



## Design d'éclairage d'horticulture

Jordan Goulet | 17 Avril 2018 |  
Lunch éclair IES | Montréal, Québec

# Agenda

---

	Page
1. Introduction	3-5
2. Définitions et unités de mesure	6-20
3. Les applications typiques	21-28
4. Les calculs photoniques	29-43

# Les grandes tendances changent les systèmes alimentaires et offrent de nouvelles opportunités pour des systèmes plus avancés

## Population grandissante



- **>9 Mi d'humains** d'ici 2050
- **70%** augmentation en production de nourriture
- **70%** de la population en milieu urbain
- **60** Mega-Villes avec >3m personnes

## Rareté des ressources naturelles



- **80%** des terres arables déjà utilisées
- **70%** d'eau douce utilisée pour la production alimentaire
- **65%** de l'eau usée perdue en raison de l'évaporation et du ruissellement
- **30%** des combustibles fossiles utilisés par le secteur alimentaire

## Demande du marché variable



- **2.500 km** du champ à la fourchette
- **50%** des cultures plantées non récoltées
- **14%** d'aliments contaminés par des pesticides
- **0,1%** des pesticides utilisés atteignent le ravageur ciblé

Nous avons besoin de plus de nourriture, plus proche des zones urbaines, produite de manière plus efficace, cultivé localement et tout au long de l'année.

# La technologie AEC est utilisée dans plusieurs segmentations de marché

AEC = Agriculture à Environnement Contrôlé

Jardinage Intelligent

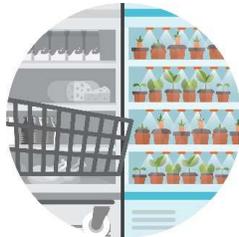
Culture intérieure

Agritecture

Résidentiel



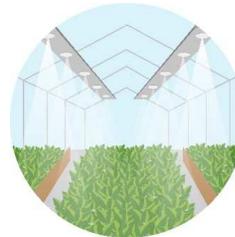
En magasin



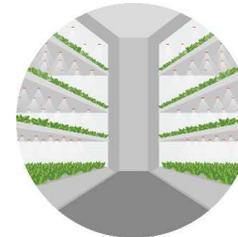
Conteneur



Serre de production



Ferme verticale



Toiture verte



# Cannabis

---



---

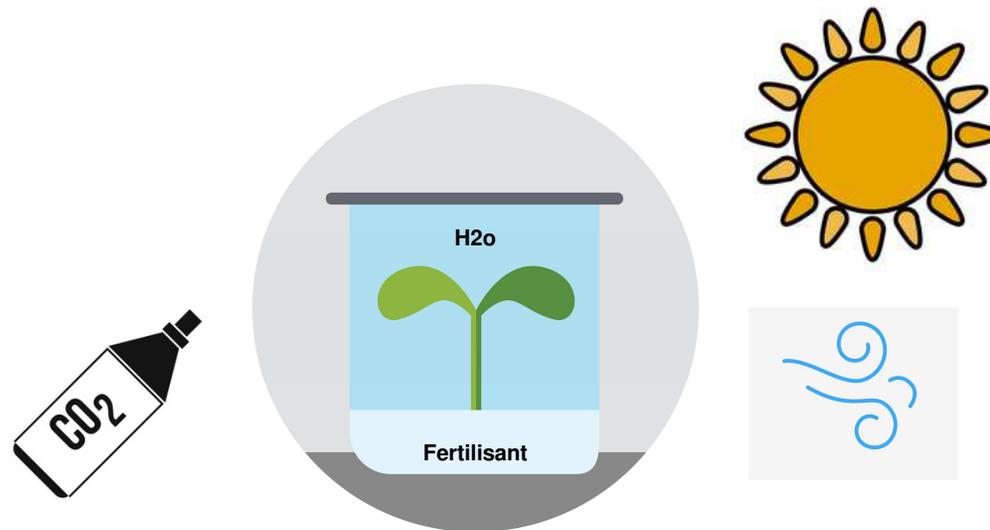
# Définitions et unités de mesure

# Définitions

---

## Photosynthèse

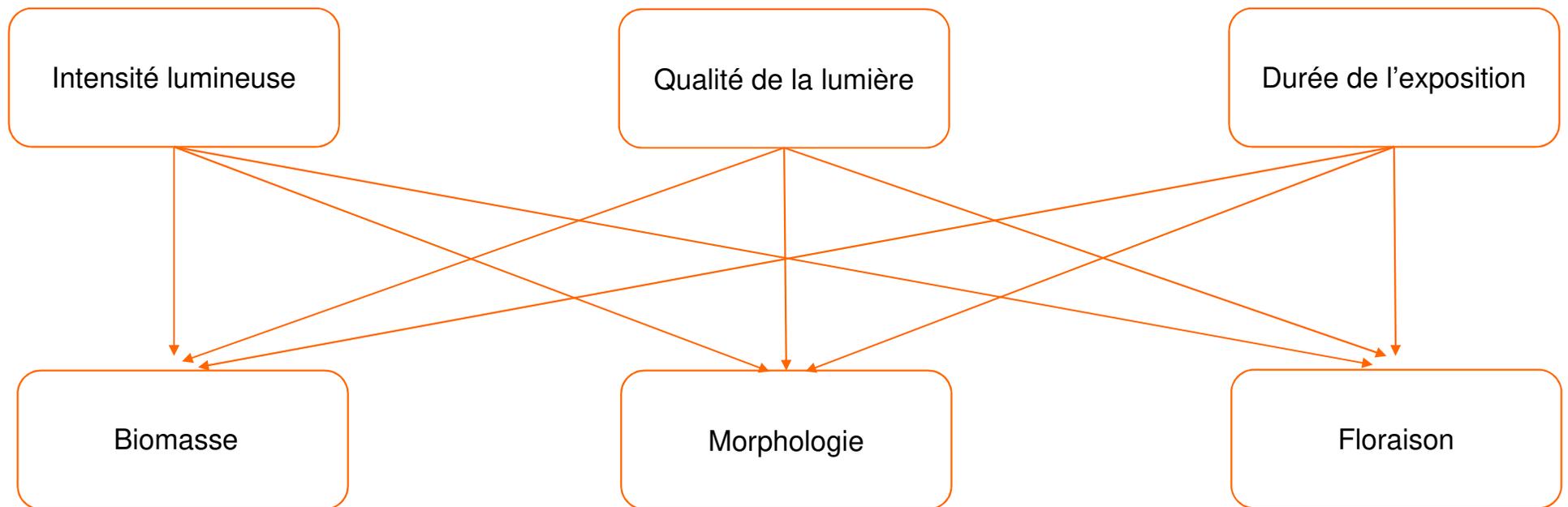
La photosynthèse est le processus utilisé par les plantes pour convertir les rayonnements électromagnétiques - lumière - en énergie chimique utilisée pour la croissance et le développement. Tout ce qui est nécessaire pour ce processus est le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), les éléments nutritifs 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.



La production d'un légume consiste à convertir des unités de lumière en teneur de matière sèche!

