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 * S_1(\lambda) + M_2 * S_2(\lambda) \quad (3.1)$$

Où

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703xD + 5.9114yD}{0.0241 + 0.2562xD - 0.7341yD} \quad (3.2)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424xD + 30.0717yD}{0.0241 + 0.2562xD - .7341yD} \quad (3.3)$$

Où

$$xD = \begin{cases} -4.6070 \frac{10^9}{CCT^3} + 2.9678 \frac{10^6}{CCT^2} + 0.09911 * \frac{10^3}{CCT} + 0.244063, CCT < 7000 \\ -2.0064 * \frac{10^9}{CCT^3} + 1.9018 * \frac{10^6}{CCT^2} + 0.24748 * \frac{10^3}{CCT} + 0.23704, CCT \geq 7000 \end{cases} \quad (3.4)$$

Les résultats sont émis par plage de 50 nm et sont numérotés en fonction de leur plage (voir Tableau 3.2) afin de permettre la comparaison. Seulement le spectre visible a été pris en considération. Les résultats ont ensuite été notés en fonction de la variation.

Tableau 3.2 Numérotation des plages

Bin	Etendue
1	[400 à 450] nm
2	[450 à 500] nm
3	[500 à 550] nm
4	[550 à 600] nm
5	[600 à 650] nm
6	[650 à 700] nm

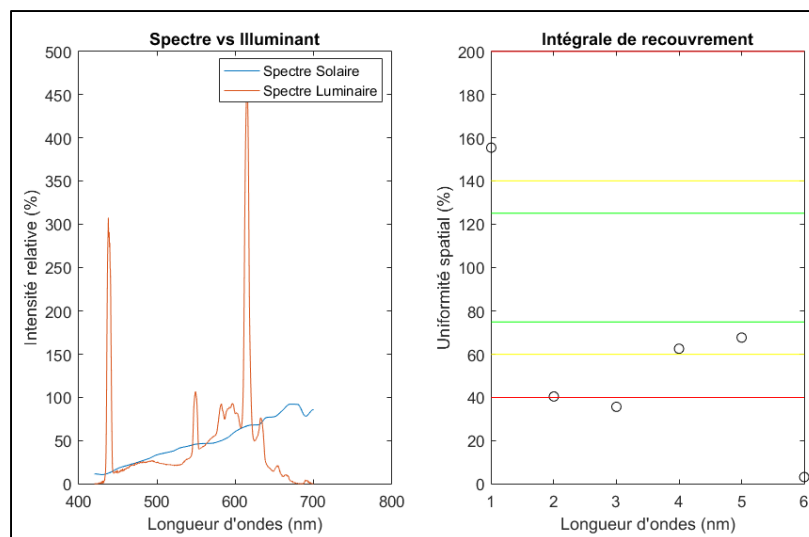


Figure 3.3 Intégrale de recouvrement spectral T8 horticole 4000k

Les résultats de l'intégrale de recouvrement démontrent une grande différence avec le spectre de référence. Par contre, l'erreur semble s'annuler et permet d'avoir des résultats relativement corrects. Ce qui est surprenant, lorsque la comparaison est uniquement visuelle

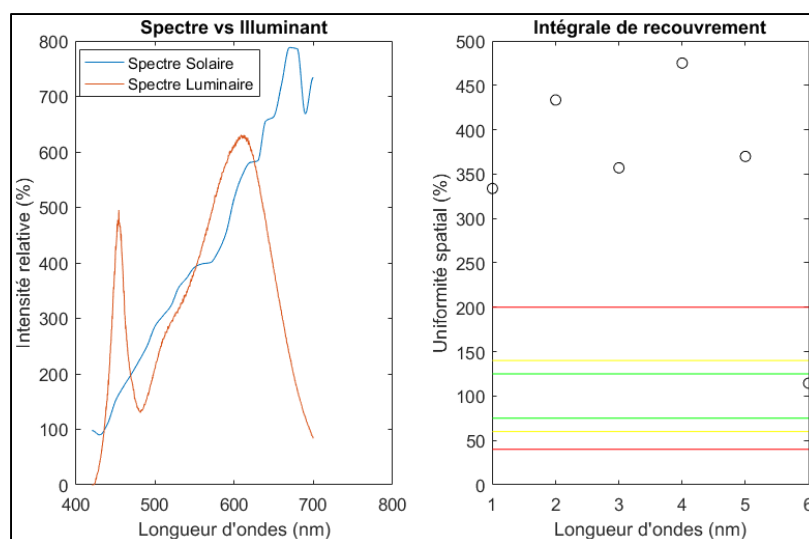


Figure 3.4 Intégrale de recouvrement spectral T8 Del 3000k

La figure Figure 3.4 donne un portrait de l'intégrale de recouvrement qui démontre une similarité avec le spectre de référence. Par contre, il est possible d'observer une erreur constante sur l'entièreté de la plage spectrale au niveau de la comparaison des spectres. Le

luminaire aux DEL ne concorde en aucun point à un spectre solaire. Ceci génère des résultats sortant de la plage de classification. Dans le cas de ce luminaire, un spectre solaire à 3000K a été utilisé pour comparaison et pour ce conformé à la donnée technique du fabricant.

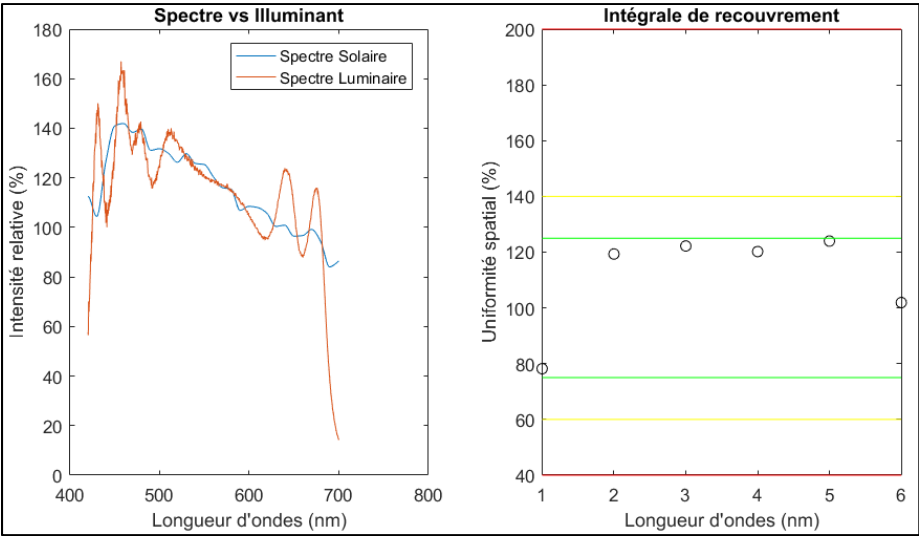


Figure 3.5 Intégrale de recouvrement spectral du luminaire multi-DEL 6500K

Les résultats de ce test démontrent que le luminaire multi-DEL offre une meilleure intégralité de recouvrement. Les systèmes d'éclairage horticole et à DEL, ne peuvent être classer, car ils dépassent les requis pour une classification C.

Tableau 3.3 Résultats du test d'intégrale de recouvrement spectral

Luminaire	Classe
Horticole	Hors classe
DEL	Hors classe
Multi-DEL	A

3.3.2 Champ de vision des luminaires

Le champ de vision permet de déterminer la qualité de la surface à éclairer par les luminaires. Par la suite, ces mesures seront utiles pour le calcul de l'uniformité spatiale de l'irradiance. Pour déterminer le champ de vue (FOV), la source lumineuse est fixée sur son côté le plus long, sur une table optique. Cette position permettra de prendre une mesure de l'angle de vue à la verticale. Ensuite, le détecteur est positionné à une distance fixe, dans ce cas-ci il est positionné à 30 cm. Cette distance est idéale pour avoir une mesure qui utilise le maximum de la plage dynamique du détecteur sans le saturer. Par la suite, les mesures sont prises à intervalles réguliers soit au 5 cm pour être en mesure de tracer l'angle de vue du luminaire. Après quoi, les mesures sont prises sur l'axe horizontal. Toujours selon la même procédure.

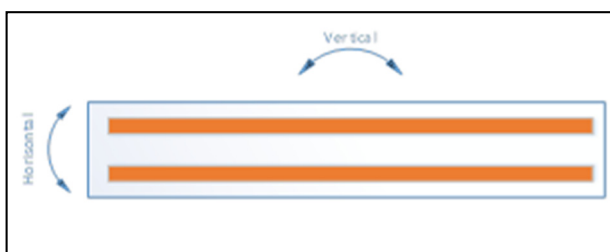


Figure 3.6 Définition des axes de vue d'un luminaire

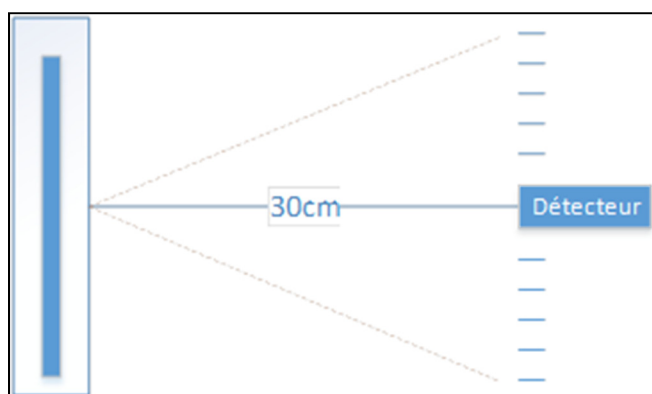


Figure 3.7 Schéma de montage pour les tests de champ de vue

La figure Figure 3.7 explique comment les mesures ont été acquises : un détecteur est disposé à 30 cm de la source d'éclairage et ensuite déplacé pour faire l'acquisition de la totalité de la

surface éclairée. L'acquisition des mesures a été faite à partir du centre jusqu'à une extrémité. Chaque déplacement est de 5 cm. Une fois complété, le détecteur a été repositionné au centre et ont été faites les mesures du centre jusqu'aux extrémités pour déterminer l'angle de vue total de la source.

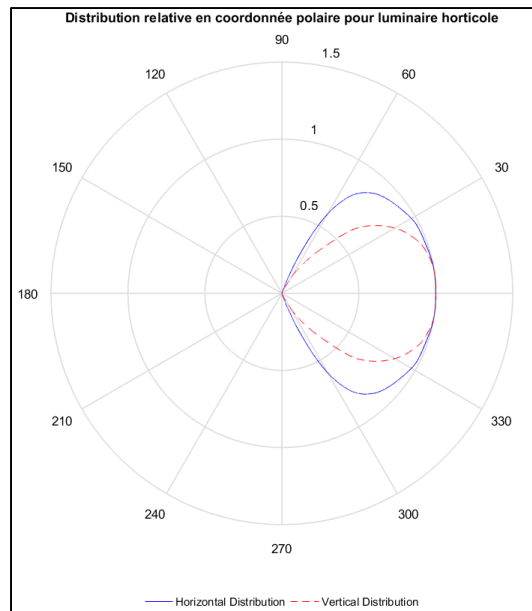


Figure 3.8 Angle de vue horizontal et vertical des T8 horticoles

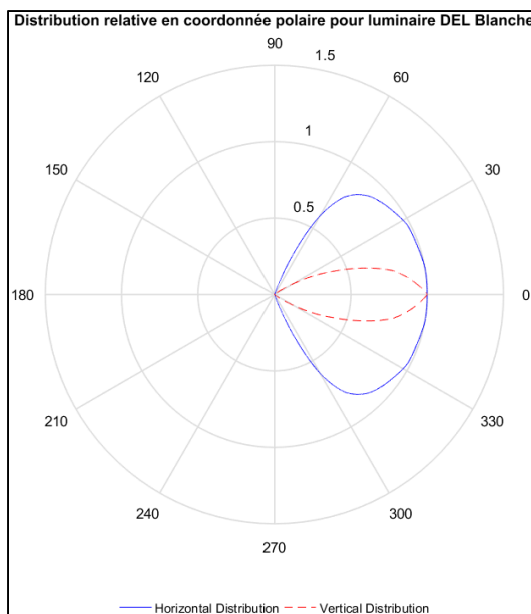


Figure 3.9 Angle de vue horizontal et verticale du luminaire à DEL blanches

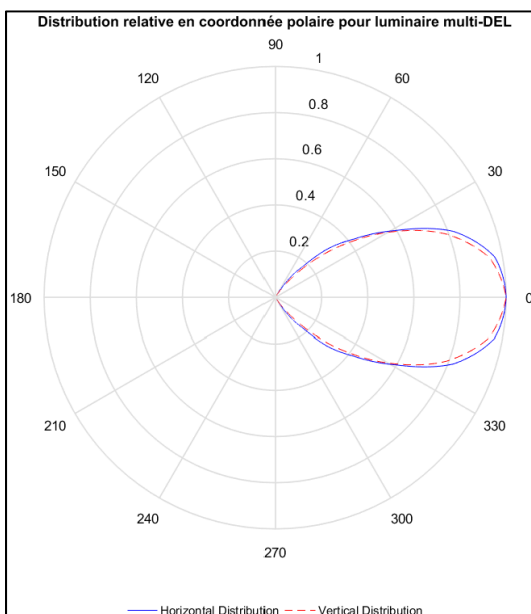


Figure 3.10 Angle de vue horizontal et vertical du système d'éclairage multi-DEL

Pour déterminer la surface d'éclairage des luminaires, il suffit de trouver le rayon en utilisant les données obtenues par les mesures précédentes. Les équations utilisées sont les suivantes.

$$Rayon = distance * \tan(angle_{FOV}) \quad (3.5)$$

Tableau 3.4 Résultats des angles de vue des luminaires

Luminaires	Diamètre horizontal (cm)	Diamètre vertical (cm)
Horticole	104.66	87.12
DEL	104.66	19.48
Multi-DEL	43.93	43.93

Après avoir obtenu le rayon de l'ellipse, il est possible de déterminer la surface totale éclairée par chaque luminaire (voir tableau 3.5). Les résultats démontrent une très grande disparité entre les sources d'éclairage. Cette différence influence le résultat du test suivant, soit l'uniformité spatiale.

Tableau 3.5 Résultats des surfaces d'éclairé par chaque luminaire

Luminaire	Surface (m^2)
Horticole	2.8644
DEL	0.6405
Multi-DEL	0.6062

3.3.3 L'uniformité spatiale de l'irradiance

Ce test vise à évaluer la surface éclairée des luminaires et à calculer l'uniformité de cette surface. Le système de classement est similaire à l'intégrale de recouvrement, soit avec des cotes A, B, C, hors classe. La méthodologie pour le calcul de l'uniformité spatiale est de calculer la surface pour chacune des classes et d'en faire la comparaison. La source ayant la plus grande surface uniforme sera considérée comme la meilleure. Le calcul de surface est basé sur les résultats obtenus dans la section précédente.

Tableau 3.6 Surface en (m²) par classe des luminaires

Luminaire	Horticole	DEL	Multi-DEL
A	0.0151	0.0031	0.0047
B	0.0315	0.0072	0.0085
C	0.1111	0.0267	0.0150

Les résultats démontrent que le T8 horticole offre une meilleure uniformité spatiale que le luminaire T8 DEL et multi-DEL. Le luminaire horticole offre une uniformité spatiale quatre fois plus grande que les nouvelles générations de luminaire. Ceci est dû au fait que les DEL émettent de façon directionnelle en comparaison du fluorescent qui illumine sur 360°.

3.3.4 La stabilité temporelle de l'irradiance

La stabilité temporelle vise à déterminer la stabilité de l'irradiance dans le temps. Cette mesure nous renseigne sur la variabilité temporelle. La variation la plus petite obtient le meilleur résultat. Les résultats obtenus pour chacun des luminaires sont très variés. La source multi-DEL se démarque des deux autres types de luminaires par plus d'un facteur 3. mille mesures ont été acquises sur une durée de 28 secondes, soit une mesure toutes les 2,8ms. Ceci permet de capter tous les types de variations temporelles. Pour la figure Figure 3.11, les lignes de couleurs signifient les classes, soit vert pour classe A jaune pour la classe B et rouge pour la classe C.

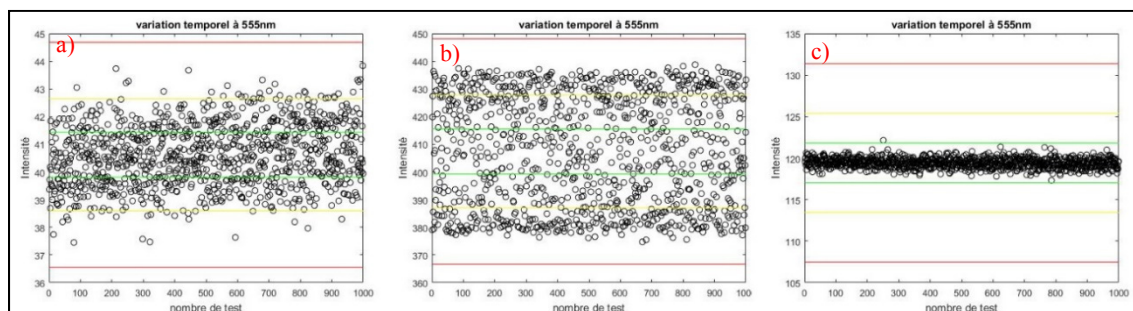


Figure 3.11 Comparaisons de l'uniformité temporelle pour le luminaire a) T8 horticole, b) T8 DEL, c) Multi-DEL

La figure Figure 3.11 expose les résultats. Une différence marquée peut-être constatée entre les sources d’éclairage. La source multi-DEL offre la plus petite variation temporelle d’irradiance. En comparant la densité des résultats, d’autres informations pertinentes ressortent. Les résultats des sources horticoles et multi-DEL suivent une tendance normale, ce qui démontre que la majorité des variations sont proches de la moyenne. Par contre, pour ce qui est du luminaire à DEL, la distribution est concentrée dans les extrémités. Ce qui avise d’une variation dans le temps très marquée et d’un manque de stabilité flagrant.

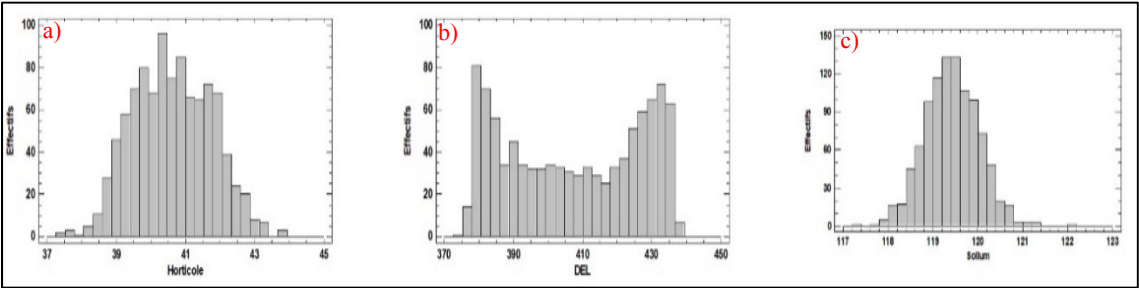


Figure 3.12 Distributions des résultats de variation temporelle
a) T8 horticole, b) T8 DEL, c) Multi-DEL

Finalement, en appliquant les pondérations de la norme E927-10, il est possible d’attribuer une cote pour chaque luminaire. En retirant les valeurs discrètes, hors normale, soit la donnée maximale et minimale, les variations ne changent pratiquement pas à l’exception du luminaire multi-DEL qui change de cote, passant de B à A (voir tableau Tableau 3.7 Pondération des sources lumineuses). Ce qui nous fait dire que la variation est plus importante sur les luminaires T8 horticole et DEL.

Tableau 3.7 Pondération des sources lumineuses

	Toutes les valeurs		Sans extremum		Variation
	Variation	Cote	Variation	Cote	Poucent
Horticole	7.86	C	7.71	C	0.9%
DEL	7.87	C	7.71	C	1.02%
Multi-DEL	2.01	B	1.49	A	14%

3.4 Résultats de la comparaison spectrale

Dans le but d'obtenir une note permettant de déterminer le meilleur luminaire en fonction des résultats obtenus avec leur spectre, la méthode mathématique d'analyse multicritère (AHP) a été utilisée. La méthode AHP est une méthode de prise de décision multicritère qui permet un certain taux d'inconsistance (car l'humain l'est souvent) (Saaty, 1990). Pour déterminer la pondération de chacun des tests, une note entre 1 et 9 priorise les critères d'évaluation. La figure 3.13 donne la pondération appliquée et la figure 3.14 donne les résultats de la pondération normalisée des critères ordonnancés en ordre de priorité. Pour cette étude, les mesures les plus importantes sont l'intégrale de recouvrement et la stabilité temporelle. Il est facile d'expliquer ce résultat, car l'étude porte sur la caractérisation du spectre plus que sur la surface d'éclairement.

	Intégrale d	Champ de	Uniformité	Stabilité te
Intégrale de recouvrement		7.0	5.0	1.0
Champ de vision			3.0	7.0
Uniformité Spatial				3.0
Stabilité temporelle	Incon: 0.02			

Figure 3.13 Détermination de la pondération

Intégrale de recouvrement	1.000	
Stabilité temporelle	.865	
Uniformité Spatial	.275	
Champ de vision	.117	
Inconsistency = 0.02 with 0 missing judgments.		

Figure 3.14 Résultats normalisés de la priorisation des critères d'évaluation pour déterminer le meilleur luminaire au niveau spectral

En se basant sur les résultats de la figure 3.15, le résultat final démontre que la dernière génération de luminaire soit les sources d'éclairage à large spectre multi-DEL surpasse la génération précédente à près de 50 % de plus. Par contre, un fait intéressant à noter est que selon ces tests et pondérations, le luminaire horticole (plus vieille génération) semble surpasser les T8 à DEL.

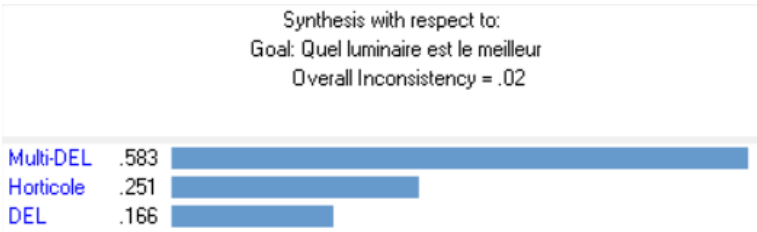


Figure 3.15 Résultats pondérés des tests spectraux en fonction des luminaires

La figure 3.16 permet de visualiser quel luminaire est le meilleur en fonction des critères des tests. L’intégrale de recouvrement et la stabilité temporelle le luminaire multi-DEL est le meilleur choix. Cependant, si le choix se faisait uniquement sur-le-champ visuel et l’uniformité spatiale, le luminaire horticole serait le meilleur choix. En conclusion en aucun cas le luminaire à DEL blanches n’est pas un choix à prendre.

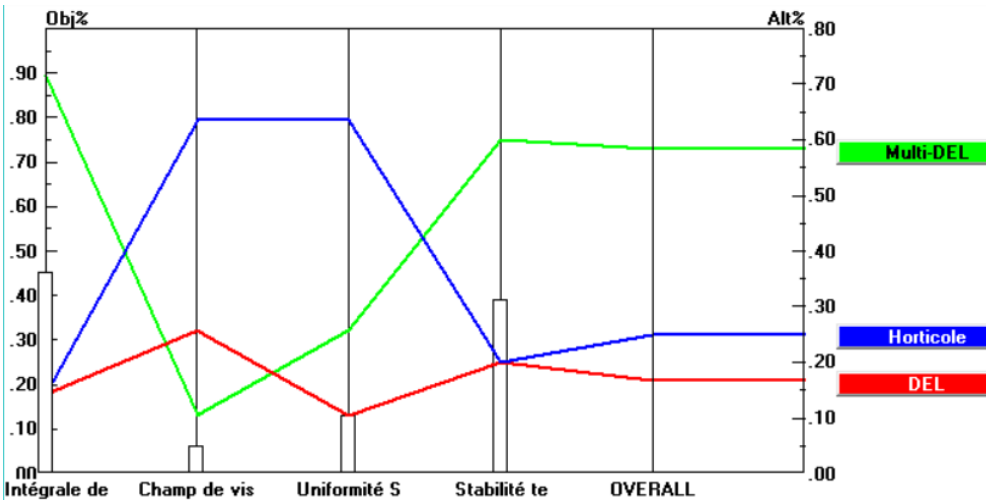


Figure 3.16 Choix du meilleur luminaire en fonction des critères de tests

De plus, pour valider cette méthodologie, il est possible d’analyser le rendement de chacun des luminaires pour confirmer la méthodologie. L’analyse de rendement se fait par la quantité d’éclairement divisé par la puissance dégagée comme l’équation 3.6

$$\text{rendement} = \frac{\text{PPFD} * \text{Surface}}{W} = \frac{\mu\text{mol}}{W * s} = \frac{\mu\text{mol}}{J} \quad (3.6)$$

Les résultats de rendement sont affichés dans le tableau Tableau 3.8. Les résultats de rendement corroborent les résultats obtenus avec le processus d'analyse hiérarchique.

