

Chapitre II

Métrologie associée



Métrologie des rayonnements naturels d'origine solaire et atmosphérique

Olivier Marloie ¹, Jean-Marc Bonnefond ²

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.

¹ 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

² 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.

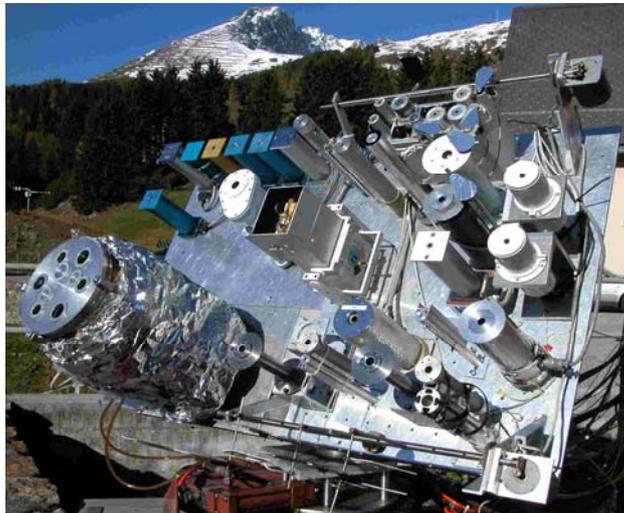


Figure 1 : Groupe étalon mondial (WSG) au PMOD/WRC (Source : PMOD/WRC)

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 W.m^{-2} (niveau de confiance : 95 %) pour des éclairements du rayonnement direct I supérieur à 700 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 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 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'ombler 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^{ème} 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 μm)

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 μm) 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/m²,

k_1, k_2, k_3 trois pseudo-constantes,

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

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/m²,

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

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 μm)

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 pyr géomètre) selon les instructions décrites précédemment. On déterminera alors quatre coefficients pour chaque capteur du pyr radiomètre.

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 pyr géomètre 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 pyr géomètre 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 μm)

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 :

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 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 (R_g) 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 :

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

R_g : (0,3 - 3,0 μm) en W.m^{-2}

PAR : (0,4 - 0,7 μm) 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° (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.

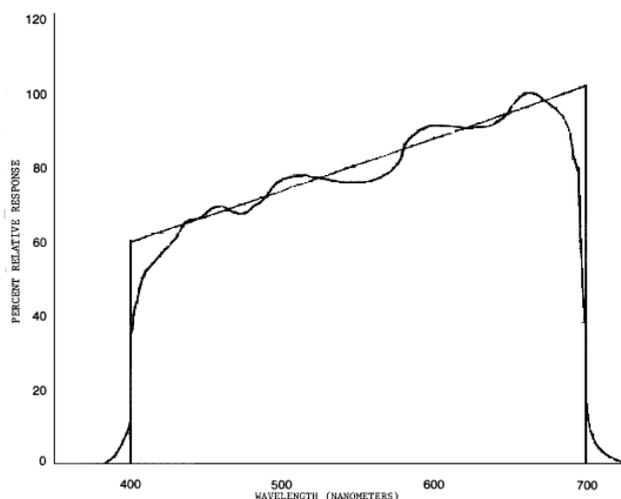


Figure 3 : *Sensibilité spectrale relative (au niveau énergétique) du capteur LI-190SA de LI-COR comparé à un capteur idéal*

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) - Physikalisches 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 , consulté le 6/03/2009

Caractérisation et étalonnage d'une caméra thermique FLIR – SC 2000

Jean-François Hanocq¹, Marie Weiss¹, Jean-Pierre Lagouarde², Philippe Clastre¹

Résumé : Le département Environnement et agronomie de l'Inra a acquis une caméra thermique FLIR-SC2000 pour réaliser le suivi de parcelles agricoles par l'acquisition d'images de température de surface, éventuellement en aéroporté. Les unités EMMAH du centre Inra d'Avignon et EPHYSE du centre Inra de Bordeaux ont effectué sa caractérisation. Afin de pouvoir exploiter correctement ces images, nous avons d'abord été conduits à caractériser précisément la réponse spectrale de la caméra, puis à contrôler sa précision et ses caractéristiques optiques compte tenu de son utilisation dans des environnements et sur des vecteurs très différents (cultures, forêts, serres, avion). Nous décrivons les matériels, les protocoles et les résultats d'expérimentation qui ont servi à la caractériser ; nous abordons également le fonctionnement de ce type de caméra à micro bolomètres dite "non refroidie" où une bonne utilisation du système interne d'auto étalonnage, le "shutter", est importante pour rester dans les limites d'utilisation données par le constructeur.

