

Outils de prototypage pour le dimensionnement de l'éclairage énergétique en milieux confinés

Denis Fiorillo, Benoît Decaux, Frédéric Depta, Jean-François Hu, Catherine Giauffret, Maryse Brancourt, Isabelle Lejeune, Eric Hanocq¹

Résumé : Cet article présente un ensemble de méthodes pour dimensionner l'éclairage énergétique. L'éclairage est calculé au niveau de la plante qui est située dans des milieux confinés (chambres de culture et serre) et sous des éclairages artificiels (lampes à décharges et tubes fluorescents). Les équations pour calculer l'éclairage énergétique sont décrites. Les formules de conversion d'unités en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$, en W/m^2 PAR et en lux, sont données et tiennent compte des spectres des sources. Les sources étendues de lumière sont étudiées et une formule permet de corriger les valeurs calculées pour des courtes distances entre les tubes fluorescents et les plantes. Les projecteurs des lampes à décharge sont discutés et les méthodes pour obtenir les valeurs des angles solides à l'émission sont expliquées. Des exemples d'utilisation d'outils de prototypage sur trois chambres de culture et une serre sont indiqués.

Mots clés : éclairage artificiel, éclairage, chambre de culture, milieu confiné, tube fluorescent, lampe à décharges, projecteur.

Introduction

En milieux confinés de culture, la disposition des plantes sur les tablards dépend de l'homogénéité des variables climatologiques dont l'éclairage. Cette étude propose des méthodes de prototypage pour dimensionner l'éclairage énergétique pour différentes configurations d'éclairages artificiels. Nous présentons ici, le dispositif expérimental, les formules de calcul de l'éclairage énergétique reçu ainsi que les sources étendues de lumière. A la fin de l'article nous donnons un index des principales abréviations utilisées.

1. Dispositif expérimental

L'ensemble expérimental comprend quatre chambres de culture de types différents et deux serres de types différents. Les milieux confinés sont équipés d'un éclairage artificiel. La source émettrice de lumière artificielle (lampe) a été mesurée quantitativement dans ces milieux par un récepteur (capteur de mesure d'éclairage).

¹ UMR 1281 INRA/USTL Stress Abiotiques et Différenciation des Végétaux Cultivés - F-80200 Estrées-Mons
☎ 03 22 85 33 22 - ✉ denis.fiorillo@mons.inra.fr

1.1 Milieux confinés

L'étude s'est déroulée dans quatre types de chambres de culture et sur deux types de serre (**figures 1**).

Chambres de culture : toutes les chambres ont des dimensions différentes excepté pour les chambres B1 et B2 qui sont identiques. Les chambres A et D disposent d'un éclairage issu de lampes à décharges tandis que les chambres B1, B2 et C disposent d'un éclairage issu de tubes fluorescents. La comparaison des flux lumineux émis par unité de surface d'éclairage entre les chambres fait apparaître un minimum de 16 417 lumens / m² pour la chambre C, et un maximum de 206 845 lumens / m² pour la chambre D.

Serres : les deux serres utilisées pour l'étude ont des dimensions différentes mais sont équipées d'un seul et même type d'éclairage artificiel issu de lampes à décharges. Les deux serres d'architecture différente présentent un flux lumineux émis par unité de surface variant de 15 000 (serre S1) à 20 000 lumens / m² (serre S2).

Les caractéristiques physiques des milieux confinés (architecture et composition de l'éclairage) sont rappelées dans le **tableau 2**.



Figure 1.1 : chambre de culture A (24 lampes à décharge 400 W, plateau rotatif)

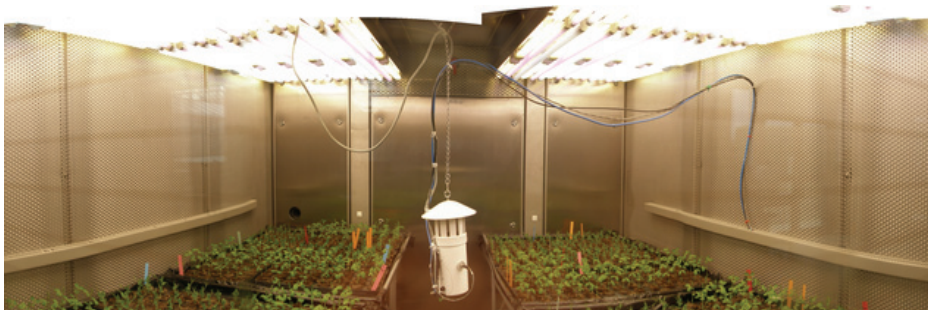


Figure 1.2 : chambres de culture B1 et B2
(24 tubes fluorescents Philips PL-L 55 W + 20 tubes fluorescents Osram Biolux 36 W
+ 20 tubes fluorescents Osram Fluora 36 W)



Figure 1. 3 : *chambre de culture C (68 tubes fluorescents Osram Fluora 58W)*



Figure 1. 4 : *chambre de culture D (35 lampes à décharges 400W)*

Milieu confiné	Type	Longueur x Largeur (m)	Hauteur (m) source/précepteur	Types de lampe	Flux lumineux par lampe (lumen)	Nombre de lampes	Flux maximum par unité de surface (lumen / m ²)
Ch A	chambre de culture (plateau rotatif)	4,47 x 3,12	1,25	projecteurs SON-T 400W projecteurs HPI 400W	55000 42500	12 12	83 893
Ch B 1&2	chambre de culture	2,60 x 2,30	0,97	tubes fluo PL-L 55W tubes fluo Biolux 36W tubes fluo Fluora 36W	4800 2300 1400	24 20 20	31 639
Ch C	chambre de culture	3,27 x 2,85	1,03	tubes fluo. Fluora 58W	2250	68	16 417
Ch D	chambre de culture	3,00 x 2,80	1,46	projecteurs SON-T 400W projecteurs HPI 400W	55000 42500	20 15	206 845
S1	chappelle de serre	9,25 x 4,80	1,94	projecteurs SON-T 400W	55000	12	14 865
S2	serre	9,80 x 9,80	1,98	projecteurs SON-T 400W	55000	35	20 044

Tableau 2 : *architecture et composition de l'éclairage des milieux confinés*

1.2 Lampes d'éclairage

Les lampes sont décrites par les caractéristiques suivantes :

- la technologie d'éclairage utilisée qui conditionne le rendement lumineux ;
- le spectre à l'émission ;
- le projecteur et/ou le carénage enveloppant l'ampoule qui impacte l'angle solide à l'émission et par conséquent l'intensité lumineuse dans l'espace de projection ;
- la disposition spatiale qui impacte la distance séparant la source du récepteur et par conséquent la taille et la géométrie de la surface éclairée ;
- l'éventuel filtre placé entre l'émetteur et le récepteur qui impacte le spectre et le flux émis.

1.2.1 Technologies d'éclairage

Deux types de lampes ont été étudiés : les tubes fluorescents et les lampes à décharges électriques. Au total cinq lampes différentes ont été utilisées et leur description est rappelée dans le **tableau 3**.

Fabricant	Technologie	Référence	Puissance électrique
Philips	décharges électriques	Master HPI-T Plus	400 W
Philips	décharges électriques	Master SON-T Agro	400 W
Philips	tube à fluorescence	Master PL-L	55 W
Osram	tube à fluorescence	Fluora	58 W
Osram	tube à fluorescence	Fluora	36 W
Osram	tube à fluorescence	Biolum	36 W

Tableau 3 : descriptif des lampes

1.2.2 Rendements lumineux

L'éclairage des lampes à décharge et des tubes à fluorescence est issu d'un phénomène physique commun : la luminescence d'un gaz ionisé sous l'action de l'impact d'électrons (**figure 4**).

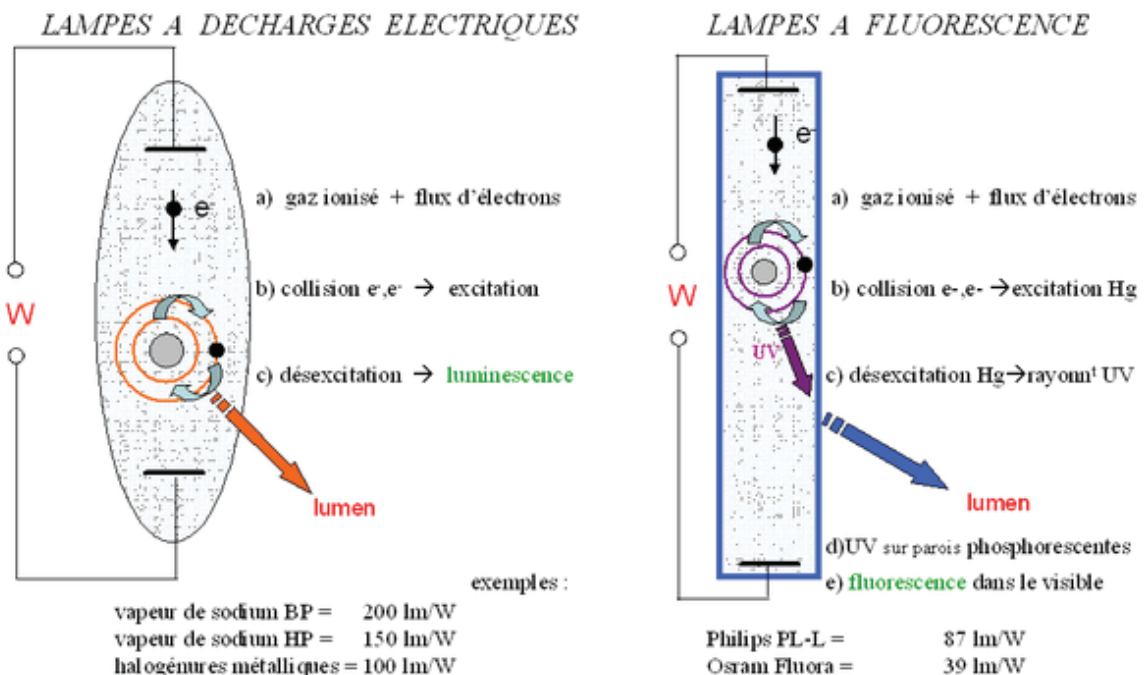


Figure 4 : principes d'émission de lumière

Dans les lampes à décharge, c'est le gaz d'ionisation qui émet le rayonnement visible. Quantitativement, le rendement lumineux est le plus élevé parmi les technologies existantes (**tableau 5**). Le flux lumineux calculé en lumen, est une grandeur adaptée à la sensibilité spectrale de l'œil humain. Le rendement lumineux permet de comparer différentes sources spectrales par rapport à la vision photopique. Le spectre d'action d'une plante (**figure 6**) utilise majoritairement les couleurs rouges et bleues du spectre visible, contrairement à l'œil qui est davantage sensible au jaune (**figure 18**). Qualitativement, la nature chimique du gaz d'ionisation détermine le spectre (principalement orange pour les vapeurs de sodium, tandis que divers compositions d'halogénures métalliques donnent les couleurs dominantes suivantes : vert pour le thallium, indigo pour l'indium, rouge pour le lithium, bleu pour le césium, etc.).

Dans les tubes à fluorescence, on retrouve, le plus souvent, du mercure à l'état gazeux comme source d'ionisation ; ce dernier fournit un rayonnement UV qui est totalement intercepté par le revêtement phosphorescent tapissant l'entière surface interne du tube ; sous l'action des UV, la substance phosphorescente produit le rayonnement visible. Le rendement lumineux est inférieur à celui des lampes à décharges car dans ce cas, deux phénomènes en chaîne, conduisent à l'émission de lumière. Divers spectres peuvent être obtenus selon les mélanges de substances phosphorescentes employées.

<u>Référence des lampes</u>	<u>Rendement lumineux (lm/W)</u>
Philips SON-T Agro 400W	138
Philips HPI-T Plus 400W	106
Philips Master PL-L 55W	87
Osram Biolux 36W	64
Osram Fluora 36W	39

Tableau 5 : rendement lumineux des lampes

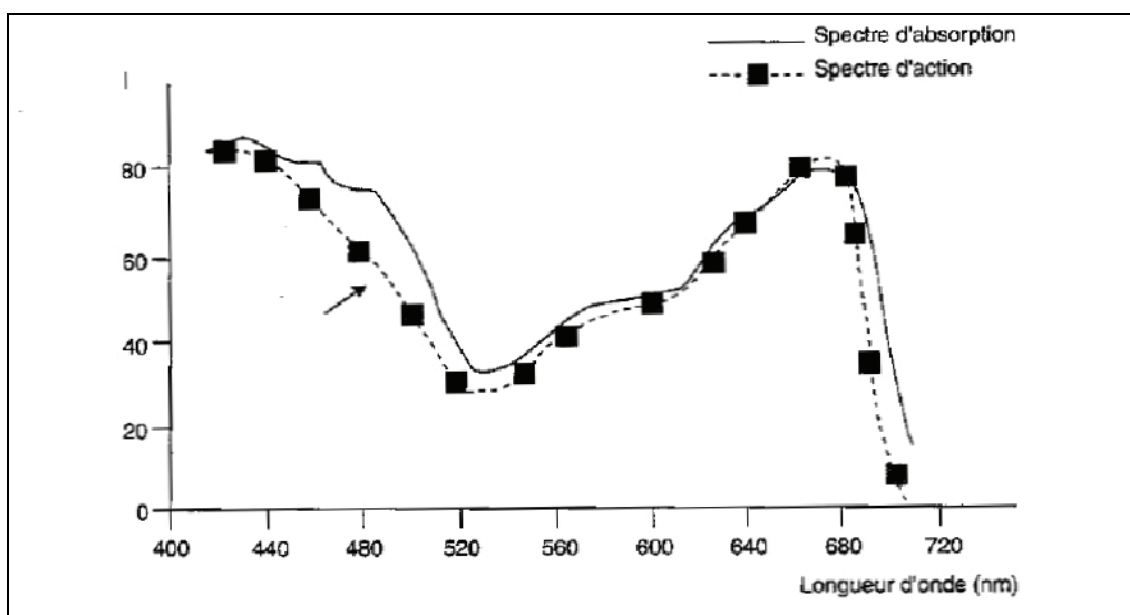


Figure 6 : spectre d'action de la photosynthèse chez *Ulva taeniata*

1.2.3 Spectres d'émission des lampes

L'absence de spectromètre sur site ne permettant pas de caractériser les lampes *in situ*, nous avons utilisé pour l'expérience, les spectres d'émissions fournis par les fabricants pour les cinq types de lampes. Les indications spectrales du fabricant sont indiquées pour des lampes neuves fonctionnant à une température ambiante de 25°C. Les valeurs spectrales ont été reportées manuellement dans un tableur pour être ensuite extrapolées linéairement afin d'obtenir un spectre d'émission qui ne sera utilisé que dans la bande spectrale s'étendant de 400nm à 700 nm (région PAR ou région photo-synthétiquement utile) et avec une résolution spectrale de 1 nm (**figure 7**). Les unités reportés en ordonnées sur les graphiques, sont celles fournies par les fabricants, *i.e.* : coefficient arbitraire de puissance pour la lampe SON-T, mW/(m².5 nm.1000 lux) pour la lampe HPI, μW/(5 nm. lumen) pour la lampe PL-L et coefficient arbitraire de puissance pour les lampes Biolux et Fluora.

