

## Métrologie des rayonnements naturels d'origine solaire et atmosphérique

Olivier Marloie <sup>1</sup>, Jean-Marc Bonnefond <sup>2</sup>

**Résumé :** Cet article présente, dans une première partie, la métrologie des rayonnements naturels d'origine solaire et atmosphérique au niveau mondial développée au sein de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) : Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) ; centres radiométriques mondiaux, régionaux et nationaux ; comparaison internationale des pyréliomètres (IPC) ; référence radiométrique (RRM) ; groupe d'étalon mondial (GEM). Dans une deuxième partie, il décrit les méthodes d'étalonnage des pyranomètres, des pyrgéomètres et des pyrradiomètres, ainsi que l'étalonnage de capteurs quantiques pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif.

**Mots clés :** métrologie, rayonnements naturels, étalonnage, pyranomètre, pyrgéomètre, pyrradiomètre, quantummètre

### 1. Organisation mondiale de la métrologie du rayonnement d'origine solaire

#### 1.1 L'organisation météorologique mondiale (OMM)

L'organisation météorologique mondiale (OMM), créée en 1950, est une institution des Nations unies spécialisée dans la météorologie (le temps et le climat), l'hydrologie opérationnelle et les sciences géophysiques connexes. Elle compte 188 états et territoires membres (au 24 janvier 2007). L'OMM a été créée à l'échelle du globe pour assurer le développement de la météorologie et de l'hydrologie opérationnelle et pour tirer avantage de leurs applications.

L'un des principaux objectifs de l'OMM est de faciliter la coopération mondiale et de créer des réseaux de stations effectuant des observations météorologiques.

#### 1.2 La commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO)

Cette commission technique de l'OMM s'emploie principalement à mettre en application les dispositions du *programme des instruments et des méthodes d'observation* afin de garantir la précision des données et leur compatibilité à l'échelle du globe ainsi que la stabilité, sur le long terme, des systèmes d'observation intégrés de l'OMM.

Ces dispositions portent sur :

- la normalisation des instruments et des méthodes d'observation,
- la traçabilité, au niveau mondial, des mesures aux normes du système international d'unités (SI),
- l'utilisation et la maintenance des instruments et des systèmes, auxquels les membres font appel pour l'exploitation courante de leurs réseaux d'observation.

---

<sup>1</sup> UMR1114 Environnement méditerranéen et modélisation des agro - hydrosystèmes EMMAH INRA-Univ. Avignon et Pays de Vaucluse - F-84000 Avignon ☎ 04 32 72 23 47 ✉ [olivier.marloie@avignon.inra.fr](mailto:olivier.marloie@avignon.inra.fr)

<sup>2</sup> INRA, UR1263 Écologie fonctionnelle et physique de l'environnement EPHYSE - F-33140 Villenave d'Ornon

La commission conduit les comparaisons d'instruments afin d'assurer la compatibilité et l'homogénéité des données à l'échelle mondiale.

Pour bien comprendre les mécanismes du climat, il est essentiel de déterminer le bilan radiatif au niveau du globe qui doit s'appuyer sur des mesures homogènes du rayonnement solaire réalisées dans toutes les régions du monde. Dans ce but, la CIMO a mis en place une structure métrologique au niveau mondial afin d'assurer la traçabilité des mesures à des références internationales reconnues et des pratiques de mesure communes.

Deux centres radiométriques mondiaux ont été désignés par la CIMO :

- le centre radiométrique mondial de Davos en Suisse dont la mission principale est de détenir et maintenir des références radiométriques mondiales (RRM) pour les mesures de rayonnement solaire ;
- le centre radiométrique mondial situé à l'observatoire géophysique de Saint Petersburg (Russie) dont la mission principale est de centraliser et d'archiver les données radiométriques d'origine solaire acquises dans le monde entier afin d'assurer la disponibilité de ces données pour la communauté scientifique internationale.

La CIMO a désigné vingt-deux centres radiométriques régionaux (régions au sens OMM) afin de servir de centre pour des comparaisons régionales de pyréliomètres. Un centre régional doit posséder et maintenir un groupe étalon mondial composé d'au moins trois pyréliomètres dont un est comparé tous les cinq ans au minimum, à la RRM.

La CIMO a également désigné des centres radiométriques afin de maintenir un instrument étalon et de servir de centre pour l'étalonnage et la vérification des instruments utilisés dans les réseaux nationaux de mesure de rayonnements. Un centre national doit posséder et maintenir au moins deux pyréliomètres comme étalons nationaux et, il doit réaliser une comparaison d'un de ces pyréliomètres à l'étalon régional au minimum tous les cinq ans. Les centres radiométriques nationaux sont responsables de la mise à jour de l'information technique, de la collecte des données, du suivi des résultats de mesure ainsi que de la maintenance du réseau national des stations de mesure de rayonnements.