Mots clés : Caméra thermique, caméra infrarouge, étalonnage

Introduction

Les unités EMMAH du centre Inra d'Avignon et EPHYSE du centre Inra de Bordeaux partagent depuis 2003, l'utilisation d'une caméra thermique "SC 2000" commercialisée par la société FLIR pour suivre l'état de cultures et de couverts forestiers. La société FLIR assure l'étalonnage absolu de la caméra ; nous décrivons dans ce document la réalisation, la mise en place des matériels et les protocoles ainsi que les résultats de la caractérisation réalisée par les deux unités. Cette caractérisation concerne :

- la détermination de la loi de projection,
- la réponse spectrale de la caméra FLIR,
- l'étalonnage de la caméra pour :
 - vérifier la précision de la mesure ;
 - déterminer l'influence de la température ambiante ;
 - étudier l'effet de vignettage des images ;
 - préciser le rôle et la commande du shutter.

1. Caractéristiques de la caméra

1.1 Détermination de la loi de projection géométrique

L'effet barillet correspond à une courbure des lignes droites qui va en s'amplifiant en bordure d'image (**figure 2**). Cette distorsion est liée au caractère imparfait des objectifs et aux aberrations des systèmes optiques. La déformation des lignes parallèles aux bords de l'image en une courbure d'autant plus accentuée que l'on s'éloigne du centre de l'image est

¹ UMR 1114 Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes, EMMAH, Inra-Univ. Avignon et Pays de Vaucluse – F-84914 Avignon
☎ 04 32 72 23 69 ✉ jean-francois.hanocq@avignon.inra.fr

² UR 1263 Ecologie fonctionnelle et physique de l'environnement EPHYSE, Inra F – 33883 Villenave d'Ornon

caractéristique d'une déformation en "barillet". Lors du traitement d'une image, il est important pour certaines applications particulières de corriger ces déformations.

Le protocole expérimental (**figure 1**) consiste à viser une grille métallique à maille carrée facilitant la lecture des déformations. La grille à température ambiante est posée au dessus d'un bac rempli d'eau et de glace fondante (ou maintenue par de petits supports de matériau isolant thermique au-dessus de packs de glace artificielle) de manière à avoir un bon contraste thermique (**figure 1**) avec le fond ainsi réalisé. La déformation est modélisée par l'ajustement d'un polynôme d'ordre 3 dont la forme est :

$$x' = a_1x^3 + a_2x^2y + a_3x^2 + a_4xy^2 + a_5xy + a_6x + a_7y^3 + a_8y^2 + a_9y + a_{10}$$

$$y' = b_1x^3 + b_2x^2y + b_3x^2 + b_4xy^2 + b_5xy + b_6x + b_7y^3 + b_8y^2 + b_9y + b_{10}$$

A partir d'une même origine, (x, y) sont les coordonnées (lignes et colonnes) d'un point donné de la grille et (x', y') celles de l'image de la caméra, a_i et b_j sont les coefficients des polynômes. L'identification des mailles (x,y) et des points correspondants (x',y') dans l'image permet de calculer les coefficients a_i et b_j à l'aide de Matlab. La **figure 2** montre que l'effet barillet est faible pour l'objectif standard de la SC 2000 dont l'angle d'ouverture est de 24° (horizontal) et de 18° (vertical). La distorsion est plus grande avec des objectifs grands angulaires à ouverture plus large.

Il existe maintenant sur le Web des outils d'assemblage et de corrections d'images (ex : adobe photoshop, panotools) pour réaliser des mosaïques pour couvrir des zones de grandes dimensions.