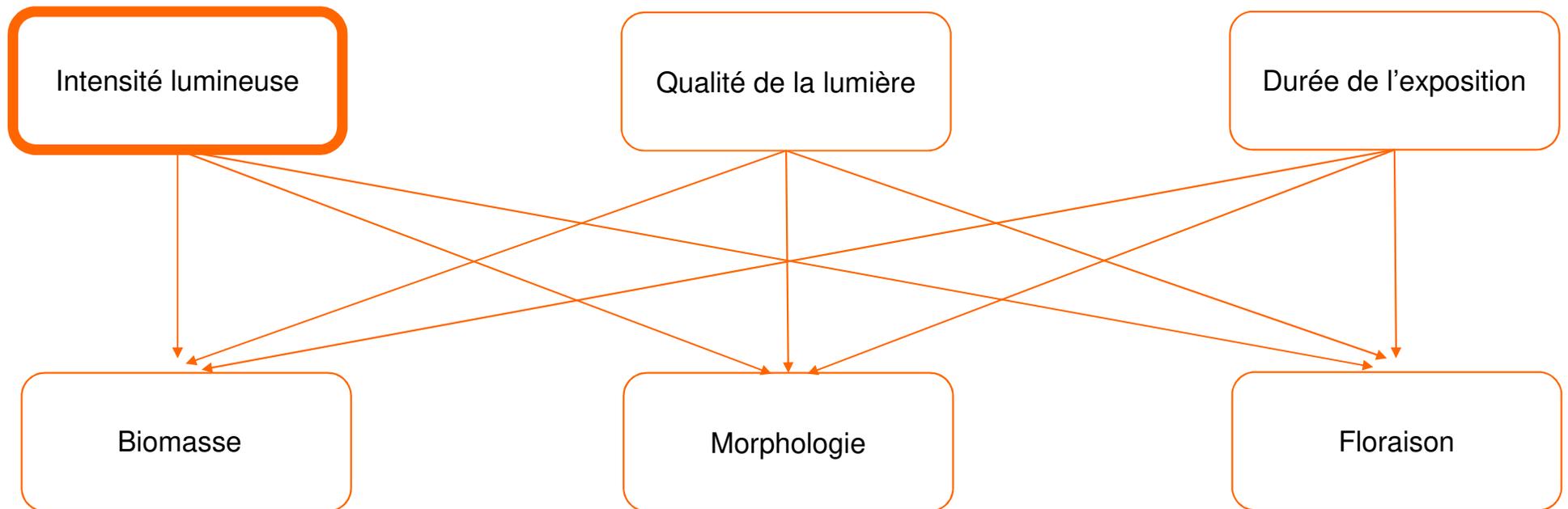
## Relation entre les plantes et la lumière

---



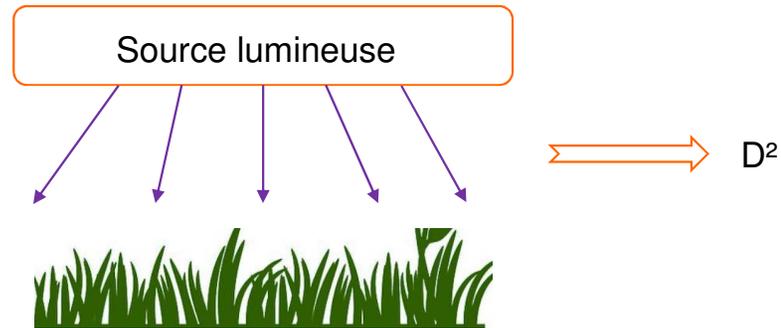
## Relation entre les plantes et la lumière

---



## Intensité lumineuse

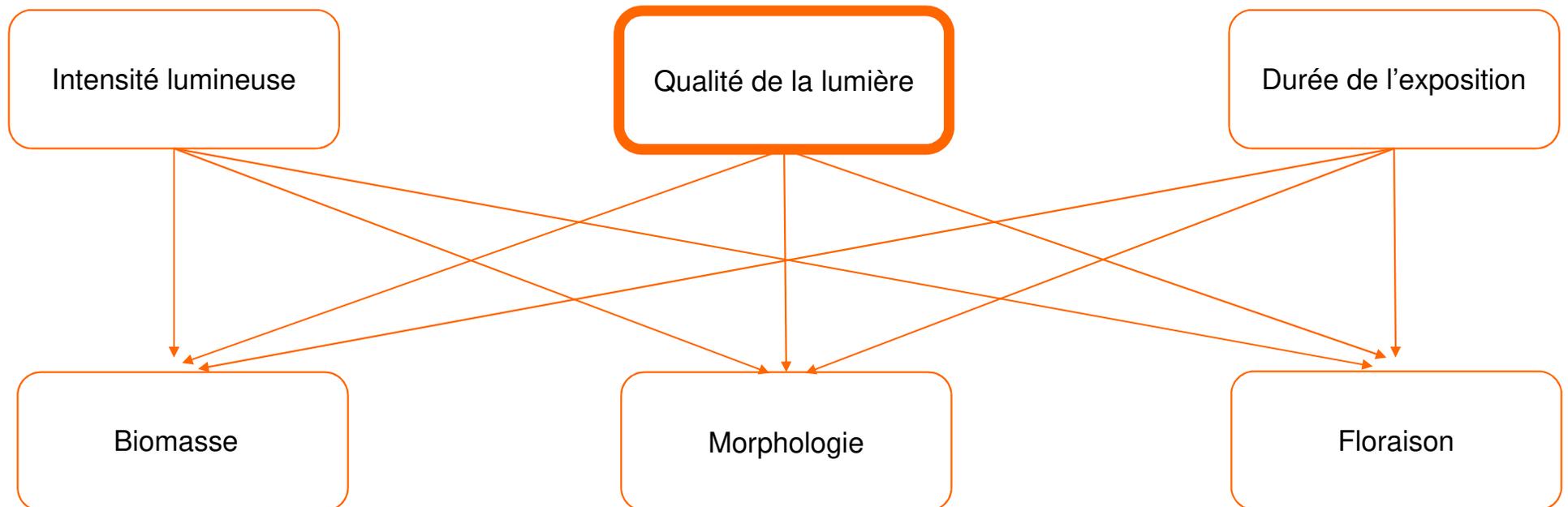
L'intensité lumineuse en éclairage d'horticulture se définit en Micromoles Umol (1 **micromole** =  $10^{-6}$  moles). La relation entre les micromoles et les unités d'éclairage général est équivalente et peut être vulgarisée comme suit :



Lumens	≡	Flux Photonique Photosynthétique (PPF)	≡	UMols <sup>1</sup>
Pieds bougie ou Lux	≡	Densité de Flux Photonique Photosynthétique (PPFD)	≡	UMolm <sup>2</sup> s <sup>1</sup>
Candela	≡	Photons	≡	γ

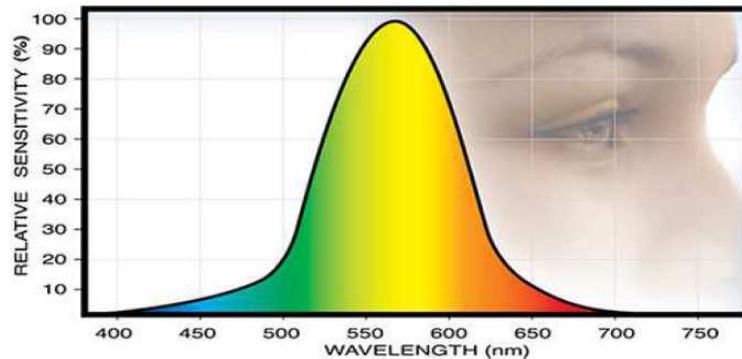
## Relation entre les plantes et la lumière

---



# Qualité de la lumière

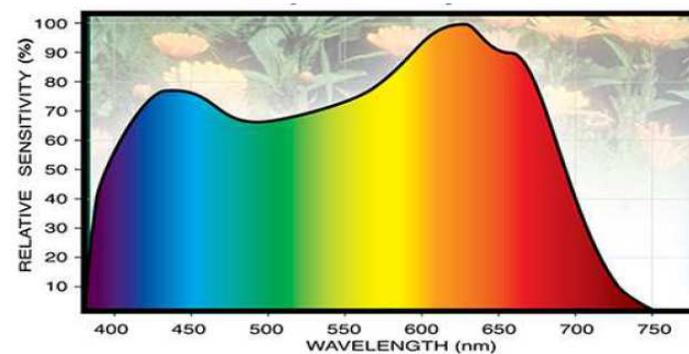
Réponse de l'œil humain à la lumière



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 perçu par l'homme.

