

# **Module 17**

## **Éclairage et Horticulture**

**Professeur:**  
**Peer Eric Moldvar**  
Consultant en éclairage  
[peer-eric.moldvar@polymtl.ca](mailto:peer-eric.moldvar@polymtl.ca)



# Module 17:

- Photosynthèse
- Rayonnement photosynthétiquement actif Photosynthetically active radiation (PAR)
- Lumière VS Photosynthetically active radiation (PAR)
- Réponse de l'œil humain à la lumière VS Réponse de la photosynthèse à la lumière

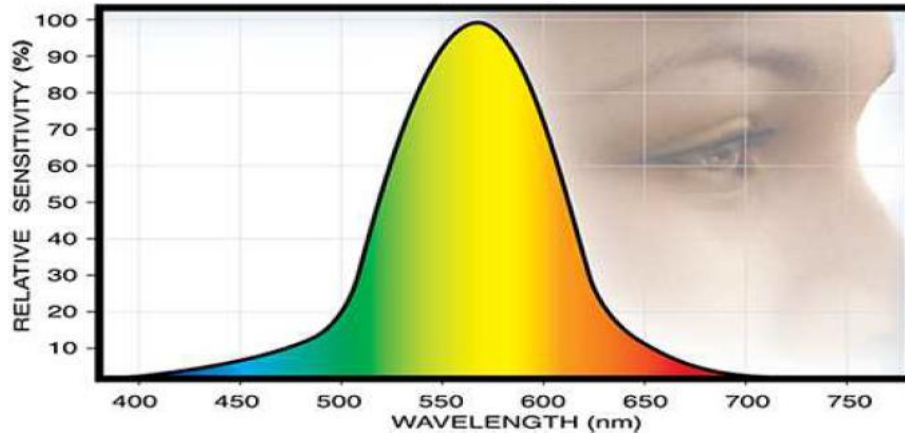


## Photosynthèse

La photosynthèse est le processus utilisé par les plantes pour convertir les rayonnements électromagnétiques - lumière - en énergie chimique utilisée pour la croissance et le développement. Tout ce qui est nécessaire pour ce processus est le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), les éléments nutritifs et l'eau. Le processus lui-même n'est pas particulièrement efficace; Seulement 4 à 6% du rayonnement absorbé est converti en énergie chimique. Pourtant, c'est le moteur qui anime la vie sur cette planète.



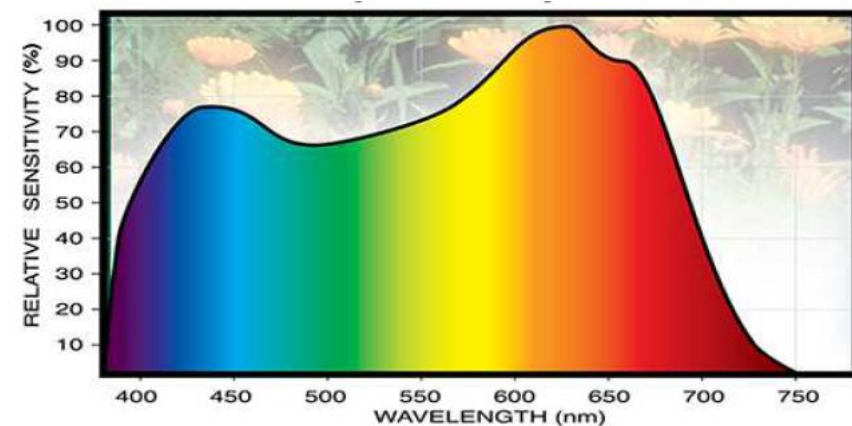
Réponse de l'œil humain à la lumière



## Lumière

On appelle **lumière** l'ensemble des ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde de 380nm (violet) à 780nm (rouge). La lumière est intimement liée à la notion de couleur tel que perçue par l'homme.

Réponse de la photosynthèse à la lumière

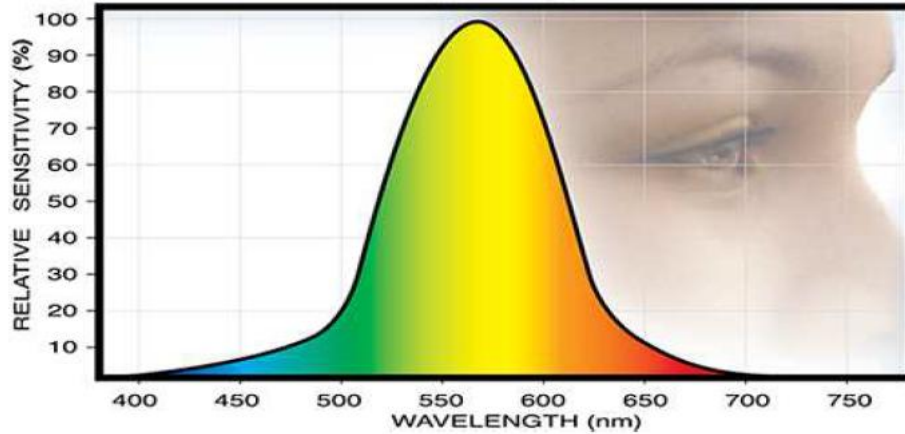


## Photosynthetically active radiation (PAR)

Le rayonnement photosynthétiquement actif Photosynthetically active radiation (PAR) est défini comme un rayonnement électromagnétique sur la plage spectrale de 400 nm à 700 nm que les organismes photosynthétiques peuvent utiliser dans le processus de photosynthèse pour fixer le carbone dans le CO<sub>2</sub> dans les glucides. Les horticulteurs mesurent PAR pour la recherche de plantes et la conception d'éclairage de serre (par exemple, Barnes et al., 1993) en utilisant des photomètres spécialisés (par exemple, Biggs et al., 1971).