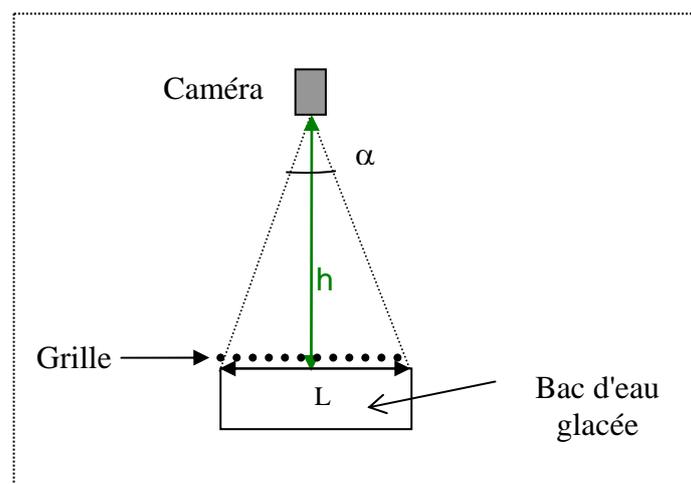


Figure 1 : Protocole d'expérimentation pour visualiser la grille

☞ La même méthode utilisée à diverses hauteurs h permet, à partir des dimensions de la portion de grille vue, de caractériser le champ de l'objectif utilisé et les angles d'ouverture des axes principaux de l'image [selon une relation $0.5 L/h = \text{tg}(\alpha/2)$].

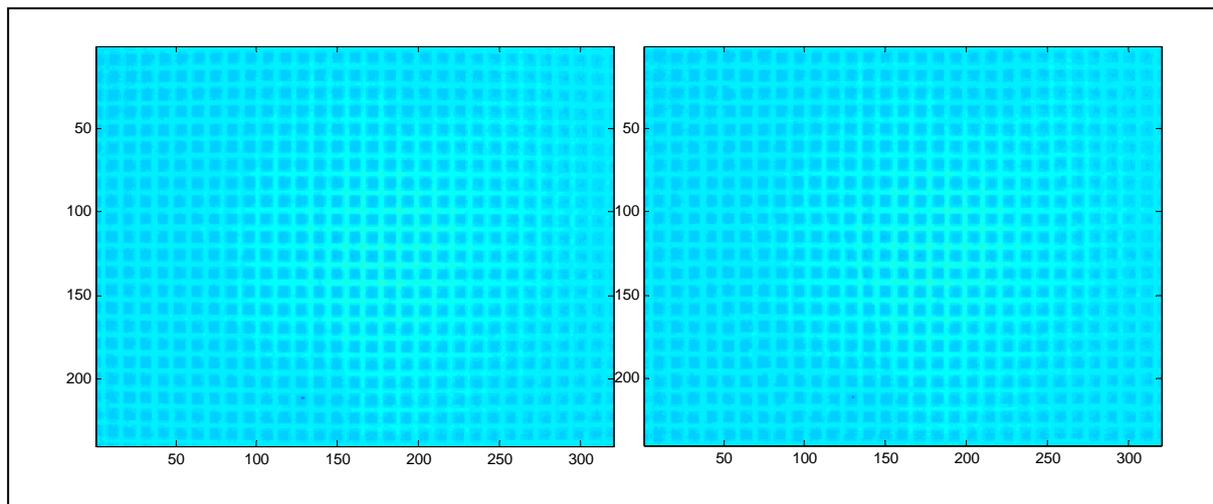


Figure 2 : à gauche : image distordue par l'effet barillet, à droite : image corrigée

1.2 Caractéristiques spectrales de la caméra

Lorsqu'il s'agit de caractériser une surface donnée, la courbe de réponse spectrale de la caméra est un paramètre important. Nous avons réalisé une étude théorique pour caractériser l'impact de la réponse spectrale de la caméra sur des mesures aéroportées à l'aide des modèles de simulation du transfert radiatif dans l'atmosphère MODTRAN et LOWTRAN 7. Nous avons choisi les hypothèses suivantes :

- une émissivité de surface de 0,98, caractéristique d'un sol couvert ;
- une température de surface de 30°C ;
- une visée de la surface à une hauteur de 3 000 m ;
- une visibilité de 50 km et un modèle d'aérosol « mid latitude summer », caractéristique des latitudes tempérées.

Les résultats montrent une forte sensibilité de la mesure aux effets atmosphériques en-deçà de 7,5 μm et surtout au-delà de 13 μm : la transmission de la luminance provenant de la surface (sol + végétation) s'y trouve fortement réduite tandis qu'une forte contribution de l'atmosphère s'ajoute à la mesure (**figure 3**).

