



**HAL**  
open science

# Lumière : efficience et architecture des plantes ; impact des édifices / des éclairages sur le développement des plantes. L'exemple des pelouses

Didier Combes, P. Robert, J.M. Hurlus

## ► To cite this version:

Didier Combes, P. Robert, J.M. Hurlus. Lumière : efficience et architecture des plantes ; impact des édifices / des éclairages sur le développement des plantes. L'exemple des pelouses. *Innovations Agronomiques*, 2015, 45, pp.13-22. 10.15454/1.46226475032746E12 . hal-02636481

**HAL Id: hal-02636481**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02636481>**

Submitted on 27 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## **Lumière : efficacité et architecture des plantes ; impact des édifices / des éclairages sur le développement des plantes. L'exemple des pelouses**

**Combes D.<sup>1</sup>, Robert P.<sup>2</sup>, Hurlus J.-M.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>INRA-URP3F INRA, CS 80006, F-86600 Lusignan

<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles / UVSQ, LéaV, France

<sup>3</sup>Société TERENVI, Le Zand Put Houck, F-59670 Winnezele

**Correspondance** : didier.combes@lusignan.inra.fr

### **Résumé**

Qu'elle soit naturelle ou artificielle, la lumière joue un rôle prépondérant dans les processus fondamentaux pour le développement des plantes (germination, croissance, floraison ...). Les végétaux chlorophylliens ont non seulement développé des mécanismes de conversion de l'énergie solaire (photosynthèse) mais également des systèmes multiples d'information sur leurs conditions d'éclairage. Les plantes sont en effet capables de percevoir certaines caractéristiques du rayonnement (direction, durée, composition spectrale) qui agissent comme des signaux. Au sein des peuplements végétaux, les interactions entre le rayonnement solaire et les organes chlorophylliens se traduisent par des variations spatiales et temporelles très importantes du niveau et de la composition spectrale de la lumière. Les caractéristiques de la lumière naturelle dépendent des conditions de ciel ou des matières qu'elle rencontre alors que la lumière artificielle dépend du type de source considérée. En milieu urbain, la lumière naturelle est perturbée par les bâtiments provoquant des ombres portées. La lumière artificielle quant à elle est utilisée pour par exemple mettre en valeur des arbres remarquables et compenser le manque de lumière des pelouses des stades de football.

**Mots-clés** : Lumière, Diffus, global, Photomorphogenèse, Propriétés optiques, Transferts radiatifs

### **Abstract: Light interaction with plant architecture : building and artificial light impact on plant development**

Whatever the considered natural or artificial light, light plays a key role in fundamental processes involved in plant development (germination, growth, flowering,...). Green plants have not only developed an energy conversion mechanism but they also developed a system of information on their light surroundings. Plants are able to sense some light characterisation (direction, duration, spectral composition) acting as signals. Within a plant canopy, light interaction with plant organs induces very large variation in spatial and temporal of spectral composition of light. These characteristics of natural light depend on the sky conditions or the matter met whereas the characteristics of artificial light depend on the considered light source. In urban site, natural light is modified by the buildings inducing shade. Artificial light is used in order to enhance some outstanding trees and to compensate the lack of light of turfgrass in football stadium.

**Keywords**: Light, Diffuse, Global, Photomorphogenesis, Optical properties, Radiative transfer

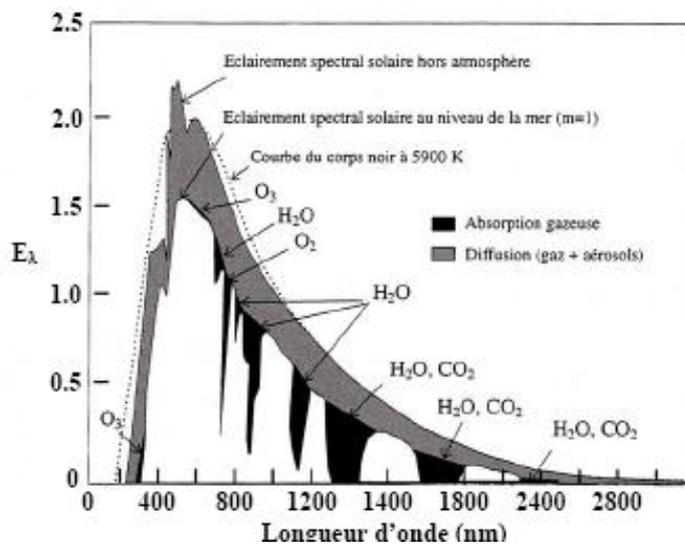
### **Introduction**

La lumière joue un rôle prépondérant dans les processus fondamentaux pour le développement des plantes (germination, croissance, floraison ...). Les végétaux chlorophylliens ont non seulement développé des mécanismes de conversion de l'énergie solaire (photosynthèse) mais également des

systèmes multiples d'information sur leurs conditions d'éclairement (Smith, 1982). Les plantes sont en effet capables de percevoir certaines caractéristiques du rayonnement (direction, durée, composition spectrale) qui agissent comme des signaux.