Réponse de la photosynthèse à la lumière

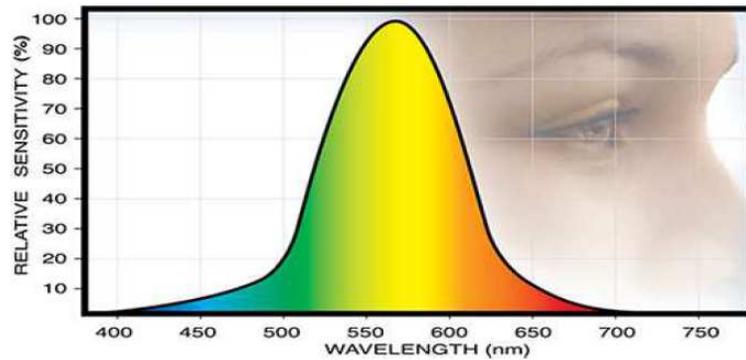


*Photosynthetically active radiation (PAR)*

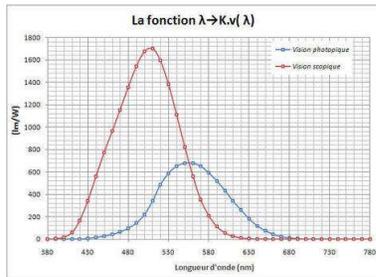
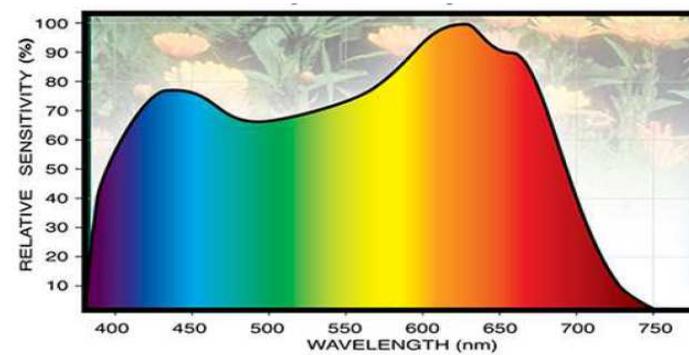
Le rayonnement photosynthétiquement actif Photosynthetically active radiation (PAR) est défini comme un rayonnement électromagnétique sur la plage spectrale de 400 nm à 700 nm que les organismes photosynthétiques peuvent utiliser dans le processus de photosynthèse pour fixer le carbone dans le CO<sub>2</sub> dans les glucides. Les horticulteurs mesurent le 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).

# Récepteurs

Réponse de l'œil humain à la lumière



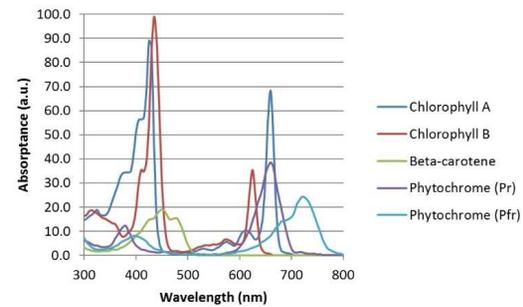
Réponse de la photosynthèse à la lumière



Récepteurs de l'œil

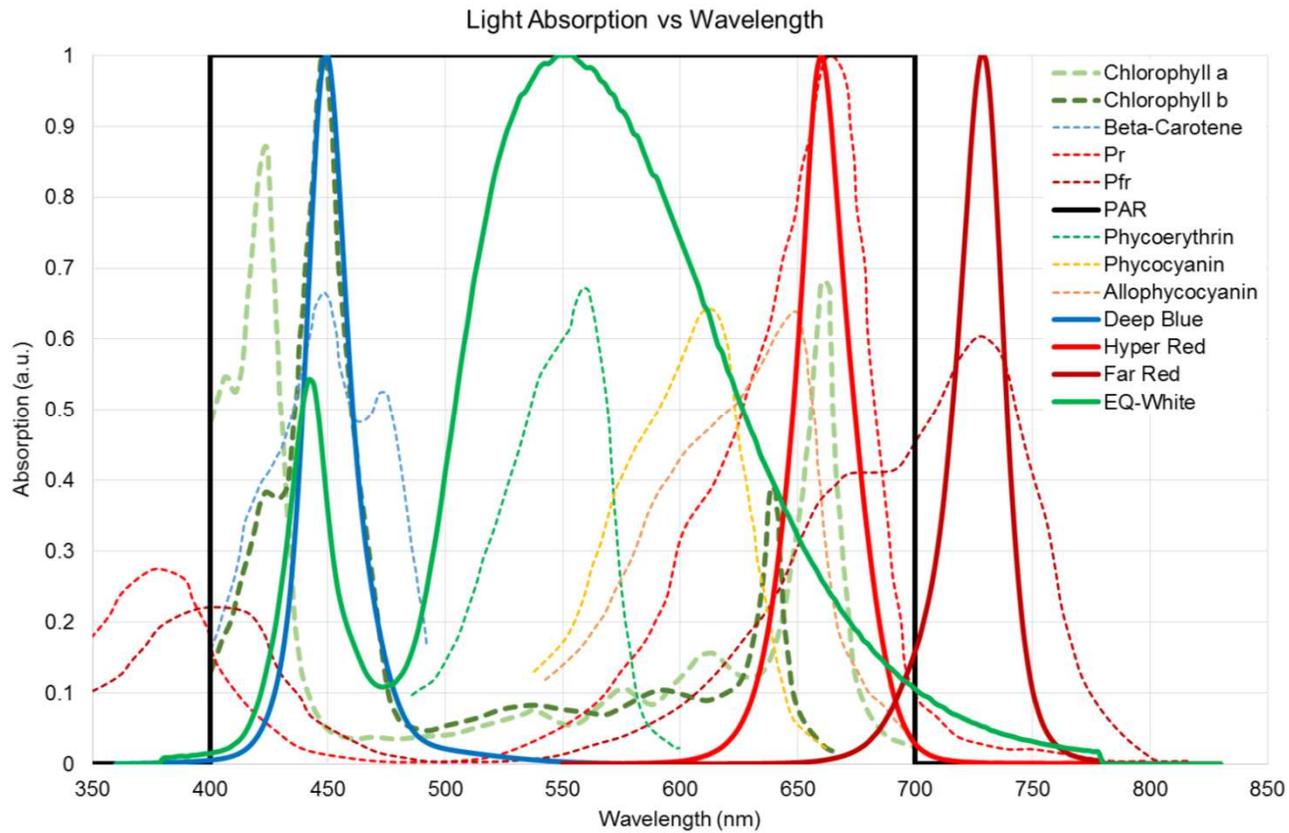
- Cônes
- Bâtonnets
- Ganglions

Récepteurs de la photosynthèse



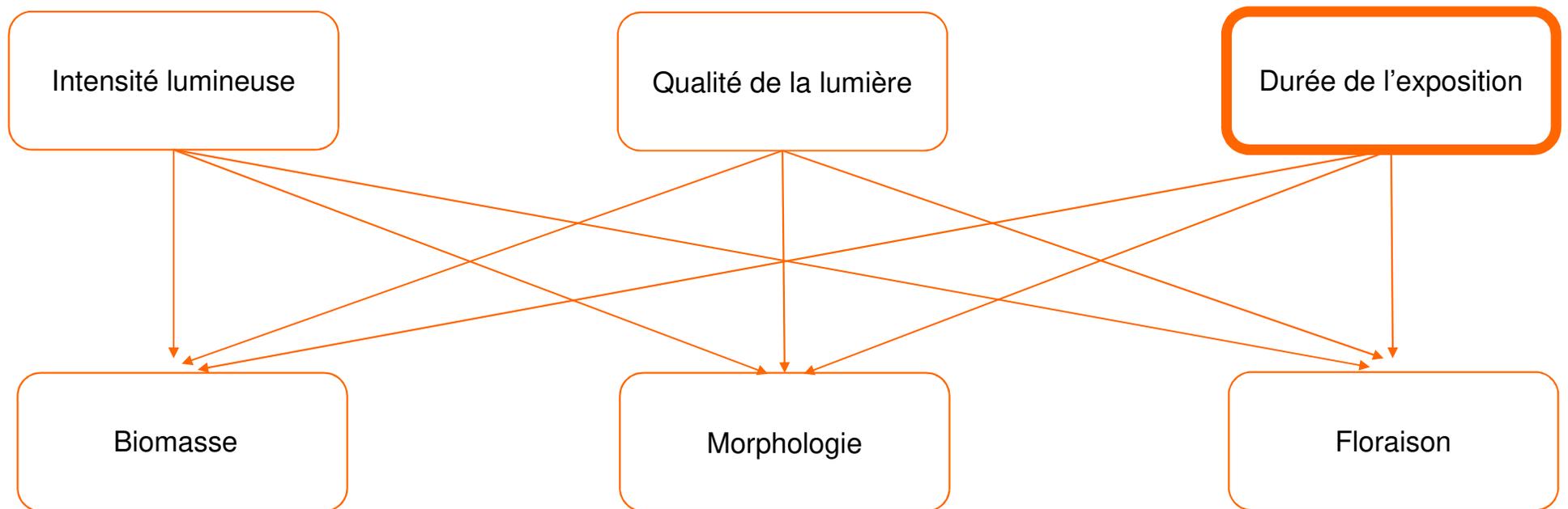
- Chlorophylle A
- Chlorophylle B
- Beta-Carotène
- Phytochrome (Pr)
- Phytochrome (Pfr)