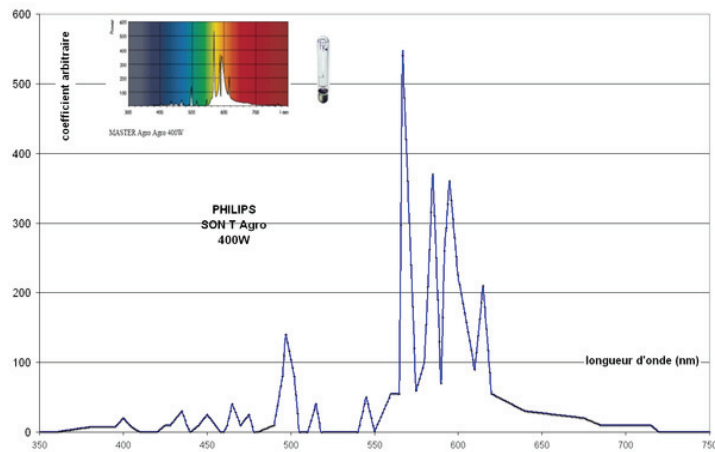


Figure 7.1 : spectre d'émission (lampe SON-T 400W)

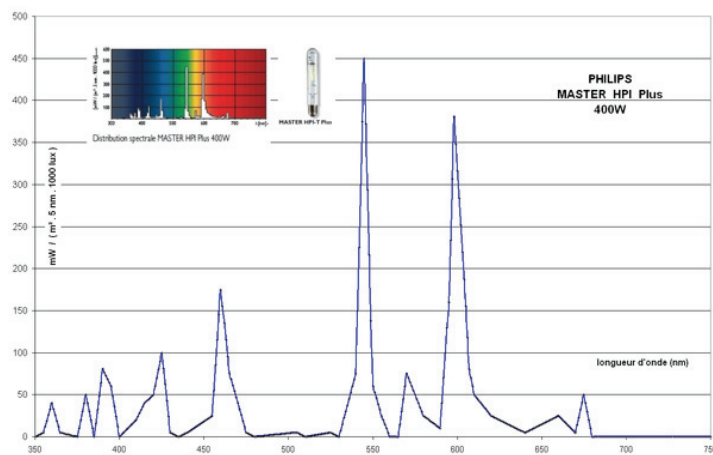


Figure 7.2 : spectres d'émission (lampe HPI 400W)

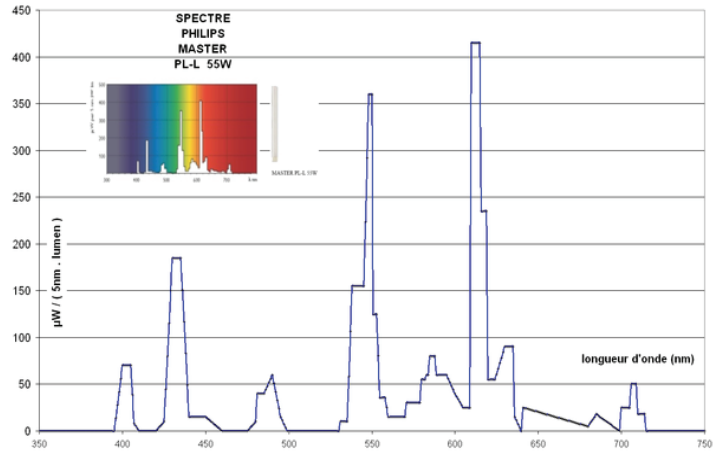


Figure 7.3 : spectres d'émission (lampe PL-L 55W)

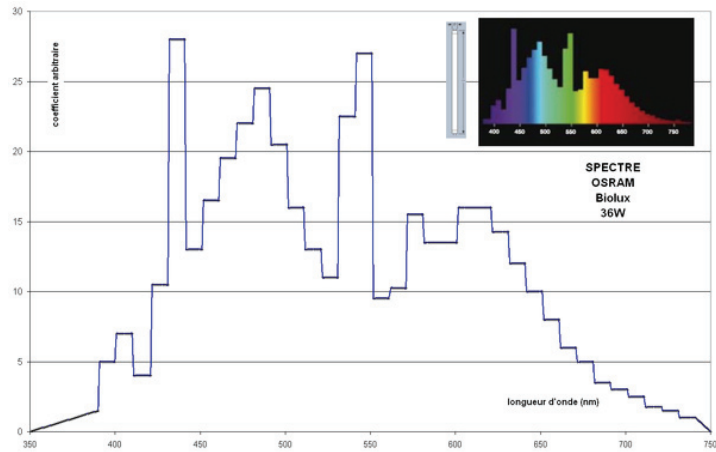


Figure 7.4 : spectres d'émission (lampe Biolux 36W)

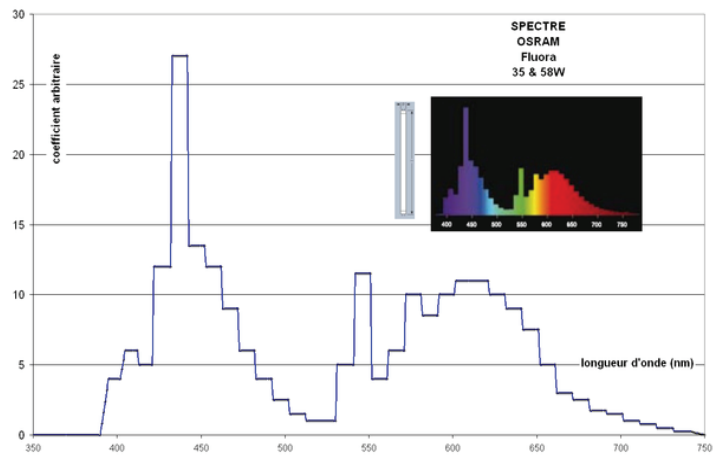


Figure 7.5 : spectres d'émission (lampe Fluora 36 & 58W)

1.2.4 Projecteurs et carénages autour de la lampe

Les tubes fluorescents ne disposent pas de projecteurs dédiés et ils sont simplement montés sur leur embase de raccordement électrique située de part et d'autre du tube ; le tube se situant à quelques mm sous un capot métallique en acier inoxydable brossée (qui contient l'alimentation électrique) (**figure 8**).

Les lampes à décharge SON-T et HPI sont fixées à l'intérieur d'un projecteur symétrique et vitré de marque respective Philips Diamant SNF et MNF dont les caractéristiques seront discutées (**figure 9**) dans le paragraphe 4.



Figure 8 : carénage inox au-dessus des tubes fluorescents



Figure 9 : projecteur PHILIPS Diamant SNF-K300

1.2.6 Filtres

Les projecteurs de lumières Philips Diamant sont équipés d'une vitre de protection frontale. La vitre absorbe une fraction du flux lumineux moyen et de façon sélectivement inhomogène dans le spectre. La fraction absorbée est indiquée par le fabricant du projecteur et figure dans la variable L.O.R qui varie de 0 (absorption totale) à 1 (absorption nulle) (**figure 10**).

La chambre de culture A est équipée d'un faux plafond permettant la séparation fluidique et thermique entre la cellule climatisée basse de culture et la cellule climatisée haute renfermant les projecteurs. Le faux plafond est constitué d'une plaque en matériau plastique translucide et alvéolé. Les mesures de rayonnement ont été effectuées avec et sans la plaque et la détermination du coefficient d'absorption de la plaque a été évaluée à environ 13 % (**figure 11**).

Les deux dalles lumineuses composées des 34 tubes fluorescents de la chambre de culture C, sont équipées d'une vitre écran. En position basse lorsque la distance entre les dalles et les plantes est courte, la vitre écran permet de préserver les tubes d'un refroidissement du au flux d'air climatisé. La mesure de l'absorption lumineuse n'a pas été effectuée (**figure 12**).

La chambre de culture D est équipée d'un faux plafond permettant la séparation fluidique et thermique entre la cellule climatisée basse de culture et la cellule climatisée haute renfermant les projecteurs. Le faux plafond est constitué d'un assemblage de dalles vitrées. Les dalles sont constituées d'un double vitrage et comportent un revêtement optique permettant l'absorption partielle du rayonnement infrarouge (**figure 1.4**).

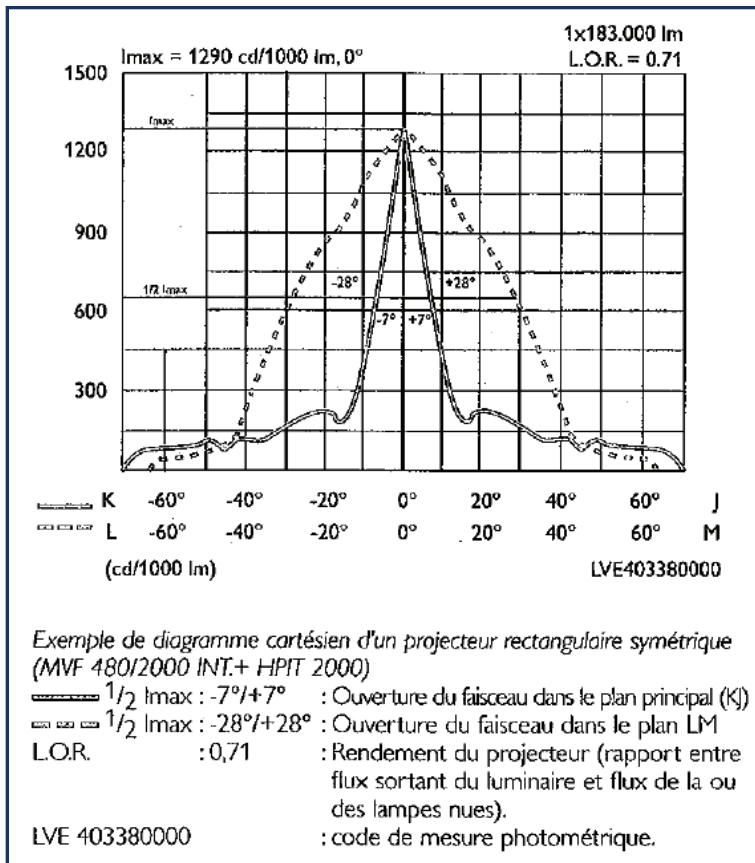


Figure 10 : rendement lumineux (L.O.R.) d'un projecteur ordinaire

Figure 11 : faux-plafond en matériau plastique translucide de la chambre de culture A



Figure 12 : vitre de protection située entre les tubes fluorescents et les plantes

1.2 Capteurs d'éclairément

Trois capteurs différents d'éclairément ont été utilisés durant l'étude. Les capteurs mesurent l'éclairément énergétique reçu en μmoles de photons / ($\text{m}^2.\text{s}$). Les photons mesurés ont une longueur d'onde comprise entre 400 nm et 700 nm. La région spectrale étudiée est appelée région PAR ou région photo-synthétiquement active.

Le capteur n°1 est un capteur Licor Quantum 190SA qui présente une incertitude globale d'étalonnage en sortie d'usine de +/- 5% (**figure 13**).

Le capteur n°2 est un capteur Solems PAR/LE qui se présente sous la forme d'une barre linéaire de 20 cm environ de longueur sur environ 2 cm de largeur (**figure 14**).

Le capteur n°3 est un capteur Skye SKP 215 (**figure 15**).

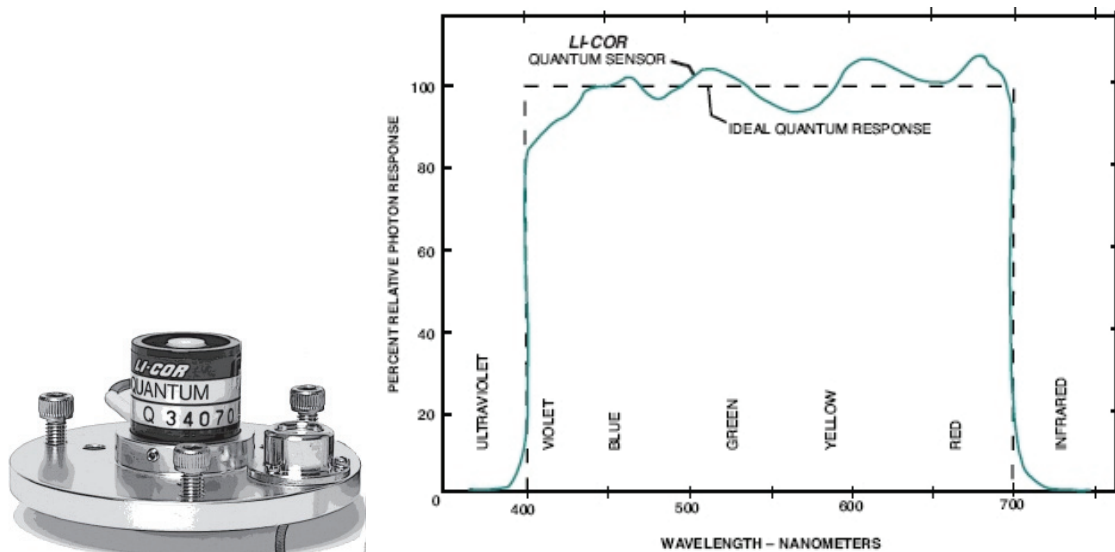


Figure 13 : capteur n°1 LICOR Quantum 190SA et courbe de réponse spectrale

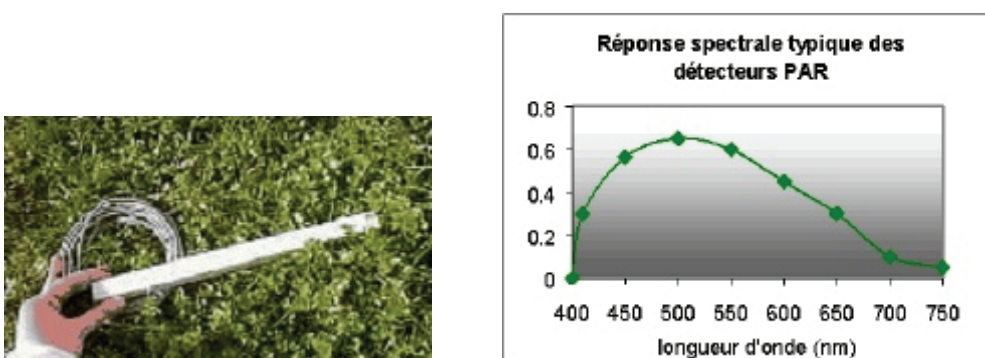


Figure 14 : capteur n° 2 SOLEMS PAR_LE et courbe de réponse spectrale

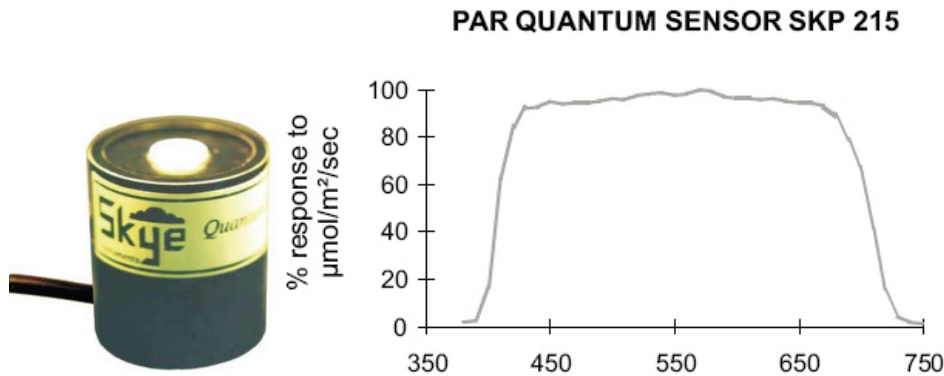


Figure 15 : capteur n° 3 SKYE SKP215 et courbe de réponse spectrale

2. Formules de calcul de l'éclairement énergétique reçu

Les principales grandeurs optiques sont rappelées dans les **figures 16** et **17**. La **figure 16** regroupe les grandeurs optiques dites photométriques qui comprennent les rayonnements obéissant à des critères spectraux visuels. La **figure 17** regroupe les grandeurs optiques dites radiométriques qui comprennent les rayonnements obéissant à des critères énergétiques et couvrant un spectre plus large.