## 1. Caractérisation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire extraterrestre s'étend sur une gamme de longueurs d'onde variant entre 200 et 4000 nm environ avec un maximum d'éclairement autour de 490 nm. Ce spectre est généralement subdivisé en trois grands domaines : l'ultraviolet pour les longueurs d'onde inférieures à 400 nm, le visible entre 400 et 700 nm et l'infrarouge pour les longueurs d'onde supérieures à 700 nm. Le visible est aussi le domaine de la conversion photosynthétique par les plantes et est couramment dénommé PAR (Photosynthetically Active Radiation).



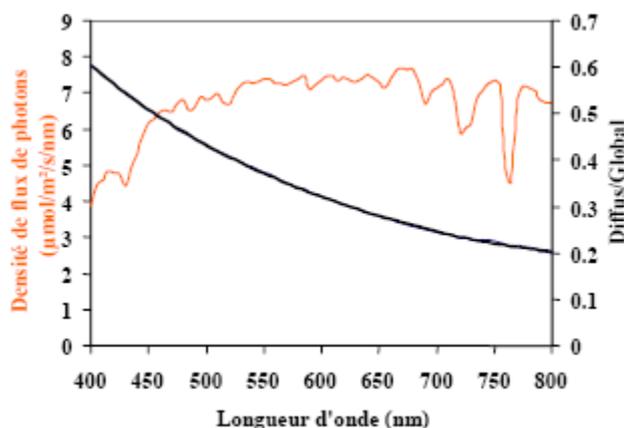
**Figure 1** : Eclairement solaire extraterrestre et à la surface terrestre (modifié d'après Bonhomme, 1993)

Lors de la traversée de la couche atmosphérique, le rayonnement solaire est atténué en raison des diffusions et absorptions sélectives par les différentes composantes gazeuses de l'air, les particules en suspension ainsi que les gouttelettes d'eau et cristaux de glace. L'importance de ces phénomènes dépend évidemment de l'épaisseur relative de la masse d'air traversée. L'absorption du rayonnement résulte principalement de l'ozone (essentiellement pour des radiations inférieures à 290 nm et un peu autour de 600 nm), de l'oxygène (surtout autour de 760 nm et dans de larges bandes de l'infrarouge lointain), la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone (dans des bandes spectrales étroites autour de 1400, 1600, 1900 et 2400 nm). Les rayons du Soleil sont aussi rediffusés par les composantes de l'atmosphère. Il existe deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. La première se produit avec des particules de dimension très petite par rapport à la longueur d'onde du rayonnement (les molécules des gaz atmosphériques) et son intensité est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde.

La diffusion de Mie se produit lorsque la longueur d'onde est du même ordre de grandeur ou plus petite que la particule avec laquelle le rayonnement interagit; c'est le cas pour les divers aérosols (poussières par exemple). Cette diffusion a surtout un effet dans le domaine du visible où son intensité varie peu avec la longueur d'onde (diffusion neutre). L'atténuation du rayonnement par les aérosols peut être très importante (de 5 à 90 %). Lorsque l'atmosphère est peu chargée en aérosol, le rayonnement rediffusé par le ciel est relativement plus riche en lumière bleue (diffusion de Rayleigh importante). Ainsi la partie du rayonnement solaire qui atteint directement la surface du sol diffère de celle du rayonnement extraterrestre (Figure 1).

Les rayons du Soleil sont donc diffusés dans différentes directions. La hauteur zénithale du Soleil intervient en renforçant les phénomènes de diffusion car plus le Soleil est bas sur l'horizon plus l'épaisseur de couche atmosphérique traversée est importante. La couverture nuageuse réduit le rayonnement solaire en réfléchissant une partie vers l'atmosphère. Elle contribue également à le diffuser davantage par réflexions multiples avec le sol. La distribution des luminances du ciel dépend donc de l'ensemble de ces phénomènes. Les modèles de luminance du ciel les plus courants et anciens sont les "standard overcast" et "uniform overcast" (Moon et Spencer, 1942). Bien qu'ils n'aient pas été vérifiés sur l'ensemble des longueurs d'onde du rayonnement terrestre, ils supposent que le comportement directionnel des luminances est identique quelle que soit la longueur d'onde.