# Distribution spectrale de la puissance



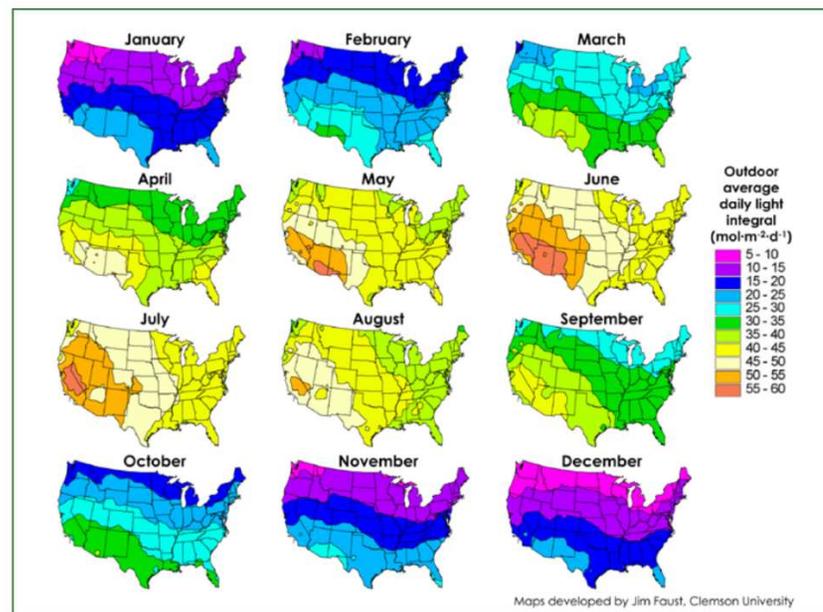
## Relation entre les plantes et la lumière

---



## Durée de l'exposition

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>

# Calcul de Valeur intégrée journalière

## Étape 1

Déterminer le nombre moyen de pieds bougies par heure. Prendre la moyenne horaire des pieds-bougies par jour, ajoutez-les, puis divisez somme de 24.

Par exemple, vous avez 24 lectures de pieds-bougies par heure:

$0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 5 + 12 + 21 + 40 + 43 + 159 + 399 + 302 + 461 + 610 + 819 + 567 + 434 + 327 + 264 + 126 + 15 + 4 + 0 = 4,408$  pieds-bougies  
 $4,408 \text{ pieds-bougies} \div 24 \text{ heures} = 184 \text{ pieds-bougies par heure}$

## Étape 2

Convertir les pieds-bougies par heure à PAR ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) basé sur la lumière émise par la source. Pour se faire, en multipliant les pieds bougies par heure par un facteur pour la source de lumière. La lumière du soleil a 0,20 pied-bougies par  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Les lampes HPS ont 0,13 pied-bougies par  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

En utilisant le même exemple que ci-dessus, le PAR pour les cultures recevant la lumière naturelle serait calculée comme ceci:  $184 \text{ pieds-bougies par heure} \times 0,20 \text{ pied-bougies par } \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 36,8 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$   
Pour les lampes HPS, le PAR serait:  $184 \text{ pieds-bougies par heure} \times 0,13 \text{ pied-bougies par } \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 23,9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

## Étape 3

Convertir le PAR en DLI. Faites ceci en utilisant l'équation suivante:  
 $\text{PAR} (\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \times 0,0864$   
Le facteur 0,0864 est le nombre total de secondes en un jour divisé par 1 000 000

Pour les cultures recevant la lumière naturelle du soleil:  
 $36,8 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \times 0,0864 = 3,2 \text{ mol.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$   
Pour les cultures recevant un éclairage HPS:  
 $23,9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \times 0,0864 = 2,1 \text{ mol.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$

## Gain en production

---

**1% de plus de lumière = 1% de plus de récolte**

À considérer:

- Somme de lumière reçue et utilisée par l'ensemble des plants
- CO2
- Température des feuilles
- Transpiration
- Humidité relative
- Irrigation
- Fertilisant

## Recherche vs. Production commerciale

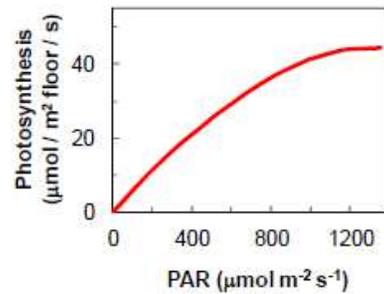
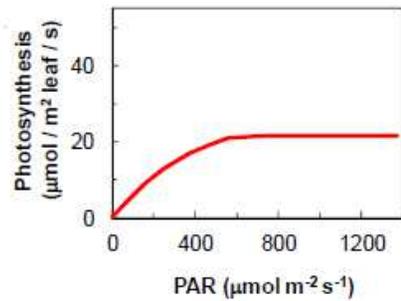
---



# Gain en production grâce à la lumière

Plant sensors are available now.

Models used for upscaling sensor info of a leaf to whole crop (Photosynthesis leaf is not equal to crop)

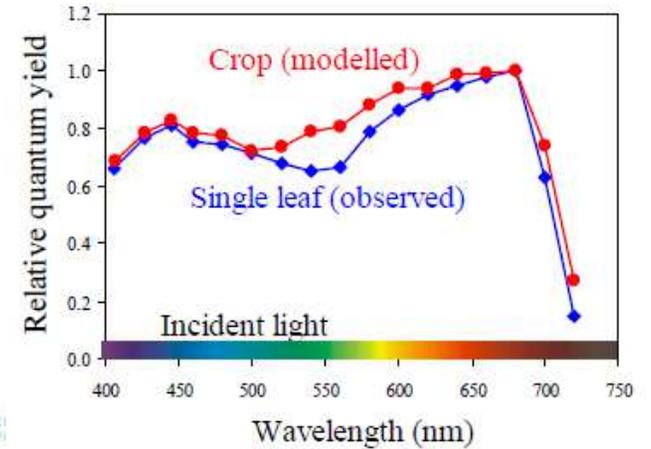


Response crop  $\neq$  single leaf

Assumption: crop consists of identical green leaves

Leaf: low absorption green light

Crop: more absorption of green light (deeper penetration in canopy)



---

# Les applications

## Production en serre

---



Source: <https://ville.stfelicien.qc.ca/fr/citoyens/les-grands-projets/serres-toundra/>

# Production en serre

---

Source de prédilection



Haute pression Sodium (1000W Double embout)



Défis techniques liés à l'application



Gestion de la chaleur, haute puissance requise,  
Ombrage

Opportunité pour amélioration  
technologique



Haut potentiel pour les économies  
d'énergie avec le DEL

## Production intérieure Cannabis

---



# Production intérieure Cannabis

---

Source de prédilection



Haute pression Sodium (1000W Double embout)  
Halogénures métalliques céramiques (315W)  
Tubes fluorescents (boutures)



Défis techniques liés à l'application



Gestion de la chaleur, haute puissance requise,  
qualité du spectre lumineux, dépréciation des  
lampes

