

# Les LEDs et les plantes...

Ing. Samuël Colasse<sup>1</sup>, Ir. Julien Louvieux<sup>2</sup>, Dr. Thierry Marique<sup>3</sup> et Dr. Cécile Nanbru<sup>4</sup>

L'emploi des diodes lumineuses (ou LED pour « light emitting diode ») devient de plus en plus courant (feux d'automobiles, éclairages domestiques,...) avec cet avantage constant : une plus faible consommation électrique. D'où la question qu'a posé le projet « VEGELED » : qu'en est-il de leur utilisation dans le domaine de la recherche et de l'horticulture ?

Dans le but d'apporter des éléments de réponse à cette question la Haute École de la Province de Hainaut – Condorcet a réalisé, en Wallonie, un projet de recherche intitulé « VEGELED ». Il s'agit d'un projet FIRST – Hautes Écoles réunissant la H.E.P.H. – Condorcet, le C.A.R.A.H, son centre de recherches appliquées associé et le département Spotled de l'entreprise Colasse s.a. spécialisé dans l'utilisation et la diffusion des éclairages LED. Ce projet a été soutenu par la Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie du S.P.W.

Après deux ans de recherches, nous pouvons affirmer que leur utilisation est en effet parfaitement conciliable avec des objectifs de production horticole qu'ils soient ornementaux ou maraîchers, et ce avec des avantages indiscutables en terme d'économie d'énergie et de limitation de risque de pollution.

Les essais de ces deux premières années ont essentiellement été réalisés en chambres de culture, ce qui impliquait l'absence d'apport de lumière exogène et une uniformisation des paramètres cultureux. Une douzaine d'essais ont

Plantes testées	Nbre d'expérimentations	Nbre de traitements
Laitue 'Reine de Mai'	6	77
Laitue 'Merveille des 4 saisons'	4	30
Radis 'National à bout blanc'	4	27
Mais 'Morisat'	2	17
Basilic 'à larges feuilles'	1	16
Petunia F1	1	9
Pelargonium 'Shocking Violet'	1	9
Verveine blanche	1	9
Banancier	1	9
Colza 'Olivert'	1	8
Impatiens	1	8
Persil	1	8
Bégonia pourpre	1	8
Poivron doux d'Espagne	1	8
Ananas	1	5
Tomate	1	4
Haricot	1	4
Oignon	1	2

TABLEAU 1: PLANTES TESTÉES DANS LE PROJET VEGELED



été réalisés reprenant entre 8 et 16 traitements chacune. Le projet VEGELED s'attelant à tester et paramétrer les LEDs pour des cultures en enceintes closes, c'est-à-dire sans autre apport de lumière (cf. photo ci-contre). La majorité des traitements employaient des LEDs (230) afin de déterminer les puissances optimales ainsi que les spectres les plus pertinents pour les différentes plantes tests. Néanmoins 24 traitements ont utilisé les néons horticoles, quatre traitements ont employé des lampes fluo compactes (2) ou des halogènes (2), ceci afin de comparer l'efficacité lumineuse des LEDs à d'autres sources lumineuses.

1. Chercheur du projet Vegeled.
2. Conseiller au projet Vegeled.

3. Conseiller au projet Vegeled spécialisé dans les simulations mathématiques.
4. Promoteur du projet Vegeled.

TABLEAU 2 : COMPARAISON A MEME PUISSANCE NOMINALE DES PRINCIPAUX TYPES D'ECLAIRAGE A ORIENTATION HORTICOLE

Base d'une puissance nominale de 1200 W	distance	Consommation W.h <sup>-1</sup>	Illuminance (lx)	Equilibre rouge - bleu	Equilibre rouge - far red	% de rayonnement essentiel à la plante	μmole.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> de photons utiles à la plante / kLx	Dépense énergétique W.h <sup>-1</sup> / μmole.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> de photons utiles
Lumière naturelle estivale			42000	46%	50%	46%	11,0	
Néon horticole GRO-LUX 40 x 30 W	1 m	3280	2020	<u>33%</u>	<u>6%</u>	<u>78%</u>	21,5	72,4
HPI + Phillips 3 x 400 W	1 m	1200	3460	<u>51%</u>	30%	45%	6,6	52,6
HPS 2 x 600 W	1 m	1200	16500	<1%	<u>8%</u>	42%	4,7	14,6
Halogènes 20 x 60 W	1 m	1200	1170	7%	70%	34%	12,1	111,7
Lampe Fluocompact 2700 K + 4000 K (50/50) 20 x 60 W	1 m	1200	6043	27%	14%	53%	7	28,3
Leds blanc froid 1200 x 1W	1 m	1200	7230	51%	14%	51%	7,6	22,0
Combinaison spots leds monochromes ( 24 x 50W)	1 m	1200	4200	<u>43%</u>	<u>1%</u>	<u>98%</u>	<u>85</u>	<u>3,4</u>

