

CHAPITRE I

Pratique de la mesure à l'Inra

Les capteurs actuels, leur principe de mesure et leur manipulation



Les Capteurs de mesures du rayonnement naturel

Jean-Marc Bonnefond¹

Résumé : *Cet article ne présentera pas une liste exhaustive des capteurs existants pour mesurer l'ensemble des rayonnements naturels. Il donnera une définition de l'intervalle des longueurs d'onde étudiées dans l'ensemble du spectre électromagnétique et les grandes catégories de capteurs utilisés pour quantifier l'énergie disponible par classe de longueurs d'onde et, enfin, des exemples de capteurs commerciaux et leurs caractéristiques techniques.*

Mots clefs : capteurs, rayonnement, climat lumineux, thermopile, pyranomètre, pyrgeomètre, pyrradiomètre, photomètre

Introduction

Cet article n'a pas pour vocation de faire une liste exhaustive de tous les capteurs existants pour mesurer l'ensemble des rayonnements naturels. Nous nous attacherons, tout d'abord, à définir l'intervalle des longueurs d'onde étudiées dans l'ensemble du spectre électromagnétique. Puis nous verrons les grandes catégories de capteurs que nous pouvons être amenés à utiliser pour quantifier l'énergie disponible par classe de longueurs d'onde. Enfin, nous donnerons des exemples de capteurs commerciaux ainsi que leurs caractéristiques techniques.

1. Le Spectre électromagnétique

On définit le spectre électromagnétique comme étant la décomposition en fréquence du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes. Ceci en termes de fréquence exprimée en Hertz (Hz), de longueur d'onde exprimée en mètre (m) et d'énergie de photon exprimée en Joule (J) ou en électron-volt ($1 \text{ e.V} = 1,06929 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Ces trois grandeurs ν (fréquence), λ (longueur d'onde) et E (énergie) sont liées deux à deux par la constante de Plank, h , et la célérité de la lumière, c , selon les formules :

$$E = h \cdot \nu$$

et

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$\text{donc } E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

avec $h = 6,626\ 068\ 96 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ (CODATA, 2006)

1.1 Etendue

L'étendue du spectre électromagnétique exprimée en longueur d'onde est d'environ 10^{-14} m à plusieurs km. Nous avons pris pour habitude de découper ce spectre en bandes ou gammes de

¹ INRA, UR1263 EPHYSE, - F-33140, Villenave d'Ornon ☎ 05 57 12 24 17 ✉ bonnefon@bordeaux.inra.fr

longueur d'onde (**figure 1**) auxquelles nous avons donné un nom bien particulier (**tableau 1**). Comme nous le voyons le spectre électromagnétique est immense et seule une toute petite partie de ce spectre est concernée par l'école technique et donc nous nous intéresserons dans la suite de cet article au seul rayonnement thermique naturel.

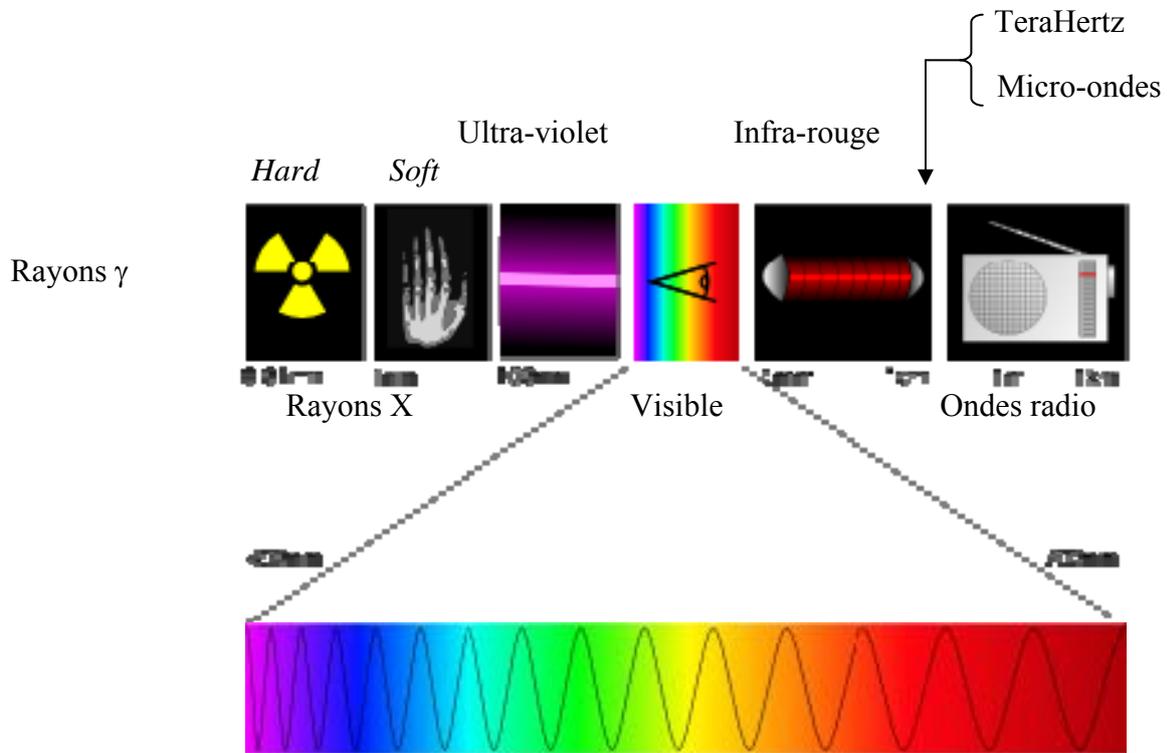


Figure 1 : *Le spectre électromagnétique*

Longueur d'onde	Domaine	Fréquence
10 cm	Radio	(3 GHz - 150 Kilo Hertz)
De 3 mm à 10 cm	Micro-onde et radar	(100 Giga Hertz - 3 GHz)
De 300 μm à 3 mm	Terahertz	(10 Tera Hertz - 100 GHz)
De 700 nm à 300 μm	Infrarouge	Lointain (100 μm - 300 μm) Thermique (5 μm - 100 μm) PIR et MIR (700 nm - 3 μm)
De 400 nm à 700 nm	Lumière visible	Rouge (620 nm - 700 nm) Orange (592 nm - 620 nm) Jaune (578 nm - 592 nm) Vert (500 nm - 578 nm) Bleu (446 nm - 500 nm) Violet (400 nm - 446 nm)
De 10 ⁻⁸ m à 4.10 ⁻⁷ m	Ultraviolet	UVa (320 nm - 400 nm) UVb (280 nm - 320nm) UVc (200 nm - 280 nm) (10 nm - 200 nm)
De 10 ⁻¹¹ m à 10 ⁻⁸ m	Rayon X	Soft (1 nano mètre - 10 nm) Hard (10 pico metres - 1 nm)
De 10 ⁻¹⁴ m à 10 ⁻¹¹ m	Rayon γ	(10 femto mètres - 10 pm)

Tableau 1 : *Classes de longueur d'onde du spectre électromagnétique*

1.2 Le rayonnement thermique naturel

On appelle communément rayonnement thermique tout rayonnement dont la longueur d'onde est directement reliée à la température de la source qui l'émet par la loi de Wien :

$$\lambda_{\max, \mu m} = \frac{2898}{T_K}$$

Avec λ_{\max} : longueur d'onde de la raie centrale de la bande d'émission (μm)
 T_k : Température de la source émettrice (K)

Les sources naturelles qui émettent des rayonnements thermiques et qui nous intéressent donc dans cette étude sont de deux natures : le Soleil et la voûte céleste.

- le soleil

L'astre a une température de surface de l'ordre de 6000 K, en suivant la loi de Wien, il émet un rayonnement dont la raie centrale est à 0,5 μm .

Le spectre lumineux s'étend d'environ 0,15 à 3 μm (**figure 2**) et peut être décomposé en différentes classes de longueurs d'onde (**tableau 2**)

Longueur d'onde	Domaine	Fréquence
De 700 nm à 3 μm	Infrarouge	PIR et MIR (700 nm - 3 μm)
De 400 nm à 700 nm	Lumière visible	Rouge (620 nm - 700 nm) Orange (592 nm - 620 nm) Jaune (578 nm - 592 nm) Vert (500 nm - 578 nm) Bleu (446 nm - 500 nm) Violet (400 nm - 446 nm)
De 10-8 m à 4.10-7 m	Ultraviolet	UVa (320 nm - 400 nm) UVb (280 nm - 320nm) UVC (200 nm - 280 nm)

Tableau 2 : Les classes de longueurs d'ondes du rayonnement émis par le soleil

Dans le jargon météorologique, ce rayonnement est aussi appelé rayonnement naturel de courte longueur d'onde.

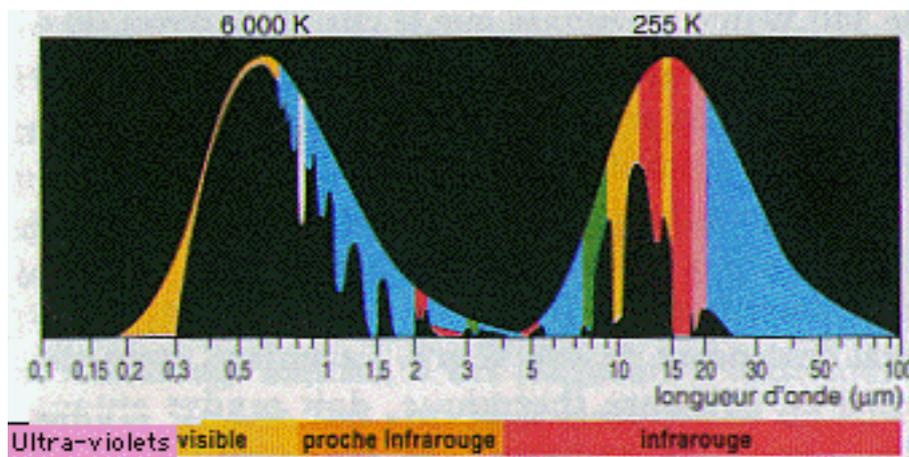


Figure 2 : Spectre des rayonnements thermiques naturels avec les raies d'absorption des principaux composés gazeux atmosphériques (O_3 , orange, CO_2 , rouge, H_2O , bleu)

- la voute céleste

Le vide intersidéral et les particules présentes dans l'atmosphère confèrent à la voute céleste une température apparente : le ciel que nous regardons depuis le point d'observation émet un rayonnement directement lié à cette température en suivant la loi de Stephan :

$$E = \sigma T_a^4$$

Avec σ : constante de Stephan, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
 T_a : Température apparente du ciel (K)

Le spectre lumineux s'étend d'environ 5 à 100 μm et présente la particularité d'être fortement absorbé par les composés gazeux atmosphériques (**figure 2**). Nous remarquons qu'au niveau du sol, seuls les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 5 et 25 μm arrivent. Les rayonnements de longueurs d'onde supérieures sont absorbés dans leur quasi-totalité par la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

2. La mesure du rayonnement thermique naturel

2.1 Les photorécepteurs

Comme nous venons de le voir, le rayonnement s'exprime selon sa longueur d'onde, sa fréquence ou l'énergie de ses photons.

Nous avons vu aussi que la longueur d'onde d'un rayonnement thermique naturel donné est liée directement à la température de la source qui l'émet. Ce rayonnement possède donc une énergie E reliée directement à cette longueur d'onde par la constante de Planck et la célérité de la lumière. Cet apport d'énergie à une surface réceptrice, va augmenter sa température. Il suffira donc de suivre les variations de la température de surface du capteur ainsi fabriqué pour en déduire l'énergie incidente. C'est ce que nous appellerons les « capteurs thermiques ».

Dans les courtes longueurs d'onde nous pouvons aussi utiliser la mesure directe de l'énergie des photons : en effet, nous avons vu aussi qu'un photon de lumière possède une énergie propre liée à la fréquence du rayonnement et à la célérité de la lumière. Il suffira d'utiliser ces quanta d'énergie arrivant à la surface d'un élément photosensible pour produire une force électromotrice fonction du nombre de photons. Ces capteur ainsi fabriqués seront appelés « capteurs quantiques ».

2.1.a Classification

- Récepteurs thermiques

Les récepteurs thermiques que nous rencontrons sont de deux types : les bolomètres et les thermopiles ; les deux utilisent le principe de la transformation de la température de surface de l'élément sensible en une force électromotrice. La différence entre les deux systèmes vient principalement du type de générateur d'énergie électrique utilisé, thermo-résistance, thermistance ou thermocouple.

- Récepteurs quantiques

La grande variété d'éléments, conducteurs ou semi-conducteurs, possédant des propriétés photoélectriques a permis de fabriquer de nombreux capteurs de ce type. Nous allons essayer de regrouper, dans cet article, l'ensemble de ces récepteurs en quatre grandes familles, les photorésistances, les photodiodes, les phototransistors et les photopiles (cellules photovoltaïques).

Quelle que soit la famille à laquelle ils appartiennent, les récepteurs possèdent tous un mode de fonctionnement commun basé sur l'émission ou le transfert d'électrons en fonction du nombre de photons impactant la surface du capteur. Cette émission ou transfert d'électrons crée une force électromotrice qui varie selon l'intensité et aussi la fréquence et donc la longueur d'onde du rayonnement.

2.1.b Caractéristiques

Quel que soit le type de capteur considéré, thermique ou quantique, il possède des caractéristiques qu'il est bon d'évaluer avant de choisir. Sans en faire une liste exhaustive nous allons lister celles qui nous semblent prioritaires.

- **Réponse en fonction de l'éclairement** : il faut citer en premier le domaine de linéarité puis les limitations du capteur pour des éclaircissements faibles (courant d'obscurité) ou forts (saturation).
- **Sensibilité** : elle est définie dans le domaine de linéarité, elle est le rapport de la réponse électrique à l'excitation lumineuse.
- **Rendement quantique** : uniquement pour les capteurs photoélectriques, c'est le nombre d'électrons échangés par photons impactant le capteur.
- **Réponse spectrale** : elle représente la sensibilité du capteur à la longueur d'onde du rayonnement.
- **Réponse temporelle** : c'est la rapidité du photorécepteur, elle est à relier à la constante de temps du capteur. Cette réponse temporelle peut varier de quelques ms pour des cellules photoélectriques à plusieurs secondes pour des capteurs thermiques.
- **Résolution spatiale** : elle est liée à la taille et à la géométrie de la surface active. Il est très important de prendre en compte cette caractéristique pour mesurer des éclaircissements au lever ou au coucher du soleil par exemple.

2.2 Les photorécepteurs thermiques

2.2.a Les thermopiles

Le principe est de transformer l'énergie rayonnante en force électromotrice (f.e.m.) en produisant de l'énergie électrique à l'aide de thermocouples. La f.e.m. ainsi produite est alors de la forme

$$E = a + b * (T - T_{ref}) + c * (T - T_{ref})^2$$

Avec a, b et c des constantes liées à la nature des deux matériaux,
T la température dite « chaude »,
T_{ref} température froide ou de référence.

Cette production d'énergie est appelée *effet Seebeck* ; cet effet est la combinaison de trois effets étudiés, indépendamment :

- **effet Thomson**, lorsqu'une partie d'un conducteur est chauffée il en résulte un flux d'électron de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide. Si la partie chauffée est le point de jonction de deux conducteurs de même matériau, le flux d'électrons est identique de part et d'autre de la jonction et la force électromotrice produite est nulle. Si, en revanche, le conducteur est constitué de deux matériaux différents, les flux d'électrons ne seront pas identiques et il en résultera une force électromotrice non nulle ;

- **effet Volta**, lorsque deux conducteurs de natures différentes sont mis en contact il en résulte une force électromotrice uniquement dépendante de la nature des deux matériaux.
- **effet Peltier**, il est défini comme étant la quantité d'énergie soit dégagée, soit absorbée au niveau d'une jonction de deux conducteurs différents suivant l'intensité et le sens du courant qui la traverse.

Il existe deux types de thermopiles utilisés, les thermopiles à échanges verticaux (Moll – Gorczynski) (**figure 3**) ou les thermopiles à échanges horizontaux (Linke, Cimel...) (**figure 4**).

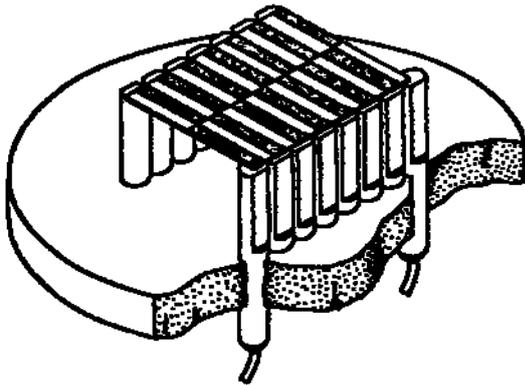


Figure 3 : Thermopile de Moll – Gorczynski

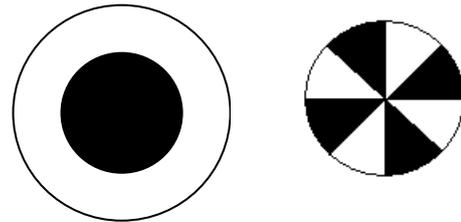


Figure 4 : Thermopile Noir/Blanc
(Linke, Cimel ...)

- Thermopiles à échanges thermiques verticaux

Le flux thermique arrivant à la surface de l'élément sensible, sur lequel sont collées les jonctions chaudes de thermocouples montés en série, est dirigé vers le corps du récepteur constitué d'un bloc dense en aluminium. Les jonctions froides ou de référence des thermocouples sont collées à ce corps. Il s'ensuit une différence de température entre le corps du capteur et sa surface qui dépend uniquement de l'intensité du rayonnement arrivant à sa surface (**figure 5**).

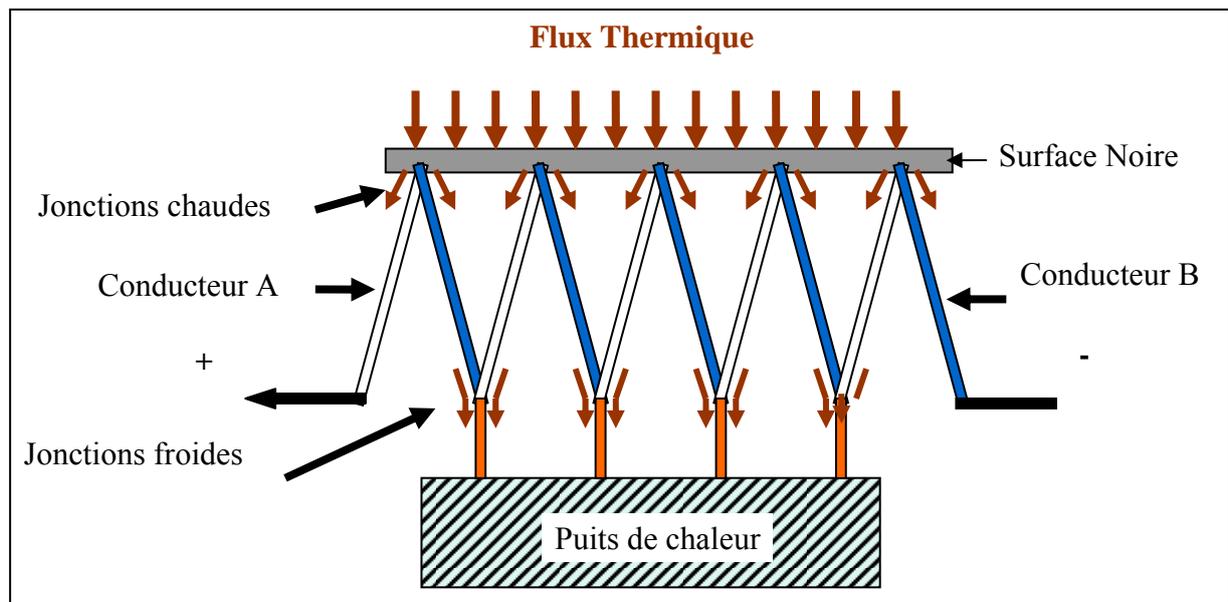


Figure 5 : Schéma de principe d'une thermopile à échanges thermiques verticaux

- Thermopiles à échanges thermiques horizontaux

Ces thermopiles sont constituées de deux surfaces soit concentriques soit juxtaposées, une de couleur blanche et l'autre de couleur noire. Pour stabiliser le système, la ou les surfaces noires sont reliées par un pont thermique au corps de l'appareil constitué d'un bloc dense en aluminium. Le flux thermique arrive simultanément sur les surfaces blanches et noires. Il en résulte une élévation de température différente des deux surfaces, la surface noire s'échauffant plus que la blanche. La force électromotrice produite est directement reliée à la différence de température entre les deux surfaces uniquement dépendante du flux thermique (**figure 6**).

Du fait des propriétés particulières des composants des surfaces noires et blanches (**tableau 3**), albédos différents et émissivités identiques, la différence de température entre les surfaces noires et blanches n'est fonction que de l'éclairement de courte longueur d'onde.