(Source : http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photométrie/Grandeurs_lumineuses_et_unités_photométriques).

unités photométriques SI			
Grandeur	Unité SI	Symbole	Notes
Quantité de lumière	lumen.seconde	lm.s	le lumen.seconde est parfois appelé <i>talbot</i> dans les pays anglosaxons
Flux lumineux	lumen (ou candela.stéradian)	lm	appelé parfois <i>puissance lumineuse</i>
Intensité lumineuse	candela (ou lumen par stéradian)	cd	c'est l' unité de base
Luminance	candela par mètre carré	cd/m ²	appelée parfois <i>brillance</i>
Éclairement	lux (ou lumen par mètre carré)	lx	il s'agit du flux lumineux reçu par une surface
Exitance	lumen par mètre carré	lm/m ²	même dimension que l'éclairement mais il s'agit du flux lumineux émis par une surface
Efficacité lumineuse	lumens par watt	lm/W	le maximum possible est 683

SI photometry units

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Luminous energy	Q_v	lumen second	lm·s	units are sometimes called talbots
Luminous flux	F	lumen (= cd·sr)	lm	also called <i>luminous power</i>
Luminous intensity	I_v	candela (= lm/sr)	cd	an SI base unit
Luminance	L_v	candela per square metre	cd/m ²	units are sometimes called nits
Illuminance	E_v	lux (= lm/m ²)	lx	Used for light incident on a surface
Luminous emittance	M_v	lux (= lm/m ²)	lx	Used for light emitted from a surface
Luminous efficacy		lumen per watt	lm/W	ratio of luminous flux to radiant flux

SI • Photometry

Figure 16 : grandeurs optiques photométriques (traduites en français et en anglais)

unités radiométriques SI				
Grandeur	Unité	Symbole	Notes	correspondance
Énergie (radiante)	joule	J	c'est l'énergie au sens classique du terme	Quantité de lumière
Puissance (radiante)	watt	W	c'est une puissance au sens commun du terme	Flux lumineux
Intensité énergétique	watt par stéradian	W·sr ⁻¹	la puissance est rapportée à l'unité d'angle solide	Intensité lumineuse
Luminance énergétique	watt par stéradian et par mètre carré	W·sr ⁻¹ ·m ⁻²	la puissance est rapportée à l'unité d'angle solide et à l'unité de surface apparente (surface projetée perpendiculairement à la direction de mesure)	Luminance
Éclairement énergétique	watt par mètre carré	W·m ⁻²	la puissance est rapportée à l'unité de surface réceptrice	Éclairement
Exitance énergétique	watt par mètre carré	W·m ⁻²	la puissance est rapportée à l'unité de surface émettrice	Exitance
Luminance énergétique spectrale	watt par stéradian et par mètre cube	W·sr ⁻¹ ·m ⁻³	la luminance énergétique est rapportée à l'unité de largeur de bande spectrale et s'exprime plus couramment en W·sr ⁻¹ ·m ⁻² ·nm ⁻¹	
Exitance énergétique spectrale	watt par mètre cube	W·m ⁻³	l'exitance énergétique est rapportée à l'unité de largeur de bande spectrale et s'exprime plus couramment en W·m ⁻² ·nm ⁻¹	

SI radiometry units

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Radiant energy	Q	joule	J	energy
Radiant flux	Φ	watt	W	radiant energy per unit time, also called <i>radiant power</i>
Radiant intensity	I	watt per steradian	W·sr ⁻¹	power per unit solid angle
Radiance	L	watt per steradian per square metre	W·sr ⁻¹ ·m ⁻²	power per unit solid angle per unit <i>projected</i> source area, called <i>intensity</i> in some other fields of study.
Irradiance	E, I	watt per square metre	W·m ⁻²	power incident on a surface, sometimes confusingly called "intensity".
Radiant exitance / Radiant emittance	M	watt per square metre	W·m ⁻²	power emitted from a surface.
Radiosity	J or J _s	watt per square metre	W·m ⁻²	emitted plus reflected power leaving a surface
Spectral radiance	L _λ or L _ν	watt per steradian per metre ³ or watt per steradian per square metre per hertz	W·sr ⁻¹ ·m ⁻³ or W·sr ⁻¹ ·m ⁻² ·Hz ⁻¹	commonly measured in W·sr ⁻¹ ·m ⁻² ·nm ⁻¹
Spectral irradiance	E _λ or E _ν	watt per metre ³ or watt per square metre per hertz	W·m ⁻³ or W·m ⁻² ·Hz ⁻¹	commonly measured in W·m ⁻² ·nm ⁻¹

Figure 17 : grandeurs optiques radiométriques (traduites en français et en anglais)

2.1 Éclairement photométrique reçu

L'éclairement photométrique est supposé reçu par un capteur photopique idéal. La courbe de réponse du capteur photopique idéal est indiquée sur la **figure 18**. L'équation 7, qui permet de décrire la valeur de l'éclairement photométrique, est écrite à partir de la définition de quatre grandeurs photométriques illustrées sur la **figure 19**.

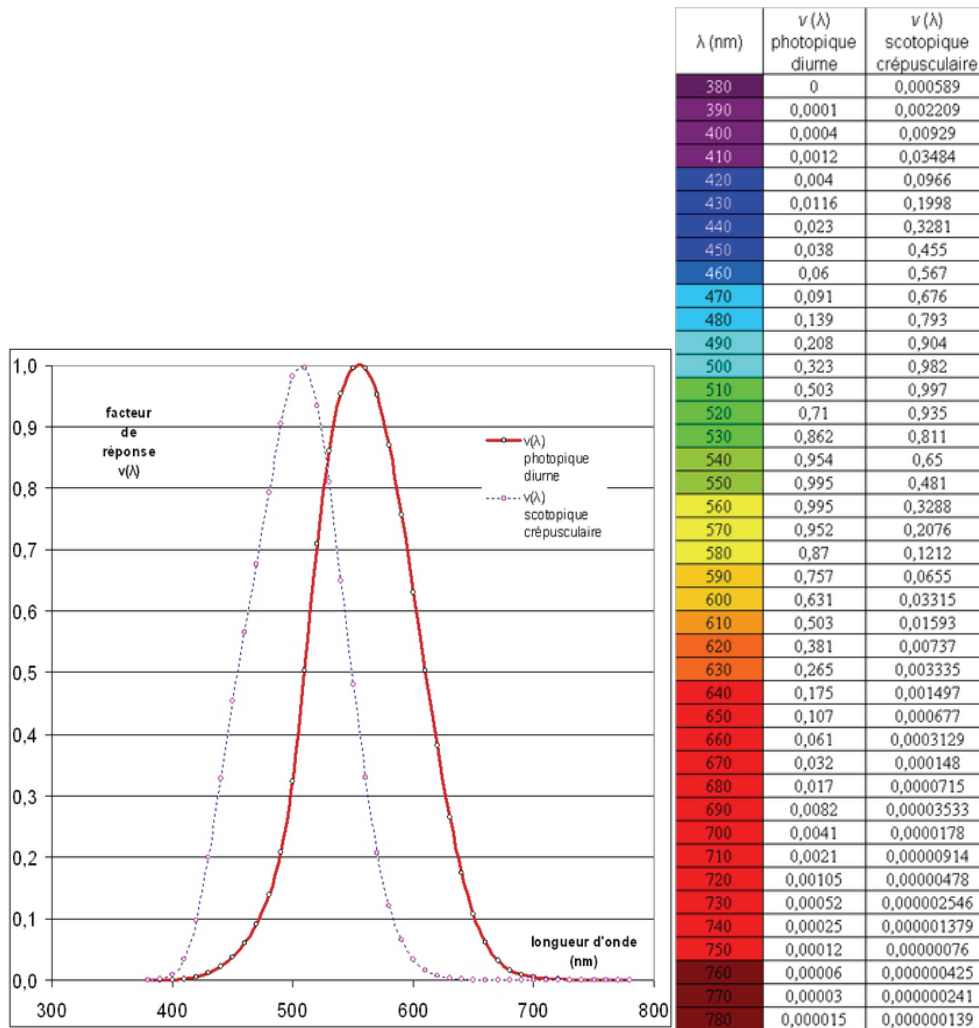


Figure 18 : fonctions de sensibilité spectrale normalisée et coefficients d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique diurne et scotopique crépusculaire
 (Source : http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photométrie/Efficacité_lumineuse)

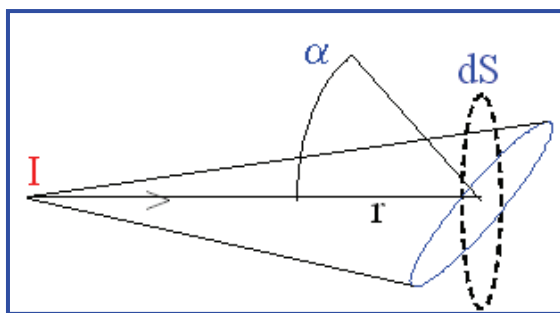


Figure 19 : représentation de l'émetteur et du récepteur de rayonnement

Angle solide du récepteur :	$d\Omega_{\text{réc.}} = dS_{\text{réc.}} \cos(\alpha) / r^2$	(équation 1)
Flux lumineux reçu :	$d\Phi = I d\Omega_{\text{réc.}}$	(équation 2)
Intensité émise :	$I = \Phi / \Omega_{\text{ém.}}$	(équation 3)
Eclairém ^t photométrique reçu :	$EP = d\Phi / dS_{\text{réc.}}$	(équation 4)
Equation 4 & équation 2 :	$EP = I d\Omega_{\text{réc.}} / dS_{\text{réc.}}$	(équation 5)
Equation 5 & équation 1 :	$EP = I \cos(\alpha) / r^2$	(équation 6)
Equation 6 & équation 3 :	$EP = \Phi \cos(\alpha) / (\Omega_{\text{ém.}} r^2)$	(équation 7)

Le flux lumineux émis par la lampe est égal au flux lumineux reçu par le capteur. L'émetteur comprend l'ensemble lampe + projecteur ; le flux lumineux et l'angle solide de cet ensemble sera préféré aux flux lumineux et aux angles solides de la lampe ou du projecteur pris séparément. L'éclairement photométrique reçu est défini à partir de grandeurs photométriques qui comprennent les rayonnements obéissant à des critères visuels. L'unité des lux correspond à une mesure de l'éclairement photométrique reçu par le récepteur dans la bande spectrale visible seulement. La bande spectrale visible sera supposée égale à la bande spectrale photosynthétiquement active (PAR) s'étendant de 400 nm à 700 nm.

2.2 Éclairement énergétique reçu (capteur idéal)

Le spectre de l'émetteur fourni par le fabricant, indique pour chaque longueur d'onde λ , une valeur (EES_λ/EP) correspondante au ratio entre l'existance énergétique spectrale EES_λ (en $W/(m^2.m)$) mesurée à cette longueur d'onde, et l'éclairement photométrique EP (en lux) d'une valeur souvent normalisée et généralement fixée à 1000 lux (**figures 7.1 à 7.5**). Avec la correspondance entre l'éclairement photométrique (en lux) et le flux lumineux (en lumen) selon l'équation 4 : $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen} / m^2_{\text{récepteur}}$, les unités des lampes HPI ($mW/(m^2.5 \text{ nm}.1000 \text{ lux})$) et des lampes PL-L ($\mu W/(5 \text{ nm}.lumen)$) sont homogènes. Pour les autres lampes, la même unité sera conservée et les valeurs arbitraires seront ajustées linéairement par un coefficient constant à la suite de comparaisons entre les mesures et les calculs correspondants.

En supposant que :

- le capteur est considéré idéal et que son coefficient de réponse est uniforme et égale à 1 sur toute la bande spectrale PAR.
- l'existance énergétique E_xE et l'éclairement énergétique E_cE sont tous deux des puissances rapportées à la même unité de surface (en W/m^2),
- l'équation 7 permet de calculer l'éclairement photométrique reçu d'une lampe en lux,

l'équation 8 permet de calculer l'éclairement énergétique PAR (λ variant de 400 à 700nm) reçu d'une lampe et exprimé en W/m^2 selon :

$$E_cE = EP \int_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} (EES_\lambda/EP) d\lambda = \Phi \cos(\alpha) / (\Omega_{\text{ém.}} r^2) \int_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} (EES_\lambda/EP) d\lambda \quad (\text{équation 8})$$

2.3 Éclairement énergétique reçu (capteurs réels)

Les capteurs ne sont plus considérés idéaux et possèdent une courbe de réponse spectrale indiquée par le fabricant qui s'écrit : $0 \leq c_\lambda \leq c_{\text{max}}$. Les réponses spectrales des trois types de capteurs sont différentes, et leur 'étalonnage' sous un ciel diurne moyen donnent trois aires de mesure $\int c_\lambda d\lambda$ pour λ variant de 400 à 700 nm, qui sont égales.

Entre l'émetteur et le récepteur, se situe éventuellement un filtre avec une courbe de réponse spectrale, indiquée par le fabricant, et qui s'écrit : $0 \leq f_\lambda \leq 1$.

Les coefficients de réponse spectrale des capteurs et des filtres ont été reportés manuellement dans un tableur pour être ensuite extrapolés linéairement afin d'obtenir une réponse spectrale

qui ne sera utilisée que dans la bande spectrale s'étendant de 400 nm à 700 nm (région PAR ou région photo-synthétiquement active) et avec une résolution spectrale de 1 nm (figures 13, 14 et 15 pour les capteurs et figure 20 pour les filtres).

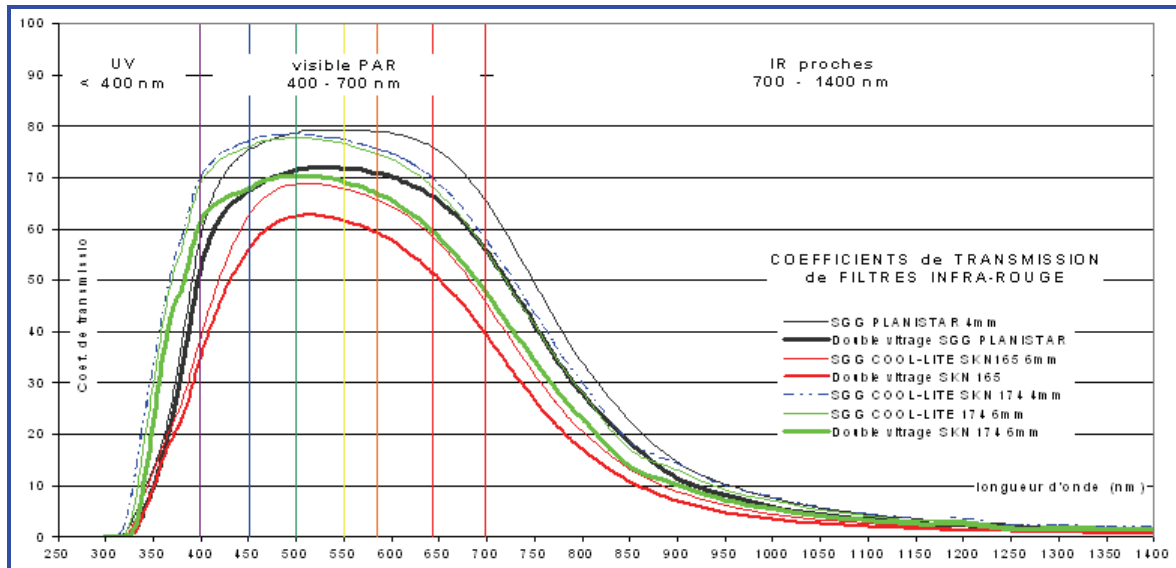


Figure 20 : courbes d'absorption spectrale de différents filtres en verre (Source : Saint-Gobain)

L'équation 9 permet de calculer l'éclairement énergétique PAR (λ variant de 400 à 700 nm) reçu par un capteur réel, au travers d'un filtre éventuel, d'une lampe et exprimé en W/m^2 selon :

$$E_c E = \Phi \cos(\alpha) / (\Omega_{ém.} r^2) \int_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} c_\lambda f_\lambda (EES_\lambda / EP) d\lambda \quad (\text{équation 9})$$

2.3 Conversion d'unités de l'éclairement énergétique reçu

Dans la bande spectrale PAR (assimilée égale à la bande spectrale visible), chaque rayonnement monochromatique possède une énergie distincte tel que :

$$E_\lambda = h c / \lambda \quad (\text{équation 10})$$

Par conséquent, la conversion d'unités de l'éclairement énergétique prend en compte le spectre de l'émetteur et de celui-ci seulement, quels que soient les filtres et les capteurs de mesure situés en aval.

