

Caract.xls

Un outil pour estimer les caractéristiques spectrales du rayonnement lumineux actif sur la croissance et le développement des plantes

Christophe de Berranger¹, Angélique Christophe², Hélène Gautier³, Claude Varlet-Grancher¹

Résumé

Cette feuille de calcul a été développée dans le cadre d'expérimentations relatives aux échanges radiatifs et au fonctionnement des plantes en peuplement. Le but de ces recherches est plus particulièrement de déterminer et quantifier les effets de la lumière sur la morphogenèse des plantes en conditions naturelles ou contrôlées.

Il s'agit d'un outil de calcul rapide des caractéristiques spectrales du rayonnement les plus importantes pour le fonctionnement des plantes. Ces calculs sont effectués à partir de mesures acquises avec un spectroradiomètre. Cet appareil permet de mesurer la distribution de l'énergie lumineuse en fonction de la longueur d'onde (spectre de rayonnement lumineux).

Mots-clés

Composition spectrale de la lumière, Rayonnement utile à la photosynthèse (PAR), Efficience photosynthétique (Y), Rayonnement morphogénétiquement actif (UVA-Bleu, Rouge Clair – Rouge Sombre)

Introduction

La lumière est indispensable au développement de tous les végétaux chlorophylliens. Les mécanismes photosynthétiques permettent aux plantes de convertir l'énergie radiative (solaire ou artificielle) en énergie potentielle chimique pour produire leur matière organique. Cette conversion ne peut se faire que dans une gamme spectrale qui correspond aux radiations visibles (entre 400 et 700 nm) et qui est qualifiée de rayonnement utile pour la photosynthèse (PAR : Photosynthetically Active Radiation). Le terme général de "lumière" désigne théoriquement le rayonnement visible.

En conditions naturelles, les végétaux sont soumis à des variations très importantes d'éclairement (niveau, direction, durée, composition spectrale) aussi bien au cours de la journée que de l'année et en fonction de leur situation géographique (latitude, altitude, ...). De plus les plantes possèdent des systèmes de perception des caractéristiques du rayonnement qui leur permettent de moduler leur croissance et leur développement en fonction des conditions radiatives. Les principaux mécanismes contrôlés par la lumière sont la germination, le dé-étiolement, le photopériodisme, le phototropisme et la photomorphogenèse.

¹ INRA Unité d'Ecophysiologie des Plantes Fourragères, Route de Saintes 86600 LUSIGNAN.

² UMR INRA / ENSAM : Ecophysiologie des Plantes sous Stress environnementaux, 2 place Viala 34060 MONTPELLIER Cedex 1.

³ INRA Unité de recherche Plantes et Systèmes de Culture Horticoles, Domaine Saint-Paul - Site Agroparc 84914 AVIGNON Cedex 9.

Tous ces mécanismes dépendent de la composition spectrale du rayonnement incident et plus particulièrement de la perception de certaines longueurs d'onde par l'intermédiaire de photorécepteurs (cinq familles actuellement identifiées). L'énergie mise en jeu dans la photoperception est très faible. Elle agit comme un signal lumineux qui déclenche des modifications du fonctionnement de la plante et non comme une source d'énergie (processus photosynthétiques).

Le rayonnement solaire s'étend de 300 à 3000 nm et recouvre les radiations ultraviolettes (UV-A, UV-B et UV-C < 400 nm), le rayonnement visible et les rayonnements infrarouges (proche PIR et moyen MIR > 700 nm). Les principales radiations qui sont actives sur le fonctionnement des plantes, indépendamment de la photosynthèse, correspondent essentiellement aux domaines des UV-B (de 280 à 320 nm), du Bleu associé aux UV-A, (UVA-BL, de 320 à 500 nm) du Rouge Clair (RC, autour de 660 nm) et du Rouge Sombre (RS, autour de 730 nm). Les radiations UVA-BL, RC, RS sont responsables de nombreuses réponses morphogénétiques et architecturales des plantes (photomorphogenèse) (Varlet-Grancher C. et Gautier H., 1995). Les modifications de flux de photons dans ces domaines sont essentiellement perçues par deux grandes familles de photorécepteurs: les phytochromes pour le Rouge Clair RC, le Rouge Sombre RS et plus particulièrement le rapport RC/RS, et les cryptochromes pour le domaine UVA-BL.

Nous proposons une feuille de calcul sous Excel permettant de caractériser l'activité biologique potentielle du rayonnement par rapport à la photosynthèse et à la photomorphogenèse, c'est à dire dans la gamme 320 – 800 nm.

1. Rappel sur la caractérisation du rayonnement actif sur la photosynthèse et la morphogenèse des plantes

Très peu de spectroradiomètres utilisables en conditions naturelles peuvent analyser l'ensemble du spectre du rayonnement solaire global et leur domaine est généralement limité dans une gamme 300 – 1100 nm. Les éclairagements énergétiques qui peuvent être obtenus à partir de ces instruments n'ont donc qu'une valeur indicative. Les mesures effectuées pour les radiations inférieures à 350 nm sont souvent peu précises avec les instruments les plus courants.

1.1. Le rayonnement utile à la photosynthèse

1.1.a. Le rayonnement photosynthétiquement actif : PAR

Seule la partie visible du spectre solaire peut être absorbée par les feuilles et convertie en énergie potentielle chimique comme le montre un exemple de propriétés optiques d'une feuille de trèfle blanc (figure 1). Cependant l'efficacité des mécanismes photosynthétiques n'est pas égale pour toutes les radiations du visible. Elle est plus faible dans le bleu et maximale pour la lumière rouge. La figure 2 montre les spectres d'action de la photosynthèse lorsque l'éclairage est exprimé en énergie (éclairage énergétique) ou en photons (éclairage photonique) d'après les travaux de McCree (1972). Ces résultats et d'autres par la suite montrent que l'intensité de la photosynthèse se situe essentiellement dans la gamme 400-700 nm et qu'elle est plus proportionnelle à la quantité de photons qu'à la quantité d'énergie reçue par la feuille. Depuis ce travail et sur la proposition de McCree, le rayonnement utile à

la photosynthèse est caractérisé par le nombre de photons de la gamme 400-700 nm reçus par unité de surface réceptrice et de temps.