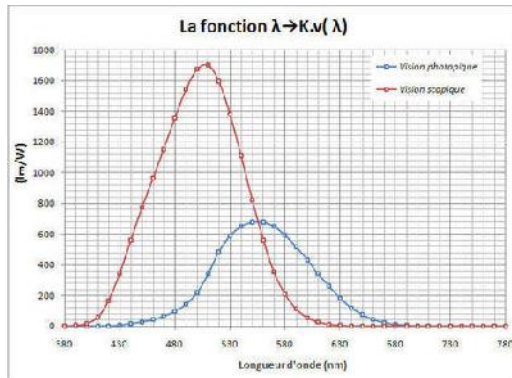
# Éclairage et Horticulture

## Réponse de l'œil humain à la lumière

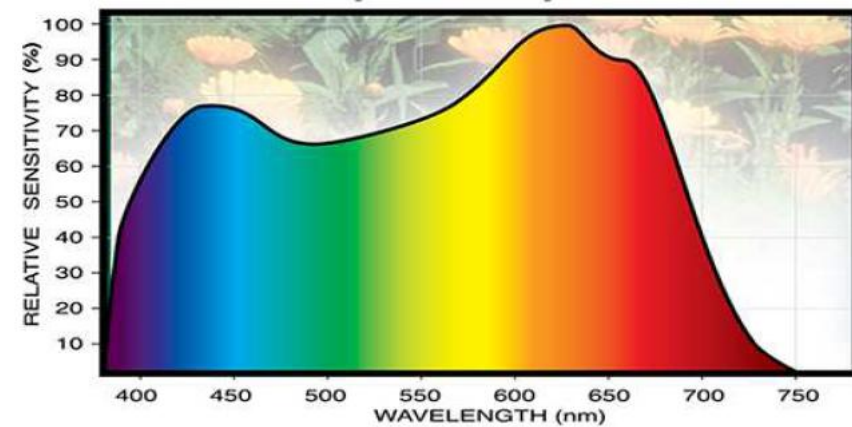


### Récepteur de l'œil

- Cônes
- Bâtonnets
- Ganglions

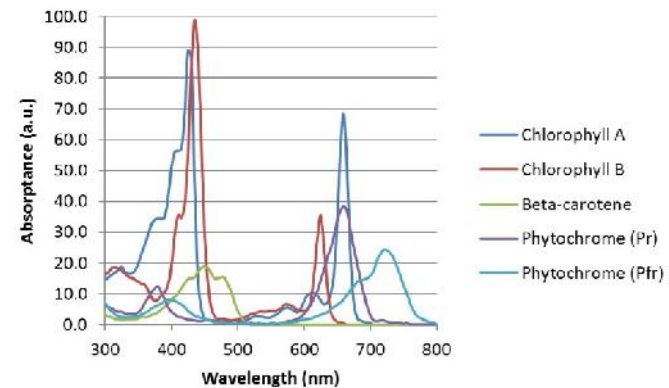


## Réponse de la photosynthèse à la lumière

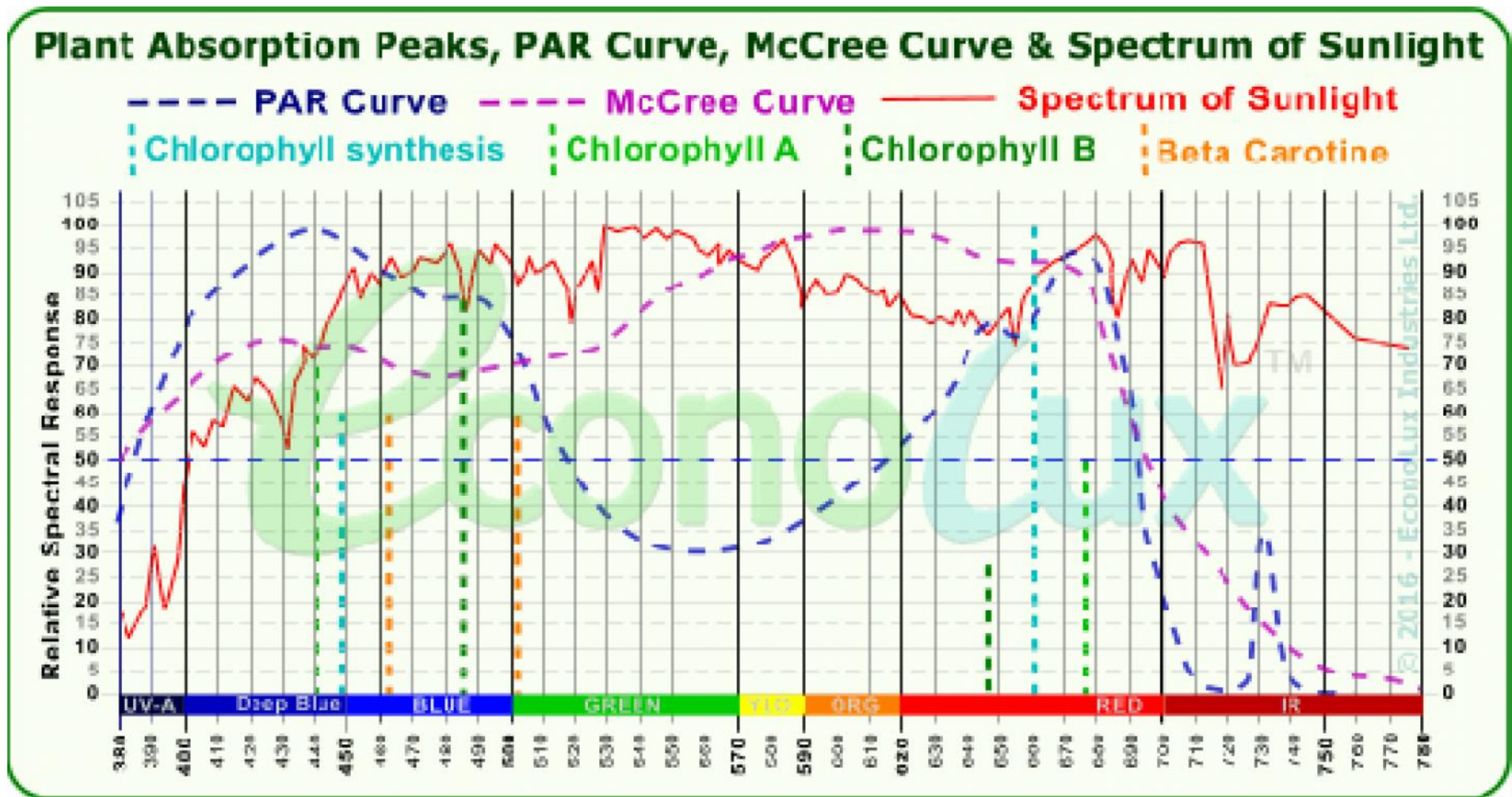


### Récepteur de la photosynthèse

- Chlorophylle A
- Chlorophylle B
- Beta-Carotène
- Phytochrome (Pr)
- Phytochrome (Pfr)

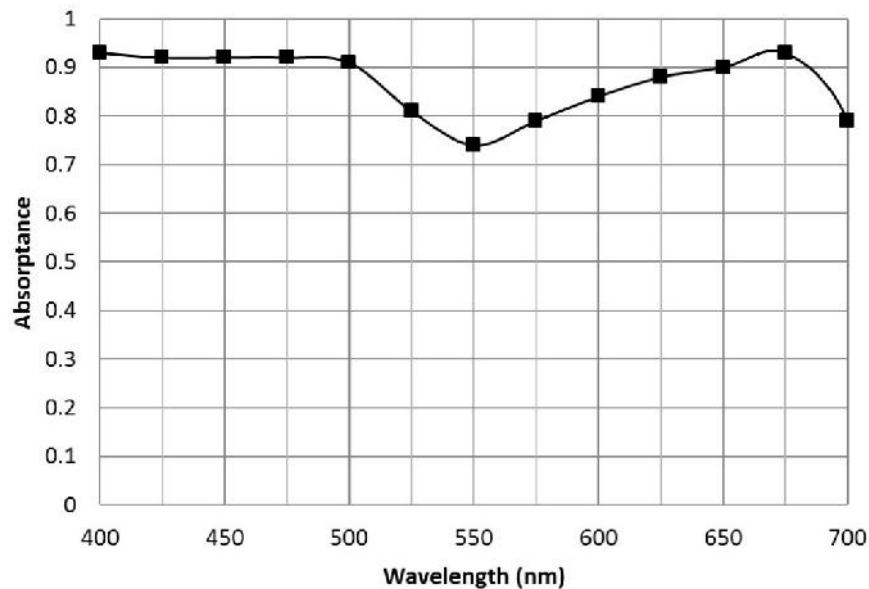


# Éclairage et Horticulture



## Absorption spectrale moyenne des plantes cultivées

McCree (1972a) a mesuré l'absorption spectrale) et le rendement quantique de l'assimilation du CO<sub>2</sub> pour les feuilles de 22 espèces de plantes cultivées . En prenant les mesures moyennes à des intervalles de 25 nm pour toutes les espèces végétales (tableau 1), il a produit le rendement quantique relatif pondéré par photon (tableau 1) qui est représentatif de la plupart des plantes cultivées.

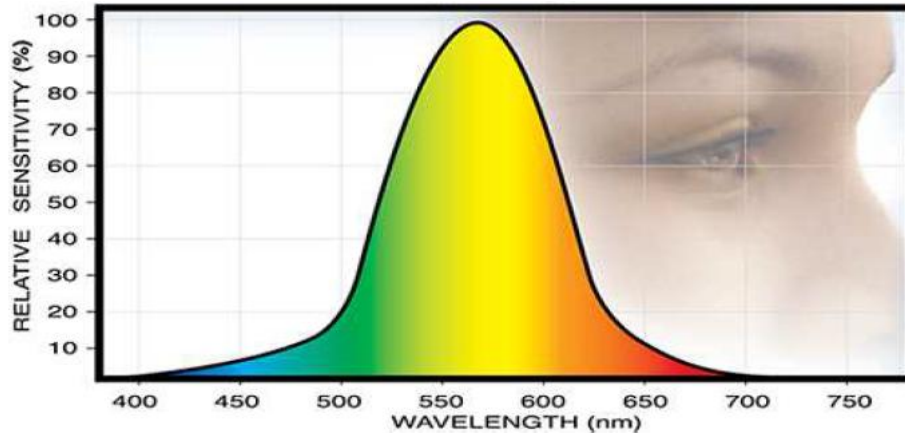


Wavelength (nm)	Relative Spectral Quantum Yield
400	0.42
425	0.68
450	0.70
475	0.63
500	0.65
525	0.72
550	0.82
575	0.91
600	0.97
625	1.00
650	0.90
675	0.90
700	0.48

Table 1 – Relative Quantum Yield (average of 22 field species)



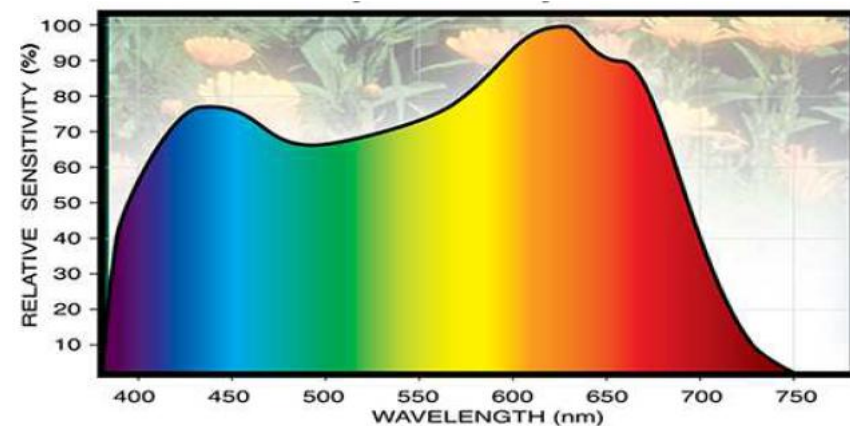
Réponse de l'œil humain à la lumière



## Flux Lumineux

En éclairage, le flux lumineux d'une source est représenté des photons/sec et l'unité est le Lumen

Réponse de la photosynthèse à la lumière



## photosynthetic photon flux (PPF)

Rendement du flux de photons

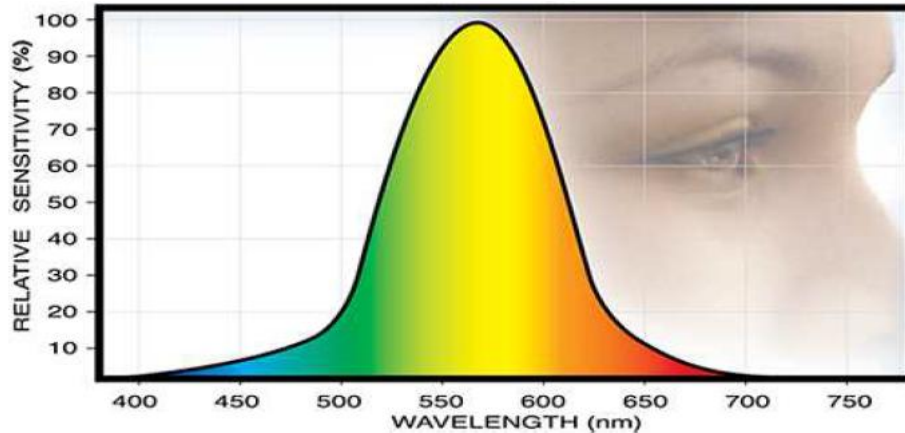
Il est également possible de mesurer le *Photosynthetically active radiation* PAR en termes d'énergie plutôt que de photons.

L'énergie d'un photon à longueur d'onde est donnée par la relation Planck-Einstein:  $E = hc / \lambda$

Où E est l'énergie dans joules, h est la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  joule-secondes), c est la vitesse de la lumière ( $2.998 \times 10^8$  mètres par seconde), et  $\lambda$  est mesuré en mètres. Par exemple, un micromole de photons d'une longueur d'onde de 450 nm a 0,266 joules d'énergie. La mise à l'échelle des valeurs de rendement quantique relatif pondérées par photons par la longueur d'onde et la normalisation produit le rendement quantique relatif pondéré en énergie, également connu sous le nom de spectre d'action Le flux de photons photosynthétiques pondéré en énergie est mesuré en watts (joules par seconde) et est appelé flux de photons de rendement *yield photon flux*(YPF)



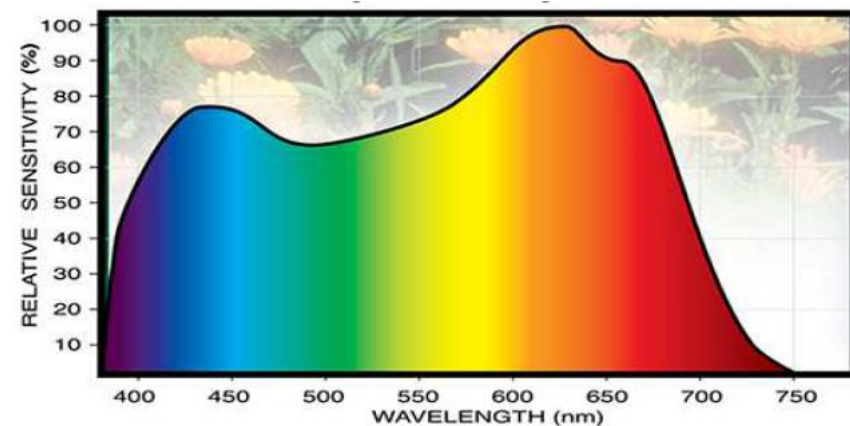
Réponse de l'œil humain à la lumière



## Illuminance

Les photons reçu sur une surface sont des lumen/m<sup>2</sup> aussi nommé Lux si lumen/pi<sup>2</sup> on parle de pied bougie footcandle fc