Tableau 3.8 Rendement des luminaires

Luminaire	Rendement
Horticole	1.233
Del Blanche	0.88
Multi-Del	2.07

3.5 La croissance des plantes

3.5.1 Le type de plante

Les tests comparatifs sont effectués sur 5 types de fines herbes différents pour être en mesure de faire une étude comparative et permettre d'arriver à des conclusions pertinentes. Ces types de plantes ont été utilisés, car, dans l'agriculture de serre en endroit confiné (conteneur). Ces espèces de plantes sont les plus fréquentes. De plus, elles offrent une croissance rapide, ce qui permet une itération plus rapide si des problèmes survenaient.

Il est possible de voir que les plantes ont toutes environ le même temps de croissance avant maturité ce qui facilite la comparaison. De plus, les paramètres d'éclairage et d'humidité sont sensiblement les mêmes, ce qui permet d'utiliser uniquement un système de croissance avec les mêmes paramètres.

Les fines herbes utilisées sont :

Tableau 3.9 Détail des plantes utilisé pour l'expérimentation

Nom Commun	Nom Complet	Éclairage	Humidité Relative	Temps de Croissance
Basilic	Ocimum basilicum	>150 μ Mol	65-80%	68 jours
Menthe	Mentha arvensis	>150 μ Mol	65-80%	80 jours
Coriandre	Coriandrum sativum	>150 μ Mol	65-80%	80 jours
Laitue frisée	Lactuca sativa	>150 μ mol	65-80%	50 jours
Ciboulette	Allium schoenoprasum	>150 μ Mol	65-80%	39 jours

3.5.2 Le protocole de germination

Le plan de germination utilisé pour démarrer les semis est basé sur le croisement de la méthodologie de W.H.Perron, 2017 et Conn *et al.*, 2013. Le protocole de germination est nécessaire pour faire pousser des semis ayant des caractéristiques semblables pour s'assurer de la validité de la comparaison par la suite sur la croissance. Lors de la phase de germination, un suivi journalier a été fait pour s'assurer du taux d'humidité des plants. Soit en moyenne un arrosage de 100 ml par bac de germination par jour.

La germination se fait selon les étapes suivantes :

1. Le choix des graines ; premier tri à sec ;
2. Recouvrir les graines d'eau dans un bocal en verre ;
3. Le trempage ; le temps varie selon les types de graines (exécuter un 2e tri) ;
4. Rincer, puis incliner le contenant pour permettre un bon drainage ;
5. Recouvrir le contenant d'un linge sec (jusqu'à l'apparition du germe) ;
6. Arroser ;
7. Étendre sur un plateau de terre (cabaret de cafétéria avec un peu de terre) et les asperger d'eau à l'aide d'un vaporisateur ;
8. Recouvrir le plateau à l'aide d'un autre plateau (pour conserver l'humidité) ;
9. Vérifier régulièrement pour s'assurer de conserver une bonne humidité (faire attention de ne pas mettre trop d'eau).

3.5.3 Plan de Suivis de Croissance

Pour assurer la prise de données efficace et permettre d'avoir des données pertinentes, la prise de mesures se fait en moyenne tous les 3 jours. L'irrigation des plantes est contrôlée à 25ml/plant, sans aucun ajout de pesticide. La période de germination est de 10 jours. Les mesures ont été prises en trois phases. Chaque mesure de croissance d'une population est faite sur trois répliquas de 18 plants et est évaluée pour chacune des espèces. Par souci de consistance, les résultats des deux plants ayant les résultats les plus élevés et les deux plants ayant les résultats les plus faibles n'ont pas été pris en compte dans les calculs. Par la suite, une moyenne a été appliquée sur les 14 plants restants. L'expérimentation a été répliquée à trois reprises sur une durée de 34 jours. Pour le plant de jalapeños, le plan a été soumis à une irrigation hebdomadaire de 400 ml, sans ajout de pesticide. Pour cette phase expérimentale, les mesures de la longueur et de la largeur de chaque fruit ont été prises chaque jour.

3.5.4 Le Régime d'éclairage

Le but de la recherche est de faire la comparaison des types d'éclairage horticoles pour faire la comparaison de la croissance des plantes exposées. Le régime d'éclairage utilisé pour cette recherche est basé sur une photopériode de 16h. Cette ration d'éclairage est fortement utilisée dans l'industrie et est considérée comme une norme (Conn *et al.*, 2013 ; Hung *et al.*, 2015).

3.5.5 La caractérisation des plants

Pour évaluer la croissance des plantes, plusieurs mesures différentes ont été faites sur les plants. Ceci permet de bien évaluer l'influence de la lumière sur les diverses parties de la plante. L'unité de mesure est le (mm). Les mesures acquises lors des expérimentations sont :

- la hauteur, qui est mesurée entre la base du plant (niveau du terreau) et le dessus de la tige la plus haute;
- la croissance, qui est différence entre la mesure actuelle du plant par rapport à la hauteur datant de la dernière mesure;

- la largeur des feuilles, qui se prend à l'endroit où la feuille est le plus large;
- la largeur des feuilles, qui est mesurée sur le pétiole à partir du début du limbe jusqu'à l'apex de la feuille;
- la vigueur , qui est mesurée par le diamètre du tronc principal de la plante.

Pour ce qui est du plant de Jalapeño uniquement la croissance des fruits ont été enregistré pour le diamètre et la longueur.

3.5.6 Photo des plants

La prise de photos est une approche simple et couramment utilisée pour permettre la comparaison physique des plantes qui ont été traitées différemment. Pour cette étude, deux moments ont été pris pour une comparaison soit à la sortie de la phase de germination et à la fin de la période de croissance des plants. Les plants ont été photographiés pour une comparaison visuelle. La figure Figure 3.17 Comparaison visuelle entre deux plants montre un exemple de l'analyse visuelle des plants lors des prises de mesures.



Figure 3.17 Comparaison visuelle entre deux plants

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Résultats de croissance des plantes

Les résultats de croissance résument l'évolution des plants lors des trois expérimentations. Par contre, il est à noter que lors de la première expérimentation, un dysfonctionnement du système d'enrichissement au CO₂ au jour 25 a entraîné une sénescence des plants. Les résultats de la première expérimentation se terminent donc à 24 jours de croissance. À partir du 24^e jour, les graphiques présentent une moyenne des deux dernières expérimentations plutôt que des trois.

4.1.1 Les plants de basilic

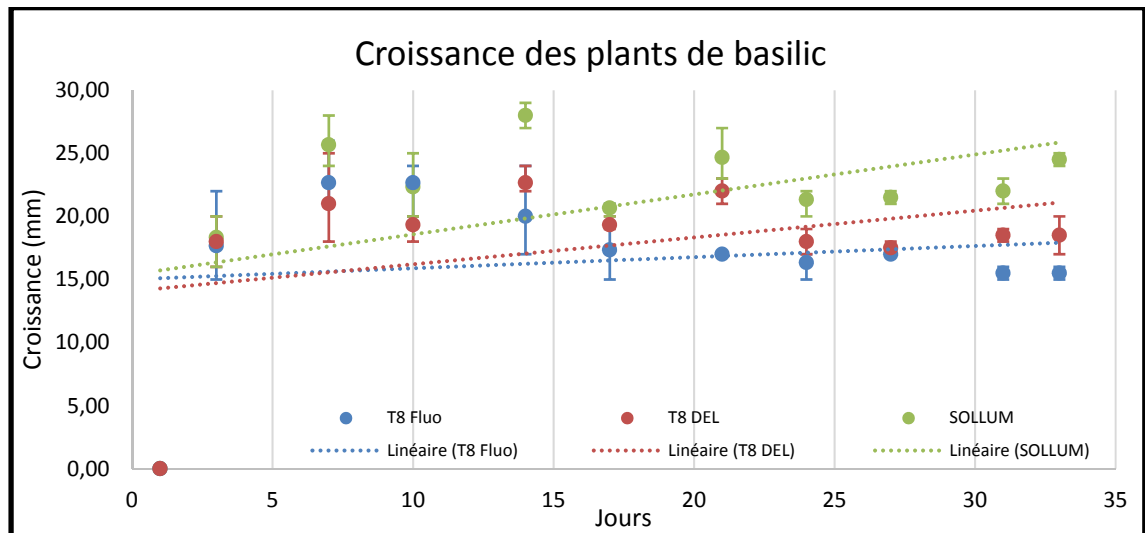


Figure 4.1 Variation dans le temps de la croissance des plants de basilic en fonction de chaque luminaire

La figure Figure 4.1 permet de comparer la croissance des plants de basilic, et de constater que le luminaire multi-DEL offre un meilleur rendement au niveau de la croissance des plants.

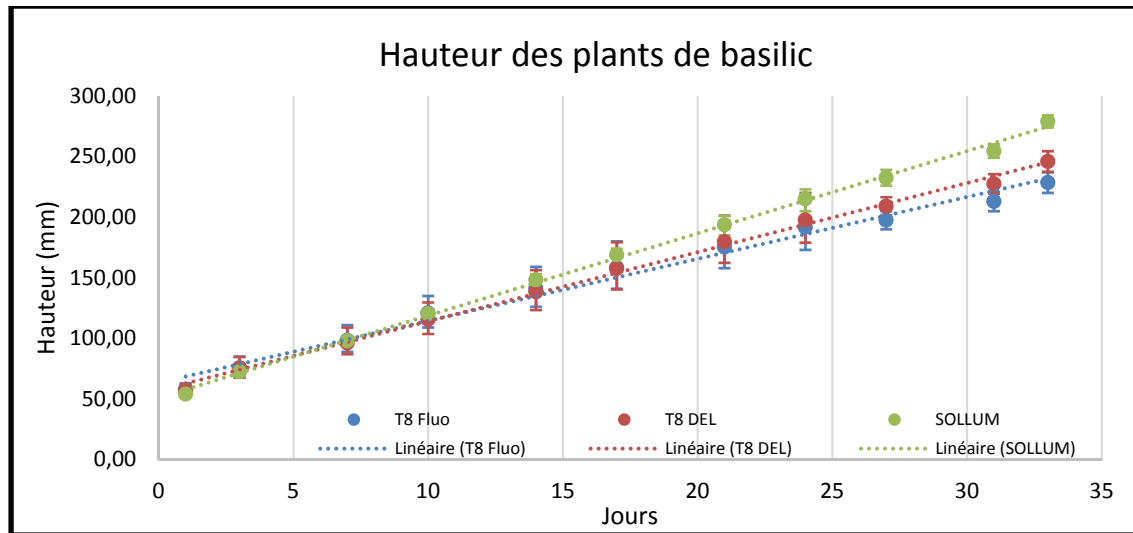


Figure 4.2 Variation dans le temps de la hauteur des plants de basilic en fonction de chaque luminaire

La hauteur des plants est linéaire et constante sous les trois types d'éclairage. Par contre, le système multi-DEL offre une croissance plus marquée de 6 % par rapport à la croissance du T8 DEL.

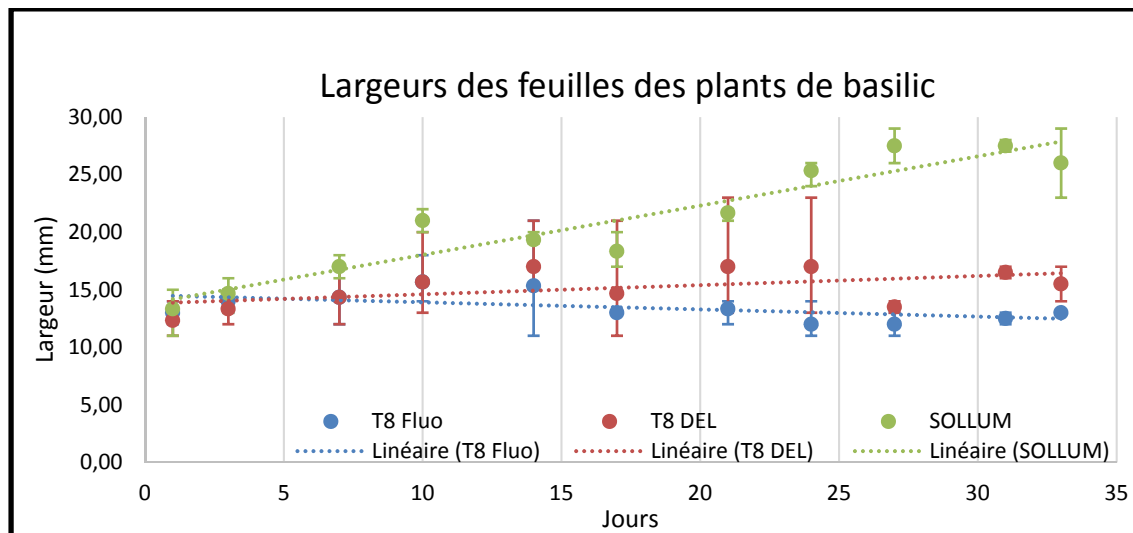


Figure 4.3 Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de basilic en fonction de chaque luminaire

Les résultats illustrés à la figure 4.3 montrent une forte croissance de la largeur des feuilles par le luminaire multi-DEL par rapport aux deux autres luminaires.

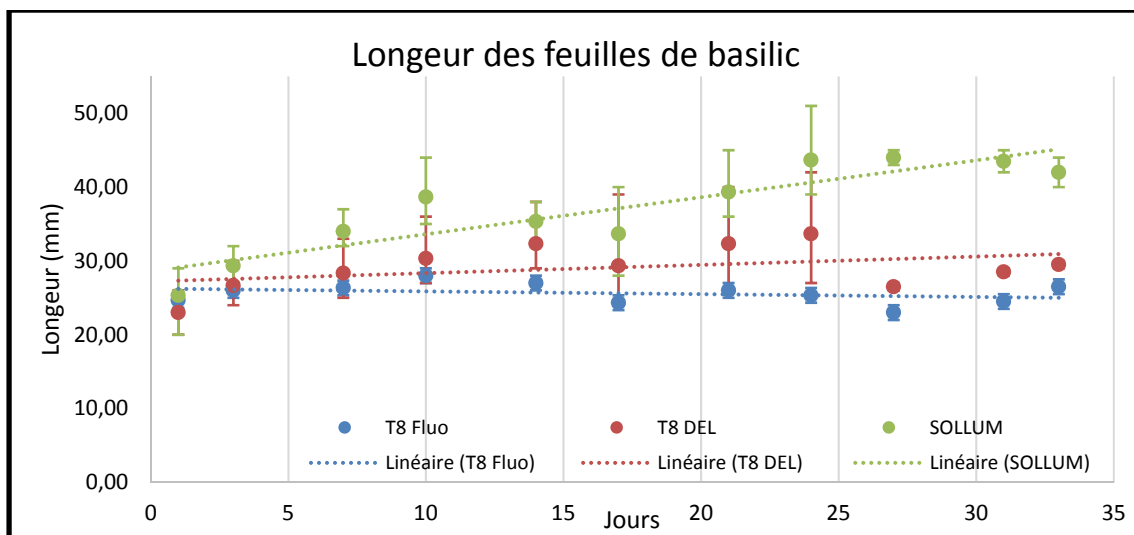


Figure 4.4 Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de basilic en fonction de chaque luminaire

Pour ce qui est de la grandeur des feuilles de basilic en longueur et en largeur, le luminaire de multi-DEL offre le meilleur rendement.

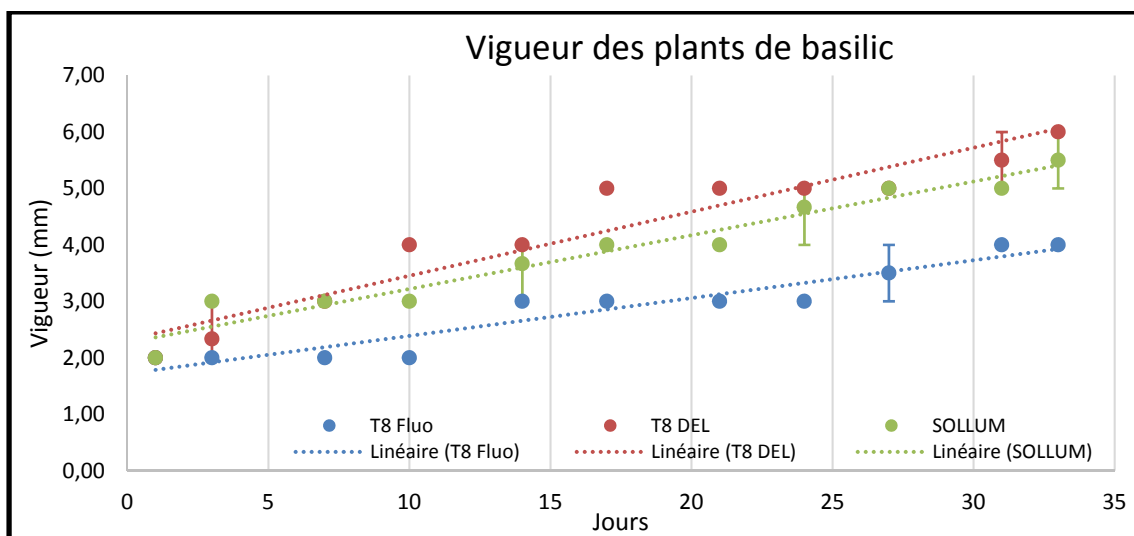


Figure 4.5 Variation dans le temps de la vigueur des plants de basilic en fonction de chaque luminaire

Pour ce qui est de la vigueur, le système d'éclairage aux DEL blanches offre le meilleur rendement.

4.1.2 Les plants de menthe

En ce qui concerne les plants de menthe, le luminaire multi-DEL domine tous les types de mesures.

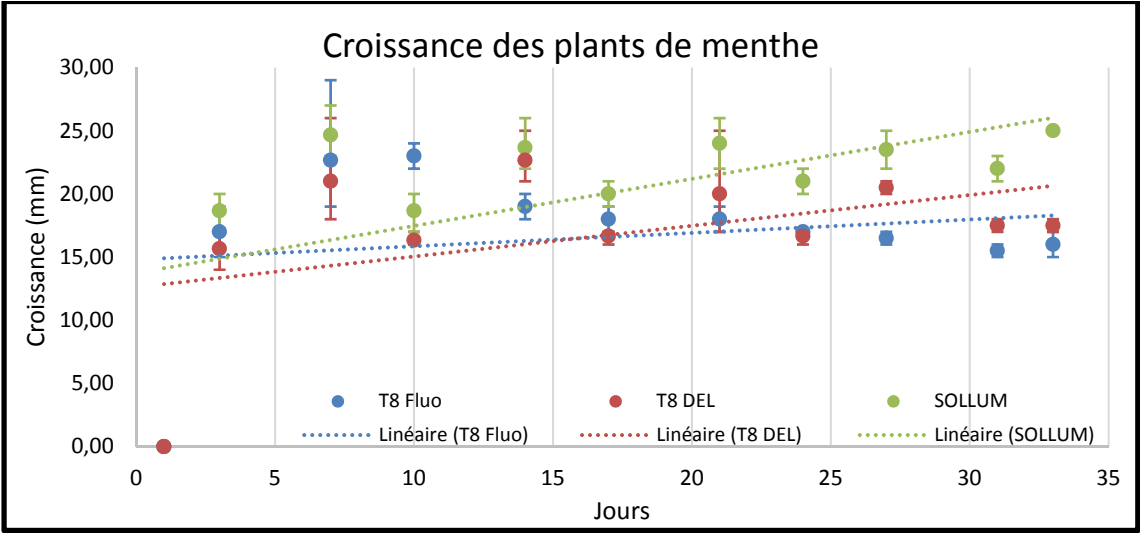


Figure 4.6 Variation dans le temps de la croissance des plants de menthe en fonction de chaque luminaire

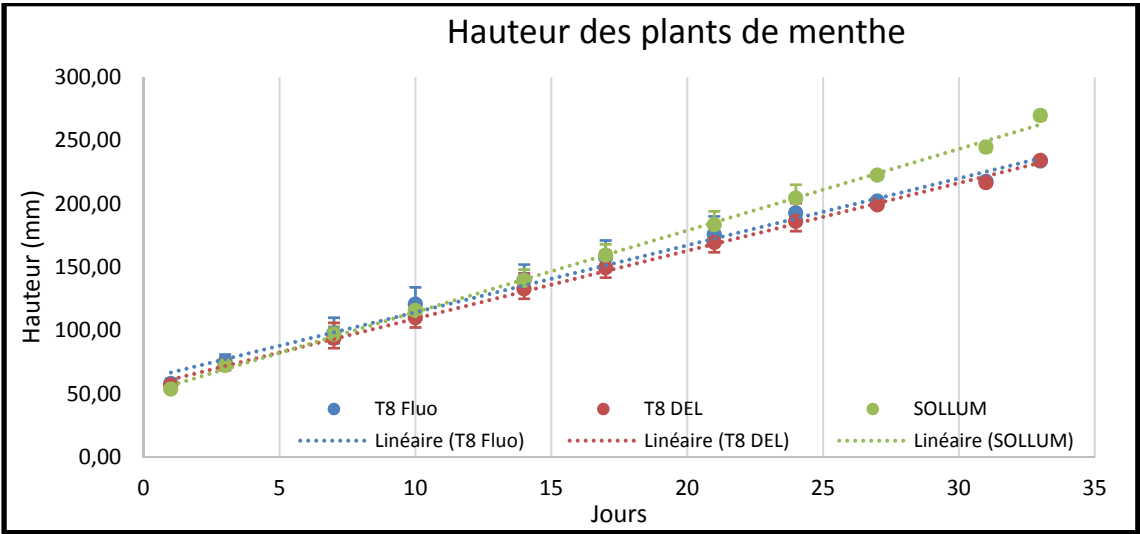


Figure 4.7 Variations dans le temps de la hauteur des plants de menthe en fonction de chaque luminaire

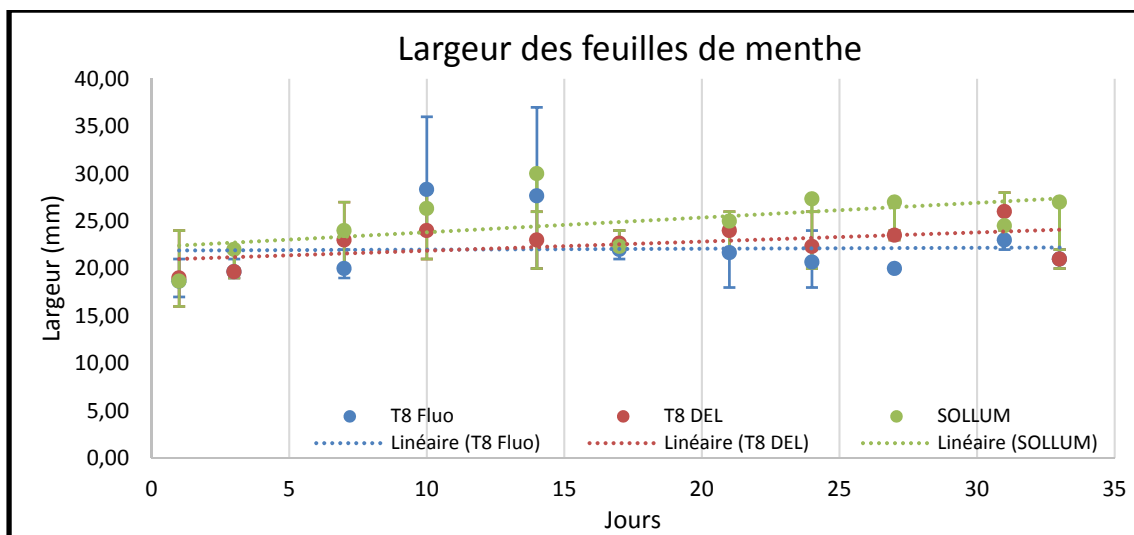


Figure 4.8 Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de menthe en fonction de chaque luminaire

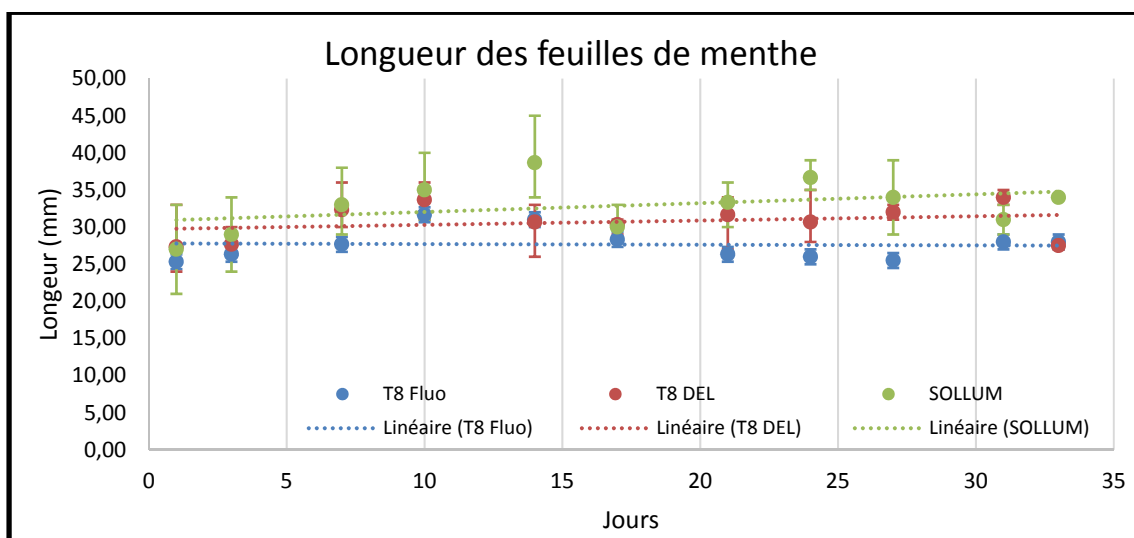


Figure 4.9 Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de menthe en fonction de chaque luminaire

Il est à noter que pour la largeur et la longueur des feuilles de menthe, aucun luminaire ne se démarque considérablement.