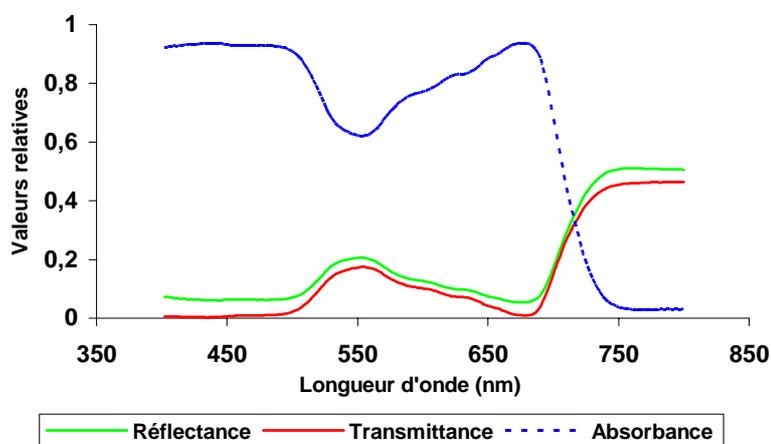


Figure 1 : *Propriétés optiques d'une feuille de trèfle blanc.*

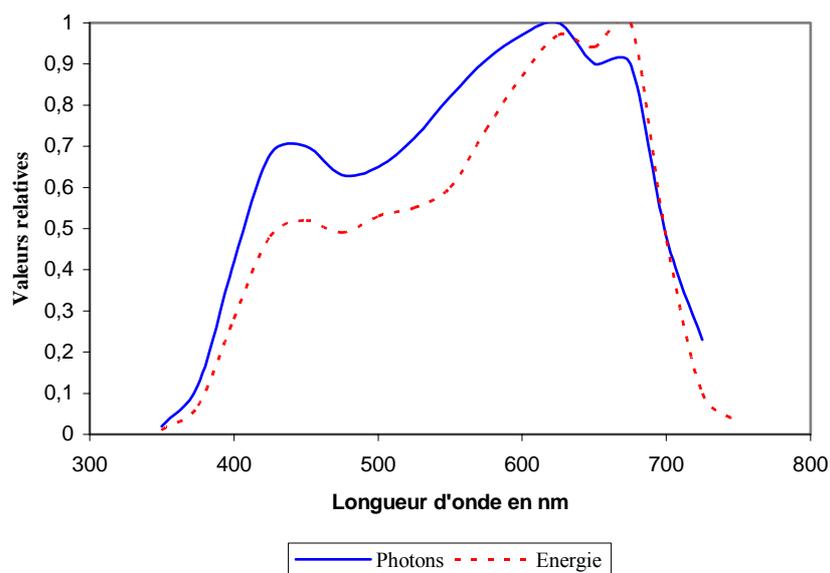


Figure 2 : *Spectres d'action de la photosynthèse exprimés en énergie et en photons (d'après Mc Cree, 1972).*

A partir d'un spectre, le PAR est calculé par l'intégrale du nombre de photons N_λ (ou éclairement photonique) de chaque radiation (de longueur d'onde λ) entre 400 et 700 nm.

$$PAR = \int_{400}^{700} N_\lambda \cdot d\lambda$$

Le nombre de photons pouvant être très important, le PAR est exprimé en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Si l'étalonnage du spectroradiomètre est donné en éclairage énergétique la conversion en photons sera obtenue par la relation entre l'énergie d'un quantum et la fréquence de la radiation (cf. paragraphe 2.2).

Il faut souligner que cette définition implique deux simplifications : 1- la restriction du PAR au domaine 400-700 nm alors que l'activité photosynthétique peut ne pas être nulle en dehors de ces limites et surtout 2- que toutes les radiations dans cette gamme ont la même efficacité photosynthétique. C'est donc à partir de cette définition et avec ces limitations que les quantummètres ont été développés comme instruments de mesure du PAR.

Lorsqu'on utilise des sources de rayonnements avec des compositions spectrales très variées (lampes diverses, utilisation de filtres, ...), les mesures de PAR au quantummètre peuvent être faussées (comparaison d'une source très riche en bleu avec une source très riche en rouge par exemple). Dans ce cas il est préférable de tenir compte d'un spectre d'action moyen de la photosynthèse et de caractériser une efficacité photosynthétique potentielle Y du rayonnement reçu.

1.1.b. "Efficacité" photosynthétique potentielle Y

Ce paramètre a été recommandé d'abord par Sager *et al.* (1988) et consiste à "corriger" la densité de flux de photons de chaque radiation N_λ par le rendement quantique relatif ϕ_λ (normé à 1 pour la valeur maximale, cf. figure 2) obtenu par:

$$Y = \int_{300}^{780} N_\lambda \cdot \phi_\lambda \cdot d\lambda .$$

λ = longueur d'onde (nm)

N_λ = densité de flux de photons de longueur d'onde λ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)

ϕ_λ = rendement quantique relatif

On étend l'intégration au domaine 300-780 nm pour tenir compte aussi de l'activité photosynthétique au-delà des bornes utilisées pour définir le PAR.

1.2. Rayonnement actif sur la morphogénèse

Les phytochromes et les cryptochromes sont les deux plus grandes familles de photorécepteurs des signaux lumineux actuellement identifiées et responsables de très nombreuses réponses morphogénétiques dont celles liées à l'évitement de l'ombrage observées chez beaucoup d'espèces. Ces photorécepteurs sont des holoprotéines associant une apoprotéine et un chromophore. Ce dernier est responsable des propriétés optiques c'est-à-dire du domaine spectral perçu par le photorécepteur et est considéré comme identique pour tous les membres de la famille considérée.