Réponse de la photosynthèse à la lumière



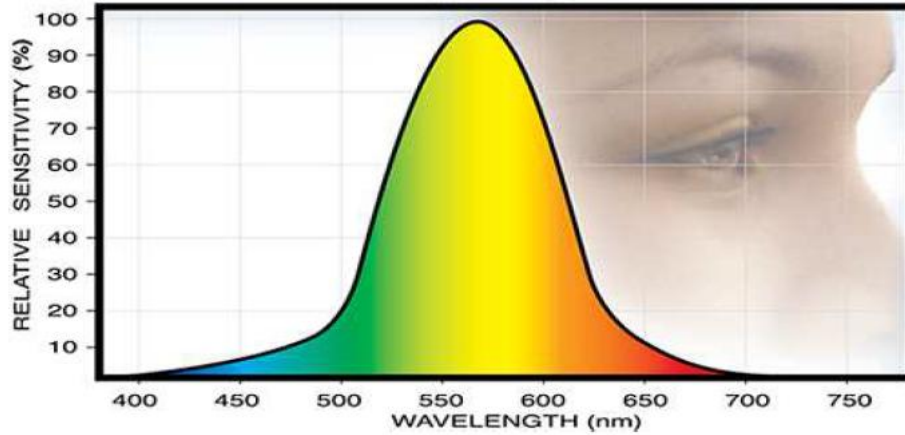
## photosynthetic photon flux density (PPFD)

Une unité de mesure commune pour PAR est la densité de flux photonique photosynthétique (PPFD), mesurée en unités de moles par mètre carré par seconde [1]. Dans ce cas, chaque photon absorbé, indépendamment de sa longueur d'onde (et donc de son énergie), est supposé contribuer de manière égale au processus de photosynthèse. Ceci est conforme à la loi Stark-Einstein, qui stipule que tout photon (ou quantum) qui est absorbé excitera un électron, quelle que soit l'énergie du photon, entre 400 nm et 700 nm. Pour cette raison, le flux de photons photosynthétiques est également appelé flux quantique.

[1] Une Mole est une unité de mesure utilisée en chimie pour exprimer le nombre d'entités élémentaires dans une substance égale au nombre d'atomes dans 12 grammes de l'isotope carbone-12. Il correspond à la constante d'Avogadro, dont la valeur  $N_A$  est de  $6,022 \times 10^{23}$  particules (dans ce cas les photons) par mole. Un micromole est un millionième de mole. (Un micromole [ $\mu\text{mol}$ ] de photons était parfois désigné par les scientifiques des plantes comme une microeinstein. Cependant, cette unité de mesure ne fait pas partie du Système international d'unités (SI), de sorte que son utilisation a été obsolète.)

# Éclairage et Horticulture

Réponse de l'œil humain à la lumière



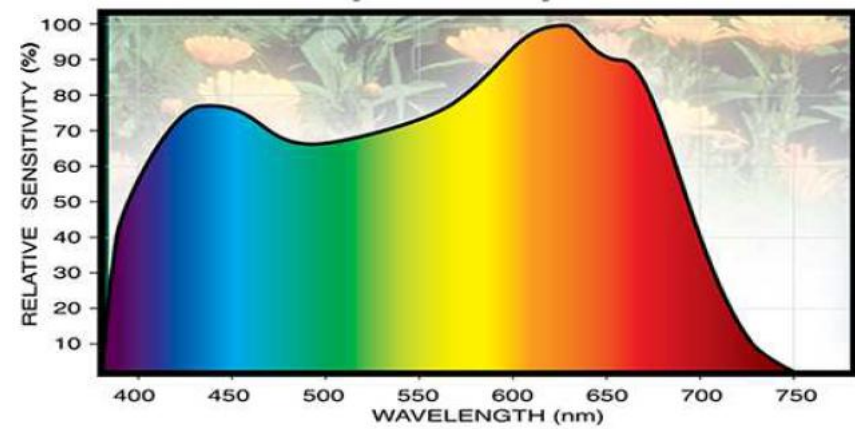
Illuminance

$\text{lumen/m}^2$

Lux

fc

Réponse de la photosynthèse à la lumière

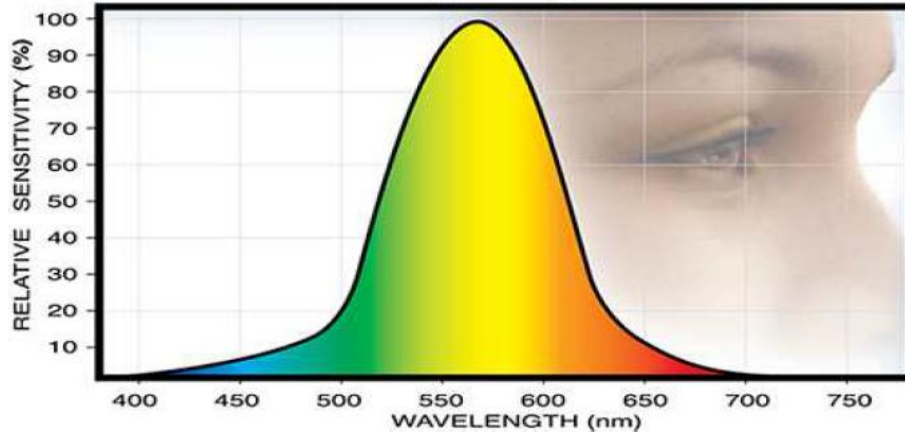


photosynthetic photon flux density (PPFD)

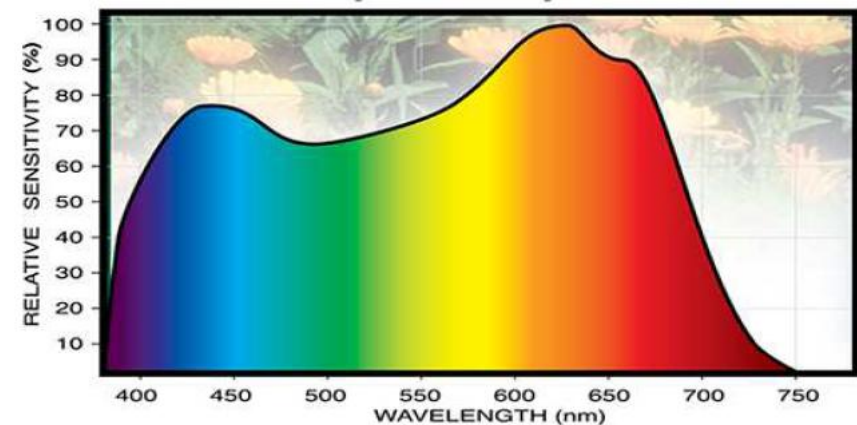
$\mu\text{mol/sec-m}^2$



Réponse de l'œil humain à la lumière



Réponse de la photosynthèse à la lumière



Des lumens au Photosynthetic Photon Flux PPF

Des Lux au Photosynthetic photon flux density (PPFD)

En tant que concepteurs d'éclairage, nous avons besoin d'une méthode de conversion des lumens en flux Photosynthetic Photon Flux (PPF) et d'éclairement en densité de flux Photosynthetic photon flux density (PPFD). Nous ne pouvons le faire que si nous savons ou pouvons estimer la distribution de puissance spectrale (SPD) de la source lumineuse.

# Éclairage et Horticulture



Figure 4:  
CIE 1931 luminous  
efficiency function  $V(\lambda)$

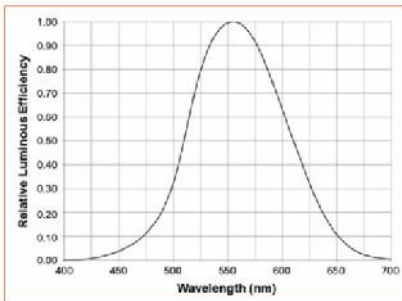


Figure 2:  
Action spectrum  
for crop plant  
photosynthesis

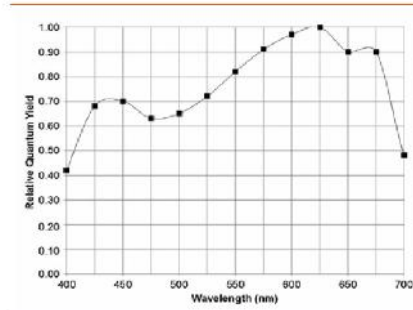
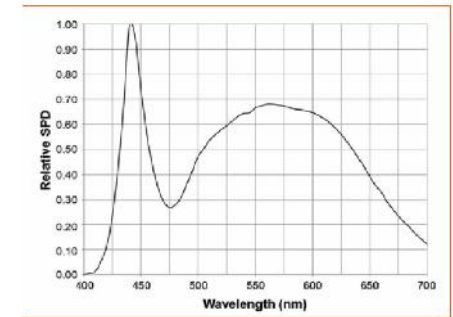
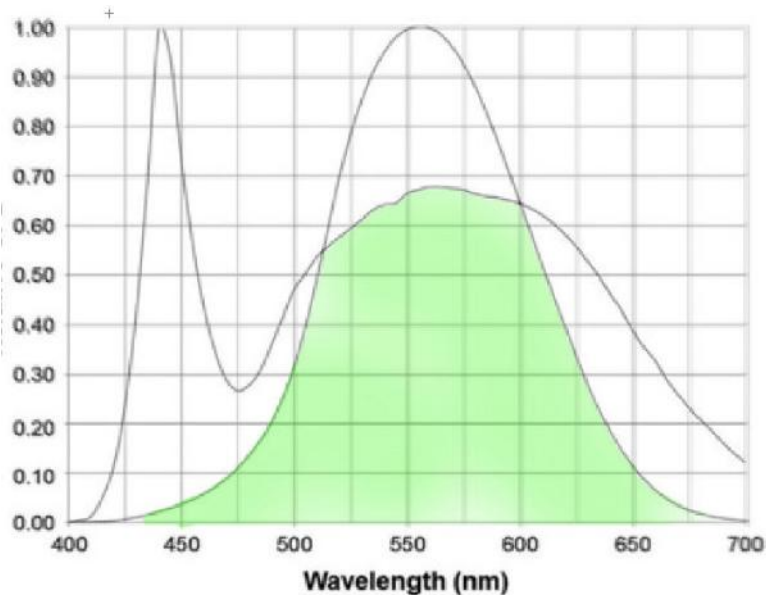