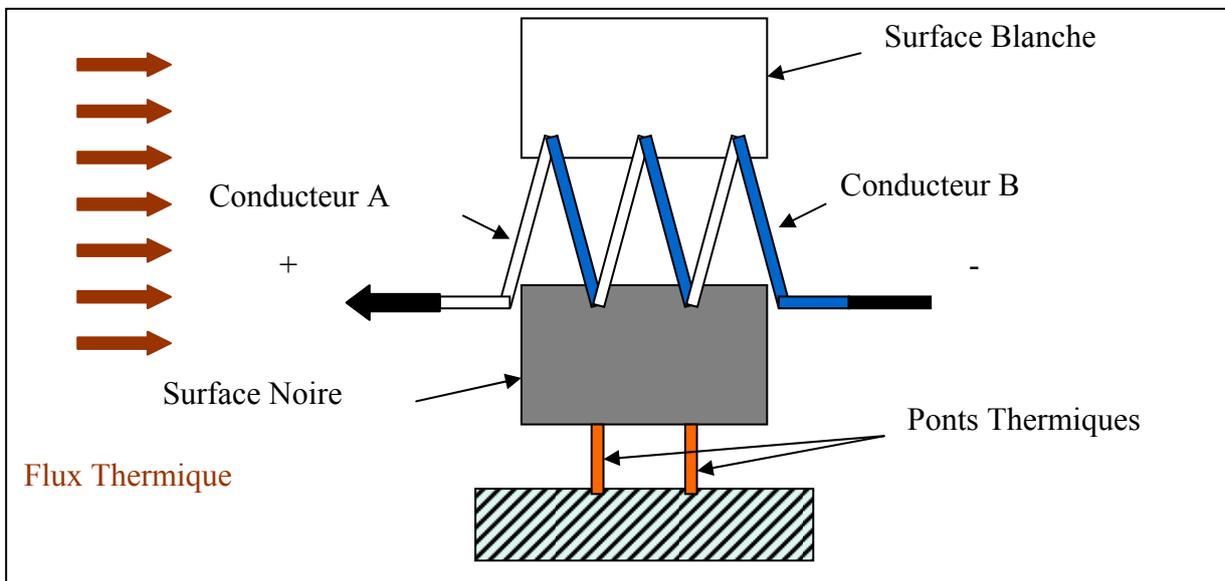


Figure 6 : Schéma de principe d'une thermopile à échanges thermiques horizontaux

Surface	Albédo	Emissivité
Blanche	≈ 1	≈ 1
Noire	≈ 0	≈ 1

Surface blanche : Sulfate de Baryum ($BaSO_4$)

Tableau 3 : Propriétés des surfaces blanches et noires de la thermopile à échanges thermiques horizontaux

2.2.b Les bolomètres

Dans cet appareil il n'y a pas de conversion d'énergie radiative en énergie électrique mais uniquement une mesure de la variation temporelle de température de la surface sensible à l'aide de thermo-résistance ou de thermistance (**figure 7**).

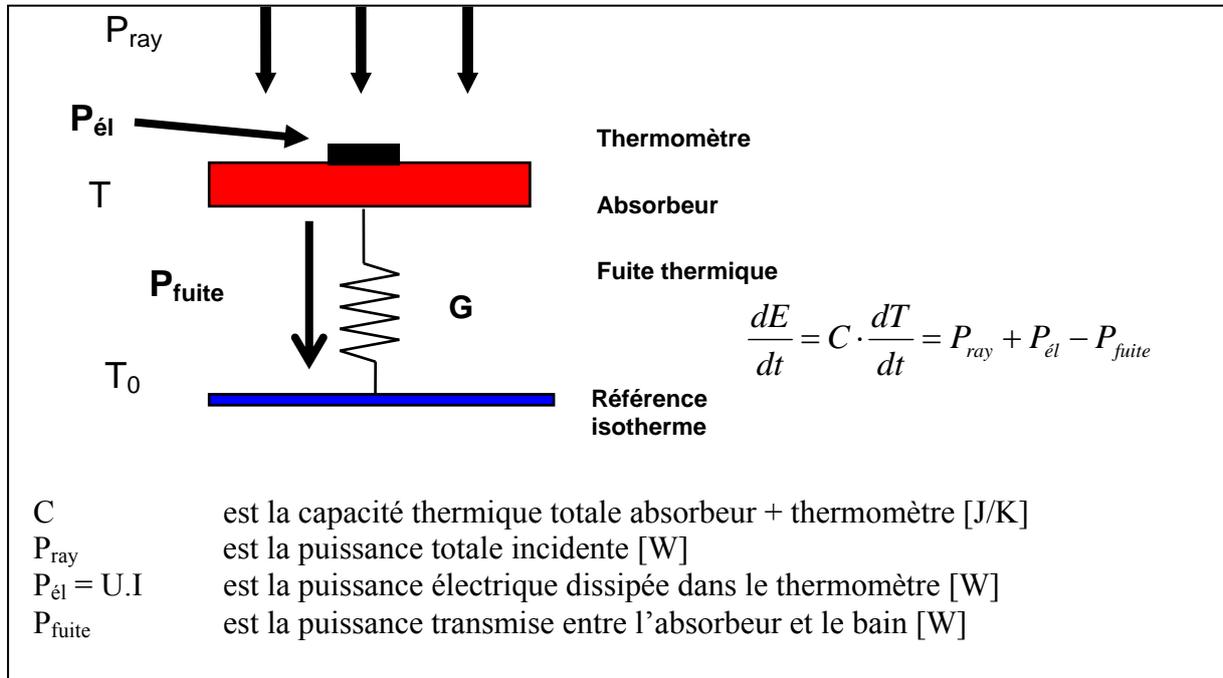


Figure 7 : Schéma de principe et de fonctionnement du bolomètre

Les thermo-résistances et les thermistances sont des thermomètres formés respectivement de conducteurs métalliques ou de semi-conducteurs.

Les lois de variations en fonction de la température sont :

- **thermo-résistances**

$$R_{(T)} = R_0 * (1 + a * (T - T_0) + b * (T - T_0)^2 + \dots)$$

Avec R_0 , résistance du conducteur à 0°C
 a, b, \dots caractéristique du matériau en K^{-1}

la thermo résistance la plus utilisée dans le monde de l'industrie et donc la plus connue est la sonde Pt100 qui est une sonde de platine (Pt) de 100Ω à 0°C avec $a = -3,908 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ et $b = -5,802 \cdot 10^{-7} K^{-1}$

- **thermistances**

$$R_{(T)} = a * e^{b/T}$$

Avec a et b des constantes liées au matériau semi conducteur.

Les thermistances sont plus sensibles que les thermo-résistances mais aussi moins précises pour les hautes températures du fait de la loi en exponentielle.

2.3 Les photorécepteurs quantiques

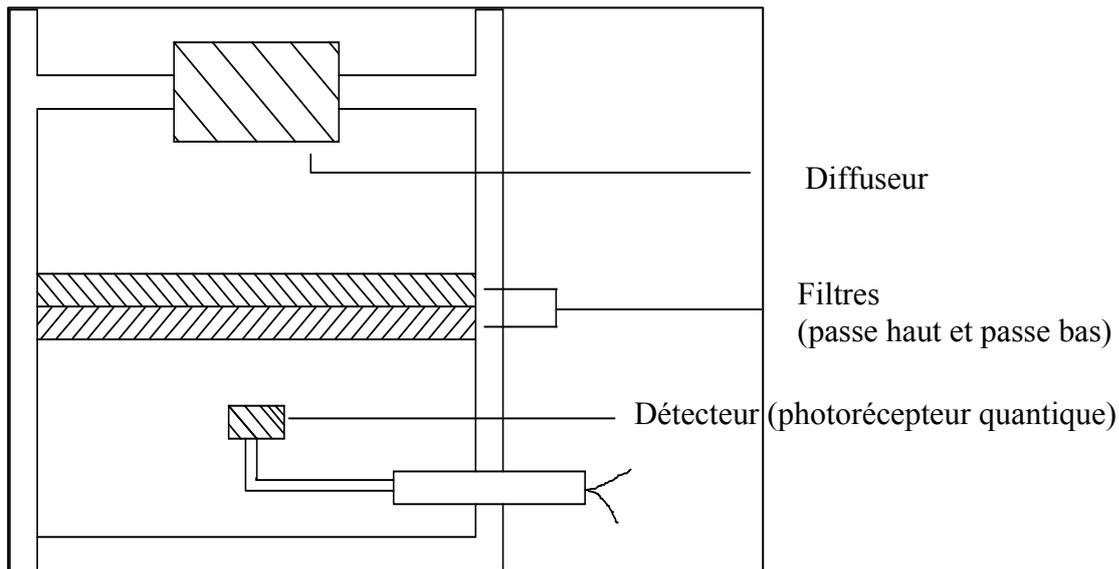


Figure 8 : Schéma de principe d'un quantum-mètre ou capteur quantique

2.3.a Les photorésistances

Les photorésistances sont des composants électroniques dont la résistivité varie en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la lumière qui les atteint. Cette résistivité peut être supérieure à $1\text{M}\Omega$ dans l'obscurité et inférieure à $1\text{k}\Omega$ en pleine lumière. Elles sont en général constituées d'un serpentin de composé conducteur, qui se comporte comme un semi-conducteur, déposé sur une plaque de céramique.

Leur domaine spectral est quasi identique à celui de l'œil humain et les différences entre les différents composés sont plutôt du domaine des temps de réponses, notamment dans l'obscurité.

Comme toutes les résistances, elles présentent la particularité de ne pas être polarisées. Les principaux matériaux utilisés pour leur conception sont le sulfure de cadmium (CdS), le sélénure de cadmium (CdSe), le tellure de cadmium (CdTe) ou le sulfure de plomb (PbS).

Nous les trouvons aussi sous d'autres noms comme résistance photo-dépendante (light-dependent resistor - LDR) ou photoconducteur.

2.3.b Les photodiodes

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. À l'inverse d'une LED (diode électro lumineuse), qui produit de la lumière, la photodiode utilise de la lumière pour réaliser une fonction spécifique.

À la base, une photodiode fonctionne comme une photorésistance et donc dans l'obscurité totale, la résistance est très élevée et ne conduit que très peu de courant. Mais lorsque la jonction PN est exposée à la lumière, la résistance interne décroît et le courant augmente.

Les photodiodes peuvent être utilisées sous deux modes :

- le mode photovoltaïque où, en l'absence de polarisation, elles génèrent une tension ;
- le mode photoampérique où, utilisées en polarisation inverse à l'intérieur d'un circuit électrique, elles génèrent un courant directement proportionnel à l'intensité lumineuse.

2.3.c Les phototransistors

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite ICE_0 . Lorsque la base est éclairée, il apparaît un photo-courant I_{ph} dans la jonction collecteur-base sous la forme : $I_c = \beta I_{ph} + ICE_0$.

Celui-ci est donc le photo-courant de la photodiode collecteur-base multiplié par le gain β du transistor. Ce courant est donc nettement plus élevé que celui d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus) et il rend donc le phototransistor beaucoup plus sensible. En revanche, cela a pour effet négatif d'augmenter le courant d'obscurité. Un autre problème est que la constante de temps d'un phototransistor est bien plus élevée que celle d'une photodiode.

2.3.d Les photopiles ou cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque ou photopile est un photorécepteur qui transforme directement la lumière du soleil en énergie électrique. Elle se présente sous la forme d'une plaque de silicium pouvant aller d'une surface de quelques millimètres carrés pour un capteur météorologique à plusieurs mètres carrés pour le toit d'une maison.

Le principe de fonctionnement est identique à celui d'une photodiode où les photons vont exciter les électrons du silicium ce qui génère une force électromotrice.

- Bande passante

De façon générale le silicium a un gap de 1,1 eV ($\lambda \approx 1,13 \mu\text{m}$, moyen infrarouge et au-delà) : si l'énergie des photons est inférieure à 1,1 eV, les photons vont traverser le matériau sans être absorbés et ne vont pas générer de photo-courant.

A l'opposé, si l'énergie des photons dépasse les 3 eV ($\lambda \approx 0,414 \mu\text{m}$, ultraviolet et en-deçà), l'absorption est élevée mais elle ne se fait qu'en surface et les photo-courants générés sont immédiatement recombinés et ne participent pas à un courant utile.

Nous sommes en présence d'une bande passante entre $0,414 \mu\text{m}$ et $1,13 \mu\text{m}$ qui correspond, à peu près, au rayonnement visible plus le rayonnement de proche infrarouge.

- Nature des matériaux

Pour fabriquer des cellules photovoltaïques, deux grands types de silicium sont utilisés :

- le **silicium amorphe** est obtenu par évaporation sous vide du silicium et déposé sur une plaque de verre. Il est de couleur gris-noir et il ne présente pas de structure cristalline apparente. Sa bande passante est comprise entre $0,414$ et $0,75 \mu\text{m}$ centrée sur $0,5 \mu\text{m}$ et donc proche de la bande passante de l'œil humain correspondant au rayonnement visible et au rayonnement photo synthétiquement actif (PAR).

Ce matériau a un maximum d'efficacité par temps couvert, le spectre lumineux dans ce cas étant essentiellement constitué de lumière bleue. Il présente malheureusement l'inconvénient de mal vieillir et de voir sa sensibilité diminuer avec le temps.

- le **silicium cristallin** est obtenu par la fonte du silicium puis refroidi en bloc plus ou moins brutalement et découpé en tranches fines appelées wafers. Il est de couleur bleue avec deux aspects possibles :

- uniforme, silicium monocristallin obtenu par refroidissement lent et contrôlé du silicium ;
- non uniforme, silicium polycristallin obtenu par refroidissement rapide du silicium.

Sa bande passante est comprise entre $0,414$ et $1,13 \mu\text{m}$, elle couvre donc le rayonnement visible mais aussi le proche infrarouge et donc la majeure partie de l'énergie de courte longueur d'onde arrivant au sol.

Sa sensibilité est stable dans le temps mais sa fabrication est assez onéreuse. De plus, s'il est utilisé pour mesurer uniquement le rayonnement visible, des filtres interférentiels sont indispensables.

2.4 Choix du type de photorécepteur

Ce choix est guidé par l'utilisation finale du capteur. Il est aisé de penser que si nous nous intéressons à l'énergie utilisable par un couvert végétal, pour l'évapotranspiration par exemple, le plus simple est d'utiliser des capteurs qui mesurent directement cette énergie.

De la même façon, si nous nous intéressons à des réactions mettant en jeu les quanta d'énergie, comme la photosynthèse par exemple, l'utilisation de capteurs quantiques serait plus indiquée.

Nous avons déjà vu qu'il est possible de mesurer ou d'en avoir une estimation assez précise, l'énergie du rayonnement de courte longueur d'onde en utilisant des capteurs quantiques. En effet, la bande 0,414 à 1,13 μm du silicium cristallin représente la quasi-totalité de l'énergie solaire qui arrive au niveau de la mer. Le rayonnement photo synthétiquement actif, 0,414 et 0,75 μm , représente à lui seul plus de 50% de cette énergie (**figure 9**).

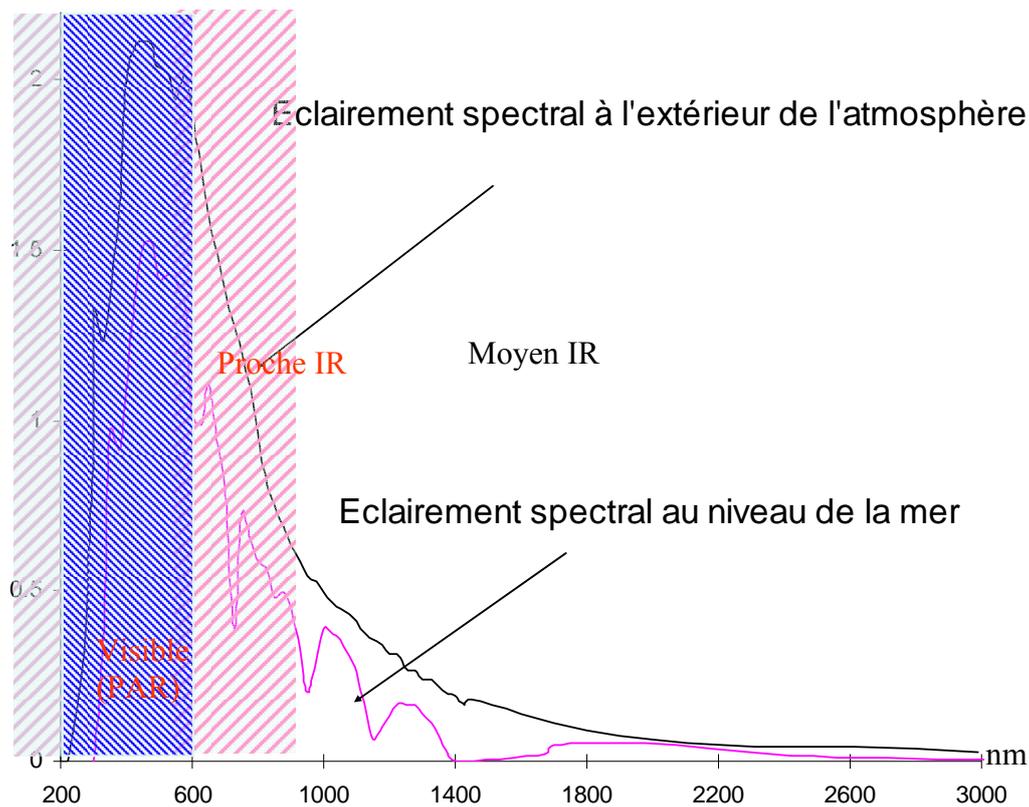


Figure 9 : Répartition en énergie de l'éclairement solaire

L'intérêt d'utiliser cette technologie est bien évidemment, en dehors d'un temps de réponse bien plus court, que le coût des capteurs au silicium est environ 10 fois moins élevé que celui des capteurs thermiques.

Cependant l'utilisation de photomètres au silicium pour estimer le rayonnement global implique de prendre des précautions lors de leurs utilisations.

Tout d'abord le rapport PAR / rayonnement solaire global (Rg) n'est pas constant tout au long de la journée. Ce rapport est fonction de la composition spectrale du rayonnement. Il présente donc des variations importantes aux incidences rasantes des levers et des couchers du soleil, lumière essentiellement rouge ou lors de temps couvert, lumière essentiellement bleue (**figure 10**). Le ratio moyen de $2,08 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ couramment utilisé dans les conversions PAR / Rg n'est donc valable que sous certaines conditions.

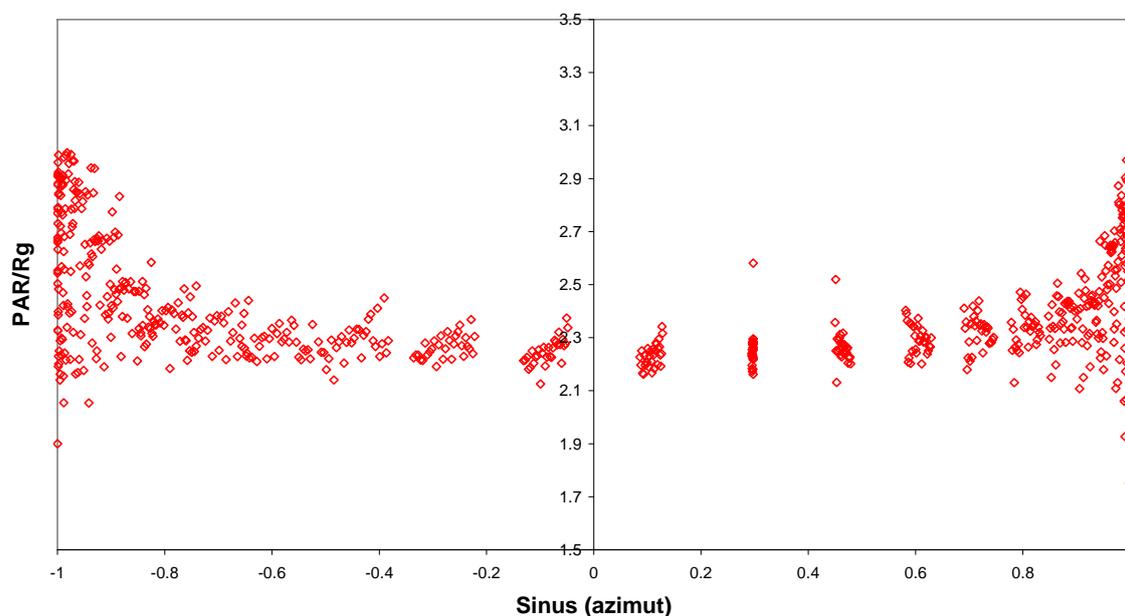


Figure 10 : Relation PAR/Rg en fonction du sinus de l'azimut solaire

Un autre problème lié à l'utilisation de capteurs quantiques, en tant que capteurs d'énergie, est l'impossibilité de les utiliser sous les couverts végétaux pour caractériser le microclimat lumineux énergétique d'un sous-bois par exemple.