Le rayonnement global arrivant au-dessus d'un couvert végétal est égal à la somme des radiations provenant directement du disque solaire (rayonnement direct) et des rayonnements rediffusés par les particules en suspension dans l'atmosphère (rayonnement diffus). Le disque solaire est considéré comme une source ponctuelle située à l'infini. Les rayons diffus issus de chaque quartier du ciel et les rayons directs sont assimilés à un faisceau de rayons parallèles. Ce rayonnement global est caractérisé par l'éclairement reçu sur une unité de surface horizontale. La part relative de l'éclairement diffus dans le rayonnement global D/G est très variable et généralement utilisée comme un indicateur de l'importance du taux d'enneigement et des aérosols (pollution) dans l'atmosphère : de l'ordre de 0.10-0.15 pour un ciel très clair (pas de nuage et faible pollution) à 1.0 lorsque le rayonnement direct est complètement occulté (ciel couvert). La composition spectrale du rayonnement global est déterminée par la contribution relative des deux composantes, le direct et le diffus (Figure 2). Les compositions spectrales des deux composantes diffèrent et ne dépendent pas des mêmes facteurs.



**Figure 2** : Composition spectrale du rayonnement solaire global (courbe orange) et du rapport rayonnement solaire diffus sur le rayonnement solaire global (courbe noire) (Varlet-Grancher, 1996 ; communication personnelle)

Par ciel clair et pour des hauteurs de Soleil élevées, le diffus est riche en radiations bleues (maximum autour de 425 nm) alors que le direct présente son maximum autour de 550 nm. La composition spectrale du direct varie surtout avec la hauteur du Soleil (Varlet-Grancher, 1975) : lorsque celle-ci diminue, la masse d'air traversée par les rayons pour parvenir au sol augmente et le direct s'appauvrit relativement en radiations visibles et s'enrichit dans l'infrarouge. La composition spectrale du diffus du ciel dépend essentiellement du taux de nébulosité. Lorsque D/G augmente, les diffusions de Mie sur les gouttelettes d'eau et les aérosols deviennent prépondérantes et le diffus du ciel s'enrichit en radiations de plus grandes longueurs d'onde (déplacement du maximum vers 500 nm).

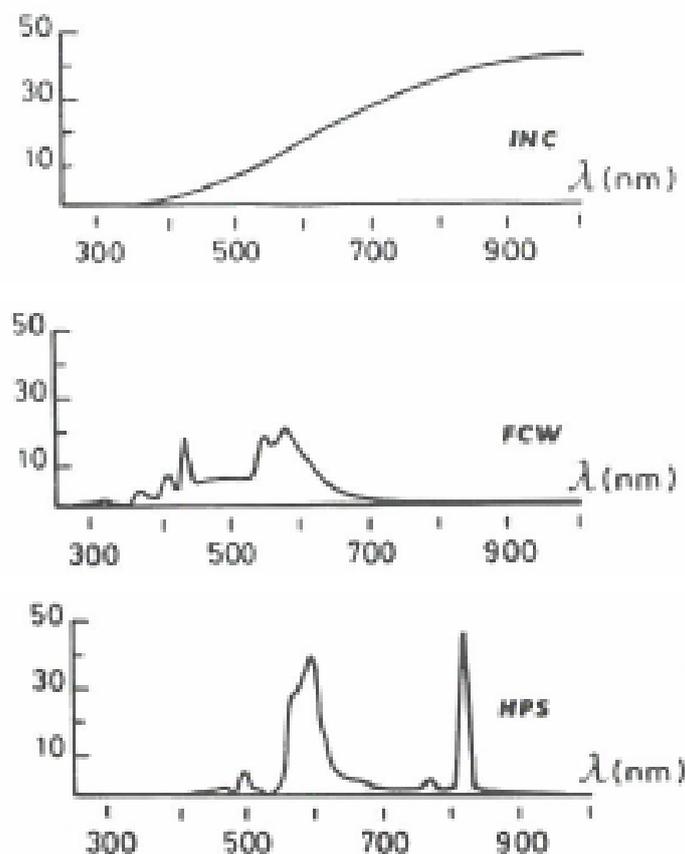
Finalement la composition spectrale du rayonnement global dépend très peu des conditions atmosphériques et de la hauteur du Soleil (au-dessus de  $10^\circ$  environ). Le rapport RC/RS reste remarquablement constant  $1.15 \pm 0.02$  (Smith et Holmes, 1977) au cours de la journée ou de l'année. Cependant, au lever et au coucher du Soleil (hauteurs inférieures à  $10^\circ$ ), ce rapport peut présenter des variations entre 0.60 et 1.50. La proportion des photons bleus et ultraviolets A dans le visible reste constante (autour de 0.32) et le niveau du flux de ces photons UV-A-BL varie donc très fortement comme le niveau de PAR.