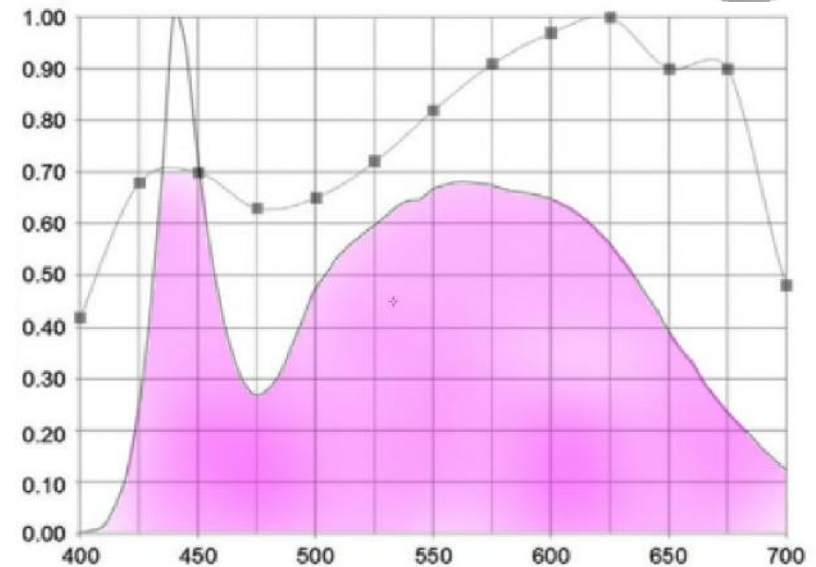
Figure 3:  
5000 K LED relative  
spectral power  
distribution



L'énergie qui est considéré dans nos fichier photométrique IES pour notre vision selon cette source



L'énergie que la plante utilise de cette source



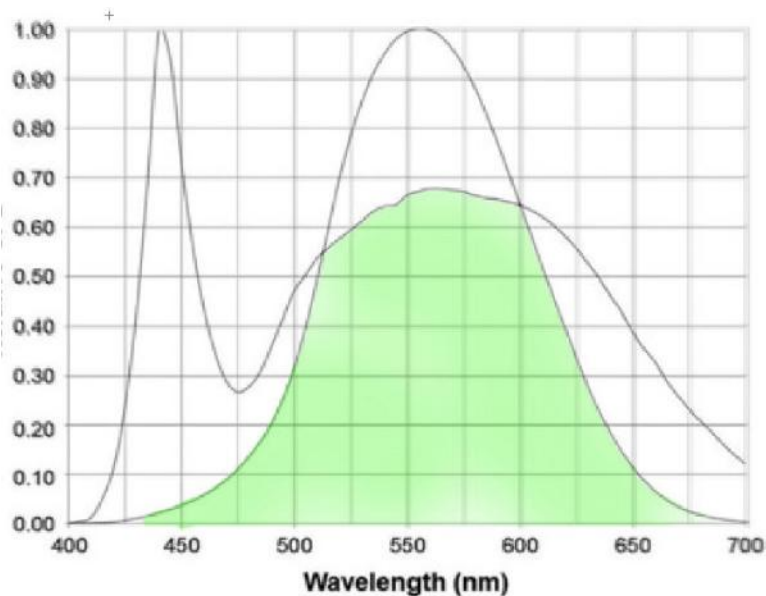
Ses graphiques ne devraient pas être superposé puisqu'il sont relatif, mais pour les besoin de la cause et la compréhension je les ai superposés.



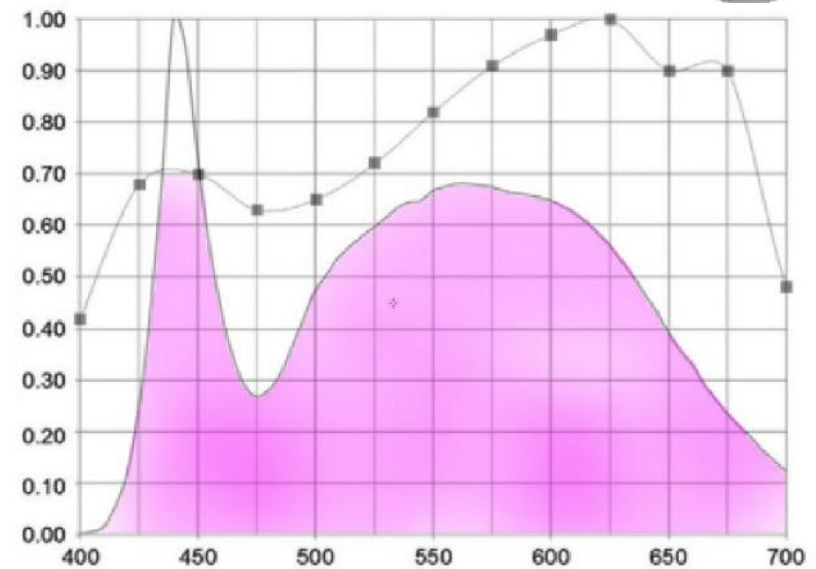
## Facteur de conversion de Illuminance (kilolux) à PPFD ( $\mu\text{mol} / \text{sec}\cdot\text{m}^2$ )

Pour calculer le PPFD en ( $\mu\text{mol} / \text{sec}\cdot\text{m}^2$ ) à partir de logiciel traditionnel et de donnée photométrique traditionnel tel que le fichier IES . Il faut convertir les unités de lux à  $\mu\text{mol} / \text{sec}\cdot\text{m}^2$  tout en considérant l'ajout d'un facteur qui représente l'énergie supplémentaire de la source qui est utile aux plantes et non considéré dans le fichier ies.

L'énergie qui est considéré dans nos fichier photométrique IES pour notre vision selon cette source



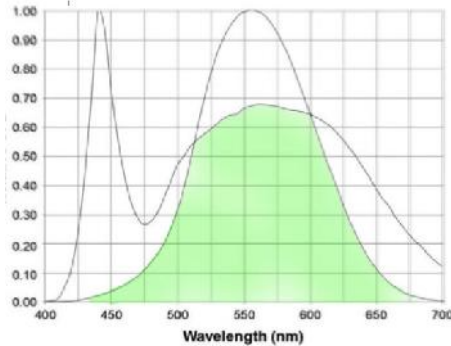
L'énergie que la plante utilise de cette source



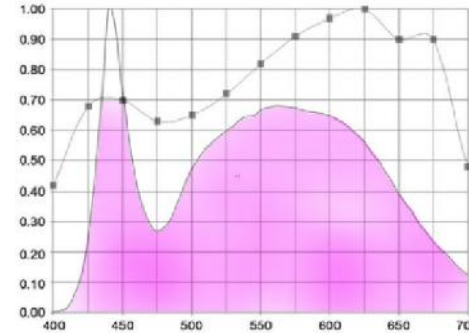
Ses graphiques ne devraient pas être superposés puisqu'ils sont relatifs, mais pour les besoins de la cause et la compréhension je les ai superposés.

# Éclairage et Horticulture

L'énergie qui est considéré dans nos fichier photométrique IES pour notre vision selon cette source



L'énergie que la plante utilise de cette source



Un watt de puissance rayonnante à 555 nm est par définition égal à 683 lumens. Compte tenu de la fonction d'efficacité lumineuse CIE 1931 (figure 5), on peut calculer le flux radiant spectral ( ) en watts par nanomètre pour chaque lumière comme suit:

$$\Phi(\lambda)/lm = \frac{W_{rel}(\lambda)}{683 * \sum_{400}^{700} V(\lambda)W_{rel}(\lambda)\Delta\lambda}$$

Où  $W_{rel}(\lambda)$  est la distribution de puissance spectrale relative,  $V(\lambda)$  est la fonction d'efficacité lumineuse à la longueur d'onde  $\lambda$ , et  $\Delta\lambda$  est l'intervalle de longueur d'onde (typiquement 5 nm). Pour l'exemple ci-dessus, le flux radiant spectral par nanomètre pour chaque lumière à 440 nm est de 22,5 microwatts, tandis que le flux de rayonnement total par lumen est de 3,18 milliwatts.

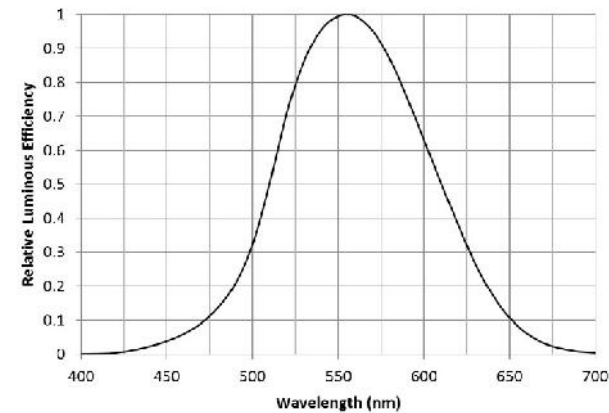


Figure 5

Pour plus d'info: <http://agi32.com/blog/2014/12/10/photometry-and-photosynthesis/> Ian Ashdown, FIES



## La base mathématique pour le calcul de PPF:

Si la distribution spectrale de puissance (SPD) d'une source lumineuse est connue pour les longueurs d'onde pertinentes (400-700 nm), alors la quantité d'énergie photosynthétique disponible pour les plantes peut être déterminée. Basé sur son SPD, une source de lumière aura un facteur de conversion qui peut être utilisé pour traduire la densité de flux lumineux (éclairage) reçue par la plante en densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD), en  $\mu\text{mol} / \text{s}\cdot\text{m}^2$ .

Un watt de puissance radiante à 555 nm est par définition égal à 683 lumens. Etant donné la fonction d'efficacité lumineuse CIE 1931  $V(\lambda)$ , nous pouvons calculer le flux spectral spectral  $\Phi_e(\lambda)$  pour les plantes en watts par nanomètre pour chaque lumière comme:

$$\Phi_e(\lambda) / \text{lumen} = [\text{Wrel}(\lambda)] / [683 \cdot \int_{400-700} [V(\lambda) \text{Wrel}(\lambda) d\lambda]]$$

où  $\text{Wrel}(\lambda)$  est la distribution de puissance spectrale relative et  $V(\lambda)$  est la fonction d'efficacité lumineuse à la longueur d'onde  $\lambda$ . Avec cela, le flux de photons photosynthétiques (PPF) par nanomètre en micromoles par seconde par nanomètre peut être calculé:

$$\text{PPF} / \text{nm} = (10^{-3}) \cdot [\Phi_e(\lambda) / (Nahc)],$$

où:

$N_A$  = constante d'Avogadro,  $6.022 \times 10^{23}$

$h$  = constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  joule-secondes)

$c$  = vitesse de la lumière,  $2,998 \times 10^8$  m / s

$\lambda$  = longueur d'onde en mètres.