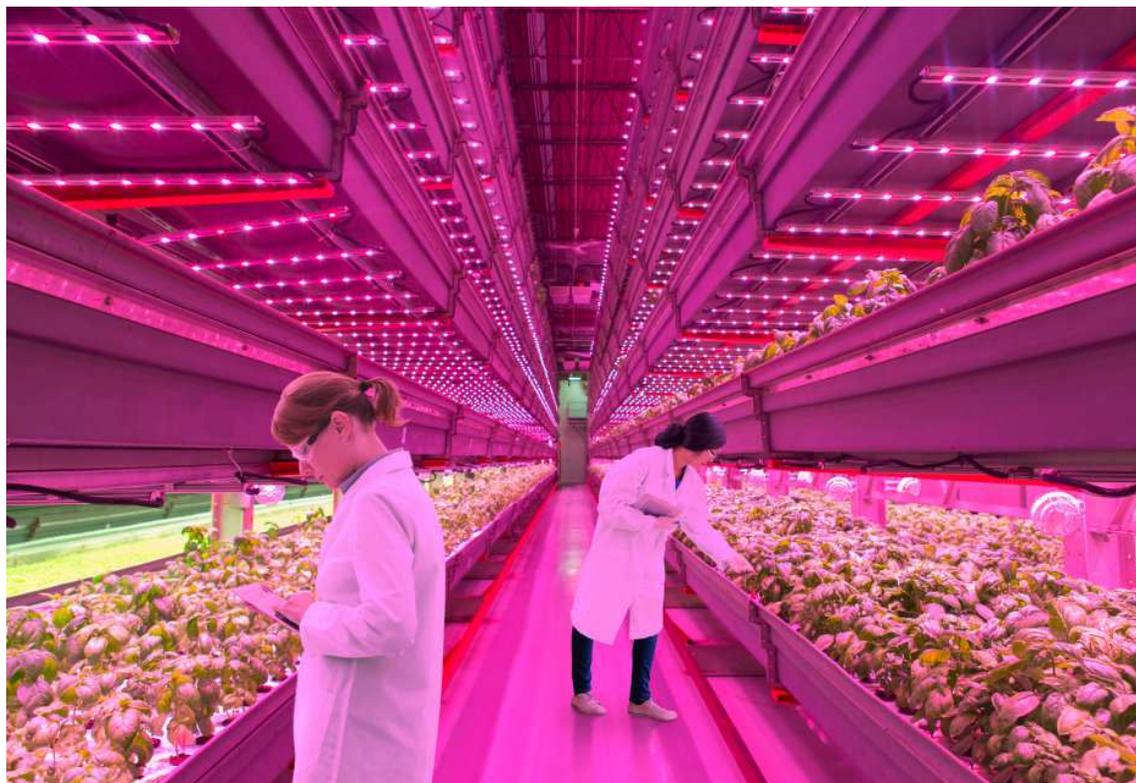
Opportunité pour amélioration  
technologique



Haut potentiel pour les économies d'énergie  
avec le DEL. Amélioration des valeurs  
qualitatives du produit fini.

## Ferme Verticales (légumes)

---



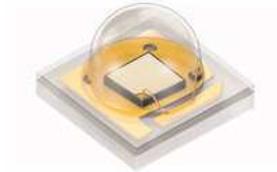
## Ferme Verticales (légumes)

---

Source de prédilection



Tubes fluorescents (boutures)  
DEL (rouge/bleu ,blanche)



Défis techniques liés à l'application



Uniformité de l'éclairage, gestion de la chaleur  
et de la circulation d'air

Opportunité pour amélioration  
technologique



Amélioration des valeurs quantitatives et  
qualitatives du produit fini. Gain en production  
grâce à la modification spectrale durant les  
cycles de production.

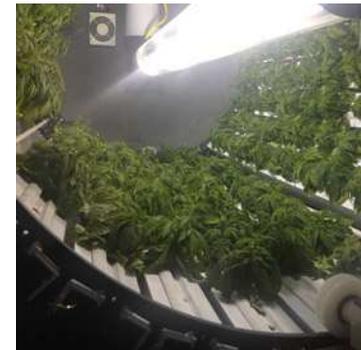
## Applications (autres)

---

- Murs végétaux



- Systèmes automatiques



- Appareils résidentiels



---

# Les calculs photoniques

## Le design d'éclairage d'horticulture

---



AGI32 Rendering by Jordan Goulet

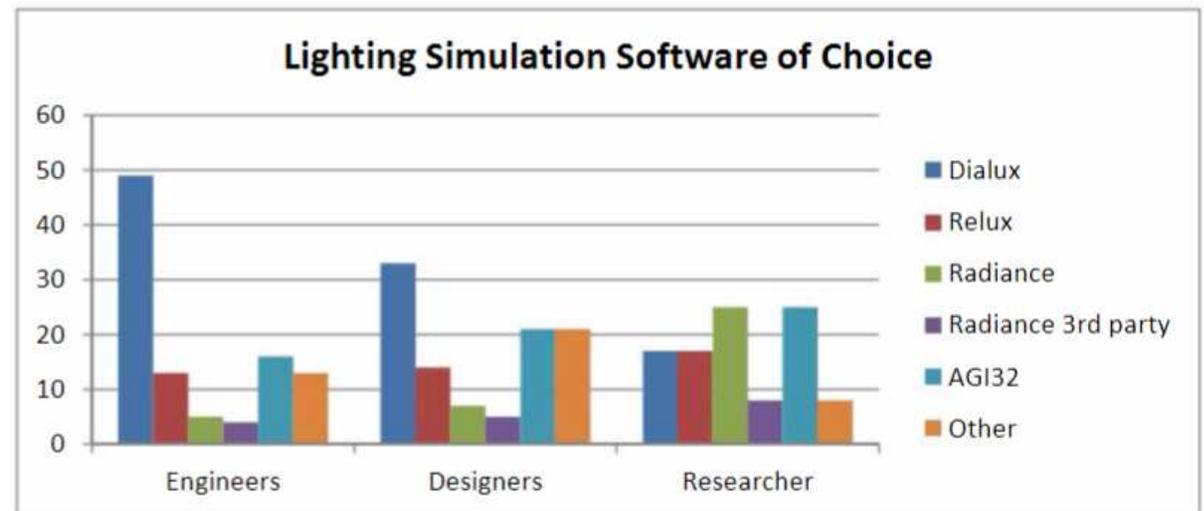
La conception de l'éclairage en horticulture est utile pour déterminer la quantité et le type d'appareils nécessaires afin d'atteindre le niveau de densité de flux de photoniques photosynthétiques (PPFD). Trouver le meilleur arrangement spatial avec le minimum de luminaires pour atteindre la cible est une nécessité afin de réduire l'investissement en capital pour l'utilisateur final.

Les plans d'éclairage sont utilisés par nos clients pour comparer les performances des produits des fabricants les uns par rapport aux autres lors des appels d'offre.

## Options de logiciels de simulation d'éclairage disponibles

Différents logiciels de calcul sont disponibles sur le marché et sont tous «centrés sur l'œil l'humain». Certains offrent des fonctions limitées de mesure de l'irradiance horticole. Aucun d'eux n'est spécialement conçu pour les applications d'horticulture.

- Dialux
- Relux
- AGI32 by Lighting Analysis
- Calculux (Philips)
- Radiance
- Visual (Acuity)
- Lightscape 3.2
- 3D Max design
- Litestar
- Daylight Analysis
- Optiwin 3D Pro
- AND MORE...



Source: A comparison Study of four popular Lighting Simulation software programs by Peter Byrne B.Eng (tech) , Brunel University [https://issuu.com/peter.byrne1000/docs/dissertation\\_-\\_peter\\_byrne\\_-\\_publis](https://issuu.com/peter.byrne1000/docs/dissertation_-_peter_byrne_-_publis)