## 2. Caractérisation du rayonnement lumineux de sources artificielles

Les sources de lumière artificielle que l'on peut trouver dans le commerce peuvent être classées suivant quatre groupes principaux (Figures 3 et 4) : les lampes à incandescence, fluorescentes, à décharge et les diodes électroluminescentes (LED).

La lampe à incandescence a longtemps été utilisée dans le domaine de l'horticulture. Elle est le moins efficace en termes de conversion de l'énergie en rayonnement utile pour la photosynthèse. La principale caractéristique des lampes à incandescence est leur apport dans l'infrarouge qui se traduit par un dégagement de chaleur important. Les deux tiers de la puissance électrique sont convertis en rayonnement lumineux dans le domaine de longueur d'onde 850-2700 nm. En horticulture, ces lampes sont principalement utilisées pour le contrôle de la photopériode en complément d'autres types de sources.

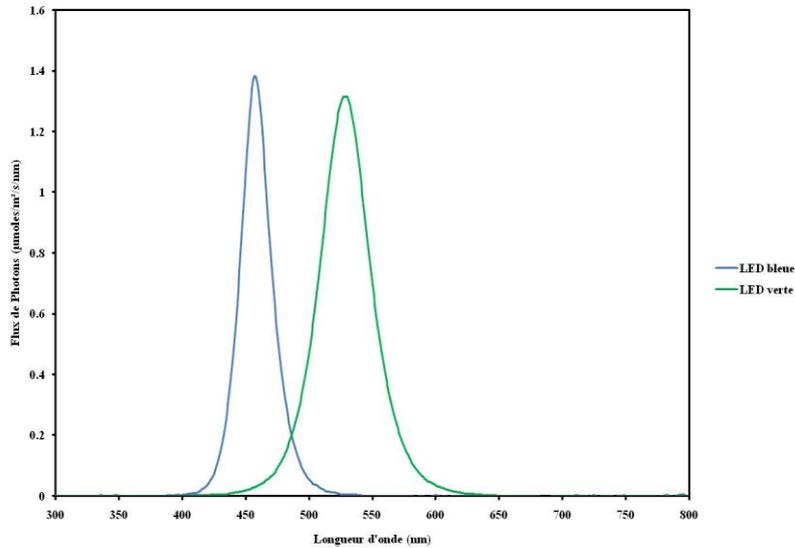
Les lampes fluorescentes sont souvent utilisées dans les enceintes de cultures en combinaison avec les lampes à incandescence. Elles sont trois fois plus efficaces que les lampes à incandescence en termes de conversion en rayonnement utile à la photosynthèse. En plus des lampes fluorescentes blanches, il existe un large choix de lampes colorées.



**Figure 3** : Composition spectrale du rayonnement lumineux émis par une lampe à incandescence (haut), une lampe à fluorescence (milieu) et une lampe à sodium haute pression (bas)

Les lampes à décharges sont recommandées lorsque des niveaux élevés de rayonnement utile à la photosynthèse sont nécessaires. Elles sont caractérisées par une puissance électrique nécessaire élevée. Il existe différents types de lampes à décharge dont les lampes à mercure et à sodium. Dans le milieu horticole, les lampes de sodium à haute pression sont les plus utilisées. L'émission de lumière par le sodium est moins jaune que les lampes de sodium basse pression.