En France, le centre radiométrique de Météo France Carpentras (vaucluse) en lien avec celui de Trappes (Yvelines) a été désigné comme centre radiométrique national et régional (zone Europe). Ce centre réalise l'étalonnage d'instruments radiométriques (pyréliomètre, photomètre solaire, capteur de durée d'insolation, pyranomètre et pyrgéomètre) assurant ainsi le raccordement aux étalons internationaux.

### **1.3 Le centre radiométrique mondial de Davos (Suisse)**

Pour que les données de rayonnement aient la qualité voulue, l'OMM a désigné en 1971, l'observatoire physico-météorologique de Davos (PMOD) comme centre radiométrique mondial (World Radiometric Center - WRC) afin de :

- développer et maintenir des références radiométriques fiables ;
- procéder à l'étalonnage des instruments servant de référence dans les centres radiométriques régionaux du monde entier ;
- promouvoir la recherche et le développement en matière de radiométrie et de méthodes de mesure des paramètres du rayonnement ;
- former des spécialistes du rayonnement.

Le centre est subdivisé en deux sections auxquelles s'ajoutent deux domaines complémentaires :

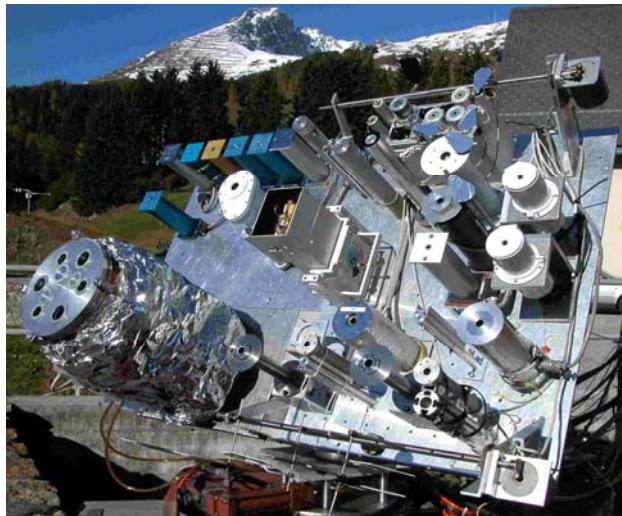
- la section de radiométrie solaire (WRC-SRS),
- la section de radiométrie infrarouge (WRC-IRS),
- domaine complémentaire : Centre d'étalonnage en matière de turbidité atmosphérique (World Optical depth Research and Calibration Centre - WORCC),
- domaine complémentaire : Centre européen d'étalonnage des radiomètres ultraviolets (European Ultraviolet Radiometer Calibration Center - EUVC).

### Radiométrie solaire

La référence radiométrique mondiale (RRM), en service depuis 1980, est l'étalon primaire de la mesure représentant l'unité SI d'éclairement énergétique (*irradiance* en anglais).

Cette RRM est matérialisée par un groupe de pyréliomètres absolus à cavité très bien caractérisé. Ce groupe d'instruments est appelé « groupe étalon mondial » (GEM) (ou World Standard Group (WSG), **figure 1**).

Actuellement, la RRM est déterminé à partir d'un groupe composé de 6 radiomètres absolus (pyréliomètres). Le principe de mesure de ces instruments est de comparer l'élévation de température d'une cavité (corps noir) produite par le rayonnement reçu, avec celle produite par effet Joule dans une résistance chauffante. La non-équivalence des effets produits par ces 2 modes de chauffage (substitution de la puissance du rayonnement solaire par une puissance électrique) de la cavité de ces pyréliomètres, nécessite de connaître un facteur d'ajustement. Ce facteur est obtenu par des mesures longues, méticuleuses et coûteuses en laboratoire.



**Figure 1** : Groupe étalon mondial (WSG) au PMOD/WRC (Source : PMOD/WRC)

Les pyréliomètres étalons des centres régionaux ou nationaux sont identiques aux étalons primaires mais ils ne bénéficient pas d'une telle caractérisation. Les facteurs d'ajustement des étalons régionaux sont déterminés au cours d'une comparaison internationale des pyréliomètres (IPC) qui a lieu tous les 5 ans à Davos.

L'incertitude de la RRM est inférieure à  $1 \text{ W.m}^{-2}$  (niveau de confiance : 95 %) pour des éclairements du rayonnement direct  $I$  supérieur à  $700 \text{ W m}^{-2}$  (conditions de ciel clair et stable). Cette incertitude augmente avec le transfert de la RRM vers les étalons nationaux. Les experts de l'OMM l'évaluent au plus à  $4 \text{ W.m}^{-2}$  (niveau de confiance : 95 %) pour les mêmes conditions d'éclairement :  $I > 700 \text{ W m}^{-2}$ .

