

Qua²Ray : quantité et qualité du rayonnement

Logiciel d'analyse du rayonnement lumineux

Eric Roy¹, Annie Eprinchard¹, Ela Frak¹, Didier Combes¹

Résumé. Qua²Ray est un logiciel d'analyse du rayonnement lumineux à partir d'acquisitions réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre. Il comprend plusieurs fonctions capables d'analyser des spectres en instantané, de calculer des cartographies de rayonnement, ou encore de calculer des propriétés optiques d'échantillons. Toutes ces fonctions sont basées sur le calcul des caractéristiques spectrales essentielles au fonctionnement des plantes. Cet article décrit les matériels utilisés avec Qua²Ray, les différentes fonctions ainsi que plusieurs exemples concrets d'applications.

Mots clés : spectroradiomètre, composition spectrale, flux de photons, source lumineuse, propriétés optiques

Introduction

A l'INRA, l'Unité de Recherche pluridisciplinaire Prairies et plantes fourragères étudie le fonctionnement des plantes fourragères dans les prairies semées. Ces recherches, visent à mieux comprendre et modéliser les effets des facteurs abiotiques et plus particulièrement ceux liés à l'environnement lumineux.

Le rayonnement joue un rôle prépondérant et complexe dans les processus qui déterminent l'architecture et la croissance des plantes en peuplement. Il pilote l'acquisition photosynthétique du carbone (effet trophique) et en même temps, exerce la fonction de signal pouvant déclencher des réactions morphogénétiques (effet photomorphogénétique) spécifiques à plusieurs domaines de longueurs d'onde allant des UV jusqu'au proche infrarouge (Varlet-Grancher et al., 1995). Pour comprendre et analyser les effets du rayonnement, les chercheurs de l'équipe Ecophysiologie qui s'intéressent à la régulation de la croissance et du développement des plantes par la lumière, ont systématiquement besoin d'accéder aux différentes variables du rayonnement que sont : la densité de flux de photons entre 400-700 nm (photosynthetically active radiation : PAR), la densité de photons UVA-Bleu (320- 500 nm), le rapport relatif entre le flux de photons dans la bande spectrale du rouge clair (600-700 nm) et du rouge sombre (700-800 nm), etc. Ces différentes variables sont extraites à partir des mesures de distribution de l'énergie lumineuse (spectres) dans le domaine allant des UV-A, en passant par le visible et jusqu'au proche infrarouge (380-1100 nm) obtenues à l'aide de spectroradiomètres.

Au cours des années 2000, le calcul de ces variables a été formalisé grâce au développement d'une feuille Excel dédiée, appelée «*CARACT.XLS*» (De Berranger et al., 2005) mais elle ne permettait qu'un traitement individuel (un par un) des spectres. De plus, la caractérisation de l'environnement lumineux et de son hétérogénéité, sa manipulation grâce à l'utilisation de différents type de sources ou de filtres de transmission en vue de tester et d'identifier la variable du rayonnement pertinente vis-à-vis d'un processus biologique (exemple : suppression de bleu et allongement foliaire) génèrent beaucoup d'informations spectrales qui doivent toutes être analysées. D'autres feuilles de calculs ont ainsi été développées pour simuler des éclairagements artificiels, pour convertir les données brutes en grandeur physique ou encore pour calculer les propriétés optiques de divers matériaux à partir de spectres de transmission. Or, le développement récent de nouveaux outils de cartographie spatiale et des demandes croissantes des chercheurs de l'Unité et de nombreux collègues de l'INRA à caractériser ou manipuler l'environnement lumineux des plantes nous ont amenés à faire évoluer cet ensemble d'outils en un seul logiciel, Qua²Ray, de façon à automatiser le traitement des spectres et à intégrer les coordonnées des acquisitions.

1. INRA, UR0004 P3F Ecophysiologie, Le chêne RD150 CS80006, F-86600 Lusignan, France ; eric.roy@lusignan.inra.fr

Description du matériel

Mesure de spectre lumineux

Les mesures de spectres sont réalisées par des spectroradiomètres couplés à une fibre optique qui guide le flux lumineux reçu par un récepteur connecté à son embout. La lumière reçue est ainsi décomposée par un réseau optique dans la gamme de longueurs d'ondes spécifiques au spectroradiomètre (de 300 à 1100 nm).

Deux spectroradiomètres ont été utilisés, l'un de marque ASD (modèle FIELDSPEC Pro Dual Range) et le second de marque TriOS GmH (modèle TRIMISPEC). Ils sont équipés d'un récepteur (cosinus) dont l'angle d'ouverture est de 180°. Ce récepteur permet de rendre compte des effets d'angle lors de la mesure de rayonnement : cela signifie que le rayonnement de direction perpendiculaire au récepteur est maximum alors que celui qui vient dans la direction rasante est faible. Le spectroradiomètre ASD est fourni avec un certificat d'étalonnage afin de convertir les données brutes en flux par unité de surface et pour chaque longueur d'onde ($W/m^2/nm$). Le logiciel de pilotage et d'acquisition du spectroradiomètre ASD (RSDual) permet de définir le protocole d'acquisition des spectres de rayonnement et génère des données sous un format binaire. Ces données peuvent être transformées au format ASCII à l'aide d'un second logiciel (ASD ViewSpectro). Ce fichier texte comporte 23 lignes d'entêtes et 751 lignes de données correspondant aux longueurs d'onde de 325 nm à 1075 nm, avec un incrément de 1 nm.