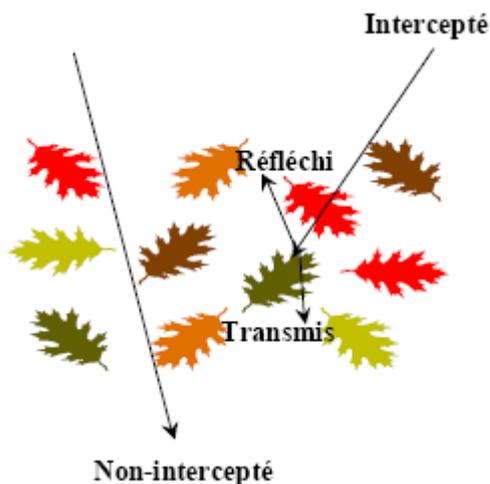
Enfin, Les LED (Figure 4) sont composées de semiconducteurs au sein desquels sont produits les photons constituant l'énergie lumineuse. Le spectre d'une LED est constitué d'un pic étroit d'émission du rayonnement lumineux centré sur une longueur d'onde caractéristique de la LED.



**Figure 4** : Composition spectrale du rayonnement émis par deux LED verte et bleue.

### 3. Les échanges radiatifs et la distribution de la lumière au sein d'un peuplement végétal

Les principales modifications de la composition spectrale du rayonnement solaire s'observent dans le couvert végétal. Les rayons incidents peuvent d'abord être interceptés puis rediffusés par les divers éléments qui composent la végétation (feuilles, tiges ...) et par le sol. Les mécanismes de rediffusion dépendent très fortement des propriétés d'absorption de ces éléments et varient donc avec la longueur d'onde du rayonnement alors que ce n'est pas le cas de l'interception.



**Figure 5** : Représentation schématique des différentes interactions entre le rayonnement incident, représenté par des rayons, et les éléments de la végétation

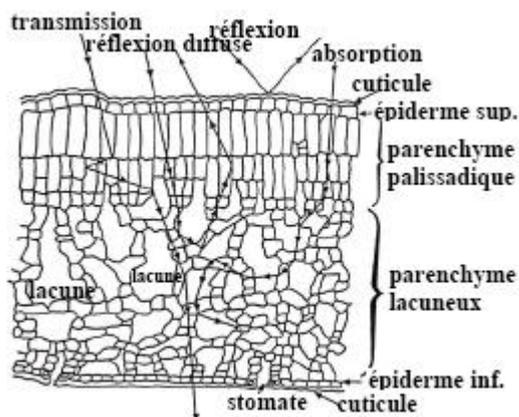
#### 3.1 Interaction rayonnement - couvert végétal

L'interaction qui détermine l'interception d'un rayon incident (de la composante directe ou diffuse du rayonnement incident) est purement géométrique et correspond à une intersection entre la droite représentant ce rayon et un élément de surface du couvert végétal (Figure 5). L'interception dépend donc de la direction du rayon (position du Soleil pour la composante directe et secteur de ciel considéré

pour la composante diffuse) et de la structure du couvert, c'est-à-dire des caractéristiques géométriques de ses éléments (dimension, position et orientation).

Pour chaque rayon traversant le couvert végétal, deux situations sont possibles : son interception par un élément de la végétation ou sa non-interception et donc sa transmission au sol. Cette non-interception correspond à la notion de « trou » pour la direction du rayon et le niveau considéré dans le couvert (Sinoquet *et al.*, 1993). Lorsque l'on considère le rayonnement direct, on observera donc des « taches de soleil » (non-interception) et des « zones d'ombre » (interception). Le Soleil n'est pas une source ponctuelle et les phénomènes de pénombre peuvent être plus ou moins importants (Stenberg, 1995) mais sont rarement pris en compte (Ross, 1981).

Les feuilles sont des milieux complexes qui ne se comportent pas comme des corps noirs. Les rayons incidents peuvent être réfléchis dans la direction symétrique à la direction incidente par rapport à la verticale (réflexion spéculaire), en fonction de l'état de surface de la feuille (rugosité, pilosité, cuticule cireuse,...), ou rediffusés (réflexion diffuse ou transmission), après de multiples interactions au sein des tissus foliaires (Figure 6).

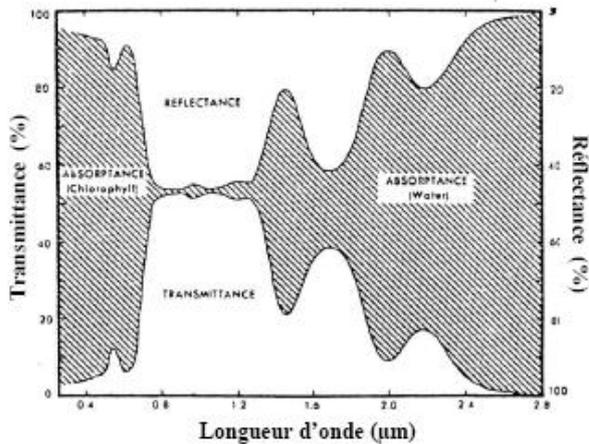


**Figure 6** : Coupe schématique d'une feuille de dicotylédone. Les divers types d'interactions entre le rayonnement et les éléments structuraux des tissus foliaires sont représentés (d'après Guyot, 1989).