Pour caractériser le rayonnement par rapport à son action potentielle sur la morphogénèse des plantes il faut donc tenir compte des spectres d'action des réponses photomorphogénétiques ou des spectres d'absorption des photorécepteurs.

1.2.a. Le système phytochrome

Les phytochromes présentent deux formes interconvertibles (Pr et Pfr) correspondant à des isoméries géométriques sur le chromophore. Elles sont caractérisées par des spectres d'absorption différents qui se chevauchent (figure 3). La forme Pr présente un maximum d'absorption autour de 660 nm (RC) alors que la forme Pfr a son maximum autour de 730 nm (RS). Il existe un pic commun aux deux formes à 280 nm (dans l'UV) et aussi deux autres pics différenciés, mais de moindre importance, dans le bleu; à 380 nm pour le Pr et à 410 nm pour le Pfr. Ainsi pour tout éclairage dans la gamme 300 – 800 nm, la composition spectrale du rayonnement va déterminer un état d'équilibre du photorécepteur entre ses deux isomères.

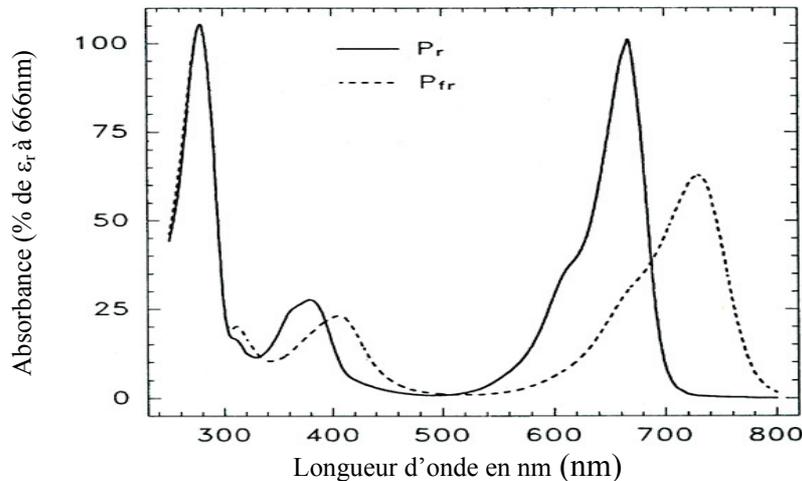


Figure 3 : Spectres d'absorption relatifs des formes Pr et Pfr (d'après Mancinelli, 1994) basés sur les valeurs moyennes de coefficients d'extinction molaire de phytochrome purifié à partir de plantules étiolées d'avoine et de seigle.

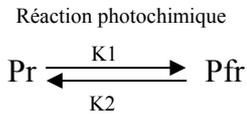
La forme active sur la morphogénèse des plantes est le Pfr et son action est fonction de sa concentration relative caractérisée par le photoéquilibre (symbolisé par φ).

$$\varphi = \frac{[Pfr]}{[Pfr] + [Pr]}$$

La détermination expérimentale (dosage de Pr et Pfr) du photoéquilibre est très difficile. On calcule un photoéquilibre φ_c à partir de la composition spectrale du rayonnement entre 300 et 800 nm, des spectres d'absorption et des caractéristiques photochimiques des formes Pr et Pfr de phytochromes extraits de plantes étiolées (donc du phytochrome A). L'extension de cette procédure à tous les phytochromes est basée sur l'hypothèse que le chromophore est identique.

Le calcul de φ_c est basé sur un modèle simplifié du fonctionnement du système phytochrome et sur des vitesses de photo conversion K1 et K2.

Equilibre phytochromique



$$\text{Photoéquilibre : } \varphi_c = \frac{K1}{K1 + K2}, V = K1 + K2$$

K1 : constante de réaction de la transformation de Pr en Pfr

K2 : constante de réaction de la transformation de Pfr en Pr

V : vitesse d'inter-conversion

Ces vitesses de photoconversion sont le produit à chaque longueur d'onde du flux de photons incidents (N_λ) et de la probabilité σ qu'un photon induise une photo réaction de Pr (σ_r) et de Pfr (σ_{fr}) :

$$K1 = \int_{300}^{800} N_\lambda \cdot \sigma_{r,\lambda} \cdot d\lambda \quad \text{et} \quad K2 = \int_{300}^{800} N_\lambda \cdot \sigma_{fr,\lambda} \cdot d\lambda$$

σ est déterminé par le produit entre le coefficient d'absorption de la molécule (ϵ) et le rendement quantique de la réaction quantique de la photoconversion (Φ) : $\sigma = \epsilon \cdot \Phi$. Les valeurs de σ_r et σ_{fr} ont été calculées pour chaque longueur d'onde tous les 2nm par Sager *et al.* (1988).

$$\varphi_c = \frac{K1}{K1 + K2} = \frac{\int_{300}^{800} N_\lambda \cdot \sigma_{r,\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{300}^{800} N_\lambda \cdot \sigma_{r,\lambda} \cdot d\lambda + \int_{300}^{800} N_\lambda \cdot \sigma_{fr,\lambda} \cdot d\lambda}$$

Toute longueur d'onde dans la gamme 300-800 détermine un photoéquilibre. Le φ_c est d'environ 0.80 dans le RC, 0.03 dans le RS et 0.40 dans le bleu. En raison de l'activation du phytochrome par les radiations UVA-BL, une réponse induite par les radiations UVA-BL peut être liée soit au phytochrome, soit aux photorécepteurs spécifiques de ces radiations.

Depuis les travaux de Smith et Holmes (1977), l'état du phytochrome est aussi souvent caractérisé par un autre paramètre appelé Zéta (ζ). Ce paramètre correspond au rapport entre les flux de photons dans le Rouge Clair et dans le Rouge Sombre (rapport RC/RS).