L'étalonnage du spectroradiomètre TriOS a été effectué en interne par comparaison avec le spectroradiomètre ASD. Nous avons développé une feuille de calcul Excel pour calculer les coefficients d'étalonnage qui permettent de convertir les données brutes en grandeur physique identique à celle de l'ASD.

Le spectroradiomètre TriOS est piloté par le logiciel MSDA qui génère des fichiers ASCII aux extensions .DAT comprenant 34 lignes d'entêtes et 843 lignes de données correspondant aux longueurs d'onde de 307 nm à 1100 nm avec un incrément de 1 nm.

Le format des données des spectres spécifique à chaque spectroradiomètre, comprend les métadonnées du spectroradiomètre (numéro de série, date du spectre, longueur d'onde min et max, temps d'intégration...) ainsi que deux colonnes contenant les valeurs de longueurs d'onde et les valeurs de flux en $W/m^2/nm$.

Cartographie de rayonnement lumineux

La cartographie de rayonnement peut être effectuée de manière manuelle ou automatique. Le choix d'une acquisition manuelle peut se faire dans le cas où les points de mesure ne sont pas nombreux. Le temps nécessaire pour une mesure est d'environ 1 seconde et intègre le temps d'acquisition et l'enregistrement du fichier. Au-delà de 50 points, il est préférable d'opter pour une acquisition automatique.

Un dispositif de cartographie automatique, le Climascope (**Figure 1**), a été développé en 2006 pour répondre à cette dernière problématique. Il s'agit d'un plateau (230 x 230 mm) qui peut recevoir différents types de capteurs (rayonnement, température, humidité, concentration de CO_2). Il se déplace suivant deux axes sur une distance totale de 860 mm de long et 550 mm de large avec un pas d'un millimètre.

Pour effectuer des mesures de rayonnement, nous avons monté le spectroradiomètre TriOS sur un robot à deux axes (Pan Tilt) fixé au plateau mobile. Le Climascope et le spectroradiomètre sont reliés à un ordinateur qui gère de manière synchronisée le déplacement du plateau et l'acquisition des spectres, via une interface développée sous LabView©.



Les coordonnées de tous les points de la cartographie doivent être au préalable renseignées en millimètre dans un fichier texte, en précisant les déplacements du plateau suivant les deux axes perpendiculaires (l'axe des X et des Y). Dans ce même fichier, l'orientation (azimut et élévation) en degré du robot doit également être renseignée. Après avoir importé le fichier de coordonnées, l'interface LabView (i) commande le déplacement du plateau pour le placer au premier point de mesure, (ii) fait l'acquisition du spectre, (iii) copie et renomme le fichier de données selon le format suivant : « nom-de-la-carto_n°incrément_positionX_positionY_azimut_élévation.dat. », (iv) et passe au point suivant. Une fois la cartographie terminée, nous obtenons autant de fichiers de spectres que de points de mesure.

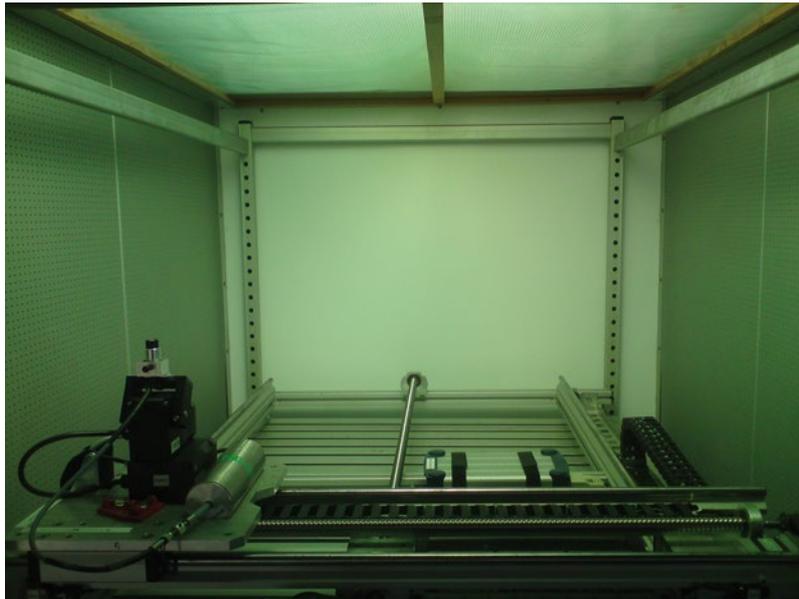


Figure 1. Illustration du Climascope dans une enceinte de culture (photo : E. Roy, INRA).

Mesure de propriétés optiques

Nous utilisons la sphère intégrante LI-COR 1800-12S (LI-COR 1983) associée au spectroradiomètre FIELDSPEC Pro pour mesurer la réflectance et la transmittance d'échantillons.

Pour connaître le pourcentage de réflexion ou de transmission d'un échantillon, il faut une mesure de flux de rayonnement incident. Cette mesure est effectuée lorsque l'illuminateur éclaire la sphère et correspond à la référence (Reference). Il est nécessaire également d'estimer le bruit électronique (Dark Reading) en effectuant une mesure lorsque l'illuminateur éclaire le porte échantillon vide. Enfin, les mesures de l'échantillon sont effectuées en réflectance (Reflectance Sample) et transmittance (Transmittance Sample) lorsque l'illuminateur éclaire le porte échantillon avec l'échantillon.