Les parts relatives de l'énergie incidente absorbée (absorptance), réfléchie (réflectance) et transmise (transmittance) par feuille définissent ses propriétés optiques. Celles-ci varient fortement avec la longueur d'onde de manière similaire pour toutes les feuilles vertes. La Figure 7 montre les propriétés optiques hémisphériques (les flux absorbés, réfléchis et transmis sont intégrés sur  $2\pi$ ), en fonction de la longueur d'onde, mesurées sur une feuille de noyer.

Les valeurs des flux hémisphériques ont été mesurées par la méthode classique de la sphère intégrante couplée à un spectromètre. On peut considérer trois grands domaines spectraux par rapport à l'absorption :

- Les UV et le visible dans lesquels l'absorption de l'énergie est très forte et qui correspond à la conversion énergétique effectuée par les mécanismes photosynthétiques,
- Le proche infrarouge pour lequel les rayonnements sont très faiblement absorbés (rediffusions importantes),
- L'infrarouge moyen et lointain pour lequel l'absorption est variable et résulte essentiellement de l'eau contenue dans la feuille.



**Figure 7** : Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille verte (d'après Knipling 1970). La partie hachurée représente l'absorption. Les axes de gauche et de droite indiquent les valeurs respectivement de la transmittance et de la réflectance en fonction de la longueur d'onde.

La variabilité des spectres d'absorption, de réflectance ou de transmittance entre feuilles et espèces porte essentiellement sur leur amplitude, en fonction de la longueur d'onde. Il y a très peu d'effet sur la modification de leur forme. En plus de ces variations spectrales, les propriétés optiques présentent également des variations directionnelles en fonction de la longueur d'onde.

Les mesures des caractéristiques bidirectionnelles des propriétés optiques sont beaucoup plus rares que les mesures hémisphériques. Les premières très descriptives, datent du début des années 60 (revue par Combes *et al.* 2002) et ont ensuite amélioré la méthode d'acquisition de la réflectance et de la transmittance directionnelle mais dans le plan d'incidence c'est-à-dire le plan comprenant la direction de l'incidence et celle de la visée. Il a fallu attendre les années 80 pour avoir des mesures directionnelles pour de nombreuses configurations d'angles.

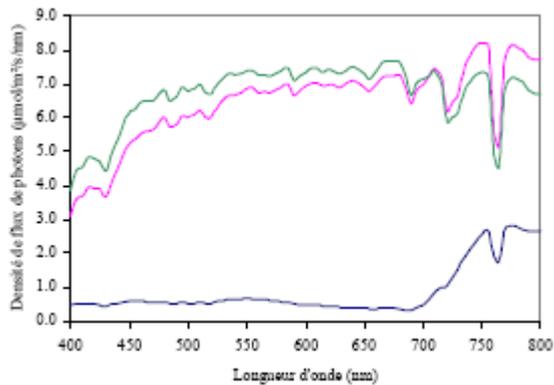
D'autres systèmes explorant des angles restreints ont également été développés pour effectuer des mesures de réflectance directionnelle mais dans le contexte de l'étude des deux composantes diffuse et spéculaire du rayonnement réfléchi par une feuille (Combes *et al.*, 2002). Toutes ces mesures directionnelles montrent que lorsque l'angle d'incidence s'écarte de la verticale, la valeur de la réflectance est maximale dans la direction opposée au rayonnement incident.

Les autres organes non chlorophylliens (tiges ligneuses surtout et organes floraux) ont des propriétés optiques différentes mais, dans la plupart des cas, leur surface reste limitée par rapport au système foliaire.