2.3.1 Conversion W/m^2_{PAR} en $\mu moles/(m^2.s)_{PAR}$

L'équation 11 donne la valeur de l'éclairement énergétique PAR (de 400 à 700 nm) exprimée en $\mu moles/(m^2.s)$ équivalente à l'éclairement énergétique PAR (de 400 à 700 nm) égal à 1 W/m^2 tel que :

$$1 \text{ } W/m^2_{PAR} = K_1 \text{ } \mu moles/(m^2.s)_{PAR}$$

avec :

$$K_1 = \frac{\int_{400nm}^{700nm} (EES/EP)_\lambda \, d\lambda}{\int_{400nm}^{700nm} \frac{(EES/EP)_\lambda}{10^{-6} \mathcal{V} h c / \lambda} \, d\lambda} \quad (\text{équation 11})$$

Dans l'équation 11, comme dans l'équation 9, l'éclairement énergétique et l'exitance énergétique sont tous deux rapportés à une unité de surface équivalente, permettant d'écrire l'équation de passage.

2.3.2 Conversion $\mu mole/(m^2.s)_{PAR}$ en $lux_{400 \text{ à } 700nm}$

Avec le spectre de l'émetteur identique à celui utilisé dans le paragraphe 2.2.1, L'équation 12 donne la valeur de l'éclairement énergétique photopique (de 400 à 700 nm **environ**) exprimée en lux, équivalente à l'éclairement énergétique PAR (de 400 à 700 nm) égal à 1 $\mu mole/(m^2.s)$ tel que :

$$1 \text{ } \mu mole/(m^2.s)_{PAR} = K_2 \text{ } lux_{(400 \text{ à } 700nm)}$$

avec :

$$K_2 = \frac{\int_{400nm}^{700nm} \frac{(EES_\lambda/EP)}{10^{-6} \mathcal{V} h c / \lambda} \, d\lambda}{\int_{400nm}^{700nm} 683 \, v_\lambda (EES_\lambda/EP) \, d\lambda} \quad (\text{équation 12})$$

Les bandes spectrales photopique et photo-synthétiquement active (PAR) sont considérées proches l'une de l'autre, et s'étendant de 400 à 700 nm.

2.3.3 Résultats

L'ensemble des résultats calculés des coefficients de conversion de mesure du capteur Licor 190SA (sans filtre intermédiaire) sous divers éclairages est donné dans le **tableau 21**. Les coefficients calculés par la société Licor sont rappelés sur la **figure 22**, pour comparaison.

Pour convertir, multiplier par	Ciel diurne moyen	Ciel diurne nuageux	Philips HPI	Philips SON-T	Philips PL-L	Osram Fluora	Osram Biolux
W/m^2_{PAR} en $\mu moles/(m^2.s)_{PAR}$	4,62	4,48	4,61	4,86	4,68	4,46	4,47
$kLUX_{PAR}$ en $\mu moles/(m^2.s)_{PAR}$	17,99	19,08	12,29	11,75	13,68	19,73	16,29
$kLUX_{PAR}$ en W/m^2_{PAR}	3,9	4,26	2,66	2,42	2,92	4,43	3,65
écart relatif entre la mesure sous source sélectionnée et ciel diurne moyen de même flux	0%	2,5%	-0,3%	-5,6%	-1,7%	3,1%	2,8%

Tableau 21 : coefficients de conversion calculés pour le capteur Licor190SA sans filtre intermédiaire et sous divers spectres artificiels

To convert	Light source					
	Daylight	Metal halide	Sodium (HP)	Mercury	White fluor.	Incand.
W m ⁻² (PAR) to $\mu F s^{-1} m^{-2}$ (PAR)	4.6	4.6	5.0	4.7	4.6	5.0
klux to $\mu E s^{-1} m^{-2}$ (PAR)	18	14	14	14	12	20
klux to W m ⁻² (PAR)	4.0	3.1	2.8	3.0	2.7	4.0

Figure 22 : coefficients de conversion indiqués pour le capteur Licor190SEB sans filtre intermédiaire et sous divers spectres artificiels
(Source : Licor LI-190SEB Photosynthetic Irradiance (PI) Sensor, Instruction manual, publication n° 8010-09, octobre 1980)

3. Sources étendues de lumière

3.1 Calcul de l'éclairement photométrique reçu (capteur idéal)

Les équations 7 et 8 permettent de calculer l'éclairement photométrique en lux et l'éclairement énergétique en W/m^2 d'une source ponctuelle située à une distance r (en mètres) du capteur. Dans le cas d'une source étendue, *i.e.* lorsque la distance r est voisine ou inférieure à la plus grande des dimensions de la source, les équations ne sont plus valables et une nouvelle équation sera utilisée. Par exemple, les tubes fluorescents utilisés dans les chambres B1 et B2 mesurent 1,20 m (36W) et 1,50 m (58W) dans la chambre C, et la distance séparant les tables de culture des tubes fluorescents est d'environ 1 m (**tableau 2**).

La **figure 23** représente une source étendue de lumière (un tube fluorescent) dont les extrémités t_1 et t_2 ont pour coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) . Le capteur a pour coordonnées (x, y) et se trouve à une distance z du plan contenant la source étendue. Soit les écarts Δx égal à la différence entre l'abscisse d'un point du tube et l'abscisse x du capteur, et Δy égal à la différence entre l'ordonnée d'un point du tube et l'ordonnée y du capteur. On suppose que l'intensité lumineuse I de la source est répartie de façon homogène sur toute la grande longueur LT du tube selon l'équation 14 :

$$I = \int_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \int_{\Delta y_1}^{\Delta y_2} A \, d\Delta x \, d\Delta y \quad (\text{équation 14})$$

en intégrant : $A = I / LT \quad (\text{équation 15})$

Par ailleurs l'intensité : $I = \Phi / \Omega_{\text{ém.}} \quad (\text{équation 3})$

l'éclairement photométrique dEP d'un élément fini de dimensions $d\Delta x \, d\Delta y$ de la source étendue : $dEP = A \, d\Delta x \, d\Delta y \, \cos \alpha / r^2 \quad (\text{équation 16})$

avec :

$$\alpha = \text{Arctan}(t/z) \quad (\text{équation 17})$$

$$\cos \alpha = 1/\sqrt{[1+(t/z)^2]} \quad (\text{équation 18})$$

$$t = \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} \quad (\text{équation 19})$$

$$r^2 = z^2 \{ 1 + (\sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} / z)^2 \} \quad (\text{équation 20})$$

On obtient :

$$EP = \int_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \int_{\Delta y_1}^{\Delta y_2} dEP \, d\Delta x \, d\Delta y \quad (\text{équation 21})$$

soit :

$$EP = \Phi / (\Omega_{\text{ém.}} LT z^2) \int_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \int_{\Delta y_1}^{\Delta y_2} [1 + (\Delta x/z)^2 + (\Delta y/z)^2]^{-3/2} \, d\Delta x \, d\Delta y \quad (\text{équation 22})$$

La fonction primitive de la double intégrale précédente, a pour résultat l'équation 23 :

$$EP = \Phi z / (\Omega_{\text{ém.}} LT) \left[\frac{\Delta y_2 \sqrt{(z^2 + \Delta y_2^2 + \Delta x_2^2)}}{z^4 + (\Delta y_2^2 + 2\Delta x_2^2)z^2 + \Delta x_2^4 + \Delta y_2^2 \Delta x_2^2} - \frac{\Delta y_1 \sqrt{(z^2 + \Delta y_1^2 + \Delta x_1^2)}}{z^4 + (\Delta y_1^2 + 2\Delta x_1^2)z^2 + \Delta x_1^4 + \Delta y_1^2 \Delta x_1^2} \right] \quad (\text{équation 23})$$

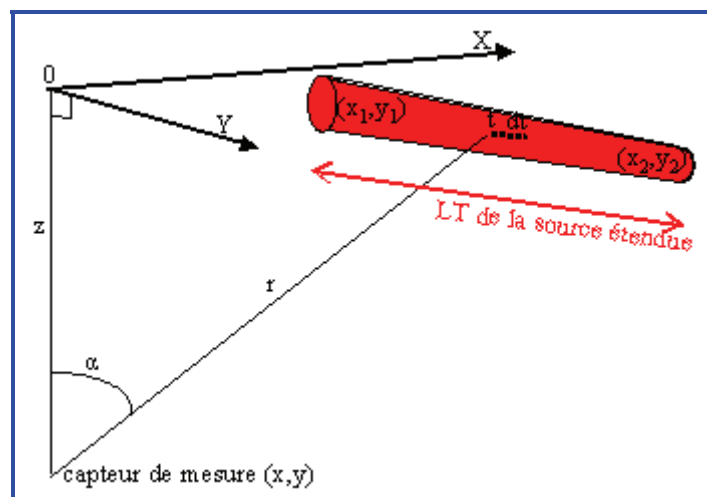


Figure 23 : représentation d'une source étendue de lumière (tube fluorescent)

3.2 Calcul de l'éclairement énergétique reçu (capteur réel)

En combinant les équations 8, 23 et 12 on peut écrire l'équation 24 qui décrit l'éclairement énergétique en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$ d'une source étendue et de spectre connu, qui traverse un filtre et qui est reçu par un capteur, dont les courbes de réponses spectrales sont connues :

$$E_e E = \Phi z / (\Omega_{em} LT) \left[\frac{\Delta y_2 \sqrt{(z^2 + \Delta y_2^2 + \Delta x_2^2)}}{z^4 + (\Delta y_2^2 + 2\Delta x_2^2)z^2 + \Delta x_2^4 + \Delta y_2^2 \Delta x_2^2} - \frac{\Delta y_1 \sqrt{(z^2 + \Delta y_1^2 + \Delta x_1^2)}}{z^4 + (\Delta y_1^2 + 2\Delta x_1^2)z^2 + \Delta x_1^4 + \Delta y_1^2 \Delta x_1^2} \right] \int_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} \frac{c_y f_y (EES/EP)_\lambda d\lambda}{10^{-6} \int_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} \frac{(EES/EP)_\lambda d\lambda}{h c / \lambda}} \quad (\text{équation 24})$$

3.3 Comparaison entre les mesures et les calculs d'éclairement énergétique PAR

Les mesures ont été effectuées dans une chambre de culture. Un capteur Licor 190SA a été placé sous la verticale et au milieu d'un tube fluorescent neuf, et à différentes distances z . Les mesures ont été distinctement effectuées avec 3 types différents de tubes fluorescents (**figures 24 et 25**) dont les caractéristiques sont mentionnées dans le **tableau 26**.



figure 24 : montage expérimental de mesure de l'éclairement d'une source étendue (tube fluorescent Osram Biolux 36W)



figure 25 : montage expérimental de mesure de l'éclairement d'une source étendue (tube fluorescent Philips PL-L 55W)

capteur de mesure LiCor 190SA

tube fluo	Biolux 36W	Fluora 36W	Philips PLL 55W
Φ en lumen	2304	1404	4785
cos α	1	1	1
$\Omega_{\text{émateur}}$ en stéradians	7,00	12,57	8,77
K en $[(\text{W}/\text{m}^2) / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}\cdot 2\cdot\text{s}\cdot 1)]$	73,4560	22,5018	74,0072
longueur du tube LT en m	1,185	1,185	0,435

Tableau 26 : montage expérimental pour la mesure de l'éclairement d'une source étendue

Les valeurs de l'angle solide de l'émetteur de lumière ont été ajustées afin d'obtenir la meilleure corrélation entre les différentes mesures d'éclairement énergétique et les valeurs calculées avec l'équation 24. Les **figures 27, 28 et 29** montrent les résultats de comparaison, successivement pour les tubes fluorescents Osram Biolux 36W, Osram Fluora 36W et Philips PLL 55W. Sur les figures, les cercles correspondent aux mesures effectuées avec le capteur Licor 190SA, et les courbes rouge et bleu ciel correspondent successivement aux calculs effectués avec l'hypothèse de source étendue (équation 24) et de source ponctuelle (équations 8 et 12 combinées). Les mesures de comparaison montrent que pour des hauteurs z inférieures à la longueur des tubes fluorescents, le modèle de calcul pour une source ponctuelle surestime la valeur de l'éclairement énergétique tandis que le modèle de calcul pour une source étendue est plus proche des valeurs réellement mesurées.

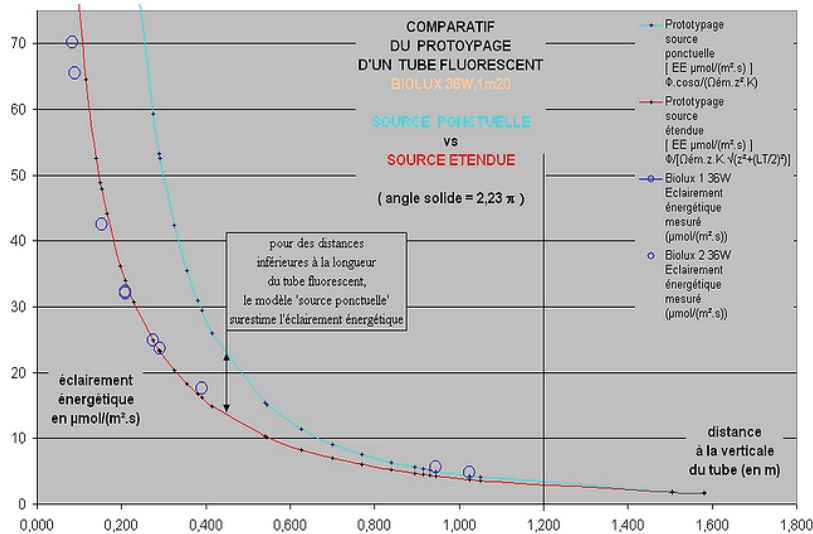


Figure 27 : résultat de comparaison entre le modèle de source ponctuelle, le modèle de source étendue et les valeurs mesurées (tube fluorescent Osram Biolux 36W)

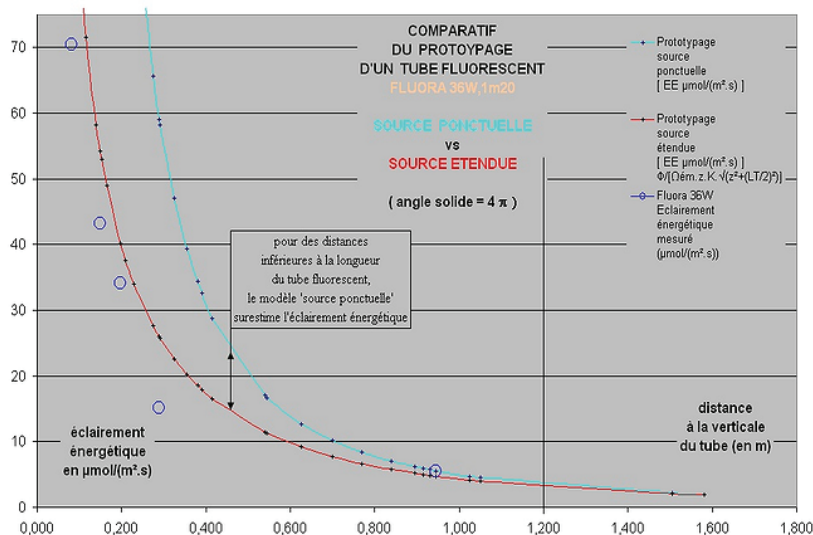


Figure 28 : résultat de comparaison entre le modèle de source ponctuelle, le modèle de source étendue et les valeurs mesurées (tube fluorescent Osram Fluora 36W)

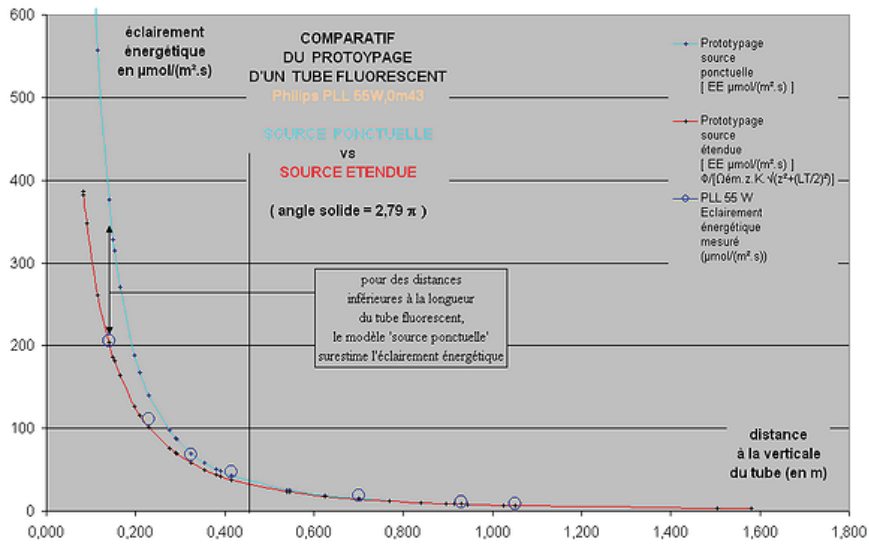


Figure 29 : résultat de comparaison entre le modèle de source ponctuelle, le modèle de source étendue et les valeurs mesurées (tube fluorescent Philips PLL 55W)