En effet, lors de la traversée du feuillage, les bandes violette, bleues, orange et rouges sont interceptées et utilisées par la plante pour la production de chlorophylle. La lumière est donc constituée principalement des bandes vertes (réflexion) et jaune (transmission), il y a donc une modification du spectre lumineux et une modification importante du rapport PAR / Rg qu'il est difficile pour ne pas dire impossible de quantifier.

En conclusion, les capteurs quantiques peuvent être utilisés pour mesurer l'énergie radiative solaire au-dessus d'un couvert végétal ou dans une serre (pas de modification du spectre solaire par le verre) sous certaines conditions mais leur utilisation est impossible sous un couvert végétal ou en lumière artificielle. Malgré cela ce sont des appareils stables dans le temps ($\pm 2\%$ /an), de bonne précision ($\pm 5\%$) et avec un faible coefficient de dérive en température ($\pm 0,1\%$). Ils possèdent, de plus, une constante de temps faible et sont efficaces pour les faibles éclaircissements.

3. Les appareils de mesure

Tous les appareils servant à mesurer les rayonnements naturels sont des radiomètres parfois aussi appelés optomètres. Pour chaque classe de longueurs d'onde, on donne un nom spécifique à l'appareil de mesure, quel que soit le type de photorécepteur utilisé.

3.1 La mesure des ultraviolets

Les ultraviolets (UV) sont des rayonnements dont la longueur d'onde, λ , est comprise entre 200 et 400 nm. Ils représentent environ 5% de l'énergie totale émise par le Soleil mais absorbés par l'ozone et les gaz atmosphériques ils sont très sensibles à l'épaisseur d'atmosphère traversée. C'est la raison principale du taux élevé de ces rayonnements en été entre 11 h et 16 h et en altitude. Ils sont réfléchis par l'eau (coeff. Réfl. = 5%), le sable (20 %), l'herbe (5 %) et la neige (85 %).

S'il est coutumier de dire qu'ils ont peu ou pas d'intérêts agronomiques (sauf sur certaines conidies ou bactéries), ils intéressent la communauté scientifique travaillant sur la santé humaine. En effet si les UV sont divisés en 3 classes, les UVc (λ de 200 à 280 nm), les UVb (λ de 280 à 320 nm) et les UVA (λ de 320 à 400 nm), du fait de la couche d'ozone troposphérique 99 % des UV arrivant à la surface de la Terre sont des UVA. Bien qu'étant les moins énergétiques, ce sont les plus pénétrants. Ils peuvent traverser une vitre et pénétrer la peau jusqu'au derme et à trop forte dose, ils sont responsables des cancers de la peau car ils perturbent l'ADN de la cellule.

Du fait de la faible part de rayonnement UV ils sont mesurés généralement en $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, certains de ces appareils sont montrés dans la **figure 11** et leurs caractéristiques dans le **tableau 4**.

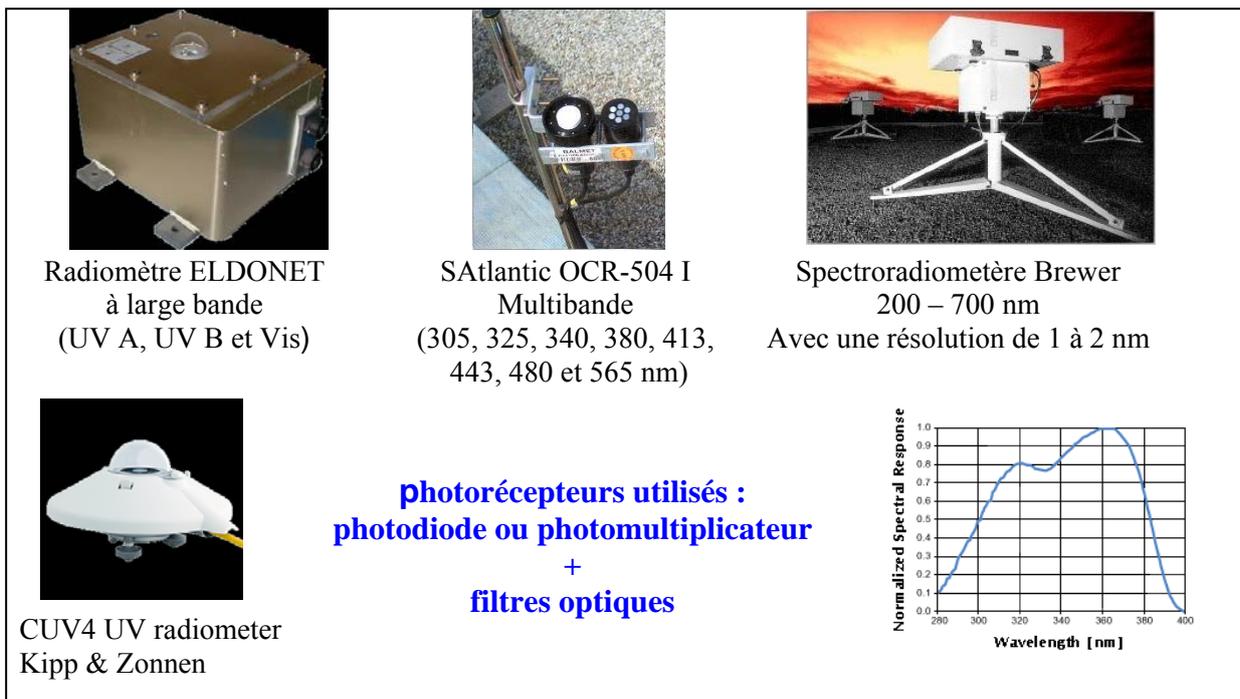


Figure 11 : Exemples de radiomètres UV

Justesse des capteurs

CON-TROL-CURE : $\pm 5 \%$
 KONICA : Linearity $\pm 5 \%$
 EIT : $\pm 7 \%$ @ 25°C, -0.2% per °C
 DeltaT : $\pm 7.5 \%$
 Kipp & Zonnen CUV4 : non-linéarité <1%
 Directional Error <10%
 ELDONET : $\pm 8 \%$ pour les UV B et $\pm 4 \%$ pour les UV A
 SATlantic : $\pm 4 \%$

Tableau 4 : Caractéristiques de quelques radiomètres UV

3.2 La mesure du rayonnement visible

Le rayonnement visible est la partie du spectre solaire dont la gamme des longueurs d'onde λ qui le composent s'étend de 400 à 700 nm. Il représente environ 50 % de l'énergie totale émise par le Soleil et il est principalement absorbé par la vapeur d'eau lors de la traversée de l'atmosphère.

Ce rayonnement a un intérêt agronomique important, il est à la base du mécanisme de photosynthèse du gaz carbonique par les végétaux. Nous l'avons déjà vu, il est décomposé en bandes de couleurs allant du violet (400 nm) au rouge (750 nm). Seules certaines de ces bandes sont utilisées pour la photosynthèse (bandes bleues, violette, orange et rouges), les autres sont soit réfléchies soit transmises (**figure 12**).

Ce rayonnement est aussi appelé rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR : photosynthetically active radiation), ou, s'il est exprimé en $\mu\text{moles de photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, PPFD (photosynthetic photon flux density).

Les unités utilisées sont principalement les $\mu\text{moles de photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (végétaux) ou les Lux (habitat).

Les radiomètres utilisés pour la mesure du rayonnement visible sont généralement appelés quantum-mètres ou luxmètres (**figure 13 et tableau 5**).

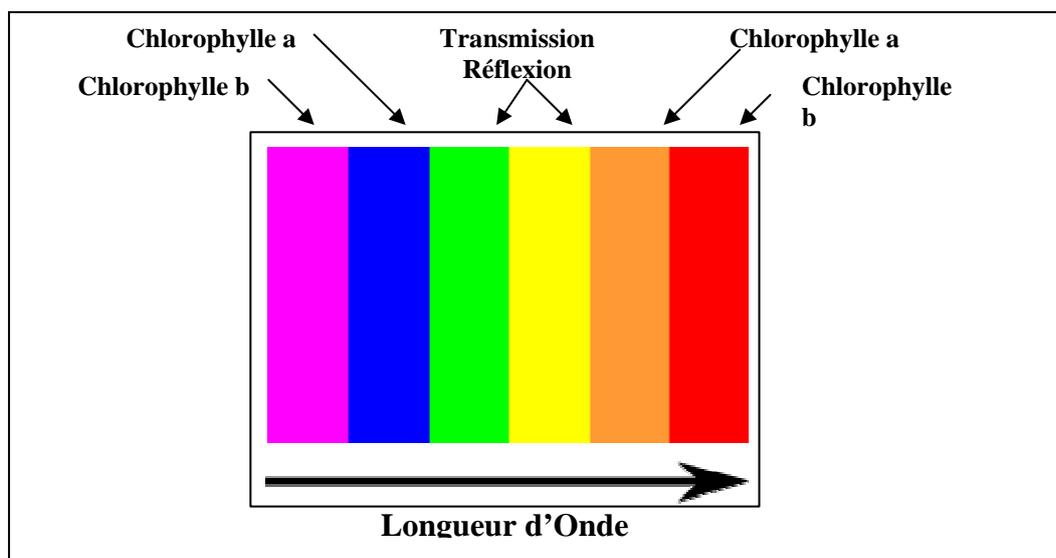


Figure 12 : Utilisation des différentes λ du P.A.R. par la végétation



Figure 13 : Exemple de capteurs utilisés pour la mesure du rayonnement visible

<p>Si Photodiode ☞ alimentation en général entre 7 et 15 V</p> <p>Temps de réponse < 1s voire < 0,2s</p> <p>Justesse des capteurs</p> <p>LiCor Li-190 : ± 5% MAX</p> <p>Skye SKP215 : < ± 3% Typ, ± 5% MAX</p> <p>DeltaT BF3 : PAR Total ± 12 % de la lecture PAR Diffus ± 15 % de la lecture</p> <p>Kipp & Zonnen PAR Lite : ± 10 %</p>

Tableau 5 : Caractéristiques de quelques quantum-mètres ou luxmètres

3.3 La mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble du spectre de rayonnement émis par le soleil, c'est l'ensemble des longueurs d'onde λ comprises entre 0,3 et 3 μm .

Il comprend les ultraviolets, le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge.

Lors de la traversée de l'atmosphère il est absorbé principalement par l'ozone, la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Une partie de ce rayonnement arrive au sol de manière directionnelle, rayonnement direct, et une autre partie est diffusée par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère, rayonnement diffus.

Ce rayonnement est le moteur principal de tous les échanges entre les végétaux et l'atmosphère d'où son intérêt agronomique (Evapotranspiration, photosynthèse, etc.)

L'unité de mesure couramment utilisée est le W/m^2 .

3.3.a Le rayonnement global

Symbolisé R_g , c'est l'ensemble du rayonnement solaire, suivant ses deux composantes directe et diffuse, qui arrive au niveau du sol. Les appareils pour le mesurer sont appelés pyranomètres et ils sont fabriqués sur la base de photorécepteur thermiques (**figure 14 et tableau 6**) ou quantiques (**figure 15 et tableau 7**).

- Pyranomètres à photorécepteurs thermiques

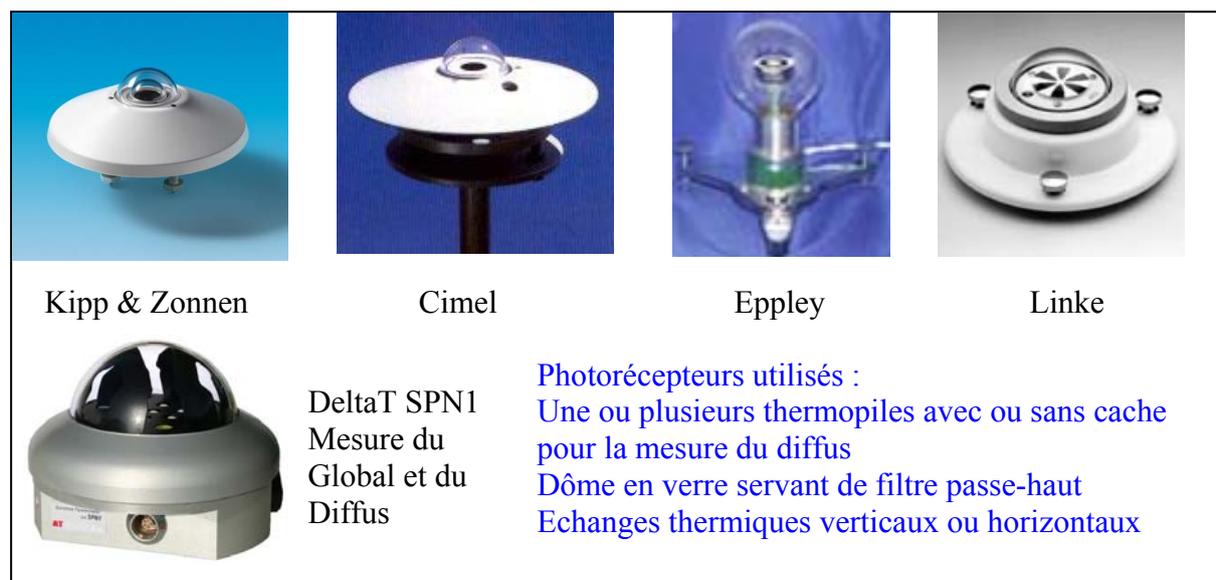


Figure 14 : Exemple de pyranomètres à photorécepteur thermique

Temps de réponse de ≈ 5 à 30 s
Justesse des capteurs :
Cimel CE 180 : $\pm 1\%$ (classe 2)
DeltaT SPN1 : R Global : $\pm 5\%$
R Diffus : $\pm 5\%$
Kipp & Zonnen CMP 3 : $\pm 10\%$ MAX (classe 2)
CMP 6 : $\pm 5\%$ MAX (classe 1)
CMP 22 : $\pm 1\%$ MAX (standard secondaire)

Tableau 6 : Caractéristiques de quelques pyranomètres « thermiques »

- Pyranomètres à photorécepteurs quantiques



Figure 15 : Exemple de pyranomètres à photorécepteurs quantiques

Temps de réponse de < 1s

Justesse des capteurs :

Allweather 3120 : ± 5%

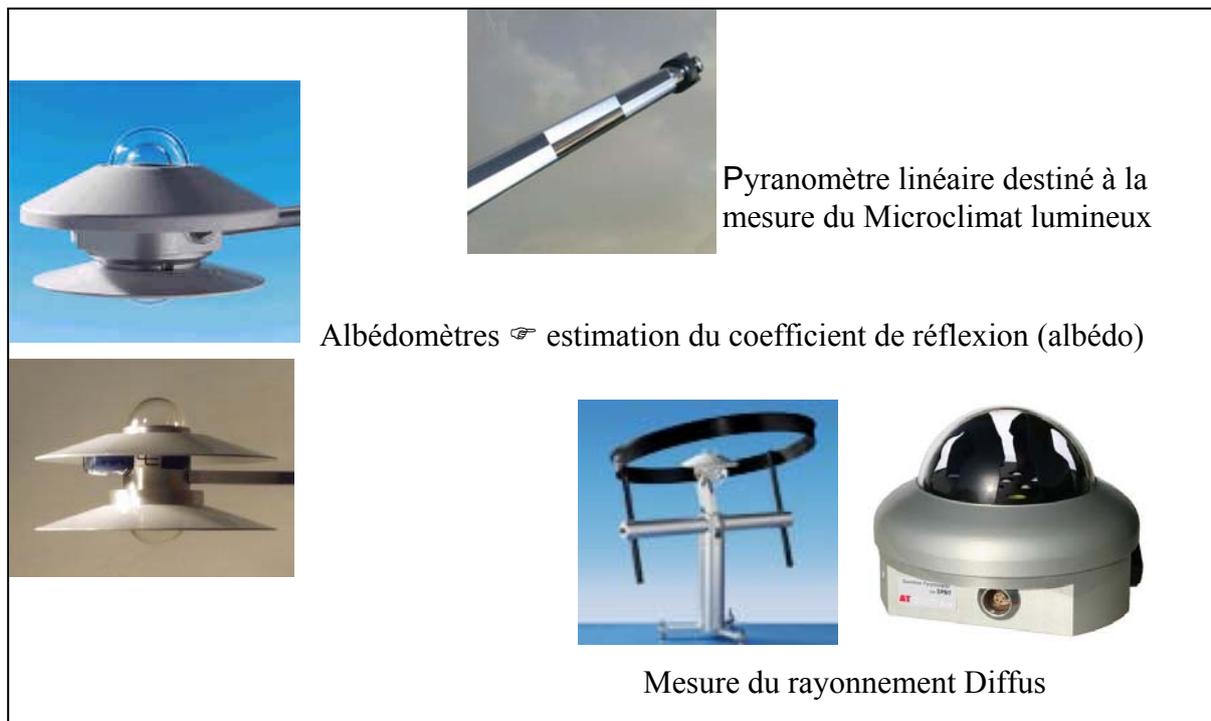
DeltaT ES2 : ± 3 %

LiCor Li-200 : ± 5 %

Kipp & Zonnen SP Lite : ± 3 %

Tableau 7 : Caractéristiques de quelques pyranomètres « quantiques »

- Utilisation particulières des pyranomètres



3.3.b Le Rayonnement Direct

Ce rayonnement est la composante directe du rayonnement solaire et sa composition spectrale est identique. C'est en fait le pinceau lumineux émis par le disque solaire.

Il est directionnel et il est donc nécessaire pour le mesurer, de suivre la course du soleil à l'aide d'un système piloté informatiquement.

Les appareils utilisés pour le mesurer sont appelé pyréliomètres (**figure 16**) et, comme pour le rayonnement global, sa valeur est exprimée en W/m^2 .

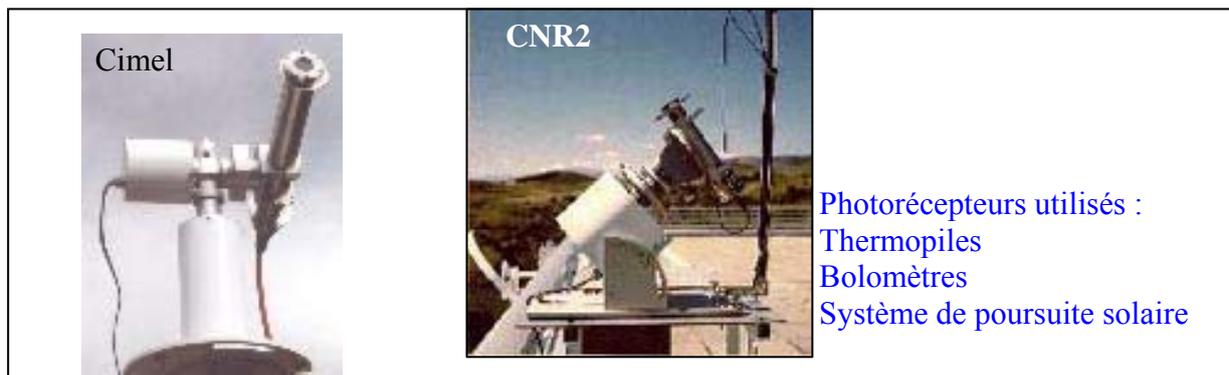


Figure 16 : Exemples de pyréliomètres

La mesure du rayonnement direct couplé à la mesure de la luminance du ciel permet de définir l'épaisseur optique, permettant de calculer un facteur d'atténuation du rayonnement, et il est mesuré à l'aide de photomètres (**figure 17**).

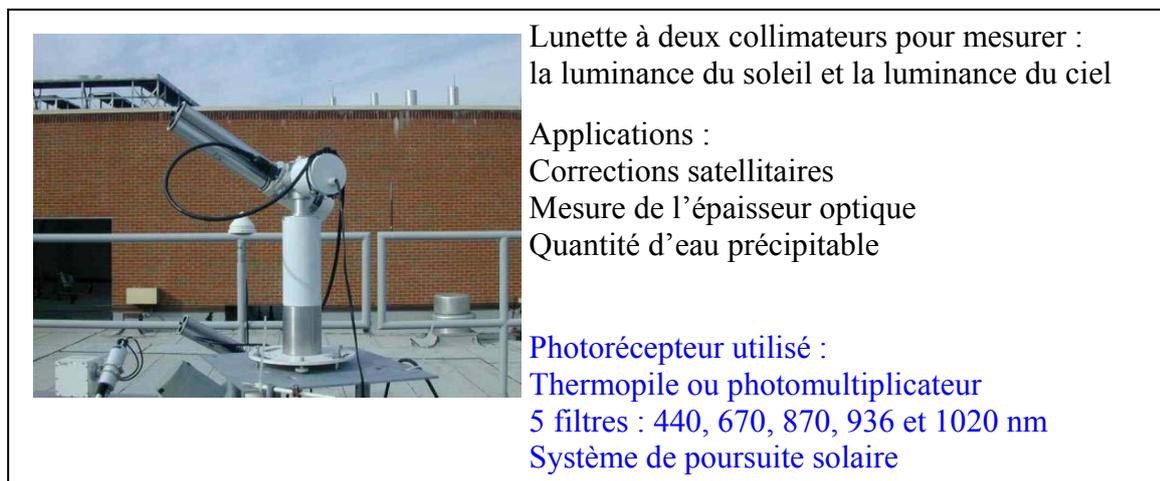


Figure 17 : Exemple de photomètre

3.4 La mesure du rayonnement infrarouge thermique

Le rayonnement thermique ou rayonnement infrarouge lointain est l'ensemble du spectre de rayonnement lié à la température apparente du ciel, la gamme des longueurs d'onde qui le composent s'étend de 5 à 100 μm et il ne provient pas d'une direction privilégiée (omnidirectionnel).