### 3.2 Distribution de la lumière et des signaux lumineux dans le couvert végétal

La composition spectrale du rayonnement rediffusé au sein du couvert végétal est donc fortement atténuée dans le PAR et plus particulièrement dans le bleu et le rouge. En contrepartie, le proche infrarouge est relativement peu modifié. Ces modifications entraînent une diminution du rapport RC/RS après diffusion au sein du couvert végétal. Bien que les surfaces des organes non chlorophylliens soient faibles par rapport à la surface foliaire, ils peuvent contribuer à l'appauvrissement du rayonnement dans le bleu. Leur effet sur le rapport RC/RS reste peu important. Le rayonnement réfléchi par le sol vers la végétation est appauvri en bleu mais le rapport RC/RS est peu modifié.

Les spectres de rayonnement dans les taches de soleil et les taches d'ombre résultent de ces modifications spectrales. Les spectres de rayonnement transmis dans ces deux zones sont présentés sur la Figure 8. Il s'agit de mesures effectuées dans la couronne d'un noyer isolé. On observe, dans le rayonnement mesuré à l'ombre, une forte atténuation dans le PAR due à la forte absorption des feuilles; cette atténuation varie avec la position dans la couronne. Plus on se rapproche de la base du houppier et plus l'atténuation devient forte (Combes *et al.*, 2000).



**Figure 8** : Spectres mesurés du rayonnement solaire incident (verte) et du rayonnement transmis dans la couronne d'un noyer (au Soleil : courbe rouge, et à l'ombre : courbe bleue) (Combes *et al.*, 2000)

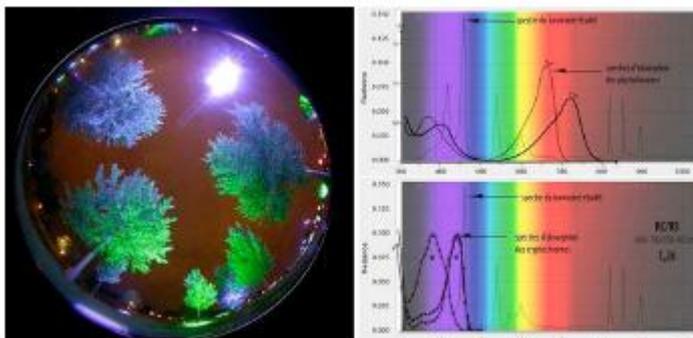
Dans les taches de soleil, le spectre du rayonnement est différent et est proche de celui du rayonnement incident. Ces deux spectres sont similaires à cause du rayonnement direct qui est prépondérant par rapport au rayonnement rediffusé. Des niveaux d'infrarouge localement plus importants que dans le rayonnement incident sont parfois observés et sont attribués à la proximité des feuilles environnantes qui focalisent le rayonnement rediffusé (Smith et Holmes, 1977).

## 4. Impact des édifices

### 4.1 Exemple des parcs publics

L'éclairage des parcs publics a été instauré à l'origine pour la sécurité du public au 19<sup>ème</sup> siècle avec le gaz pour connaître un renouveau au début des années 80 (Robert *et al.*, 2012). Dans ce renouveau, les éclairages sont depuis utilisés pour mettre en exergue des végétaux remarquables à l'aide de différents types de sources lumineuses (vue précédemment) couplée dans certains cas avec des filtres de transmission de lumière. Afin d'analyser les interactions entre les plantes et les facteurs biotiques et abiotiques, une caractérisation du Parc de la Villette à Paris et du Parc de Gerland à Lyon a été conduite. Des observations ont été faites pour caractériser la quantité et la qualité du rayonnement lumineux sur la base de mesures effectuées sur les sites d'étude. Le rayonnement artificiel a été comparé au rayonnement solaire en prenant en compte la période d'allumage des sources lumineuses.

La Figure 9 montre l'exemple d'un arbre du Parc de Gerland éclairé à l'aide d'une source artificielle à fluorescence couplée avec un filtre de transmission de lumière. Cet éclairage a un impact potentiel sur les végétaux à travers les photorécepteurs bleu et rouge qui induisent des réponses photomorphogénétiques (Barillot *et al.*, 2012). Le spectre de réponse des photorécepteurs est représenté sur la Figure 9 pour permettre d'identifier les longueurs d'onde active sur le développement des plantes.



**Figure 9** : Caractérisation d'un site du Parc de Gerland à Lyon. A gauche, une photographie hémisphérique et à droite l'analyse des spectres de rayonnement lumineux (Robert *et al.*, 2012).