PROTOTYPAGE des PROFILS d'ÉCLAIREMENT d'une CHAMBRE de CULTURE (SOURCE ETENDUE DE LUMIERE)

ARCHITECTURE de la CHAMBRE		MAILLAGE & TRAITEMENT	
chb	chambre climatisée	N	5
bl	bordure latérale gauche & droite	pas	longueur d'une maille 0,351 m
it	intervalle entre tubes	nbX	nombre de mailles (x) 20 20,0
lc	largeur du couloir	nbY	nombre de mailles (y) 19 14,5
bf	bordure en face & fond (PLL)	xc	position du capteur (x) 2,840 m
ip	intervalle longitudinal entre 2 panneaux (PLL)	yc	position du capteur (y) 2,698 m
bF2	bordure en face & fond		
ip2	intervalle longitudinal entre 2 panneaux		
lac	largeur de la chambre		
loc	longueur de la chambre		

DESCRIPTION de l'ÉCLAIRAGE		Phoora 36W	
fho	type de tube fluorescent	Floora 36W	
nt	nb total de tubes	43	
hat	hauteur (1 tube)	0,5000 m	
cr	coefficient de réflexion sur les murs	0,00%	
fhu	flux lumineux (1 tube) PLL	5000 lumens	
cc	coefficient de conversion W en μmol (1 tube) PLL	5000,0	
as	angle solide émission (1 tube) PLL	12,566 stéradians	
lot	longueur (1 tube) PLL	2,000 m	
fhu2	flux lumineux (1 tube) EhoK	5000 lumens	
cc2	coefficient de conversion W en μmol (1 tube) EhoK	5000,0	
as2	angle solide émission (1 tube) EhoK	12,566 stéradians	
lot2	longueur (1 tube) EhoK	2,000 m	
fhu3	flux lumineux (1 tube) Phoora	5000 lumens	
cc3	coefficient de conversion W en μmol (1 tube) Phoora	5000,0	
as3	angle solide émission (1 tube) Phoora	12,566 stéradians	
lot3	longueur (1 tube) Phoora	2,000 m	

Ecl.En.Max	6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Ecl.En.Min	0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
(Max-Min)/Min	99%

Figure 30 : outil de prototypage pour le calcul de l'éclairage énergétique reçu par des sources étendues de lumière en milieu confiné

3.4 Outil de prototypage (source étendue)

Un outil de prototypage est développé sous l'application Excel® pour calculer, en chaque point de la chambre, la valeur du rayonnement énergétique PAR (**figure 30**). Le calcul intègre la contribution de toutes les sources étendues de lumière et utilise l'équation 24 pour calculer, pour chaque tube fluorescent, la valeur du rayonnement énergétique PAR reçu. Les caractéristiques des émetteurs (spectres, flux, dimensions et dispositions), des filtres (courbe d'absorption spectrale, dimensions et dispositions) et du capteur (courbe de réponse spectrale et disposition) sont renseignées dans le l'application.

3.4.1 Coefficients de réflexion

Les chambres de culture B1, B2 et C disposent de parois verticales en acier inoxydable qui réfléchissent une partie du rayonnement des tubes fluorescents. Le coefficient de réflexion dépend de l'état de surface des parois et des équipements et obstacles (gaines de soufflage de l'air climatisé par exemple) qui sont fixées sur les parois. Pour prendre en compte la contribution du rayonnement réfléchi des 4 parois verticales dans le calcul global, la surface éclairante principale (bloc n° 0) est dupliquée 4 fois, disposée aux 4 coins cardinaux autour (blocs n° 1, 2, 3 et 4), et affectée d'une valeur de flux diminuée et ajustable au coefficient de réflexion souhaitée. La **figure 31** montre le schéma d'implantation et les mesures de distance entre les sources étendues et le capteur de mesure correspondantes.

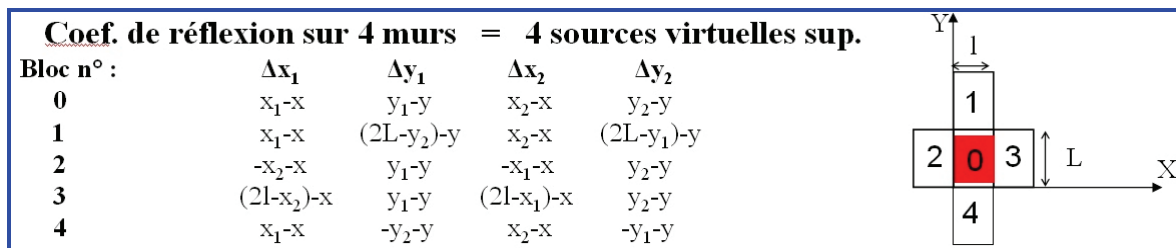


Figure 31 : implantation et calculs des écarts correspondant aux coefficients de réflexion

Les mesures dans les chambres B1 et C sont comparées aux résultats de l'outil de prototypage et les résultats sont respectivement indiqués sur les **figures 32** et **33**. L'échelle des graphiques a été ajustée afin d'obtenir des surfaces de rayonnement qui varient de 5 % par rapport au rayonnement maximum. Les graphiques montrent une relative adéquation entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées dans la distribution spatiale du rayonnement (homogénéités spatiales). Le réglage des coefficients de réflexion et de l'angle solide émetteur permet d'obtenir l'ajustement des valeurs quantitatives du rayonnement calculées aux mesures. Deux autres variables peuvent expliquer les différences quantitatives observées pour la chambre C : la durée d'utilisation des tubes fluorescents (jusqu'à 50 % de perte en flux lumineux pour des tubes fluorescents après 6 000 h d'utilisation) et la température de fonctionnement des tubes fluorescents (rendement d'ionisation moins élevé à basse température).

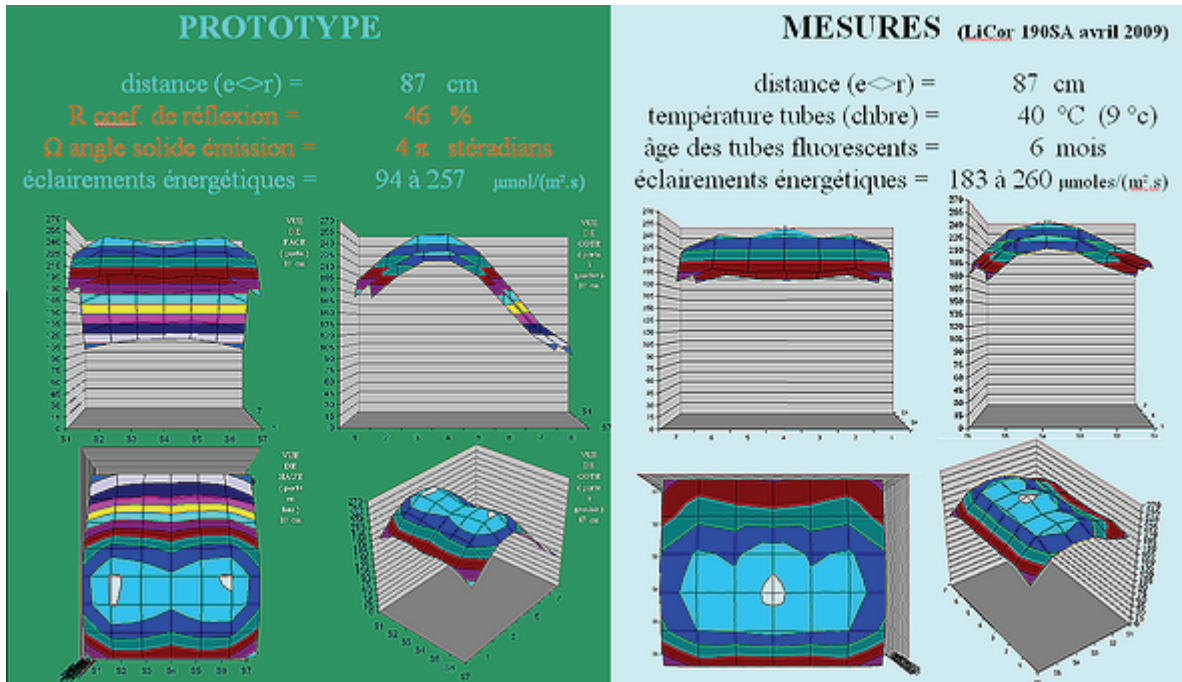


Figure 32 : comparaison entre les rayonnements énergétiques calculés et les mesures (chambre de culture B1)

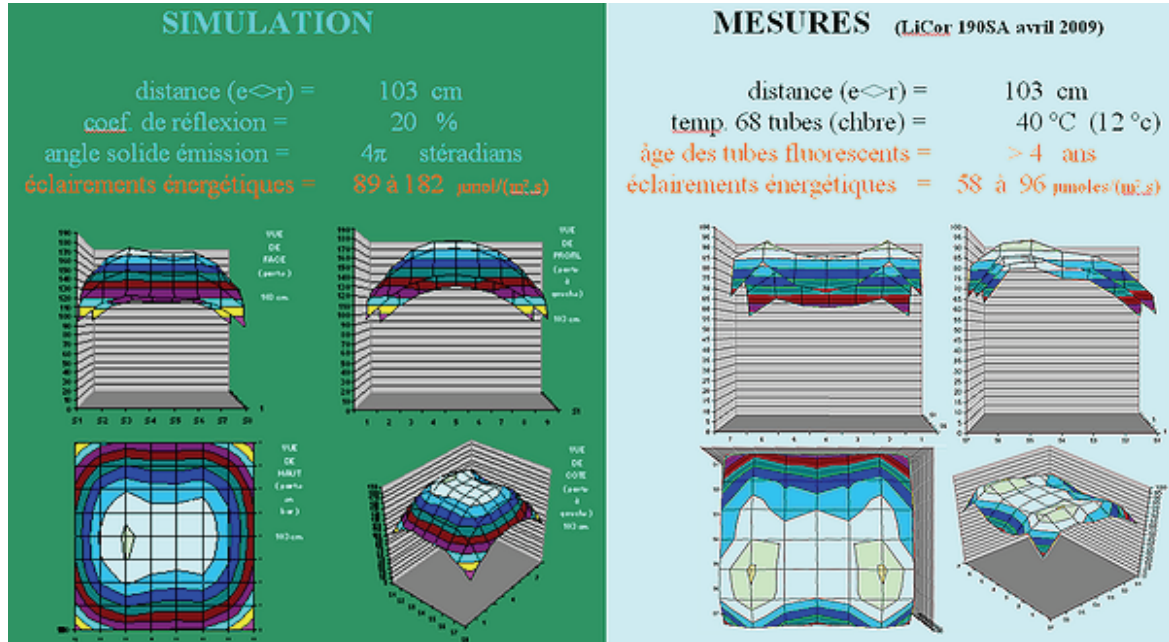


Figure 33 : comparaison entre les rayonnements énergétiques calculés et les mesures (chambre de culture C)

3.4.3 Influence des paramètres distance, coefficients de réflexion et angle solide sur la valeur calculée de l'éclairement énergétique reçu (figure 34)

L'évaluation de l'impact des variations de la distance s'est effectuée en prototypant un tube fluorescent Osram Fluora 58W de longueur égale à 1,50 m, de flux égal à 2 304 lumens, d'angle solide à l'émission égal à 4π et de coefficient de réflexion des quatre parois égal à 0 %. La distance d a été variée de 10 cm à 100 cm, et a fortement impacté la valeur du rayonnement au centre (qui varie inversement avec d^2) et a fortement impacté le profil de distribution spatial du rayonnement (qui s'élargit avec d^2).

L'évaluation de l'impact des variations du coefficient de réflexion R des quatre parois s'est effectuée en prototypant un tube fluorescent Osram Fluora 58W de longueur égale à 1,50 m, de flux égal à 2 304 lumens, d'angle solide à l'émission égal à 4π et placé à une distance verticale centrée du capteur égale à 50 cm. Le coefficient de réflexion d a été variée de 0 % à 100 %, a faiblement impacté la valeur du rayonnement au centre et a fortement impacté le profil de distribution spatial du rayonnement (qui s'élargit avec R).

L'évaluation de l'impact des variations de l'angle solide à l'émission s'est effectuée en prototypant un tube fluorescent Osram Fluora 58W de longueur égale à 1,50 m, de flux égal à 2 304 lumens, placé à une distance verticale centrée du capteur égale à 50cm et un coefficient de réflexion des quatre parois égal à 0 %. L'angle solide Ω a été variée de $\pi/2$ à 4π , a fortement impacté la valeur du rayonnement au centre (qui varie inversement avec Ω) et a faiblement impacté le profil de distribution spatial du rayonnement.

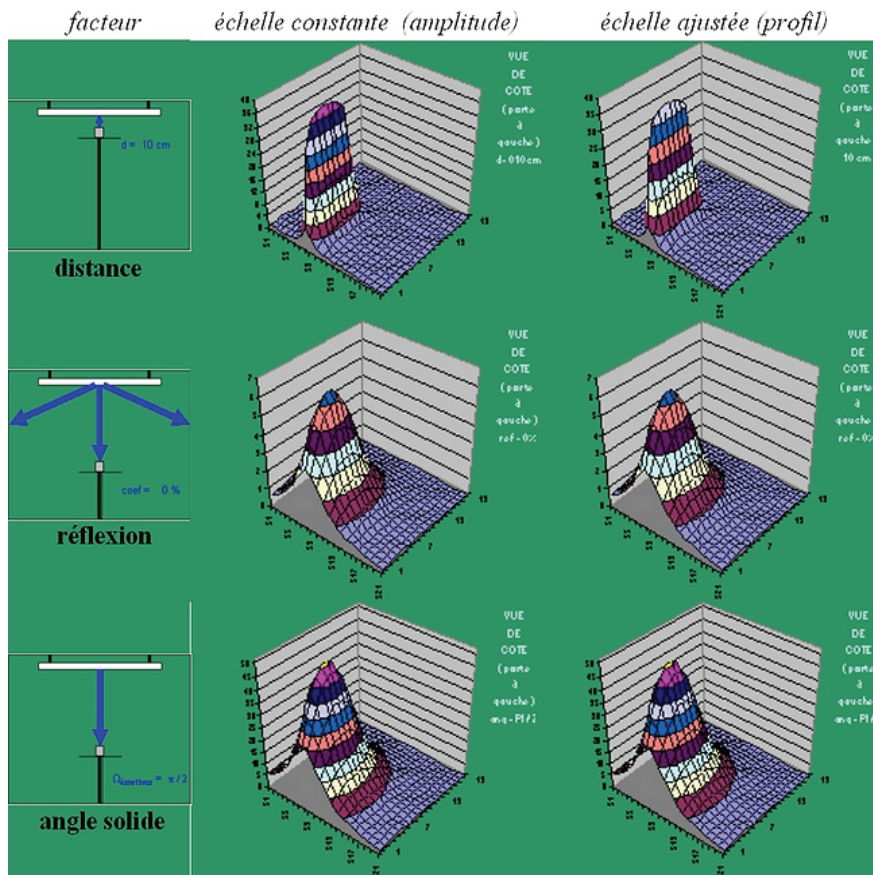
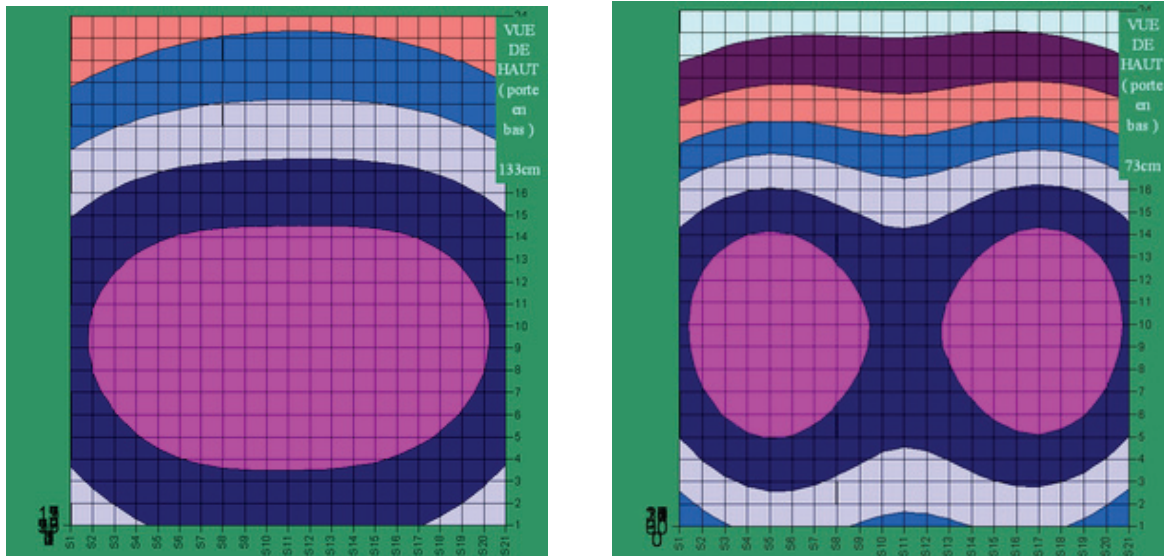