Après avoir acquis ces spectres, nous pouvons appliquer la formule ci-dessous qui est décrite dans la notice du LI-COR 1800 : T pour transmittance, R pour réflectance.

$$T_{(nm)} = \frac{\text{Transmittance Sample}_{(nm)} - \text{Dark Reading}_{(nm)}}{\text{Reference}_{(nm)} - \text{Dark Reading}_{(nm)}} \quad R_{(nm)} = \frac{\text{Reflectance Sample}_{(nm)} - \text{Dark Reading}_{(nm)}}{\text{Reference}_{(nm)} - \text{Dark Reading}_{(nm)}}$$

La gestion du nom de ces différents spectres est essentielle si nous voulons automatiser le calcul des propriétés optiques. Nous avons défini un protocole d'acquisition dans lequel l'ordre des séquences des mesures est défini et une syntaxe précise est utilisée pour le nom des fichiers. Ce nom commence par le nom d'échantillon suivi d'un indice « t » propre au spectroradiomètre et d'un numéro d'incrément qui augmente à chaque acquisition.

Description du logiciel Qua²Ray

Qua²Ray est un logiciel d'analyse du rayonnement lumineux développé en Visual Basic pour Application. A l'ouverture, la page principale présente les différentes fonctions (Figure 2) regroupées par type d'analyse telles que l'analyse spectrale, l'analyse spatiale, l'analyse de propriétés optiques et l'analyse de sources lumineuses.

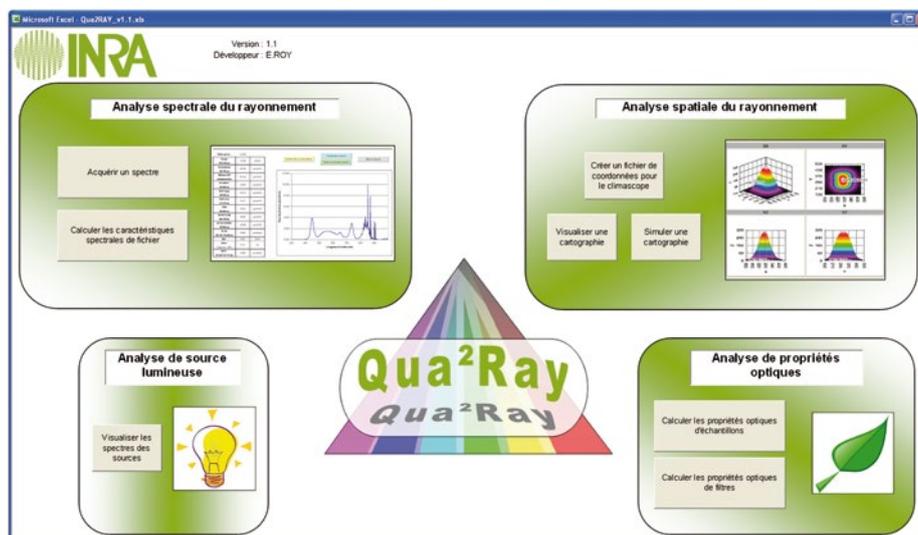


Figure 2. Capture d'écran de la page principale du logiciel Qua²Ray.

Analyse spectrale du rayonnement lumineux

Fonction « Acquérir un spectre »

Cette fonction permet d'acquérir un spectre, de le visualiser et de calculer ses caractéristiques instantanément. Elle garde en mémoire jusqu'à trois acquisitions et les exporte pour les enregistrer. Si nous souhaitons analyser leurs caractéristiques avec un autre spectre connu, la fonction peut charger un spectre d'une source lumineuse disponible dans Qua²Ray (Figure 3).

Cette fonction est pour l'instant disponible uniquement avec le spectroradiomètre TRIMISPEC et son logiciel MSDA qui fournit les acquisitions en instantané dans un répertoire connu.

Dans le cas d'un réglage d'un éclairage matriciel à LED, cette fonction permet de suivre l'ensemble des caractéristiques spectrales lorsque nous modifions l'intensité d'un groupe de LED (rouge, vert ou bleu).



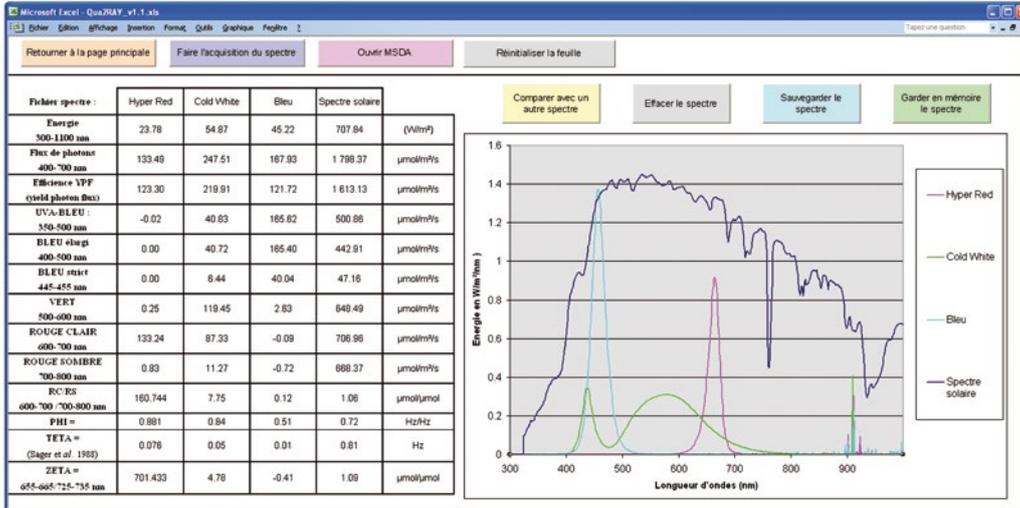


Figure 3. Acquisition de trois spectres de LED pour comparaison avec le spectre solaire.