La somme sur la plage de 400 à 700 nm donne le flux de photons photosynthétiques (PPF) par lumen pour la source de lumière donnée:

$$\text{PPF} \approx 8,359 \cdot 10^{-3} \cdot \int_{400-700} [\Phi_e(\lambda) d\lambda]$$

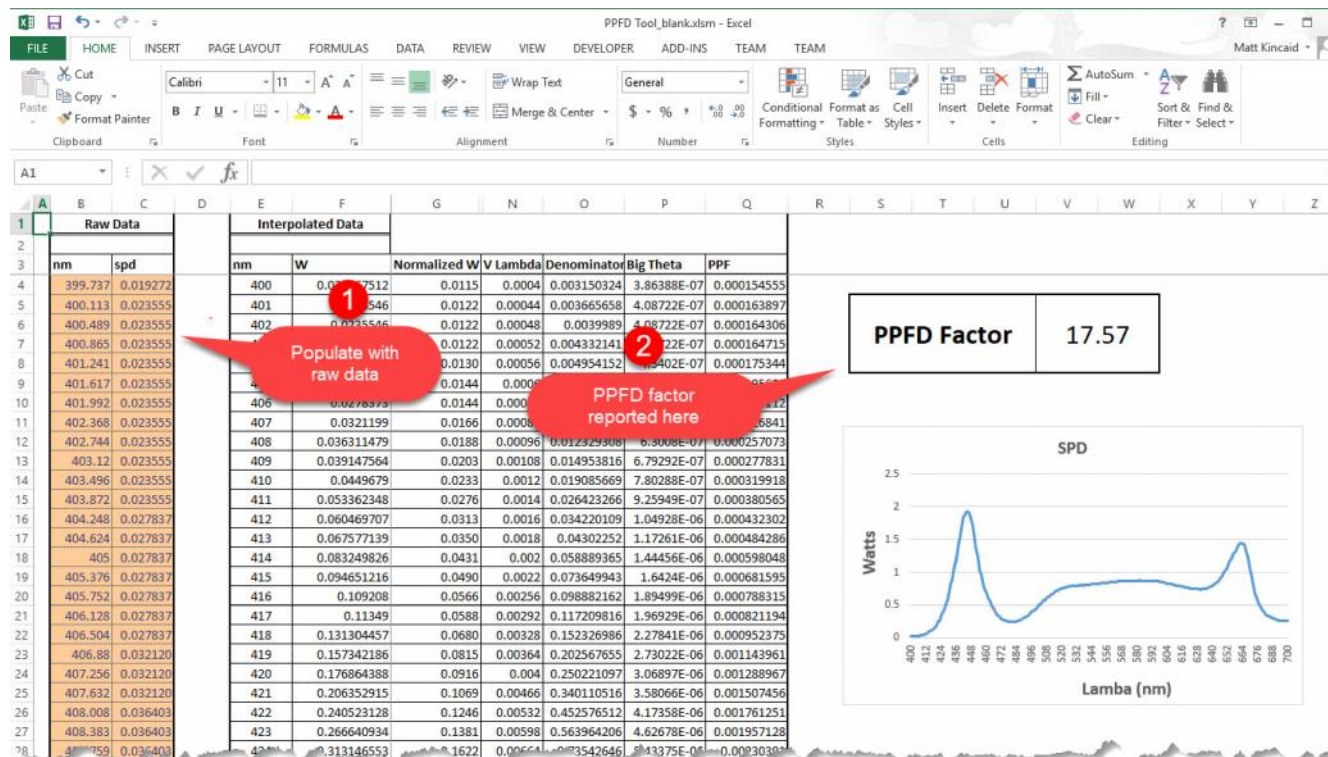
Avec une valeur d'éclairage (Lux ou footcandles), nous pouvons calculer de manière similaire la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) en micromoles par seconde par mètre carré ( $\mu\text{mol} / \text{s}\cdot\text{m}^2$ ) pour la source de lumière donnée.

Les graphiques SPD sont relativement faciles à trouver, mais trouver la même information sous forme tabulaire, nécessaire pour les équations ci-dessus, est plus difficile. Une source est CIE 15: 4, Colorimetry (2004). En ajoutant les données numérisées des courbes SPD blanches à LED d'un fabricant de LED, nous pouvons arriver au tableau suivant des facteurs de conversion PPF, pour convertir l'éclairage en kilolux en PPF en  $\mu\text{mol} / \text{s}\cdot\text{m}^2$ :



# Éclairage et Horticulture

AGi32 a une caractéristique qui permet le calcul de la densité de flux de photonsynthèse photonique (PPFD) avec n'importe quelle grille de calcul basée sur un compteur de sortie. Pour utiliser cette caractéristique, il est nécessaire de fournir à AGi32 un facteur de conversion PPF qui caractérise la distribution spectrale de puissance (SPD) de la source lumineuse utilisée. Les facteurs PPF peuvent être calculés en utilisant les données SPD d'un test de sphère d'intégration avec la feuille de calcul jointe.



<https://lightinganalysts.freshdesk.com/support/solutions/articles/22000211885-computing-ppfd-factors-from-spd-data>



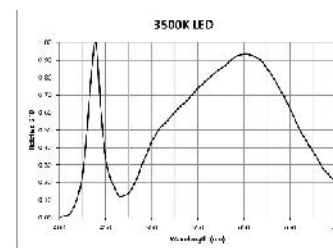
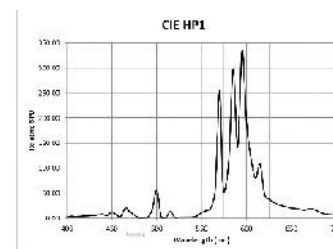
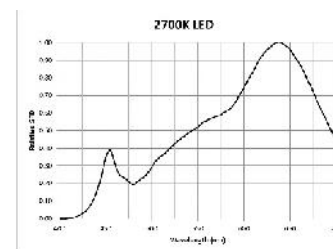


# Éclairage et Horticulture

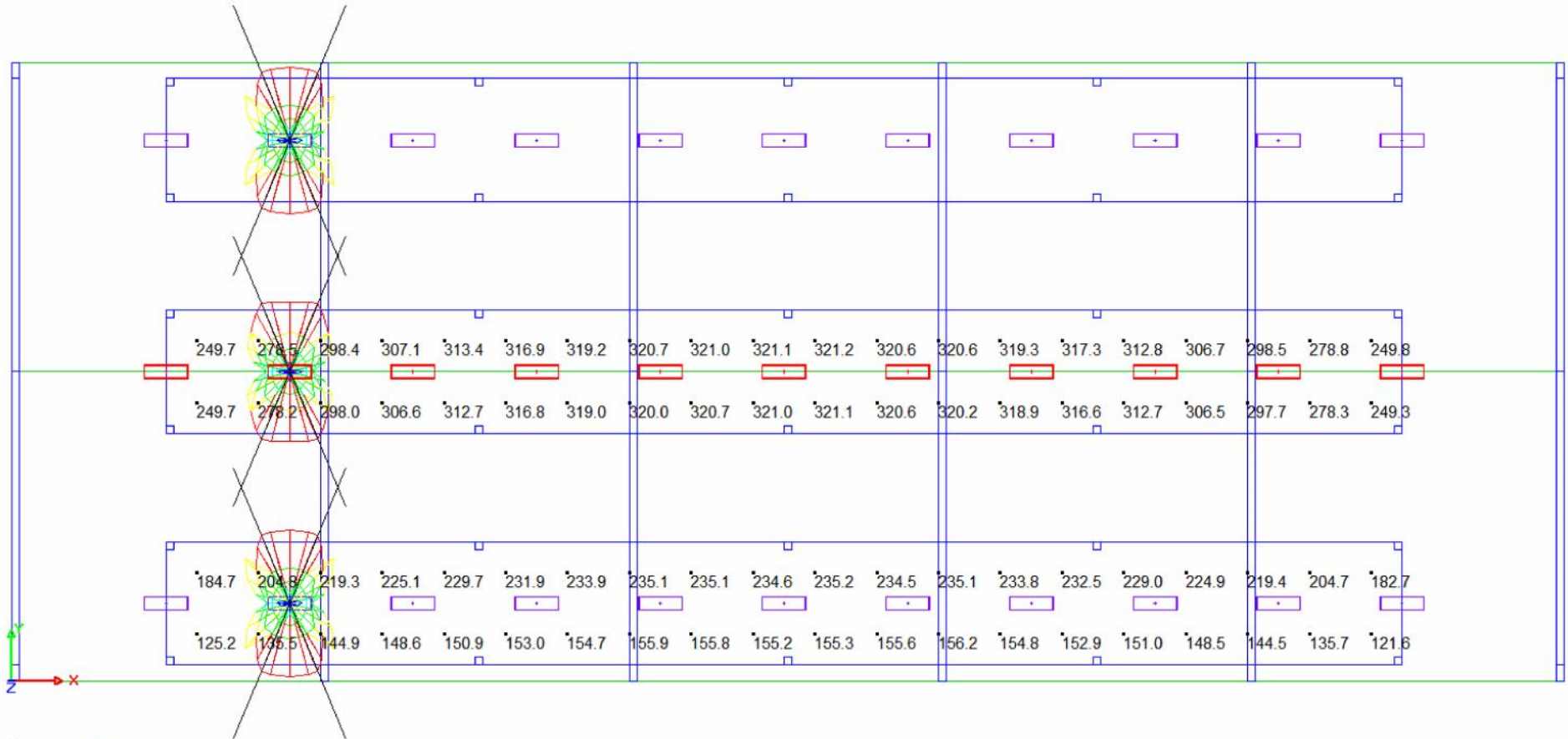
Chaque source a sa propre courbe spectrale ce qui signifie que chaque source a son propre facteur de conversion de Illuminance (kilolux) à PPFD ( $\mu\text{mol} / \text{sec}\cdot\text{m}^2$ )

Light Source	Conversion Factor
CIE A (incandescent, 2856K)	20.3
CIE 5000K daylight (D50)	18.1
CIE 5500K daylight (D55)	18.1
CIE 6500K daylight (D65)	18.3
CIE 7500K daylight (D75)	18.6
CIE HP1 (standard high-pressure sodium, 1959K)	11.7
CIE HP2 (color-enhanced high-pressure sodium, 2506K)	19.3
CIE HP3 (high-pressure metal halide, 3144K)	14.4
CIE HP4 (high-pressure metal halide, 4002K)	15.0
CIE HP5 (high-pressure metal halide, 4039K)	16.3
2700K white light LED (Philips Luxeon Rebel LXW9-PW27)	18.1
3000K white light LED (Philips Luxeon Rebel LXW9-PW30)	17.1
3500K white light LED (Philips Luxeon Rebel LXW7-PW35)	14.6
4000K white light LED (Philips Luxeon Rebel LXW8-PW40)	14.3
5000K white light LED (Philips Luxeon Rebel LXW8-PW50)	14.6

Table 2 – Illuminance (kilolux) to PPFD ( $\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{m}^2$ ) conversion factors