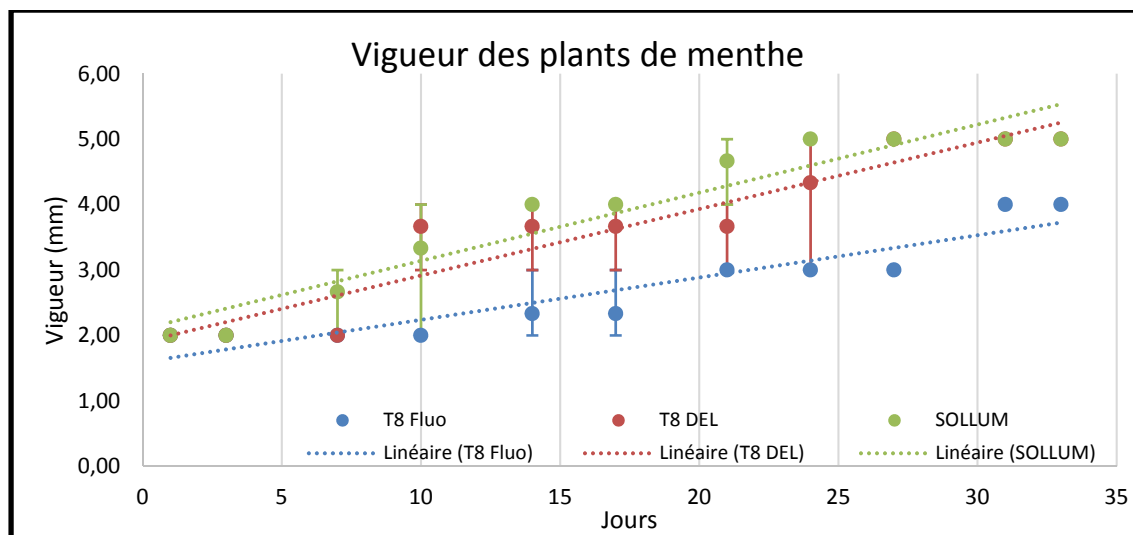


Figure 4.10 Variation dans le temps de la vigueur des plants de menthe en fonction de chaque luminaire

La figure 4.10 montre une vigueur accrue des plants de menthe avec le luminaire multi-DEL en début d'expérimentation, mais au bout des 34 jours, les résultats sont presque les mêmes.

4.1.3 Les plants de coriandre

Tout comme les plants de menthe, les plants de coriandre suivent la même tangente de croissance.

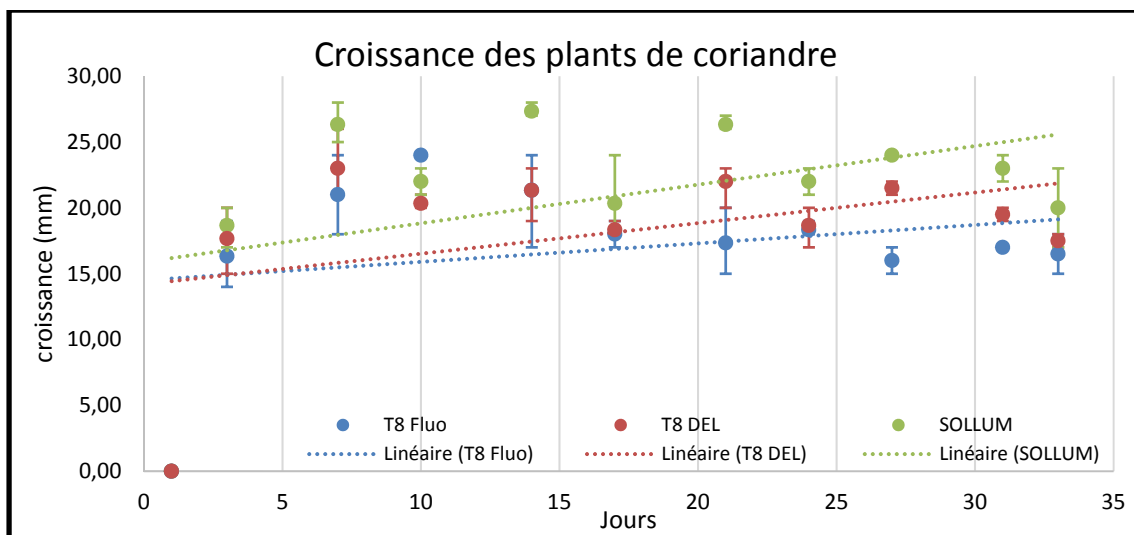


Figure 4.11 Variation dans le temps de la croissance des plants de coriandre en fonction de chaque luminaire

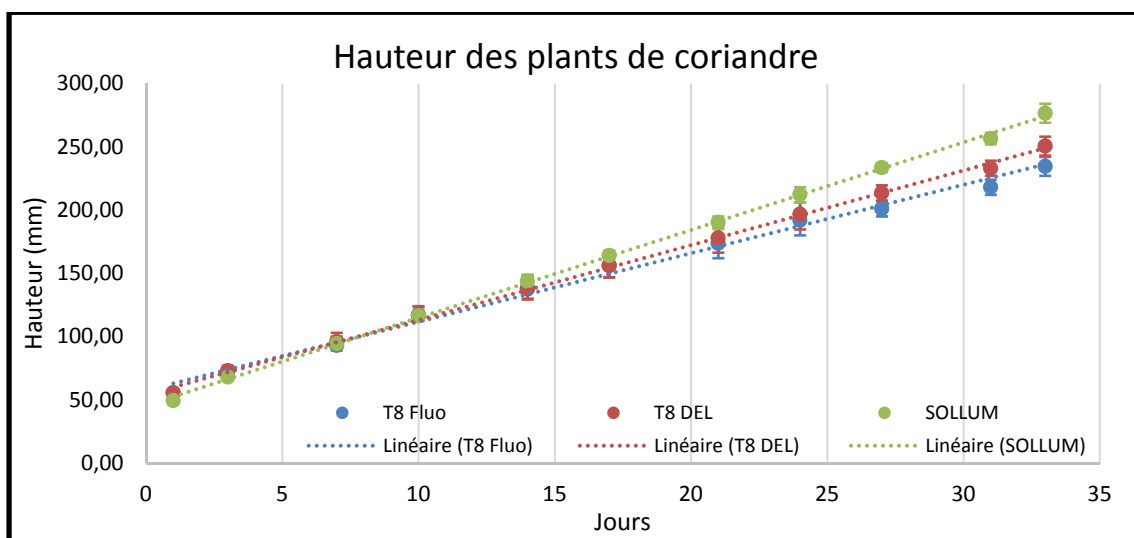


Figure 4.12 Variations dans le temps de la hauteur des plants de coriandre en fonction de chaque luminaire

En ce qui concerne la hauteur des plantes de coriandre, la figure 4.12 expose une meilleure croissance des plants avec le luminaire multi-DEL.

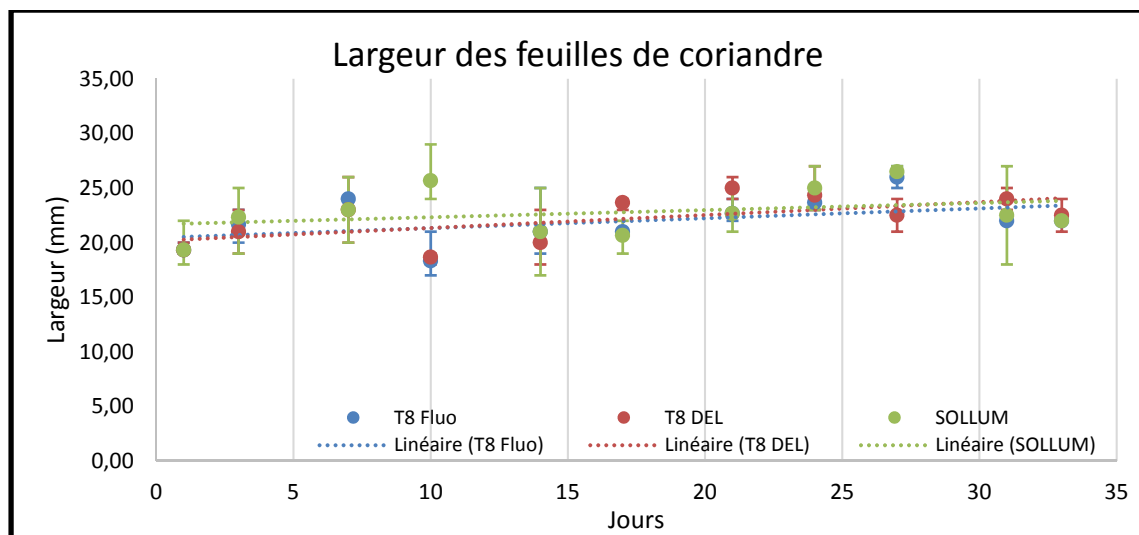


Figure 4.13 Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de coriandre en fonction de chaque luminaire

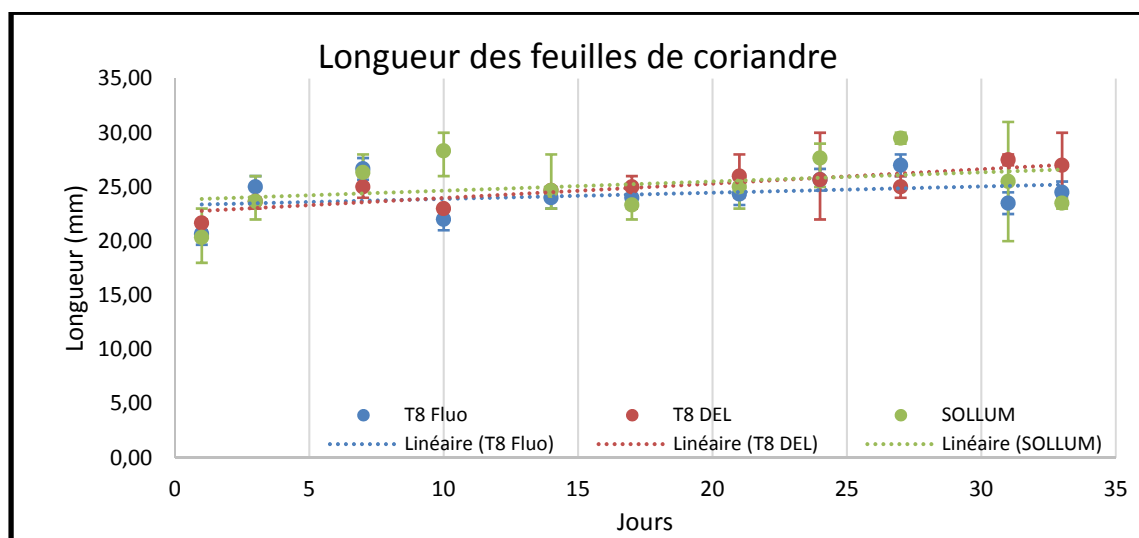


Figure 4.14 Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de coriandre en fonction de chaque luminaire

Tout comme la menthe, en se basant sur la figure 4.13 et figure 4.14, la croissance des feuilles de la coriandre ne semble pas changer en fonction du luminaire.

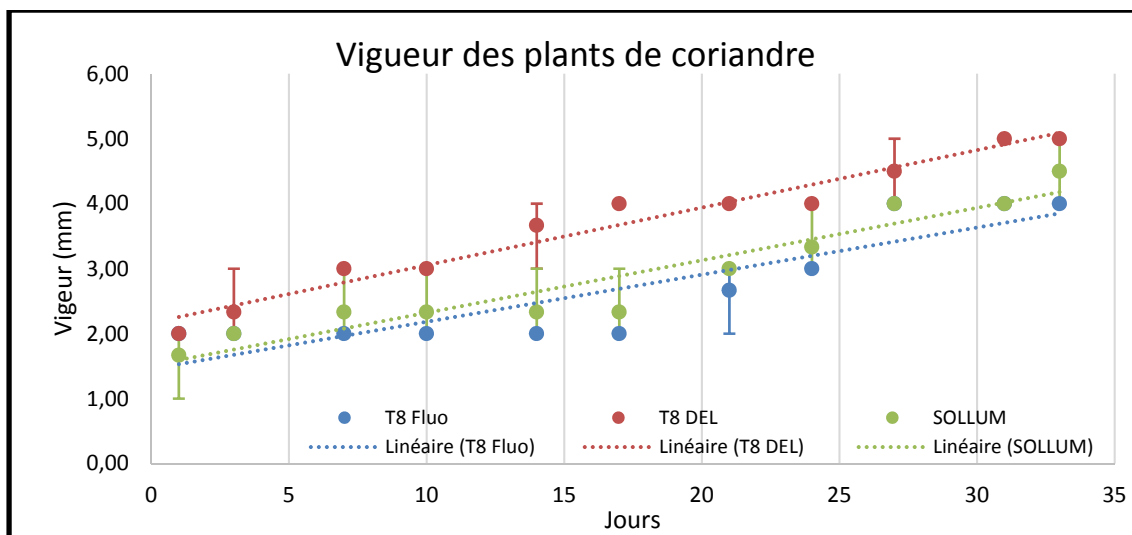


Figure 4.15 Variation dans le temps de la vigueur des plants de coriandre en fonction de chaque lumineaire

La figure 4.15 démontre que tout comme le plant de menthe le luminaire à DEL favorise plus la vigueur des plants.

4.1.4 Les plants de laitue frisée

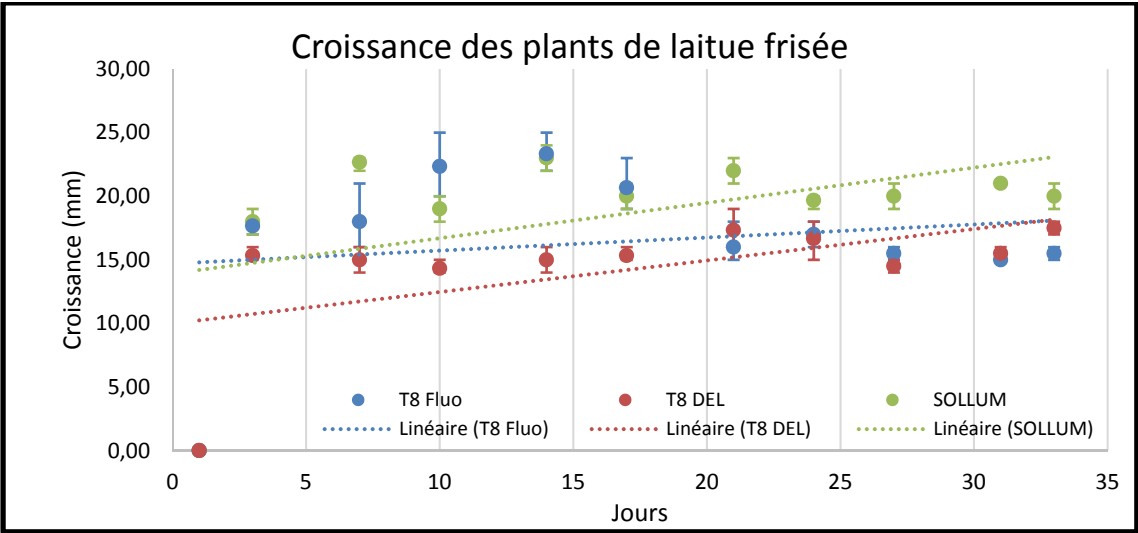


Figure 4.16 Variation dans le temps de la croissance des plants de laitue frisée en fonction de chaque luminaire

En se basant sur le graphique de la figure Figure 4.16, l'on remarque que la croissance est constante avec les trois luminaires.

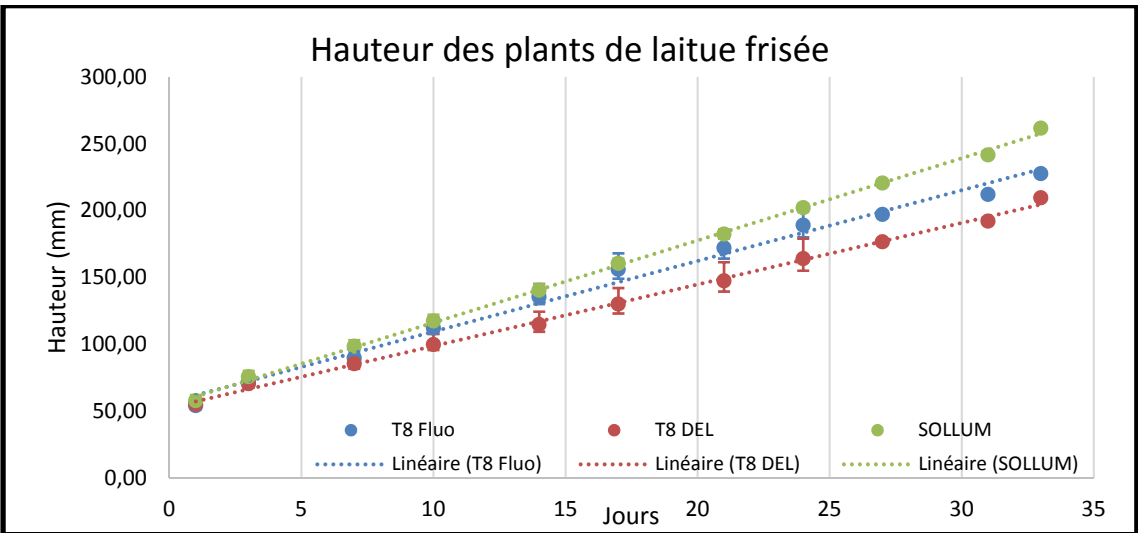


Figure 4.17 Variations dans le temps de la hauteur des plants de laitue frisée en fonction de chaque luminaire

La hauteur des plants de laitue ne grandit pas aussi vite avec un luminaire à DEL blanches en comparaison avec le luminaire horticoles et multi-DEL.

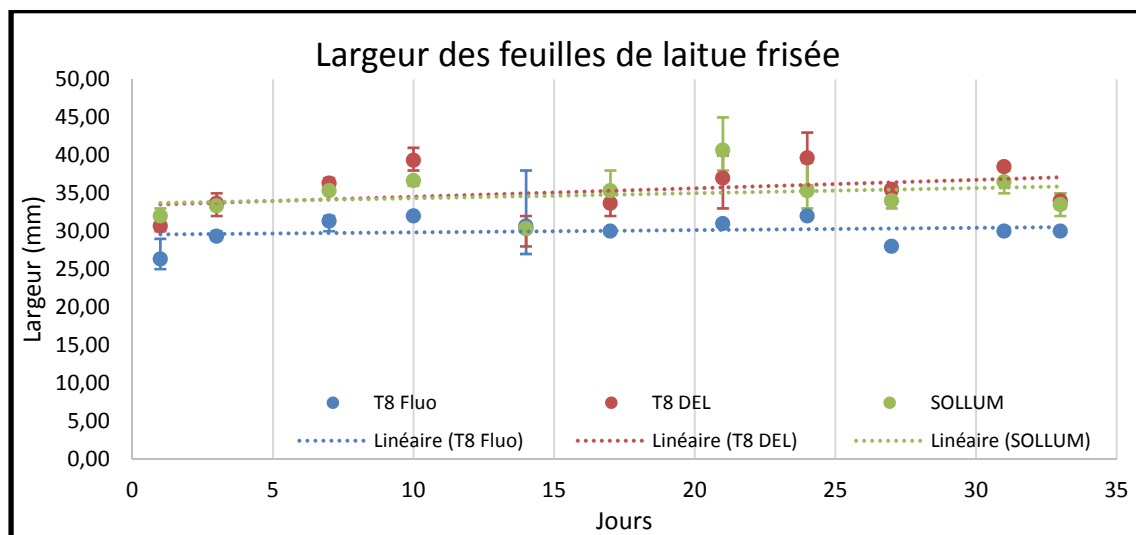


Figure 4.18 Variation dans le temps de la largeur des feuilles des plants de laitue frisée en fonction de chaque luminaire

Au niveau de la largeur des feuilles, les deux types de luminaires à DEL donnent le même effet.

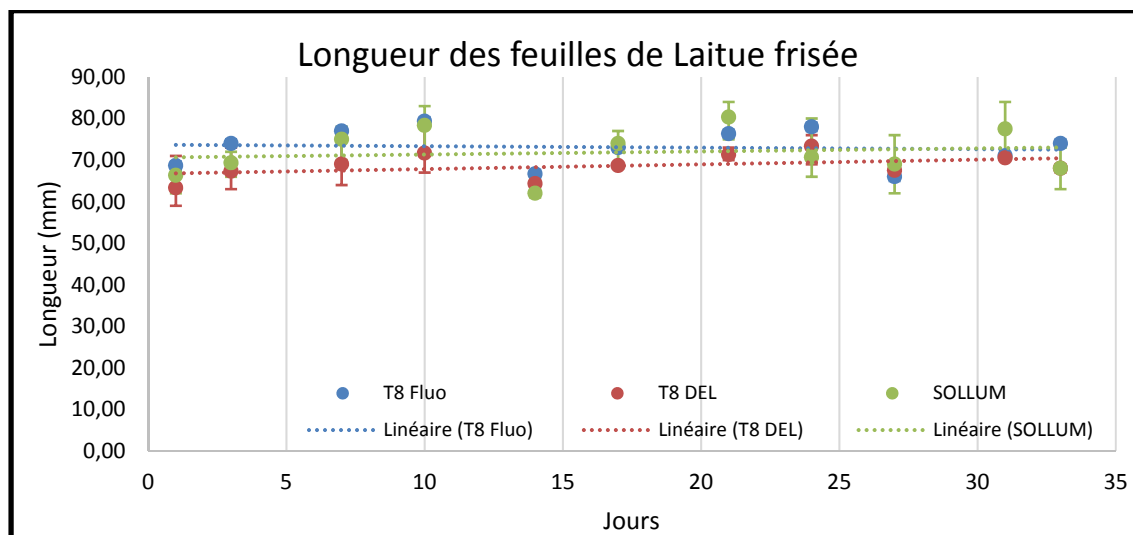


Figure 4.19 Variation dans le temps de la longueur des feuilles des plants de laitue frisée en fonction de chaque luminaire

Avec la figure Figure 4.19, les résultats démontrent que pour la longueur des feuilles tous les luminaires confondus donnent le même rendement.