Le tableau ci-dessus, réalisé sur base de mesures, met en évidence quelques points essentiels à prendre en compte lorsque l'on envisage l'éclairage de végétaux.

La lumière naturelle reste, et de loin, la plus économique et souvent la mieux adaptée à la plante. Lorsque l'on mesure la lumière naturelle, on remarque un équilibre entre le flux photonique (PPF) délivré en rouge et en rouge lointain (far red) proche de 50%. Cet équilibre reproduit en éclairage artificiel est par contre désastreux, et ce parce que les éclairages artificiels (et c'est heureux pour la santé humaine) sont pratiquement dépourvus de rayonnement ultra-violet (UV) dont les effets sont antagonistes de ceux des rouges lointains.

Le « néon horticole » ou plus exactement le tube luminescent à usage horticole est, parmi les éclairages horticoles traditionnels le plus efficace en terme de qualité de rayonnement, mais son emploi est limité par sa consommation énergétique élevée et sa durée de vie limitée (± 3000 h). D'autre part, la présence d'un élément toxique (vapeur de mercure) rapidement libéré dans l'environnement à la destruction du tube implique des risques sanitaires dans la filière de production et au recyclage.

Les HPI (lampes aux iodures métalliques) et les HPS (lampes au sodium) sont largement utilisées en horticulture, mais elles ne produisent pas un éclairage optimum, notamment les HPS qui sont quasiment dépourvues d'émission dans le bleu. Ces éclairages produisent également beaucoup de chaleur, ce qui implique éventuellement l'obligation d'installer un système de refroidissement également consommateur d'énergie. Il faut remarquer que la quantité de photons utiles par mille lux vaut près de la moitié de celle fournie par la lumière solaire (d'où la recommandation de doubler le nombre de lux si on utilise ce type d'éclairage). La durée de vie des HPI est de 8.000 h et de 10.000 h pour les HPS. Mis à part le déséquilibre dans le spectre, les HPS sont parmi les éclairages conventionnels les moins coûteux et offrent le meilleur rendement lumière par rapport à l'énergie consommée.

Quand aux LEDs, chaque modèle de LED possède un spectre différent selon le procédé de fabrication. Parmi les LEDs blanches, toutes ne sont pas équivalentes et certaines sont plus

avantageuses pour la croissance des végétaux. La qualité du rayonnement est assez similaire à celle d'un HPI tout en chauffant beaucoup moins, leur durée de vie est de 40.000 h !

Le grand avantage des LEDs réside dans la possibilité d'en sélectionner émettant à différentes longueurs d'ondes et donc de pouvoir cibler le spectre lumineux le plus approprié à la plante (selon le stade de développement voulu). Ceci se justifie pleinement quand on sait que la chlorophylle, le principal pigment nécessaire à la photosynthèse, n'absorbe que la lumière dans les spectres bleu et rouge. Ainsi avec une combinaison de plusieurs LEDs monochromes on peut parvenir à obtenir un spectre parfaitement équilibré et adaptable avec une proportion de lumière essentielle à la plante de 98% et une dépense énergétique faible. À remarquer que la quantité de photons utiles par mille lux produite avec ce système correspond à 770% de celle de la lumière naturelle ! Le système ne chauffe pratiquement pas (on peut toujours les toucher même après des dizaines d'heures de fonctionnement).