Pour des pyréliomètres de réseaux (à simple thermopile), l'incertitude croît pour atteindre près de  $20 \text{ W.m}^{-2}$  pour les mêmes conditions d'éclairement et le même niveau de confiance de 95 %.

### Radiométrie infrarouge

La section de radiométrie infrarouge du centre radiométrique mondial (WRC-IRS) a été créée en 2004. Elle a pour tâche de définir, pour le rayonnement de grande longueur d'onde, l'échelle de comparaison pour toutes les mesures dans le monde. Elle doit diffuser cette échelle dans les centres radiométriques du monde entier, d'une part en procédant à l'étalonnage d'instruments au PMOD/WRC, d'autre part en créant des centres régionaux d'étalonnage, dont les étalons dérivent de l'étalon de référence de la WRC-IRS.

La WRC-IRS entretient une référence intermédiaire pour les pyrgéomètres infrarouges, en se basant sur les procédures et les instruments composant un groupe étalon mondial de pyrgéomètre, le WISG (World Infrared Standard Group of pyrgeometers, **figure 2**).

Le WISG se compose actuellement de quatre pyrgéomètres : deux modèles *Precision Infrared Radiometer* (PIR) d'Eppley, et deux modèles *CG4* de Kipp & Zonen. Tous les instruments sont montés sur un traqueur afin d'ombérer le rayonnement solaire direct. Ces instruments sont eux même comparés à un radiomètre absolu à balayage du ciel et à d'autres pyrgéomètres dans le cadre des comparaisons internationales (International Pyrgeometer and Absolute Sky Scanning Comparison, IPASRC-II, Alaska, mars 2001).



**Figure 2** : Groupe étalon infrarouge mondial (WISG) au PMOD/WRC (Source : PMOD/WRC)

En laboratoire, l'utilisation de sources de rayonnement du corps noir à basse température, référence rapportée à des étalons de température absolue, permet de bien caractériser les instruments du WISG. En conditions naturelles, les développements en cours de radiomètres absolus doivent permettre d'identifier des instruments de référence pour l'étalonnage de pyrgéomètres.

## 2. Instructions d'étalonnage

### 2.1 Pyranomètre - Mesure du rayonnement global (0,3 - 3 µm)

**2.1.a Méthodes :** Deux normes (normes ISO, 1992-1993) existent concernant l'étalonnage des pyranomètres, elles décrivent les méthodes suivantes :

- par comparaison à un pyréliomètre étalonné (méthode cache-soleil),
- par comparaison à un pyréliomètre et un pyranomètre occulté,
- par comparaison à un pyranomètre choisi comme étalon, la source d'éclairement étant le soleil ou une source artificielle constituée de plusieurs lampes sur un banc optique de laboratoire ou dans une sphère intégrante.

L'étalonnage consiste à déterminer un **coefficient d'étalonnage K**, qui permet de déterminer la valeur numérique du rayonnement global  $G$  mesurée par le pyranomètre.

$$G \text{ est exprimé en } W/m^2, \quad U \text{ est exprimé en } V \text{ (ou mV ou encore } \mu V), \quad G = \frac{U}{K}$$

$$K \text{ est exprimé en } V/W.m^{-2} \text{ (ou mV/W.m}^{-2} \text{ ou encore } \mu V/W.m^{-2}).$$

Les coefficients d'étalonnage  $K$  des pyranomètres ne sont pas constants. Ils varient selon la saison, la méthode utilisée pour l'étalonnage, la hauteur du soleil et la méthode de calcul.

La CIMO édite des recommandations dans son guide (7<sup>ème</sup> édition, 2008) actualisant les procédures à suivre.

La première recommandation est d'étalonner un pyranomètre tous les deux ans. Compte tenu de la moins bonne réponse en cosinus des instruments pour des directions d'éclairements rasants, il est recommandé de ne pas étalonner pour des hauteurs du soleil inférieures à 30°. Cette recommandation est impossible à respecter en hiver sous nos latitudes. Il est conseillé d'enregistrer soit la température ambiante soit celle du capteur pour étudier les effets de la température.

**Première méthode dite du cache-soleil :** comparaison avec un pyréliomètre étalon - méthode nécessitant un ciel toujours clair sans nuages

Les rayonnements Global  $G$ , Direct  $I$  et Diffus  $D$ , sont liés par la relation :

$$G = I \cdot \sin(h) + D$$

où  $h$  représente la hauteur du Soleil,

Pour étalonner un pyranomètre il faut disposer simultanément des éclairements énergétiques ou de signaux électriques, de  $G$ ,  $I$  et  $D$ .