Il est absorbé fortement par les composés gazeux atmosphériques (ozone, vapeur d'eau, gaz carbonique, GES) lors de la traversée de l'atmosphère et il présente des intérêts agronomiques et environnementaux (effet de serre, évapotranspiration, gelées radiatives, etc.)

Il est mesuré uniquement avec des photomètres utilisant des thermopiles de type Moll-Gorczyński ou des bolomètres associés à un filtre passe-bas et sa valeur est exprimée en W/m^2 .

Les appareils utilisés pour le mesurer sont appelés pyrgéomètres (**figure 18 et tableau 8**)

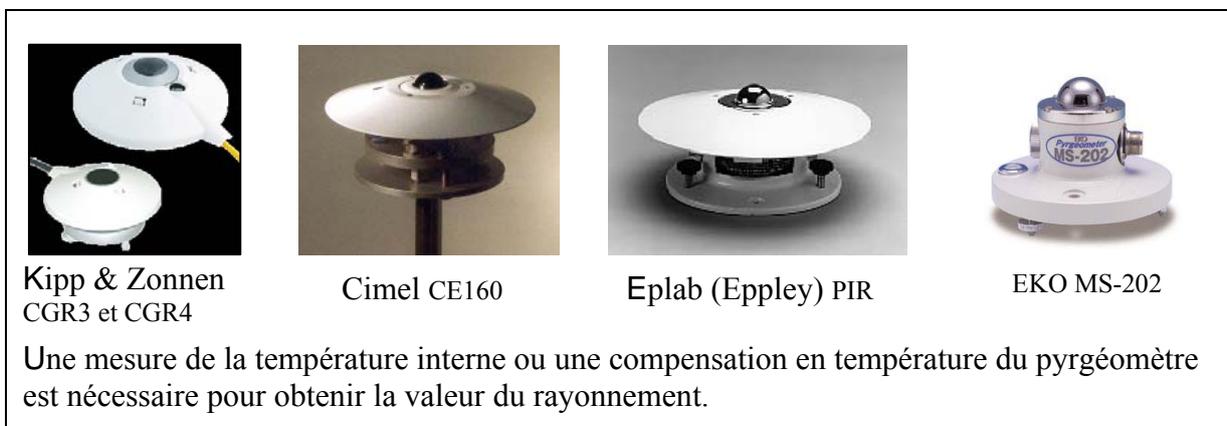


Figure 18 : Exemples de pyrgéomètres

Temps de réponse de ≈ 2 à 30 s

Justesse des capteurs

La précision des capteurs est essentiellement liée à la qualité optique du filtre (Transparence à l'infrarouge)

Cimel CE160 : $\pm 1\%$, qualité du filtre ?

EPLAB et EKO : pas d'information, mais considéré comme des capteurs de grande précision

Kipp & Zonnen, offset à $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ lié au filtre :

CGR 3 : $< 15 \text{ W}/\text{m}^2$

CGR 4 : $< 4 \text{ W}/\text{m}^2$

Tableau 8 : Caractéristiques de quelques pyrgéomètres

3.5 La mesure de l'ensemble des rayonnements naturels

Pour mesurer la totalité des rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 0,3 et 100 μm nous utilisons des pyrromètres (**figure 19**).

Comme pour le rayonnement infrarouge thermique ces appareils sont uniquement constitués à partir de thermopile Moll-Gorcziński. Dans ces appareils, la différence avec les pyrromètres vient uniquement de l'absence de filtre de façon à mesurer, simultanément et avec la même thermopile, les rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'onde.

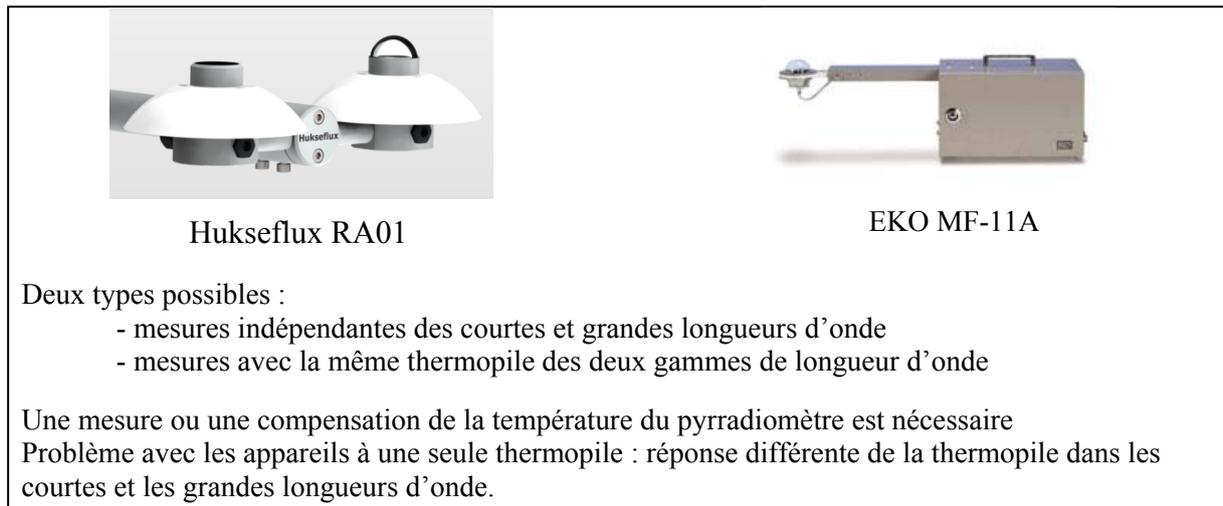


Figure 19 : Exemples de pyrromètres

Dans la pratique, il est rare de ne s'intéresser qu'aux rayonnements naturels incidents. Aussi, les appareils couramment utilisés sont des pyrromètres différentiels ou bilanmètres (**figure 20**) qui servent à mesurer directement le bilan d'énergie du couvert ou de la surface sous le capteur.

Le bilan d'énergie radiative d'un couvert végétal n'est autre que l'énergie utilisée par celui-ci pour son fonctionnement.

Deux types d'appareils coexistent, ceux qui donnent directement le bilan radiatif et constitués de deux thermopiles mises tête-bêche, reliées électriquement entre-elles et des appareils indépendants à deux ou quatre thermopiles où les signaux électriques sont enregistrés séparément. Le problème majeur que rencontrent les appareils à deux thermopiles est que la réponse de chaque thermopile est différente dans les courtes et les grandes longueurs d'ondes ce qui induit des erreurs importantes sur la mesure du bilan d'énergie. Il vaudra donc mieux privilégier l'utilisation de pyrromètres différentiels à quatre thermopiles dont le prix d'achat est sans commune mesure avec les précédents (**tableau 9**).



Figure 20 : Exemples de pyrromètres différentiels ou bilanmètres

	Schrenk 8111	Kipp& zonnen NR Lite	Kipp& zonnen CNR1	Kipp& zonnen CNR2
Capteur de température	Pt100		Pt 100	
Gamme Spectrale	0.3 – 30 μm	0.2 – 100 μm	0.3 – 3 μm sw 5 - 42 μm Lw	0.3 – 3 μm sw 4.5 - 40 μm Lw
Effet de la température du dôme			< 25 W/m ² Lw	< 25 W/m ² Lw
Erreur sur l'orientation	< 5%	< 30 W/m ² sw	< 25 W/m ² sw ? Lw	< 25 W/m ² sw ? Lw
Temps de réponse	< 25s (95%) < 45s (99%)	< 60 s (95%)	< 18s (95%) sw < 18s (95%) Lw	< 10s (95%) sw < 10 s (95%) Lw
stabilité	< 3% par an			
Effet de la température	< 2%		< 4% sw < 4% Lw	< 5% sw < 5% Lw
Incertitude journalière			< 10% sw ? Lw	< 10% sw ? Lw

Tableau 9 : Caractéristiques de quelques pyrromètres différentiels

Conclusion

Il existe pour chaque domaine spectral, des capteurs bien spécifiques. Il est donc important de bien savoir ce que nous voulons mesurer. Nous avons vu aussi que des capteurs, pour un domaine spectral considéré, ont des caractéristiques physiques différentes des uns aux autres

et que, bien souvent, leur coût ou les conditions d'utilisation sont liés à ces différences ; pour ces raisons nous devons définir nos besoins avec précision avant d'effectuer le choix.

Enfin, quelque appareil de mesure de rayonnement que ce soit délivre un signal dépendant de ce qu'il voit. Aussi, lors de la mise en place, on doit s'assurer que l'environnement du capteur correspond bien à la mesure à réaliser et que l'appareil est correctement positionné.

Bibliographie

Guyot G. (1992) Le rayonnement. Cours de Bioclimatologie, Chapitre 1, ENSA, Montpellier, 56p.

Mermier M., Dayau S., Baculat B., Ripoche D. (1995) Mesures de rayonnement et mesures radiométriques, Actes de l'Ecole Chercheur, Inra, Le Croisic 1995, 295-309

Perrin de Brichambaut Ch. (1963) Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Gauthier-Villars, 300p.

Mesure des rayonnements de grande longueur d'onde

Myriam Dauzat ¹, Dominique Flura ²

Résumé : Nous présentons trois types d'appareils qui utilisent la mesure de grandes longueurs d'onde (aux environs des 10 μm) pour des mesures de rayonnement atmosphérique ou des mesures de températures sans contact. Une description sera suivie des précautions à prendre lors des mesures puis d'exemples d'utilisation dans nos recherches. Cet article se veut pratique et l'occasion d'échanges de méthodes ou d'impressions, et surtout il a pour but de sensibiliser les utilisateurs des températures de surface à l'échelle du couvert mais aussi de la plante aux influences possibles de l'environnement sur les mesures.

Mots clés : Pyrgéomètre, rayonnement atmosphérique, température radiative, thermomètre infrarouge, caméra infrarouge, émissivité, température de réflexion.

Introduction

Tout corps émet un rayonnement dont la longueur d'onde du pic d'émission est liée à sa température en Kelvin selon la loi de Wien $\lambda_{\text{max}} = \frac{2897.10^{-6}}{T_k}$. Nous voyons que pour des

températures autour des 300 K, nous obtenons une longueur d'onde de 10 μm . Pratiquement toutes les surfaces naturelles terrestres ainsi que l'atmosphère vont émettre un rayonnement aux environs de cette longueur d'onde. Selon la loi de Stefan Boltzman la puissance dissipée par ce rayonnement dépend de leurs températures toujours en Kelvin par :

$$F(T) = \varepsilon \sigma T^4 \text{ avec } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ F(T) s'exprime en W/m}^2.$$

L'émissivité ε est une caractéristique de surface du corps rayonnant ; pour un corps noir elle sera de 1 (le corps noir est un objet idéal qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit et dont le rayonnement qu'il émet ne dépend que de sa température). L'émissivité d'un matériau est le rapport entre l'énergie qu'il rayonne et celle d'un corps noir qui rayonnerait à la même température c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 (cf. §3). Les instruments que nous allons décrire utilisent la mesure de ce rayonnement.

1. Le pyrgéomètre

C'est un radiomètre hémisphérique qui sert à mesurer le flux radiatif infrarouge incident à la surface de la terre dans toutes les directions (angle solide de 2π), flux dû au rayonnement tellurique d'origine atmosphérique ou à celui émis par le sol si l'on retourne le capteur. L'élément sensible est une thermopile sensible au rayonnement infrarouge. Le rayonnement inférieur à 4 μm est réfléchi ou bloqué par la coupelle qui de ce fait va s'échauffer et générer un rayonnement dont il faudra tenir compte dans la mesure. Kipp et Zonen, dans son modèle CGR4, par construction évacue cette chaleur dans le corps de l'instrument. Pour les capteurs

¹ Inra UMR 759 LEPSE 34060 Montpellier, ☎ 04 99 61 24 61 ✉ myriam.dauzat@supagro.inra.fr

² Inra UMR 1091 EGC Environnement et grandes cultures F-78850 Thiverval Grignon ☎ 01 30 81 55 21

✉ Dominique.Flura@grignon.inra.fr

Eppley, une mesure de la température du dôme est effectuée par une thermistance. Prenons pour commencer le cas plus simple du Pyrgéomètre Kipp et Zonen CGR4 (**figure 1**). Le capteur est une thermopile qui convertit la différence de température entre l'élément sensible et celle du corps de l'appareil en un signal de tension proportionnel au rayonnement reçu. Une mesure de la température du corps de l'appareil nous permet de calculer le rayonnement.

$$R_a = U/S + \sigma T_c^4$$

R_a : rayonnement atmosphérique en W/m^2 ,

U : tension de sortie de la thermopile en μV

S : coefficient de sensibilité ou coefficient d'étalonnage en $\mu V/Wm^2$,

σ : constante de Stefan Boltzman,

T_c : température du corps de l'instrument en Kelvin.

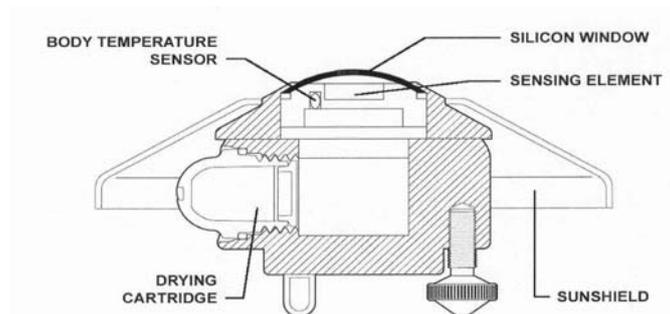


Figure 1 : Schéma d'un pyrgéomètre CGR4 Kipp et Zonen

Pour mesurer le rayonnement atmosphérique avec le pyrgéomètre Eppley, le constructeur nous propose deux solutions. La première, utilise simplement la sortie compensée en température donnant $R_a = U_{\text{compensé}}/S$; cette solution séduisante est à rejeter pour son manque de précision. La seconde solution utilise la même formule que celle décrite précédemment pour le CGR4. Le problème est que le rayonnement dû à la température de la coupelle n'est pas retranché. Albrecht et Cox propose d'introduire la température du dôme suivant $R_a = U/S + \sigma T_c^4 - K \sigma (T_d^4 - T_c^4)$ avec T_d température du dôme, le coefficient K serait égal à 3,5. J.-Ph. Morel et J. Olivieri (2007) font une critique détaillée et ils proposent une autre formule tenant compte de la température de la coupelle avec des modifications de l'instrument :

$$R_a = U/S (1 + K1 \sigma T_c^3) + K2 \sigma T_c^4 - K3 \sigma (T_d^4 - T_c^4). K1, K2, K3 \text{ constantes}$$

1.1 Spécification du pyrgéomètre CGR4 de Kipp et Zonen

La gamme spectrale s'étend de 4,5 à 42 μm , le temps de réponse est inférieur à 18 s, la non linéarité inférieure à 1% dans la gamme de -250 à + 250 W/m^2 . La dépendance en température de la sensibilité est inférieure à 5% pour une variation de température de - 40 à 40 °C et inférieure à 10 % pour une variation de température allant de - 40 à 80°C. L'erreur d'inclinaison inférieure à 2 %.

1.2 Installation d'un pyrgéomètre

On installera l'instrument de niveau à une distance minimale de dix fois la hauteur d'un éventuel obstacle (arbre, mur...). Une distance de 100 m maximum sera observée entre l'instrument et l'acquisition de donnée qui devra avoir une résistance interne élevée supérieur

à un M Ω . Une ventilation est nécessaire pour éviter les dépôts de rosée (l'eau absorbe l'infrarouge) et éviter un échauffement excessif de la coupelle (**figure 2**).



Figure 2: Pygéomètre Eppley muni d'une ventilation

1.3 Maintenance

Une coupelle sale donnera des valeurs erronées, pour cette raison la coupelle d'un appareil en plein champ sera lavée à l'eau déminéralisée. Nous Vérifions régulièrement la mise de niveau. Le dessicant doit être vérifié avant et après chaque installation ou tous les 6 mois dans le cas d'une installation fixe. Un étalonnage tous les cinq ans est nécessaire, tous les deux ans voire tous les ans pour une plus grande précision. Pour mettre en évidence d'éventuels défauts on effectue une inter comparaison de capteurs par ciel nuageux.

1.4 Valeurs typiques de rayonnement atmosphérique et importance dans le bilan radiatif

Température ambiante	Rayonnement atmosphérique W/m ²	
	Ciel couvert	Ciel clair
- 20°C	230	80
0°C	315	165
+ 30°C	480	330

Tableau 1 : variation du rayonnement atmosphérique en fonction de la température ambiante

On notera **figure 3** que le rayonnement atmosphérique est quasi constant et qu'intégré sur 24 heures il est comparable au rayonnement global. Les courbes qui proviennent d'une expérimentation au Niger avec une atmosphère humide et une température élevée correspondent bien avec les ordres de grandeurs du **tableau 1** sur lequel on remarquera que le rayonnement atmosphérique dépend de la température et de la couverture nuageuse.

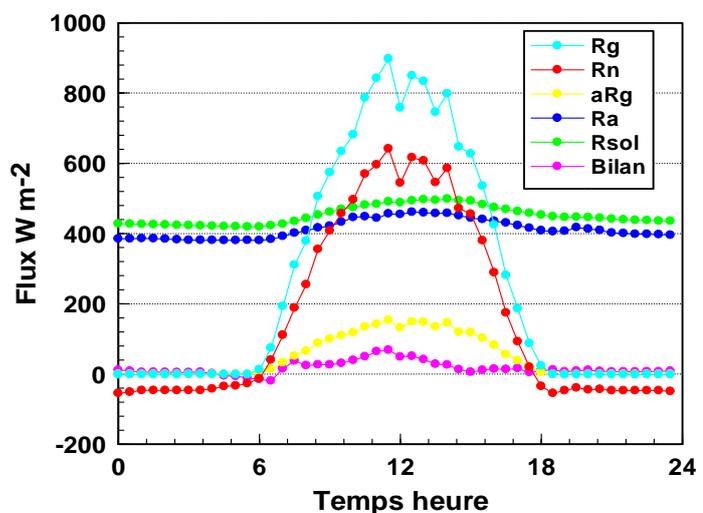


Figure 3 : relation entre les termes du bilan radiatif

La vapeur d'eau absorbant le rayonnement aux environs des 6 μm , une augmentation de l'humidité de l'air va accroître cette absorption et de ce fait le rayonnement atmosphérique. Le bilan radiatif qui est la somme algébrique des rayonnements avec en positif les rayonnements reçus par le sol et en négatif ceux qui le quittent, peut s'écrire sous la forme : $(1-a) R_g - R_{\text{sol}} + (1-\varepsilon) R_a - R_n = 0$ (Tuzet A., 2008). Chaque courbe de la **figure 3** est le résultat de mesures réalisées à partir d'instruments indépendants les uns des autres. La courbe notée « bilan » représente la somme des erreurs de mesures. Si toutes les mesures avaient été parfaites le bilan radiatif aurait été bouclé et égal à zéro.

2. Mesure de température radiative

C'est une mesure de température sans contact. Puisqu'un corps émet une énergie radiative en fonction de sa température, nous allons mesurer cette énergie et en déduire la température en suivant la formule $E = \varepsilon \sigma T^4$. Cette énergie est émise sous la forme d'un rayonnement de grande longueur d'onde. Le thermomètre infrarouge mesure le rayonnement dans cette gamme de longueur d'onde en général 8-14 μm et fait la conversion en température. La plupart des surfaces naturelles ont une émissivité supérieure à 0,9. Par exemple, l'émissivité d'un sol limoneux nu sera d'environ 0,91 celle d'un gazon 0,98. Le thermomètre infrarouge recevra le rayonnement émis par la surface plus la réflexion du rayonnement atmosphérique (ici les énergies s'ajoutent, contrairement aux températures), soit

$$\varepsilon\sigma T_s^4 + (1-\varepsilon)R_a \text{ que le thermomètre ne sait décomposer et prendra pour } \varepsilon\sigma T_s^4.$$

Deux questions se posent, il nous faut connaître l'émissivité de la surface à mesurer ainsi que le rayonnement atmosphérique pour recalculer la température de la surface. Couramment on néglige l'émissivité de la surface et la réflexion du rayonnement atmosphérique, mais il faut accepter une erreur sur la mesure pouvant atteindre 3 degrés. On pourra lire Olioso (1995) pour plus de précision sur le sujet et Idso (1981) pour une prise en compte du rayonnement atmosphérique. Une façon simple de connaître l'émissivité de la surface à mesurer est de coller un patch dont on connaît l'émissivité, sur cette surface et d'attendre l'équilibre thermique entre les deux. On fait ensuite une mesure de température des deux surfaces. La différence de température mesurée entre les deux est due à la différence d'émissivité que l'on pourra calculer (cf. § 3.3).