Mais ce paramètre est simplifié puisqu'il ne prend en compte que les régions maximales du spectre d'absorption du phytochrome.

$$\zeta = \frac{\text{densité de flux de photons entre 655 et 665 nm}}{\text{densité de flux de photons entre 725 et 735 nm}} = \frac{\int_{655}^{665} N_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{725}^{735} N_{\lambda} \cdot d\lambda}$$

A partir de ζ et de la relation établie par Smith et Holmes on peut estimer φ_c . Cependant il faut bien se rappeler que cette procédure est simplifiée et peut conduire à des estimations erronées de φ_c selon la composition spectrale du rayonnement incident.

Les plantes sont aussi capables de percevoir les modifications du spectre dans la région UVA-BL (320-520 nm). Les photorécepteurs impliqués dans cette perception sont appelés cryptochromes (Gressel, 1977).

1.2.b. Système cryptochrome : Les principaux photorécepteurs impliqués dans les réponses morphogénétiques régulées par le bleu appartiennent à la famille des cryptochromes. Cependant les propriétés optiques des autres photorécepteurs semblent peu différentes.

La nature flavoprotéique de ces photorécepteurs n'a été complètement élucidée que très récemment (Ahmad *et al.*, 2002). Les propriétés optiques du chromophore peuvent être assimilées à celle de la flavine (figure 4) même si d'autres molécules (ptéridines) peuvent être également impliquées. Les cryptochromes agissent comme des compteurs de photons dans la gamme 320-520 nm. Négligeant l'effet des pics d'activité relativement peu prononcés des photorécepteurs dans cette gamme, le rayonnement actif BL est caractérisé par l'éclairement photonique (ou densité de flux de photons) dans une bande spectrale dont les limites ne sont pas normalisées mais comprises dans le domaine d'activité 320-520nm.

A la suite de différents auteurs et en fonction de la sensibilité des spectroradiomètres utilisés nous avons retenu la gamme 350-500 nm et la formule suivante :

$$BL = \int_{350}^{500} N_{\lambda} \cdot d\lambda$$

BL est exprimé en $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

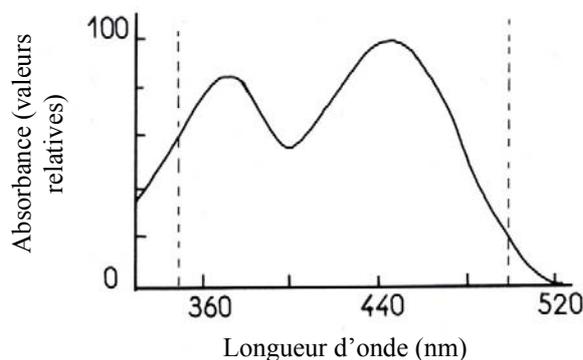


Figure 4 : Spectre d'absorption de la flavine (d'après Mohr et Shropshire, 1983). L'absorption dépend de la longueur d'onde dans l'UVA-BL (320-520nm) avec un pic d'absorption autour de 370 nm et un autour de 450 nm.

2. Mode opératoire

Ce classeur Excel, qui comprend 9 feuilles et 15 macros, a été développé pour effectuer des calculs d'intégration de certaines longueur d'onde et calculer des paramètres comme le Zeta (ζ) ou le Phi_c (ϕ_c) à partir de mesure spectrale en énergie, comprises entre 300 et 1100 nm. Le pas de mesure du fichier d'entrée peut être indifféremment de 1 nm, 5 nm ou 10 nm (pour 10 nm, les spectres doivent commencer par une valeur multiple de 10).

La gamme maximale de mesures est comprises entre 300 et 1100 nm mais il est possible d'utiliser des spectres avec des bornes inférieures (ex : 350-900 nm) qui seront automatiquement reconnus.

Il est également possible, de regrouper dans un tableau, des informations concernant la mesure (ex : date, heure, etc,...).

Pour les mesures effectuées à l'extérieur on peut également avoir la hauteur de soleil si l'on saisi la date et l'heure, la latitude et la longitude.

Les fichiers spectre d'entrée peuvent être acquis par différents types de spectroradiomètres à partir du moment où le fichier est de type 2 colonnes sans en-tête :

- la première colonne indique la longueur d'onde (nm)
- la deuxième colonne indique la valeur en énergie ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)

La macro reconnaît les extensions de type .TXT, .PRN, .WK1, 2, 3, 4, .XLS.

2.1. Description des calculs de la feuille

Les calculs des intégrales sont basés sur la méthode du point milieu (figure 5). Elle consiste à approcher une intégrale donnée par la somme des aires des rectangles centrés sur chacune des longueurs d'onde du spectre. La base de chacun des rectangles correspond au pas de longueur d'onde ($\Delta\lambda$) et sa hauteur est égale à la valeur de l'énergie mesurée. Les aires des rectangles extrêmes sont calculées sur un demi intervalle.

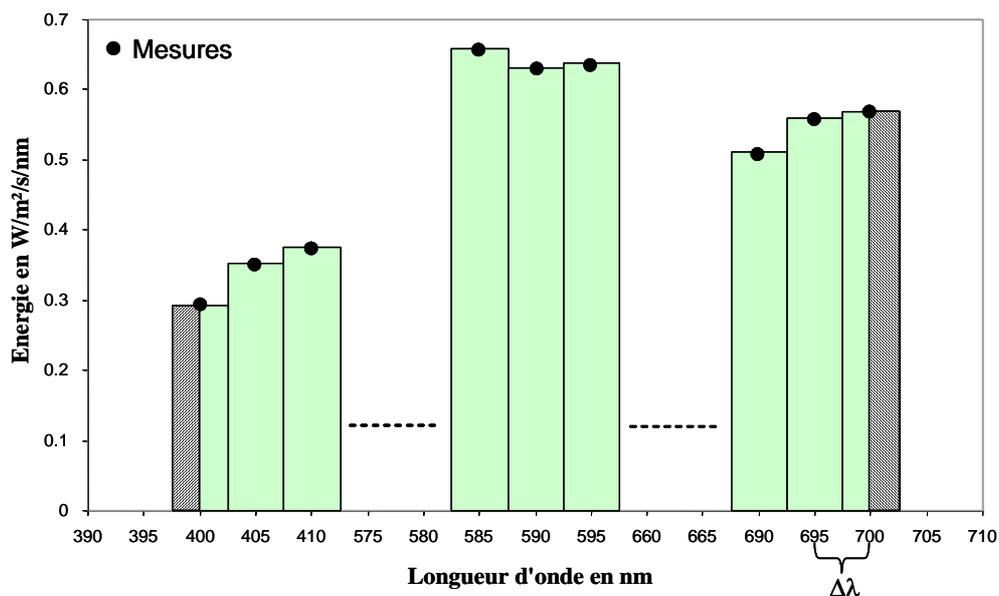


Figure 5 : Représentation schématique de la méthode de calcul des intégrales.