$I$  est mesuré par le pyréliomètre étalon.  $G$  et  $D$  sont mesurés en relevant respectivement les tensions  $U_G$  et  $U_D$  délivrées par le pyranomètre à étalonner. L'estimation du coefficient  $K$  à une valeur de rayonnement global se réalise en trois étapes correspondant à trois instants  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  ( $t_3 - t_1 = 5$  minutes environ).  $I$  et  $U_D$  sont mesurés à l'instant  $t_2$ .  $U_G$  est calculé en moyennant des mesures réalisées aux instants  $t_1$  et  $t_3$ .

$$G - D = I \cdot \sin(h) \text{ ou } \frac{(U_G - U_D)}{K} = I \cdot \sin(h)$$

$$K = \frac{(U_G - U_D)}{I \cdot \sin(h)}$$

Le pyranomètre est masqué par un petit disque **cache-soleil** à l'instant  $t_2$  uniquement. On note que la méthode de calcul de la hauteur du soleil ( $h$ ) influence sensiblement l'incertitude finale.

**Seconde méthode** : comparaison avec un pyrhéliomètre étalon (mesure du rayonnement direct I) et un pyranomètre étalon mesurant le rayonnement diffus D (occulté par un petit disque suiveur) pour cette méthode le ciel sera toujours clair et sans nuages  
Le coefficient d'étalonnage K est déterminé à partir de la relation :

$$G = I \cdot \sin(h) + D = \frac{U_G}{K}$$

$$K = \frac{U_G}{I \cdot \sin(h) + D}$$

Cette méthode est de loin préférable à la précédente : pas de manipulations du disque cache-soleil, meilleure incertitude de mesure de **K**.

**Troisième méthode** : comparaison avec un pyranomètre de référence.

Le pyranomètre étalon est de même type que le(s) pyranomètre(s) à étalonner ; pour cette méthode le ciel n'est pas obligatoirement clair comme pour les 2 précédentes.

Cette méthode est la plus simple à mettre en œuvre. Le coefficient d'étalonnage K est le rapport R entre la tension  $U_G$  du capteur à étalonner et la tension  $U_R$  délivrée par l'étalon,  $K_R$  étant le coefficient d'étalonnage de l'étalon :

$$K = \frac{U_G}{G} = \frac{U_G}{U_R} K_R = R \cdot K_R .$$

**Quatrième méthode** : comparaison avec un pyranomètre étalon en laboratoire.

Cette méthode est semblable à la précédente ; le soleil est remplacé par une source de lumière artificielle et elle nécessite l'utilisation de banc optique ou de sphère intégrante.

### **2.1.b Mode opératoire de la méthode par comparaison à un pyranomètre de référence en conditions naturelles**

Le banc d'étalonnage doit être situé à l'extérieur sur un site où les obstacles (non naturels en principe) doivent être à une hauteur inférieure à 5 degrés. Il est préférable d'étalonner par « beau temps » (ciel clair sans nuages) sur plusieurs jours (pas obligatoirement consécutifs) jusqu'à obtenir environ 1 000 valeurs de tension de sortie pour chaque pyranomètre. Pour l'OMM il est difficile de spécifier ce nombre. Mais dans tous les cas, *"l'écart type de la moyenne devrait être inférieur à la limite d'exactitude souhaitée"*.

En condition instable, ciel avec quelques nuages, il est nécessaire de faire des mesures sur une période plus grande.

#### **Actions préliminaires :**

- contrôler visuellement l'état général: corps du pyranomètre, coupelles, peinture de la thermopile, câble de sortie, étanchéité... ;
- remplacer les pièces défectueuses ;
- remplacer le dessicant (si présent) ;
- nettoyer le radiomètre ;
- installer les pyranomètres sur des supports à la même hauteur, avec le fil de sortie au Nord.



### Avant chaque démarrage d'une acquisition ou chaque jour d'étalonnage :

- mettre de niveau tous les pyranomètres ;
- nettoyage des coupelles : poussières, condensation, gelée blanche, fientes d'oiseaux, *etc.* ;
- démarrer l'acquisition automatique, par "beau temps", et n'utiliser les données que pour des hauteurs de soleil supérieures à 30°.

Après 3 jours en été et 4 à 5 jours en hiver (pas obligatoirement consécutifs), mille valeurs de tensions de sortie  $U_G$  et  $U_R$  sont disponibles.

Pour chaque couple (i) de valeurs de tensions acquises, le coefficient  $K_i$  est calculé par la relation :

$$K_i = \frac{U_{Gi}}{G_i} = \frac{U_{Gi}}{U_{Ri}} K_R = R_i \cdot K_R$$

Le calcul du Coefficient d'étalonnage peut être estimé selon deux méthodes :

$$\text{moyenne : } K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \text{ ou moyenne pondérée : } K_{\text{pondéré}} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i \cdot G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i}$$

Il n'existe pas de grosses différences entre les coefficients d'étalonnage calculés suivant ces 2 méthodes mais elles sont utilisées toutes les deux.