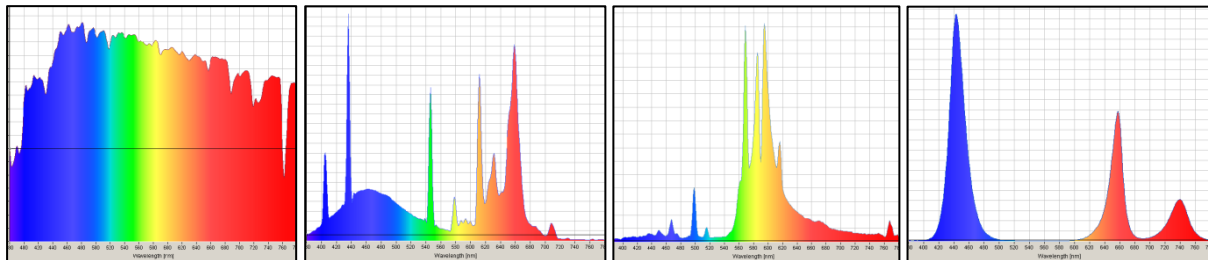


FIGURE 1: SPECTRES LUMINEUX DE GAUCHE A DROITE : SOLEIL, NEON HORTICOLE, HPS, 3 LEDs MONOCHROMES.

Cette possibilité de ne produire que les longueurs d'onde nécessaires implique une révolution de l'éclairage horticoles :

- Les unités d'appréciation de la quantité de lumière telles que le lux, le candélabre et le lumen se révèlent inappropriées car toutes basées sur la perception de l'œil humain or celui-ci étant centré sur le spectre vert alors que les plantes sont surtout intéressées par les gammes rouges et bleues.
- Ce type d'éclairage permet toutes les variations d'intensité et de qualité lumineuses.
- Un seul système d'éclairage avec des LEDs modulables peut convenir pour toutes les plantes et pour tous les stades de développement.
- Le système ne chauffant pas, le dispositif peut être placé au plus près de la plante ce qui diminue donc les pertes lumineuses par dispersion.

En deux ans, l'équipe Végéled a pu produire en milieu clos, sans autre source d'éclairage que des LEDs, plus d'une dizaine de plantes (cf. tableau 1).

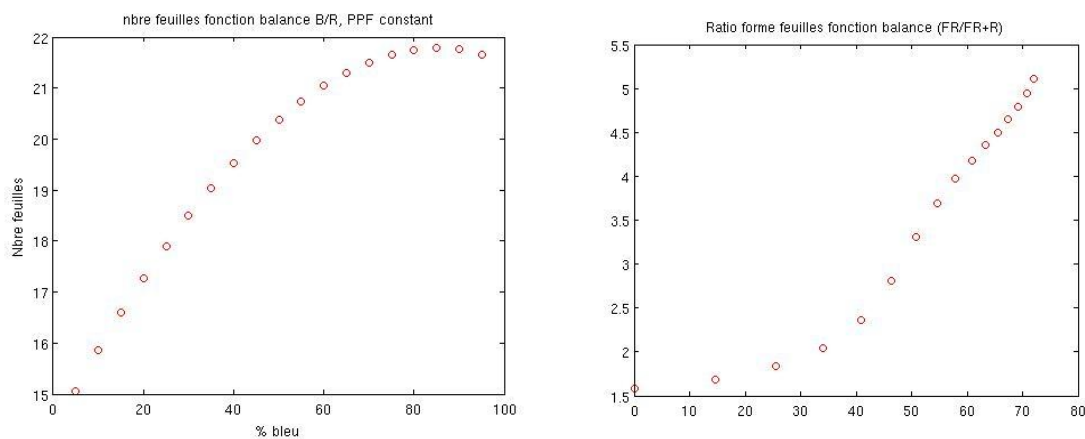
Plusieurs plantes ont été testées, mais la laitue a particulièrement été étudiée sur base de deux variétés : 'Reine de Mai' et 'Merveille des 4 saisons'.

La simulation mathématique par réseaux neuronaux sous MATLAB a permis de compiler les différentes expérimentations sur les laitues et de développer un modèle prédictif sur base

du spectre d'éclairement, des différences d'effectifs, de température, des durées de culture et d'éclairement,...

### Laitue (*Lactuca sativa*) variété printanière : 'Reine de Mai'

Concernant la puissance lumineuse nécessaire en lumière utile, on constate qu'au-delà d'un PPF de 200  $\mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , il n'y a plus avantage à augmenter l'éclairement. Au niveau de la qualité de l'éclairement, dans le cas de la laitue 'Reine de Mai', l'équilibre se situe entre 40% et 60 % de bleu. Pour ce type de laitue dite de printemps, l'apport de rouge lointain est néfaste au développement végétatif et provoque, même à faible dose, le développement reproductif de la plante (montaison).