2.1 Caractéristique des thermomètres infrarouges

Il existe des thermomètres infrarouges portables sur batterie et à mémoire, d'autres nécessitent un enregistreur, certains possèdent une mesure de leur température interne pour une éventuelle correction, d'autres ne sont que des instruments de contrôle.

2.2 Précautions à prendre lors de la mesure

Bien que l'erreur de mesure due à la température interne de l'instrument soit souvent faible (**tableau 2**), il convient pour les instruments portables de les laisser s'équilibrer en température avec l'environnement et de protéger du rayonnement solaire les instruments à poste fixe. Comme tous les instruments ayant une optique, celle-ci devra rester propre. Une fois connues les erreurs dues à l'instrument, à l'émissivité et à la composante atmosphérique on doit s'interroger sur l'objet à mesurer et l'utilisation de la mesure. Prenons en exemple le cas de la mesure de température d'un couvert de blé. Comparons une mesure à la verticale avec mesure à l'oblique. Avant la fin du tallage du blé (propriété des graminées à produire plusieurs tiges à partir d'une plantule), la visée verticale intègre une contribution importante du sol. Au moment du développement de l'épi dans la tige, l'épiaison, la contribution du sol

dans la visée verticale devient faible mais les feuilles visées seront celles qui reçoivent le plus de soleil à l'inverse de la visée oblique pour qui la contribution des feuilles à l'ombre sera importante. Quelle utilisation fera-t-on de la mesure ? Une étude de stress hydrique ? Une étude de caractérisation des températures pour des cultures aux architectures différentes ? On s'aperçoit qu'il n'y a pas de solution unique. Dans un cas, on prendra la solution qui donne des mesures les plus homogènes alors que dans l'autre, c'est la dispersion des températures qui nous intéresse.

Mesure de température		commentaire
Echelle	- 40°C à 100°C	Prendre la gamme la plus petite
Précision	± 0,5°C	Il s'agit de la précision sur la mesure d'un corps noir
Effet de la température	± 0,1°C	
Considération de l'optique		
Bande spectrale	8 à 14 µm	
Visée	Visualisation de la cible par Led	Eviter les lasers pour les portables
Champ de visée (focus)	Variable de 4° à 20°	Souvent donné comme le rapport de la distance sur le diamètre de la cible ex 10/1
Général		
Signal de sortie	10mV/°C	
Emissivité	Ajustable de 0,1 à 0,99	
Environnement	Humidité relative 99 % sans condensation	Pour poste fixe à l'extérieur voir le modèle adapté supportant la pluie

Tableau 2 : Caractéristiques d'un thermomètre infrarouge

2.3 Exemple d'utilisation de cette mesure

Un exemple assez ancien, mais didactique, d'utilisation de cette mesure de température radiative est celle du CWSI (crop water stress index) indice de stress hydrique d'un couvert (Katerji, 1988). Le CWSI sert au déclenchement de l'irrigation et il est défini comme $(T_c - T_{cmin}) / (T_{cmax} - T_{cmin})$ avec T_c la température du couvert, T_{cmin} la température du même couvert en confort hydrique et T_{cmax} la température maximum qu'aurait ce même couvert s'il était complètement sec. Les températures maxima et minima peuvent être obtenues par modèle. La température minimum peut aussi être obtenue par une simple mesure du couvert dans une partie de la parcelle que l'on gardera en confort hydrique. Pour minimiser les erreurs, les mesures se font au même moment.

3. La caméra infrarouge (IR)

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu [-273,15 degrés Celsius ou 0° Kelvin], émet un rayonnement dans l'infrarouge. Une caméra infrarouge mesure non pas une température mais une énergie rayonnée. Plus la température d'un corps est élevée, plus son énergie rayonnée est élevée.

La caméra thermique présente ici l'avantage de capter ce rayonnement, de le quantifier et de le restituer sous forme d'une image « visible » (vidéo) qui associe des couleurs à différentes intensités de rayonnements. Par le paramétrage de la caméra, l'opérateur va affecter, souvent de façon automatique, des températures à chaque couleur on lira alors des températures à distance, sans contact et de façon non destructive.

Avant d'utiliser un tel appareil, il faut savoir qu'à travers le paramétrage, l'opérateur est responsable des températures affichées, en effet, le calculateur de la caméra est passif : il est donc moins facile qu'il n'y paraît de se servir d'un tel instrument.

Nous utilisons depuis peu au LEPSE, une caméra Infrarouge B20HSV (Flir System), d'échelle spectrale 7,5<<13 μm, équipée d'un détecteur de type 320*240 pixels, de résolution thermique théorique de : 0,05°C.

Lors de l'achat, l'objectif scientifique était de déceler des comportements stomatiques différents suivant les génotypes et en fonction des conditions environnementales chez *Arabidopsis thaliana* cultivé en chambre de culture, mais aussi chez le maïs, cultivé en serre ou au champ.

Au cours des premières mesures, nous nous sommes aperçus que plusieurs précautions sont à prendre avant d'obtenir des résultats fiables. Il est par exemple important, comme pour l'utilisation d'un thermomètre IR, de déterminer l'émissivité et la température de réflexion avant toute mesure et de considérer l'environnement de travail : chambre, serre, extérieur, soleil ou ciel nuageux... Nous donnerons ici des conseils pour la mesure de ces 2 paramètres et nous présenterons des astuces pour mesurer la température ambiante et des exemples d'erreurs à éviter.

3.1 L'émissivité

Définition

L'émissivité (ϵ) est la capacité d'un corps à émettre un rayonnement.

$$\epsilon = \frac{\text{rayonnement émis par un corps}}{\text{rayonnement émis par un corps noir}} \quad \text{les 2 corps étant à la même température.}$$

L'émissivité varie avec la nature du matériau (sol, végétal...), la température, la longueur d'onde, l'état de surface, l'angle, et elle est comprise entre 0 et 1. Ainsi, chez un corps noir, qui absorbe et réémet toute l'énergie, $\epsilon = 1$

Détermination de l'émissivité à l'aide d'une caméra IR

Plusieurs méthodes existent pour déterminer l'émissivité :

- la première est d'utiliser les valeurs d'émissivité fournies en annexe ; cette méthode est à utiliser avec précaution car toute généralisation est source d'imprécision.
- la seconde utilise la méthode par référence à la Norme ASTM E1933-99A (Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers) :

- on applique sur une feuille de la plante, 1 à 2 cm² d'un produit dont l'émissivité est connue³.

☞ La plante ne doit alors pas transpirer (mesures la nuit). On limitera au maximum les flux convectifs pour cette mesure : on pourra utiliser une cage en cellofrais autour de la plante et il faudra veiller au paramètre de transmission des matériaux, ou bien, ne pas viser au travers du cellofrais.

- on suppose alors que la température du produit étalé (référence) et celle de la plante sont les mêmes.

- on mesure alors la température sur la zone de référence, avec par exemple, $\epsilon = 0,95$ (émissivité du produit appliqué).

- on obtient $T_{\text{réf}}$ à partir du rayonnement reçu $= \epsilon\sigma T_{\text{zone}}^4 + (1-\epsilon) R_{\text{réfléchi}}$. Cette information sera directement transmise par la caméra.

- on pointe le calculateur de la caméra sur la zone à déterminer. On ajuste alors l'émissivité jusqu'à obtenir $T_{\text{inconnue}} = T_{\text{réf}}$. Bien sûr $R_{\text{réfléchi}}$ doit rester constant car il intervient et doit être identique dans les deux mesures.

- on lit alors l'émissivité indiquée.

☞ Il faut tenir compte de la température de réflexion (température apparente réfléchie), donc de notre environnement afin d'avoir une mesure plus fiable et précise. C'est pourquoi, on déterminera sur la même image, la température de réflexion (§3.3).

Pour cette méthode, la température de réflexion doit être la plus éloignée possible de la température de surface étudiée (minimum 15 à 20°C d'écart).

Enfin, on peut mesurer l'émissivité au spectroradiomètre : c'est l'idéal si on place l'appareil près de la plante afin que les conditions de mesure soient identiques. Par ailleurs, cet appareil n'est pas toujours disponible sur les centres Inra et il est souvent très utilisé par exemple en télédétection.

Influence de l'émissivité

Hypothèse : peu d'influence de l'émissivité entre 0,9 et 0,98 pour une température de réflexion voisine de la température ambiante (par exemple en chambre de culture).

On observera les résultats au § 3.3, couplés aux variations de température de réflexion.

3.2 Détermination de la température de réflexion ou température apparente réfléchie (Norme ASTM E1862-97)

Méthode

On place une feuille de papier aluminium ménager froissé puis défroissé grossièrement, côté brillant près de la surface à mesurer. Attention, la feuille de papier devra être mise au dernier moment pour éviter tout risque de condensation et de dépôt d'humidité sur la feuille.

Cette feuille est un réflecteur parfait (hypothèse), sur lequel se réfléchit un corps noir équivalent à un environnement moyen homogène et diffus. On règle alors l'émissivité dans les paramètres de la caméra à 1 ($\epsilon = 1$).

³ Différents produits peuvent aider à la détermination de l'émissivité :

tipex	0.93
Rouleau adhésif 3M super 33++	0.95
Rouleau adhésif 3M (autosoudable)	0.9

On récupèrera alors tout ce qui est réfléchi.

On fait une image de ce papier et à l'aide du logiciel ou directement sur la caméra, on calcule sa température moyenne sur une zone de ce papier la plus large possible.

On entre alors cette température réfléchie manuellement dans les paramètres du calculateur. Elle deviendra active pour tous les objets dont l'émissivité sera inférieure à 1.

sur une pelouse, la nuit	sous un arbre (été, ombre)	chambre de culture	Extérieur soleil (jour)	Serre en été
TR= -1.1	22.4	27	-11	25

Tableau 3 : Exemples de températures de réflexion (°C) obtenues dans différents environnements

☞ La température de réflexion peut atteindre -30 à -40°C par temps très dégagé, sans pollution atmosphérique, ni évaporation (hiver, temps sec). La température de réflexion dans un milieu fermé se rapprochera de la température ambiante.

3.3 Variation de la température de surface pour différentes émissivités et températures de réflexion (interaction)

	AR01 : détermination de la température de surface d'une pelouse AR02 : détermination d'une température de réflexion AR03 : détermination d'une température ambiante		
	Détermination de la température (°C) de surface de la zone AR01		
Temp de réflexion	$\epsilon = 0.9$	$\epsilon = 0.95$	$\epsilon = 0.98$
-40°C	15.7	13.6	12.4
-10	13.7	12.6	12
0	12.8	12.2	11.8
20	10.6	11.1	11.4

Tableau 4 : exemples de variation de la température de surface (°C) pour différentes émissivités et températures de réflexion

L'émissivité n'a pas une grande influence sur la mesure si la température de réflexion est proche de la température ambiante.

La température de réflexion sera plus influente que l'émissivité (pour des émissivités fortes), en fonction de l'environnement de la mesure (extérieur, chambre, temps couvert ou non).

3.4 Influence de l'angle de visée

La température de surface est théoriquement constante jusqu'à un angle de 45°.

De plus, la caméra permet d'éliminer le problème de l'angle de visée que l'on avait avec le thermomètre infrarouge. Si on effectue la mesure sur une plante et que l'on vise un peu de sol (**images § 3.6**), celui-ci apparaîtra d'une couleur différente. Il est alors possible d'en faire abstraction dans la température moyenne de la plante.

3.5 Influence de l'ambiance sur les mesures : quelques exemples concrets

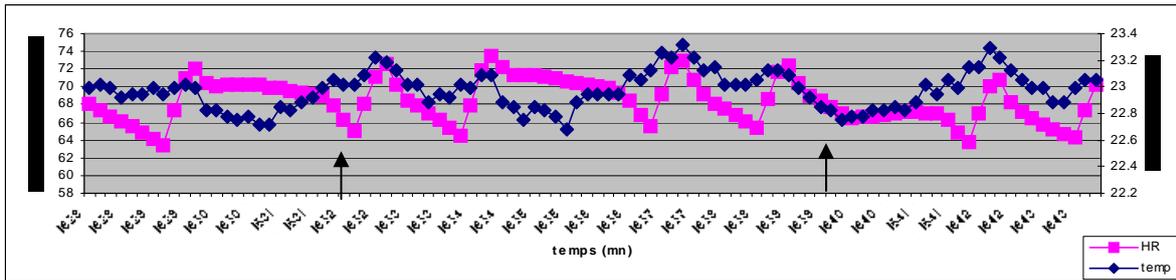
Variation des températures de surface selon le climat ambiant d'une chambre de culture

Pour illustrer l'influence de l'environnement sur les températures de surface de plante, voici les résultats d'une expérience très simple : dans une chambre de culture, un pot d'*Arabidopsis thaliana* est pris en photo toutes les minutes, toujours à la même position dans la chambre. Nous visualisons ici les effets de la régulation climatique sur la plante grâce aux images de rayonnement thermique.

On observe donc des écarts de température pouvant aller jusqu'à 6°C pour une même plante à quelques secondes d'intervalle. Ces écarts sont plus grands que l'amplitude thermique donnée par le capteur de la chambre climatique (CS215, Campbell). Cela est dû à l'effet des **brumisateurs** qui ont un effet immédiat sur la plante. Il n'y a pas d'écart entre la température de la plante et celle du papier à cigarette.

On voit ici une des difficultés de l'utilisation d'une caméra infrarouge pour déterminer la température foliaire de façon fiable et reproductible en milieu contrôlé. Ici, une solution pour réaliser les mesures est d'arrêter la régulation en humidité : les plantes ne seront alors plus aux conditions souhaitées (consigne de VPD, Vapour Pressure, Deficit non respectée). Le déficit de pression de vapeur représente l'écart entre la pression de vapeur saturante et la pression partielle de vapeur d'eau ; c'est-à-dire que c'est l'écart entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et celle qu'il y aurait à saturation.

Les plantes sont moins sensibles à la régulation en température seule. L'effet sur leur température est beaucoup moins perceptible, même s'il existe quand même.



Visualisation des données météo pendant les prises de photos

Images IR : Prise d'images toutes les minutes

Le papier à cigarette nous indique la température ambiante sur chaque image IR

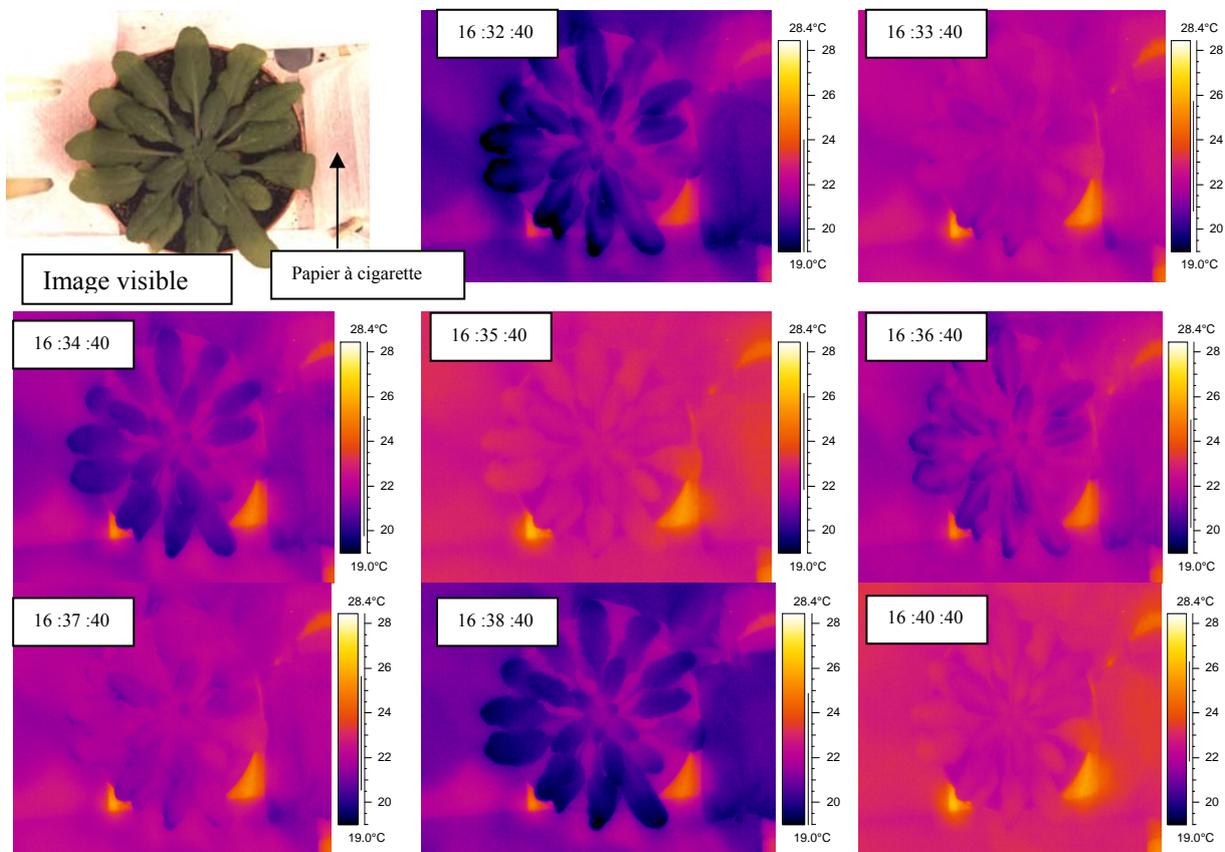


Tableau 5 : Influence du climat ambiant sur les températures de surface d'une plante d'Arabidopsis thaliana dans une chambre de culture.

Influence spatiale d'une chambre de culture sur la température de réflexion

Nous avons cherché à connaître la variabilité spatiale de la température de réflexion dans une chambre de culture, pour cela nous avons pris une mesure, environ tous les 50 cm, dans le sens de la longueur de la chambre et tous les 20 cm dans le sens de la largeur.

Les conditions climatiques dans la chambre étaient les suivantes :

Température air: 23,7°C, humidité relative de l'air: 60 %, PAR (rayonnement photosynthétiquement actif): 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$

La chambre de culture dispose d'un support central supportant 14 plateaux percés de 36 alvéoles.

Nous avons pris les mesures tous les 2 plateaux et respectivement sur les alvéoles 1, 15, 36.

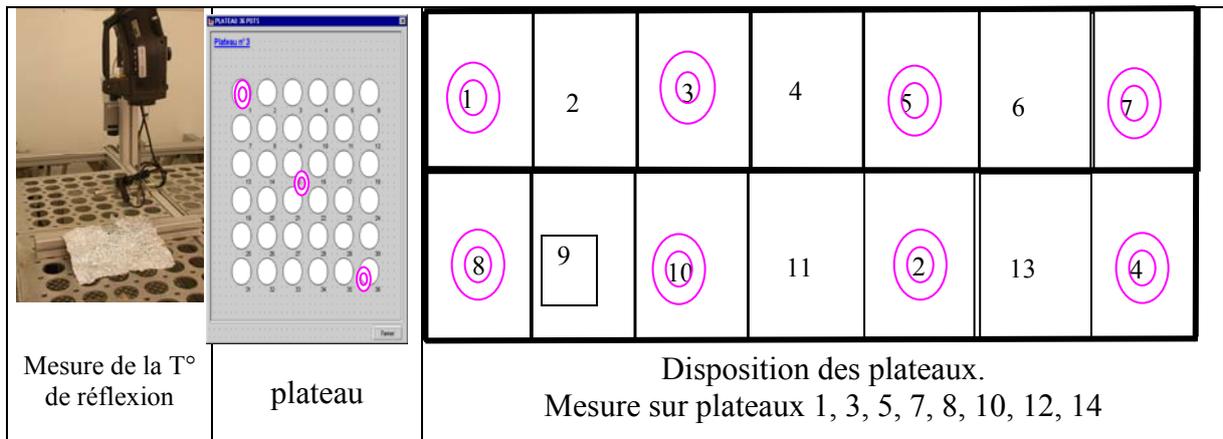


Figure 4 : dispositif pour la mesure de température de réflexion dans une chambre de culture

Les résultats

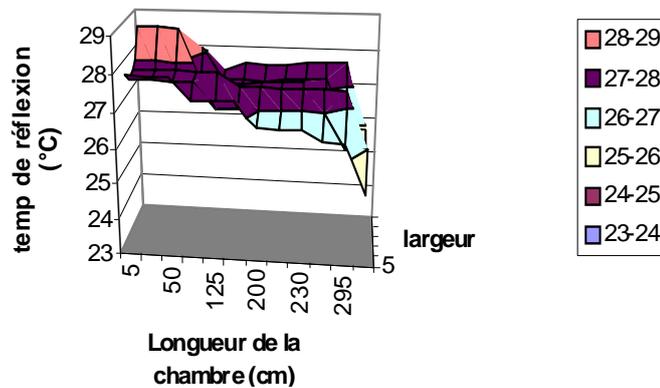


Figure 5 : Distribution spatiale des températures de surface sur l'ensemble de la surface de la chambre (120 cm de hauteur/sol)

On constate une hétérogénéité des températures de réflexion sur la surface de la chambre de culture, due en partie aux parois de la chambre (parois présentes au niveau des températures les plus basses, à droite du graphique, pas de paroi proche sur la gauche de la chambre).