Les valeurs instantanées par longueur d'onde sont calculées dans la colonne C par la formule :

$$\text{Flux de photons } C9 = B9 * A9 * 0.001 / 0.119618112$$

Dans le tableau de résultats, l'intégration du Flux de photons entre 400-700 nm est :

pour 5nm
$$\text{Flux de photons} = 5 * (\text{SOMME}(C28:C88) - C28/2 - C88/2)$$

	A	B	C	D	E		I
1						SOURCE :	Soleil
2	300					Energie	
3				m ² /mol	m ² /mol	300-1100 nm	336.02 (W/m ²)
4	Longueur	Energie	Flux de photons	Photochemical	Photochemical		EFFICIENCE
5	d'onde	(W/m ² /nm)	(μmol/m ² /s)	cross section	cross section	Flux de photons	
6	en nm			R	FR	400-700 nm	832.97 μmol/m ² /s
7							Moyen (Sager 1982)
8	300	0		2233	920		0
9	305	0.002515	0.006412246	1577.5	677	Efficience YPF	0
10	310	0.01026	0.026587739	1294	610	(yield photon flux)	0
11	315	0.02315	0.060958448	1078	550.5		0.000609584
12	320	0.03818	0.102131157	893	468	BLEU :	0.001021312
						(350-500)	226.55 μmol/m ² /s
						PHI =	0.72 Hz/Hz
						ZETA =	1.12 μmol/μmol
						655-665/725-735	

2.4. Efficience YPF

L'efficience YPF est exprimée en μmol.m⁻².s⁻¹ et calculée à partir du flux de photons et des valeurs du spectre d'action de la photosynthèse pour chaque longueur d'onde.

Les valeurs instantanées par longueur d'onde sont calculées dans la colonne I par la formule :

$$\text{Efficience } I11 = H11 * C11$$

Dans le tableau de résultats, l'intégration de l'Efficience entre 300-780 nm est :

pour 5nm
$$\text{Efficience} = 5 * (\text{SOMME}(I8:I104) - I8/2 - I104/2)$$

	A	B	C	D	E	G	H	I
1						SOURCE :	Soleil	
2	300					Energie		
3				m ² /mol	m ² /mol	300-1100 nm	336.02 (W/m ²)	
4	Longueur	Energie	Flux de photons	Photochemical	Photochemical	Flux de photons	ERGIE SPECTRE ACTION	EFFICIENCE
5	d'onde	(W/m ² /nm)	(μmol/m ² /s)	cross section	cross section	400-700 nm	300-1100 nm	PHOTOSYNTHESE
6	en nm			R	FR		na FR	Moyen (Sager 1982)
7								Moyen (Sager 1982)
8	300	0	0	2233	920	832.97 μmol/m ² /s	0	0
9	305	0.002515	0.006412246	1577.5	677		0	0
10	310	0.01026	0.026587739	1294	610	Efficience YPF	0	0
11	315	0.02315	0.060958448	1078	550.5	(yield photon flux)	748.93 μmol / m ² / s	0.000609584
12	320	0.03818	0.102131157	893	468		576254	0.001021312
						BLEU :		
						(350-500)	226.55 μmol/m ² /s	
						PHI =	0.72 Hz/Hz	
						ZETA =	1.12 μmol/μmol	
						655-665/725-735		

2.5. Bleu

Le Bleu est l'intégration entre 350 et 500nm du Flux de photons et exprimé en $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Dans le tableau de résultats, l'intégration du Bleu entre 350-500 nm est :

pour 5nm
$$\text{Bleu} = 5 * (\text{SOMME}(\text{C18:C48}) - \text{C18}/2 - \text{C48}/2)$$



SOURCE :	Soleil	
Energie 300-1100 nm	336.02	(W/m²)
Flux de photons 400-700 nm	832.97	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Efficience YPF (yield photon flux)	748.93	$\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{s}$
BLEU : (350-500)	226.55	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
PHI =	0.72	Hz/Hz
ZETA = 655-665/725-735	1.12	$\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$

2.6. Phi_c

Le Phi_c est le photoéquilibre de la concentration du phytochrome entre sa forme Pfr et Pr exprimé en Hz/Hz.

$$\text{Phi}_c (\varphi_c) = \frac{(\text{SOMME}(\text{F8:F108}) - \text{F8}/2 - \text{F108}/2)}{((\text{SOMME}(\text{F8:F108}) - \text{F8}/2 - \text{F108}/2) + (\text{SOMME}(\text{G8:G108}) - \text{G8}/2 - \text{G108}/2))}$$



SOURCE :	Soleil	
Energie 300-1100 nm	336.02	(W/m²)
Flux de photons 400-700 nm	832.97	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Efficience YPF (yield photon flux)	748.93	$\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{s}$
BLEU : (350-500)	226.55	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
PHI =	0.72	Hz/Hz
ZETA = 655-665/725-735	1.12	$\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$

2.7. Zeta

Le Zeta est le rapport de la densité de flux de photons RC (655-665 nm) sur la densité de flux de photons RS (725-735 nm) exprimée en $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$.

$$\text{ZETA } (\zeta) = \frac{\text{SOMME}(C79:C81)-C79/2-C81/2}{\text{SOMME}(C93:C95)-C93/2-C95/2}$$



SOURCE :	Soleil	
Energie 300-1100 nm	336,02	(W/m ²)
Flux de photons 400-700 nm	832,97	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Efficienc YPF (yield photon flux)	748,93	$\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{s}$
BLEU : (350-500)	226,55	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
PHI =	0,72	Hz/Hz
ZETA = 655-665/725-735	1,12	$\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$

3. Présentation

Lorsqu'on lance le fichier CARACT.XLS à partir du gestionnaire de fichiers Windows, le fichier s'ouvre sur une feuille de calcul avec :

- sur la gauche, un tableau des caractéristiques spectrales
- en haut à droite, un tableau d'observations complémentaires à la mesure
- en bas à droite, le graphique représentant le spectre du rayonnement mesuré.