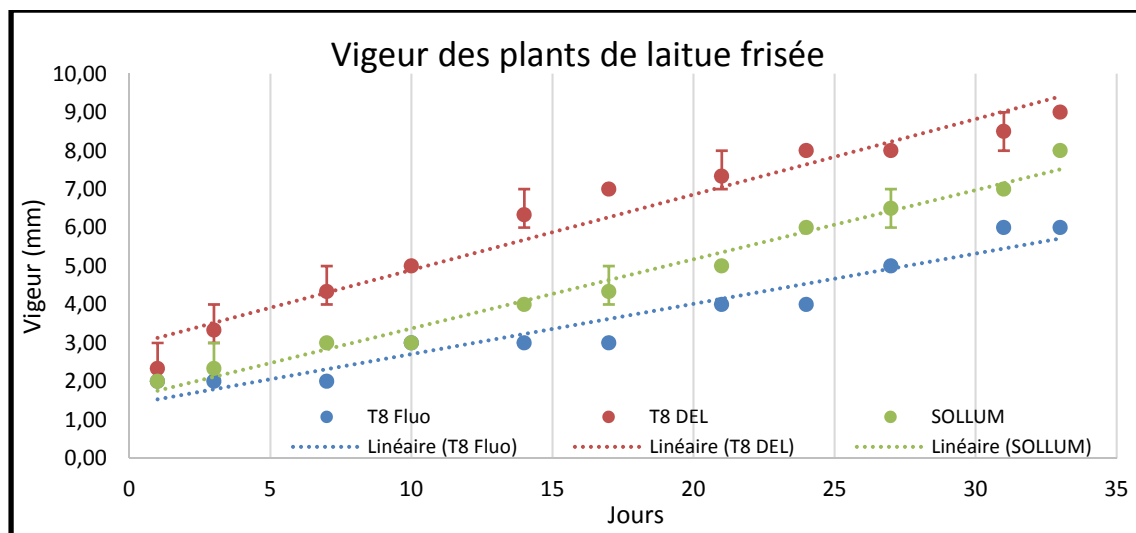


Figure 4.20 Variation dans le temps de la vigueur des plants de laitue frisée en fonction de chaque luminaire

La figure 4.20 montre un accroissement de la vigueur significativement plus grande avec le luminaire à DEL par rapport aux autres luminaires.

4.1.5 Les plants de ciboulette

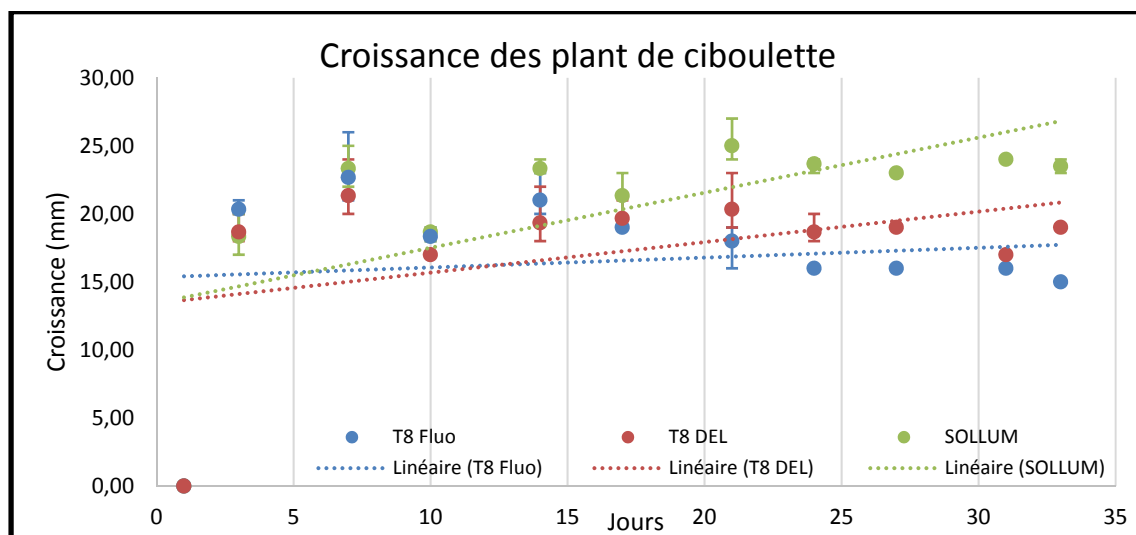


Figure 4.21 Variation dans le temps de la croissance des plants de ciboulette en fonction de chaque luminaire

La croissance de la ciboulette est beaucoup plus forte avec le luminaire multi-DEL qu'avec les luminaires de génération précédente.

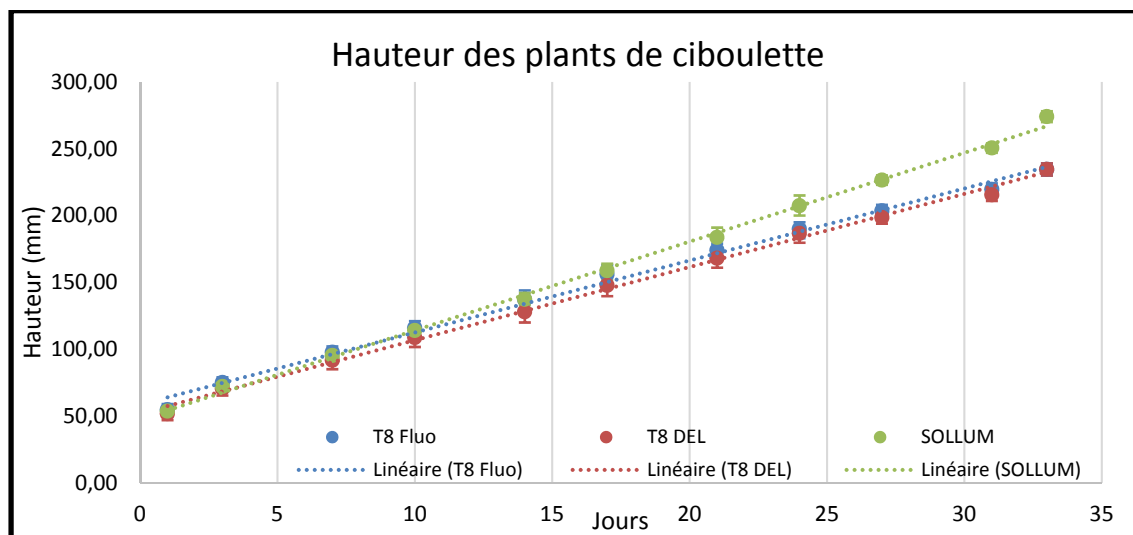


Figure 4.22 Variation dans le temps de hauteur des plants de ciboulette en fonction de chaque luminaire

La hauteur de la ciboulette se démarque par la croissance plus élevée par le luminaire multi-DEL. Notez que la ciboulette n'ayant pas de feuilles, aucun résultat n'a été acquis au niveau de la longueur et de la largeur des feuilles.

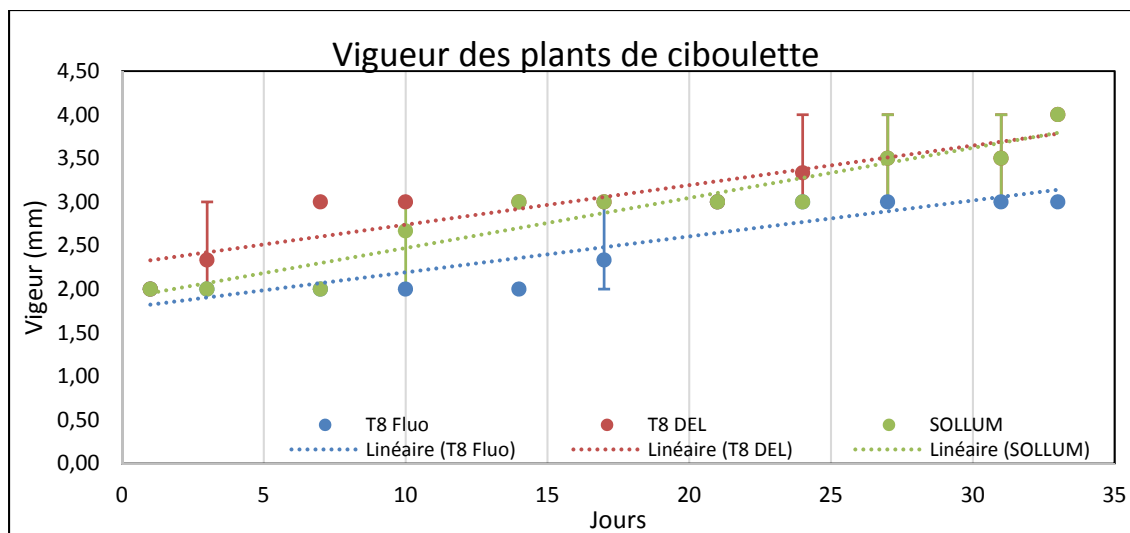


Figure 4.23 Variation dans le temps de la vigueur des plants de ciboulette en fonction de chaque luminaire

La figure Figure 4.23 démontre bien que les luminaires ne se distinguent pas les uns des autres, en ce qui a trait à la vigueur des plants de ciboulette.

4.2 Les résultats de croissance de jalapeño

Avec l'utilisation de lampes à large spectre multi-DEL, il a été possible de faire croître des plants de jalapeños de façon constante sur une plage de 34 jours. Par la suite, une nouvelle floraison arrive 8 jours après la cueillette des derniers fruits. Malheureusement, avec les lumières T8 horticoles et T8 Del, il a été impossible de faire fleurir le plan et donc, nous n'avons pas eu de piment jalapeño.

Tableau 4.1 Distance et quantité de photons émis pour un luminaire multi-DEL

	Distance de la lampe (cm)	Quantité de photons (μmol)
Jalapeño 1	33	108
Jalapeño 2	13	26

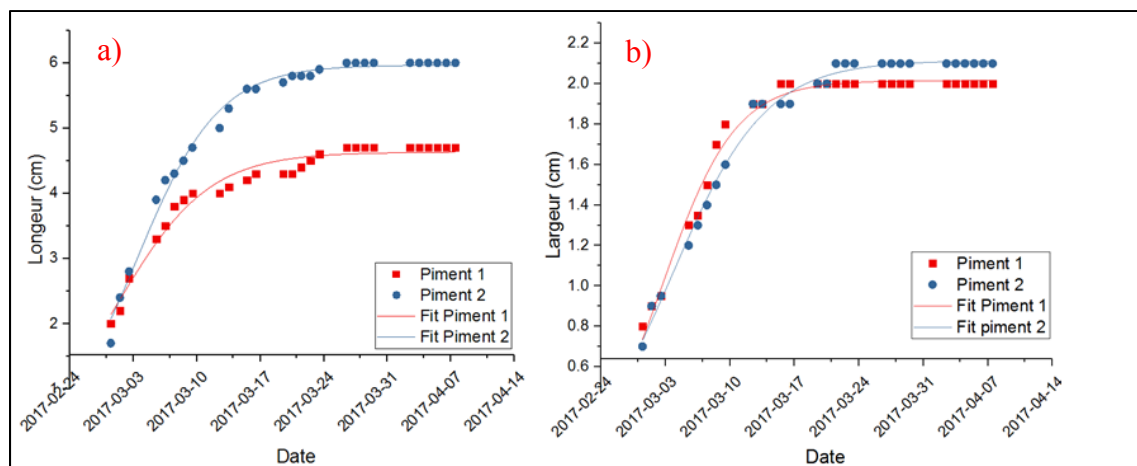


Figure 4.24 Croissances de jalapeño
en a) longueur (cm) et b) largeur (cm) avec un luminaire multi-DEL

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1 Analyse statistique

5.1.1 Introduction

Dans le cadre de cette recherche, plusieurs facteurs ont été échantillonnés dans le but d'obtenir le plus d'informations pertinentes possible. À l'étape de l'analyse, il est primordial de commencer par une analyse de composante principale pour simplifier les résultats. Les résultats mesurés et présentés dans le chapitre précédent se décomposent comme suit pour les fines herbes :

- croissance (mm);
- hauteur (mm);
- largeur des feuilles (mm);
- longueur des feuilles (mm);
- vigueur (diamètre des tiges) (mm);
- surface des tiges (mm²).

Pour les plants de jalapeños :

- longueur
- largeur

Les résultats utilisés pour cette analyse sont des résultats finaux, soit au 33^e jour de croissance. Comme la première expérimentation a dû être arrêtée prématurément, au jour 24, celle-ci n'a pas été prise en compte dans cette analyse.

Tableau 5.1 Compilation des résultats des fines herbes à feuilles utilisées pour l'analyse

Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Surface (mm ²)
237	13	27	4	12,5664
220	13	26	4	12,5664
249	14	29	6	28,2744
243	17	30	6	28,2744
274	29	44	5	19,6350
284	23	40	6	28,2744

5.1.2 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales vise à obtenir un plus petit nombre de combinaisons linéaires en fonction des 5 variables prenant en compte la plus grande partie de la variabilité des données. Dans ce cas, l'analyse en composantes principales permet d'en extraire, car elles ont des valeurs propres supérieures ou égales à 1 (voir figure 5.1). Ces deux composantes expliquent 97.9216 % de la variabilité des données d'origine.

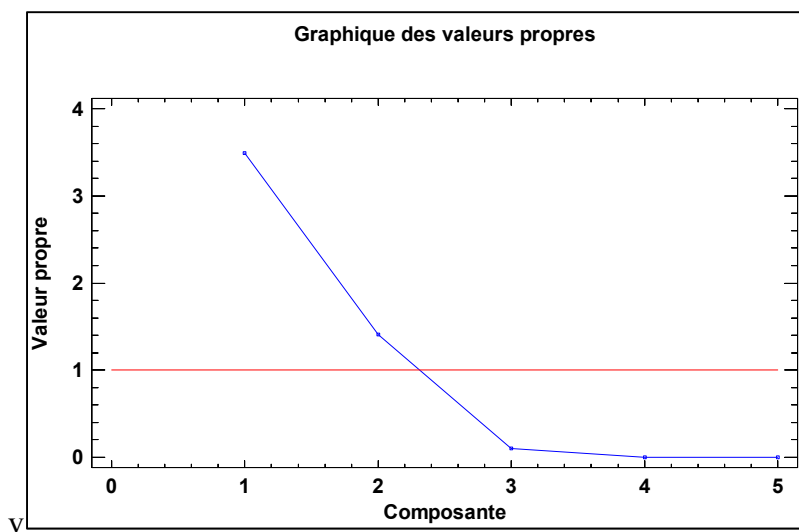


Figure 5.1 Résultats de l'analyse en composante principale

Par la suite, les résultats intéressants se trouvent dans le graphique du poids des variables (voir figure Figure 5.2). Celui-ci permet de visualiser l'interaction des facteurs. Dans ce graphique, la surface de la tige et le diamètre de celle-ci sont étroitement reliés et comme le poids de ces variables sont presque collés, il est possible de conclure que celles-ci veulent dire la même chose. Ce n'est pas une surprise, car pour obtenir la surface de la tige, l'utilisation du diamètre est nécessaire. De même, la longueur et la largeur des feuilles sont aussi étroitement reliées ce qui veut dire que ces deux variables aussi sont de même poids. Par contre, la surface et la longueur des feuilles, comme elles se trouvent presque à 90° l'un de l'autre, ceci explique que ces paramètres sont complètement indépendants. Donc, les paramètres simplifiés observés seront la surface de la tige, la hauteur et la longueur des feuilles. Ce qui fait sens dans le cas où, pour les fines herbes, ce qui est recherché est soit la surface de feuille obtenue (basilic, menthe, laitue frisée, coriandre) ou la grosseur de la tige (ciboulette). Tout en prenant en compte la croissance de la plante.

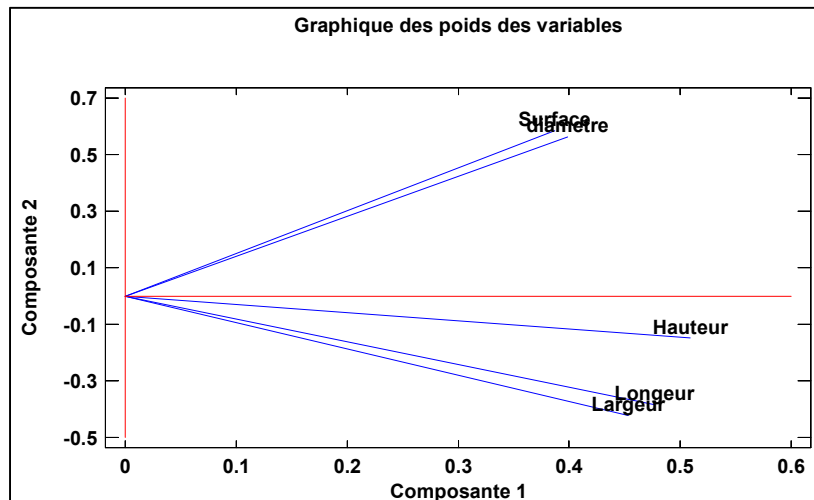


Figure 5.2 Résultats des poids des variables

Pour bien comprendre les résultats, une analyse de la variance (ANOVA) à plusieurs facteurs a été faite. Les facteurs pris en considération pour cette analyse sont le type de lampe et l'espèce de plante.

5.1.3 Validation de la qualité des résultats

La validité des résultats est faite à partir des résultats simplifiés, soit la hauteur, la longueur des feuilles et la surface de la tige. Avant tout, il est nécessaire de valider la qualité des résultats.

5.1.3.1 Validation du signal sur le bruit

En validant le signal sur le bruit, il est possible de déterminer que les résultats obtenus sont très forts et permettent de dire que les facteurs ont un effet statistiquement significatif sur chacun des paramètres

Équation 1. Calcul du ratio signal sur bruit

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Bruit}} = \frac{\text{Variace-residu}}{\text{residu}} \quad (5.1)$$

Tableau 5.2 Résultats du ratio signal sur bruit des mesures

Surface	Hauteur	Longueur des feuilles
8.5409	7.93	19.94

5.1.3.2 Validation des résidus

Une analyse des résidus est nécessaire pour valider que la prise de mesure n'a pas été altérée dans le temps ou que l'utilisateur des appareils de mesures n'a pas induit d'erreur en cours d'échantillonnage. L'analyse des résidus (voir figure 5.3) des mesures prises permet d'affirmer qu'il n'y a aucune dérive dans le temps et que la prise de mesures ne semble pas avoir influencé les résultats. Si tel était le cas, le graphique des résidus aurait affiché un effet de cône et le graphique de normalité aurait indiqué des résidus en forme de « S ».

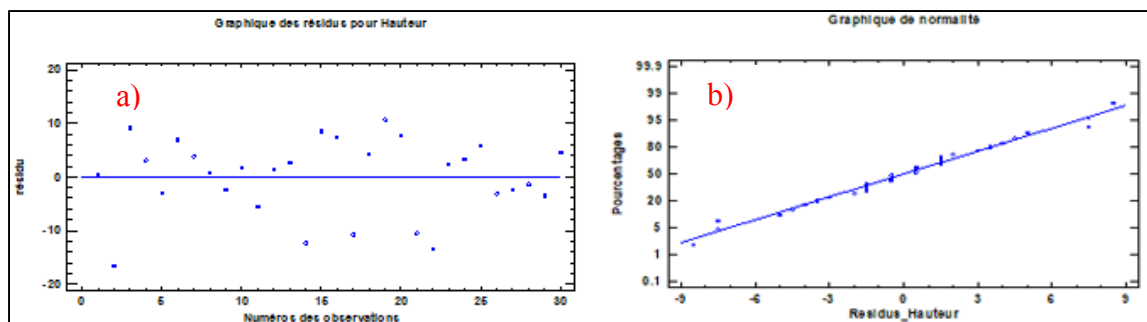


Figure 5.3 Résultats de l'analyse des résidus selon a) numéro des observations b) la normalité

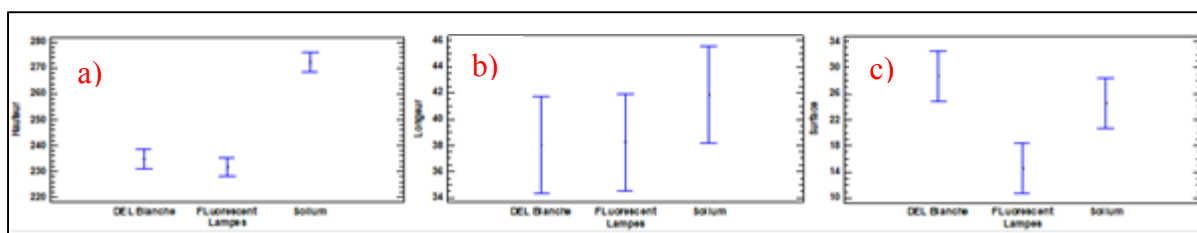


Figure 5.4 Résultats en fonction des luminaires pour a) la hauteur, b) la superficie des feuilles et c) la surface des plantes

Pour les résultats en fonction des luminaires, basés sur les moyennes et les intervalles de confiances, il est possible d'observer que les luminaires multi-DEL se distinguent par rapport aux autres pour la croissance des plants. Par contre, les résultats obtenus démontrent que le type de luminaire influence peu ou pas la longueur des feuilles. Par contre, il est à noter que les luminaires à base de DEL apportent une variation sur la superficie de la tige en comparaison aux lumières horticoles.

Tableau 5.3 Tests des étendues multiples pour les hauteurs des plants pour chaque type de lampes

Lampes	Effectif	Moyenne	Écart-type	Groupe homogène
Fluorescent	10	231.7	2.52956	X
DEL Blanche	10	234.9	2.52956	X
Multi-DEL	10	272.1	2.52956	X

Tableau 5.4 Tests des étendues multiples pour les longueurs des feuilles pour chaque type de lampes

Lampes	Effectif	Moyenne	Écart-type	Groupe homogène
Fluorescent	8	38.25	1.64341	X
DEL Blanche	8	38.0	1.64341	X
Multi-DEL	8	41.875	1.64341	X

Tableau 5.5 Tests des étendues multiples pour la surface des tiges pour chaque type de lampes

Lampes	Effectif	Moyenne	Écart-type	Groupe homogène
Fluorescent	10	14.6084	1.74952	X
DEL Blanche	10	28.7456	1.74952	X
Multi-DEL	10	24.5044	1.74952	X

Pour valider l'affirmation ci-dessus, un test non paramétrique sur chacune des mesures a été fait. Les résultats de la procédure des comparaisons multiples (Test non paramétrique) pour déterminer les moyennes qui sont significativement différentes les unes des autres. Ces tests indiquant que les groupes formés ont des différences statistiquement significatives au niveau de confiance de 99,5 %. Donc, pour ce qui est de la croissance des plants en hauteur, les T8 horticoles et les T8 à DEL semblent influencer les plantes de façons significatives et différemment par rapport au luminaire multi-DEL. Dans le cas de la longueur et largeur des feuilles, les trois luminaires ne se distinguent pas significativement et pour la croissance des tiges, le luminaire multi-DEL et les T8 aux DEL se différencient significativement du T8 horticole.

Finalement, l'analyse statistique permet de valider que tous les plants poussent de façons semblables. Comparant toutes les espèces testées, les résultats démontrent que chaque plante pousse de façons similaires sous n'importe quel type d'éclairage. Ceci fait en sorte que la comparaison des luminaires est valide.

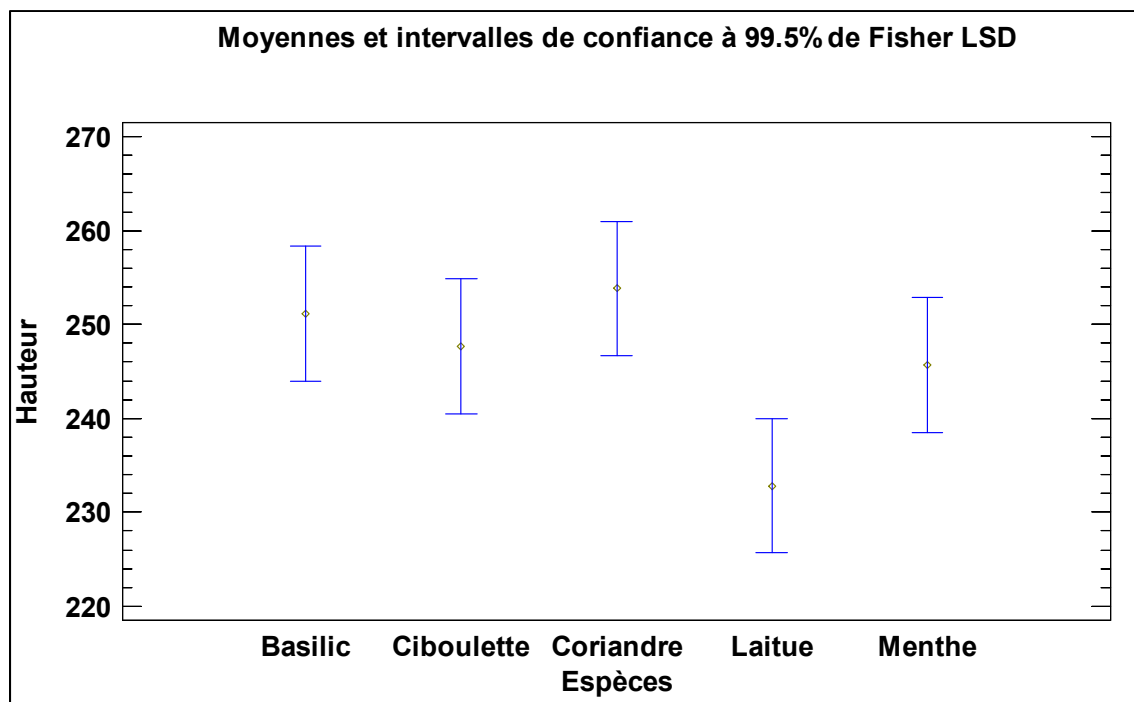


Figure 5.5 Résultats des moyennes et intervalles de confiance

5.2 Résumé des rendements

Les rendements des luminaires sont comparés à la plus vieille technologie, soit les luminaires T8 horticole afin de valider si la nouvelle technologie apporte un meilleur rendement aux plantes. En prenant l'ensemble des résultats, les luminaires multi-DEL semblent donner de meilleurs rendements que les fluorescents horticoles et les fluorescents aux DEL. Par contre, il est à noter que la vigueur semble être un problème avec les luminaires multi-DEL et les luminaires à DEL blanche performant mieux. En moyenne, sur l'ensemble des plants, les luminaires multi-DEL performant 20 % mieux que les fluorescents horticoles. Pour ce qui est des luminaires aux DEL blanches, ils offrent des résultats supérieurs au luminaire horticole de 13 % mieux que les fluorescents T8 aux DEL.