Même si cet écart peut avoir des conséquences minimales sur les températures de surface des plantes, il mérite d'être pris en compte sur chacune des images de plantes individuelles. En effet, au cours de phénotypage, de faibles variations de températures peuvent différencier deux génotypes ou deux niveaux de stress.

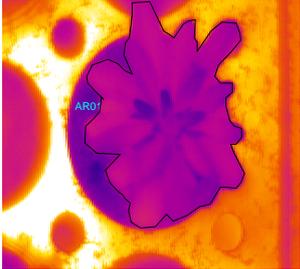
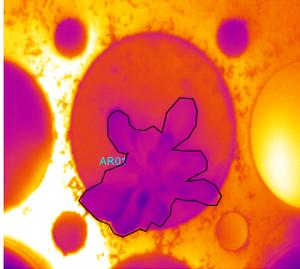
Prenons l'exemple du § 3.6, un écart de température de réflexion de 3°C influencera la mesure de la température moyenne de surface de la plante témoin de 0,1°C.

On voit ici l'importance de prendre en compte tous les paramètres influant sur les mesures.

3.6 La caméra IR peut-elle aider à la détection de stress hydrique ?

Voici 2 exemples d'images de plantes, l'une témoin et l'autre stressée, les conditions environnementales sont identiques pour les 2 plantes : température = 21 à 22°C, Vapour Pressure Deficit (VPD)= 1.2kPa, PAR = 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$. En revanche, les teneurs en eau du sol sont bien différentes : la plante témoin est cultivée avec 4gr d'eau/gr de sol sec (sol

à 40 % d'humidité), et la plante stressée est cultivée avec 2gr d'eau/gr de sol sec (soit un sol à 20 % d'humidité), le sol est un mélange terreau/terre végétale (50/50). Ces conditions sont suffisantes pour faire apparaître un stress sur les génotypes que nous étudions. La plante témoin et la plante stressée sont du même génotype.

Exemple n°1	Plante témoin	Plante stressée
Image Visible		
Image IR		
T° moyenne de la plante (°C)	21.9/ pas de température ambiante mesurée	22.1/ pas de température ambiante mesurée

Nous n'avons pas d'indication de la valeur de la température ambiante au moment de la mesure, nous ne pouvons pas conclure sur le faible écart de température de surface des 2 plantes.

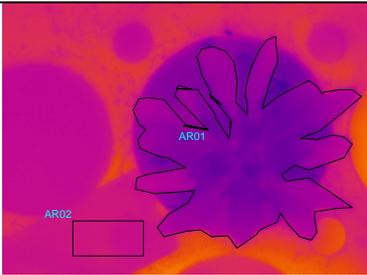
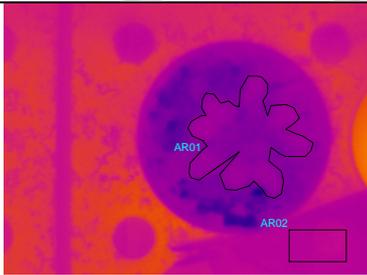
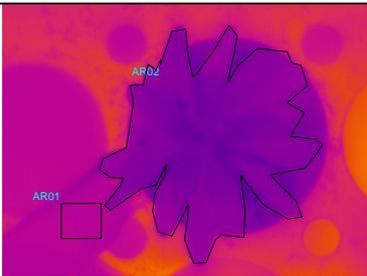
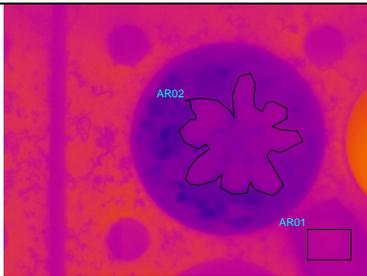
Exemple n° 2		
Image visible		
2-1 Image IR		
T°C SurfPlte/Amb	19.1/22	19.2/20.9
2-2 Image IR		
T°C SurfPlte/Amb	20.2/22.1	20.6/22.1

Tableau 6 : Comparaison de températures de surface de plantes témoins et stressées (exemples 1 et 2)

- dans l'exemple n°2-1, la différence de température est faible, voire nulle, entre plante stressée et non stressée par un déficit hydrique. Dans cet exemple, la température ambiante n'est pas identique sur les 2 images : l'interprétation est donc hasardeuse. D'autres facteurs peuvent entrer en compte : l'influence du sol ou l'architecture de la plante.

- Dans l'exemple 2-2, la température ambiante est identique. La différence entre plante stressée et témoin est de 0,4°C. Cette différence de température pourrait être indicatrice d'un stress. Une mesure de conductance stomatique indique en parallèle un écart de 35 % et confirme le stress.

Ces exemples n'ont pas la prétention de vouloir montrer la détection et la quantification d'un stress hydrique sur une plante entière à l'aide d'une caméra infrarouge, même si cela est possible ; il faudrait pour cela multiplier les répétitions, diminuer les effets d'ombrage de la caméra elle-même sur la plante. Ils montrent la difficulté d'utiliser la température de surface pour détecter le stress hydrique en chambre climatique. Le niveau de rayonnement PAR = 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ correspondrait à une mesure de PAR à l'extérieur quand le rayonnement global est d'environ 100 W/m². Par une belle journée le rayonnement global atteint 800W/m². Le bilan radiatif R_n au niveau de la feuille peut atteindre 500W/m² en milieu de journée. Cette énergie, la feuille devra la dépenser sous forme de flux de chaleur latente, LE, et de flux de chaleur sensible, H. La feuille en confort hydrique va transpirer et consommer ce trop plein d'énergie. La feuille stressée transpire peu, sa température augmente favorisant ainsi l'échange d'énergie avec l'air environnant. L'énergie qui n'a pas pu être dépensée en flux de chaleur latente, le sera en flux de chaleur sensible. La stratégie en extérieur est de faire des mesures de température au moment propice, quand le rayonnement est le plus fort. Si le vent est faible et le VPD fort alors les écarts de température entre plantes stressées et celles qui ne le sont pas seront grands. Dans la chambre climatique le rayonnement est faible et le brassage d'air est souvent fort. Il faudra s'attendre à de faibles écarts de températures entre plantes car il y a peu d'énergie à dépenser et cela même si le stress hydrique existe d'où la nécessité de mesures soignées et d'une maîtrise maximale des conditions environnementales de la plante au moment de la mesure.

L'objectif ici est surtout de montrer qu'il faut toujours rester prudent sur l'interprétation, et bien intégrer tous les facteurs d'erreurs et d'incertitudes liés au paramétrage de la caméra et aux conditions ambiantes de mesure.

Nous cherchons à améliorer la méthode pour mettre en évidence plus simplement des plus grandes différences de températures de surface (jusqu'à 3°C) entre plantes. Par exemple, des mesures de nuit (cas de certains géotypes gardant leurs stomates ouverts) ou au contraire, un plus fort rayonnement ou bien une isolation du sol peuvent améliorer et diminuer considérablement l'influence du milieu. On peut également prendre sur une même image les plantes témoins et stressées. Cela supposera alors d'éloigner la caméra ou de choisir un objectif adapté.

3.7 Quelques astuces pour les mesures

La mesure

La mesure peut s'effectuer de 2 façons :

- soit, tous les paramètres sont connus lors de la prise d'image avec précision (température ambiante, humidité relative, température réfléchie, émissivité...), et la mesure de température IR ou l'image IR est alors tout de suite exploitable ;
- soit tous les paramètres ne sont pas connus lors de la prise d'image et il est capital d'avoir les références pour la température ambiante et réfléchie sur la même image. On pourra alors

corriger les paramètres grâce au logiciel directement via la caméra ou via un PC de bureau et rectifier l'image.

Dans les 2 cas, il est important de toujours avoir présents sur une image une référence pour définir la température d'ambiance (§ ci-après) ainsi qu'un papier alu froissé/défroissé (§ 3.2), pour déterminer sur chaque image la température réfléchie.

- **la mesure de la température ambiante** que l'on peut définir en déposant à côté de l'objet à mesurer et sur le même plan, un papier à cigarette.

- **la mesure de la transmission** : il est simple de mesurer la transmission d'un film plastique par exemple. Il suffit de prendre la température d'un objet sans film et avec film, bien sûr exactement dans les mêmes conditions. Ensuite, il suffira d'ajuster la valeur du paramètre « transmission » jusqu'à trouver les mêmes valeurs de température dans les deux conditions.

☞ Les films transparents type cellofrais peuvent avoir des valeurs de transmission différentes d'un film à l'autre (0,7 à 0,95 : valeurs testées sur des films du commerce).

Pour des cibles dont la température est proche de la température ambiante, la transmission des fenêtres de température très voisine (cellofrais par exemple) devient difficile à compenser à cause des conditions limites.

Condition limite pour la transmission en prenant l'hypothèse d'un corps noir :

Pour un corps noir l'équation radiométrique simplifiée se réduit à :

$L_{\text{mesurée}} = L_{\text{objet}} * T + (1 - T) L_{\text{film}}$ et

$L_{\text{objet}} = L_{\text{film}}$ ($L = \text{Luminance}$)

Dans cette situation, la transmission ne joue plus et il faut considérer l'équation complète qui inclura la réflexion du film, les températures réfléchies, ce qui complique la mesure.

Conclusion

La thermographie infrarouge apparaît ici comme une technique intéressante puisqu'elle est sans contact, non destructive, précise et qu'elle peut être intégrative. Sa maîtrise reste délicate et l'interprétation des résultats dépend souvent de l'environnement proche.

Une fois la technique maîtrisée, il reste à exploiter les images. Une automatisation du traitement des images est en cours au LEPSE, par établissement de masques à partir d'images visibles pour établir le contour de chaque plante et pour ainsi définir leur température moyenne. Le logiciel ImageJ sera largement utilisé.

Le haut débit IR n'est donc pas encore pour aujourd'hui, mais le projet existe. Si d'autres unités sont intéressées ou ont déjà avancé sur ce sujet, une coopération pourrait s'engager.

Remerciement

Nous remercions M. Demoyer (ITC France) pour ses conseils concernant l'utilisation de la caméra infrarouge, la prise d'images, et pour la relecture de cet article. Merci à Marjorie Pervent pour le prêt de ses plantes.

Bibliographie

- Albrecht B. and Cox S.K. (1977) Procedures for improving pyrgeometer performance, *Journal of Applied Meteorology*, 16, 188-197.
- Idso S.B. (1981) A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μm thermal radiation from cloudless skies, *Water Resources*, 17(2), 295-304.
- Jones H.G. (1999) Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surface. *Plant cell and environment* 22, 1043-1055
- Jones H.G., Stoll M., Santos T., de Sousa C., Chaves M.M. and Grant O.M (2002) Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 53, No. 378, pp. 2249-2260, November 2002
- Jones H.G., Archer N., Rotenberg E. and Casal R. (2003) Radiation measurement for plant ecophysiology, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, No. 384, pp. 879-889,
- Katerji, (1988) *Agronomie* 1988, 8(5), 425-433.
- Morel J.-Ph et Oliviéri J. (2007) La mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge, https://intranet.inra.fr/mission_qualite/acces_thematiques/formations_et_ecoles
- Oliosio A. (1995) Estimating the difference between brightness and surface temperatures for a vegetal canopy, *Agriculture and Forest Meteorology*, 72, 237-242.
- Tuzet A. (2008) Notions théoriques des transferts radiatifs *In* Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge, *Le Cahier des Techniques de l'Inra*, pp.7-34.
- NORME ASTM E 1933 REV A 2005-MAR-01 • Active/Current • Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.

Annexe 1

Tableau d'émissivité (non métaux)

👉 Les émissivités dépendent de la longueur d'onde à laquelle on effectue la mesure

Matériel	Émission			
	1,0 μm	5,0 μm	7,9 μm	8-14 μm
Glace	n. d.	—	0,98	0,98
Terre	n. d.	0,9-0,98	0,9-0,98	
Couleur (pas alcalin)	—	0,9-0,95	0,9-0,95	
plâtre	n. d.	0,4-0,97	0,8-0,95	0,8-0,95
	Verre			
Vitre	n. d.	0,98	0,85	0,85
Coulé	n. d.	0,9	n. d.	n. d.
Caoutchouc	n. d.	0,9	0,95	0,95
Bois (naturel)	n. d.	0,9-0,95	0,9-0,95	0,9-0,95
Calcaire	n. d.	0,4-0,98	0,98	0,98
Karborund	n. d.	0,9	0,9	0,9
Céramique	0,4	0,85-0,95	0,95	0,95
Gravier	n. d.	0,95	0,95	0,95
Carbone				
non oxydé	0,8-0,95	0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9
Graphite	0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,8	0,7-0,8
Papier (chaque couleur)	n. d.	0,95	0,95	0,95
Matière (tissu)	n. d.	0,95	0,95	0,95
Sable	n. d.	0,9	0,9	0,9
Neige	n. d.	—	0,9	0,9
Argile	n. d.	0,85-0,95	0,95	0,95
Eau	n. d.	—	0,93	0,93

n. d. = non disponible

Quelques références pour les couverts végétaux :

type de surface	émissivité
prairie	0,98
blé	0,97
maïs	0,96
vignes, vergers	0,95
résineux	0,98
feuillus	0,97

Adapté de Girard et Girard (1999)

Rayonnement net en Agronomie Concepts et mesure

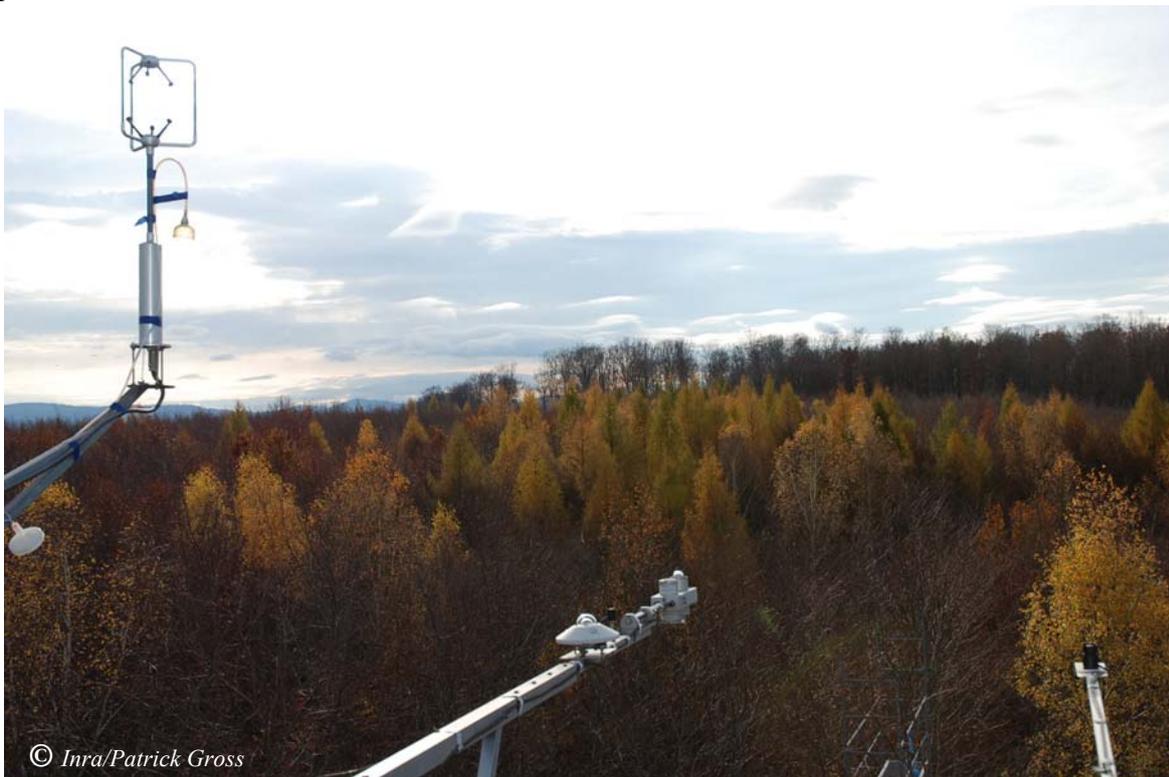
Patrick GROSS¹

Résumé : *La mesure du rayonnement net est utilisée pour les recherches en bioclimatologie ou en écophysiologie végétale. Après avoir rappelé les concepts essentiels, nous décrirons des capteurs permettant cette mesure et nous ferons une analyse des erreurs de mesure inhérentes à ces capteurs. Enfin, nous donnerons les courbes de mesure pour des journées types.*

Mots clés : Rayonnement net, pyrromètre différentiel, pyranomètre, pyrgéomètre, incertitude de mesure.

Introduction

Le rayonnement net au dessus d'un couvert végétal est l'énergie radiative disponible pour les échanges convectifs ou conductifs : flux de chaleur sensible ou latente, stockage dans le système sol-plante. Sa mesure est importante car elle permet de valider le calcul de ces flux par d'autres méthodes.



© Inra/Patrick Gross

Mesures des flux de matière (CO₂ et H₂O) et d'énergie au dessus d'une forêt

¹ UMR 1137 Ecologie et écophysiologie forestières EEF Inra-Univ.Nancy I - F-54280 Champenoux

☎ 03 83 39 40 31 ✉ patrick.gross@nancy.inra.fr

1. Concepts

1.1 Définitions physique et agronomique

Le rayonnement net, R_n , dans un plan horizontal X au dessus d'un couvert végétal, est la somme algébrique de quatre composantes (**figure 1a**) :

- R_g , rayonnement global, rayonnement solaire direct + diffus ;
- αR_g , rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-couvert végétal, (α = albédo, fraction du rayonnement solaire réfléchi) ;
- R_a , rayonnement atmosphérique ;
- R_t , rayonnement terrestre.

Par convention, on compte positivement les rayonnements descendants. On a donc

$$R_n = R_g (1 - \alpha) + R_a - R_t.$$

R_g et αR_g ont une bande spectrale de 0,28 à 4 μm , comprise à 99 % dans les courtes longueurs d'onde. R_a et R_t ont leur énergie dans une bande supérieure à 3 μm , quasiment exclusivement dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge lointain ou IRL).

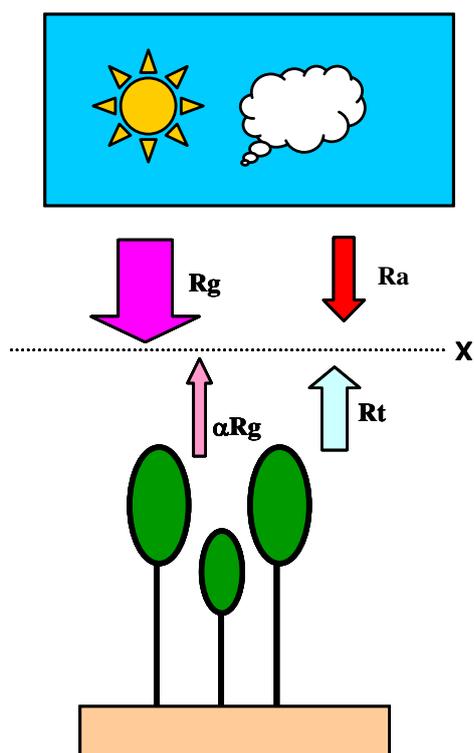


Figure 1a

Bilan radiatif dans le plan X
 $R_n = R_g (1 - \alpha) + R_a - R_t.$

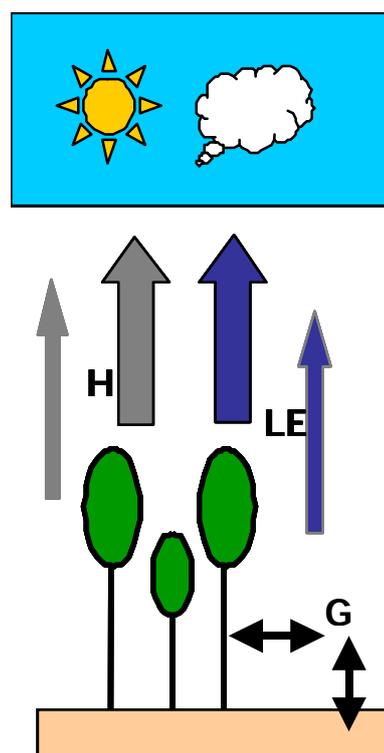


Figure 1b

Les flux convectifs et conductifs
 $R_n = H + LE + G$

Le rayonnement net est l'énergie radiative disponible pour les échanges convectifs et conductifs de l'ensemble sol + plante : flux de chaleur sensible H et latente LE, stockage G (**figure 1b**).