Toutes les données et les calculs sont dans les colonnes A à I de cette même feuille mais ne sont pas visibles à l'ouverture du fichier.

En haut de la feuille, on remarque 5 boutons :

- « Continuer »
- « Quitter »
- « Impression »
- « Enregistrement »
- « Aide »

qui donnent chacun accès sur une macro.

Bouton « Continuer ».

Macro qui efface le champ de données des valeurs d'énergie (colonne B) dans chaque feuille « Spectre » (Spectre1, Spectre5, Spectre10) pour initialiser les calculs puis affiche la boîte de dialogue « Caractérisation ».

Bouton « Quitter »

Macro qui remet à zéro les valeurs du tableau « Observations » ainsi que les valeurs d'énergie dans chaque feuille « Spectre » puis sauvegarde le fichier avant de le fermer.

Bouton « Impression »

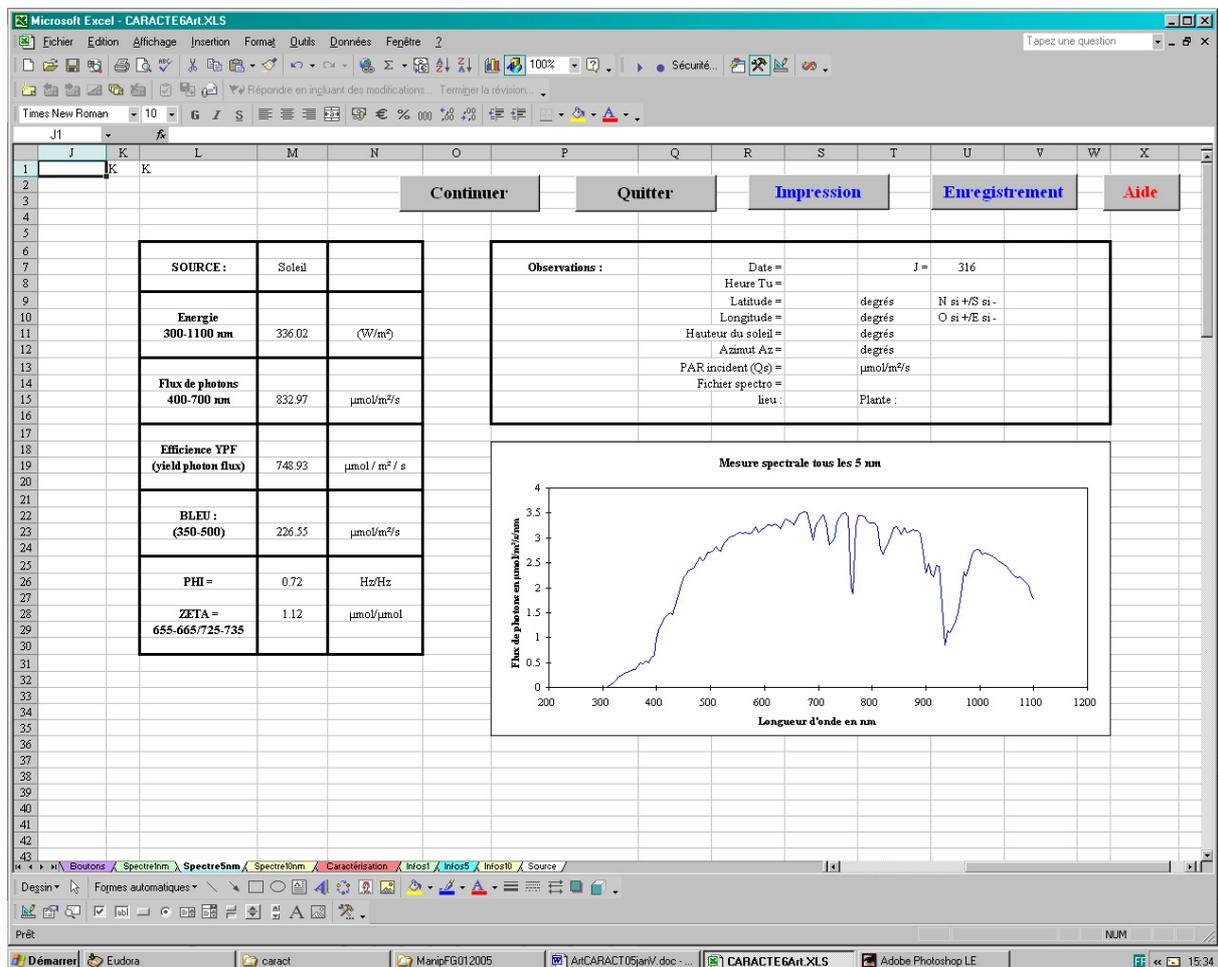
Macro qui permet d'imprimer les tableaux de résultats.

Bouton « Enregistrement »

Macro qui enregistre les tableaux de résultats dans un fichier de sortie automatiquement nommé (le nom du fichier est le nom du fichier spectre d'entrée précédé d'un K). Seuls les résultats des calculs sont stockés dans ce fichier (pas les données de base).

Bouton « Aide »

Macro qui ouvre une feuille dans laquelle on trouve des informations sur le fonctionnement du classeur.