En observant chaque mesure individuellement, les luminaires multi-DEL performant mieux que les deux autres systèmes d'éclairage à l'exception de la vigueur qui en fonction des résultats semble meilleure avec les luminaires aux DEL blanches. Les raisons possibles de

cette amélioration du rendement sont dues à plusieurs facteurs. En premier lieu, la quantité de μE fournis à la plante est légèrement supérieure avec le luminaire multi-DEL qu’avec les deux autres technologies d’éclairage.

La vigueur des plantes peut être expliquée par la différence d’uniformité des types d’éclairage. Comme chaque plante cherche à avoir le plus d’énergie possible, elles tendent à pousser vers la source lumineuse. Dans le cas des luminaires T8, la superficie d’éclairage est plus grande et plus uniforme que la source lumineuse multi-DEL. Ceci fait en sorte que pour le luminaire multi-DEL, les plantes ont tendance à pousser en « cône » plutôt que de pousser verticalement. Comme la plante cherche à optimiser sa position, la vigueur en diamètre de la plante en est affectée.

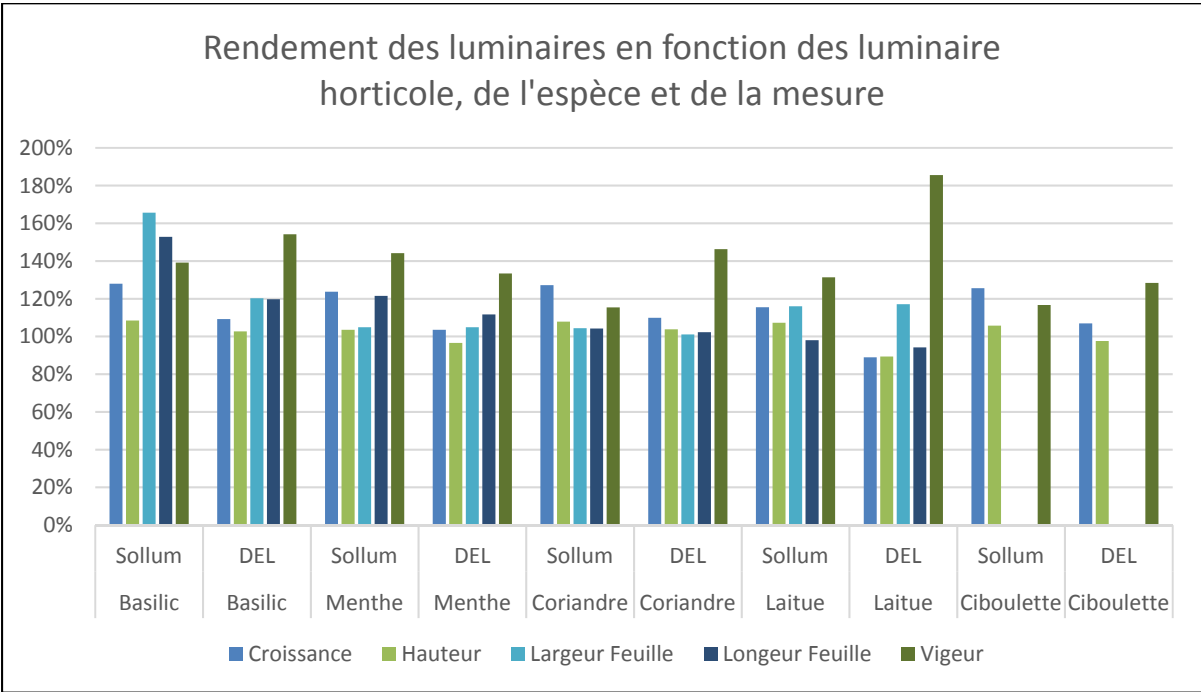


Figure 5.6 Comparatif des rendements des plantes en fonction des luminaires horticoles

Tableau 5.6 Résumé des comparatifs entre luminaires multi-DEL et DEL blancs par rapport au T8 horticole

	Basilic		Menthe		Coriandre		Laitue		Ciboulette	
	Multi	Blanc	Multi	Blanc	Multi	Blanc	Multi	Blanc	Multi	Blanc
Croissance	128 %	109 %	124 %	103 %	127 %	110 %	115 %	89 %	126 %	107 %
Hauteur	108 %	103 %	104 %	97 %	108 %	104 %	107 %	89 %	106 %	98 %
Largeur	166 %	120 %	105 %	105 %	104 %	101 %	116 %	117 %	--	--
Longueur	153 %	120 %	121 %	112 %	104 %	102 %	98 %	94 %	--	--
Vigueur	139 %	154 %	144 %	133 %	115 %	146 %	131 %	186 %	117 %	128 %
Moyenne	139 %	121 %	120 %	110 %	112 %	113 %	114 %	115 %	116 %	111 %

Les résultats démontrent que les luminaires multi-DEL offrent un rendement supérieur au T8 horticole, et que le luminaire aux DEL blanches. Le luminaire multi-DEL offre en moyenne un rendement supérieur de 6 %. La comparaison des rendements se fait à partir des T8 horticole. En finale, le T8 DEL blanches offre un rendement moyen supérieur à la technologie précédente de 13 % et la technologie multi-DEL offre un rendement moyen supérieur de 19 %. À la lumière de ces résultats, il est possible de déterminer que les luminaires multi-DEL par rapport aux technologies précédentes offrent une avancée significative sur la croissance des plantes.

5.2.1 Analyse de croissance des jalapeños

Les résultats obtenus démontrent une corrélation directe entre la quantité de μE reçus par le fruit et la grosseur du fruit. De plus, de la fin de la floraison à l'obtention d'un fruit mûr rouge. Le test expérimental démontre une croissance totale en 38 jours $\pm$ 1 jour. Selon la fiche technique du plant de jalapeños, la croissance jusqu'à maturation est normalement entre 60 à 70 jours. Avec ces informations, il est possible de déterminer que les luminaires multi-DEL offrent un rendement sur les fruits d'environ de 36 % supérieur à la norme.

CONCLUSION

Cette recherche aborde la problématique de comparer des systèmes d'éclairage de génération différente, soit les luminaires fluorescents T8 horticoles, des luminaires T8 à base DEL blanche et la dernière génération de luminaire multi spectral à large spectre. Cela est motivé par le fait que les technologies d'éclairage évoluent rapidement et l'implantation de la DEL dans le marché se fait de façon accélérée. Il est de plus en plus mentionné dans la littérature scientifique que la lumière à large spectre (tel le soleil) augmente la productivité et la santé des plantes. Dans la littérature, il semble y avoir deux grandes écoles de pensée. La première est qu'uniquement la lumière bleu et rouge est nécessaire comme éclairage, car les courbes de photosynthèse n'utilisent pas le vert. La seconde est que les plantes ont toujours poussé sous le soleil avec un large spectre. Cette étude démontre l'augmentation de croissance en fonction de la largeur spectrale des luminaires utilisés et plus chaque avancée technologique semble donner des rendements toujours de plus en plus supérieurs à son prédécesseur. La méthodologie pour la comparaison s'est divisée en deux volets distincts soit la comparaison spectrale et l'influence de ces luminaires sur la croissance de plant.

La comparaison spectrale a permis de déterminer que les luminaires multi-DEL offrent un réel avantage par rapport à l'autre technologie. Les tests se sont divisés en quatre sections et multi-DEL se distingue grandement sur deux de celle-ci soit pour l'intégrale de recouvrement spectral et la stabilité temporelle. Par contre, le luminaire T8 horticole se démarque grandement de ces compétiteurs plus modernes. Pour ce qui est de la croissance, les luminaires aux DEL soit le T8 aux DEL et le luminaire multi-DEL ont offert des rendements beaucoup plus élevés que les lumières horticoles, soit environ 20 % de plus. La différence entre les luminaire DEL blanc et multi-DEL se situe surtout au niveau de la croissance des fruits. Lors des expérimentations seulement le luminaire multi-DEL a été en mesure de faire croître des piments jalapeños à pleine maturité.

RECOMMANDATIONS

Dans le futur, la prochaine étape serait de faire la comparaison entre un système d'éclairage bispectral (bleu et rouge) et un éclairage à large spectre multi-DEL. Ceci permettrait de déterminer si l'éclairage à large spectre offre de meilleurs rendements ou non par rapport à ceux-ci. Par la suite, une série de tests sur des plants à fruit (tomate, concombre, etc.) permettraient de qualifier la valeur ajoutée lors de l'utilisation d'un système d'éclairage de dernière génération.

ANNEXE I

DONNÉES RÉCOLTÉES

Les données ont été récoltées dans un chiffrier Excel. Les données ont été compilées de sorte à pouvoir extraire les informations de chaque plant.

Données brutes des suivis de plantes

Croissance																	
T8 fluorescent	Fluo - Basilic			Fluo - Menthe			Fluo - Coriandre			Fluo - Laitue frisée			Fluo - Ciboulette				
Jour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	22	16	15	19	15	17	19	16	14	18	18	17	21	20	20		
7	26	21	21	29	20	19	24	18	21	21	16	17	26	21	21		
10	24	24	20	24	22	23	24	24	24	25	20	22	19	18	18		
14	24	19	17	18	20	19	24	23	17	25	23	22	23	20	20		
17	21	16	15	19	17	18	19	18	17	23	20	19	19	19	19		
21	17	17	17	19	17	18	20	17	15	18	15	15	16	19	19		
24	17	17	15	17	17	17	19	18	18	18	17	16	16	16	16		
27		17	17		16	17		17	15		15	16		16	16		
31		16	15		16	15		17	17		15	15		16	16		
33		16	15		17	15		18	15		16	15		15	15		
T8 DEL	DEL - Basilic			DEL - Menthe			DEL - Coriandre			DEL - Laitue frisée			DEL - Ciboulette				
Jour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	20	16	18	17	14	16	20	15	18	15	15	16	20	18	18		
7	25	20	18	26	18	19	26	21	22	16	15	14	24	20	20		
10	20	20	18	16	16	17	20	20	21	14	14	15	17	17	17		
14	24	22	22	25	21	22	23	22	19	16	15	14	22	18	18		
17	19	19	20	17	16	17	18	18	19	15	15	16	21	19	19		
21	23	22	21	25	18	17	23	23	20	19	17	16	23	19	19		
24	19	18	17	17	17	16	17	19	20	15	18	17	20	18	18		
27		17	18		20	21		22	21		14	15		19	19		
31		18	19		17	18		19	20		16	15		17	17		
33		20	17		17	18		17	18		18	17		19	19		
Sollum	Sollum - Basilic			Sollum - Menthe			Sollum - Coriandre			Sollum - Laitue frisée			Sollum - Ciboulette				
Jour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	19	16	20	20	17	19	20	17	19	18	17	19	20	18	17		
7	28	25	24	27	23	24	28	26	25	23	22	23	25	22	23		
10	22	20	25	19	17	20	21	22	23	19	18	20	19	18	19		
14	29	27	28	26	22	23	28	27	27	23	22	24	24	23	23		
17	21	20	21	20	19	21	19	18	24	19	20	21	22	19	23		
21	27	24	23	26	24	22	27	26	26	22	23	21	27	24	24		
24	22	20	22	21	20	22	23	21	22	19	20	20	24	24	23		
27		21	22		25	22		24	24		19	21		23	23		
31		23	21		21	23		22	24		21	21		24	24		
33		25	24		25	25		17	23		19	21		23	24		

Hauteur															
T8 fluorescent															
	Fluo - Basilic			Fluo - Menthe			Fluo - Coriandre			Fluo - Laitue frisée			Fluo - Ciboulette		
1	63	58	53	62	58	54	57	56	54	56	54	52	55	59	50
3	85	74	68	81	73	71	76	72	68	74	72	69	76	79	70
7	111	95	89	110	93	90	100	90	89	95	88	86	102	100	91
10	135	119	109	134	115	113	124	114	113	120	108	108	121	118	109
14	159	138	126	152	135	132	148	137	130	145	131	130	144	138	129
17	180	154	141	171	152	150	167	155	147	168	151	149	163	157	148
21	197	171	158	190	169	168	187	172	162	186	166	164	179	176	167
24	214	188	173	207	186	185	206	190	180	204	183	180	195	192	183
27		205	190		202	202		207	195		198	196		208	199
31		221	205		218	217		224	212		213	211		224	215
33		237	220		235	232		242	227		229	226		239	230
T8 DEL															
	DEL - Basilic			DEL - Menthe			DEL - Coriandre			DEL - Laitue frisée			DEL - Ciboulette		
1	60	57	55	58	58	55	59	55	52	58	54	53	54	50	51
3	80	73	73	75	72	71	79	70	70	73	69	69	74	68	69
7	105	93	91	101	90	90	105	91	92	89	84	83	98	88	89
10	125	113	109	117	106	107	125	111	113	103	98	98	115	105	106
14	149	135	131	142	127	129	148	133	132	119	113	112	137	123	124
17	168	154	151	159	143	146	166	151	151	134	128	128	158	142	143
21	191	176	172	184	161	163	189	174	171	153	145	144	181	161	162
24	210	194	189	201	178	179	206	193	191	168	163	161	201	179	180
27		211	207		198	200		215	212		177	176		198	199
31		229	226		215	218		234	232		193	191		215	216
33		249	243		232	236		251	250		211	208		234	235
Sollum															
	Sollum - Basilic			Sollum - Menthe			Sollum - Coriandre			Sollum - Laitue frisée			Sollum - Ciboulette		
1	55	53	54	56	53	52	52	49	47	62	60	51	54	52	55
3	74	69	74	76	70	71	72	66	66	80	77	70	74	70	72
7	102	94	98	103	93	95	100	92	91	103	99	93	99	92	95
10	124	114	123	122	110	115	121	114	114	122	117	113	118	110	114
14	153	141	151	148	132	138	149	141	141	145	139	137	142	133	137
17	174	161	172	168	151	159	168	159	165	164	159	158	164	152	160
21	201	185	195	194	175	181	195	185	191	186	182	179	191	176	184
24	223	205	217	215	195	203	218	206	213	205	202	199	215	200	207
27		226	239		220	225		230	237		221	220		223	230
31		249	260		241	248		252	261		242	241		247	254
33		274	284		266	273		269	284		261	262		270	278

Largeur Feuille												
T8 fluorescent												
	Fluo - Basilic			Fluo - Menthe			Fluo - Coriandre			Fluo - Laitue frisée		
Jour 1	14	12	13	21	18	17	19	20	19	29	25	25
Jour 3	15	13	14	21	19	19	20	22	23	30	29	29
Jour 7	17	12	14	22	19	19	24	24	24	30	32	32
Jour 10	18	14	15	25	36	24	21	17	17	32	32	32
Jour 14	21	14	11	20	37	26	25	19	19	38	27	27
Jour 17	13	13	13	24	21	21	21	21	21	30	30	30
Jour 21	14	12	14	24	18	23	24	22	22	31	31	31
Jour 24	14	11	11	24	18	20	25	23	23	32	32	32
Jour 27		11	13		20	20		27	25		28	28
Jour 31		12	13		24	22		22	22		30	30
Jour 33		13	13		20	22		22	22		30	30
T8 DEL												
	DEL - Basilic			DEL - Menthe			DEL - Coriandre			DEL - Laitue frisée		
Jour 1	14	12	11	24	17	16	19	19	20	30	30	32
Jour 3	15	12	13	20	19	20	23	19	21	32	34	35
Jour 7	17	12	14	27	20	22	26	20	23	36	36	37
Jour 10	20	13	14	28	21	23	19	18	19	39	38	41
Jour 14	21	15	15	26	23	20	23	18	19	28	31	32
Jour 17	21	11	12	22	22	24	24	24	23	32	35	34
Jour 21	23	13	15	24	22	26	24	25	26	33	40	38
Jour 24	23	13	15	26	20	21	23	23	27	36	40	43
Jour 27		14	13		23	24		24	21		36	35
Jour 31		16	17		24	28		25	23		39	38
Jour 33		14	17		20	22		21	24		33	35
Sollum												
	Sollum - Basilic			Sollum - Menthe			Sollum - Coriandre			Sollum - Laitue frisée		
Jour 1	15	14	11	23	18	15	22	18	18	32	33	31
Jour 3	16	15	13	25	23	18	25	19	23	34	33	33
Jour 7	18	17	16	27	23	22	26	20	23	36	35	35
Jour 10	21	22	20	28	26	25	29	24	24	37	37	36
Jour 14	19	19	20	31	30	29	21	17	25	30	31	30
Jour 17	20	18	17	22	21	24	22	19	21	38	34	34
Jour 21	22	22	21	24	24	27	25	21	22	45	39	38
Jour 24	26	26	24	27	27	28	27	25	23	34	33	39
Jour 27		29	26		30	24		26	27		35	33
Jour 31		27	28		22	27		18	27		38	35
Jour 33		29	23		25	29		22	22		32	35

Longeur Feuille												
T8 fluorescent												
	Fluo - Basilic			Fluo - Menthe			Fluo - Coriandre			Fluo - Laitue frisée		
Jour 1	25	25	24	29	24	23	21	21	20	70	68	68
Jour 3	26	26	26	30	25	24	25	25	25	74	74	74
Jour 7	26	26	27	32	26	25	27	27	26	79	76	76
Jour 10	28	28	28	33	32	30	22	23	21	84	77	77
Jour 14	31	28	22	27	33	33	27	23	22	68	66	66
Jour 17	22	26	25	29	29	27	24	24	24	73	73	73
Jour 21	26	26	26	29	24	26	27	22	24	77	76	76
Jour 24	27	26	23	28	25	25	29	24	24	80	77	77
Jour 27		22	24		26	25		27	27		66	66
Jour 31		25	24		30	26		23	24		71	71
Jour 33		27	26		28	28		25	24		74	74
T8 DEL												
	DEL - Basilic			DEL - Menthe			DEL - Coriandre			DEL - Laitue frisée		
Jour 1	26	23	20	33	25	24	22	22	21	71	60	59
Jour 3	30	24	26	30	26	27	24	24	23	73	63	66
Jour 7	33	25	27	36	30	31	26	24	25	76	64	67
Jour 10	36	27	28	36	31	34	23	23	23	78	67	70
Jour 14	38	29	30	33	33	26	25	25	24	64	64	65
Jour 17	39	24	25	31	29	31	26	23	26	69	69	68
Jour 21	40	26	31	34	27	34	26	24	28	73	70	71
Jour 24	42	27	32	35	29	28	25	22	30	76	69	75
Jour 27		27	26		33	31		26	24		67	68
Jour 31		28	29		33	35		28	27		70	71
Jour 33		29	30		27	28		24	30		67	69
Sollum												
	Sollum - Basilic			Sollum - Menthe			Sollum - Coriandre			Sollum - Laitue frisée		
Jour 1	29	27	20	33	27	21	23	20	18	69	68	62
Jour 3	32	29	27	34	29	24	26	22	23	72	70	66
Jour 7	37	33	32	38	32	29	28	26	25	78	77	70
Jour 10	44	35	37	40	34	31	30	29	26	83	80	72
Jour 14	36	32	38	45	37	34	23	23	28	62	63	61
Jour 17	40	28	33	33	28	29	24	24	22	77	77	68
Jour 21	45	36	37	36	30	34	26	26	23	84	82	75
Jour 24	51	39	41	39	35	36	29	29	25	66	66	80
Jour 27		45	43		39	29		30	29		76	62
Jour 31		42	45		29	33		20	31		84	71
Jour 33		44	40		34	34		23	24		63	73

Vigueur															
T8 fluorescent															
	Fluo - Basilic			Fluo - Menthe			Fluo - Coriandre			Fluo - Laitue frisée			Fluo - Ciboulette		
Jour 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Jour 3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Jour 7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Jour 10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Jour 14	3	3	3	2	2	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Jour 17	3	3	3	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	2	2
Jour 21	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	4	4	3	3	3
Jour 24	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3
Jour 27		4	3		3	3		4	4		5	5		3	3
Jour 31		4	4		4	4		4	4		6	6		3	3
Jour 33		4	4		4	4		4	4		6	6		3	3
T8 DEL															
	DEL - Basilic			DEL - Menthe			DEL - Coriandre			DEL - Laitue frisée			DEL - Ciboulette		
Jour 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
Jour 3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	3	4	2	2	3
Jour 7	3	3	3	2	2	2	3	3	3	4	4	5	3	3	3
Jour 10	4	4	4	3	4	4	3	3	3	5	5	5	3	3	3
Jour 14	4	4	4	3	4	4	4	4	3	6	6	7	3	3	3
Jour 17	5	5	5	3	4	4	4	4	4	7	7	7	3	3	3
Jour 21	5	5	5	3	4	4	4	4	4	7	7	8	3	3	3
Jour 24	5	5	5	3	5	5	4	4	4	8	8	8	3	3	4
Jour 27		5	5		5	5		5	4		8	8		3	4
Jour 31		5	6		5	5		5	5		9	8		3	4
Jour 33		6	6		5	5		5	5		9	9		4	4
Sollum															
	Sollum - Basilic			Sollum - Menthe			Sollum - Coriandre			Sollum - Laitue frisée			Sollum - Ciboulette		
Jour 1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
Jour 3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
Jour 7	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2
Jour 10	3	3	3	4	4	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3
Jour 14	4	4	3	4	4	4	2	2	3	4	4	4	3	3	3
Jour 17	4	4	4	4	4	4	2	2	3	4	4	5	3	3	3
Jour 21	4	4	4	5	5	4	3	3	3	5	5	5	3	3	3
Jour 24	5	5	4	5	5	5	3	3	4	6	6	6	3	3	3
Jour 27		5	5		5	5		4	4		6	7		3	4
Jour 31		5	5		5	5		4	4		7	7		3	4
Jour 33		5	6		5	5		4	5		8	8		4	4