2. La mesure du rayonnement net

La bande spectrale du rayonnement à mesurer s'étale de 0,28 à 50 μm . Il est très difficile de réaliser un capteur ayant une réponse uniforme sur cette plage. Aussi, pour une plus grande précision, il est préférable de mesurer les composantes Rg et αRg (courtes longueurs d'onde) avec des pyranomètres et Ra comme Rt (grandes longueurs d'onde) avec des pyr géomètres. (**figure 2**)

2.1 Les capteurs nécessaires

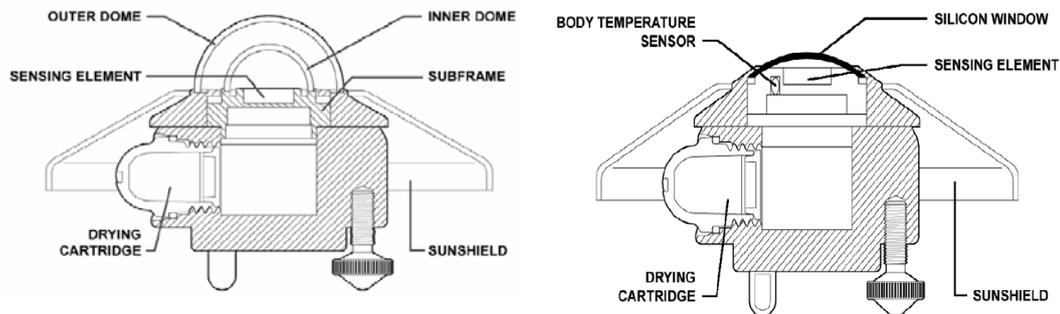


Figure 2 : exemple de pyranomètre à gauche et de pyr géomètre à droite -
(Documentation Kipp et Zonen)

Ces capteurs sont constitués d'une fenêtre optique laissant passer la bande spectrale souhaitée et d'un détecteur thermique à thermocouple (thermopile) délivrant une tension électrique proportionnelle au rayonnement incident sélectionné. L'élément sensible est un disque noirci sous lequel sont répartis uniformément des thermocouples, connectés en série, mesurant la différence de température entre cette surface noire qui absorbe le rayonnement à mesurer et le corps du capteur non affecté par ce rayonnement. Ce gradient thermique est faible : pour les pyranomètres quelques degrés avec un rayonnement incident de $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$.

Pour un pyranomètre, le rayonnement incident est déterminé à partir de :

$$E_{\text{inc}} = \frac{e}{s}$$

E_{inc} : rayonnement reçu par le pyranomètre en W m^{-2}
 e : tension délivrée par le pyranomètre en μV
 s : sensibilité du pyranomètre en $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$

Le calcul du rayonnement reçu par un pyr géomètre est différent. En effet, la fenêtre optique en silicium est conçue pour laisser passer le rayonnement infrarouge. La surface sensible de

ce capteur peut être assimilée à un corps noir : à une température donnée, elle rayonne dans les grandes longueurs d'onde (IRL) et perd de l'énergie suivant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E = \sigma T^4$$

E rayonnement émis en Watts m⁻²
 σ constante de Stefan-Boltzmann = 5.67 x 10⁻⁸ W m⁻² K⁻⁴
T température de la surface sensible en K

La tension délivrée par le capteur sera alors proportionnelle à la différence entre le rayonnement reçu et celui émis par la surface sensible. Il est donc nécessaire d'ajouter à l'intérieur du pyrgéomètre, très proche de l'élément sensible, un capteur de température afin d'estimer le rayonnement IRL émis et de calculer le rayonnement incident grâce à :

$$E_{\text{inc}} = \frac{e}{s} + \sigma T^4$$

E_{inc} : rayonnement reçu par le pyrgéomètre en W m⁻²
e : tension délivrée par le pyrgéomètre en μV
s : sensibilité du pyrgéomètre en $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$
 σ : constante de Stefan-Boltzmann
t : température de la surface sensible en K

La mesure de la température du capteur est donc indispensable pour calculer le rayonnement de grande longueur Ra ou Rt. Si on ne s'intéresse qu'au bilan net, c'est-à-dire à la différence entre Ra et Rt, celle-ci est superflue puisque les deux termes en σT^4 s'annulent, en supposant que les surfaces sensibles des capteurs pour Ra et Rt sont à la même température.

2.2 Les sources d'erreur

La température ambiante affecte la réponse du capteur, l'intensité et la direction du rayonnement ont également une influence sur la linéarité de la mesure. Les constructeurs indiquent une incertitude journalière qui intègre ces sources d'erreur.

Les appareils haut de gamme (par exemple CGR4 et CMP21 de Kipp et Zonen) sont caractérisés en fonction de la température : une courbe d'étalonnage individuelle indique l'influence de celle-ci dans une large plage d'utilisation et permet de diminuer l'incertitude de mesure. Des courbes de correction standard sont également délivrées avec ces capteurs pour quantifier l'erreur de linéarité en fonction de l'angle d'incidence et de l'intensité du rayonnement.

De plus, il existe les erreurs d'offset (décalage en français) de type A qui affectent les pyranomètres, celles de type B qui concernent également les pyrgéomètres et l'offset de chauffage de dôme (window heating offset) qui touchent uniquement ces derniers. Nous allons expliciter ces erreurs.

Par ciel clair, la température apparente de la voûte céleste est négative (échelle Celsius). Ceci induit un refroidissement du dôme, créant ainsi un léger flux thermique d'IRL de l'élément sensible vers le ciel. On observe particulièrement ce phénomène pendant les nuits par ciel dégagé : la surface sensible est plus froide que le corps du capteur et la thermopile délivre un signal légèrement négatif. C'est l'erreur d'offset de type A. Lorsque le pyranomètre est utilisé dans une enceinte avec éclairage artificiel, le réchauffement du dôme provoque l'effet inverse (offset positif). Une ventilation appropriée du dôme et du corps du pyranomètre réduit cette erreur. Les constructeurs proposent cet accessoire pour certains modèles.

Une variation de la température du corps du pyranomètre ou du pyr géomètre induit une modification du gradient thermique entre les soudures froides (corps du capteur) et chaudes (surface sensible) de la thermopile. Ce changement cause l'erreur *d'offset de type B*. Cette erreur est quantifiée pour une variation de température de 5°C / h. Un élément de compensation interne intégré dans certains modèles minimise cette tension de décalage.

Le rayonnement solaire, de courte longueur d'onde, chauffe le dôme (fenêtre en silicium) du pyr géomètre destiné à ne mesurer que les grandes longueurs d'onde. La différence de température ainsi créée entre le dôme et la thermopile induit un transfert de chaleur vers l'élément sensible qui vient s'ajouter au rayonnement IRL à mesurer et qui cause l'erreur nommée *window heating offset* par les anglo-saxons, surestimant le rayonnement infrarouge incident réel. Elle est donnée par les constructeurs pour un rayonnement global incident de 1 000 W/m². La compensation de cette erreur par des mesures de température avec des capteurs miniatures placés dans le dôme est délicate. Certains fabricants ont minimisé cette erreur en réduisant le gradient de température entre dôme et corps du capteur en favorisant le couplage thermique entre ces deux éléments.

2.3 Le choix et l'installation des capteurs

Le **tableau 1**, ci-dessous, issu d'une plaquette commerciale Kipp et Zonen, présente des modèles de pyr radiomètres différentiels, plus communément appelés bilanmètres, intégrant dans un même boîtier tous les capteurs nécessaires à la mesure du rayonnement net.

SPECIFICATIONS					
Measurement	CNR 1		CNR 2		NR LITE
	SW	LW	Net SW	Net LW	Net Total
Signal outputs	2	2	1	1	1
Temperature output	-	1	-	-	-
Response time (95%)	< 18 s	< 18 s	< 10 s	< 10 s	< 60 s
Offset type A	< 15 W/m ²	-	< 15 W/m ²	-	-
Offset type B	< 4 W/m ²	< 4 W/m ²	< 5 W/m ²	-	-
Window heating offset	-	< 25 W/m ²	-	< 25 W/m ²	-
Field of view	180°	150°	180°	150°	180°
Directional error	< 25 W/m ²	-	< 25 W/m ²	-	< 30 W/m ²
Temperature dependence of sensitivity (-10 °C to +40 °C)	< 4 %	< 4 %	< 5 %	< 5 %	-
Daily uncertainty	< 10 %	-	< 10 %	-	-
Expected output range under atmospheric conditions	0 to +50 mV	-5 to +5 mV	0 to +50 mV	-5 to +5 mV	-25 to +25 mV
Heater	12 VDC, 6 W		-		-
Operating temperature	-40 to +80 °C		-40 to +80 °C		-30 to +70 °C
Weight, including rod, without cable	2500 g		360 g		490 g
Cable length	10, 25, 50 m		10, 25, 50 m (with connector)		15 m

CNR SERIES NET RADIOMETER RANGE

Dimensions in mm

Kipp & Zonen B.V. reserves the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

Tableau 1 : Différents modèles de bilanmètres KIPP et ZONEN

Le modèle le plus simple, *NRLITE*, donne uniquement l'information R_{net} total, le constructeur ne s'engage pas sur une incertitude journalière chiffrée.

Le *CNR2* permet la mesure séparée des rayonnements nets dans les spectres solaire (SW) et de grande longueur d'onde (LW), l'incertitude journalière maximum est donnée.

Enfin le *CNR1* est l'appareil le plus complet, avec la mesure séparée des quatre composantes, comme décrit précédemment. On constate que même cet appareil a une incertitude journalière maximum qui approche 10 %. Les personnes qui veulent « boucler le bilan d'énergie » ne doivent pas oublier le niveau élevé de cette incertitude

Un autre fabricant néerlandais, Hukseflux, propose un matériel de performances voisines.

Les expérimentateurs exigeants (et fortunés) pourront réaliser des mesures de rayonnement net plus précises en assemblant eux-mêmes les pyranomètres et pyrgéomètres haut de gamme. Ceci nécessite un support adapté très robuste pour supporter le poids élevé d'un tel équipement (**photos 2 et 3**).

Nous venons en effet de lister les sources d'erreurs dues aux instruments eux-mêmes, il faut également respecter des règles d'installation afin de ne pas dégrader davantage la précision des mesures. Si la contrainte horizon dégagé est assez aisée à respecter pour les capteurs regardant le ciel en choisissant une orientation sud, l'absence d'artefact due au support est plus difficile à maîtriser. En effet, les capteurs face au sol doivent être suffisamment hauts au dessus du couvert végétal afin de voir une surface représentative : 1 à 2 m. pour une prairie, plus pour des ensembles moins homogènes comme les forêts. Le support du capteur doit être rigide et rester stable dans le temps afin de garantir l'horizontalité des appareils qui est vérifiée lors de l'installation et ensuite périodiquement. La structure verticale du support doit aussi avoir la dimension apparente la plus faible possible par rapport à la végétation, vue du capteur. Ces deux contraintes sont difficiles à concilier car plus on éloigne le capteur, plus la flexion du support horizontal est grande.



Photos 2 et 3 © Inra/Patrick Gross : Support pour capteurs de rayonnement

2.4 Exemple de mesures réalisées sous différentes conditions atmosphériques (figures : 3, 4 et 5)

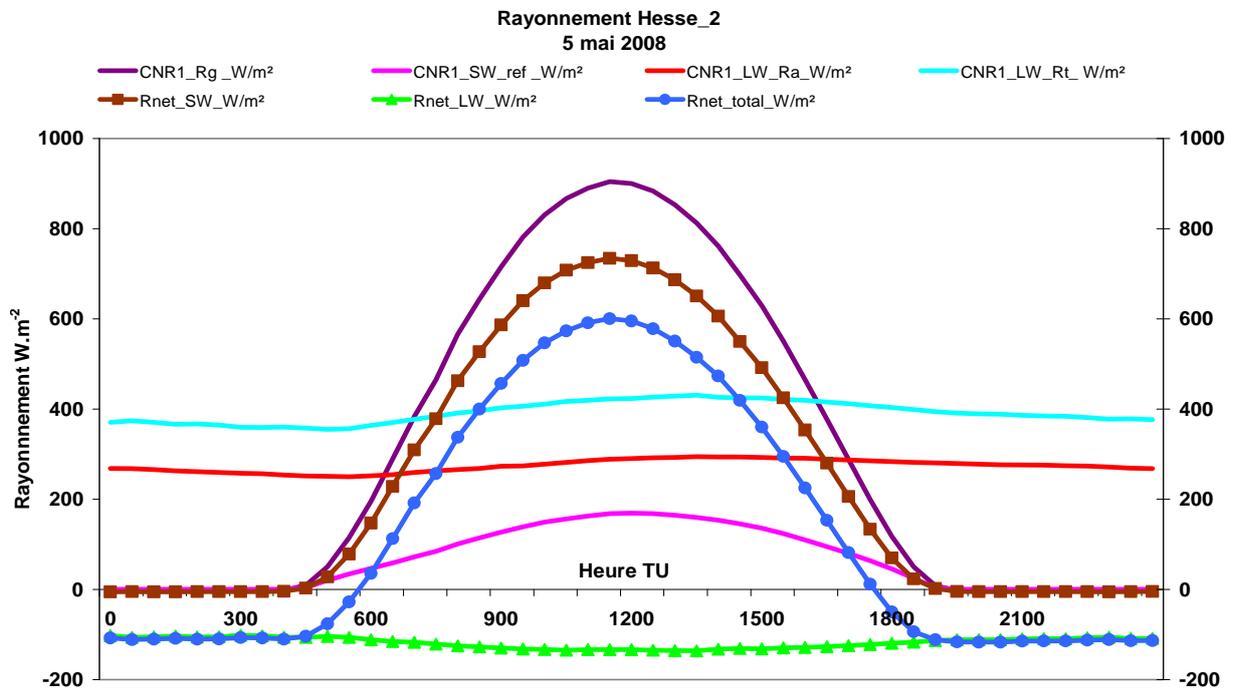


Figure 3 : Variation des différentes composantes du rayonnement net pendant une journée avec ciel dégagé et faible humidité, même en période nocturne.

Le rayonnement global (courbe violette) varie entre 0 et 900 $W\ m^{-2}$. La courbe rose (rayonnement solaire réfléchi) correspond à un albédo de $\approx 0,16$. Le bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde est représenté par la courbe avec carrés bruns. Le rayonnement terrestre (courbe bleue) est toujours supérieur au rayonnement atmosphérique (courbe rouge) : la différence pour les grandes longueurs d'onde est négative (courbe avec triangles verts) et s'accroît pendant la journée lorsque la température de l'ensemble végétation-sol s'élève plus que celle de la voûte céleste.

Le bilan net total (courbe avec ronds bleus) est positif pendant la période de 6 h à 18 h, lorsque R_g a un niveau suffisant.

Cette cinétique journalière idéale est assez peu fréquente dans notre région. Les journées avec un ciel clair sont souvent accompagnées de fin de nuit avec une humidité relative forte (**figure 4**) occasionnant la formation de brouillards dans l'air et de condensations sur les pyrromètres. Ceci affecte particulièrement le capteur pointant vers le ciel : au lieu de « voir » un ciel froid, ce dernier mesure, pour tout ou partie, le rayonnement des gouttelettes d'eau, à la température de l'air. Le rayonnement net de grande longueur d'onde est ainsi proche de zéro.

Dans ce cas, il est difficile de distinguer entre la condensation sur le capteur et la brume présente dans l'air. Une option chauffage existe sur certains bilanmètres : CNR1 Kipp et Zonen par exemple. Ce chauffage n'est possible que si l'énergie électrique nécessaire est disponible, 6 W h minimum. C'est rarement le cas pour les acquisitions autonomes avec batteries. Idéalement, ce chauffage ne devrait être activé que pendant la période nocturne : d'une heure avant le coucher du soleil à une heure après le lever. Ceci minimise les erreurs d'offset supplémentaires induites par ce chauffage sur le capteur pyranomètre en période diurne.

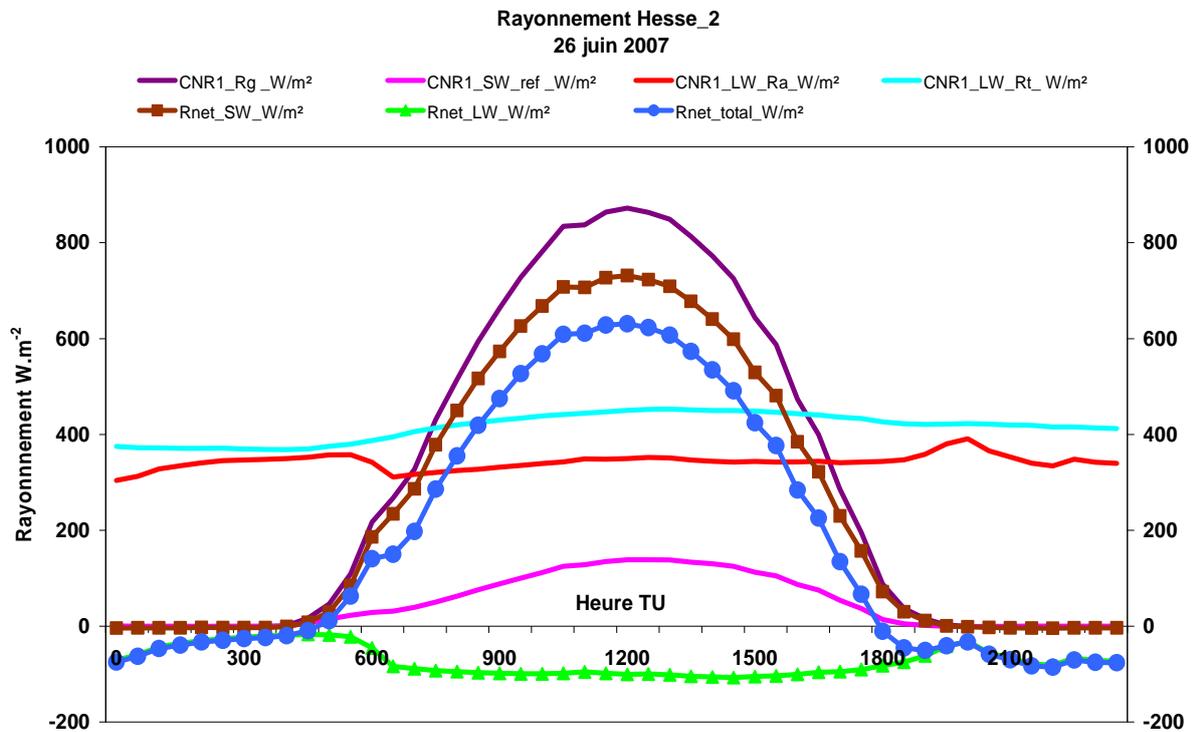


Figure 4 : Effets de l'humidité relative élevée en fin de nuit :

- la condensation sur le capteur et le brouillard provoquent la remontée du rayonnement atmosphérique (courbe rouge), le rayonnement net est proche de zéro ;
- le petit pic observé en soirée, entre 19h et 21h, est dû à un passage nuageux : l'humidité relative mesurée alors ne pouvant pas faire suspecter une formation de brume ou de rosée.

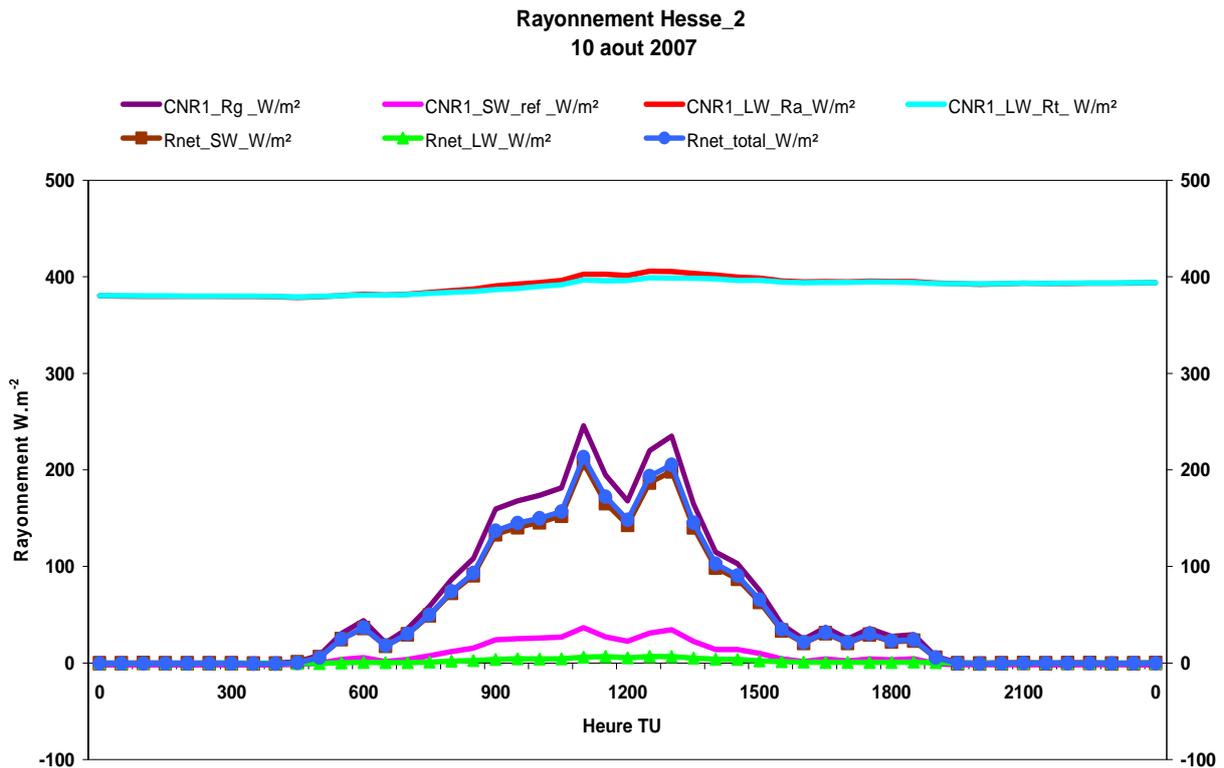


Figure 5 : *Journée nuageuse sans pluie :*

- les températures du couvert végétal et des nuages sont très proches ;
- les rayonnements terrestre et atmosphérique sont prépondérants et quasiment identiques ;
- le rayonnement net total et de courte longueur d'onde se confondent.