Des études menées par Météo France sur les variations relatives des coefficients d'étalonnage de deux séries de 7 pyranomètres (type CM5 et CM11 de Kipp & Zonen), sur des périodes respectives de 20 et 10 ans, montrent une remarquable stabilité de ces coefficients.

Ces coefficients sont tous compris dans l'intervalle  $\pm 1\%$  de la valeur moyenne calculée sur 20 et 10 ans, indépendamment de la méthode d'étalonnage utilisée (Morel *et al.*, 2007).

## 2.2 Pyrgéomètre - Mesure du rayonnement de grandes longueurs d'onde (3 - 50 $\mu\text{m}$ )

### 2.2.a Méthodes

L'étalonnage d'un pyrgéomètre consiste à déterminer principalement un coefficient d'étalonnage C permettant de calculer l'éclairement énergétique de grande longueur d'onde (3,5 - 50  $\mu\text{m}$ ) du rayonnement terrestre descendant d'origine atmosphérique  $L_{\downarrow}$ . Ce coefficient est déterminé grâce à l'utilisation de corps noir mais il est possible de l'estimer en réalisant des mesures en conditions naturelles par comparaison à un pyrgéomètre dont la traçabilité de l'étalonnage est assurée par une chaîne ininterrompue de comparaison au groupe d'étalon mondial (WISG) de Davos. En France, l'étalonnage au centre radiométrique de Carpentras (Météo France) assure le raccordement au WISG.

Il n'existe pas de norme mais le guide CIMO ainsi que le centre radiométrique mondial dicte des recommandations à suivre.

Il existe deux principaux modèles de capteurs dont l'étalonnage diffère en raison de leur conception différente :

#### - Pyrgéomètre Eppley modèle PIR

De par sa conception, le pyrgéomètre modèle PIR de Eppley exige de déterminer d'autres constantes nécessitant l'emploi de corps noir. La température de la coupelle influence la mesure il faut donc la mesurer. Les anciennes versions de ce pyrgéomètre PIR doivent être

modifiées afin de mesurer correctement cette température (à l'intérieur de la coupelle en trois points à 120° et à une hauteur de 45°, opération est réalisable au centre radiométrique mondial de Davos). Il est préférable de ventiler cet instrument et, si possible d'occulter sa coupelle du soleil, par un petit disque suiveur.

$$L \downarrow = \frac{U_{emf}}{C} \cdot (1 + k_1 \cdot \sigma \cdot T_b^3) + k_2 \cdot \sigma \cdot T_b^4 - k_3 \cdot \sigma \cdot (T_d^4 - T_b^4) \quad (\text{Philipona et al., 1995})$$

$U_{emf}$ : tension de sortie en mV,

$C$ : coefficient d'étalonnage du pyrgéomètre en mV/W/m<sup>2</sup>,

$k_1, k_2, k_3$  trois pseudo-constantes,

$\sigma$ : constante de Stephan Boltzmann égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$

$T_B$  et  $T_D$ : températures du corps du capteur (*Body*) et de la coupelle (*Dome*) en K

Ces *pseudo-constantes* sont déterminées à Davos par l'utilisation de corps noir. Elles dépendent en fait d'autres constantes dont la transmittance de la coupelle (dans les 2 sens, réflectivité à l'intérieur de la coupelle, émissivité surface thermopile, etc.).

### - Pyrgéomètre Kipp & Zonen modèle CG4 ou CGR4

$$L \downarrow = \frac{U_{emf}}{C} + \sigma \cdot T_b^4$$

$U_{emf}$ : tension de sortie en mV,

$C$ : coefficient d'étalonnage du pyrgéomètre en mV/W/m<sup>2</sup>,

$\sigma$ : constante de Stephan Boltzmann égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$

$T_B$ : température du corps (*Body*) du capteur en K.

Le pyrgéomètre CG4 est plus récent que le pyrgéomètre PIR d'Eppley. Une conception originale de la coupelle du CG4, a permis d'éviter un trop fort échauffement de la coupelle par temps ensoleillé, la mesure de  $T_D$  (coupelle) n'est plus nécessaire.

De nombreuses comparaisons entre le PIR modifié et le CG4, ont montré que les 2 pyrgéomètres se comportaient de manière excellente. Lors de ces comparaisons, l'*incertitude relative élargie* ( $k=2$ ) des mesures a été estimée à 5 % environ.

### 2.2.b Mode opératoire pour la détermination du coefficient d'étalonnage en condition naturelles

Ce mode opératoire est pratiqué par le centre radiométrique de Carpentras de Météo France ainsi que par Kipp & Zonen pour l'étalonnage de leurs instruments (pyrgéomètres CGR4 et CGR3).