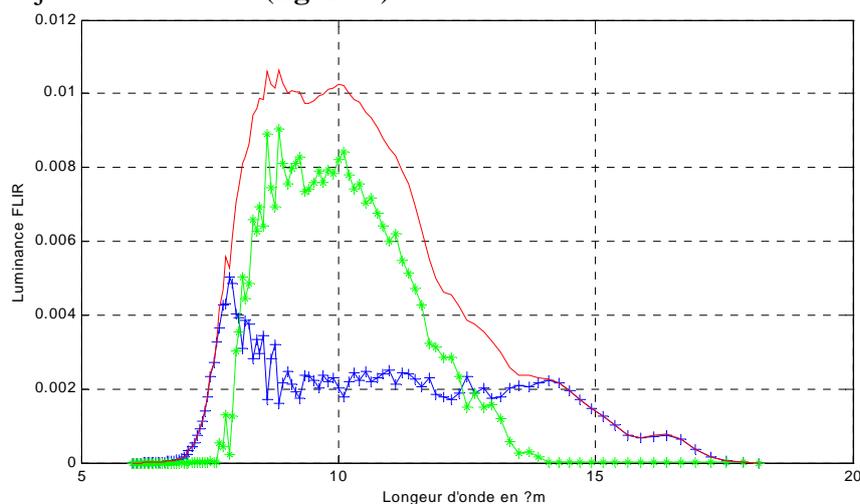


Figure 3 : Luminance provenant de la surface (vert), de l'atmosphère (bleu) et totale (rouge) pour la caméra FLIR (sans filtre Oriel)

Afin d'optimiser la réponse spectrale de la caméra pour caractériser au mieux la surface, nous avons donc intercalé un filtre³ dans le système optique de la caméra permettant ainsi d'avoir une bande passante strictement comprise entre 7,5 et 13 μm (**figure 4**).

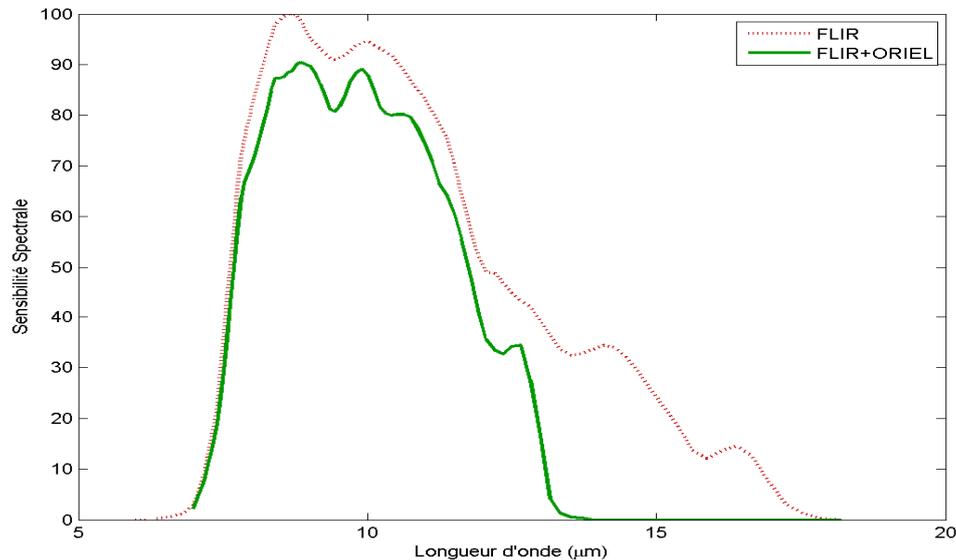


Figure 4 : Sensibilité spectrale de la caméra FLIR seule et de la caméra FLIR + filtre ORIEL

2. Etalonnage radiométrique de la caméra

2.1 Etalonnage absolu

En général, la société FLIR assure l'étalonnage absolu ; la précision annoncée de cette caméra est de $\pm 2^\circ$. Après réception de la caméra, nous avons réalisé des mesures à température ambiante, en visant une surface d'eau dont la température est stabilisée par un bain thermostatique. Les paramètres introduits dans le logiciel d'interprétation des images ThermaCAMResearch associés à la caméra étaient les suivants : distance = 0 ; émissivité = 1,0, transmission optique = 1,0, transmission atmosphérique = 1,0. La température du bain a été comparée à la température de surface T_s estimée à partir de la mesure de température de brillance T_b de la caméra par la relation :

$$T_b^4 = \varepsilon_w T_s^4 + (1 - \varepsilon_w) T_a^4$$

dans laquelle les températures sont en K. L'émissivité de l'eau du bain ε_w est fixée à 0,98, tandis que T_a désigne la température ambiante du laboratoire où se fait la mesure.