FIGURES 2 : SIMULATION MATLAB SUR BASE DES EXPERIMENTATIONS REALISEES DANS LE PROJET VEGELED

### Laitue (*Lactuca sativa*) variété estivale : 'Merveille des quatre saisons'

D'un point de vue quantitatif, un flux photonique de 140 à 300  $\mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  est largement suffisant, mais le plafonnement est moins marqué que pour la laitue printanière (variété 'Reine de Mai'). Sur le plan qualitatif, l'équilibre bleu-rouge est comparable à celui de 'Reine de Mai' et cette laitue est plus tolérante aux effets du rouge lointain.

### Radis (*Raphanus sativus*) variété : ' National bout blanc'

Une puissance lumineuse, en lumière utile, de 250  $\mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  permet d'obtenir en 3 semaines des radis commercialisables. Le radis est moins sensible que les laitues à la balance bleu-rouge et tous les résultats entre 25 et 45 % de bleu sont équivalents. Le radis se révèle être très sensible



à l'action des rouges lointains qui entraînent chez lui une montaison rapide, ainsi en 31 jours sous un traitement avec une balance rouge – rouge lointain contenant de 22% de rouge lointain, la floraison du radis a été atteinte. Dans ce cas, il y a absence de gonflement du collet.

### **Pétunia (*Petunia x hybrida*) : F1**

Une puissance lumineuse en lumière utile de  $140 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  s'est révélée suffisante. Le Pétunia est moins sensible que les laitues à la balance bleu-rouge et tous les résultats s'équivalent entre 25 et 55 % de bleu. Le Pétunia réagit assez fortement à une balance riche en rouges lointains qui entraînent chez lui une montaison et une floraison rapide. L'expérience a également montré qu'avec un peu de temps supplémentaire (une semaine) on arrivait au même résultat avec un PPF utile double, mais sans rouge lointain.



### **Pelargonium zonale : 'Shocking Violet'**

Une puissance lumineuse en lumière utile de  $140 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  s'est révélée suffisante, mais il est indéniable qu'une augmentation de l'irradiance lui sera bénéfique. Comme pour le Pétunia, le Pélargonium semble peu sensible à la balance rouge-bleu pourvu qu'elle reste dans une gamme moyenne (25 à 55 %). D'après nos expériences un rapport de 30 % de bleu serait optimal. Le Pélargonium supporte mieux que les autres plantes étudiées les fortes proportions de rouge lointain. L'effet de ceux-ci est notablement visible sur le nombre de feuilles qui décroît avec l'augmentation de la proportion de rouge lointain. Par contre l'effet sur la floraison n'a pas été observé. Une proportion avec 15 % de rouge lointain a semblé donner les meilleurs résultats.



FIGURE 3 : PELARGONIUMS PRODUITS SOUS LEDS

### **Verveine blanche (*Verbena x hybrida*) et Impatiens (*Impatiens walleriana*)**

Une puissance lumineuse nécessaire en lumière utile  $140 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  s'est révélée suffisante. Ces plantes sont moins avides de lumière que les Pétunias et les Pélargoniums. Le rapport rouge – bleu à 50% de bleu s'est montré, notamment au niveau des cotations professionnelles, supérieur aux autres traitements (plus pauvres en bleu), sans que ceux-ci n'aient démerité. Ces plantes réagissent très mal à l'apport de rouge lointain qui implique de fortes élongations des entre-nœuds et donne rapidement aux plantes un caractère filant. L'absence de rouge lointain est le meilleur réglage.



FIGURE 4 : VERVEINES PRODUITES SOUS LEDS EN MILIEU CLOS

### **Persil : *Petroselinum crispum***

Une puissance lumineuse nécessaire en lumière utile  $140 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  s'est révélée suffisante. Le rapport rouge – bleu à 50% de bleu s'est montré, notamment au niveau des cotations professionnelles, supérieur aux autres traitements (plus pauvres en bleu) ; le persil est notamment plus frisé à forte de bleu.