Fonction « Calculer les caractéristiques spectrales de fichier »

A partir d'acquisitions faites avec le spectroradiomètre ASD ou TriOS, la fonction calcule les caractéristiques spectrales du rayonnement les plus importantes au niveau des plantes.

La fenêtre « Paramètres de traitement » renseigne le type de spectroradiomètre, les particularités du fichier d'acquisition (avec entête, fichier du Climascope, données brutes ou non), le nom et le format du fichier à enregistrer (xls, txt ou csv).

Après avoir cliqué sur le bouton « Lancer le calcul », une boîte de dialogue standard « Ouvrir » permet de choisir un ou plusieurs fichiers de spectre à traiter. La fonction traite les fichiers sélectionnés et insère le résultat dans le tableau. L'ensemble des colonnes correspond aux différents paramètres synthétiques caractérisant le rayonnement et chaque ligne correspond à un fichier traité.

Lorsque les acquisitions proviennent d'une cartographie du Climascope, la fonction récupère à partir du nom des fichiers, les coordonnées du point où le spectre a été mesuré. Ainsi, nous obtenons un tableau avec les coordonnées dans les quatre premières colonnes, suivies des 17 caractéristiques spectrales et du nom du fichier dans les colonnes suivantes (Figure 4).

Coordonnées		Azimuth	Elevation	Energie 300-1100 nm	Flux de photons 400-700 nm	Efficacité YP (yield photon)	UVA-BLEU : 350-500 nm	BLEU élargi 400-500 nm	BLEU strict 445-455 nm	VERT 500-600 nm
1	X	Y								
2				1.16	4.28	3.14	4.25	4.24	1.34	0
3	0	0	0	1.52	5.63	4.13	5.6	5.59	1.76	0
4	0	50	0	1.99	7.4	5.43	7.35	7.33	2.31	0
5	0	100	0	2.62	9.7	7.12	9.64	9.62	3.04	0
6	0	150	0	3.41	12.73	9.34	12.65	12.62	3.98	0
7	0	200	0	4.47	16.56	12.15	16.46	16.43	5.19	0
8	0	250	0	5.37	19.86	14.57	19.74	19.7	6.22	0
9	0	300	0	6.04	22.51	16.52	22.36	22.31	7.04	0
10	0	350	0	6.1	22.68	16.64	22.52	22.48	7.09	0
11	0	400	0	5.35	20.06	14.71	19.94	19.9	6.28	0
12	0	450	0	4.33	16.13	11.83	16.04	16.01	5.06	0
13	0	500	0	3.35	12.54	9.2	12.46	12.43	3.93	0
14	0	550	0	2.51	9.32	6.84	9.26	9.24	2.92	0
15	0	600	0	1.87	6.94	5.09	6.9	6.89	2.17	0
16	0	650	0	1.39	5.17	3.79	5.14	5.13	1.62	0
17	0	700	0							

Figure 4. Aperçu du fichier enregistré après le calcul des caractéristiques spectrales pour différents spectres.

Analyse spatiale du rayonnement lumineux

Fonction « Créer un fichier de coordonnées pour le Climascope »

Pour réaliser une cartographie, le Climascope a besoin d'un fichier au format texte avec toutes les coordonnées des points de mesure. À partir des informations qui sont renseignées dans la fenêtre sur les offsets par rapport au bord de la pièce, les longueurs et les intervalles des points de mesure, la fonction crée le fichier en insérant une ligne par point de mesure (**Figure 5**).



Figure 5. A gauche, définition des paramètres pour calculer les points de mesure et à droite le fichier créé.

Fonction « Visualiser une cartographie de rayonnement »

La fonction « Visualiser une cartographie » ouvre une boîte de dialogue standard « Ouvrir » pour sélectionner le fichier de cartographie puis lance l'application Grap3D. Afin d'analyser les résultats de la cartographie obtenue par la fonction « Calculer les caractéristiques spectrales de fichier », Graph3D permet de tracer un graphique en trois dimensions avec ses trois projections à partir des données d'un fichier « txt » (**Figure 6**). Il interprète les deux premières colonnes comme les coordonnées des axes X et Y et nous pouvons choisir le paramètre à afficher sur l'axe Z grâce au menu déroulant. L'unité des axes X et Y est le millimètre et celle de l'axe Z dépend du paramètre affiché.

Fonction « Simuler une cartographie de rayonnement »

Cette fonction a pour but de simuler le positionnement de sources lumineuses que nous avons préalablement cartographiées individuellement.

Par exemple, nous avons cartographié un spot sur une surface de 800 mm par 550 mm avec le Climascope. Nous souhaitons simuler le rayonnement lumineux reçu sur un plan horizontal en prenant en compte la configuration du positionnement de six spots espacés de 300 mm sur l'axe X et de 400 mm sur l'axe Y. Nous renseignons dans la fenêtre « Simuler une cartographie », le fichier de la cartographie source, le nombre de sources sur les axes X et Y, leur intervalle sur X et Y et le fichier de sauvegarde (**Figure 6**).