## 4.2 Exemple des stades de football

En milieu urbain, les bâtiments subissent les mêmes interactions avec le rayonnement qui ont été décrites dans le premier chapitre. L'architecture des bâtiments et les matériaux qui les constituent jouent un rôle déterminant dans le degré d'ombrage qui peut être observé au niveau des pelouses qui s'y trouvent. Dans les parties ombrées, le rayonnement direct est absent et seul le rayonnement diffus est présent. Il en résulte une différence de spectre du rayonnement lumineux entre les parties à l'ombre et les parties au soleil. Certains bâtiments sont constitués de matériaux translucides comme la couverture des tribunes des stades. Ces matériaux ont une capacité de transmission du rayonnement qui est censée minimiser les effets de l'ombre. Bien souvent, cette transmission n'est pas importante au niveau de la pelouse compte tenu de la dispersion du rayonnement qui n'est pas transmis de manière privilégiée vers la pelouse.

Le rayonnement lumineux réfléchi par les bâtiments contribue également au spectre du rayonnement lumineux arrivant au niveau de la pelouse. Dans les parties ombrées, les rayonnements diffus et réfléchi dont les principales raisons pour lesquelles la visibilité à l'ombre d'un bâtiment n'est pas nulle.



**Figure 10** : Illustration du dispositif d'éclairage artificiel utilisé pour compenser le manque de lumière dans les parties ombrées (cas du Stade de Furiani à Bastia).

Dans le cas des stades de football, le problème d'ombrage des tribunes induit une dégradation de la pelouse qui se traduit par une perte de la couverture végétale. Afin de pallier ce manque de lumière, il est utilisé des rampes qui portent des sources lumineuses (Figure 10). Le type de source lumineuse utilisée est du sodium à haute pression. Afin d'optimiser l'utilisation de ces rampes lumineuses, la démarche consiste à prendre en compte les conditions de rayonnement *in situ*, effectuer un bilan qui permet de déterminer le temps d'utilisation des rampes lumineuses. Un portail Web a ainsi développé pour permettre au gestionnaire de la pelouse de connaître le bilan de lumière artificielle apportée et pour recevoir des préconisations sur le positionnement des rampes.

### Remerciements

Une partie de ce travail a été financée par Plante et Cité.

## Références bibliographiques

- Barillot R., Frak E., Combes D., Durand J.-L., Escobar-Gutiérrez A., 2010. What determines the complex kinetics of stomatal conductance under blueless PAR in *Festuca arundinacea*? Subsequent effects on leaf transpiration. *Annals of Botany* 61, 2795-2806.
- Bonhomme R., 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet (Eds.). *Crop Structure and Light Microclimate*. INRA, Paris. pp. 17-28.
- Moon P., Spencer D.E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illum. Eng. Soc.* 37, 707-726
- Combes D., Sinoquet H., Varlet-Grancher C., 2000. Preliminary measurement and simulation of the spatial distribution of the Morphogenetically Active Radiation (MAR) within an isolated tree canopy. *Annals of Forest Science* 57(5-6), 497-511.
- Combes D., Bousquet L., Jacquemoud S., Sinoquet H., Varlet-Grancher C., Moya I., 2007. A new spectrogoniophotometer to measure leaf spectral and directional optical properties. *Remote Sensing of Environment* 109, 107-117.
- Guyot G., 1989. Les signatures spectrales des surfaces naturelles. Collection Télédétection Satellitaire, Editions Paradigme. 178 p.
- Knipling E.B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1, 155-159.
- Robert P., Combes D., Mudri L., Farhat G., 2012. Extérieur nuit. Pour une anthropologie culturelle du paysage nocturne des parcs urbains. *Ambiances in action – International Congress on Ambiances*, Montreal 2012, Canada. International Ambiances Network, pp 279-284.
- Ross J., 1981. The Radiation regime and architecture of plant stands. The Hague, Dr Junk Publishers. 391 p.
- Sinoquet H., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1993. Modelling radiative transfer within homogeneous canopies: basic concepts. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et Sinoquet. H. (Eds.) *Crop Structure and Light Microclimate*. INRA-Editions, Paris, pp. 207-228.
- Smith H., Holmes M.G., 1977. The function of phytochrome in natural environment - III. Measurement and calculation of phytochrome photoequilibria. *Photochemistry and Photobiology* 25, 547-550.
- Smith H., 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*. 33, 481-518.
- Stenberg P., 1995. Penumbra in within-shoot and between-shoot shading in conifers and its significance for photosynthesis. *Ecological Modelling* 77 (2-3), 215-231.
- Varlet-Grancher C., 1975. Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables. *Annales agronomiques* 26 (3), 245-264.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)