### **Haricot vert nain (*Phaseolus vulgaris*) 'Argus'**

Une puissance lumineuse nécessaire en lumière utile de  $200 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  s'est révélée suffisante mais la plante profite encore davantage d'un PPF de  $320 \mu\text{moles. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Le rapport rouge – bleu à 40% de bleu s'est montré tout à fait satisfaisant.



FIGURE 5 : HARICOT NAIN EN PHASE DE PRODUCTION SOUS 4 TRAITEMENTS (A GAUCHE EN HAUT ET EN BAS: PPF  $125 \mu\text{MOLE.M}^{-2}.\text{S}^{-1}$ ; A DROITE EN BAS : PPF  $200 \mu\text{MOLE.M}^{-2}.\text{S}^{-1}$ .; EN HAUT : PPF  $320 \mu\text{MOLE.M}^{-2}.\text{S}^{-1}$ .)

### **Economique ?**

Les LEDs sont loin d'être bon marché, surtout dans les catégories réellement intéressantes pour les plantes. En réponse, il est avancé la grande durabilité des LEDs et leur faible consommation électrique.

Une première estimation indicative ; qui prend en compte non seulement les coûts d'achat du matériel et de la consommation électrique, mais également la qualité de la lumière donne des résultats particulièrement étonnants.

Estimation des prix des matériels sur base des prix catalogues, sur une durée de 40.000 h et par m <sup>2</sup>				complément lumineux (50 μmole.m-2.s-1 ou 10 W/m2)				éclairage en site obscur (200 μmole.m-2.s-1 ou 40W/m2/s)			
Type d'éclairage	% de rayonnement essentiel à la plante	PPF utile à la plante / W consommé	prix du matériel par Watt nominal	puissance d'éclairage nécessaire à 1 m de distance	Coût horaire du matériel	coût consommation électrique horaire : 7,75 c€ / kWh	coût total/h/m <sup>2</sup>	puissance d'éclairage nécessaire à 1 m de distance	Coût horaire du matériel	coût consommation électrique horaire : 7,75 c€ / kWh	coût total/h/m <sup>2</sup>
Néons horticoles	78%	0,014	2,74 €	1325 W	0,25 €	0,28 €	0,53 €	5300 W	0,99 €	1,12 €	2,12 €
HPI +	45%	0,027	0,80 €	1880 W	0,04 €	0,15 €	0,18 €	7500 W	0,15 €	0,58 €	0,73 €
HPS	42%	0,068	0,55 €	730 W	0,01 €	0,06 €	0,07 €	2925 W	0,04 €	0,23 €	0,27 €
Lampe Fluocompact	53%	0,035	2,46 €	1400 W	0,09 €	0,11 €	0,20 €	5650 W	0,35 €	0,44 €	0,79 €
Leds blanc froid	51%	0,046	3,63 €	1100 W	0,10 €	0,09 €	0,18 €	4400 W	0,40 €	0,34 €	0,74 €
Combinaison spots leds monochromes	98%	0,296	5,00 €	170 W	0,02 €	0,01 €	0,03 €	675 W	0,08 €	0,05 €	0,14 €

- Le % de rayonnement essentiel à la plante reprend la proportion de la lumière émise véritablement mise à profit pour le développement de la plante.
- Le PPF utile à la plante / W consommé : reprend la quantité de photons (en μmole par m<sup>2</sup> et par seconde) émis dans le spectre utile au développement de la plante et ce par watt consommé.

En observant ces deux points, on comprend directement l'avantage des LEDs monochromes. À titre d'exemple, si on compare la quantité de photons utiles à la plante (PPF utile) émis par Watt consommé, la combinaison de spots LEDs monochromes est supérieure de 435 % aux lampes HPS.

- Le prix du matériel par Watt nominal indique le prix du matériel reporté au Watt consommé.

Deux pistes ont été présentées dans ce tableau :

- La première reprend un système d'éclairage complémentaire ajoutant 50 μmoles. m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (10W) pour un mètre carré, les lampes étant placées à 1 m des plantes. Ce système correspond à un éclairage d'appoint.
- La deuxième reprend un système d'éclairage donnant 200 μmoles. m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (40W) pour un mètre carré, les lampes étant placées à 1 m des plantes. Ce système correspond à un éclairage complètement artificiel des plantes, sans autre source lumineuse.