Le banc d'étalonnage doit être situé à l'extérieur sur un site où les obstacles (non naturels en principe) ne doivent pas être à une hauteur supérieure à 5 degrés. Seules les données de nuit et pour des conditions de ciel clair sont utilisées pour calculer ce coefficient. Les valeurs délivrées par le pyrgéomètre à étalonner et par l'étalon sont relevées toutes les secondes et intégrées sur une minute. Au total, il est impératif de disposer d'un jeu de données correspondant à 6 heures de mesure (cumul de périodes en condition de ciel clair). Les données de jour permettent de valider l'estimation du coefficient.



### Actions préliminaires :

- contrôler visuellement l'état général : corps du pyrgéomètre, coupelles, câble de sortie, étanchéité, etc.,
- remplacer les pièces défectueuses,
- remplacer le dessicant éventuel,
- nettoyer les coupelles : poussières, condensation, gelée blanche, fientes d'oiseaux, etc.,
- installer les pyrgéomètres sur des supports à la même hauteur, avec le fil de sortie au Nord.

Pour chaque couple (i) de valeurs de tensions acquises, le coefficient  $C_i$  est calculé par la relation :

$$C_i = \frac{U_{ii}}{L \downarrow_{ri} - \sigma.T_b^4}$$

Le critère suivant (bilan des échanges dans l'infrarouge au niveau du capteur) peut être utilisé afin de déterminer les conditions de ciel clair et ainsi de sélectionner les coefficients  $C_i$  utilisables :

$$L \downarrow_{ri} - \sigma.T_b^4 > 40W.m^{-2}$$

Le coefficient d'étalonnage C est estimé par le calcul de la moyenne :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}$$

### 2.3 Pyrradiomètre différentiel - mesure du rayonnement net (0,3 - 50 $\mu\text{m}$ )

Quatre types d'instruments existent :

- pour des mesures indépendantes des rayonnements descendants et ascendants de courtes et grandes longueurs d'onde : ces instruments sont composés de deux pyranomètres et de deux pyrgéomètres montés en opposition (ex : pyrradiomètres CNR1 de Kipp & Zonen ou RA01 de Hukseflux) ;
- pour des mesures du bilan net du rayonnement descendant et ascendant : ces capteurs sont constitués à partir de l'utilisation de thermopiles protégées par des coupelles transparentes en lupolen (ex : pyrradiomètre Q7 de la marque REBS) ou recouverts d'une couche en Téflon® (ex : pyrradiomètre NRLite de Kipp & Zonen) ;
- pour des mesures indépendantes des rayonnements incidents et ascendants dans l'ensemble des longueurs d'onde. Comme dans le cas précédent les thermopiles sont protégées par des coupelles (ex. pyrradiomètre Schenk 8111) ;
- pour une mesure du bilan d'énergie dans les grandes longueurs d'onde et dans les courtes longueurs d'onde. Ces appareils sont constitués d'une paire de pyranomètres montés en opposition et d'une paire de pyrgéomètres montés de la même façon (ex. Kipp & Zonen CNR2).

Concernant le premier type d'instruments, l'étalonnage consiste à étalonner individuellement chaque capteur (pyranomètre et pyrgéomètre) selon les instructions décrites précédemment. On déterminera alors quatre coefficients pour chaque capteur du pyrromètre.

Les constructeurs proposent des prestations d'étalonnage accompagnées d'une modification interne (ajustage de résistance) afin d'obtenir un unique coefficient d'étalonnage pour l'ensemble des signaux délivrés. Cette opération simplifie le traitement des résultats de mesure.

Concernant le deuxième type d'instrument, on obtient les meilleurs résultats avec la méthode d'étalonnage réalisée en laboratoire par la détermination de la sensibilité dans le domaine des grandes longueurs d'onde par l'utilisation de corps noir.

Or, il existe différentes méthodes applicables en conditions naturelles (source : soleil + ciel). La sensibilité (ou coefficient d'étalonnage), en considérant qu'elle est constante sur tout le domaine spectral, peut être déterminée :

- dans le domaine des courtes longueurs d'onde en prenant comme étalon un pyranomètre. Il est nécessaire d'une part de mesurer séparément le rayonnement de grandes longueurs d'onde  $L_{\downarrow}$  avec un pyrgéomètre et d'autre part de couvrir la face inférieure (mesurant le rayonnement ascendant) avec une cavité dont la l'émissivité et la température sont connues (cavité avec une inertie importante de sorte que la température varie très lentement aux variations brusques de la température ambiante) ;
- dans le domaine des grandes longueurs d'onde, en appliquant le même dispositif que précédemment mais en n'utilisant que les données de nuit. Le bilan est alors égal à la différence entre la valeur du rayonnement  $L_{\downarrow}$  délivrée par le pyrgéomètre et le rayonnement émis par la cavité  $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{cavité}}^4$  ;
- dans le domaine des grandes longueurs d'onde en couvrant cette fois-ci la face supérieure d'une cavité identique à celle citée précédemment et en mesurant le rayonnement émis par une surface (eau, neige par exemple) dont on connaît l'émissivité et la température de surface ( $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4$ ). Seules les données de nuit sont utilisées pour s'affranchir du rayonnement ascendant de courtes longueurs d'onde.