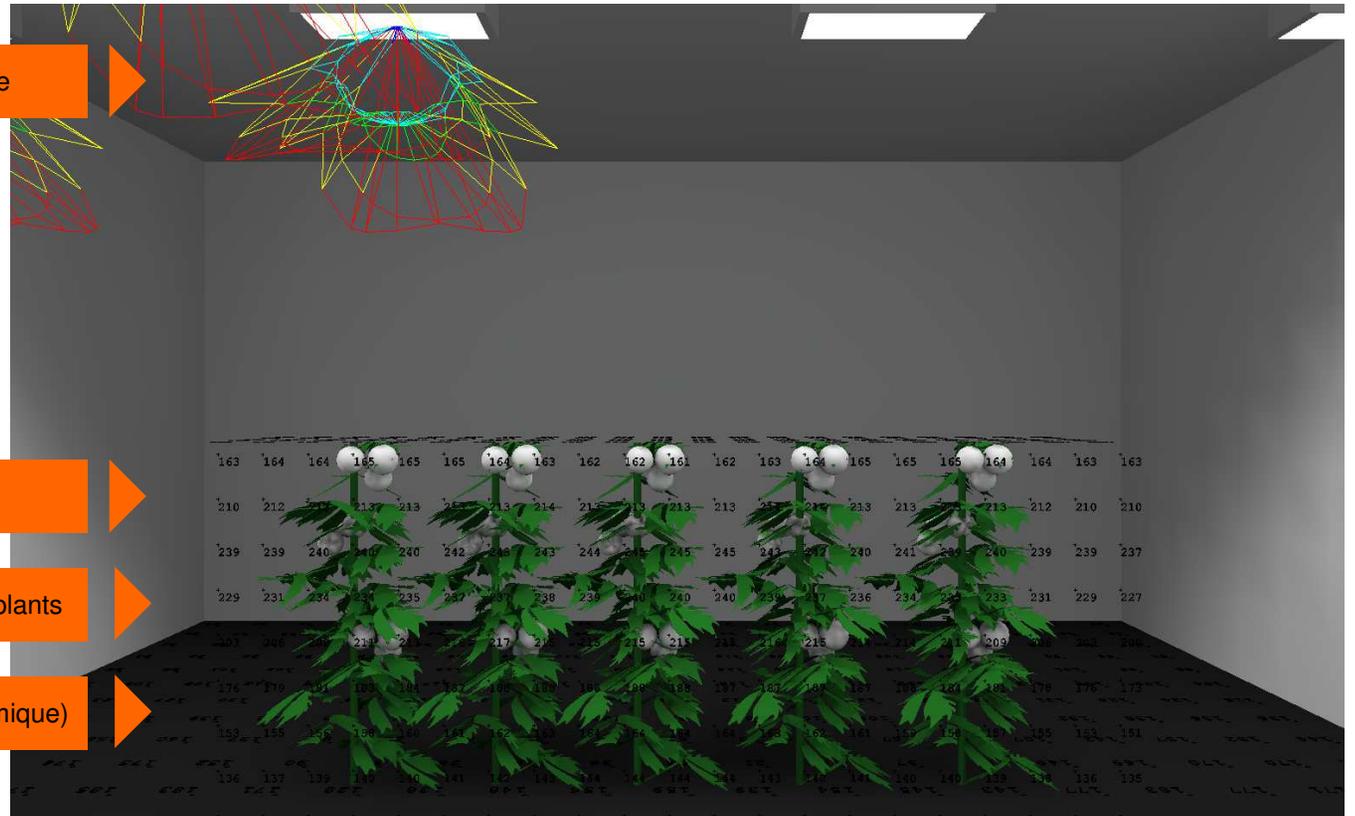
# Limitations due à la recherche inexistante

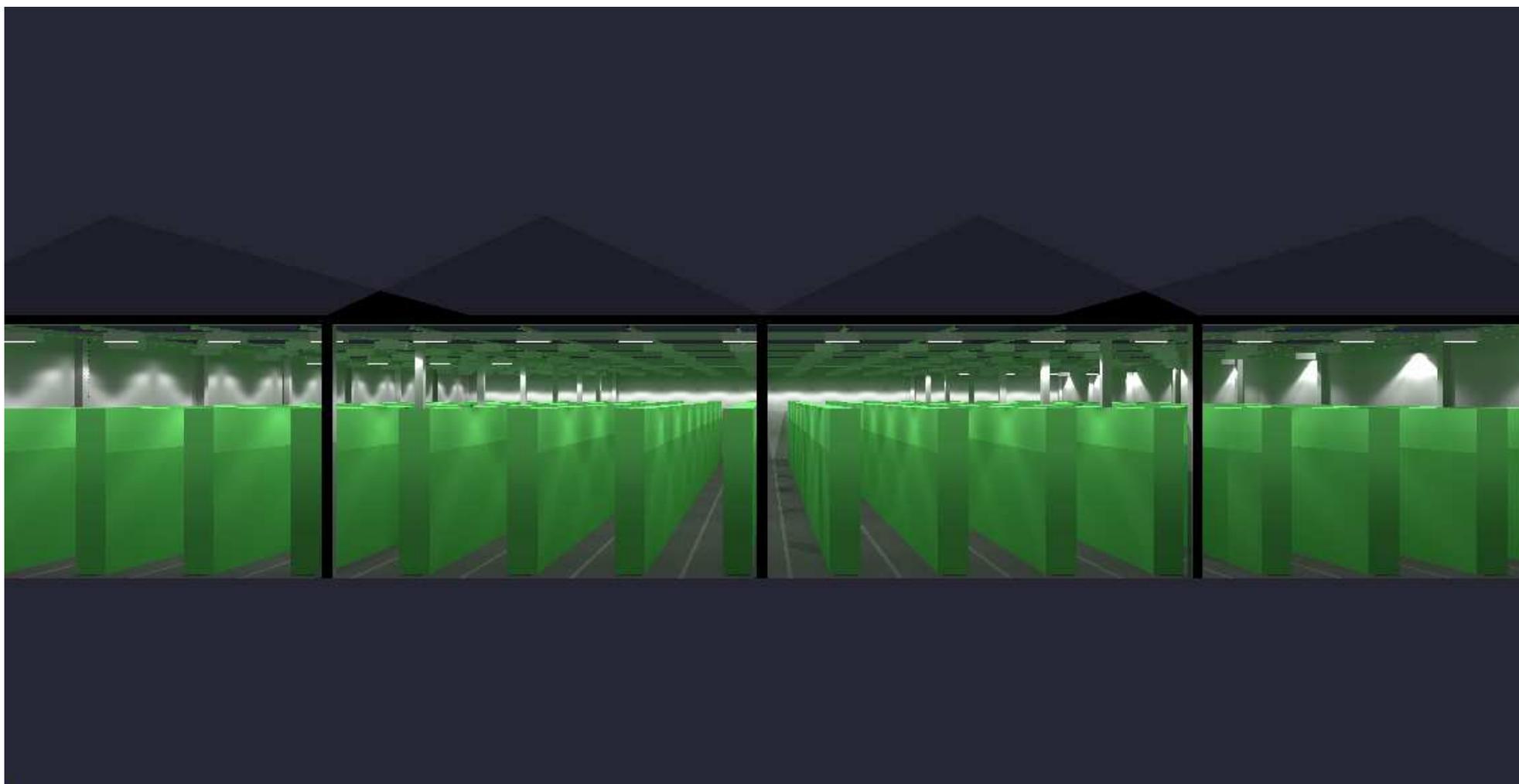
Standardisation des essais en laboratoire

Réflectance et transmittance des plants

Coefficient d'absorption des photons par les plants

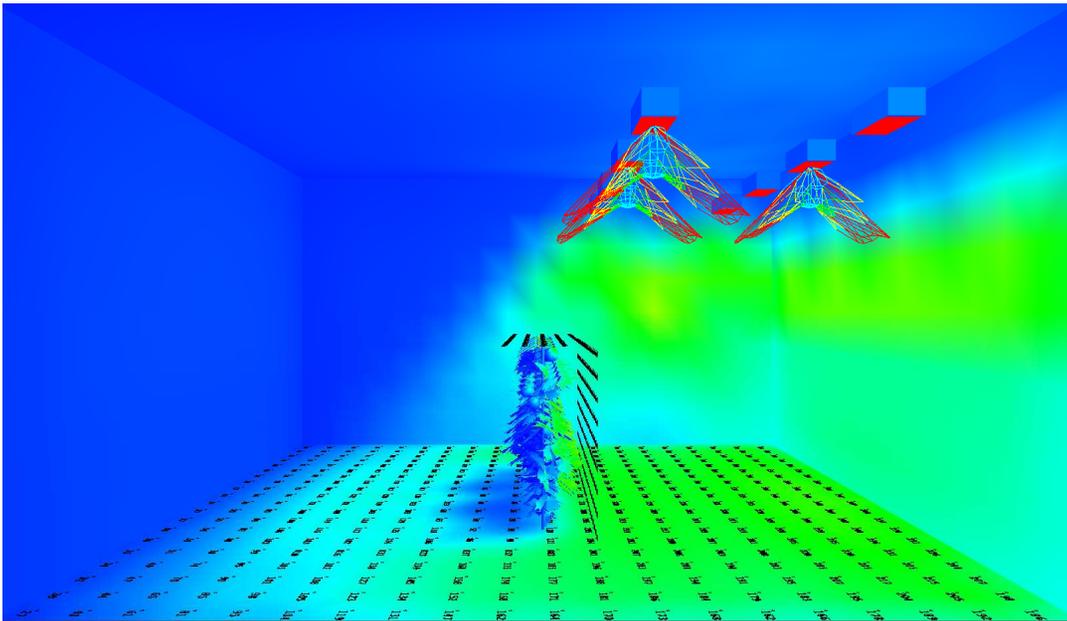
Éclairage à longueur d'ondes variables (dynamique)