Toutes les estimations ont été calculées sur une vie de 40.000 h soit celle d'un spot LED.

Le point le plus marquant est que malgré leur prix d'achat encore relativement élevé, l'utilisation des spots LEDs monochromes coûte sur leur durée de vie deux fois moins cher que les HPS. Mais cette estimation ne prend pas en compte les frais de main d'œuvre inhérents aux remplacements généralisés des ampoules, ni d'un remplacement plus précoce des ampoules. Notons également que les coûts d'éclairage pour les HPI +, les lampes fluo compactes et les LEDs blanches sont pratiquement équivalents, mais rapidement supérieurs aux coûts d'éclairage des HPS et des LEDs monochromes.

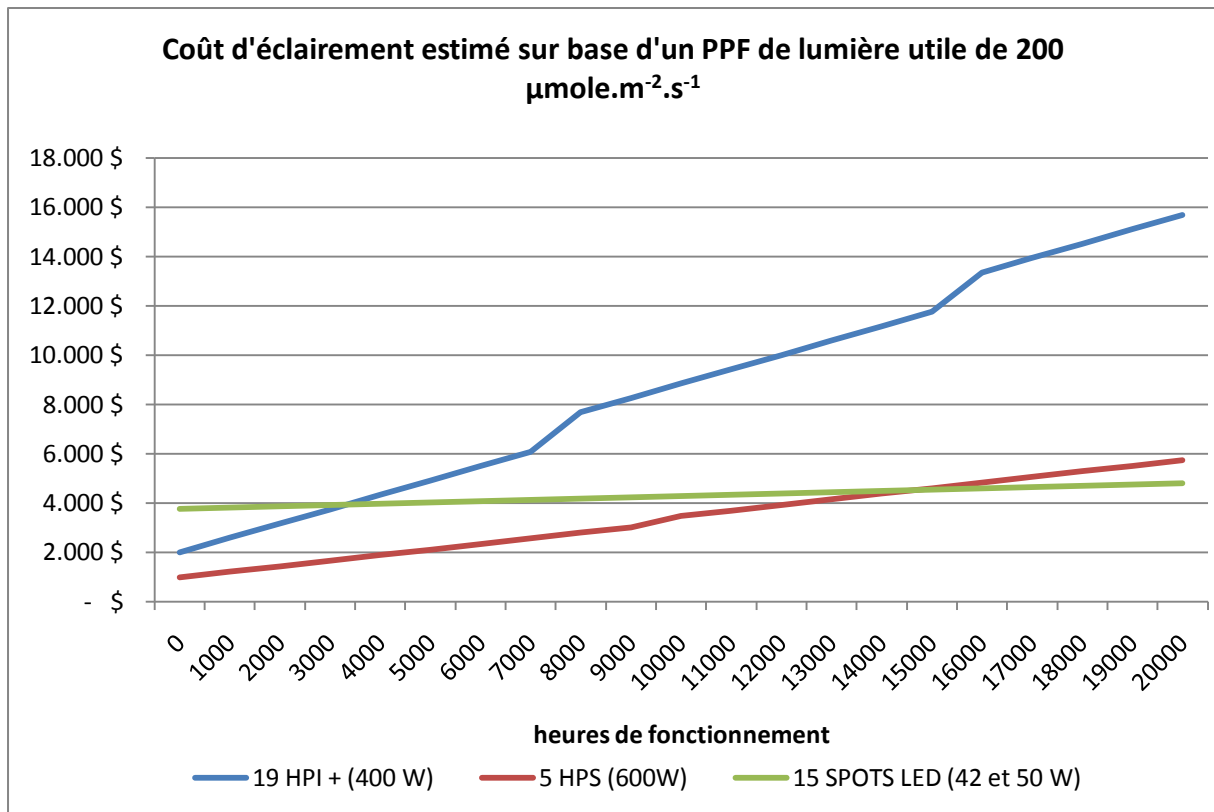


FIGURE 6 : EVOLUTION DES COÛTS D'ÉCLAIRAGE POUR UN ÉCLAIRAGE DE 1 M2 A 1M DE DISTANCE ET A UNE IRRADIANCE DE 200 MICROMOLES/M2/S ; EN ABSCISSE : NOMBRE D'HEURES DE FONCTIONNEMENT. SUR BASE D'UN PRIX DE 7.75 CENTS D'EUROS / KWH.