Dans la réalité, la sensibilité n'est pas forcément la même sur tout le domaine spectral. Ceci peut entraîner des erreurs. Sur certains instruments cela entraîne des sensibilités différentes pour les données acquises de jour et celles de nuit. Des coefficients d'étalonnage sont donc déterminés lorsque la tension délivrée est positive ou négative (ex. REBS Q7).

La vitesse du vent peut aussi avoir une influence sur la mesure du rayonnement net. En effet, le vent évacue de la chaleur au niveau du corps de l'appareil qui est souvent pris comme puits de chaleur dans la chaîne de thermocouple. Il s'en suit donc une variation de la température de référence et certains fabricants fournissent donc une correction à apporter en fonction de cette vitesse (ex. REBS Q7)

Dans la pratique, il est possible de réaliser des comparaisons avec un instrument neuf dont l'étalonnage vient d'être réalisé en laboratoire.

## 2.4 Quantummètre - Mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (0.4 - 0.7 $\mu\text{m}$ )

Les quantummètres sont des radiomètres utilisés pour la mesure du rayonnement visible (400 - 700 nm). Ces capteurs ont une réponse spectrale (**figure 3**, exemple de sensibilité spectrale) leur permettant de déterminer le rayonnement photosynthétiquement actif, en anglais PAR (Photosynthetically Active Radiation). Le PAR est utilisé par le feuillage vert des plantes lors de la photosynthèse. On peut quantifier ce dernier en :

$\text{W.m}^{-2}$ , il s'agit, pour les anglo-saxons, de *Photosynthetic Irradiance* ou PI  
 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , c'est alors le *Photosynthetic Photon Flux Density* ou PPF

La conversion des  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  en unité énergétique  $\text{W.m}^{-2}$  est compliquée. Elle dépend de la source lumineuse et, la courbe distribution spectrale de la source doit être connue afin d'effectuer la conversion (cf. LI-COR : Principle of Radiation Measurement).

Pour des mesures du rayonnement total incident (direct + diffus) en conditions naturelles et de ciel clair (soleil + ciel bleu), on peut utiliser en première approximation le facteur de conversion suivant :  $1 \text{ W.m}^{-2} = 4.57 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (Mc Cree, 1972).

Dans nos activités de recherche, il est fréquent d'observer la relation entre le rayonnement global (Rg) et le *rayonnement photosynthétiquement actif* (PAR) ou d'estimer la valeur de l'un à partir de la mesure de l'autre. Le rapport n'est pas constant et il varie en fonction du lieu et des conditions d'éclairement (essentiellement entre 0,45 et 0,52). En première approximation, on peut utiliser la formule suivante :

$$\text{Rg} = 0,48 \times \text{PAR}$$

Rg : (0,3 - 3,0  $\mu\text{m}$ ) en  $\text{W.m}^{-2}$

PAR : (0,4 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) en  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

La mesure du PAR est réalisée grâce à l'utilisation de détecteurs quantiques (photodiodes au silicium ou à l'arséniure de gallium). Le signal de sortie est généré lorsque la mobilité et le nombre de porteurs de charges libres sont modifiés par les photons incidents. L'ajout de filtres permet d'ajuster la sensibilité spectrale à la réponse photosynthétique des plantes. La réponse en cosinus de ces capteurs est généralement bonne pour des angles zénithaux inférieurs à  $80^\circ$  (erreur inférieure à  $\pm 5\%$ ).

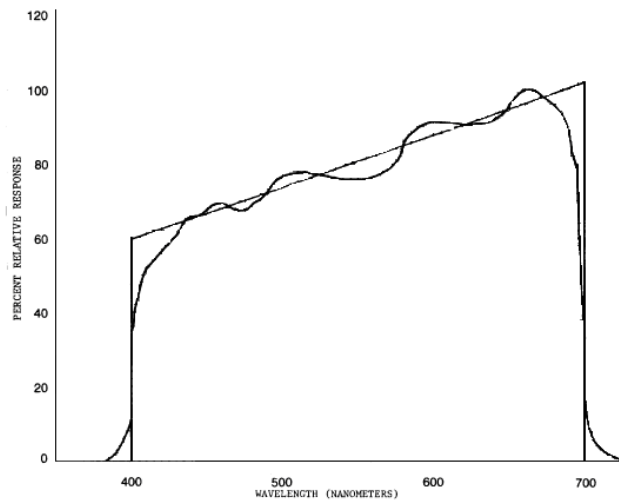
Au niveau métrologie, il n'existe pas de référence radiométrique (comparable au WSG dans le domaine solaire) permettant de se raccorder à des étalons en conditions naturelles. Ceci est lié au fait qu'il n'existe pas de réseaux de suivi du PAR à l'échelle mondiale comme c'est le cas pour la mesure du rayonnement global ; l'OMM ne prend donc pas en compte cette mesure.