# Capacités du logiciel AGI32

---



AGI32 Rendering by Jordan Goulet –  
Irradiance photonique horizontale et verticale en culture de tomates en serre

## Fonctions disponibles

A l'aide de fichiers de luminaires .IES (NAM) ou .LDT (RoW) créés dans des laboratoires photométriques, le logiciel de conception d'éclairage permet d'obtenir:

- Irradiance horizontale et verticale précise sur une surface incidente (méthode point par point)
- L'uniformité de l'irradiance
- Simulation d'irradiance de l'éclairage naturel (fonction limitée)

# Grille PPFd avec AGI32

The screenshot displays the AGI32 software interface for horticulture lighting design. The main window shows a 3D perspective view of a rectangular growth chamber with a grid of calculation points on its top surface. A dialog box titled 'Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) Factors' is open, allowing the user to select a light source from a list. The list includes various types of lamps such as incandescent, high-pressure sodium, metal halide, and LED, each with a corresponding PPFd factor in  $\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{Sq}\cdot\text{m}$ . The selected factor is 'HL300 6%' with a PPFd of 82.9. Below the dialog, a 'Calculation Summary' table provides a detailed overview of the current calculation parameters and results.

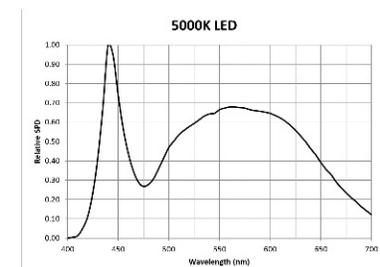
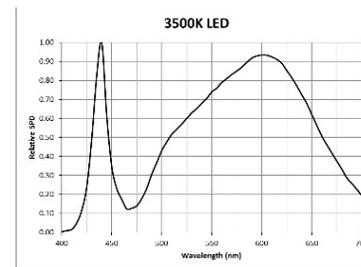
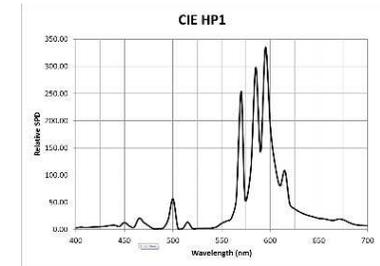
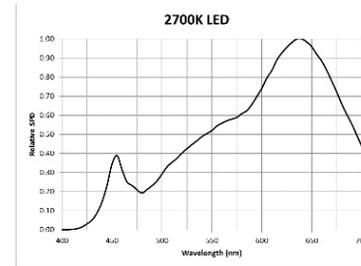
Label	CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	PPFD Factor	PPFD Factor Description
Object_2_Top_1	PPFD	$\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{S}$	?	?	?	N.A.	N.A.	82.9	HL300 6%

## Facteur de conversion (Klux – PPFD)

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



# Conversion PPF

---

## 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  $\Phi(\lambda)$  pour les plantes en watts par nanomètre pour chaque lumière comme:

$$\Phi(\lambda) / \text{lumen} = [\text{Wrel}(\lambda)] / [683 * \int_{(400-700)} [V(\lambda) \text{Wrel}(\lambda) \Delta\lambda]]$$

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:

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

où:

Na = 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:

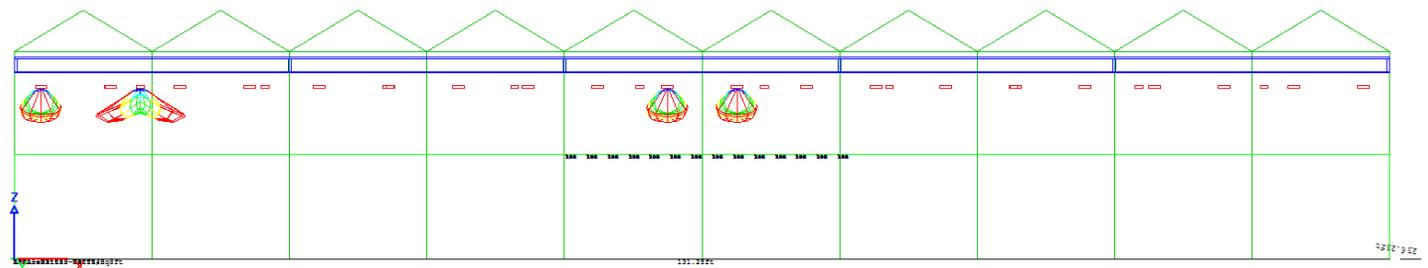
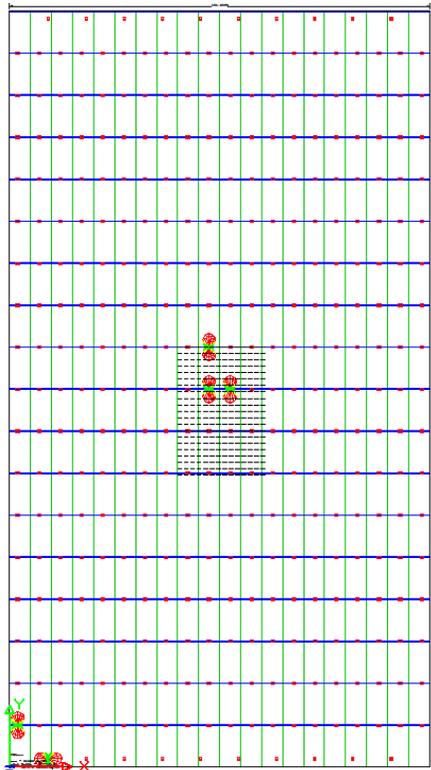
$$\text{PPF} \gg 8,359 * 10^{-3} * \int_{(400-700)} [\lambda \Phi(\lambda) \Delta\lambda]$$

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  $\mu\text{mol} / \text{s}\cdot\text{m}^2$ :