Pour créer la nouvelle cartographie, la fonction va recalculer les coordonnées de la cartographie source pour les six spots en fonction de leur positionnement, et additionner les valeurs de flux de photons pour



les coordonnées similaires. Le résultat de la simulation est enregistré sous un fichier « txt » et affiché par Graph3D (**Figure 6**).

La fonction ne prend pas en compte le processus de réflexion notamment dû à la présence de parois réfléchissantes. La méthode est particulièrement adaptée aux sources lumineuses à LED qui sont des éclairages très directionnels et dont l'impact des parois réfléchissantes est souvent négligeable, ou pour des éclairages en serres dont les vitres réfléchissent très peu la lumière.

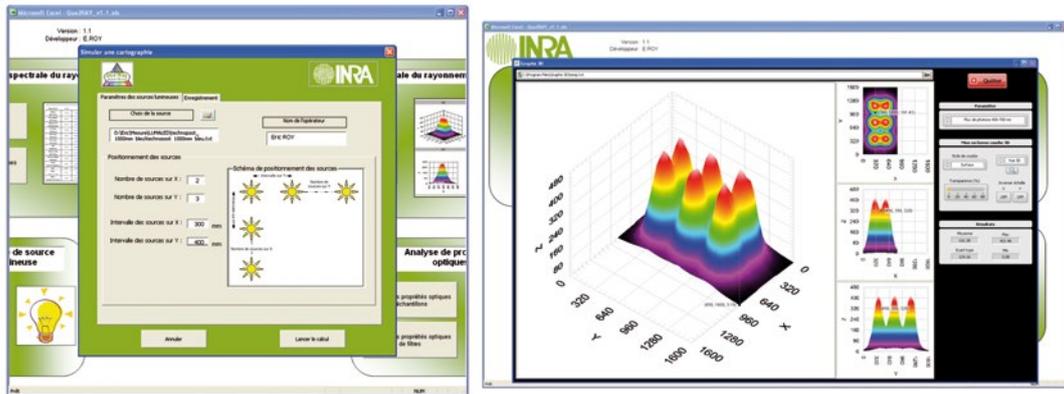


Figure 6. Simulation d'un éclairage par six spots LED avec le paramétrage de la fonction (à gauche) et l'affichage du résultat avec Graph3D (à droite).

Analyse de sources lumineuses

Une fonction permet de stocker des spectres de sources lumineuses qui sont utilisés dans plusieurs fonctions du logiciel Qua²Ray. Les valeurs du spectre sont en $W/m^2/nm$ et sont enregistrées dans un onglet du logiciel Qua²Ray. Nous pouvons les visualiser avec la fonction « Visualiser les spectres des sources » et les exporter au format « txt ».

Actuellement, il y a trois spectres stockés qui sont (i) le spectre solaire, (ii) le spectre d'une lampe à iodure métallique (HQI) et (iii) celui d'une lampe à haute pression de sodium (HPS). Ce sont les trois types de source qui sont principalement utilisés en serre et en chambre de culture. Nous pouvons personnaliser cette liste en important manuellement jusqu'à 250 spectres.

Analyse de propriétés optiques d'échantillons

Fonction « Calcul de propriétés optiques d'échantillons »

Nous avons expliqué dans la partie « description du matériel » que le calcul des propriétés optiques d'un échantillon nécessitait plusieurs mesures de spectre et donc générerait plusieurs fichiers.

Le calcul consiste à ouvrir individuellement les fichiers de spectres, à récupérer les valeurs correspondantes aux paramètres Dark Reading, Reflectance Sample, Reference et Transmittance Sample dans une seule feuille Excel. Nous appliquons ensuite la formule décrite précédemment et nous obtenons le pourcentage de rayonnement transmis ou réfléchi pour chaque longueur d'onde entre 325 et 1075 nm. Cette démarche est très fastidieuse et peut engendrer des erreurs dès l'instant où l'on a plusieurs échantillons.

Pour réduire les risques d'erreur la fonction « Calcul de propriétés optiques d'échantillons » du logiciel Qua²Ray automatise cette opération. Pour cela nous devons d'abord paramétrer le calcul à l'aide de la fenêtre « Paramètres de traitement » et ses quatre onglets : « Propriétés optiques », « Spectro », « Spectre Incident » et « Enregistrement » (**Figure 7**).

L'onglet « Propriétés optiques » permet de choisir le type de calcul à effectuer et le nombre de faces de l'échantillon. « Spectro » permet de choisir le type de spectroradiomètre avec lequel ont été faites les acquisitions ainsi que les caractéristiques des fichiers (données brutes, avec entête, numéro d'incrément des fichiers...). L'onglet « Spectre incident » propose une option de calcul des propriétés optiques pour une bande spectrale en pondérant par les valeurs du spectre de la source incidente. L'onglet « Enregistrement » permet de choisir la forme d'enregistrement des propriétés optiques calculées avec, soit un fichier par échantillon, soit un fichier avec un onglet par échantillon, soit un fichier avec un onglet pour toutes les réflectances d'échantillon et un autre onglet avec les transmittances.