Conclusion

La mesure du rayonnement net avec une précision répondant aux nécessités scientifiques est possible à condition de bien choisir le matériel en fonction des objectifs et en tenant compte des différentes sources d'erreur présentées ci-dessus. Des précautions doivent être prises pour la validation des mesures, notamment lorsque l'humidité est proche de la saturation.

La liste présentée n'est pas exhaustive, elle recense des matériels de classes de performance et de prix gradués répondant aux exigences courantes de la recherche à l'Inra.

Bibliographie

De Parcevaux S., Huber L. (2007) Bioclimatologie concepts et applications, *Editions Quae*.

Documentations techniques Kipp et Zonen

Documentations techniques Hukseflux

Détecteurs quantiques de PAR et de rayonnement solaire validité, conditions d'emploi, étalonnage

Anne Labouret¹

Résumé : *Les cellules photovoltaïques, dont le courant varie proportionnellement au flux lumineux incident, permettent de réaliser des détecteurs étanches peu onéreux, très utiles dans divers domaines de l'agronomie. Grâce aux technologies de cellules au silicium, présentant des réponses spectrales différentes, on peut accéder à la mesure du rayonnement utile à la photosynthèse (PAR : Photosynthetically Active Radiation ou rayonnement photosynthétique actif) et au rayonnement solaire global (RG). Moyennant des précautions d'emploi, ces détecteurs sont intéressants surtout pour multiplier les points de mesure sur le terrain.*

Cet article détaille leur conception, leur mode de fonctionnement et les règles d'utilisation.

Mots clés : détecteurs, silicium, PAR, rayonnement, rayonnement solaire, étalonnage

Introduction

Le rayonnement solaire, impliqué dans la plupart des processus biologiques et chimiques de la vie sur terre, est constitué de diverses composantes : visible, ultraviolets, proche infrarouge, infrarouge lointain, qui n'ont pas le même rôle, notamment sur les mécanismes de croissance, de morphologie et de pathologie végétale ou animale, thèmes essentiels de la recherche en agronomie.

Par ailleurs, ces rayonnements sont très variables en fonction du lieu géographique, de la saison, de l'heure, des conditions climatiques et aussi localement par exemple en fonction de l'interaction avec le couvert végétal. Il est donc intéressant de disposer d'une solution à la fois scientifiquement correcte et économiquement viable afin de maîtriser et de multiplier la mesure de rayonnement, dans le temps et dans l'espace. Les détecteurs quantiques au silicium, utilisant la conversion photovoltaïque de la lumière en électricité, répondent à ces préoccupations. Ils sont à distinguer des détecteurs thermiques qui, quant à eux, utilisent la conversion de la lumière en chaleur.

1. Intérêt des cellules photovoltaïques pour la mesure de rayonnement

On emploie des cellules photovoltaïques pour mesurer le rayonnement, surtout parce qu'elles ont un signal directement proportionnel au flux lumineux et qu'elles présentent (selon leur technologie de fabrication) des réponses spectrales adaptées à différents types de rayonnement et des surfaces variant de moins de 1 cm² à plusieurs dizaines de cm². De plus, grâce aux techniques éprouvées de protection climatique des panneaux solaires, elles constituent des capteurs fiables et bon marché.

1.1 Principe de conversion

Un détecteur quantique utilise un dispositif à base de semi conducteur, une photodiode, généralement au silicium, qui a la faculté de convertir le flux lumineux en courant continu. Le mécanisme est celui de la conversion photovoltaïque : un photon dont l'énergie est supérieure

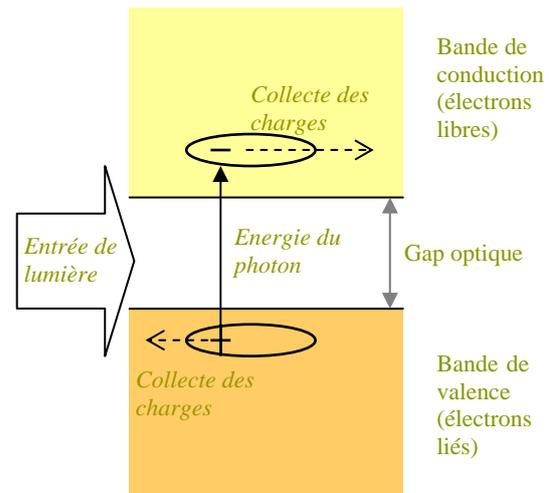
¹ SOLEMS S.A., 3 rue Léon Blum, F-91120 Palaiseau ✉ anne.labouret@solems.com

à la bande interdite du semi conducteur, ou « gap optique », est absorbé par celui-ci en créant une paire électron-trou c'est-à-dire une charge électrique négative et une charge électrique positive.

Autrement dit, grâce à son énergie, un photon extrait de l'atome de silicium un électron de la couche périphérique, ou bande de valence, qui devient un électron libre dans la bande de conduction susceptible de générer du courant électrique. Cette opération libère une charge positive, dite « trou », à la périphérie de l'atome, d'où l'appellation paire électron-trou.

Ce mécanisme est de nature « quantique » car il y a création d'une seule paire de charges par photon absorbé quelle que soit son énergie, dès lors qu'elle est supérieure à la bande interdite du matériau. Les photons d'énergie inférieure ne sont pas absorbés et l'excédant d'énergie des photons plus énergétiques que la bande interdite est perdu par désexcitation thermique.

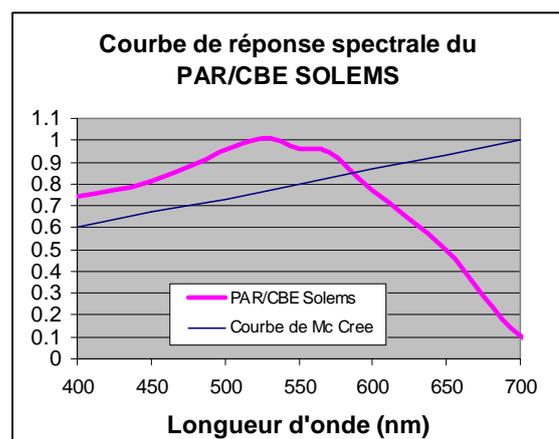
Par la constitution d'une jonction par dopage du silicium, on sépare ces charges pour les faire circuler dans un circuit extérieur, créant ainsi un courant électrique.



1.2 Technologies de cellules photovoltaïques

Grâce aux différents matériaux de cellules solaires, on peut réaliser soit des capteurs de rayonnement solaire, soit des capteurs de rayonnement PAR :

- Les cellules au silicium cristallin les plus classiques ont une réponse spectrale depuis le bleu (400 nm) jusqu'au proche IR (1 100 nm), longueur d'onde associée à leur gap optique de 1,1eV. Ces cellules sont donc intéressantes pour détecter le rayonnement solaire global (RG = direct + diffus) qui certes va au-delà, jusqu'à 3 μm et plus dans l'infrarouge, mais avec une faible quantité d'énergie.
- Les cellules au silicium amorphe avec leur gap optique plus élevé de 1,77eV, sont quant à elles sensibles dans le visible, de 400 à 700 nm et approchent d'assez près le rayonnement utile à la photosynthèse, dénommé PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) selon la courbe de Mc Cree (1972). Ces mesures de PAR à l'aide de cellules amorphes ont été initiées par M. Chartier *et al.* (1989) avec des cellules SOLEMS et exploitées depuis à l'Inra par des unités des centres de Dijon, Bordeaux, Lusignan et Avignon notamment, au Cirad et chez Météo-France.



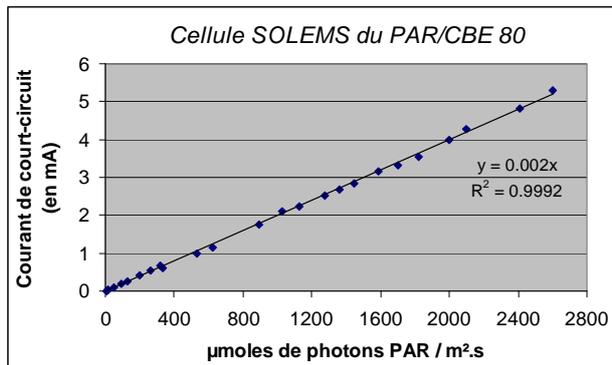
Auparavant, la mise en place d'un réseau de capteurs PAR était difficilement réalisable en raison du coût élevé des appareils de mesure, ce type d'expérimentation avec une grande quantité de points de mesures est réalisable depuis l'arrivée des capteurs au silicium.

1.3 Proportionnalité du courant de court-circuit

La courbe courant tension d'une photodiode sous éclairage présente des valeurs caractéristiques, que nous ne détaillerons pas ici. Le paramètre intéressant est le courant de court circuit, c'est-à-dire le courant sous impédance nulle, car il a l'avantage d'être directement proportionnel au flux lumineux. C'est donc ce paramètre qui est employé pour la mesure de rayonnement.

1.3.a Capteurs PAR

Pour le PAR, la grandeur physique recherchée est un flux de photons, exprimé en μmoles de photons $\text{PAR}/\text{m}^2.\text{s}$. On voit sur le schéma ci-dessous l'excellente linéarité du courant de court-circuit d'une cellule SOLEMS au silicium amorphe en fonction du PAR en micromoles de photons $\text{PAR}/\text{m}^2.\text{s}$.



C'est là que la nature « quantique » de ces capteurs prend tout son sens. En effet, le mécanisme de la photosynthèse est fonction du nombre de photons impactant une surface qui à travers le capteur quantique est converti directement en nombre de charges électriques (une paire par photon) et il est donc mesuré par le courant de court-circuit.

1.3.b Capteurs RG (de rayonnement solaire global)

Dans ce cas, la grandeur physique recherchée est un flux énergétique, en W/m^2 , et non plus un nombre de photons $\text{PAR}/\text{m}^2.\text{s}$ comme dans le cas du PAR.

Une cellule cristalline a également un courant de court-circuit proportionnel au flux incident, mais cette relation doit être étalonnée et exploitée à spectre constant, le plus souvent le spectre solaire naturel, type AM 1,5. Nous verrons les conditions d'emploi qui en résultent dans le paragraphe 3.1.

1.4 Géométrie des cellules

Pour intégrer un rayonnement sur une plus grande surface, on peut employer des cellules photovoltaïques de grandes dimensions, qui existent dans l'industrie. Rappelons cependant qu'un panneau solaire ou une photopile comportant plusieurs cellules en série ne peut pas constituer un capteur d'intégration spatiale, car la cellule la moins éclairée imposerait son faible courant aux autres. Un vrai intégrateur doit être composé d'une seule cellule de grandes dimensions.

Les cellules au silicium amorphe utilisées pour la détection du PAR sont déposées sur du verre selon des formats programmables, et elles sont donc compatibles avec des géométries particulières. Concrètement, il existe aujourd'hui des capteurs PAR ponctuels (de moins d' 1cm^2), des capteurs en ligne avec une cellule de $300 \times 4\text{mm}$ de détection, et des capteurs en ligne équipés de plusieurs points de détection alignés.

Pour détecter un flux moyen sur une surface plus étendue, on répartit plutôt plusieurs capteurs PAR déjà convertis en tension et câblés en série (cf. 3.2).

2. De la cellule photovoltaïque au détecteur de rayonnement

Il y a trois aspects à considérer pour faire un détecteur de rayonnement à partir d'une cellule solaire : optique, électrique et climatique.

2.1 Réponse en cosinus et filtrage optique

Pour s'affranchir des effets d'incidence sur les capteurs, un capot diffusant est placé devant les cellules : le matériau plastique choisi doit être translucide, stable aux UV et résistant mécaniquement.

En utilisant une coque en PMMA (Polyméthylmétacrylate) opalescent, on obtient une excellente réponse en cosinus, jusqu'à 85° d'incidence, et on coupe également la contribution des cellules entre 350 et 400 nm. Le PMMA étant réfléchissant dans l'UV, il est totalement insensible à ces radiations et stable dans le temps, contrairement par exemple au polycarbonate non traité, plus résistant mécaniquement, mais qui jaunit aux UV.

2.2 Adaptation électrique du signal

Traiter le signal en courant est peu commode et déconseillé car cela pose le problème de pertes en ligne, parasites... On shunte donc les cellules, avec des faibles résistances de charge à couche métallique, qui sont les plus stables en température. Avec des résistances ajustables on peut régler le niveau du signal tout en restant proche du point de court-circuit de la cellule ce qui conserve la linéarité du courant en fonction du rayonnement reçu ; la règle à suivre est que le signal pleine échelle i.e. au point le plus haut de la gamme de mesure, doit rester < 100 ou 150 mV selon le type de cellule (voir constructeur).

Exemple : Si une cellule au silicium amorphe SOLEMS montée dans son boîtier fournit 30 mA @ 1000 $\mu\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$ et qu'elle est destinée à explorer la gamme 0-2500 μmoles , elle donnera donc $30 \times 2,5 = 75$ mA pleine échelle, on la couplera donc à une résistance de 2 ohms maximum pour ne pas dépasser 150 mV.

La plupart des capteurs disponibles sur le marché tels les PAR/CBE ou PAR/LE de SOLEMS intègrent cette conversion en tension : le signal est alors fourni directement en mV continu. Autre avantage : ce mode de fonctionnement dit « photovoltaïque » ne requiert pas d'alimentation externe, il est économe en énergie.

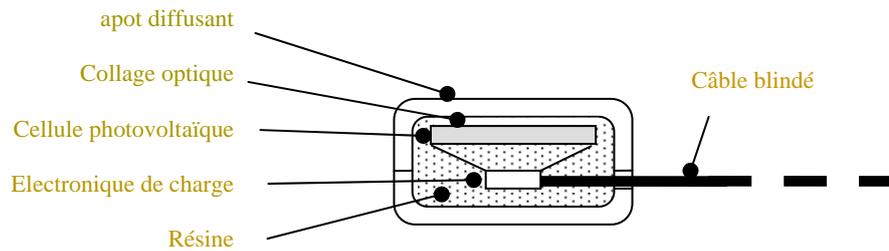
Pour certaines applications comme les chambres de culture à pilotage automatique, il peut être utile de disposer de capteurs PAR en boucle de courant 4-20 mA. Dans ce cas une alimentation 12 ou 24 V est nécessaire.

2.3 Etanchéité et câblage

Pour une bonne tenue dans le temps de ces capteurs exposés à l'extérieur dans toutes les conditions climatiques, la protection doit être soignée.

Le câblage sera blindé de préférence, pour éviter toute perturbation. Lorsque le signal du capteur est en voltage, on peut allonger les câbles sans perturber le signal ce qui est impossible lorsque le signal est en courant.

Pour la protection de ces capteurs, que ce soit pour la mesure du PAR ou du RG, SOLEMS utilise des boîtiers en PMMA. La cellule est collée optiquement au capot avant puis enrobée de résine avec la résistance, la connexion au câble et les composants électroniques nécessaires.



Vue en coupe d'un détecteur SOLEMS de PAR

3. Etalonnage et conditions d'emploi

3.1 Possibilités d'utilisation

Les capteurs quantiques de PAR sont utilisables dans de nombreuses configurations, en flux incident, transmis ou réfléchi. Ils sont par exemple bien adaptés aux bilans radiatifs des couverts végétaux (calcul du PAR absorbé en mesurant les PAR incident, réfléchi et transmis). La seule limitation est la réponse spectrale qui n'est pas rigoureusement la même que la courbe de Mc Cree. Lorsque l'écart entre ces deux courbes est grand, il n'est plus possible par exemple de filtrer ces capteurs pour tirer partie des différentes bandes spectrales visibles dans le bleu, le rouge et le vert.

En ce qui concerne les capteurs quantiques pour la mesure de rayonnement solaire, de type RG, ils doivent être utilisés avec une répartition spectrale figée de la source de lumière. Si le capteur est étalonné par le constructeur pour la mesure extérieure, il faut l'utiliser uniquement en ensoleillement naturel, dont le spectre varie peu, sauf en tout début et en fin de journée et par temps d'orage. Il ne faut surtout pas l'utiliser en transmis (le feuillage ne transmet pas toutes les couleurs de la même manière) ni sous éclairage artificiel.

En résumé, pour la mesure du rayonnement solaire en W/m^2 , on n'utilisera des capteurs quantiques que pour des mesures de flux incident, dans des conditions normales d'exposition.

	Unité à mesurer	Mesure de flux Incident	Mesure en transmis par un couvert végétal	Mesure de flux réfléchi
<i>Capteurs quantiques de PAR</i>	$\mu\text{moles de photons /m}^2.\text{s}$	OUI	OUI	OUI
<i>Capteurs quantiques de rayonnement solaire (RG)</i>	Rayonnement solaire en W/m^2	OUI *	NON	NON

** uniquement sous un spectre conforme à l'étalonnage fourni par le constructeur, soit la plupart du temps en extérieur, en conditions climatiques normales.*

3.2 Traitement du signal

La lecture de ces capteurs quantiques, dès lors qu'ils sont en tension continue, répond aux règles générales applicables à tous les capteurs de mesure. On les relie sur des centrales d'acquisition dont les caractéristiques répondent aux exigences du protocole expérimental : nombre de voies, sensibilité, fréquence de mesure, départ différé... On veillera en particulier à ce que la sensibilité des voies de mesure soit adaptée à la mesure à effectuer.

Exemple : Un capteur PAR qui donne 80 Mv @ 1 000 $\mu\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$ et qui doit explorer la gamme 0-2 000 μmoles sortira un signal de 0 à 160 mV. Il doit être monté de préférence sur une voie 0-200 mV, plutôt que 0-2 V car la mesure sera ainsi plus précise.

Pour câbler plusieurs capteurs de façon à moyenner le flux en plusieurs points, le plus simple est de les monter en série. Les signaux en tension vont s'ajouter ce dont il faudra tenir compte pour choisir la sensibilité de la voie, et on déduira la valeur moyenne par division du signal total par le nombre de capteurs.

3.3 Etalonnage

La plupart des capteurs sont livrés avec une valeur d'étalonnage assortie d'une tolérance plus ou moins large selon les constructeurs. SOLEMS délivre une valeur par lot de livraison. Une seule valeur d'étalonnage est suffisante puisque le capteur est linéaire. Pour une meilleure précision, on aura recours à un étalonnage plus précis, pour chaque capteur, par comparaison avec un capteur étalon mesurant la même grandeur physique, (μmoles de PAR ou W/m^2 d'ensoleillement) que l'on placera dans les conditions les plus proches que possible des conditions expérimentales ; par exemple, pas sous une lampe pour des expériences en extérieur. Il faudra que les deux capteurs soient exactement dans le même plan d'incidence et soumis au même rayonnement : il faut être attentif aux ombres portées car même la présence d'une personne à côté du capteur peut créer une perturbation.

On entend ici par capteur étalon, un capteur raccordé à une norme internationale et dont la tolérance d'étalonnage est plus faible que le capteur secondaire à étalonner.

Il est recommandé de procéder à ces étalonnages au moins une fois par an, en début de campagne de mesures et également en fin de campagne si les capteurs ont subi de fortes températures $> 50^\circ\text{C}$. En effet, les capteurs au silicium peuvent prendre quelques pourcents de bonus en cas de grosses chaleurs provoquées par un fort ensoleillement.

Conclusion

Si on respecte les consignes d'utilisation décrites ici, les capteurs quantiques rendent de grands services, Ils ne dispensent pas d'avoir aussi un capteur plus sophistiqué conservé hors des intempéries au laboratoire pour vérifier la validité des expériences et étalonner les capteurs quantiques « secondaires » comme on l'a vu précédemment.

En cours de mise au point, un système complet de détection de rayonnement « sans fils » va bientôt être disponible : les capteurs dialogueront par radio avec un concentrateur. Cela renforcera les possibilités de mesures avec un grand nombre de points. Le faible coût des capteurs quantiques qui incite à les multiplier sur le terrain sera encore un atout indéniable dans ce type d'expérimentation.

Bibliographie

Chartier M., Bonchrétien P., Allirand J.-M. et Gosse G. (1989) Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie* 9, 281-284.