Figure 34 : influence des valeurs des paramètres distance, coefficients de réflexion et angle solide sur les profils d'éclairement énergétiques reçus

3.4.4 Distribution spatiale du rayonnement énergétique reçu selon la distance

La distance d séparant les plafonds lumineux et le capteur a été variée pour simuler la disposition des tables de culture en position basse ($d=133$ cm) puis en position haute ($d = 73$ cm). Les résultats des calculs indiquent une valeur maximum d'éclairement énergétique de $186 \mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$ en position basse et de $296 \mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$ en position haute. La distribution spatiale montre une zone homogène d'éclairement perpendiculaire au tube fluorescent et centrée dans la chambre en position basse (**figure 35**), et deux zones homogènes à la verticale des deux groupes de plafond éclairants composés de tubes fluorescents en position haute (**figure 36**).



Figures 35 et 36 : distribution spatiale de l'éclairement énergétique reçu pour une distance grande de 133 cm et courte 73 cm entre le capteur et les sources de lumières étendues (prototypage de la chambre de culture B1)

4. Projecteurs de lumière

4.1 Caractérisation des angles solides à l'émission

Le projecteur (**figure 9**) est décrit par le fournisseur, selon deux plans perpendiculaires : le plan principal de projection KJ (perpendiculaire à l'axe de la l'ampoule) et le plan secondaire LM (parallèle à l'axe de l'ampoule). Le projecteur peut être orienté de 0 à 359° autour de son axe de rotation et peut être pivoté de -90° à $+90^\circ$ autour de son axe d'inclinaison (**figure 37**).

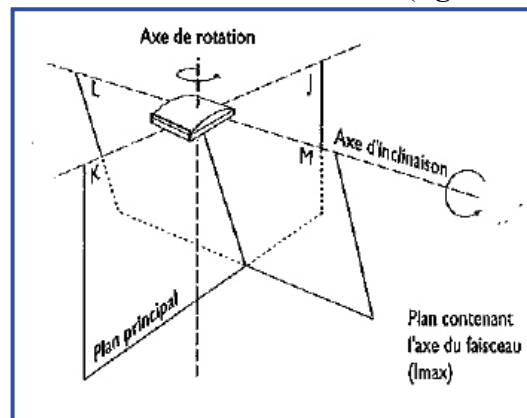


Figure 37 : plan et axes de rotation du projecteur Philips Diamant SNF-K300

Un diagramme cartésien (**figure 38**) décrit le ratio : intensité lumineuse I / flux lumineux en fonction des angles d'inclinaison (α_{KJ} et α_{LM} mesurés en degrés) formé entre le capteur et la verticale du projecteur (respectivement projetés dans les plan KJ et LM). Ce ratio correspondant, selon l'équation 3 à la valeur de l'angle solide à l'émission de l'ensemble optique (projecteur + ampoule). Le diagramme comporte deux courbes correspondant aux mesures dans les deux plans KJ et LM. Le diagramme comporte également un paramètre LOR égal au rendement lumineux de l'ensemble optique et correspondant au ratio entre le flux lumineux sortant de l'ensemble et le flux lumineux de la lampe nue.

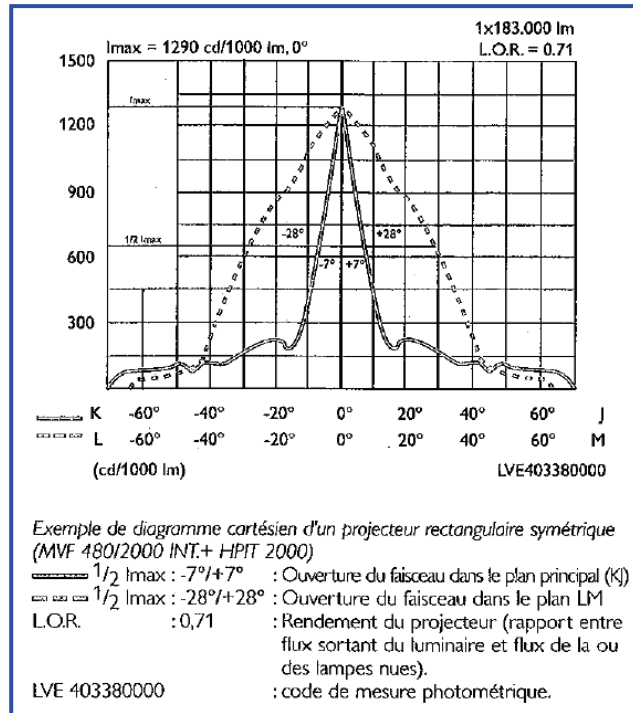


Figure 38 : diagramme cartésien d'un projecteur symétrique

Les points des diagrammes des projecteurs Diamant équipés d'une ampoule HPI et d'une ampoule SON-T, ont été reportés manuellement dans un tableur et paramétrés pour obtenir 3 fonctions polynomiales de degrés 2 (**figure 39**).

Par exemple, dans le plan KJ et pour l'ensemble projecteur + ampoule HPI, on obtient :

$$\text{Si } -\alpha_{KJ_HPI_MAX} \leq \alpha_{KJ} \leq \alpha_{KJ_HPI_MAX} : \Omega_{KJ_HPI} = f_{11}(\alpha_{KJ}) = k_{0_KJ_HPI} + k_{1_KJ_HPI} \alpha_{KJ} + k_{2_KJ_HPI} \alpha_{KJ}^2$$

$$\text{Si } \alpha_{KJ} \geq \alpha_{KJ_HPI_MAX} :$$

$$\Omega_{KJ_HPI} = f_{12}(\alpha_{KJ}) = k_{0_KJ_HPI} + k_{1_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX} + k_{2_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX}^2 + (\alpha_{KJ} - \alpha_{KJ_HPI_MAX}) (4\pi - k_{0_KJ_HPI} + k_{1_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX} + k_{2_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX}^2) / (\frac{1}{2}\pi - \alpha_{KJ_HPI_MAX})$$

$$\text{Si } \alpha_{KJ} \leq -\alpha_{KJ_HPI_MAX} :$$

$$\Omega_{KJ_HPI} = f_{13}(\alpha_{KJ}) = k_{0_KJ_HPI} - k_{1_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX} + k_{2_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX}^2 + (\alpha_{KJ} + \alpha_{KJ_HPI_MAX}) (4\pi - k_{0_KJ_HPI} - k_{1_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX} + k_{2_KJ_HPI} \alpha_{KJ_HPI_MAX}^2) / (\frac{1}{2}\pi + \alpha_{KJ_HPI_MAX})$$

Sur le même modèle que ci-dessus, trois autres séries de trois fonctions paramétrées permettent de décrire la valeur de l'angle solide pour les plans LM du projecteur + ampoule HPI et pour les plans KJ et LM du projecteur + ampoule SON-T.

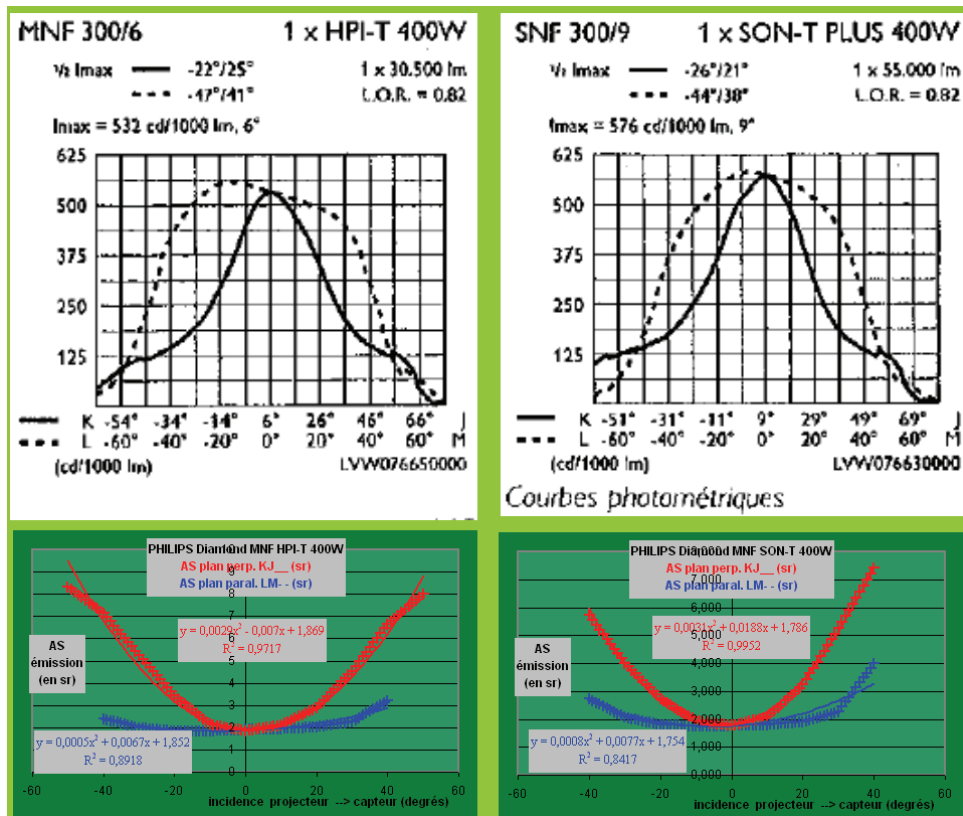


Figure 39 : fonctions paramétrées calculant l'angle solide des projecteur HPI et SON-T dans les 2 plans KJ et LM (ici $\alpha < \alpha_{MAX}$, en degrés)

4. 2 Algorithme de calcul de la distribution spatiale de l'angle solide projeté

L'algorithme suivant permet de calculer sur la surface plane de projection, où s'effectue la mesure de l'éclairage énergétique PAR reçu (tables de culture), la valeur de l'angle solide à l'émission (figure 40).

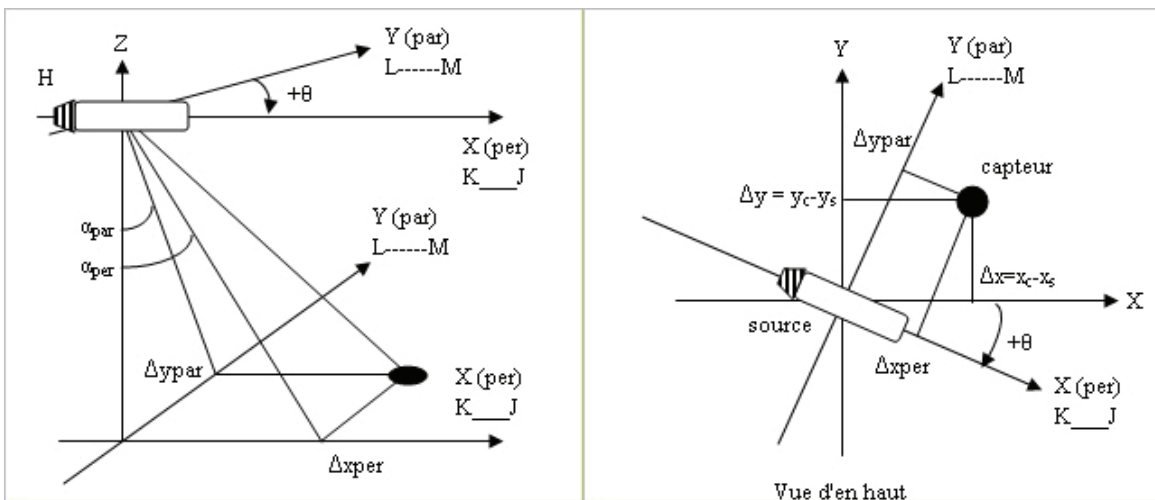


Figure 40 : représentation des repères pour le calcul des valeurs des angles solides dans le plan de mesure

Soit (X_c, Y_c) les coordonnées dans le plan de mesure ($z=0$) du capteur.

Soit (X_s, Y_s) les coordonnées dans le plan de l'ampoule ($z=H$) du projecteur.

On a :

$DX = X_c - X_s$: l'écart de distance sur l'axe des abscisses, entre le capteur et le projecteur.

$DY = Y_c - Y_s$: l'écart de distance sur l'axe des ordonnées entre le capteur et le projecteur.

Pour s'affranchir d'une éventuelle rotation θ_s (en radians) du projecteur par rapport au repère $\langle X O Y \rangle$ lié au capteur, on projette les points dans le nouveau repère $\langle X_{KJ} O Y_{LM} \rangle$ lié au projecteur, et on obtient :

$$\begin{aligned} DX_{KJ} &= DX \cos(\theta_s) + DY \sin(\theta_s) \\ DY_{LM} &= -DX \sin(\theta_s) + DY \cos(\theta_s) \end{aligned}$$

On détermine la valeur de l'angle d'incidence δ (en radians), dans le plan secondaire LM (dans lequel le projecteur peut s'incliner de -90° à $+90^\circ$) entre le capteur et le projecteur :

$$\alpha_{LM} = \text{Arctan}(DY_{LM} / H) \quad , \text{ en radians.}$$

On prend en considération, l'éventuelle inclinaison du projecteur ξ (en radians), pour corriger la valeur de l'angle d'incidence précédemment calculée :

$$\begin{aligned} \text{Si } \delta = 0 &: \alpha_{LM_COR} = \alpha_{LM} \quad , \text{ en radians} \\ \text{Si } \delta < 0 \text{ et } \delta < \alpha_{LM} &: \alpha_{LM_COR} = -(\xi - \alpha_{LM}) \quad , \text{ en radians} \\ \text{Si } \delta < 0 \text{ et } \delta \geq \alpha_{LM} &: \alpha_{LM_COR} = \alpha_{LM} - \xi \quad , \text{ en radians} \\ \text{Si } \delta > 0 \text{ et } \delta < \alpha_{LM} &: \alpha_{LM_COR} = \alpha_{LM} - \xi \quad , \text{ en radians} \\ \text{Si } \delta > 0 \text{ et } \delta \geq \alpha_{LM} &: \alpha_{LM_COR} = -(\xi - \alpha_{LM}) \quad , \text{ en radians} \end{aligned}$$

On calcule la valeur de l'angle d'incidence (en radians), dans le plan primaire KJ entre le capteur et le projecteur :

$$\alpha_{KJ} = \text{Arctan}(DX_{KJ} / H) \quad , \text{ en radians.}$$

Les angles α_{KJ} et α_{LM} permettent le calcul des valeurs des angles solides Ω_{KJ} et Ω_{LM} correspondant aux 2 plans KJ et LM, à l'aide des fonctions paramétrées (cf. § 4.1).