Les références disponibles pour l'étalonnage de ce type de capteur sont des lampes étalons utilisables en laboratoire. Au niveau national, les étalons primaires sont développés et maintenus au laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). En laboratoire, ces capteurs sont étalonnés selon deux méthodes :

- la première méthode consiste à comparer la grandeur électrique délivrée par le capteur à une lampe dont on connaît la densité de flux de photons émis. Les lampes utilisées sont étalonnées par rapport à des lampes étalons au niveau national.
- la deuxième méthode consiste à comparer la grandeur électrique délivrée par le capteur à la valeur de PAR fournie par un capteur étalon. Une lampe est utilisée comme source afin de générer un flux de photons.

Les principaux fournisseurs ont développé des dispositifs d'étalonnage et assurent chacun la traçabilité de leur lampe étalon par un raccordement aux étalons nationaux de leur pays respectif. Au niveau international, les différentes structures coopèrent afin d'assurer des inter-comparaisons des étalons.

Cependant, on constate souvent des écarts importants entre les mesures délivrées par différents modèles de capteurs pouvant aller jusqu'à 10 %. Ces écarts peuvent provenir d'erreurs d'étalonnage mais aussi de réponse spectrale différente par rapport à un capteur idéal (**figure 3**). J. Ross et M. Sulev (1999) montrent que ce type d'erreurs ne dépasse pas les 1 % pour un capteur LI-190SA de LI-COR. En revanche, pour un capteur PARLite de Kipp & Zonen, elles varient de 1 à 8 % suivant le type de rayonnement.



**Figure 3** : *Sensibilité spectrale relative (au niveau énergétique) du capteur LI-190SA de LI-COR comparé à un capteur idéal*

Dans nos activités de recherche, l'étalonnage de capteurs est réalisable en appliquant la même méthode que celle décrite pour les pyranomètres (§ 2.1.b). Cette méthode par comparaison nécessite un capteur de référence étalonné périodiquement (tous les deux ans). Actuellement, ces prestations sont proposées uniquement par les fabricants. Il n'existe pas de normes auxquelles se référer ni d'accréditation des prestataires.

Historiquement, LI-COR et son capteur LI-190 sont souvent considérés à l'Inra comme référence dans ce domaine de mesure. Idéalement, pour des mesures en conditions naturelles, l'étalonnage devrait être réalisé en extérieur par comparaison à une référence radiométrique (groupe d'étalon composé de radiomètres ou de spectroradiomètres) analogue à ce qui se fait dans le domaine solaire.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jean-Philippe Morel et Jean Olivieri du centre radiométrique de Météo France de Carpentras ainsi que Jimmy Dubard du LNE pour leur participation à l'école technique ; leur intervention a permis de préciser des points développés dans cet article.

## Bibliographie

- Gröbner J. (2005) Operating procedure at the Infrared Radiation Centre (IRC) - Physikalisch Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center
- International Organization for Standardization (1992) Solar energy, Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. ISO 9847
- International Organization for Standardization (1992) Solar energy. Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter. ISO 9846
- Kipp & Zonen (2001) CG4 Pygeometer – Instruction Manual, Manual version 0304, Delft, Holland
- Kipp & Zonen (2002) CNR1 Net Radiometer – Instruction Manual, Manual version 0706, Delft, Holland
- Kipp & Zonen (2006) CMP SERIES Pyranometer / CMA SERIES Albedometer – Instruction Manual, Manual version 0806, Delft, Holland
- Kipp & Zonen (2004) PARLite Photosynthetic Active Radiometer– Instruction Manual, Manual version 0706, Delft, Holland
- LI-COR (2005) LI-COR Terrestrial Radiation Sensors. Instruction manual, Publ. No. 984-08308, Lincoln, Nebraska, USA
- LI-COR Principle of Radiation Measurement. Lincoln, Nebraska, USA.
- McCree, K.J. (1972) Test of current definitions on photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10, 443–453.
- Morel J.P., Oliviéri J. (2007) La mesure des rayonnements électromagnétiques. Ecole des techniques « Mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge », 26-28 Novembre 2007 Avignon (84)
- Philipona R., Fröhlich, C. and Betz, Ch. (1995) Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements, *Applied Optics*, **34**, 1598-1605
- Ross J., Sulev M. (2000) Sources of errors in measurements of PAR, *Agricultural and Forest Meteorology* 100, 103-125.
- World Meteorological Organization (2008) Guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO-No. 8 (Seventh edition)

## Site Web

Physikalisch Meteorologisches Observatorium Davos (PMOD), World Radiation Center (WRC) [www.pmodwrc.ch](http://www.pmodwrc.ch), consulté le 6/03/2009