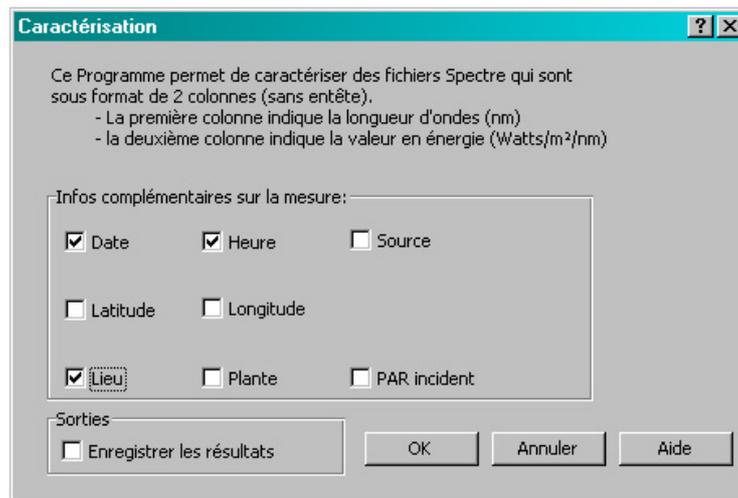
3.1. Fonctionnement :

Cliquer sur le bouton « Continuer ».

Une boîte de dialogue « caractérisation » s'ouvre dans laquelle vous pouvez cocher des cases si vous voulez entrer des informations complémentaires à la mesure.

Pour obtenir des informations sur la hauteur du soleil et l'azimut, il est impératif de cocher les options : date, heure, latitude et longitude. La macro appelle alors un sous programme nommé « Soleil12.xls » (Chartier, 2004) qui calculera automatiquement ces paramètres.

Vous pouvez également choisir d'enregistrer automatiquement les fichiers de sortie.



Le fait de cliquer sur « OK » exécute une macro qui lance la fonction « Ouvrir » d'Excel. La boîte de dialogue « Ouvrir » s'affiche, et vous n'avez plus qu'à sélectionner le fichier spectre d'entrée à caractériser.

Le programme vous demande de saisir les informations (si vous avez coché des options) dans le format proposé puis charge le fichier spectre.

Le fichier d'entrée est copié dans la feuille « Source ».

Dans cette feuille, on calcule le pas de mesure du spectre d'entrée en D1 et on copie la première valeur du spectre en E1.

Ces deux valeurs serviront à choisir la feuille de calcul adéquate et à positionner les mesures au bon endroit (ex : si le pas de mesure est 5 nm et la première valeur 350 nm, les valeurs d'énergie du fichier d'entrée seront copiées dans la feuille « Spectre5nm », colonne B en face de la longueur d'onde correspondante soit 350 nm).

Une fois les valeurs d'énergie collées dans la feuille de calcul « Spectre5nm », les calculs d'intégration s'effectuent tout seul car les formules sont écrites dans le tableau de résultats.

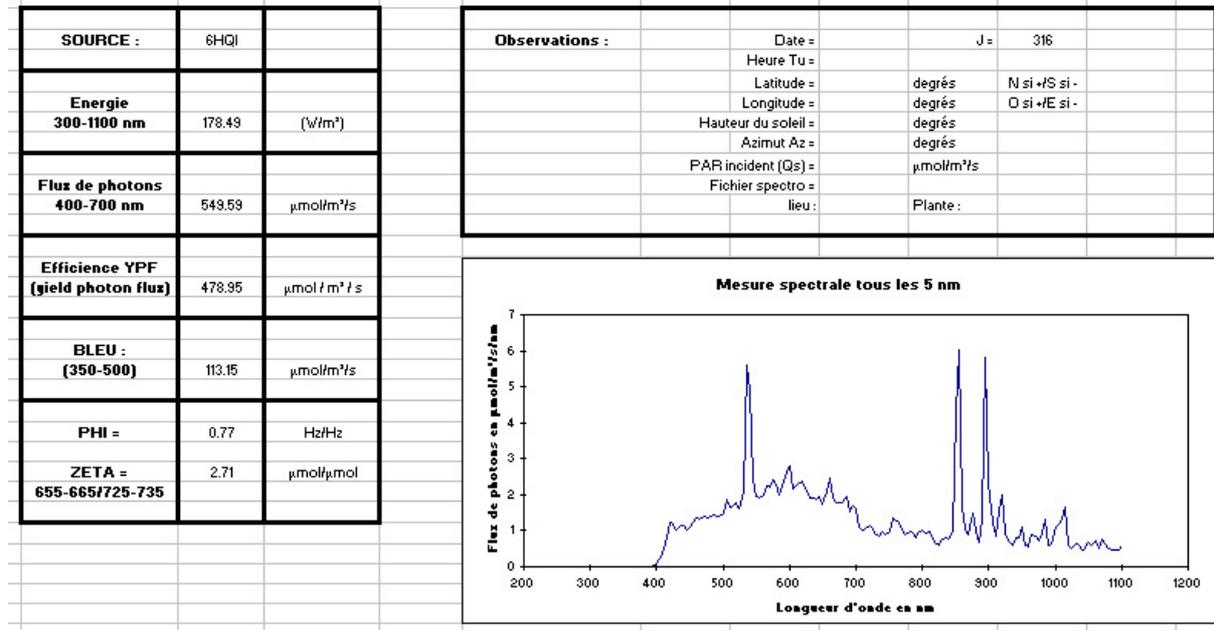
Les informations entrées dans les boîtes de dialogues précédentes sont également recopiées dans le tableau « Observations ».

La représentation graphique du spectre est exprimée en flux de photons à partir des valeurs calculées en colonne C.