Pour une position donnée du capteur, la valeur de l'angle solide à l'émission est la contribution trigonométrique entre Ω_{KJ} et Ω_{LM} pondérée par la position circulaire du capteur dans le plan de mesure :

Si $\Omega_{LM} < \Omega_{KJ}$:

$$\begin{aligned} \text{si } DY_{LM} \neq 0 & \text{ alors } \Omega = \Omega_{KJ} + (\Omega_{LM} - \Omega_{KJ}) \cos [\text{Arctan} (|DX_{KJ}| / |DY_{LM}|)] \\ \text{si } DY_{LM} = 0 & \text{ alors } \Omega = \Omega_{KJ} \end{aligned}$$

Si $\Omega_{LM} \geq \Omega_{KJ}$:

$$\begin{aligned} \text{si } DX_{KJ} \neq 0 & \text{ alors } \Omega = \Omega_{LM} + (\Omega_{KJ} - \Omega_{LM}) \cos [\text{Arctan} (|DY_{LM}| / |DX_{KJ}|)] \\ \text{si } DX_{KJ} = 0 & \text{ alors } \Omega = \Omega_{LM} \end{aligned}$$

La **figure 41** montre, pour trois dispositions d'un projecteur PHILIPS Diamant SNF-K300 équipé d'une ampoule HPI et situé à une hauteur $H = 0,88$ m, les valeurs obtenues de l'angle solide à l'émission au niveau du plan contenant le capteur. Pour ces trois dispositions le projecteur et le capteur sont centrés verticalement ; le projecteur et le capteur sont alignés sur l'axe KJ dans le 1^{er} cas, forment un angle de rotation $\theta=45^\circ$ autour de l'axe KJ dans le 2^{ème} cas et forment un angle d'inclinaison $\delta=20^\circ$ autour de l'axe KJ dans le 3^{ème} cas. Pour une meilleure lisibilité, les trois graphiques représentent la valeur $4\pi\Omega$ en stéradians. Pour ces trois configurations, la valeur minimum de Ω calculée est de 2,13 stéradians.

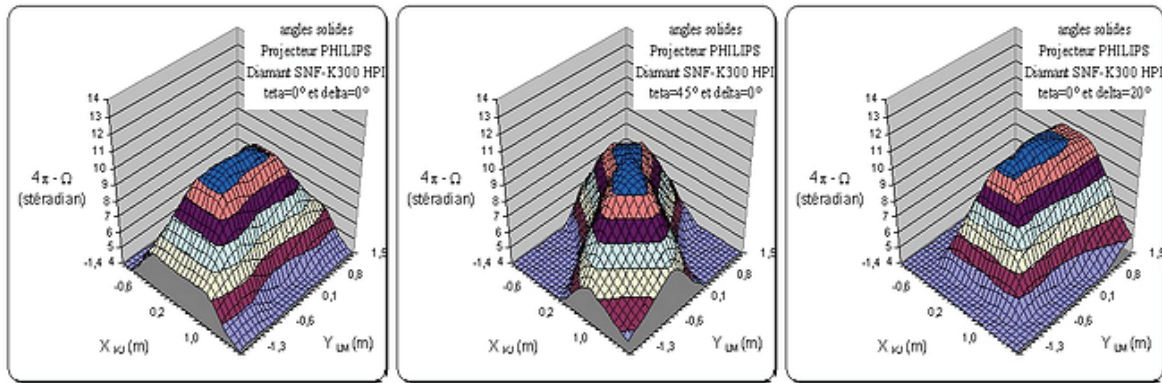


Figure 41 : valeurs des angles solides à l'émission du projecteur PHILIPS Diamant SNF-K300 à 0,88 m de hauteur du plan contenant le capteur (à gauche : $\theta = 0^\circ$ et $\delta = 0^\circ$, au centre : $\theta = 45^\circ$ et $\delta = 0^\circ$ et à droite : $\theta = 0^\circ$ et $\delta = 20^\circ$)

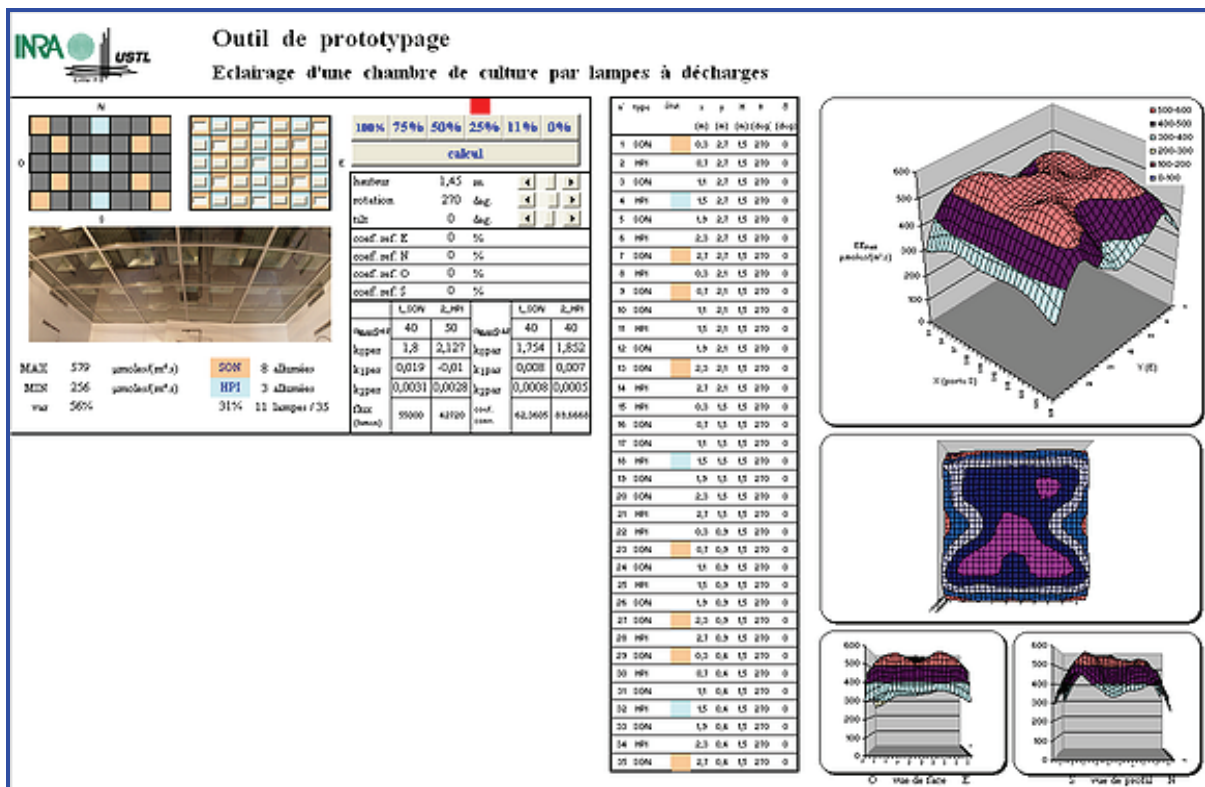


Figure 42 : outil de prototypage pour le calcul de l'éclairement énergétique PAR reçu (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) et émis par des projecteurs de lumière en milieu confiné (chambre D)

4. 3 Prototypage de la chambre D

Une application de prototypage de la chambre D a été développée sous application Excel® (**figure 42**). Elle permet de fixer différentes consignes d'éclairage (de 0 à 100 % des 35 lampes allumées). L'outil est en développement, et ne prend pas encore en considération les réflexions de lumières sur les quatre parois verticales de la chambre, et n'inclut pas encore les pertes d'absorption des vitres (double vitrage du faux-plafond et LOR du projecteur).

La **figure 43** résume les différentes distributions spatiales de l'éclairement énergétique PAR reçu, pour une distance entre les lampes et le capteur, fixée égale à 1,45 m. Les aires de la surface du graphique représentent 10 % de variation relative en éclairement.

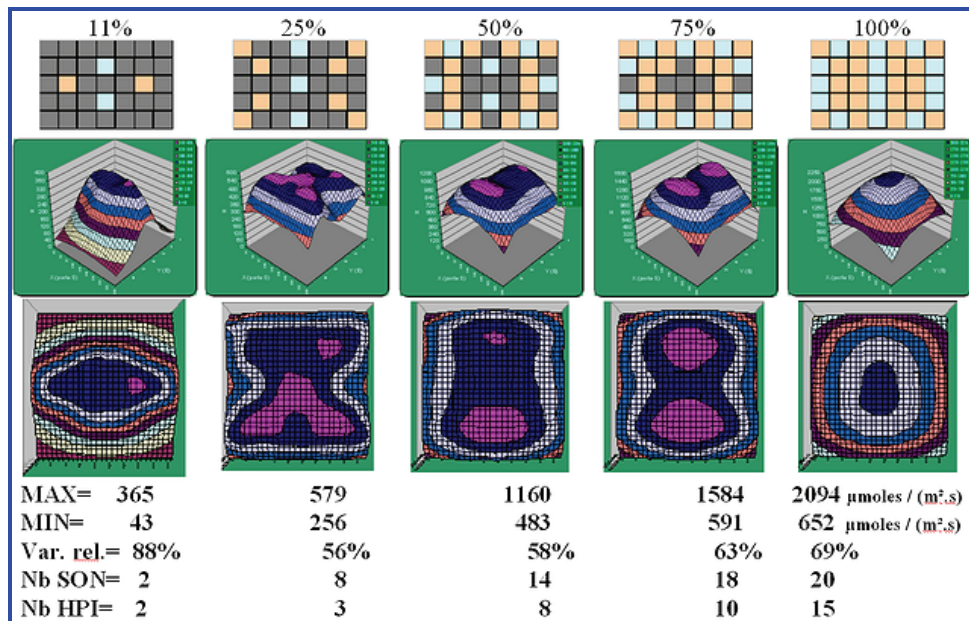


Figure 43 : distributions de l'éclairement énergétique PAR (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) dans la chambre D pour différentes consignes d'éclairage (prototypage)

Le prototypage, pour une consigne de 75 % d'éclairage, a été comparé à des mesures d'éclairement énergétique dans la chambre D à l'aide d'un capteur Licor 190SA. La **figure 44** montre le résultat des mesures. En corrigeant les valeurs calculées par l'outil de prototypage (adsorption de -30% du faux-plafond, adsorption de -18% du LOR du projecteur), on atteint une valeur maximum égale à 823 $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$ et une valeur minimum de 307 $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$. En comparaison avec les valeurs mesurées (respectivement 1015 et 630 $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$ et correction par les coefficients de conversion spectrale non appliquée : soit +5,6% de correction pour les SON-T et +0.3% de correction pour les ampoules HPI), l'écart relatif est respectivement égal à -23% et -55% entre le prototypage et la mesure. De futurs développements de l'application, incluant la prise en compte des réflexions sur les 4 parois verticales seront effectués pour améliorer les résultats. Par ailleurs, la **figure 45** montre le système de refroidissement par air, du faux-plafond d'éclairage. Les points froids et chauds impactent l'efficacité lumineuse des ampoules à décharge, en corrélation avec les mesures effectuées dans la chambre.

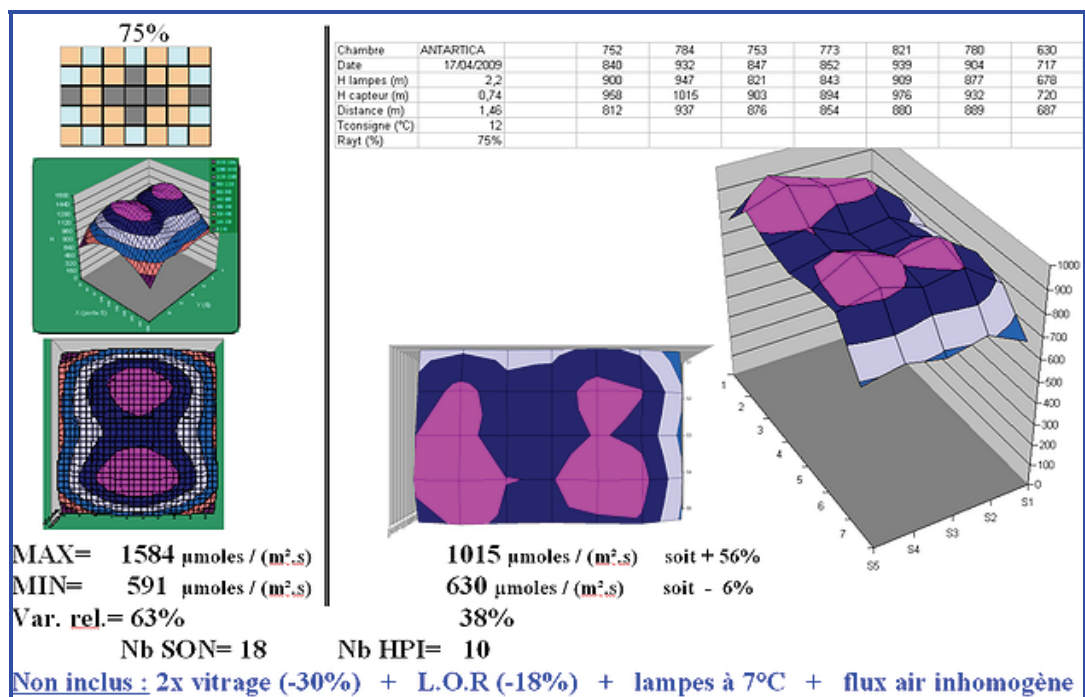


Figure 44 : comparaison de l'éclairage énergétique PAR (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) entre le prototype et les valeurs mesurées (chambre de culture D, hauteur sous les lampes = 1,45 m, éclairage à 75 % du maximum)

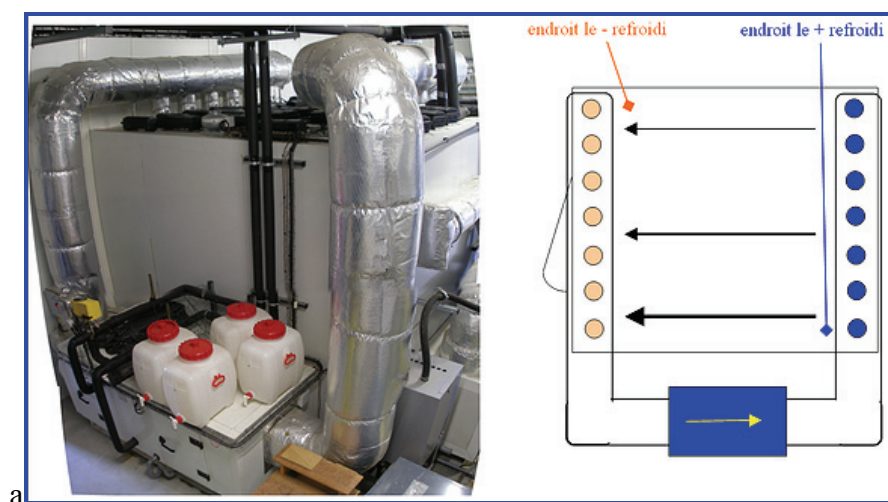


Figure 45 : cellule et réseau de refroidissement par air du faux-plafond d'éclairage

4.4 Prototypage de la chambre A

Une application de prototypage de la chambre A, a été développée sous application Excel®. Elle permet de fixer différentes consignes d'éclairage (de 0 à 100 % des 24 lampes allumées). L'outil est en développement ; il ne prend pas encore en considération les réflexions de lumières sur les quatre parois verticales de la chambre et il n'inclut pas encore les pertes d'absorption des vitres (LOR= -18 % du projecteur).

La **figure 46** résume les distributions spatiales de l'éclairement énergétique PAR reçu, pour une distance entre les lampes et le capteur, fixée égale à 1,60 m. Les différentes aires de la surface du graphique représentent 10 % de variation relative en éclairage.