Après avoir paramétré les calculs à effectuer, la fonction s'initialise et ouvre une boîte de dialogue « Ouvrir » pour sélectionner l'ensemble des fichiers d'acquisition. Dans le cas où il y a plusieurs échantillons à calculer, il suffit de sélectionner tous les fichiers d'acquisition de tous les échantillons, et le logiciel Qua²Ray traite automatiquement l'ensemble des échantillons.

Une fois les propriétés optiques calculées, elles sont sauvegardées au format souhaité. Dans notre exemple, nous avons choisi un fichier par échantillon (**Figure 7**). Le fichier comprend le nom de l'échantillon, le type de spectre incident utilisé pour le calcul, les valeurs de réflectance et de transmittance pondérées par le spectre incident, et la valeur de réflectance et de transmittance pour chaque longueur d'onde.

A la fin des opérations, un rapport final s'affiche récapitulant les échantillons traités ainsi que les fichiers qui ont été créés.

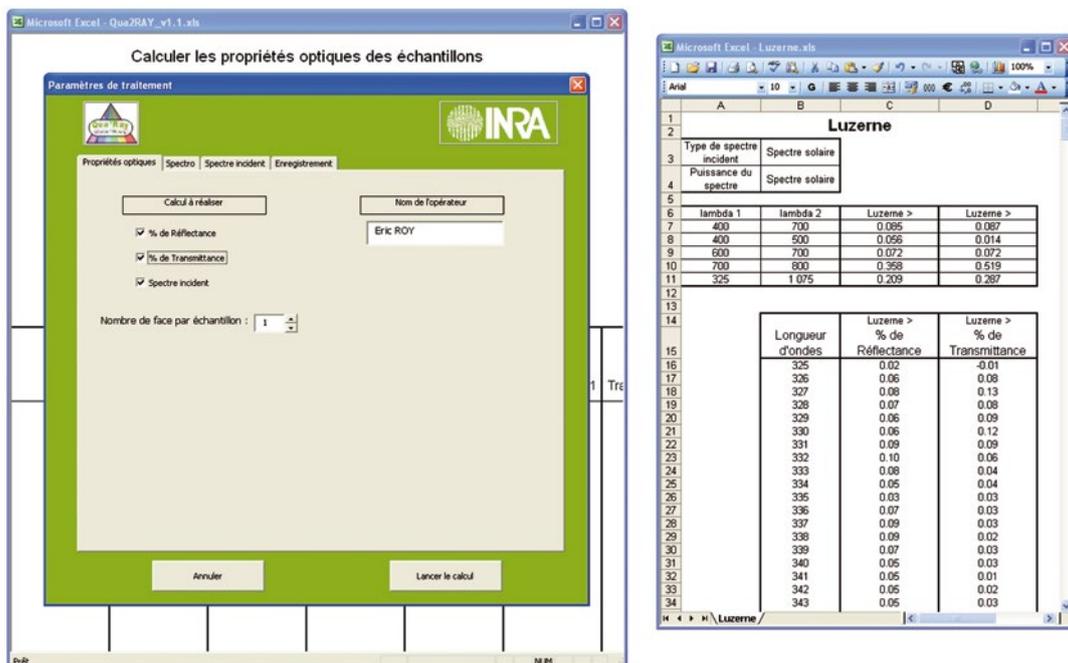


Figure 7. Configuration des paramètres de calcul (à gauche) et affichage du résultat obtenu sur une feuille de luzerne (à droite).

Fonction « Calcul de propriétés optiques de filtres »

La méthode pour mesurer et calculer les propriétés optiques de filtre est la même que celle utilisée pour un échantillon quelconque. Nous obtenons un pourcentage de rayonnement transmis ou réfléchi par longueur d'onde. Seule l'interprétation que l'on souhaite en faire diffère. L'intérêt de cette fonction, est d'associer les paramètres d'une source lumineuse stockée dans le logiciel Qua²Ray avec le filtre que l'on souhaite analyser, pour simuler le spectre et ses caractéristiques que l'on obtiendrait.

La **Figure 8** montre les propriétés optiques du filtre « HT015 » calculées par la fonction, auxquelles nous avons rajouté un graphique pour mieux les illustrer. Nous retrouvons le pourcentage de rayonnement transmis du filtre [B16:B768], la source avec son spectre [C17:C768] en courbe rose et ses caractéristiques [B1:B14], l'éclaircissement simulé avec son spectre [D16:D768] en courbe jaune et ses caractéristiques [C1:C14].