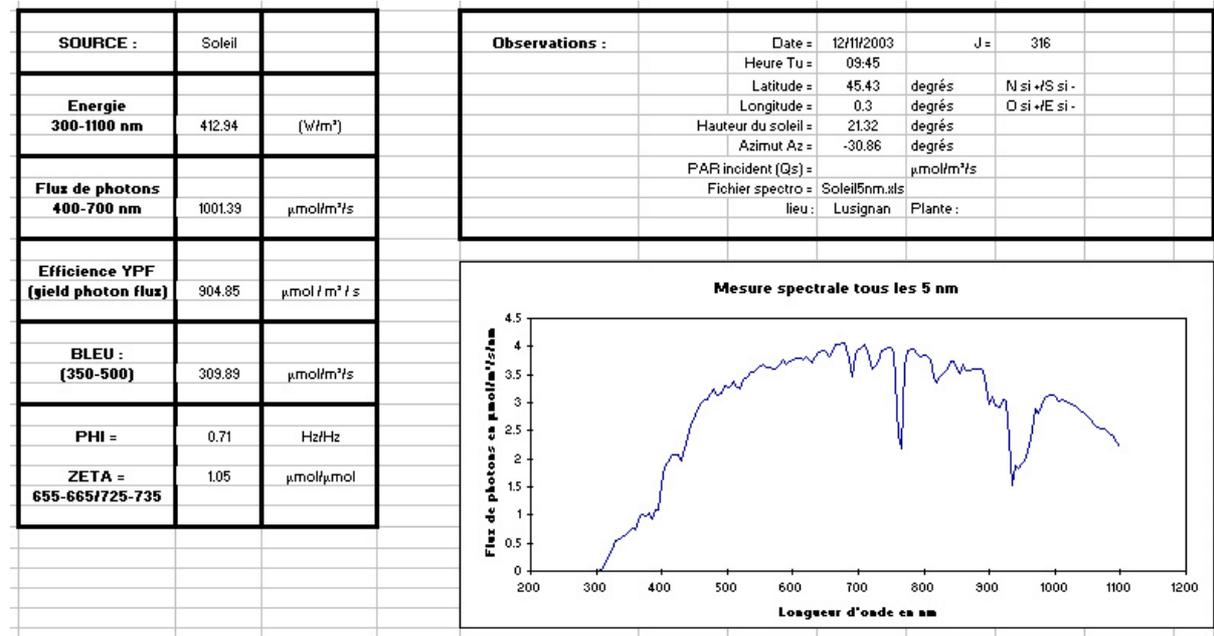
Si l'option « Enregistrer les résultats » a été cochée, les tableaux de résultats sont enregistrés automatiquement sous le répertoire d'origine en conservant le nom du fichier de base précédé d'un K. Le fichier résultat qui est enregistré, comprend uniquement les tableaux sans les données de base.

4. illustrations

Voici quelques résultats d'analyse de spectres.



Résultats d'analyse d'un spectre de plafond de phytotrons avec lampes HQI (iodure métallique)



Résultats d'analyse d'un spectre solaire par ciel clair

Conclusion

On peut envisager d'autres pas de longueur d'onde suivant les mesures effectuées mais les valeurs 1 nm, 5 nm et 10 nm doivent couvrir les besoins des utilisateurs. On peut également rajouter d'autres intégrations pour des besoins spécifiques. Cette feuille est la première partie d'un ensemble de caractérisations spectrales de mesures de rayonnement.

Une autre feuille de calcul, Carfilt.xls, a également été développée sur le même principe pour caractériser le rayonnement transmis par l'association d'une source et d'un filtre afin de simuler différentes conditions radiatives. Elle fera l'objet d'un second article.

Les fichiers des feuilles de calculs sont disponibles auprès de l'auteur.

Remerciements

Remerciements à Luc Lamazière qui a initié ce travail durant son stage de fin d'étude de l'ESIP (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers).

Références

- Ahmad M., Grancher N., Heil M., Black R.C., Giovani B., Galland P., Lardemer D. 2002. Action Spectrum for Cryptochrome-Dependent Hypocotyl Growth Inhibition in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 129(2) : 774-785.
- Chartier M. 2004. Ephémérides. Calcul de la position du soleil, calcul de G0 (rayonnement extra-terrestre), pour tout lieu et pour toute date. *8èmes Journées de la mesure et de la métrologie*, INRA, La Bussière sur-Ouche, 11-14/10/2004, D2, 3 p. (démonstration, résumé).
- Gressel J. 1977. Blue light photoreception. *Photochemistry and Photobiology.* 30 : 749-754.
- Lamazières L. 1993. Contribution à la définition et à la mise en place d'un éclairage permettant d'étudier la photomorphogénèse des plantes en phytotrons stage de fin d'étude. ESIP, Poitiers: 89 p.
- Mancinelli A.L. 1994. The physiology of phytochrome action. In: *Photomorphogenesis in Plants (2nd Edition)*. Kendrick R.E. et Kronenberg G.H.M. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht) pp. 211-269.
- McCree K.J. 1972. The Action Spectrum, Absorptance and Quantum yield of Photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology.* 9 : 191-216.
- Mohr H., Shropshire W. 1983. An Introduction to morphogenesis. In: *Photomorphogenesis. Encyclopedia of plant physiology 16A*. W. Shropshire and H Mohr. Springer-Verlag Berlin pp. 24-28.
- Monteith J.L. 1976. Spectral distribution of light in leaves and folaige. In: *Light and plant development*. H. Smith. Butterworth, London pp. 447-460.
- Sager J.C., Smith W.O., Edwards J.L., Cyr K.L. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Transactions of the ASAE.* 31 6 : 1882-1889.
- Smith H., Holmes M.G. 1977. The function of phytochrome in the natural environment- III Measurement and calculation of phytochrome photoequilibria. *Photochemistry and photobiology.* 25 : 547-550.
- Varlet-Grancher C., Gautier H., 1995. Plant morphogenetical responses to light quality and consequences for intercropping. In "Ecophysiology of tropical intercropping", Sinoquet H. & Cruz P. (Eds), Symposium International sur l'Ecophysologie des Cultures Associées Tropicales, Gosier, Guadeloupe, 06-10 Déc. 93, INRA Editions, Collection "Science Update", Paris, 231-256.