On observe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,9998$) entre température observée et température mesurée, nettement meilleure que la précision annoncée par le constructeur (**figure 5**). Nous avons vérifié la stabilité dans le temps de la caméra par répétition de la même expérience d'étalonnage à plusieurs mois d'intervalle et elle s'est révélée excellente.

³ Filtre LOT-ORIEL Réf : A206-160

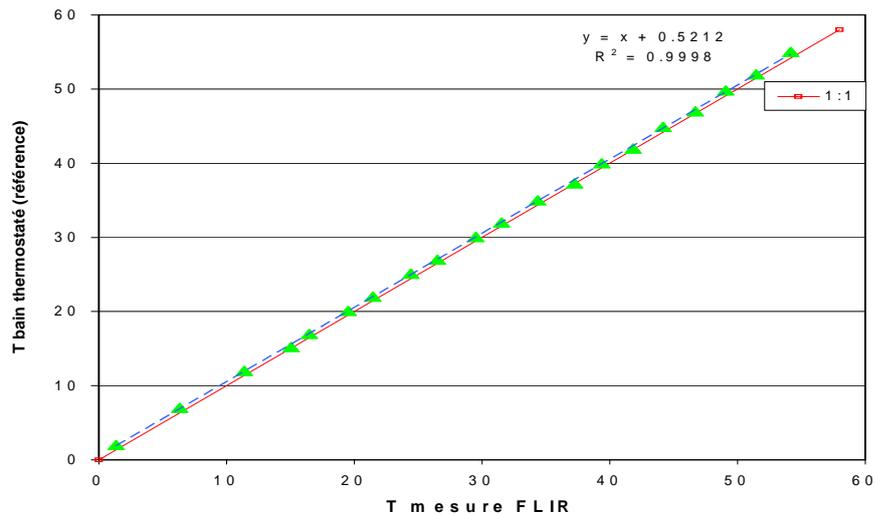


Figure 5 : Courbe d'étalonnage de la caméra FLIR

2.2 Influence de la température ambiante

La caméra devant fonctionner *a priori* dans des environnements très différents, nous avons vérifié la stabilité de cette relation en fonction de la température ambiante. Nous avons donc réalisé pour cela la série d'expériences à l'aide du matériel suivant (**figure 6**) :

- **un corps noir** : ce dispositif développé au laboratoire, est constitué d'un caisson en matériau isolant, renfermant en son centre un réservoir cylindrique en cuivre dans lequel circule de l'eau portée à la température désirée au moyen d'un bain thermostatique. Le fond du réservoir comporte une cavité dont l'ouverture circulaire débouche sur un côté du caisson ; par conduction thermique, la température de ses parois internes est identique à celle de l'eau du réservoir. Le fond de la cavité qui est face à l'ouverture est la partie visée par la caméra et une peinture spécialement choisie pour ses propriétés d'émissivité, recouvre toute la surface interne.
- **une enceinte climatique** : cette enceinte où est placée la caméra sert à créer les conditions d'environnement (température et humidité de l'air). Le côté de l'enceinte placé en regard du corps noir comporte une ouverture circulaire dans la paroi pour une visée de la caméra dans la cavité du corps noir. Nous avons utilisé un matériau isolant et extensible (type mousse) pour fermer l'espace entre la paroi de l'enceinte et le contour externe de l'objectif de la caméra afin de limiter les fuites d'air.

L'installation de ce matériel nous a donné la possibilité de simuler le fonctionnement de la caméra pour les températures ambiantes suivantes : **10, 20, 30 et 40 degrés**. Pour une température ambiante donnée, nous avons débuté les cycles de mesure sur le corps noir après que la caméra soit restée au moins deux heures dans l'enceinte climatisée. Les températures du corps noir ont été successivement les suivantes : **10, 20, 30, 40 et 50 degrés**. Un cycle de mesures consiste à enregistrer une image toutes les minutes pendant 10 minutes après avoir vérifié que la température du corps noir est bien stabilisée (déclenchement automatique de séquences de mesure programmable avec la caméra).