Figure 46 : distributions de l'éclairement énergétique PAR (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) dans la chambre A pour différentes consignes d'éclairage (prototypage)

Le prototypage, pour 6 consignes d'éclairage, a été comparé à des mesures d'éclairement énergétique dans la chambre D à l'aide d'un capteur Licor 190SA (**figure 47**). Les mesures ont été effectuées sur trois cercles de rayon respectivement égaux à 8 cm (centre du plateau tournant – courbes jaunes), 68 cm (milieu du plateau tournant – courbes bleues), 135 cm (bord extérieur du plateau tournant – courbes blanches). Le résultat des mesures consiste en la moyenne sur deux rotations du plateau tournant sur les rayons égaux à 68 et 138cm, et 1 rotation sur le rayon égal à 8cm. La **figure 48** montre la corrélation du profil d'éclairement entre les valeurs calculées par l'outil de prototypage et les moyennes des mesures le long des rotations du plateau. En corrigeant les pentes des droites de corrélation, avec l'adsorption LOR des vitres du projecteur (- 18 %), on obtient un écart relatif d'éclairement respectivement égal à - 4 %, - 8 % et - 27 % entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par l'outil de prototypage. L'hypothèse de l'ombrage de l'abri météo, situé au centre et au-dessus du plateau, peut expliquer l'écart de - 27 %. La non application des coefficients de conversion spectrale (soit + 5,6 % de correction pour les mesures des ampoules SON-T et + 0.3 % de correction pour les mesures des ampoules HPI) explique une partie de l'écart. L'hypothèse de l'usure des lampes (deux ans de fonctionnement environ) et du refroidissement climatisé du faux-plafond peut expliquer la baisse de l'efficacité lumineuse des ampoules.

De futurs développements de l'application, incluant la prise en compte des réflexions sur les quatre parois verticales seront effectués pour améliorer les résultats.

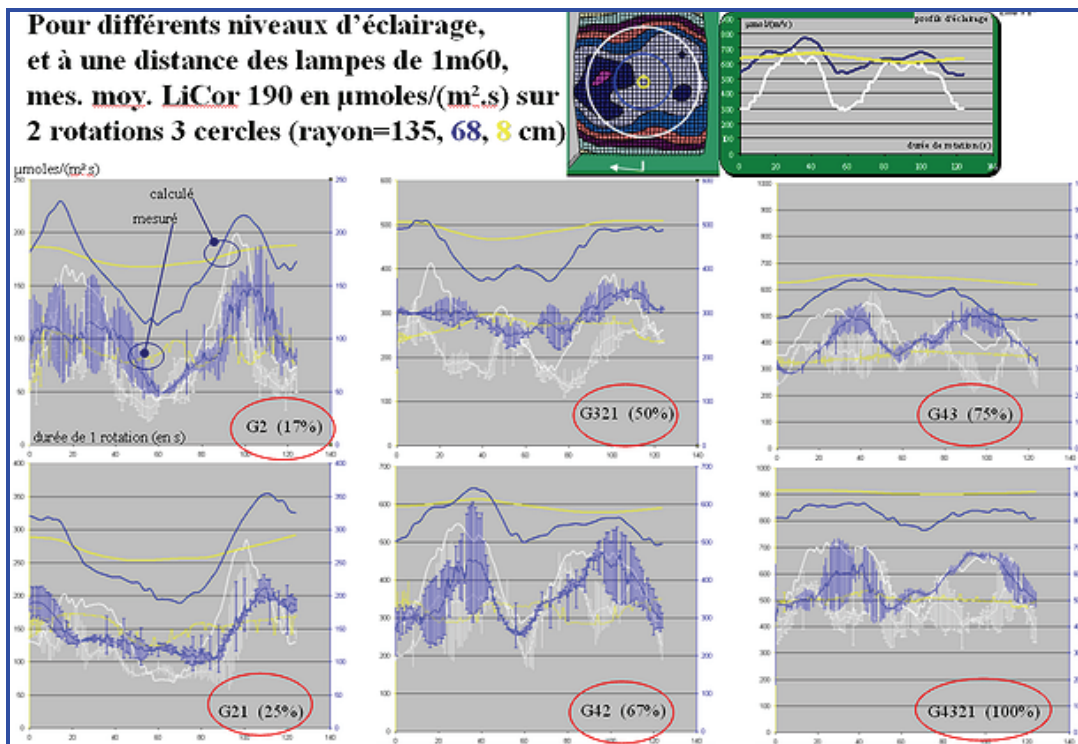


Figure 47 : comparaison de l'éclairage énergétique PAR (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) entre le prototypage et les valeurs mesurées chambre de culture A, hauteur sous les lampes = 1,60 m, 6 consignes d'éclairage)

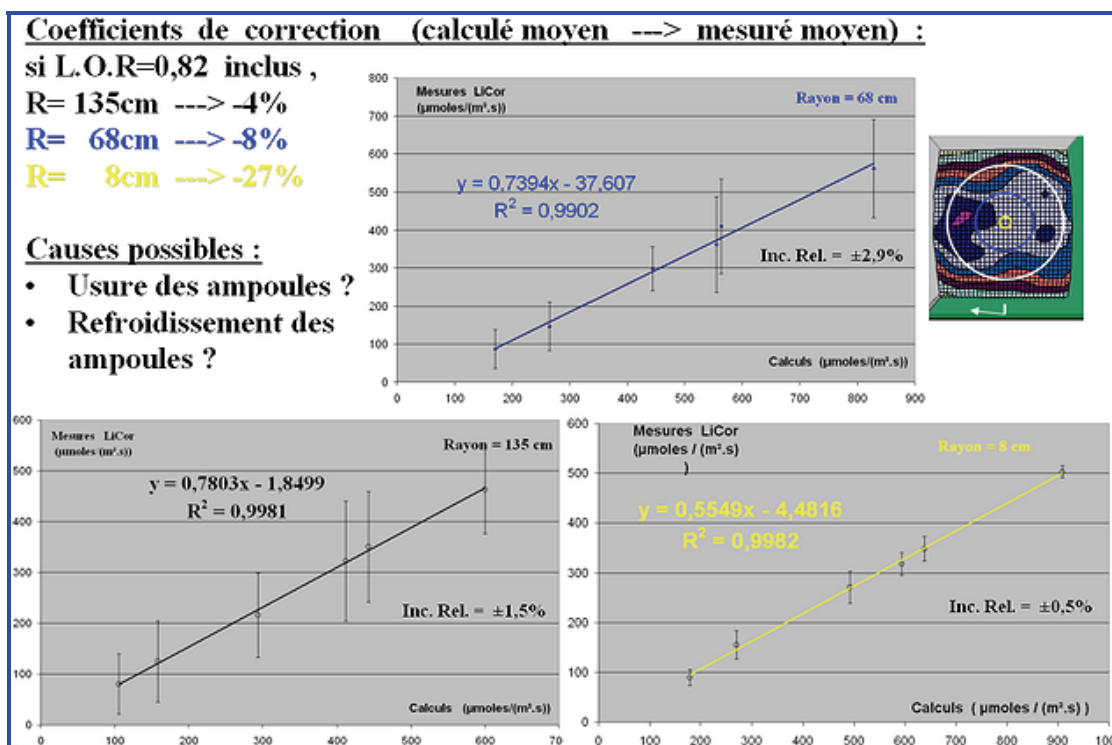


Figure 48 : corrélations entre les profils d'éclairage calculés et mesurés (chambre de culture A, hauteur sous les lampes = 1,60 m, 6 consignes d'éclairage et sur 3 cercles du plateau rotatif)

4. 5 Prototypage de la serre

Une application de prototypage de la serre a été développée sous application Excel. Elle permet de fixer différentes consignes d'éclairage (de 0 à 100% des 35 lampes SON-T allumées). L'outil est en développement, et assimile les projecteurs de la serre identique au modèle SNF-K300 SON-T, et n'inclut pas encore les pertes d'absorption des vitres (LOR = 18 % du projecteur).

La **figure 49** résume les distributions spatiales de l'éclairage énergétique PAR reçu, pour une distance entre les lampes et le capteur, fixée égale à environ 2 m. Les différentes aires de la surface du graphique représentent 10 % de variation relative en éclairage.

Le prototypage, indique des valeurs maximum d'éclairage énergétique égales à 303 $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$. La valeur corrigée, par l'adsorption LOR, devient égale à 250 $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$.

Une recommandation de la disposition des projecteurs, tournés d'un angle de 90°, sera faite pour améliorer l'homogénéité de la distribution de l'éclairage, parallèle aux bacs de culture.

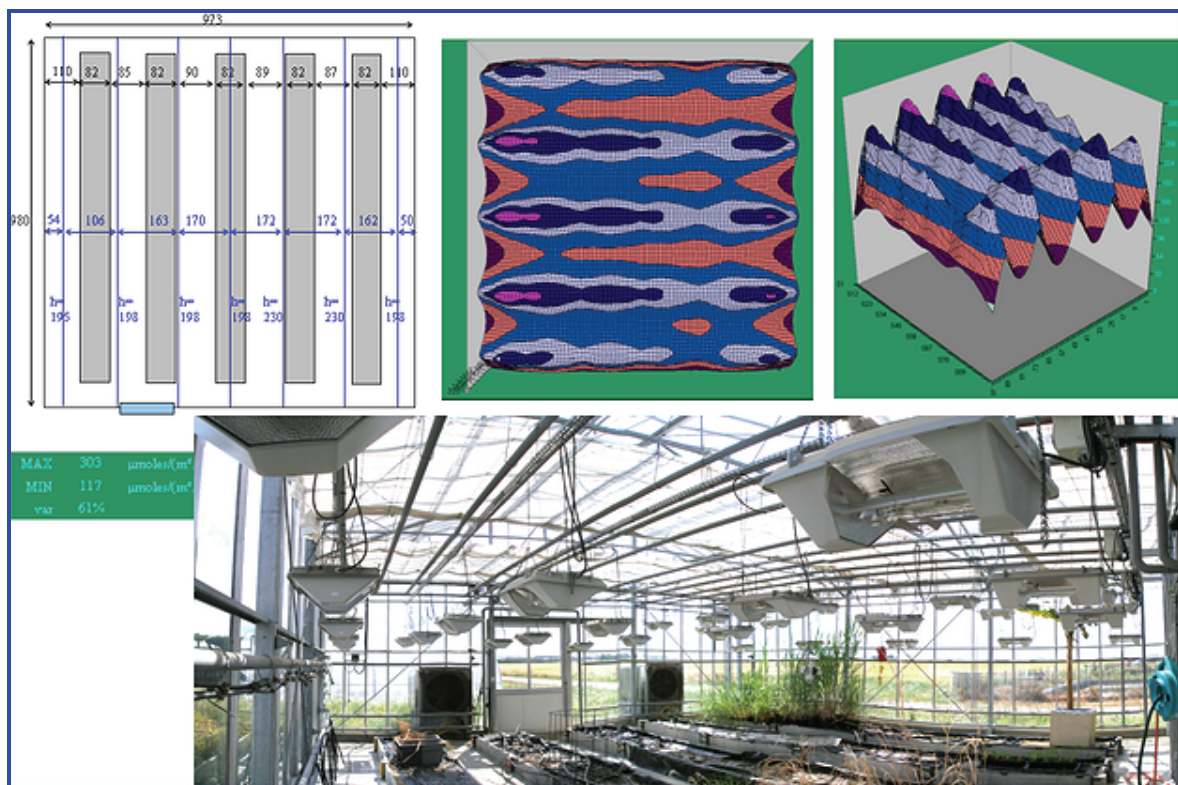


Figure 49 : distributions de l'éclairage énergétique PAR (en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2.\text{s})$) dans la serre (prototypage)

Conclusion

Les essais ont montré une corrélation entre les valeurs calculées par les outils de prototypage et les mesures réalisées *in situ*. La prise en compte de la spécificité de source étendue pour les tubes fluorescents, du paramétrage de l'angle solide pour les projecteurs des lampes à décharges permettent d'adapter l'outil à de nombreuses configurations expérimentales. Les

conversions d'unités de l'éclairage énergétique intégrant les spectres des différentes sources lumineuses contribuent également à faire diminuer les incertitudes de calcul de l'éclairage. Les coefficients de réflexion des parois et les coefficients d'absorption des vitrages seront intégrés aux futurs développements de l'application. Des études portant sur l'effet de la température et du vieillissement des lampes sur leur rendement lumineux seront incluses si possible afin d'affiner les résultats.

Remerciements : *Nous remercions les techniciens, ingénieurs et chercheurs de l'unité qui ont contribué, aux travers de nos échanges avec eux, à soulever de nombreuses questions et besoins et nous ont aidés à y répondre. Nos remerciements s'adressent également à Michael Chelle et à Alain Fortineau (INRA Environnement et Grandes Cultures - Grignon) pour leur disponibilité et leurs réponses à nos questions. Les auteurs souhaitent également remercier les équipes organisatrices des Ecoles Techniques INRA : capteurs d'éclairage (Avignon – octobre 2007) et éclairages artificiels en milieux confinés (Lusignan – Mai 2009) pour leur aide. Remerciements aux sociétés Saint-Gobain et Compagnie des Équipements Frigorifiques pour leur collaboration.*

Bibliographie

Farineau J., Morot-Gaudry J-F. (2006) La photosynthèse, Ed. INRA, p.175, ISBN 2-7380-1209-4 http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photométrie/Grandeurs_lumineuses_et_unités_photométriques. (consulté en juillet 2009)

Licor LI-190SEB (1980) Photosynthetic Irradiance (PI) Sensor, Instruction manual, publication n 8010-09, octobre 1980 http://envsupport.licor.com/docs/LI-190SEB_Manual.pdf (consulté en juillet 2009)

Annexes p.40

Index des abréviations

$E_c E$,	éclairage énergétique PAR (λ variant de 400 à 700nm) reçu en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
EP,	éclairage photométrique reçu en lux.
(EES_λ/EP) ,	ratio entre l'exitance énergétique spectrale rapportée au flux émis, fourni par le fabricant, en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{lumen})$
EES_λ ,	exitance énergétique spectrale à la longueur d'onde λ , en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$.
E_λ ,	énergie du rayonnement monochromatique en Joules.
K_1 ,	valeur de l'éclairage énergétique PAR en $\mu\text{moles}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, correspondant à $1 \text{ W}/\text{m}^2$
K_2 ,	valeur de l'éclairage énergétique photopique en lux, correspondante à $1 \mu\text{mole}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
V_λ ,	coefficient d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique diurne, à la longueur d'onde λ (figure 14).
A,	densité d'intensité lumineuse, répartie linéairement de façon homogène, en Cd/m .
I,	intensité lumineuse totale de la source étendue, en Cd.
t,	distance entre un point de la source étendue et l'origine du plan contenant la source étendue, en mètres.
α ,	angle entre le flux et la normale à la surface du capteur en radians.
r,	distance séparant l'émetteur du récepteur en mètres.
Φ ,	flux lumineux émis par l'émetteur en lumens.
z,	hauteur du plan contenant la source étendue, en mètres ($z_{\text{capteur}}=0$).
$\Omega_{\text{ém.}}$,	angle solide de l'émetteur en stéradians.
LT,	longueur de la source étendue (longueur du tube) en mètres.
Δx_1 ,	x_1-x en mètres.
Δx_2 ,	x_2-x en mètres.
Δy_1 ,	y_1-y en mètres.
Δy_2 ,	y_2-y en mètres.
x_1 ,	abscisse de l'extrémité t_1 de la source étendue en mètres.
x_2 ,	abscisse de l'extrémité t_2 de la source étendue en mètres.
y_1 ,	ordonnée de l'extrémité t_1 de la source étendue en mètres.
y_2 ,	ordonnée de l'extrémité t_2 de la source étendue en mètres.
x,	abscisse du capteur en mètres.
y,	ordonnée du capteur en mètres.
λ ,	longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique en mètres.
\mathcal{N} ,	$6,022\ 141\ 79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (constante d'Avogadro).
h,	$6,626\ 075\ 5 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ (constante de Planck).
c,	$299\ 792\ 458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (vitesse de la lumière dans le vide).
c_λ ,	coefficient de réponse spectrale du capteur, à une longueur d'onde λ (sans unité)
f_λ ,	coefficient d'absorption spectrale du filtre, à une longueur d'onde λ (sans unité)