# Éclairage et Horticulture

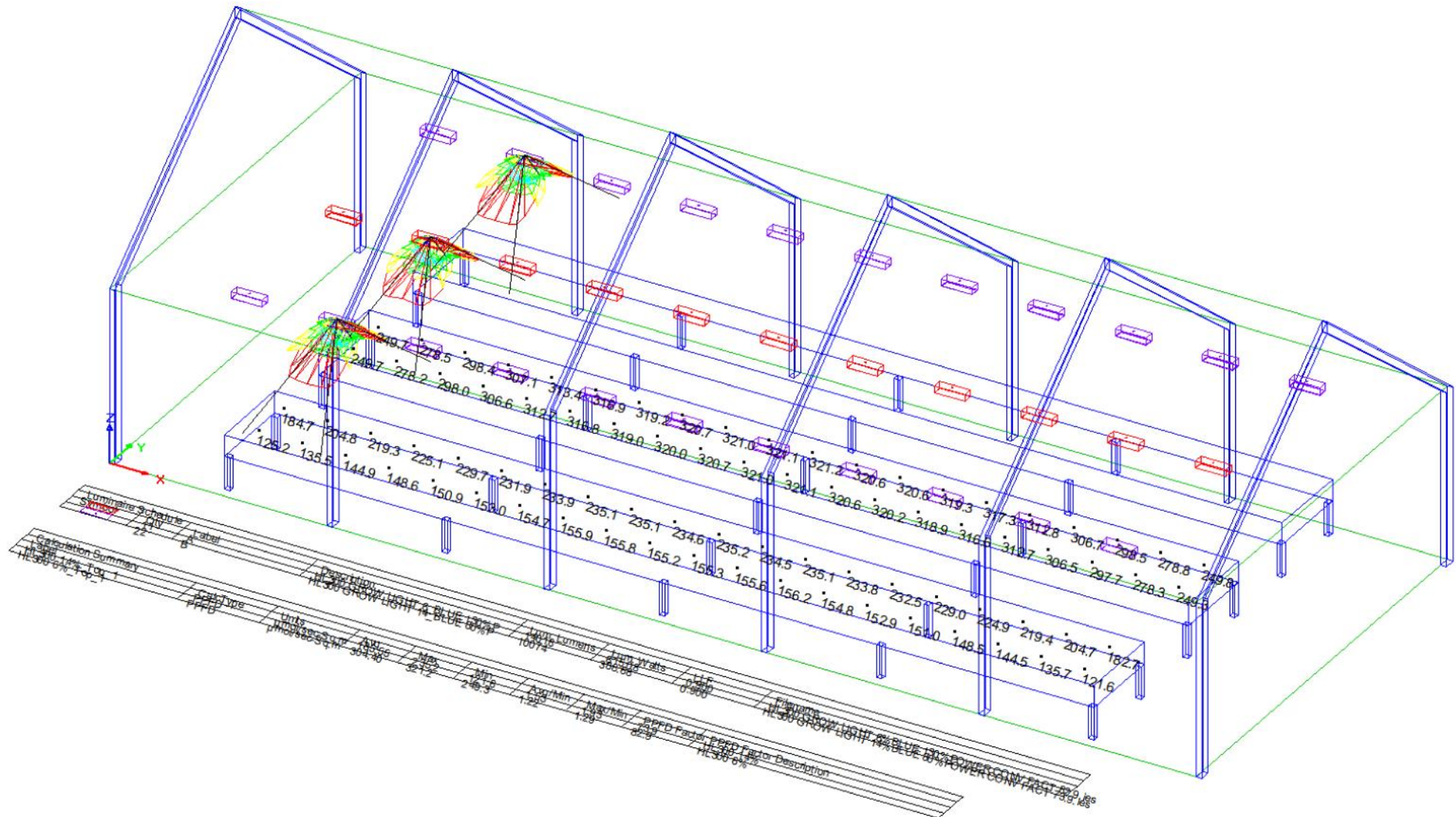


Luminaire Schedule							
Symbol	Qty	Label	Description	Lum. Lumens	Lum. Watts	LLF	Filename
-	11	A	HL300 GROW LIGHT 6_BLUE 130%P	14018	615.08	0.900	HL300 GROW LIGHT 6%BLUE 130%POWER CONV FACT 82.9.ies
-	22	B	HL300 GROW LIGHT 14_BLUE 80%P	10074	388.68	0.900	HL300 GROW LIGHT 14%BLUE 80%POWER CONV FACT 73.9.ies

Calculation Summary									
Label	CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	PPFD Factor	PPFD Factor Description
HL300 14%_Top_1	PPFD	μmol/sec-Sq.m	185.55	235.2	121.6	1.53	1.93	73.9	HL300 14%
HL300 6%_Top_1	PPFD	μmol/sec-Sq.m	304.40	321.2	249.3	1.22	1.29	82.9	HL300 6%



# Éclairage et Horticulture



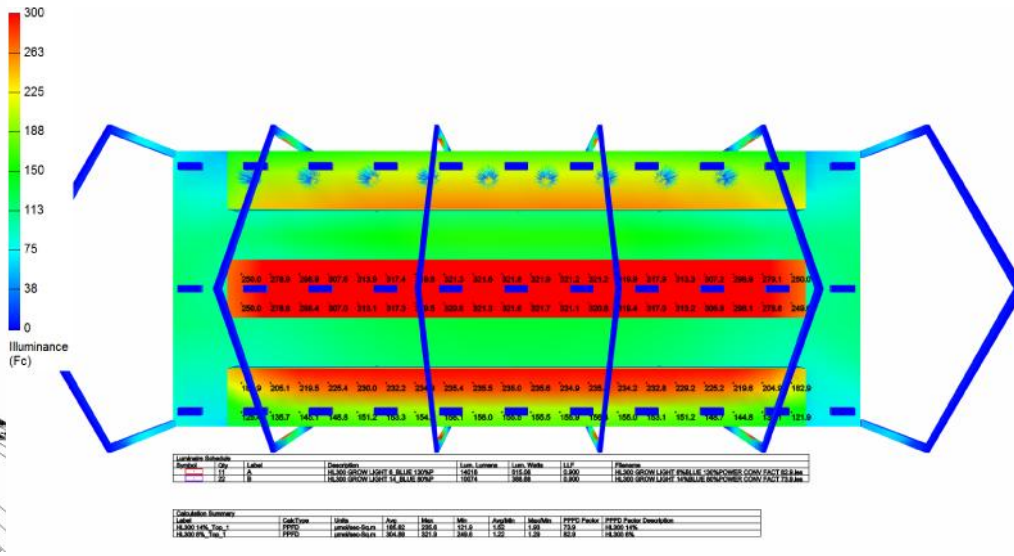
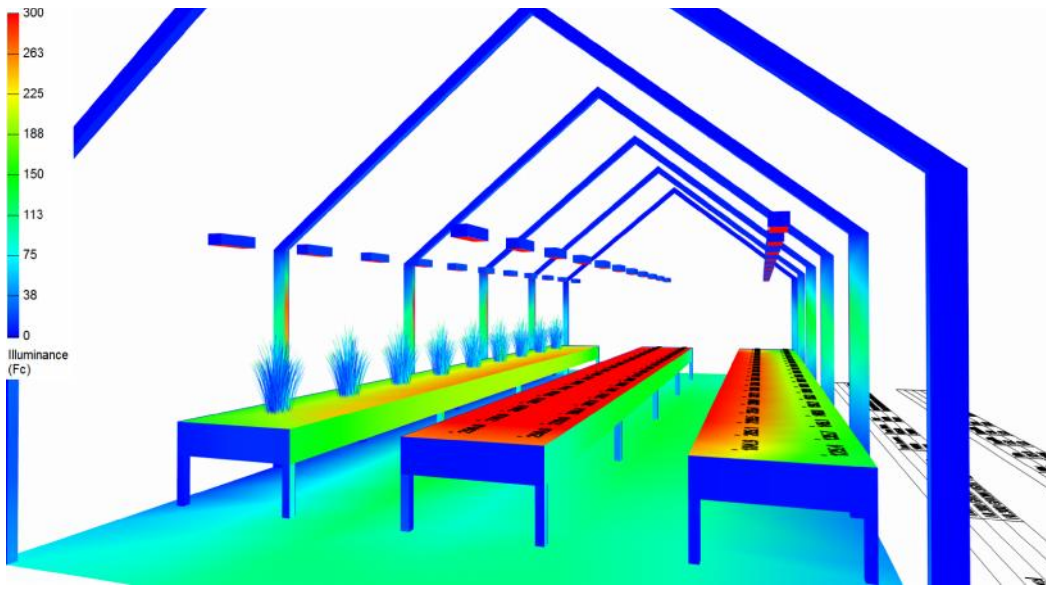
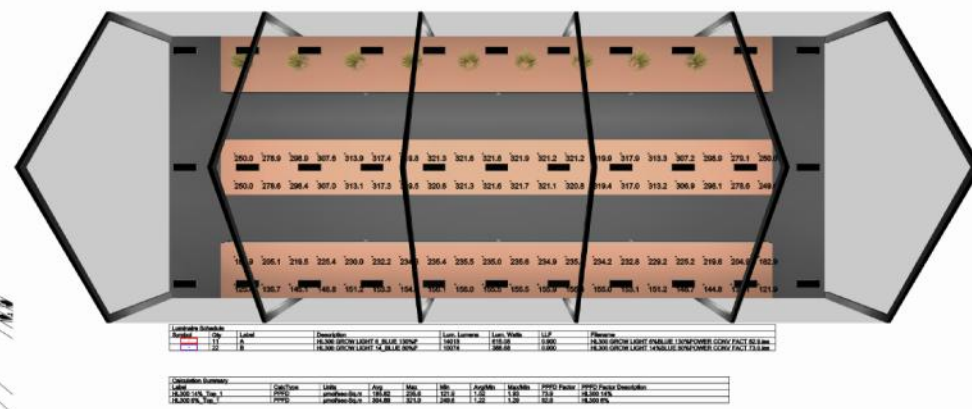
# Éclairage et Horticulture

The screenshot shows the Revit software interface with the 'Calculation Points - Automatic Placement' dialog box open. The 'Calculation Points' section is highlighted with a red circle, showing 'CalculationPoints' set to 'On', 'SubLabel' to 'Top\_1', and 'CalculationType' to '5-PPFD'. The 'PPDFFactor (kLux to μmol/sec-Sq.m)' is also highlighted with a red circle. The 'Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) Factors' dialog box is also open, showing a list of light sources with their corresponding PPFDF factors. The 'HL300 14%' entry is highlighted with a red circle, showing a PPFDF factor of 82.9.