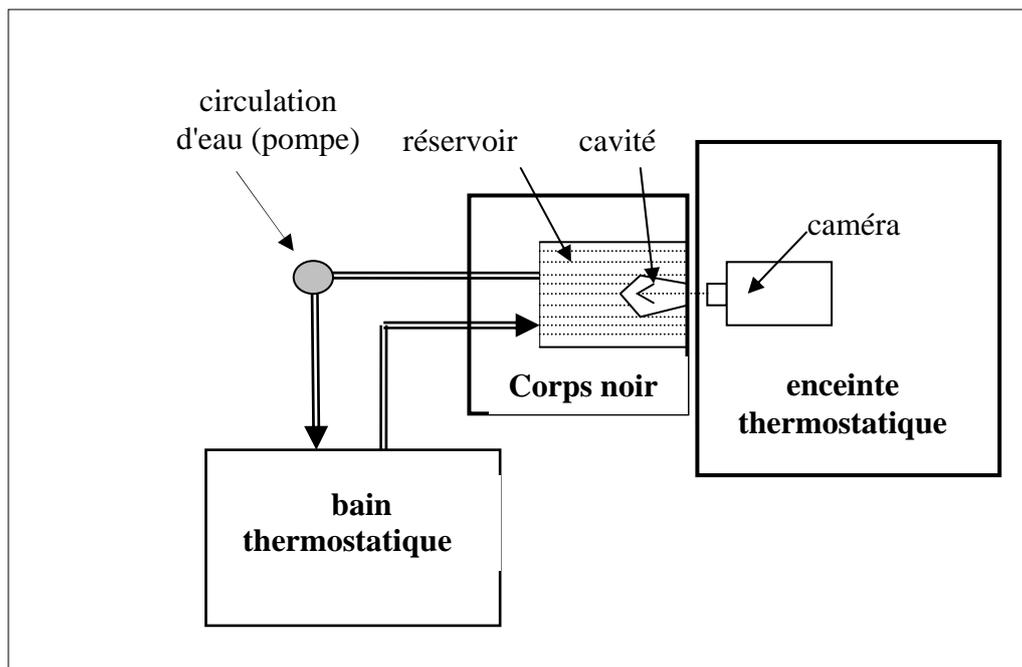


Figure 6 : Schéma synoptique de l'installation pour l'étalonnage radiométrique de la caméra

Les résultats (**figure 7**) montrent que la réponse de la caméra varie avec la température ambiante mais ces variations restent inférieures à la précision indiquées par le constructeur, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment. Pour la plupart de nos applications, cette précision est suffisante et par conséquent, aucune correction d'étalonnage ne sera appliquée à la caméra.

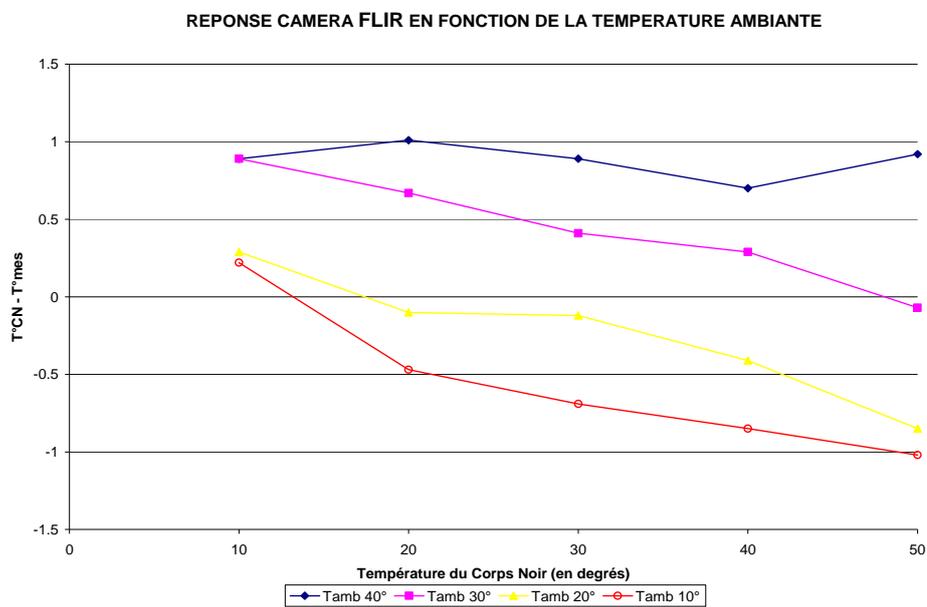


Figure 7 : Différence entre la température mesurée par la caméra et la température du corps noir en fonction de la température du corps noir