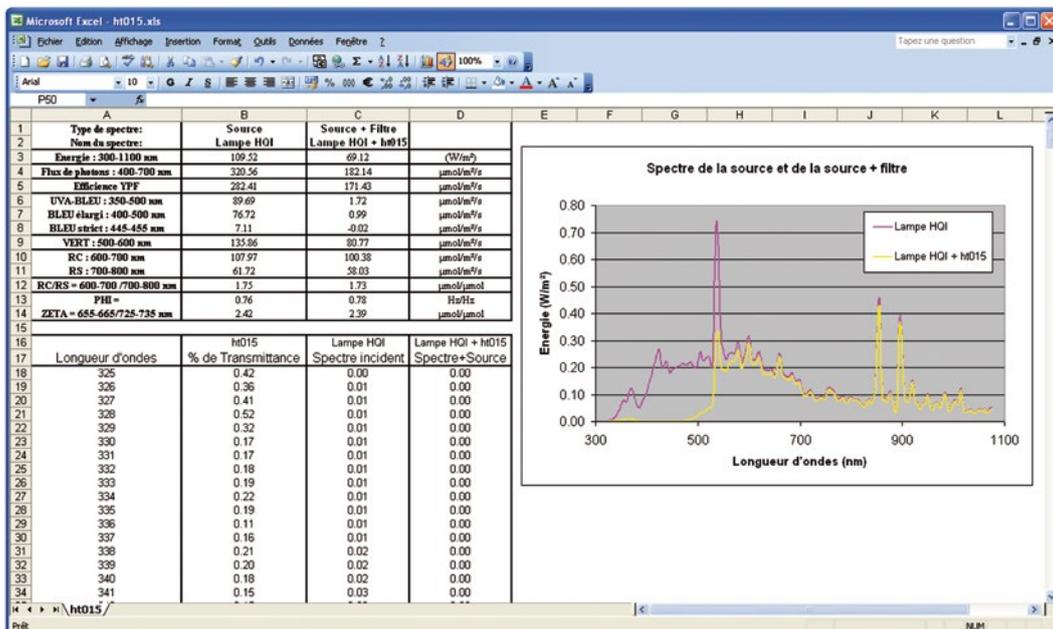


Figure 8. Simulation du résultat d'une association entre une lampe HQL et un filtre LeeFilters HT015.

Résultats

Réglage d'un plafond à LED Ecolux

L'Ecotron Ile-de-France est un dispositif expérimental composé de trois cellules climatiques pouvant simuler des environnements spécifiques (Verdier et al., 2014). Chaque cellule peut accueillir un mésocosme aquatique ou terrestre, et un système d'éclairage matriciel à LED, appelé ECOLUX. Il est composé de 40 cartes comprenant chacune 35 pavés de LED différentes (UV, blanc, bleu, rouge clair, rouge sombre) dont la programmation permet de simuler des régimes différents de lumière contrôlés en qualité et en quantité.

La capacité de ce dispositif à générer différents environnements lumineux a été testée dans le cadre d'une expérimentation concernant les effets d'un faible ratio « rouge clair/rouge sombre = Rc/Rs », sur le développement et la croissance des plants d'arabidopsis. Pour répondre à cet objectif, deux

niveaux de ratio Rc/Rs très contrastés (1.15 et 0.1) représentés par la variable Zeta ont été obtenus sous un flux constant de rayonnement PAR d'environ $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Le paramètre Zeta est un autre descripteur du ratio Rc/Rs. Il correspond à un rapport entre les flux de photons dans une bande spectrale de 10 nm entre le rayonnement rouge clair (655-665nm) et rouge sombre (725-735nm). L'ECOLUX permet de faire varier facilement le paramètre Zeta grâce aux pavés de LED rouge clair et rouge sombre, mais trouver la configuration idéale peut s'avérer difficile, car pour abaisser le Zeta on doit réduire le flux de rayonnement rouge clair au niveau de chaque carte, ce qui impacte automatiquement le flux de rayonnement utile pour la photosynthèse (PAR 400-700nm) et qu'il faudra compenser avec des LED bleues. Il faut donc systématiquement s'intéresser à l'ensemble des variables du rayonnement (aussi bien quantitatives que spectrales) après chaque changement de configuration d'allumage des pavés de LED.

La démarche pour trouver la configuration idéale avec ce type d'éclairage est la suivante : allumer quelques pavés de LED, faire une acquisition de spectre, calculer ses caractéristiques, les comparer au cahier des charges puis modifier la combinaison des pavés si nécessaire et recommencer la démarche jusqu'à trouver la combinaison satisfaisante. Cette démarche peut être longue et approximative si les calculs des paramètres ne sont pas faits en temps réel. C'est ce que permet notre logiciel Qua2Ray !

En effet, grâce à la fonction « acquérir un spectre », l'acquisition du spectre et le calcul des caractéristiques spectrales se font en quelques secondes, ce qui nous a permis de trouver rapidement les combinaisons satisfaisantes : cinq pavés de LED blanches pour un rayonnement PAR de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et un paramètre Zeta de 4.7, cinq pavés de LED blanches et sept pavés de LED rouges sombres pour un rayonnement PAR de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et un paramètre Zeta de 0.1 (**Figure 9**).



Figure 9. Cartographie de l'ECOLUX avec la combinaison cinq pavés de LED blanches et sept pavés de LED rouges sombres (photo : E. Roy, INRA).



Développement de rampes lumineuses pour les stades de sport

Dans le cadre d'un projet avec un gestionnaire de pelouse de stades de sport, nous avons développé des rampes lumineuses pour éclairer des surfaces de pelouse déficitaire en rayonnement. Le cahier des charges consistait à éclairer de façon suffisante et homogène une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés pour assurer une bonne qualité de gazon.

Pour mener à bien ce projet, nous avons commencé par choisir un type de source lumineuse en fonction de son spectre, de sa puissance d'éclairage et de sa répartition du flux pour satisfaire au mieux les besoins de la plante. Après avoir sélectionné la source lumineuse qui équipera les rampes, nous devons définir la hauteur de la source par rapport au gazon mais aussi le maillage, c'est-à-dire le nombre de sources lumineuses et l'écartement entre elles pour assurer un flux de rayonnement suffisant et homogène au niveau du couvert végétal visé.