Calculs pour le basilic

Croissance	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM										Sollum - FLUO					DEL - Fluo				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo				MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00															
3	15	22	17.67	2.67	4.33	16	20	18.00	2.00	2.00	16	20	18.33	2.33	1.67	104%	102%	100%				73%	133%	91%	107%	73%	133%	91%	107%	
7	21	26	22.67	1.67	3.33	18	25	21.00	3.00	4.00	24	28	25.67	1.67	2.33	113%	93%	100%				92%	133%	108%	114%	69%	119%	96%	86%	
10	20	24	22.67	2.67	1.33	18	20	19.33	1.33	0.67	20	25	22.33	2.33	2.67	99%	85%	100%				83%	125%	104%	100%	75%	100%	83%	90%	
14	17	24	20.00	3.00	4.00	22	24	22.67	0.67	1.33	27	29	28.00	1.00	1.00	140%	113%	100%				113%	171%	121%	159%	92%	141%	100%	129%	
17	15	21	17.33	2.33	3.67	19	20	19.33	0.33	0.67	20	21	20.67	0.67	0.33	119%	112%	100%				95%	140%	100%	133%	90%	133%	95%	127%	
21	17	17	17.00	0.00	0.00	21	23	22.00	1.00	1.00	23	27	24.67	1.67	2.33	145%	129%	100%				135%	159%	159%	135%	124%	135%	135%	124%	
24	15	17	16.33	1.33	0.67	17	19	18.00	1.00	1.00	20	22	21.33	1.33	0.67	131%	110%	100%				118%	147%	129%	133%	100%	127%	112%	113%	
27	17	17	17.00	0.00	0.00	17	18	17.50	0.50	0.50	21	22	21.50	0.50	0.50	126%	103%	100%				124%	129%	129%	124%	100%	106%	106%	100%	
31	15	16	15.50	0.50	0.50	18	19	18.50	0.50	0.50	21	23	22.00	1.00	1.00	142%	119%	100%				131%	153%	144%	140%	113%	127%	119%	120%	
33	15	16	15.50	0.50	0.50	17	20	18.50	1.50	1.50	24	25	24.50	0.50	0.50	158%	119%	100%				150%	167%	156%	160%	106%	133%	125%	113%	
			16.52					17.71					20.82			128%	109%	100%				111%	146%	124%	131%	94%	125%	106%	111%	
								9%					23%	14%											109%					
Hauteur	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM										FLUO					DEL				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo				MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
1	53	63	58.00	5.00	5.00	55	60	57.33	2.33	2.67	53	55	54.00	1.00	1.00															
3	68	85	75.67	7.67	9.33	73	80	75.33	2.33	4.67	69	74	72.33	3.33	1.67	96%		100%												
7	89	111	98.33	9.33	12.67	91	105	96.33	5.33	8.67	94	102	98.00	4.00	4.00	100%		98%												
10	109	135	121.00	12.00	14.00	109	125	115.67	6.67	9.33	114	124	120.33	6.33	3.67	99%		96%												
14	126	159	141.00	15.00	18.00	131	149	138.33	7.33	10.67	141	153	148.33	7.33	4.67	105%		98%												
17	141	180	158.33	17.33	21.67	151	168	157.67	6.67	10.33	161	174	169.00	8.00	5.00	107%		100%												
21	158	197	175.33	17.33	21.67	172	191	179.67	7.67	11.33	185	201	193.67	8.67	7.33	110%		102%												
24	173	214	191.67	18.67	22.33	189	210	197.67	8.67	12.33	205	223	215.00	10.00	8.00	112%		103%												
27	190	205	197.50	7.50	7.50	207	211	209.00	2.00	2.00	226	239	232.50	6.50	6.50	118%		106%												
31	205	221	213.00	8.00	8.00	226	229	227.50	1.50	1.50	249	260	254.50	5.50	5.50	119%		107%												
33	220	237	228.50	8.50	8.50	243	249	246.00	3.00	3.00	274	284	279.00	5.00	5.00	122%		108%												
			150.76					154.59					166.97			109%		102%												
								4%					10%	6%												108%				
Largeur Feuille	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM										FLUO					DEL				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo				MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
1	12	14	13.00	1.00	1.00	11	14	12.33	1.33	1.67	11	15	13.33	2.33	1.67															
3	13	15	14.00	1.00	1.00	12	15	13.33	1.33	1.67	13	16	14.67	1.67	1.33	105%		95%												
7	12	17	14.33	2.33	2.67	12	17	14.33	2.33	2.67	16	18	17.00	1.00	1.00	119%		100%												
10	14	18	15.67	1.67	2.33	13	20	15.67	2.67	4.33	20	22	21.00	1.00	1.00	134%		100%												
14	11	21	15.33	4.33	5.67	15	21	17.00	2.00	4.00	19	20	19.33	0.33	0.67	126%		111%												
17	13	13	13.00	0.00	0.00	11	21	14.67	3.67	6.33	17	20	18.33	1.33	1.67	141%		131%												
21	12	14	13.33	1.33	0.67	13	23	17.00	4.00	6.00	21	22	21.67	0.67	0.33	163%		128%												
24	11	14	12.00	1.00	2.00	13	23	17.00	4.00	6.00	24	26	25.33	1.33	0.67	211%		142%												
27	11	13	12.00	1.00	1.00	13	14	13.50	0.50	0.50	26	29	27.50	1.50	1.50	229%		113%												
31	12	13	12.50	0.50	0.50	16	17	16.50	0.50	0.50	27	28	27.50	0.50	0.50	220%		132%												
33	13	13	13.00	0.00	0.00	14	17	15.50	1.50	1.50	23	29	26.00	3.00	3.00	200%		119%												
			13.47					15.17					21.06			165%		115%												
								9%					33%	25%																
Longeur Feuille	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM										FLUO					DEL				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo				MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
1	24	25	24.67	0.67	0.33	20	26	23.00	3.00	3.00	20	29	25.33	5.33	3.67															
3	26	26	26.00	0.00	0.00	24	30	26.67	2.67	3.33	27	32	29.33	2.33	2.67	113%		103%												
7	26	27	26.33	0.33	0.67	25	33	28.33	3.33	4.67	32	37	34.00	2.00	3.00	129%		108%												
10	28	28	28.00	0.00	0.00	27	36	30.33	3.33	5.67	35	44	38.67	3.67	5.33	138%		108%												
14	22	31	27.00	5.00	4.00	29	38	32.33	3.33	5.67	32	38	35.33	3.33	2.67	131%		120%												
17	22	26	24.33	2.33	1.67	24	39	29.33	5.33	9.67	28	40	33.67	5.67	6.33	138%		121%												
21	26	26	26.00	0.00	0.00	26	40	32.33	6.33	7.67	36	45	39.33	3.33	5.67	151%		124%												
24	23	27	25.33	2.33	1.67	27	42	33.67	6.67	8.33	39	51	43.67	4.67	7.33	172%		133%												
27	22	24	23.00	1.00	2.00	26	27	26.50	0.50	0.50	43	45	44.00	1.00	1.00	191%		115%												
31	24	25	24.50	0.50	0.50	28	29	28.50	0.50	0.50	42	45	43.50	1.50	1.50	178%		116%												
33	26	27	26.50	0.50	0.50	29	30	29.50	0.50	0.50	40	44	42.00	2.00	2.00	158%		111%												
			25.61					29.14					37.17			150%		116%												
								5%																						

Calculs pour la menthe

Croissance	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM								FLUO					DEL - Fluo			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison DEL P/R Fluo	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00												
1	15	19	17.00	2.00	2.00	14	17	15.67	1.67	1.33	17	20	18.67	1.67	1.33	110%	92%	100%	89%	133%	105%	113%	74%	113%	89%	93%	
3	15	19	22.67	3.67	6.33	18	26	21.00	3.00	5.00	23	27	24.67	1.67	2.33	109%	93%	100%	79%	142%	93%	121%	62%	137%	90%	95%	
7	19	29	23.00	1.00	1.00	16	17	16.33	0.33	0.67	17	20	18.67	1.67	1.33	81%	71%	100%	71%	91%	83%	77%	67%	77%	71%	73%	
10	22	24	19.00	1.00	1.00	21	25	22.67	1.67	2.33	22	26	23.67	1.67	2.33	125%	119%	100%	110%	144%	130%	122%	105%	139%	125%	117%	
14	18	20	18.00	1.00	1.00	16	17	16.67	0.67	0.33	19	21	20.00	1.00	1.00	111%	93%	100%	100%	124%	111%	112%	84%	100%	89%	94%	
17	17	19	18.00	1.00	1.00	17	25	20.00	3.00	5.00	22	26	24.00	2.00	2.00	133%	111%	100%	116%	153%	137%	129%	89%	147%	132%	100%	
21	17	19	17.00	0.00	0.00	16	17	16.67	0.67	0.33	20	22	21.00	1.00	1.00	124%	98%	100%	118%	129%	129%	118%	94%	100%	100%	94%	
24	17	17	16.50	0.50	0.50	20	21	20.50	0.50	0.50	22	25	23.50	1.50	1.50	142%	124%	100%	129%	156%	147%	138%	118%	131%	124%	125%	
31	15	16	15.50	0.50	0.50	17	18	17.50	0.50	0.50	21	23	22.00	1.00	1.00	142%	113%	100%	131%	153%	144%	140%	106%	120%	113%	113%	
33	15	17	16.00	1.00	1.00	17	18	17.50	0.50	0.50	25	25	25.00	0.00	0.00	156%	109%	100%	147%	167%	147%	167%	100%	120%	106%	113%	
			16.61	1.06	1.30	15.64	18.27	16.77	1.14	1.50	18.91	21.36	20.11			123%	102%	100%	109%	139%	123%	124%	103%	118%	104%	102%	
																			124%								

Hauteur	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM								FLUO					DEL			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
	54	62	58.00	4.00	4.00	55	58	57.00	2.00	1.00	52	56	53.67	1.67	2.33												
1	71	81	75.00	4.00	6.00	71	75	72.67	1.67	2.33	70	76	72.33	2.33	3.67	96%	97%	100%	86%	107%	94%	99%	88%	106%	93%	100%	
3	90	110	97.67	7.67	12.33	90	101	93.67	3.67	7.33	93	103	97.00	4.00	6.00	99%	96%	100%	85%	114%	94%	103%	82%	112%	92%	100%	
7	113	134	120.67	7.67	13.33	106	117	110.00	4.00	7.00	110	122	115.67	5.67	6.33	96%	91%	100%	82%	108%	91%	97%	79%	104%	87%	94%	
10	132	152	139.67	7.67	12.33	127	142	132.67	5.67	9.33	132	148	139.33	7.33	8.67	100%	95%	100%	87%	112%	97%	100%	84%	108%	93%	96%	
14	150	171	157.67	7.67	13.33	143	159	149.33	6.33	9.67	151	168	159.33	8.33	8.67	101%	95%	100%	88%	112%	98%	101%	84%	106%	93%	95%	
17	168	190	175.67	7.67	14.33	161	184	169.33	8.33	14.67	175	194	183.33	8.33	10.67	104%	96%	100%	92%	115%	102%	104%	85%	110%	97%	96%	
21	185	207	192.67	7.67	14.33	178	201	186.00	8.00	15.00	195	215	204.33	9.33	10.67	106%	97%	100%	94%	116%	104%	105%	86%	109%	97%	96%	
24	202	202	202.00	0.00	0.00	198	200	199.00	1.00	1.00	220	225	222.50	2.50	2.50	110%	99%	100%	109%	111%	111%	109%	98%	99%	98%	98%	
27	217	218	217.50	0.50	0.50	215	218	216.50	1.50	1.50	241	248	244.50	3.50	3.50	112%	100%	100%	111%	114%	114%	111%	99%	100%	100%	99%	
31	232	235	233.50	1.50	1.50	232	236	234.00	2.00	2.00	266	273	269.50	3.50	3.50	115%	100%	100%	113%	118%	116%	115%	99%	102%	100%	100%	
			151.82	5.09	8.36	143.27	153.73	147.29	4.02	6.44	155.00	166.18	160.14			104%	96%	100%	95%	113%	102%	104%	88%	105%	95%	97%	
																			104%								

Largeur Feuille	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM								FLUO					DEL			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
	16	24	18.67	1.67	2.33	16	24	19.00	3.00	5.00	16	24	18.67	2.67	5.33												
1	19	21	19.67	0.67	1.33	19	20	19.67	0.67	0.33	19	20	22.00	3.00	-2.00	112%	100%	100%	90%	105%	95%	100%	90%	105%	95%	100%	
3	19	21	20.00	1.00	2.00	20	27	23.00	3.00	4.00	20	27	24.00	4.00	3.00	120%	115%	100%	91%	142%	123%	105%	91%	142%	123%	105%	
7	24	36	28.33	4.33	7.67	21	28	24.00	3.00	4.00	21	28	26.33	5.33	1.67	93%	85%	100%	58%	117%	78%	88%	58%	117%	78%	88%	
10	20	37	27.67	7.67	9.33	20	26	23.00	3.00	3.00	20	26	30.00	10.00	-4.00	108%	83%	100%	54%	130%	70%	100%	54%	130%	70%	100%	
14	21	24	22.00	1.00	2.00	22	24	22.67	0.67	1.33	22	24	22.33	0.33	1.67	102%	103%	100%	92%	114%	100%	105%	92%	114%	100%	105%	
17	21	24	21.67	3.67	2.33	22	26	24.00	2.00	2.00	22	26	25.00	3.00	1.00	111%	111%	100%	92%	144%	108%	122%	92%	144%	108%	122%	
21	18	24	20.67	2.67	3.33	20	26	22.33	2.33	3.67	20	26	27.33	7.33	-1.33	132%	108%	100%	83%	144%	108%	111%	83%	144%	108%	111%	
24	20	20	20.00	0.00	0.00	23	24	23.50	0.50	0.50	23	24	27.00	4.00	-3.00	135%	118%	100%	115%	120%	120%	115%	115%	120%	120%	115%	
27	20	20	20.00	0.00	0.00	23	24	23.50	0.50	0.50	23	24	27.00	4.00	-3.00	135%	118%	100%	115%	120%	120%	115%	115%	120%	120%	115%	
31	22	24	23.00	1.00	1.00	24	28	26.00	2.00	2.00	24	28	24.50	0.50	3.50	107%	113%	100%	100%	127%	117%	109%	100%	127%	117%	109%	
33	20	22	21.00	1.00	1.00	20	22	21.00	1.00	1.00	20	22	27.00	7.00	-5.00	129%	100%	100%	91%	110%	100%	100%	91%	110%	100%	100%	
			22.06	2.24	2.94	20.64	25.00	22.56	1.92	2.44	20.64	25.00	24.92			115%	104%	100%	87%	125%	102%	105%	87%	125%	102%	105%	
																			105%								

Longueur Feuille	T8 Fluo					T8 DEL					SOLLUM								FLUO					DEL			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
	23	29	25.33	2.33	3.67	24	33	27.33	3.33	5.67	21	33	27.00	6.00	6.00												
1	24	30	26.33	2.33	3.67	26	30	27.67	1.67	2.33	24	34	29.00	5.00	5.00	110%	105%	100%	80%	142%	113%	100%	87%	125%	100%	108%	
3	25	32	27.67	2.67	4.33	30	36	32.33	2.33	3.67	29	38	33.00	4.00	5.00	119%	117%	100%	91%	152%	119%	116%	94%	144%	113%	120%	
7	30	33	31.67	1.67	1.33	31	36	33.67	2.67	2.33	31	40	35.00	4.00	5.00	111%	106%	100%	94%	133%	121%	103%	94%	120%	109%	103%	
10	27	33	31.00	4.00	2.00	26	33	30.67	4.67	2.33	34	45	38.67	4.67	6.33	125%	99%	100%	103%	167%	136%	126%	79%	122%	100%	96%	
14	27	29	28.33	1.33	0.67	29	31	30.33	1.33	0.67	28	33	30.00	2.00	3.00	106%	107%	100%	97%	122%	114%	104%	100%	115%	107%	107%	
17	24	29	26.33	2.33	2.67	27	34	31.67	4.67	2.33	30	36	33.33	3.33	2.67	127%	120%	100%	103%	150%	124%	125%	93%	142%	117%	113%	
24	25	28	26.00	1.00	2.00	28	35	30.67	2.67	4.33	35	39	36.67	1.67	2.33	141%	118%	100%	125%	156%	139%	140%	100%	140%	125%	112%	
27	25	26	25.50	0.50	0.50	31	33	32.00	1.00</																		

Calculs pour la coriandre

Croissance	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM								FLUO				DEL - Fluo			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00											
3	14	19	16.33	2.33	2.67	15	20	17.67	2.67	2.33	17	20	18.67	1.67	1.33	114%	106%	100%	89%	143%	105%	121%	79%	143%	105%	107%
7	18	24	21.00	3.00	3.00	21	26	23.00	2.00	3.00	25	28	26.33	1.33	1.67	125%	114%	100%	104%	156%	117%	139%	88%	144%	108%	117%
10	24	24	24.00	0.00	0.00	20	21	20.33	0.33	0.67	21	23	22.00	1.00	1.00	92%	108%	100%	88%	96%	96%	88%	83%	88%	88%	83%
14	17	24	21.33	4.33	2.67	19	23	21.33	2.33	1.67	27	28	27.33	0.33	0.67	128%	128%	100%	113%	165%	117%	159%	79%	135%	96%	112%
17	17	19	18.00	1.00	1.00	18	19	18.33	0.33	0.67	18	24	20.33	2.33	3.67	113%	111%	100%	95%	141%	126%	106%	95%	112%	100%	106%
21	15	20	17.33	2.33	2.67	20	23	22.00	2.00	1.00	26	27	26.33	0.33	0.67	152%	120%	100%	130%	180%	135%	173%	100%	153%	115%	133%
24	18	19	18.33	0.33	0.67	17	20	18.67	1.67	1.33	21	23	22.00	1.00	1.00	120%	118%	100%	111%	128%	121%	117%	89%	111%	105%	94%
27	15	17	16.00	1.00	1.00	21	22	21.50	0.50	0.50	24	24	24.00	0.00	0.00	150%	112%	100%	141%	160%	141%	160%	124%	147%	129%	140%
31	17	17	17.00	0.00	0.00	19	20	19.50	0.50	0.50	22	24	23.00	1.00	1.00	135%	118%	100%	129%	141%	141%	129%	112%	118%	118%	112%
33	15	18	16.50	1.50	1.50	17	18	17.50	0.50	0.50	17	23	20.00	3.00	3.00	121%	114%	100%	94%	153%	128%	113%	94%	120%	100%	113%
			16.89	1.44	1.38	17.00	19.27	18.17	1.17	1.11	19.82	22.18	20.91			125%	115%	100%	109%	146%	123%	131%	94%	127%	106%	112%
																			127%				110%			

Hauteur	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM								FLUO				DEL						
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN			
1	54	57	55.67	1.67	1.33	52	59	55.33	3.33	3.67	47	52	49.33	2.33	2.67				94%	93%	100%	87%	106%	95%	97%	92%	116%	104%	103%
3	68	76	72.00	4.00	4.00	70	79	73.00	3.00	6.00	66	72	68.00	2.00	4.00	101%			91%	112%	100%	102%	91%	118%	105%	102%			
7	89	100	93.00	4.00	7.00	91	105	96.00	5.00	9.00	91	100	94.33	3.33	5.67	94%	98%	100%	91%	112%	100%	100%	91%	118%	105%	102%			
10	113	124	117.00	4.00	7.00	111	125	116.33	5.33	8.67	114	121	116.33	2.33	4.67	99%	100%	100%	92%	107%	98%	101%	90%	111%	101%	98%			
14	130	148	138.33	8.33	9.67	132	148	137.67	5.67	10.33	141	149	143.67	2.67	5.33	104%	104%	100%	95%	115%	101%	100%	89%	114%	100%	102%			
17	147	167	156.33	9.33	10.67	151	166	156.00	5.00	10.00	159	168	164.00	5.00	4.00	105%	105%	100%	95%	114%	101%	108%	90%	113%	99%	103%			
21	162	187	173.67	11.67	13.33	171	189	178.00	7.00	11.00	185	195	190.33	5.33	4.67	110%	107%	100%	99%	120%	104%	114%	91%	117%	101%	106%			
24	180	206	192.00	12.00	14.00	191	206	196.67	5.67	9.33	206	218	212.33	6.33	5.67	111%	108%	100%	100%	121%	106%	114%	93%	114%	100%	106%			
27	195	207	201.00	6.00	6.00	212	215	213.50	1.50	1.50	230	237	233.50	3.50	3.50	116%	109%	100%	111%	122%	114%	118%	102%	110%	104%	109%			
31	212	224	218.00	6.00	6.00	232	234	233.00	1.00	1.00	252	261	256.50	4.50	4.50	118%	110%	100%	113%	123%	117%	119%	104%	110%	104%	109%			
33	227	242	234.50	7.50	7.50	250	251	250.50	0.50	0.50	269	284	276.50	7.50	7.50	118%	110%	100%	111%	125%	117%	119%	103%	111%	104%	110%			
			150.14	6.77	7.86	151.18	161.55	155.09	3.91	6.45	160.00	168.82	164.08			108%			99%	117%	105%	110%	95%	113%	102%	105%			
																			108%				104%						

Largeur Feuille	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM								FLUO				DEL						
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN			
1	19	20	19.33	0.33	0.67	19	20	19.33	0.33	0.67	18	22	19.33	1.33	2.67				103%	106%	100%	83%	125%	109%	95%	83%	115%	100%	95%
3	20	23	21.67	1.67	1.33	19	23	21.00	2.00	2.00	19	25	22.33	3.33	2.67	103%			83%	108%	108%	83%	83%	108%	108%	83%			
7	24	24	24.00	0.00	0.00	20	26	23.00	3.00	3.00	20	26	23.00	3.00	3.00	96%	100%	100%	83%	108%	108%	83%	83%	108%	108%	83%			
10	17	21	18.33	1.33	2.67	18	19	18.67	0.67	0.33	24	29	25.67	1.67	3.33	140%	138%	100%	114%	171%	138%	141%	86%	112%	90%	106%			
14	19	25	21.00	2.00	4.00	18	23	20.00	2.00	3.00	17	25	21.00	4.00	4.00	100%	105%	100%	68%	132%	100%	89%	72%	121%	92%	95%			
17	21	21	21.00	0.00	0.00	23	24	23.67	0.67	0.33	19	22	20.67	1.67	1.33	98%	87%	100%	90%	105%	105%	90%	110%	114%	114%	110%			
21	22	24	22.67	0.67	1.33	24	26	25.00	1.00	1.00	21	25	22.67	1.67	2.33	100%	91%	100%	88%	114%	104%	95%	100%	118%	108%	109%			
24	23	25	23.67	0.67	1.33	23	27	24.33	1.33	2.67	23	27	25.00	2.00	2.00	106%	103%	100%	92%	117%	108%	100%	92%	117%	108%	100%			
27	25	27	26.00	1.00	1.00	21	24	22.50	1.50	1.50	26	27	26.50	0.50	0.50	102%	118%	100%	96%	108%	100%	104%	78%	96%	89%	84%			
31	22	22	22.00	0.00	0.00	23	25	24.00	1.00	1.00	18	27	22.50	4.50	4.50	102%	94%	100%	82%	123%	123%	82%	105%	114%	114%	105%			
33	22	22	22.00	0.00	0.00	21	24	22.50	1.50	1.50	22	22	22.00	0.00	0.00	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	109%	109%	95%			
			21.97	0.70	1.12	20.82	23.73	22.18	1.36	1.55	20.64	25.18	22.79			105%	104%	100%	90%	120%	109%	98%	90%	112%	103%	98%			
																			104%				101%						

Longueur Feuille	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM								FLUO				DEL						
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN			
1	20	21	20.67	0.67	0.33	21	22	21.67	0.67	0.33	18	23	20.33	2.33	2.67				95%	100%	100%	88%	104%	104%	88%	92%	96%	96%	92%
3	25	25	25.00	0.00	0.00	23	24	23.67	0.67	0.33	22	26	23.67	1.67	2.33	99%	105%	100%	93%	108%	104%	96%	89%	100%	96%	92%			
7	26	27	26.67	0.67	0.33	24	26	25.00	1.00	1.00	25	28	26.33	1.33	1.67	103%	103%	100%	113%	143%	130%	124%	100%	110%	100%	110%			
10	21	23	22.00	1.00	1.00	23	23	23.00	0.00	0.00	26	30	28.33	2.33	1.67	129%	123%	100%	85%	127%	104%								
14	22	27	24.00	2.00	3.00	24	25	24.67	0.67	0.33	23	28	24.67	1.67	3.33	103%	100%	100%	85%	127%	104%	105%	89%	114%	93%	109%			
17	24	24	24.00	0.00	0.00	23	26	25.00	2.00	1.00	22	24	23.33	1.33	0.67	97%	93%	100%	92%	100%	100%	92%	96%	108%	108%	96%			
21	22	27	24.33	2.33	2.67	24	28	26.00	2.00	2.00	23	26	25.00	2.00	1.00	103%	96%	100%	85%	118%	96%	105%	89%	127%	104%	109%			
24	24	29	25.67	1.67	3.33	22	30	25.67	3.67	4.33	25	29	27.67	2.67	1.33	108%	108%	100%	86%	121%	104%	104%	76%	125%	103%	92%			
27	27	27	27.00	0.00	0.00	24	26	25.00	1.00	1.00	29	30	29.50	0.50	0.50	109%	118%	100%	107%	111%	111%	107%	89%	96%	96%	89%			
31	23	24	23.50	0.50	0.50	27	28	27.50	0.50	0.50	20	31	25.50	0.50	5.50	109%	93%	100%	83%	113%	129%	87%	113%	122%	117%	117%			
33	23	24	24.50	0.50	0.50	24	30	27.00	3.00	3.00	23	24	23.50	0.50	0.50	96%	87%	100%	92%	100%	96%	96%	96%	125%	120%	100%			
			24.30	0.85	1.06	23.55	26.18	24.92	1.38	1.26	23.27	27.18	25.26			105%	102%	100%	92%	117%	107%	100%	93%	112%	103%	101%			
																			104%				102%						

Vigueur	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM								FLUO				DEL			
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX																			

Calculs pour la laitue frisée

Croissance	TB Flux					TB DEL					SOLLUM				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
3	17	18	17.67	0.67	0.33	15	16	15.33	0.33	0.67	17	19	18.00	1.00	1.00
7	16	21	18.00	2.00	3.00	14	16	15.00	1.00	1.00	18	23	22.67	0.67	0.33
10	20	25	22.33	2.33	2.67	14	15	14.33	0.33	0.67	22	30	19.00	1.00	1.00
14	22	25	23.33	1.33	1.67	14	16	15.00	1.00	1.00	22	34	21.00	1.00	1.00
17	19	23	20.67	1.67	2.33	15	16	15.33	0.33	0.67	19	21	20.00	1.00	1.00
21	15	18	16.00	1.00	2.00	16	19	17.33	1.33	1.67	21	23	22.00	1.00	1.00
24	16	18	17.00	1.00	1.00	15	18	16.67	1.67	1.33	19	20	19.67	0.67	0.33
27	15	16	15.50	0.50	0.50	14	15	14.50	0.50	0.50	19	21	20.00	1.00	1.00
31	15	15	15.00	0.00	0.00	15	16	15.50	0.50	0.50	21	21	21.00	0.00	0.00
33	15	16	15.50	0.50	0.50	17	18	17.50	0.50	0.50	19	21	20.00	1.00	1.00