2.3 Effet de vignettage

Le vignettage est principalement lié à la qualité des éléments optiques qui composent l'objectif. Si l'on vise une surface de température homogène, il se caractérise par une non-homogénéité de la réponse de la caméra dans le champ de visée. Le vignettage correspond à l'atténuation progressive et concentrique du signal au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'image. Le protocole expérimental consiste à viser à environ 30 cm de distance des surfaces de nature différente, considérées comme homogènes en température et choisies pour couvrir une gamme de températures allant de 0° à 45°C.

Les surfaces utilisées ont été les suivantes :

- corps noir du banc d'étalonnage à 0°, 24° et 40° C ;
- disque en laiton massif recouvert avec une peinture noire thermique (émissivité proche de 1) et laissé à la température ambiante du laboratoire ;
- bac avec glace fondante ;
- mur du laboratoire d'étalonnage (qui est climatisé) ;
- dalles en béton exposées horizontalement au soleil.

Pour chaque surface, des enregistrements ont été effectués à la vitesse maximum, c'est-à-dire à environ 4 images/seconde pendant 30 secondes. Dans le but de nous assurer d'une bonne homogénéité de la température intégrée en chaque point du champ, nous avons effectué des mouvements de translations rectilignes d'environ 10 cm (supérieurs à la variabilité éventuelle intracible) avec la caméra pendant l'enregistrement des données ; le but en était de soumettre tous les pixels à un échantillonnage comparable de la surface. C'est le cas par exemple, pour le bac à glace finement broyée, le mur du laboratoire et les dalles en béton. Pour tracer l'image des surfaces, nous avons calculé la valeur moyenne de chaque pixel sur les 120 images acquises (**figure 8**).