Tout d'abord, une cartographie de la source sélectionnée a été faite pour plusieurs hauteurs sur une surface de 10 m x 8 m avec un pas de 20 cm. A partir de cette cartographie, nous avons paramétré le logiciel Qua²Ray pour faire une simulation de 16 sources lumineuses avec un maillage de 4 m x 2 m. Après 30 secondes de calcul, nous obtenons une cartographie globale de 22 m x 14 m avec pour chaque coordonnée, une valeur de flux de photons en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, exportable au format xls, csv ou txt pour faire quelques calculs statistiques.

Vue la simplicité de mise en œuvre et le temps très court des simulations, nous pouvons aisément refaire la simulation avec un maillage différent pour s'approcher au mieux des exigences du cahier des charges.

Modification du spectre d'une source lumineuse HQI

Le logiciel Qua²Ray a aussi été utilisé dans le cadre d'une expérimentation visant à décorrélérer les effets de la composante bleue de la lumière (400-500 nm) et de la transpiration sur la croissance foliaire des graminées (Barillot et al., 2010). Pour réaliser cette expérience, la composition spectrale de la lumière ainsi que la capacité de transpiration des plantes devaient être manipulées indépendamment l'une de l'autre. Deux enceintes climatiques ont été utilisées à cet effet : dans chacune d'entre elles, une plante a été positionnée sur une balance de précision pour suivre la transpiration et a été équipée d'un capteur d'allongement foliaire pour suivre la vitesse d'allongement de la feuille en croissance. Les deux plantes ont été placées dans les chambres de cultures quelques heures avant d'appliquer le traitement lumineux, afin d'avoir un état initial de la vitesse et de la transpiration. Après stabilisation des conditions, le traitement lumineux (lumière avec ou sans bleu) combiné ou pas à un traitement visant à modifier le taux d'humidité relative dans les chambres, pour contrôler le déficit de saturation de l'air (VPD), a été appliqué.

Dans nos enceintes climatiques équipées de lampes à décharge du type iodure métallique (HQI), le seul moyen pour modifier le spectre dans sa composante bleue en bloquant le passage de ces photons ou en réduisant de façon neutre le flux de photons dans le PAR, est d'intercaler un filtre de transmission entre la source et la surface de culture.

Nous disposons d'un nuancier de filtres pour pré-sélectionner visuellement les filtres qui se rapprocheraient de notre besoin. Une fois sélectionnés, nous mesurons les propriétés optiques de ces filtres selon la méthode décrite précédemment (**Figure 10**).

Grâce à la fonction « Calcul de propriétés optiques de filtres » du logiciel Qua²Ray, nous calculons le pourcentage de transmission des filtres par longueur d'onde et nous simulons leurs influences sur une source lumineuse type HQI (**Figure 8**). La forme du spectre et ses caractéristiques spectrales nous permettent de choisir le filtre adapté à notre expérimentation : Lee-filter HT 216 (filtre neutre) pour ramener les deux traitements lumineux à une même efficacité photosynthétique et filtre HT 015 permettant d'éliminer les photons de la bande spectrale 400-500 nm correspondant au bleu.



Figure 10. De gauche à droite : nuancier de filtres, enceinte de culture lampe HQI + HT 216, enceinte de culture lampe HQI + HT 015 (photo : S. Carre, INRA).

Conclusion et perspectives

Le logiciel Qua²Ray aide les utilisateurs de spectroradiomètre à traiter leurs données et calculer les caractéristiques spectrales essentielles au fonctionnement d'une plante.

Ainsi, nous avons pu réaliser de nombreuses cartographies de rayonnements pour caractériser des sources lumineuses innovantes (ECOLUX, projecteurs LED Osram...), calculer des propriétés optiques sur un grand nombre d'échantillons et définir rapidement des filtres en fonction de leurs caractéristiques pour des modifications de spectres.

Développé entre 2010 et 2013 en Visual Basic sous Office 2003, le logiciel Qua²Ray aurait besoin soit d'une mise à jour pour résoudre quelques bugs liés aux nouvelles versions d'Office, soit d'un re-développement complet sous une autre plateforme comme « Python », afin d'augmenter ses capacités de calcul, d'avoir accès à des fonctions mathématiques plus élaborées, de tolérer plusieurs types de spectroradiomètre et de créer un module exécutable.

Ce logiciel est disponible pour tous les agents INRA qui le souhaitent, adaptable plus ou moins rapidement en fonction de leurs spectroradiomètres.

Références bibliographiques

Barillot R, Frank E, Combes D, Durand J-L, Abraham J, Escobar-Gutiérrez J (2010) What determines the complex kinetics of stomatal conductance under blueless PAR in *Festuca arundinacea*? Subsequent effects on leaf transpiration. *J Exp Bot* **61**: 2795-2806.

De Berranger C, Christophe A, Gautier H, Varlet-Grancher C (2005) Caract.xls : un outil pour estimer les caractéristiques spectrales du rayonnement lumineux actif sur la croissance et le développement des plantes. *Cahiers des Techniques de l'INRA* **54** : 21- 36.

Varlet-Grancher C, Ollat N, Gautier H, Julien JL (1995) La photomorphogenèse. Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie. De la plante au couvert. Le Croisic, 257-268.

Verdier B, Jouanneau I, Simonnet B, Rabin C, Van Dooren TJ, Delpierre N, Clobert J, Abbadie L, Ferrière R, Le Galliard JF (2014) Climate and atmosphere simulator for experiments on ecological systems in changing environments. *Environ Sci Technol* **48** : 8744-8753.

1800-12 Integrating Sphere instruction manual. LI-COR, inc. (May 1983).