% Comparaison Sollum pr Flux	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Flux P/R Flux	FLUO			DEL - Flux			
			MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX
102%	117%	100%	94%	112%	106%	103%	83%	94%	89%
126%	151%	100%	105%	144%	110%	138%	67%	100%	76%
85%	133%	100%	72%	100%	80%	80%	56%	75%	60%
99%	153%	100%	86%	109%	106%	103%	56%	73%	64%
97%	130%	100%	83%	111%	91%	103%	65%	84%	70%
138%	127%	100%	117%	153%	128%	140%	89%	127%	106%
116%	118%	100%	100%	125%	111%	119%	83%	113%	100%
129%	138%	100%	110%	143%	121%	127%	86%	100%	94%
140%	155%	100%	140%	140%	140%	140%	100%	107%	100%
129%	114%	100%	119%	140%	131%	127%	106%	120%	113%
116%	132%	100%	104%	127%	112%	118%	79%	99%	88%
			125%				89%		

Hauteur	TB Flux					TB DEL					SOLLUM				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +
1	52	56	54.00	2.00	2.00	53	58	55.00	2.00	3.00	51	62	57.67	6.67	4.33
3	69	74	71.67	2.67	2.33	69	73	70.33	1.33	2.67	70	80	75.67	5.67	4.33
7	86	96	89.67	2.67	5.33	83	89	86.33	2.33	3.67	91	103	96.33	5.33	4.67
10	108	120	112.00	4.00	8.00	98	103	99.67	1.67	3.33	113	122	117.33	4.33	4.67
14	130	140	135.33	5.33	9.67	112	119	114.67	2.67	4.33	137	145	140.33	3.33	4.67
17	149	160	156.00	7.00	12.00	128	134	130.00	2.00	4.00	158	164	160.33	2.33	3.67
21	164	186	172.00	8.00	14.00	144	153	147.33	3.33	5.67	179	186	182.33	3.33	3.67
24	189	204	196.00	9.00	15.00	161	168	164.00	3.00	4.00	199	205	202.00	3.00	3.00
27	196	199	197.00	1.00	1.00	176	177	176.50	0.50	0.50	220	221	220.50	0.50	0.50
31	211	211	212.00	1.00	1.00	191	193	192.00	1.00	1.00	241	242	241.50	0.50	0.50
33	226	229	227.50	1.50	1.50	208	211	209.50	1.50	1.50	261	262	261.50	0.50	0.50

% Comparaison Sollum pr Flux	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Flux P/R Flux	FLUO			DEL			
			MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX
100%	100%	100%	95%	116%	108%	103%	93%	100%	99%
110%	115%	100%	98%	123%	108%	107%	103%	94%	97%
103%	118%	100%	94%	113%	102%	103%	82%	95%	86%
104%	122%	100%	94%	112%	100%	105%	77%	92%	82%
103%	126%	100%	94%	110%	98%	106%	76%	90%	80%
107%	124%	100%	96%	113%	100%	109%	77%	93%	82%
107%	123%	100%	96%	114%	103%	111%	79%	93%	82%
112%	125%	100%	111%	113%	112%	112%	89%	90%	89%
114%	126%	100%	113%	115%	114%	114%	90%	91%	91%
115%	126%	100%	114%	116%	114%	115%	91%	93%	92%
108%	121%	100%	103%	114%	108%	108%	90%	90%	91%
			107%				89%		

Largeur Feuille	TB Flux					TB DEL					SOLLUM				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +
1	25	29	26.33	1.33	2.67	30	32	30.67	0.67	1.33	31	33	32.00	3.00	1.00
3	29	30	29.33	0.33	0.67	32	35	30.67	1.67	1.33	33	34	33.33	0.33	0.67
7	30	32	31.33	0.67	36	37	36.33	0.33	0.67	35	36	35.33	0.33	0.67	
10	32	32	32.00	0.00	0.00	38	41	39.33	1.33	1.67	36	37	36.67	0.67	0.33
14	27	38	30.67	3.67	7.33	28	32	30.33	2.33	1.67	30	31	30.33	0.33	0.67
17	30	30	30.00	0.00	0.00	32	35	31.67	1.67	1.33	34	38	35.33	1.33	2.67
21	31	31	31.00	0.00	0.00	33	40	37.00	4.00	3.00	38	45	40.67	2.67	4.33
24	32	32	32.00	0.00	0.00	36	43	39.67	3.67	3.33	33	39	35.33	2.33	3.67
27	28	28	28.00	0.00	0.00	35	36	35.50	0.50	0.50	33	35	34.00	1.00	1.00
31	30	30	30.00	0.00	0.00	38	39	38.50	0.50	0.50	35	38	36.50	1.50	1.50
33	30	30	30.00	0.00	0.00	33	35	34.00	1.00	1.00	32	35	33.50	1.50	1.50

% Comparaison Sollum pr Flux	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Flux P/R Flux	FLUO			DEL			
			MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX
114%	97%	100%	110%	117%	111%	114%	107%	121%	117%
110%	99%	100%	109%	120%	113%	117%	113%	123%	110%
115%	93%	100%	111%	116%	110%	113%	119%	128%	119%
99%	100%	100%	79%	115%	82%	111%	74%	119%	84%
118%	105%	100%	111%	127%	127%	117%	112%	117%	107%
131%	110%	100%	123%	145%	145%	123%	106%	129%	106%
110%	89%	100%	103%	122%	103%	115%	134%	134%	113%
121%	96%	100%	118%	125%	125%	118%	125%	129%	129%
122%	95%	100%	117%	127%	127%	117%	127%	130%	127%
112%	99%	100%	107%	117%	117%	107%	110%	117%	110%
115%	98%	100%	109%	123%	119%	113%	123%	120%	114%
			116%				117%		

Longeur Feuille	TB Flux					TB DEL					SOLLUM				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +
1	68	70	68.67	0.67	1.33	59	71	63.33	4.33	7.67	62	69	66.33	4.33	2.67
3	74	74	74.00	0.00	0.00	63	73	67.33	4.33	5.67	66	72	69.33	3.33	2.67
7	76	79	77.00	1.00	2.00	64	76	69.00	5.00	7.00	70	78	75.00	5.00	3.00
10	77	84	79.25	2.25	4.57	67	78	71.67	4.67	6.33	72	83	79.25	6.25	4.67
14	66	68	66.67	0.67	1.33	64	65	64.33	0.33	0.67	61	63	62.00	1.00	1.00
17	73	73	73.00	0.00	0.00	68	69	68.67	0.67	0.33	68	77	74.00	6.00	3.00
21	76	77	76.33	0.33	0.67	70	73	71.33	1.33	1.67	75	84	80.33	5.33	3.67
24	77	80	78.00	1.00	2.00	69	76	73.33	4.33	2.67	66	80	70.67	4.67	9.33
27	66	66	66.00	0.00	0.00	67	68	67.50	0.50	0.50	62	76	69.00	7.00	7.00
31	71	71	71.00	0.00	0.00	70	71	70.50	0.50	0.50	71	84	77.50	6.50	6.00
33	74	74	74.00	0.00	0.00	67	69	68.00	1.00	1.00	63	73	68.00	5.00	5.00

% Comparaison Sollum pr Flux	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Flux P/R Flux	FLUO			DEL			
			MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX
94%	103%	100%	89%	97%	97%	89%	85%	99%	85%
97%	109%	100%	89%	103%	99%	92%	81%	100%	94%
99%	109%	100%	86%	108%	99%	94%	80%	101%	93%
101%	90%	100%	90%	95%	92%	94%	90%	96%	97%
102%	93%	100%	93%	105%	105%	93%	93%	95%	93%
105%	91%	100%	97%	111%	109%	99%	91%	96%	92%
91%	96%	100%	83%	104%	103%	86%	86%	99%	90%
105%	102%	100%	94%	115%	115%	94%	102%	103%	102%
109%	110%	100%	118%	118%	100%	99%	100%	100%	99%
92%	100%	100%	85%	99%	99%	83%	91%	93%	91%
99%	105%	100%	96%	106%	103%	92%	96%	94%	92%
			96%				94%		

Vigueur	TB Flux					TB DEL					SOLLUM					
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	
1	2	2	2.00	0.00	0.00	2	3	2.33	0.33	0.67	2	2	2.00	0.00	0.00	
	3	2	2.00	0.00	0.00	4	3	3.33	0.33	0.67	2	3	2.33	0.33	0.67	
	2	2	2.00	0.00	0.00	4	5	4.33	0.33	0.67	3	3	3.00	0.00	0.00	
	7	3	3.00	0.00	0.00	5	5	5.00	0.00	0.00	3	3	3.00	0.00	0.00	
	3	2	2.00	0.00	0.00	7	4	4.33	0.33	0.67	3	3	3.00	0.00	0.00	
	3	3	3.00	0.00	0.00	7	7	7.00	0.00	0.00	4	5	4.33	0.33	0.67	
	21	4	4	4.00	0.00	0.00	7	8	7.33	0.33	0.67	5	5	5.00	0.00	0.00
	4	4	4.00	0.00	0.00	8	8	8.00	0.00	0.00	6	7	6.50	0.50	0.50	
	7	5	5.00	0.00	0.00	8	8	8.00	0.00	0.00	6	7	6.50	0.50	0.50	
	31	6	6	6.00	0.00	0.00	8	9	8.50	0.50	0.50	7	7	7.00	0.00	0.00
3	6	6	6.00	0.00	0.00	9	9	9.00	0.00	0.00	8	8	8.00	0.00	0.00	
	164	164	164.00	0.00	0.00	429	429	429.00	0.00	0.00	435	435	435.00	0.00	0.00	

Calculs pour la ciboulette

Crescence	TB Fluo					TB DEL					SOLLUM					% Comparaison Sollum pr Fluo	% Comparaison Sollum pr DEL	% Comparaison Fluo P/R Fluo	FLUO				DEL Fluo				
	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +	MIN	MAX	AVG	Error -	Error +				MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	MINIMAX	MAXIMIN	MAXIMAX	MINIMIN	
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	90%	98%	100%	81%	800%	93%	85%	80%	100%	95%	90%	
3	20	21	20.33	0.33	0.07	18	20	18.67	0.67	1.33	17	20	18.33	1.33	1.67	101%	109%	100%	85%	119%	96%	105%	77%	114%	92%	95%	
7	21	26	22.67	1.67	3.33	20	24	21.33	1.33	2.67	22	25	23.33	1.33	1.67	102%	110%	100%	95%	100%	100%	100%	89%	94%	89%	94%	
10	18	19	18.33	0.33	0.67	17	17	17.00	0.00	0.00	18	19	18.67	0.67	0.33	111%	121%	100%	103%	120%	104%	113%	78%	110%	96%	90%	
14	20	21	21.00	1.00	2.00	18	22	19.33	1.33	2.67	23	24	23.33	0.33	0.67	144%	121%	100%	144%	144%	144%	144%	144%	144%	144%	144%	
17	19	19	19.00	0.00	0.00	19	21	19.67	0.67	1.33	19	23	21.33	2.33	1.67	112%	108%	100%	103%	121%	121%	105%	100%	111%	111%	100%	
21	16	19	18.00	2.00	1.00	19	23	20.33	1.33	2.67	24	27	25.00	1.00	2.00	119%	123%	100%	126%	169%	142%	150%	100%	144%	121%	119%	
24	16	16	16.00	0.00	0.00	18	20	18.67	0.67	1.33	23	24	23.67	0.67	0.33	148%	127%	100%	144%	150%	150%	144%	113%	125%	113%	113%	
27	16	16	16.00	0.00	0.00	19	19	19.00	0.00	0.00	23	23	23.00	0.00	0.00	144%	121%	100%	144%	144%	144%	144%	119%	119%	119%	119%	
31	16	16	16.00	0.00	0.00	17	17	17.00	0.00	0.00	24	24	24.00	0.00	0.00	150%	141%	100%	150%	150%	150%	150%	100%	100%	100%	100%	
33	15	15	15.00	0.00	0.00	19	19	19.00	0.00	0.00	23	24	23.50	0.50	0.50	157%	124%	100%	153%	160%	160%	153%	127%	127%	127%	127%	
																128%	118%	100%	128%	134%	126%	125%	107%	115%	108%	105%	
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							
																128%				107%							

Suivis de la croissance des fruits de jalapeño

	Distance	μE
Poivron 1	33.0	26.0
Poivron 2	13.0	108.0
	Longeur 1	Longeur 2
2017-03-01	2	1.7
2017-03-02	2.2	2.4
2017-03-03	2.7	2.8
2017-03-06	3.3	3.9
2017-03-07	3.5	4.2
2017-03-08	3.8	4.3
2017-03-09	3.9	4.5
2017-03-10	4	4.7
2017-03-13	4	5
2017-03-14	4.1	5.3
2017-03-16	4.2	5.6
2017-03-17	4.3	5.6
2017-03-20	4.3	5.7
2017-03-21	4.3	5.8
2017-03-22	4.4	5.8
2017-03-23	4.5	5.8
2017-03-24	4.6	5.9
2017-03-27	4.7	6
2017-03-28	4.7	6
2017-03-29	4.7	6
2017-03-30	4.7	6
2017-04-03	4.7	6
2017-04-04	4.7	6
2017-04-05	4.7	6
2017-04-06	4.7	6
2017-04-07	4.7	6
2017-04-08	4.7	6

ANNEXE II

CODE MATLAB

Pour faire l'analyse spectrale, plusieurs codes Matlab ont été créés pour faciliter l'analyse. Les codes sources sont annexés dans cette section.

Caracterisation.m

```

%% spatial non-uniformity of irradiance
%-----
%% CLEAN - Nettoyage
clear; close all; clc

%% DEFINE - Variables
% Lecture du dossier
LocalPath = 'd:\Users\Me\OneDrive\01_0S\99_Maitrise\02_Memoire\Donn';

[Path] = uigetdir(LocalPath, 'Dossier Donn');
dir2read = dir(Path);
dir2read = dir2read(3:end);

%% LOAD - Bundle by Sample

parfor j = 1:size(dir2read,1)
    Data = fileread([Path , '\ ' , dir2read(j).name]);
    Data = strrep(Data, ',', '.');
    FID = fopen([Path , '\ ' , dir2read(j).name], 'w');
    fwrite(FID, Data, 'char');
    fclose(FID);
end

%% Load files
IntensityData = [];

[wavelength,~] = importspectrofile([Path , '\ ' , dir2read(1).name]);
parfor iter = 1:size(dir2read,1)
    [~,IntensityData(:,iter)] = importspectrofile([Path , '\ ' ,
dir2read(iter).name],18,2065);
end

%% Traitement
% Annulation du bruit
IntensityData(IntensityData<0) = 0;
IntensityData(1:63,:) = 0;

%% Mesure de Variation Temp

% Data = [min(IntensityData,[],2),
max(IntensityData,[],2),mean(IntensityData,2)];
Tolerance = [mean(IntensityData,2)*1.02, mean(IntensityData,2)*.98,...
             mean(IntensityData,2)*1.05,
             mean(IntensityData,2)*.95,...
             mean(IntensityData,2)*1.1,
             mean(IntensityData,2)*.90];
%
% Variation = (max(IntensityData,[],2) - min(IntensityData,[],2)) ./
(max(IntensityData,[],2)+min(IntensityData,[],2));
% Variation(isnan(Variation)) = 0;
% VariationDiff = diff(Variation);

```



```

%% Exemple de variation
index = 585; % 555nm
x = linspace(1,1000, size(IntensityData,2))';

TIE = 100 .* (max(IntensityData(index,:)) - min(IntensityData(index,:)))
./ ...
      (max(IntensityData(index,:)) +
min(IntensityData(index,:)))

Temp = IntensityData(index,:);
IntTemp = IntensityData(index,:);
IntTemp(IntTemp == max(IntTemp)) = [];
IntTemp(IntTemp == min(IntTemp)) = [];

TIEmoy = 100 .* (max(IntTemp) - min(IntTemp)) ./ ...
      (max(IntTemp) + min(IntTemp))

%% Plot
% figure(1);
% h = plot(wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,1), 'g', ...
wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,2), 'g', ...
%          wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,3), 'y', ...
wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,4), 'y', ...
%          wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,5), 'r', ...
wavelength(215:1001), Tolerance(215:1001,6), 'r', ...
%          wavelength(215:1001), IntensityData(215:1001), '.k');
% xlabel('wavelength (nm)');
% ylabel('Intensite' );
% title('Variation temporel')

figure(2);
plot(x, IntensityData(index,:), 'ok', ...
      x, Tolerance(index,1)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'g', ...
      x, Tolerance(index,2)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'g', ...
      x,Tolerance(index,3)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'y', ...
      x,Tolerance(index,4)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'y', ...
      x,Tolerance(index,5)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'r', ...
      x,Tolerance(index,6)*ones(1,size(IntensityData,2)), 'r');
xlabel('nombre de test');
ylabel('Intensite';
title('variation temporal 550nm');

```

DrawFOV.m

```
%% Field of View
%-----
%% CLEAN - Nettoyage
clear; close all; clc

%% DEFINE - Variables

X = 0;
Y = 0;
Sollum.a = 43.93;
Sollum.b = 43.93;
DEL.a = 104.66;
DEL.b = 19.48;
Horticole.a = 104.66;
Horticole.b = 87.12;

%% Draw Ellipse

pdeellip(X,Y,Sollum.a,Sollum.b);
```

FOV.m

```

%% Field of View
%-----
%% CLEAN - Nettoyage
clear; close all; clc

%% DEFINE - Variables
% Lecture du dossier
LocalPath = 'd:\Users\Me\OneDrive\01_0S\99_Maitrise\02_Memoire\Donn';

[Path] = uigetdir(LocalPath, 'Dossier Donn');
dir2read = dir(Path);
dir2read = dir2read(3:end);

%% LOAD - Bundle by Sample

parfor j = 1:size(dir2read,1)
    Data = fileread([Path , '\' , dir2read(j).name]);
    Data = strrep(Data, ',', '.');
    FID = fopen([Path , '\' , dir2read(j).name], 'w');
    fwrite(FID, Data, 'char');
    fclose(FID);
end

%% Load files
IntensityData = [];

[wavelength,~] = importspectrofile([Path , '\' , dir2read(1).name]);
parfor iter = 1:size(dir2read,1)
    [~,IntensityData(:,iter)] = importspectrofile([Path , '\' ,
dir2read(iter).name],18,2065);
end

%% Traitement
% Annulation du bruit
IntensityData(IntensityData<0) = 0;
IntensityData(1:63,:) = 0;

%% Mesure - Filed of view
DistanceSource = 30;

Distanceplus =
linspace(0,5*size(IntensityData,2),size(IntensityData,2)+1);
Distanceminus = linspace(-
5*size(IntensityData,2),0,size(IntensityData,2)+1);

IntensityAngle = sum(IntensityData);
IntensityAngle = [IntensityAngle IntensityAngle(size(IntensityAngle,2))];
TotalAngle = [fliplr(IntensityAngle) IntensityAngle];
TotalAngle = TotalAngle/max(TotalAngle);
Distance = [Distanceminus Distanceplus];
angleDistance = rad2deg(atan(Distance/DistanceSource));

%% Classification

```

```

GetData= [angleDistance' TotalAngle'];

%% plot
figure(1)
plot(angleDistance, TotalAngle, '-ok', ...
      angleDistance,
      (max(TotalAngle)*.98)*ones(1,size(angleDistance,2)), 'g', ...
      angleDistance,
      (max(TotalAngle)*.95)*ones(1,size(angleDistance,2)), 'y', ...
      angleDistance,
      (max(TotalAngle)*.90)*ones(1,size(angleDistance,2)), 'r');

xlabel('Angle de vue (°)');
ylabel('Intensité relative');
title('Angle de vue')

```

GetAllTemp.m

```

%% All Temperature K
%-----
%% CLEAN - Nettoyage
clear; close all; clc

%% DEFINE - Variables
% Lecture du dossier
LocalPath = 'd:\Users\Me\OneDrive\01_ϕS\99_Maitrise\02_Memoire\Donn飗';

[Path] = uigetdir(LocalPath,'Dossier Donn飗');
dir2read = dir(Path);
dir2read = dir2read(3:end);

%% LOAD - Bundle by Sample

parfor j = 1:size(dir2read,1)
    Data = fileread([Path , '\ ' , dir2read(j).name]);
    Data = strrep(Data, ',', '.');
    FID = fopen([Path , '\ ' , dir2read(j).name], 'w');
    fwrite(FID, Data, 'char');
    fclose(FID);
end

%% Load files
IntensityData = [];

[wavelength,~] = importspectrofile([Path , '\ ' , dir2read(1).name]);
parfor iter = 1:size(dir2read,1)
    [~,IntensityData(:,iter)] = importspectrofile([Path , '\ ' ,
dir2read(iter).name],18,2065);
end

%% Traitement
% Annulation du bruit
IntensityData(IntensityData<0) = 0;
IntensityData(1:63,:) = 0;

x = [1 500];
%% Plot

figure(1)
plot(wavelength(190:1001), IntensityData(190:1001,x));

```

importSolarFile.m

```

function [Wavelength, ratio] = importSolarFile(filename, startRow, endRow)
delimiter = '\t';
if nargin<=2
    startRow = 1;
    endRow = inf;
end

formatSpec = '%f%f%[^\\n\\r]';

fileID = fopen(filename, 'r');

dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'HeaderLines', startRow(1)-1, 'ReturnOnError',
false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'HeaderLines', startRow(block)-
1, 'ReturnOnError', false);
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col}; dataArrayBlock{col}];
    end
end
fclose(fileID);
Wavelength = dataArray{:, 1};
ratio = dataArray{:, 2};

```

importspectrofiles.m

```

function [wavelength,Intensity] = importspectrofile(filename, startRow,
endRow)
%% Initialize variables.
delimiter = '\t';
if nargin<=2
    startRow = 18;
    endRow = 2065;
end

%% Format string for each line of text:
%   column1: double (%f)
%   column2: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f%[^\\n\\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to format string.
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue' ,NaN,'HeaderLines', startRow(1)-1,
'ReturnOnError', false);
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue'
,NaN,'HeaderLines', startRow(block)-1, 'ReturnOnError', false);
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col};dataArrayBlock{col}];
    end
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Allocate imported array to column variable names
wavelength = dataArray{:, 1};
Intensity = dataArray{:, 2};

```

Spectralmatch.m

```

%% spectral match  ratio

%% CLEAN - Nettoyage
clear; close all; clc

%% DEFINE - Variables
% Lecture du dossier
LocalPath = 'd:\Users\Me\OneDrive\01_0S\99_Maitrise\02_Memoire\Donn';

[Path] = uigetdir(LocalPath, 'Dossier Donn');
dir2read = dir(Path);
dir2read = dir2read(3:end);

%% LOAD - Bundle by Sample

parfor j = 1:size(dir2read,1)
    Data = fileread([Path , '\ ' , dir2read(j).name]);
    Data = strrep(Data, ',', '.');
    FID = fopen([Path , '\ ' , dir2read(j).name], 'w');
    fwrite(FID, Data, 'char');
    fclose(FID);
end

%% Load files
IntensityData = [];
[wavelength,~] = importspectrofile([Path , '\ ' , dir2read(1).name]);

parfor iter = 1:size(dir2read,1)
    [~,IntensityData(:,iter)] = importspectrofile([Path , '\ ' ,
dir2read(iter).name],18,2065);
end

%% Load solar file
[file, path] = uigetfile(LocalPath);
[wlsf, ratioSF] = importSolarFile([path file]);

%% Traitement
% Annulation du bruit
IntensityData(IntensityData<0) = 0;
IntensityData(1:63,:) = 0;
IntensityMean = mean(IntensityData,2);

%% Mesure de Variation du Match Spectral
tolval = 0.85;

SolarData = interp1(wlsf, ratioSF,wavelength,'cubic');
SolarDataNorm = (SolarData ./ max(SolarData)) .*
(tolval*max(IntensityMean));

IntensityDiff = (SolarDataNorm - IntensityMean) ./ (SolarDataNorm +
IntensityMean);
IntensityDiffmean = mean(IntensityDiff);