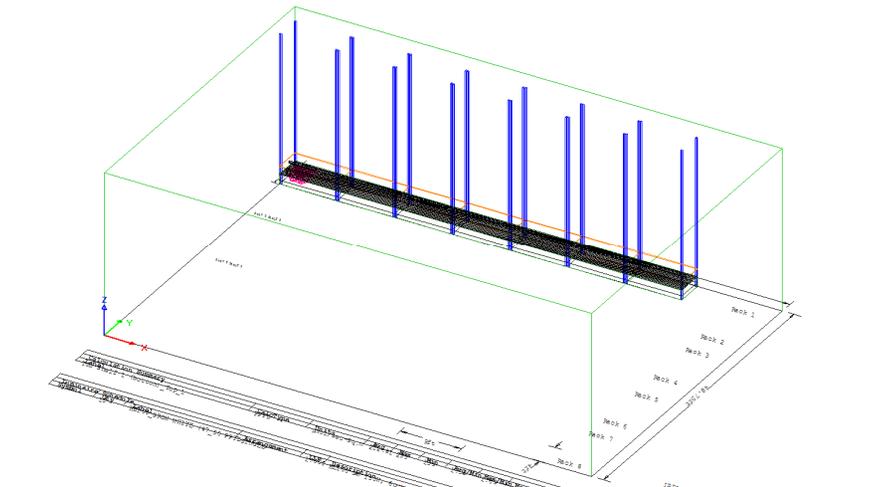
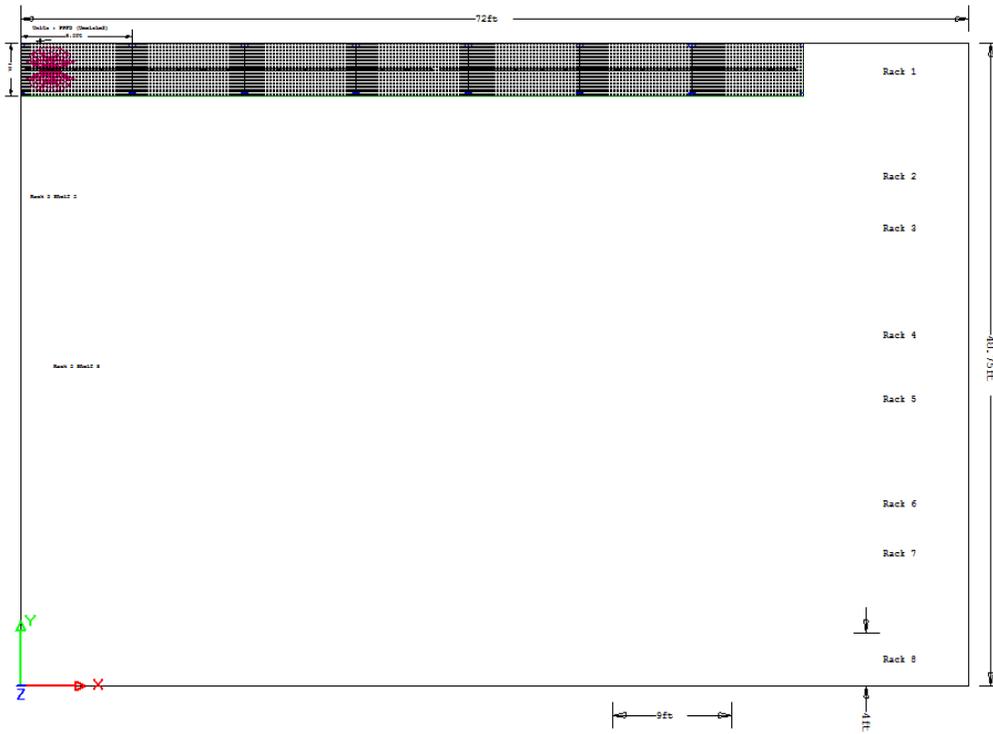


# Design de serre de production



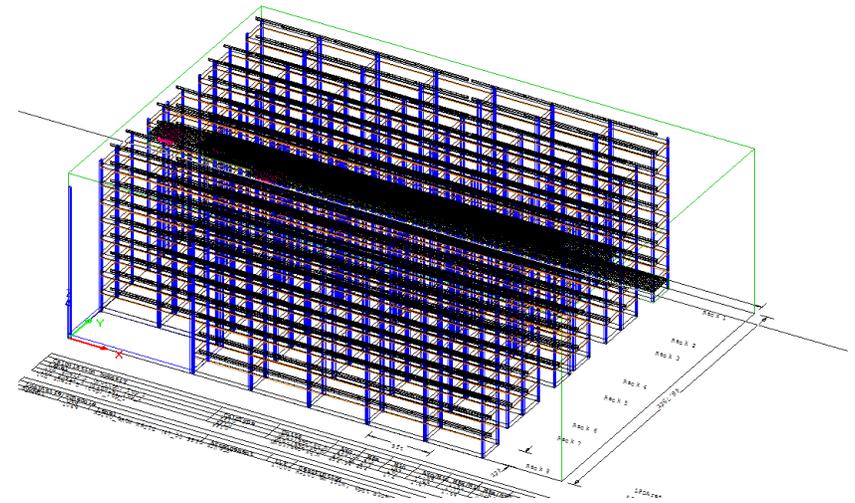
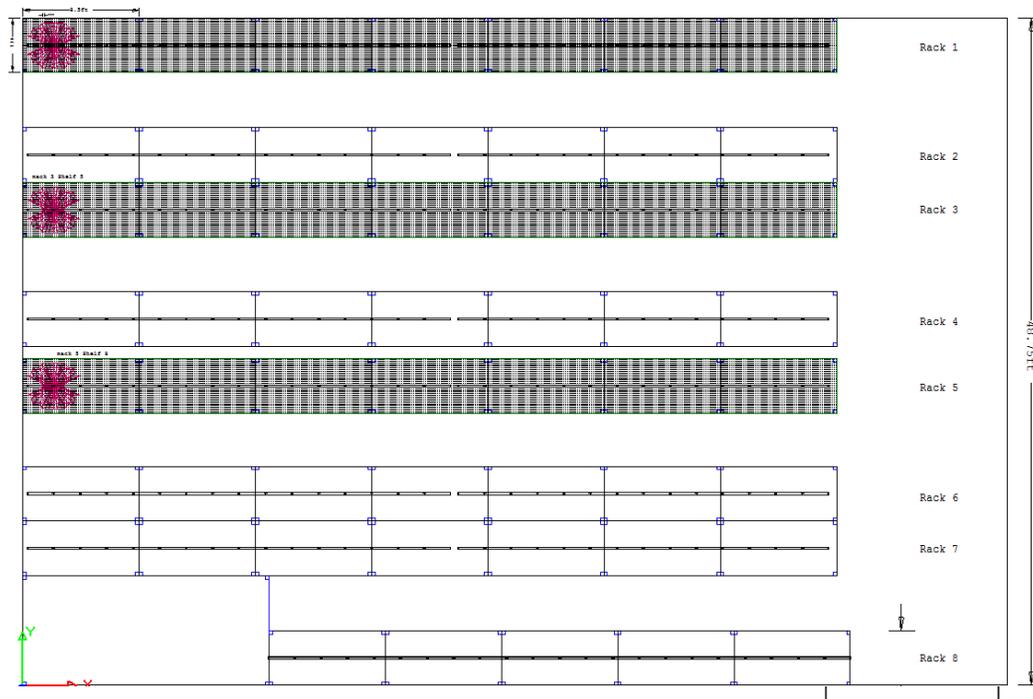
Calculation Summary													
CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	PPFD Factor	PPFD Factor Description	Max/Avg	# Pts	PtSpcLr	PtSpcTb	Label
PPFD	μmol/sec-Sq.m	199.16	207	194	1.03	1.07	11.7	CIE HP1 (standard high-pressur	N.A.	294	2	2	Plant Canopy 10ft tall Top_1

# Design de ferme verticale



Calculation Summary													
Label	CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	Max/Avg	# Pts	Description	PtSpcLr	PtSpcTb	Grid E
Tub Shelf 1 (bottom)_Top_1	PPFD	μmol/sec-Sq.m	212.81	235	139	1.53	1.69	N.A.	15232		0.125	0.125	1.438

# Design de ferme verticale



Calculation Summary													
Label	CalcType	Units	Avg	Max	Min	Avg/Min	Max/Min	Max/Avg	# Pts	Description	PtSpcLr	PtSpcTb	Grid E
Tub Shelf 1 (bottom)_Top_1	PPFD	$\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{Sq.m}$	233.00	275	144	1.62	1.91	N.A.	15232		0.125	0.125	1.438
Tub Shelf 3 (Middle)_Top_1	PPFD	$\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{Sq.m}$	230.21	273	160	1.44	1.71	N.A.	15232		0.125	0.125	11.813
Tub Shelf 5 (top)_Top_1	PPFD	$\mu\text{mol}/\text{sec}\cdot\text{Sq.m}$	252.94	282	172	1.47	1.64	N.A.	15232		0.125	0.125	19.813

## Gain en production

---

**1% de plus de lumière = 1% de plus de récolte**

À considérer:

- Somme de lumière reçue et utilisée par l'ensemble des plants
- CO2
- Température des feuilles
- Transpiration
- Humidité relative
- Irrigation
- Fertilisant

## Références

---

- Module 17 – Éclairage et Horticulture - École Polytechnique de Mtl – Peer Eric Moldvar



- Lighting in greenhouses and vertical farms – Wageningen University – Leo Marcelis



- Measuring Daily Light Integral in a Greenhouse – Purdue extension university



- OSRAM Opto-semiconductors – LED in horticulture application presentation