Label	CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	PPDF Factor	PPDF Factor Description
Object_2_Top_1	PPFD	μmol/sec-S	?	?	?	N.A.	N.A.	82.9	HL300 6%



# Éclairage et Horticulture



Pour rappel, le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) ne tient pas compte de la réponse spectrale des plantes; Il représente simplement le nombre de photons (quanta) par unité de surface par seconde dans la plage de 400 à 700 nm. Avec la disponibilité de modules LED réglables en couleur pour l'éclairage en serre, les horticulteurs voudront probablement expérimenter différents SPD pour des cultures spécifiques et des plantes à fleurs, ainsi que la directionnalité et le calendrier quotidien des rétrogradation (photopériodes) des luminaires. Quoi qu'il en soit, être en mesure de convertir les valeurs d'éclairage prédites et mesurées en valeurs PPFD pour les sources lumineuses courantes soulèvera certainement le problème de communication entre les concepteurs d'éclairage et les horticulteurs.



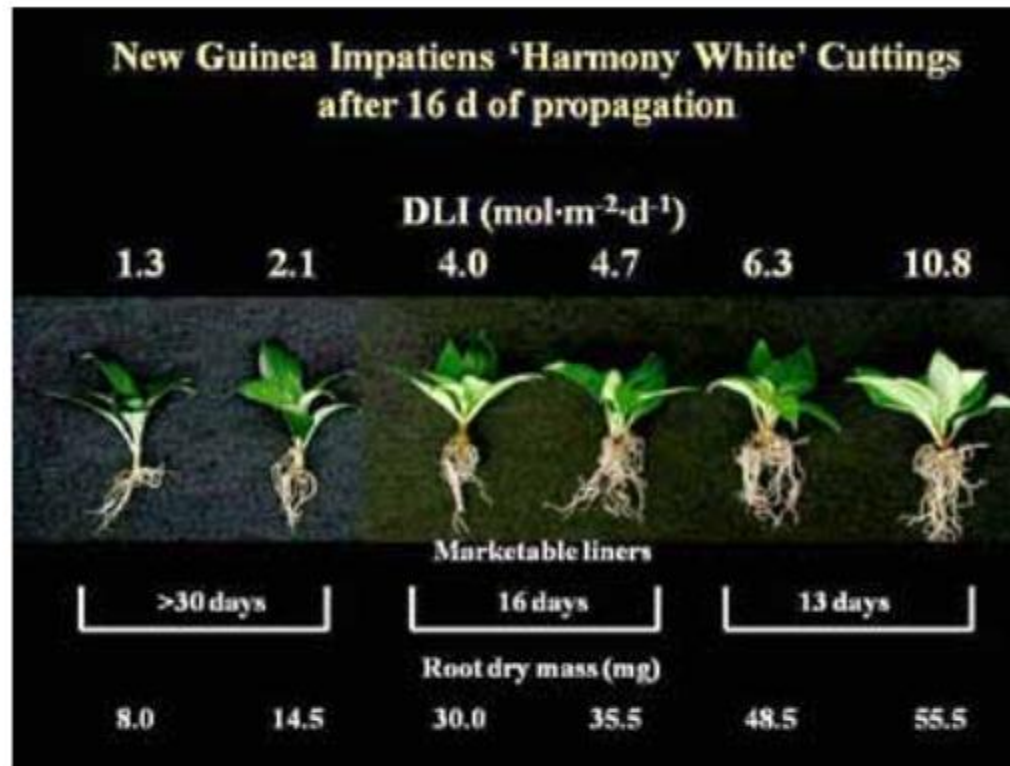
La façon dont les horticulteurs choisissent d'équilibrer le rapport entre la lumière rouge et la lumière bleue dépendra probablement des espèces végétales spécifiques cultivées et de leur stade de croissance. Certaines plantes, préfère l'ombre, tandis que d'autres préfèrent la lumière directe du soleil, avec différentes exigences SPD. En outre, des LED à 735 nm peuvent être utilisées pour induire la floraison. Quoi qu'il en soit, les facteurs de conversion ci-dessus seront toujours utiles.

En plus d'utiliser des chlorophylles et des caroténoïdes pour la photosynthèse, les plantes utilisent ces derniers et d'autres photopigments pour une grande variété de fonctions. Les phytochromes Pr et Pfr, par exemple, répondent respectivement à un rayonnement infrarouge rouge de 660 nm et à 735 nm et, ce faisant, induisent une germination et une floraison des graines, régulent l'expansion des feuilles et l'allongement de la tige, et déclenchent des réponses à la photopériode et à l'évitement de l'ombre.

D'autres photopigments régulent le phototropisme (orientation de la feuille et de la tige) et des rythmes circadiens (pour lesquels la lumière bleue est la plus efficace), la photomorphogénie (forme de la plante), la croissance des racines, l'ouverture stomatique, le mouvement des chloroplastes ... la liste continue, alors que les chercheurs en horticulture continuent à explorer Le rôle entre les SPD de lampe et la santé et la croissance végétales optimales. (Voir [www.photobiology.info](http://www.photobiology.info) pour un résumé informatif de la photobiologie végétale.)



DLI (Daily Light Integral) ou valeur intégrée journalière est l'accumulation des mol/m<sup>2</sup>/sec sur 24 heures

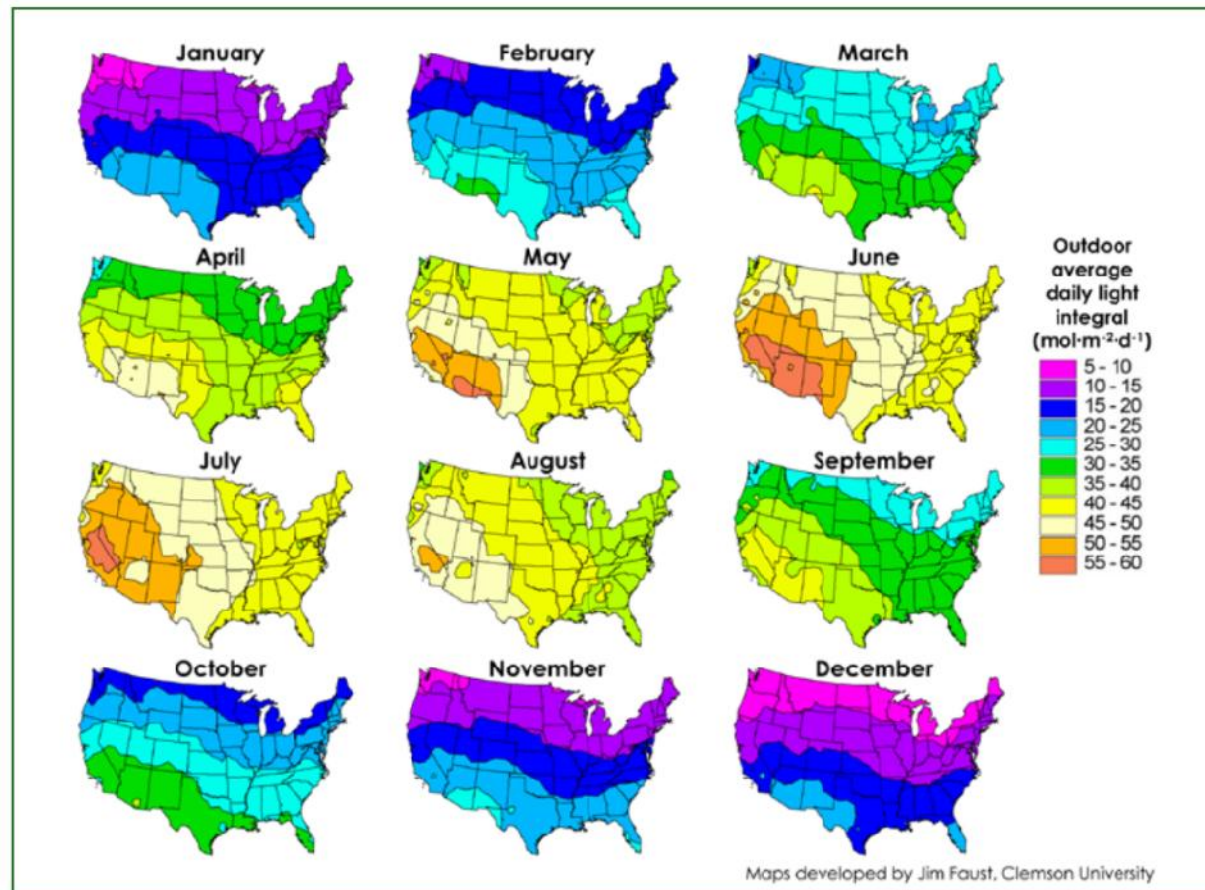


**Figure 4.** Influence of propagation daily light integral (DLI) on root development and liner marketability in New Guinea Impatiens (Lopez and Runkle, 2008).

<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>



DLI (Daily Light Integral) ou valeur intégrée journalière est l'accumulation des mol/m<sup>2</sup>/sec sur 24 heures



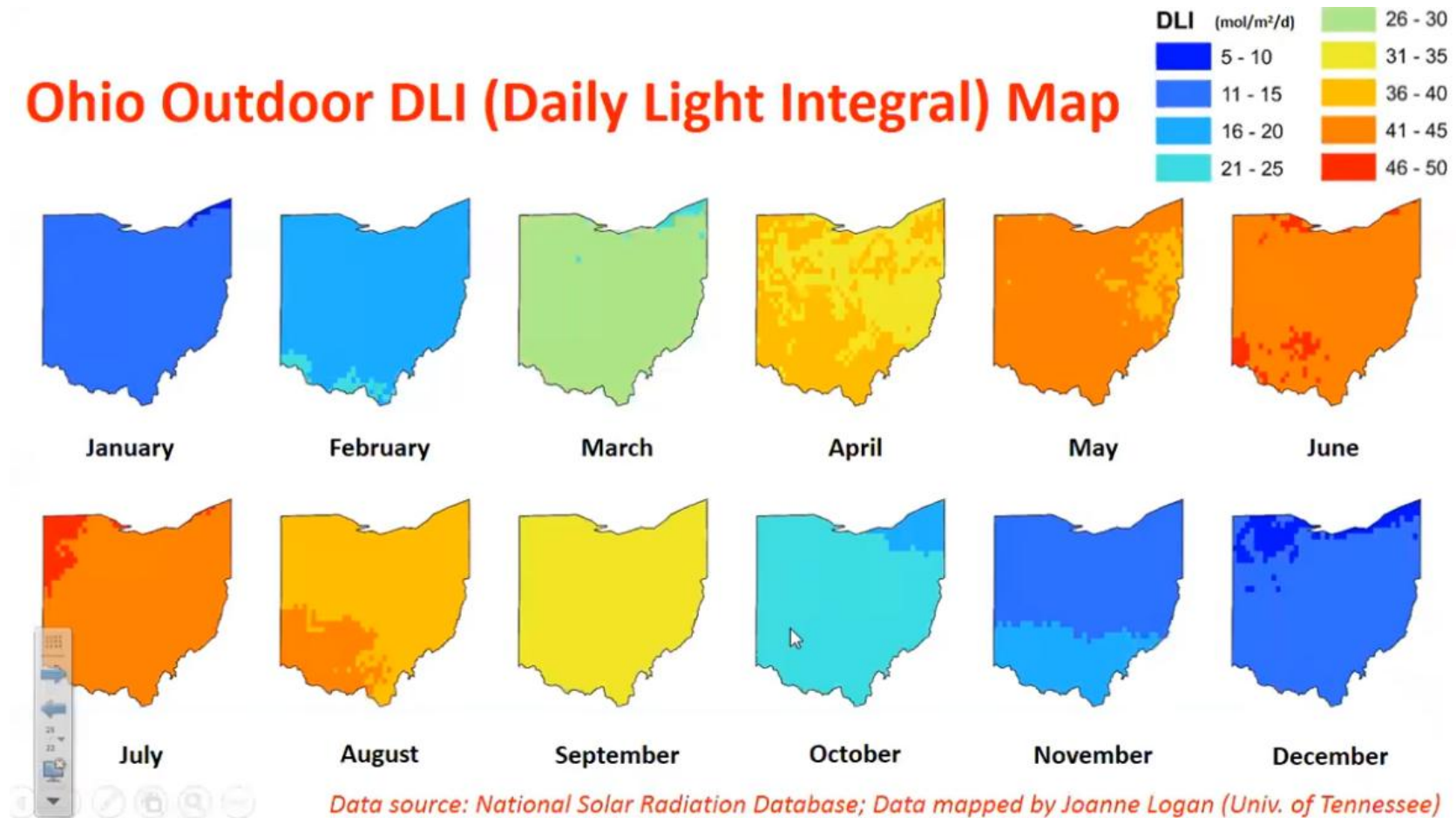
**Figure 1.** Maps of monthly outdoor DLI throughout the United States.