```



```

%% Coupe des longueur d'onde
Section.a = (161:296); % 400 -450 nm
Section.b = (297:433); % 450 -500 nm
Section.c = (434:571); % 500 - 550 nm
Section.d = (572:712); % 550 - 600 nm
Section.e = (713:855); % 600 - 650 nm
Section.f = (856:1001); % 650 - 700 nm

Spectral.Irradiance = [mean(mean(IntensityData(Section.a,:))), ...
mean(mean(IntensityData(Section.b,:))), ...
mean(mean(IntensityData(Section.c,:))), ...
mean(mean(IntensityData(Section.d,:))), ...
mean(mean(IntensityData(Section.e,:))), ...
mean(mean(IntensityData(Section.f,:)))];

Spectral.Solar = [mean(mean(SolarData(Section.a,:))), ...
mean(mean(SolarData(Section.b,:))), ...
mean(mean(SolarData(Section.c,:))), ...
mean(mean(SolarData(Section.d,:))), ...
mean(mean(SolarData(Section.e,:))), ...
mean(mean(SolarData(Section.f,:)))];

Spectral.Validation = Spectral.Irradiance ./ Spectral.Solar;

Tolerance = [0.75, 1.25, 0.6, 1.4, 0.4, 2];

%% Plot
figure(1)
subplot(1,2,1); plot(wavelength(215:1001), SolarDataNorm(215:1001),
wavelength(215:1001), IntensityMean(215:1001));
xlabel('Longueur d\'onde (nm)');
ylabel('Intensiterelative (%)');
title('Comparaison des spectre entre le soleil et le luminaire')
legend('Spectre Solaire','Spectre Luminaire', 'Location', 'Best' );

subplot(1,2,2);
plot([1:1:6], Spectral.Validation, 'ok',...
[1:1:6], Tolerance(1) * ones(6), 'g', ...
[1:1:6], Tolerance(2) * ones(6), 'g', ...
[1:1:6], Tolerance(3) * ones(6), 'y', ...
[1:1:6], Tolerance(4) * ones(6), 'y', ...
[1:1:6], Tolerance(5) * ones(6), 'r', ...
[1:1:6], Tolerance(6) * ones(6), 'r');
xlabel('Longueur d\'onde (nm)');
ylabel('Uniformitespatial (%)');

```

```
title('Non-uniformitespectral')  
legend('Spectre Solaire','Spectre Luminaire','Location', 'Best' );
```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akamatsu, N., H. Nakajima, M. Ono et Y. Miura. 1975. « Increase in acetyl CoA synthetase activity after phenobarbital treatment ». *Biochemical Pharmacology*, vol. 24, n° 18, p. 1725-1727.
- Alexandre-Tétreault, Mathieu et François Roy-Moisan. 2013. *Conception d'un système de vérification de santé de plantes par fluorescence*. École de technologies supérieure, 111 p.
- Archer, Mary D. et James Barber, éd. 2004. *Molecular to global photosynthesis*. Coll. « Series on photoconversion of solar energy », vol. 2. London : Imperial College Press, 764 p.
- Ashdown, Ian. 2014. « Photometry and Photosynthesis ». *Things Light*.
<<http://agi32.com/blog/2014/12/10/photometry-and-photosynthesis/>>. Consulté le 26 juin 2017.
- ASTM International. 2015. *Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing*. ASTM International.
- Baba, Masato, Fumie Kikuta, Iwane Suzuki, Makoto M. Watanabe et Yoshihiro Shiraiwa. 2012. « Wavelength specificity of growth, photosynthesis, and hydrocarbon production in the oil-producing green alga *Botryococcus braunii* ». *Bioresource Technology*, vol. 109, p. 266-270. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.059>>.
- Balázs Kránicz et János Schanda. 2000. « Reevaluation of daylight spectral distributions ». *Color Research and application*, vol. 24, n° 4, p. 250-259.
<[https://doi.org/10.1002/1520-6378\(200008\)25:4<250::AID-COL5>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1520-6378(200008)25:4<250::AID-COL5>3.0.CO;2-D)>.
- Barnes, Charles, Theodore Tibbitts, John Sager, Gerald Deitzer, David Bubenheim, Gus Koerner et Bruce Bugbee. 1993. « Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux ». *HortScience*, vol. 28, n° 12, p. 1197-1200.
- Bioinformatics Organization. 1998. « L'anatomie de l'oeil ».
<<http://www.bioinformatics.org/oeil-couleur/dossier/anatomie.html>>. Consulté le 10 octobre 2015.
- Björn, Lars Olof, éd. 2008. *Photobiology: the science of life and light*, 2nd ed. New York, NY : Springer, 684 p.
- Conn, Simon J., Bradleigh Hocking, Maclin Dayod, Bo Xu, Asmini Athman, Sam Henderson, Lucy Aukett, Vanessa Conn, Monique K. Shearer, Sigfredo Fuentes et others. 2013. « Protocol: optimising hydroponic growth systems for nutritional and physiological analysis of *Arabidopsis thaliana* and other plants ». *Plant methods*, vol. 9, n° 1, p. 4.

- Cope, Kevin R. et Bruce Bugbee. 2011. « Is supplemental green light necessary for plant growth and development? »
<http://cpl.usu.edu/files/publications/poster/pub__3801011.pdf>. Consulté le 24 juillet 2017.
- Cope, Kevin R., M. Chase Snowden et Bruce Bugbee. 2014. « Photobiological Interactions of Blue Light and Photosynthetic Photon Flux: Effects of Monochromatic and Broad-Spectrum Light Sources ». *Photochemistry and Photobiology*, vol. 90, n° 3, p. 574-584.
<<https://doi.org/10.1111/php.12233>>.
- Curcio, Christine A., Kenneth R. Sloan, Robert E. Kalina et Anita E. Hendrickson. 1990. « Human photoreceptor topography ». *Journal of Comparative Neurology*, vol. 292, n° 4, p. 497-523.
- Danny Pascale. 2003. *A review of RGB color spaces ... from xyY to R'G'R'*.
- Dodd, A. N. 2005. « Plant Circadian Clocks Increase Photosynthesis, Growth, Survival, and Competitive Advantage ». *Science*, vol. 309, n° 5734, p. 630-633.
<<https://doi.org/10.1126/science.1115581>>.
- Douglas, A Skoog et MW Donald. 1971. « Principles of instrumental analysis ». *Holt, Rinhart and Winston, New York*, vol. 104.
- Durner, Edward F. 2015. « Photoperiod affects floral ontogeny in strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch.) plug plants ». *Scientia Horticulturae*, vol. 194, p. 154-159.
<<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.006>>.
- Dybkær, R. 1968. « Quantities and Units in Clinical Chemistry ». *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, vol. 6, n° 6. <<https://doi.org/10.1515/cclm.1968.6.6.473>>.
Consulté le 10 septembre 2017.
- Esser, H. 1975. « [Infusion treatment in shock] ». *Infusionstherapie Und Klinische Ernährung*, vol. 2, n° 6, p. 424-428.
- Feltrin, Raquel Partelli, Rodney E. Will, Cassandra R. Meek, Ronald E. Masters, Jack Waymire et Duncan S. Wilson. 2016. « Relationship between photosynthetically active radiation and understory productivity across a forest-savanna continuum ». *Forest Ecology and Management*, vol. 374, p. 51-60.
<<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.049>>.
- Filho, Carvalho, José Luiz S, Arie F. Blank, Péricles B. Alves, Polyana A. D. Ehlert, Alberto S. Melo, Sócrates C. H. Cavalcanti, Maria de Fátima Arrigoni-Blank et Renata Silva-Mann. 2006. « Influence of the harvesting time, temperature and drying period on basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil ». *Revista Brasileira de Farmacognosia*, vol. 16, n° 1, p. 24-30. <<https://doi.org/10.1590/S0102-695X2006000100007>>.

- Fitter, Alastair H. et Robert K. M. Hay. 2012. *Environmental Physiology of Plants*. Academic Press, 396 p.
- Fluence Bioengineering Inc. 2016. « PPFD, PPF, PAR & DLI Light Measurement ». *Fluence Bioeng.* <<https://fluence.science/science/par-ppf-ppfd-dli/>>. Consulté le 30 juin 2017.
- Folta, Kevin M. et Kayla Shea Childers. 2008. « Light as a growth regulator: controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems ». *HortScience*, vol. 43, n° 7, p. 1957–1964.
- Folta, Kevin M. et Stefanie A. Maruhnich. 2007. « Green light: a signal to slow down or stop ». *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, n° 12, p. 3099-3111. <<https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>>.
- Fujiwara, K., T. Sawada, S. Goda, Y. Ando et A. Yano. 2007. « An Led-Artificial Sunlight Source System Available for Light Effects Research In Flower Science ». *Acta Horticulturae*, n° 755, p. 373-380. <<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.755.49>>.
- Fujiwara, Kazuhiro et Akira Yano. 2011. « Controllable spectrum artificial sunlight source system using LEDs with 32 different peak wavelengths of 385-910 nm ». *Bioelectromagnetics*, vol. 32, n° 3, p. 243-252. <<https://doi.org/10.1002/bem.20637>>.
- Gessler, Arthur, Jacques Roy, Zachary Kayler, Juan Pedro Ferrio, Josu G. Alday, Michael Bahn, Jorge del Castillo, Sébastien Devidal, Sonia García-Muñoz, Damien Landais, Paula Martín-Gomez, Alexandru Milcu, Clément Piel, Karin Pirhofer-Walzl, Lucia Galiano, Marcus Schaub, Matthias Haeni, Olivier Ravel, Serajis Salekin, David T. Tissue, Mark G. Tjoelker, Jordi Voltas, Günter Hoch et Víctor Resco de Dios. 2017. « Night and day – Circadian regulation of night-time dark respiration and light-enhanced dark respiration in plant leaves and canopies ». *Environmental and Experimental Botany*, vol. 137, p. 14-25. <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.014>>.
- Gianquinto, G., F. Orsini, M. Fecondini, M. Mezzetti, P. Sambo et S. Bona. 2011. « A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield ». *European Journal of Agronomy*, vol. 35, n° 3, p. 135-143. <<https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.05.005>>.
- Goodspeed, Danielle. 2012. « Plant Defense against Insect Herbivory is Mediated by the Circadian Clock ». Rice University. <<https://scholarship.rice.edu/handle/1911/70251>>. Consulté le 4 avril 2017.
- Gouvernement du Canada, Statistique Canada. 2017. « Indice des prix à la consommation, aliments, par province (Canada) ». <<http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/econ156a-fra.htm>>. Consulté le 9 septembre 2017.

- Govindjee. 2004. « Chlorophyll a Fluorescence: A Bit of Basics and History ». In *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*, sous la dir. de Papageorgiou, George Christos et Govindjee, p. 1-41. Dordrecht : Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_1>.
- Hogewoning, Sander W., Peter Douwstra, Govert Trouwborst, Wim van Ieperen et Jeremy Harbinson. 2010. « An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra ». *Journal of Experimental Botany*, vol. 61, n° 5, p. 1267-1276. <<https://doi.org/10.1093/jxb/erq005>>.
- Hogewoning, Sander W., Emilie Wientjes, Peter Douwstra, Govert Trouwborst, Wim van Ieperen, Roberta Croce et Jeremy Harbinson. 2012. « Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From Photosystems to Leaves[W][OA] ». *The Plant Cell*, vol. 24, n° 5, p. 1921-1935. <<https://doi.org/10.1105/tpc.112.097972>>.
- Hung, Cao Dinh, Chang-Hee Hong, Hyun-Bok Jung, Seon-Ki Kim, Nguyen Van Ket, Min-Woo Nam, Dae-Ho Choi et Hye-In Lee. 2015. « Growth and morphogenesis of encapsulated strawberry shoot tips under mixed LEDs ». *Scientia Horticulturae*, vol. 194, p. 194-200. <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.016>>.
- Internationale Beleuchtungskommission, éd. 2004. *Colorimetry*, 3. ed. Coll. « Technical report / CIE », vol. 15. Vienna : CIE, Central Bureau, 72 p.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida et T. Yoshihara. 2012a. « Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* ». *Environmental and Experimental Botany*, vol. 75, p. 128-133. <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>>.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida et T. Yoshihara. 2012b. « Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* ». *Environmental and Experimental Botany*, vol. 75, p. 128-133. <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>>.
- Bullock, John. 2017. « Two-minute explainer: Horticultural lighting metrics ». <<http://luxreview.com/article/2017/06/two-minute-explainer-horticultural-lighting-metrics>>. Consulté le 30 juin 2017.
- Kami, Chitose, Séverine Lorrain, Patricia Hornitschek et Christian Fankhauser. 2010. « Light-Regulated Plant Growth and Development ». In *Current Topics in Developmental Biology*, p. 29-66. vol. 91. Elsevier. <[https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(10)91002-8)>. Consulté le 10 décembre 2017.
- Kato, Masaharu C., Kouki Hikosaka, Naoki Hirotsu, Amame Makino et Tadaki Hirose. 2003. « The excess light energy that is neither utilized in photosynthesis nor dissipated by photoprotective mechanisms determines the rate of photoinactivation in photosystem II ». *Plant and Cell Physiology*, vol. 44, n° 3, p. 318-325.

- Kê, Bacon. 2001. *Photosynthesis: photobiochemistry and photobiophysics*. Coll. « Advances in photosynthesis », vol. v. 10. Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers, 763 p.
- Kim, Hyeon-Hye, Gregory D. Goins, Raymond M. Wheeler et John C. Sager. 2004. « Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes ». *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, vol. 39, n° 7, p. 1617-1622.
- Kim, Ji Hee, Ae Kyung Lee, Mark S. Roh et Jeung Keun Suh. 2015. « The effect of irradiance and temperature on the growth and flowering of *Sinningia cardinalis* ». *Scientia Horticulturae*, vol. 194, p. 147-153. <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.040>>.
- Klem, Karel, Petr Holub, Michal Štroch, Jakub Nezval, Vladimír Špunda, Jan Tříška, Marcel A.K. Jansen, T. Matthew Robson et Otmar Urban. 2015. « Ultraviolet and photosynthetically active radiation can both induce photoprotective capacity allowing barley to overcome high radiation stress ». *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 93, p. 74-83. <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.01.001>>.
- Lin, Kuan-Hung, Meng-Yuan Huang, Wen-Dar Huang, Ming-Huang Hsu, Zhi-Wei Yang et Chi-Ming Yang. 2013. « The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) ». *Scientia Horticulturae*, vol. 150, p. 86-91. <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>>.
- Mapelli-Brahm, Paula, Joana Corte-Real, Antonio J. Meléndez-Martínez et Torsten Bohn. 2017. « Bioaccessibility of phytoene and phytofluene is superior to other carotenoids from selected fruit and vegetable juices ». *Food Chemistry*, vol. 229, p. 304-311. <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.074>>.
- Massa, Gioia D., Hyeon-Hye Kim, Raymond M. Wheeler et Cary A. Mitchell. 2008. « Plant productivity in response to LED lighting ». *HortScience*, vol. 43, n° 7, p. 1951-1956.
- McClung, C. Robertson. 2006. « Plant Circadian Rhythms ». *The Plant Cell*, vol. 18, n° 4, p. 792-803. <<https://doi.org/10.1105/tpc.106.040980>>.
- McCree, K. J. 1971. « The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants ». *Agricultural Meteorology*, vol. 9, p. 191-216. <[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)>.
- Misra, Amarendra Narayan, Meena Misra et Ranjeet Singh. 2012. « Chlorophyll fluorescence in plant biology ». In *Biophysics*. InTech. <<https://www.intechopen.com/download/pdf/33300>>. Consulté le 25 juin 2017.

- Moss, R. A. et W. E. Loomis. 1952. « Absorption spectra of leaves. I. The visible spectrum ». *Plant Physiology*, vol. 27, n° 2, p. 370.
- Nelson, Jacob A. et Bruce Bugbee. 2014. « Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures ». *PLoS ONE*, vol. 9, n° 6, p. e99010. <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>>.
- Nohales, Maria A et Steve A Kay. 2016. « Molecular mechanisms at the core of the plant circadian oscillator ». *Nature Structural & Molecular Biology*, vol. 23, n° 12, p. 1061-1069. <<https://doi.org/10.1038/nsmb.3327>>.
- Ntinis, G.K., A. Koukounaras et T. Kotsopoulos. 2015. « Effect of energy saving solar sleeves on characteristics of hydroponic tomatoes grown in a greenhouse ». *Scientia Horticulturae*, vol. 194, p. 126-133. <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.013>>.
- Ocean Optics Inc. 2005. *SpectraSuite Spectrometer Operating Software*.
- Ocean Optics Inc. 2017. « Jaz Series ». In *Ocean Optics Inc.*
<<https://oceanoptics.com/product-category/jaz-series/>>. Consulté le 10 septembre 2017.
- OSRAM SYLVANIA inc. 2001. *Gro Lux Gardening and Aquarium*.
- Papageorgiou, George Christos et Govindjee, éd. 2004. *Chlorophyll a Fluorescence*. Coll. « Advances in Photosynthesis and Respiration ». Dordrecht : Springer Netherlands. <<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9>>. Consulté le 25 juin 2017.
- Pawan Kumar. 2014. *General Lighting: Global Markets*.
- Pettai, Hugo, Vello Oja, Arvi Freiberg et Agu Laisk. 2005. « The long-wavelength limit of plant photosynthesis ». *FEBS Letters*, vol. 579, n° 18, p. 4017-4019. <<https://doi.org/10.1016/j.febslet.2005.04.088>>.
- Ptushenko, V.V., O.V. Avercheva, E.M. Bassarskaya, Yu.A. Berkovich, A.N. Erokhin, S.O. Smolyanina et T.V. Zhigalova. 2015. « Possible reasons of a decline in growth of Chinese cabbage under a combined narrowband red and blue light in comparison with illumination by high-pressure sodium lamp ». *Scientia Horticulturae*, vol. 194, p. 267-277. <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.021>>.
- Purves, Dale. 2012. *Neuroscience*. Sunderland, Mass. : Sinauer Associates.
- Rabinowitch, Eugene et Govindjee. 1969. *Photosynthesis*. New York : Wiley, 273 p.
- Saaty, Thomas L. 1990. « How to make a decision: The analytic hierarchy process ». *European Journal of Operational Research*, vol. 48, n° 1, p. 9-26. <[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)>.

- Samuolienė, Giedrė, Akvilė Urbonavičiūtė, Aušra Brazaitytė, Gintarė Šabajevienė, Jurga Sakalauskaitė et Pavelas Duchovskis. 2011. « The impact of LED illumination on antioxidant properties of sprouted seeds ». *Central European Journal of Biology*, vol. 6, n° 1, p. 68-74. <<https://doi.org/10.2478/s11535-010-0094-1>>.
- Sanchez, Sabrina E. et Steve A. Kay. 2016. « The Plant Circadian Clock: From a Simple Timekeeper to a Complex Developmental Manager ». *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, vol. 8, n° 12, p. a027748. <<https://doi.org/10.1101/cshperspect.a027748>>.
- Schanda, János et International Commission on Illumination, éd. 2007. *Colorimetry: understanding the CIE system*. [Vienna, Austria] : Hoboken, N.J : CIE/Commission internationale de l'éclairage ; Wiley-Interscience, 459 p.
- Shevell, Steven K. et Optical Society of America, éd. 2003. *The science of color*, 2nd ed. Amsterdam ; Boston : [United States] : Elsevier ; Optical Society of America, 339 p.
- Silbernagl, Stefan, Agamemnon Despopoulos et Daniel Laurent. 2001. *Atlas de poche de physiologie*. Paris : Flammarion médecine sciences.
- Smart, Richard E., Stephen M. Smith et Robert V. Winchester. 1988. « Light Quality and Quantity Effects on Fruit Ripening for Cabernet Sauvignon ». *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 39, n° 3, p. 250-258.
- Snowden, Michael Chase. 2015. « Effects of Blue and Green Light on Plant Growth and Development at Low and High Photosynthetic Photon Flux ». <<http://digitalcommons.usu.edu/etd/4613/>>. Consulté le 5 avril 2017.
- Somers, David E. 1999. « The physiology and molecular bases of the plant circadian clock ». *Plant Physiology*, vol. 121, n° 1, p. 9–20.
- Standardization, ISO International Organization for et International Commission on Illumination. 1999. *ISO 10526 CIE S 005 00: CIE Standard Illuminants for Colorimetry*. <<https://books.google.ca/books?id=-gCZQwAACAAJ>>.
- Stiles, W.S. et J.M. Burch. 1959. « N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report (1958) ». *Optica Acta: International Journal of Optics*, vol. 6, n° 1, p. 1-26. <<https://doi.org/10.1080/713826267>>.
- Sun, Jindong, John N. Nishio et Thomas C. Vogelmann. 1998. « Green light drives CO₂ fixation deep within leaves ». *Plant and Cell Physiology*, vol. 39, n° 10, p. 1020–1026.
- Tardy, Florence et Michel Havaux. 1996. « Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, light-harvesting system and photoinhibition resistance of a zeaxanthin-dashaccumulating mutant of *Arabidopsis thaliana* ». *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 34, n° 1, p. 87-94. <[https://doi.org/10.1016/1011-1344\(95\)07272-1](https://doi.org/10.1016/1011-1344(95)07272-1)>.

- Taylor, D. et P. Hochstein. 1975. « Tetrahydropterin: reduction of cytochrome c and coupled phosphorylation at mitochondrial site 3 ». *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 67, n° 1, p. 156-162.
- Terashima, I., T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow et R. Oguchi. 2009. « Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green ». *Plant and Cell Physiology*, vol. 50, n° 4, p. 684-697. <<https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>>.
- Tinoco-Ojanguren, C. et R. W. Pearcy. 1995. « A Comparison of Light Quality and Quantity Effects on the Growth and Steady-State and Dynamic Photosynthetic Characteristics of Three Tropical Tree Species ». *Functional Ecology*, vol. 9, n° 2, p. 222-230. <<https://doi.org/10.2307/2390568>>.
- Ustin, Susan L., A.A. Gitelson, Stéphane Jacquemoud, Michael Schaepman, Gregory P. Asner, John A. Gamon et Pablo Zarco-Tejada. 2009a. « Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, p. S67-S77. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.019>>.
- Ustin, Susan L., A.A. Gitelson, Stéphane Jacquemoud, Michael Schaepman, Gregory P. Asner, John A. Gamon et Pablo Zarco-Tejada. 2009b. « Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, p. S67-S77. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.019>>.
- Vergne, Charline. 2016. « Dette écologique: pourquoi vivons-nous désormais à crédit ». *Le Figaro*, (5 août 2016).
- Walter-Shea, E. A. et J. M. Norman. 1991. « Leaf Optical Properties ». In *Photon-Vegetation Interactions*, sous la dir. de Myneni, Ranga B. et Juhan Ross, p. 229-251. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75389-3_8>. Consulté le 27 novembre 2017.
- Wang, Wei. 2012. « Balance Between Plant Growth and Defense: Transcriptional and Translational Control of Plant Immune System ». Duke University. <<https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/6155>>. Consulté le 4 avril 2017.
- W.H.Perron. 2017. *Guide de culture pour semis*. <https://www.dominion-seed-house.com/upload/Guide%20de%20culture_2017.pdf>.
- Wik, Torsten, Anna-Maria Carstensen et Tessa Pocock. 2012. « Greenhouse Artificial Lighting Control ». In *Proceedings 15th Nordic Process Control Workshop*. (2012), p. 130-132. <<http://publications.lib.chalmers.se/publication/169389-greenhouse-artificial-lighting-control>>. Consulté le 24 juin 2017.

- Wikipedia contributors. 2017. *Leaf*. *Wikipedia*.
 <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Leaf&oldid=798978152>>. Consulté le 10 septembre 2017.
- Wyszecki, Günter et W. S. Stiles. 2000. *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae*, Wiley classics library ed. Coll. « Wiley classics library ». New York : John Wiley & Sons, 950 p.
- Yano, Akira et Kazuhiro Fujiwara. 2012. « Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control ». *Plant Methods*, vol. 8, p. 46. <<https://doi.org/10.1186/1746-4811-8-46>>.
- Zempila, Melina-Maria, Michael Taylor, Alkiviadis Bais et Stelios Kazadzis. 2016. « Modeling the relationship between photosynthetically active radiation and global horizontal irradiance using singular spectrum analysis ». *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 182, p. 240-263. <<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.06.003>>.
- Zhang, Tingting, Stefanie A. Maruhnich et Kevin M. Folta. 2011. « Green Light Induces Shade Avoidance Symptoms1[C][W][OA] ». *Plant Physiology*, vol. 157, n° 3, p. 1528-1536. <<https://doi.org/10.1104/pp.111.180661>>.
- Zhou, Xianfeng, Wenjiang Huang, Weiping Kong, Huichun Ye, Yingying Dong et Raffaele Casa. 2017. « Assessment of leaf carotenoids content with a new carotenoid index: Development and validation on experimental and model data ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 57, p. 24-35. <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.005>>.