Sur base de ces calculs d'éclairage, on peut déterminer le moment où les coûts engendrés par l'utilisation des LEDs deviennent égaux à ceux des deux autres types d'éclairage, autrement dit la durée minimale d'utilisation d'un éclairage LED pour qu'il devienne plus rentable que les autres sources d'éclairage. De cette manière, on trouve que l'équivalence s'établit aux alentours des 15.000 h par rapport aux HPS mais il semble bon de rappeler que les coûts de refroidissement (les HPS chauffant beaucoup plus que les LEDs) et de main-d'œuvre ne sont pas pris en compte, ni les avantages qualitatifs qu'apportent les LEDs (facilité de manipulation, l'adaptabilité du spectre et de la puissance, la robustesse,...).

En conclusion nous pouvons affirmer que la culture à l'aide de LEDs monochromes est tout à fait pertinente et permet de diminuer fortement les consommations d'énergies par rapport aux systèmes d'éclairages actuels.

#### Bibliographie

- Doug Bruce and Sergej Vasil'ev, Excess Light Stress: Multiple Dissipative Processes of Excess Excitation, Department of Biological Sciences, Brock University, St. Catharines, Ontario, Canada, L2S.
- Electrabel Customer Solutions "Offre de base" pour les consommateurs d'application en décembre 2010 - TVA incluse. S.A.Electrabel.
- Emerson Robert, Ruth Chalmers and Carl Cederstrand, "Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis, Botany dpt, University of Illinois, communicated November 19, 1956.

- Enrique López-Juez and Paul F. Devlin, Light and the Control of Plant Growth, Plant Cell Monogr , L. Bögre and G. Beemster: Plant Growth Signaling, DOI 10.1007/7089\_2007\_162/Published online: 7 February 2008, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.
- G.D. Goins, N.C. Yorio, M.M. Sanwo and C.S. Brown, Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting, Journal of Experimental Botany, Vol. 48, No. 312, pp. 1407-1413, July 1997.
- Govindjee and Eugène Rabinowitch, Action spectrum of the “second emerson effect”, Photosynthesis Research Laboratory, Department of Botany, University of Illinois, Urbana.
- Hugo Pettai, Vello Oja, Arvi Freiberg, Agu Laisk, Photosynthetic activity of far-red light in green plants, Biochimica et Biophysica Acta 1708 (2005) 311– 321.
- Hyeon-Hye Kim and Toyoki Kozai, Production of value-added transplants in closed systems with artificial lighting, Kluwers Academic Publishers, Netherlands.
- Kevin M. Folta and Stefanie A. Maruhnich, Green light: a signal to slow down or stop, Journal of Experimental Botany, Vol. 58, No. 12, pp. 3099–3111, 2007.
- McCree K. J., Significance of Enhancement for Calculations Based on the Action Spectrum for Photosynthesis, Plant Physiol. (1971) 49, 704-706.
- Pedro J. Aphalo, Light signals and the growth and development of plants — a gentle introduction, Draft of April 2006, Department of Biological and Environmental Sciences, Plant Biology, University of Helsinki, Finland.
- S. Meyer, A. Cartelat, I. Moya and Z. G. Cerovic, UV-induced blue-green and far-red fluorescence along wheat leaves: a potential signature of leaf ageing, Journal of Experimental Botany, Vol. 54, No. 383, pp. 757±769, February 2003.
- S.W. Hogewoning, G. Trouwborst, G.J. Engbers, J. Harbinson, W. van Ieperen, J. Ruijsch and O. van Kooten, Plant Physiological Acclimation to Irradiation by Light-Emitting Diodes (LEDs), Proc. XXVII IHC-S6 High-Qual. Crop Prod. under Protect. Cultiv. Ed.-in-Chief: D.J. Cantliffe, Acta Hort. 761, ISHS 2007.
- Tracy A. O. Dougher and Bruce Bugbee, Differences in the Response of Wheat, Soybean and Lettuce to Reduced Blue Radiation, Photochemistry and Photobiology, 2001, 73(2): 199–207.
- Tracy A. O. Dougher and Bruce Bugbee, Evidence for Yellow Light Suppression of Lettuce Growth, Photochemistry and Photobiology, 2001, 73(2): 208–212.