Source: Mapping monthly distribution of daily light integrals across the contiguous United States (Pamela C. Korczynski, Joanne Logan, and James E. Faust; Clemson University, 2002)

<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>

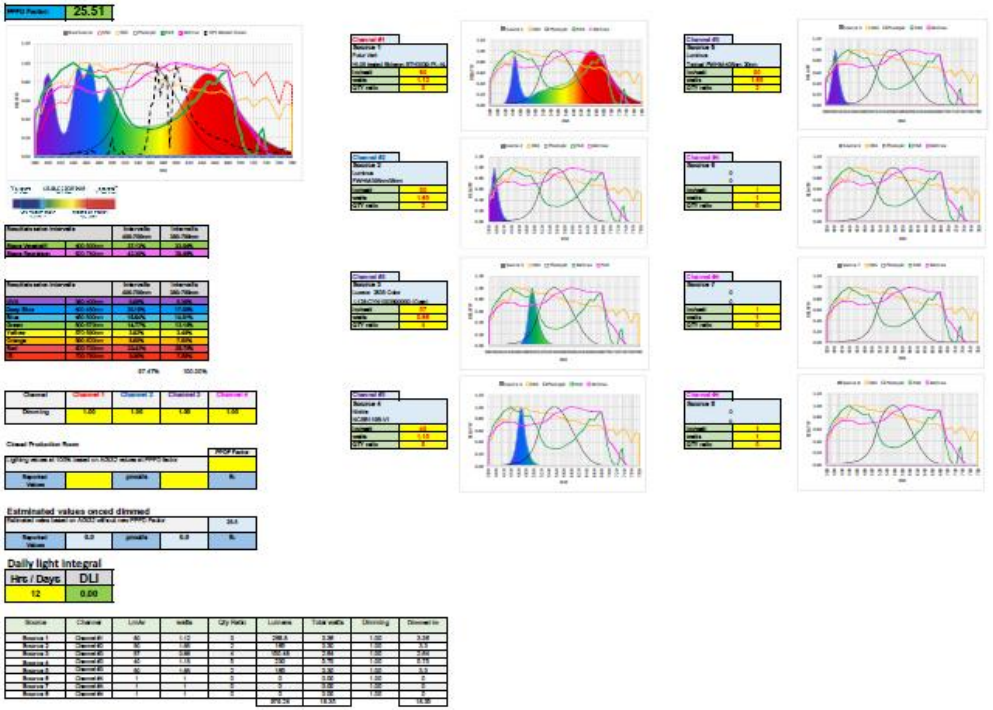
# Éclairage et Horticulture

DLI (Daily Light Integral) ou valeur intégrée journalière est l'accumulation des mol/m<sup>2</sup>/sec sur 24 heures

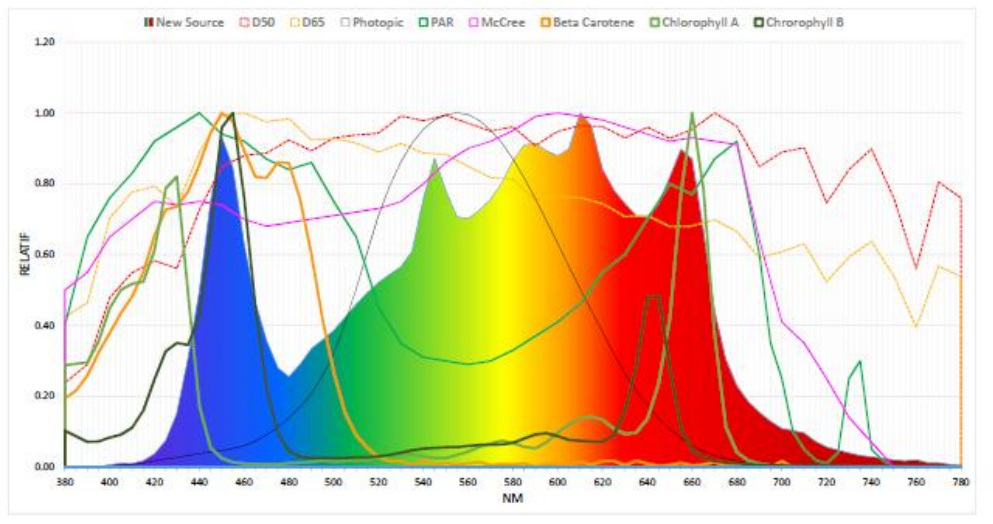
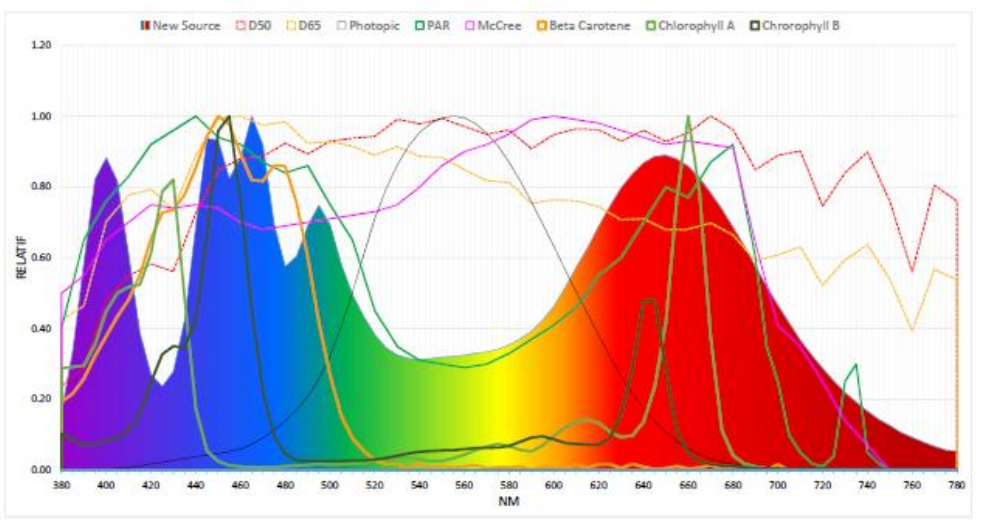
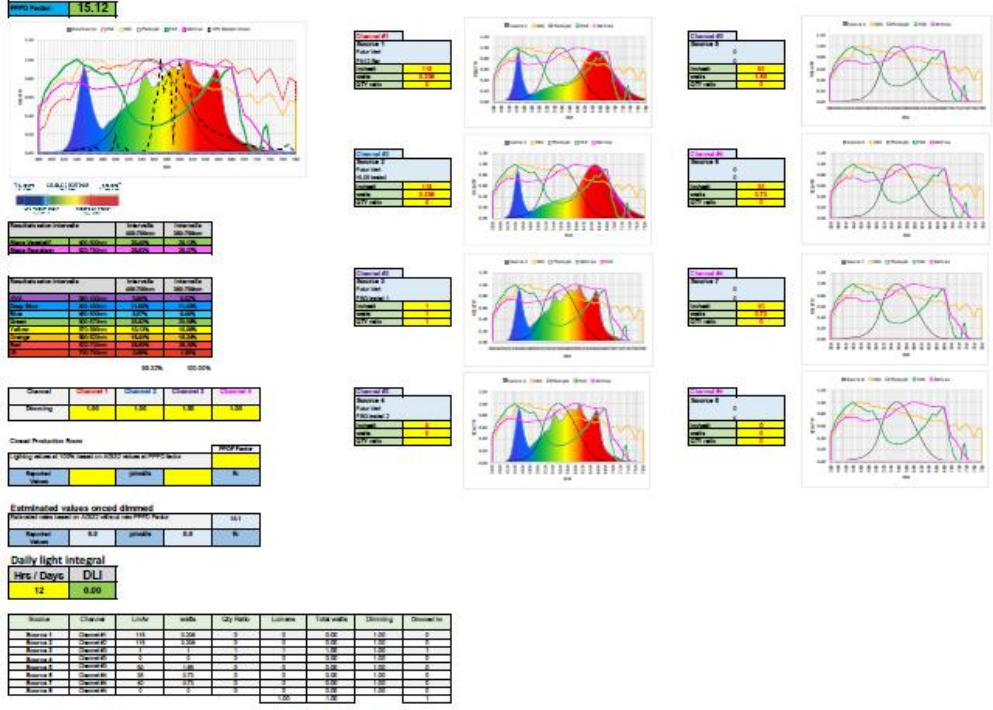


# Éclairage et Horticulture

## Nova Farming Led Super Mixte



## Optimisation Chambre Futur vert F80



## Culture verticale



## Culture verticale



# Références



- Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180 USA <http://www.lrc.rpi.edu/>
- Wikipédia ,Le projet d'encyclopédie libre, <http://fr.wikipedia.org>
- Google Search images <http://www.google.ca>
- OSRAM Horticultural lighting Technical & Marketing Presentation\_01 08 20...
- <http://agi32.com/blog/2014/12/10/photometry-and-photosynthesis/> Ian Ashdown, FIES