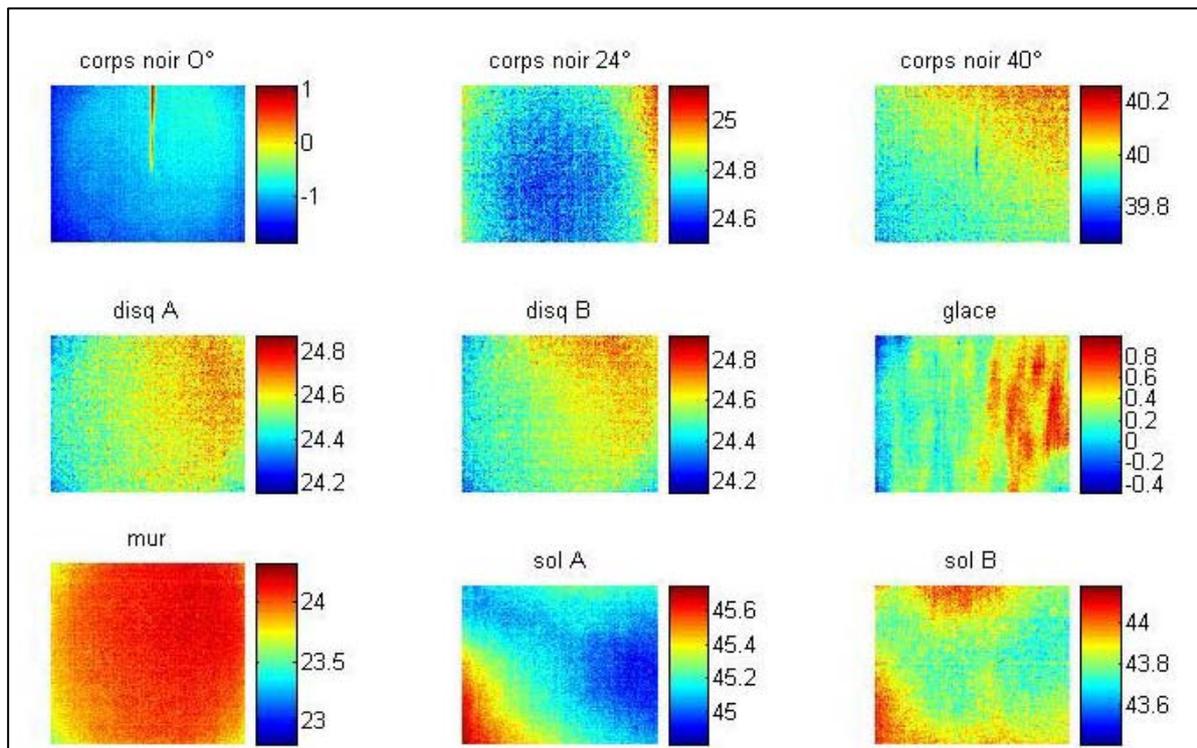


Figure 8 : Effet de vignettage en fonction des différentes cibles visées

On observe pour le corps noir à 40° et le disque A et B, que le coin supérieur droit est légèrement plus chaud. Cet effet pourrait être dû à la proximité du volet qui sert à l'auto-étalonnage (shutter) de la caméra dont nous donnons ensuite quelques explications sur son fonctionnement ; en moyenne, les corrections à appliquer seraient de 0,4°C. Ce même effet n'étant pas visible pour les autres surfaces, nous avons considéré que le vignettage était négligeable.

2.4 Rôle et fonctionnement du shutter

La caméra SC 2000 fait partie d'une génération de caméra dite "non refroidie" c'est-à-dire que le détecteur n'est pas refroidi à très basse température (type stirling) mais régulé en température par un composant à effet Peltier pour maintenir la matrice proche de 25°, température ambiante standard. Cette technologie n'offre pas une régulation thermique de la matrice suffisante à elle seule pour compenser les facteurs d'échauffement interne, notamment celui du détecteur qui reçoit le flux de l'objet visé. Pour obtenir la précision attendue, un système d'auto étalonnage est intégré à la caméra. Son fonctionnement est basé sur une action mécanique consistant à intercaler dans le trajet optique un volet obturateur (shutter) dont la température est mesurée en continu. Cette commande provoque une interruption d'environ une à deux secondes de la scène visée pendant laquelle la caméra va se recalibrer en prenant comme référence la température de l'obturateur. Sur le mode "automatique", l'intervalle de temps entre les déclenchements est variable ; il est dépendant de la température de divers éléments internes de la caméra qui sont mesurés en continu. En moyenne, c'est un déclenchement toutes les 5 minutes mais ce temps peut être plus long et atteindre 15 à 20 minutes ; dans l'intervalle de deux déclenchements du shutter, on constate une augmentation apparente de la température qui affecte en premier les contours de l'image. Suivant les conditions d'environnement, après quelques minutes, l'élévation de température peut atteindre 1,5°C.

Sur le mode "manuel", la fonction est inhibée et peut donc être déclenchée à volonté, juste avant une prise d'image par exemple. Ce dernier mode de fonctionnement est à adopter pour garder une précision supérieure au demi-degré. En règle générale, elle est obtenue avec certitude lorsque l'acquisition de l'image est faite dans les 30 secondes qui suivent le déclenchement du shutter.

Conclusions

Nous avons réalisé la caractérisation radiométrique et géométrique de la caméra. Nous avons vérifié que la précision de la mesure était dans les limites d'erreur annoncées par le constructeur ($\pm 2^\circ$) et que l'on restait également inférieur à $\pm 2^\circ$ pour des variations de la température ambiante comprises entre 10° et 40°C. Nous avons également réalisé la caractérisation de la loi de projection, incluant la correction de l'effet barillet.

La fonction "auto shutter" est à utiliser avec réserve compte tenu de la précision désirée. Une précision inférieure ou égale au demi degré peut être obtenue dans le cas d'un fonctionnement séquentiel et donc automatique des prises d'images, à condition de pouvoir déclencher le shutter à la demande c'est-à-dire juste avant l'acquisition de l'image. Cette fonction n'existe pas sur ce modèle de caméra et nous avons développé un logiciel pour y remédier.

L'évolution technologique des dernières générations de caméras non refroidies s'est traduite par une meilleure stabilité et une meilleure précision que la SC 2000 ; de ce fait, les auto étalonnages sont beaucoup plus espacés et la fréquence de déclenchement du shutter peut être programmée.

Bibliographie

Lagouarde J-P., Ballans H., Moreau P., Guyon D., and Coraboeuf D. (2000) Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine. *Remote Sensing of Environment* **72**, 17-34.