



HAL
open science

Les capteurs de mesures du rayonnement naturel

Jean-Marc Bonnefond

► **To cite this version:**

Jean-Marc Bonnefond. Les capteurs de mesures du rayonnement naturel. Cahier des Techniques de l'INRA, 2008, N° Spécial: Rayonnements naturels, pp.37-58. hal-02653141

HAL Id: hal-02653141

<https://hal.inrae.fr/hal-02653141v1>

Submitted on 19 Sep 2024

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

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



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

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.

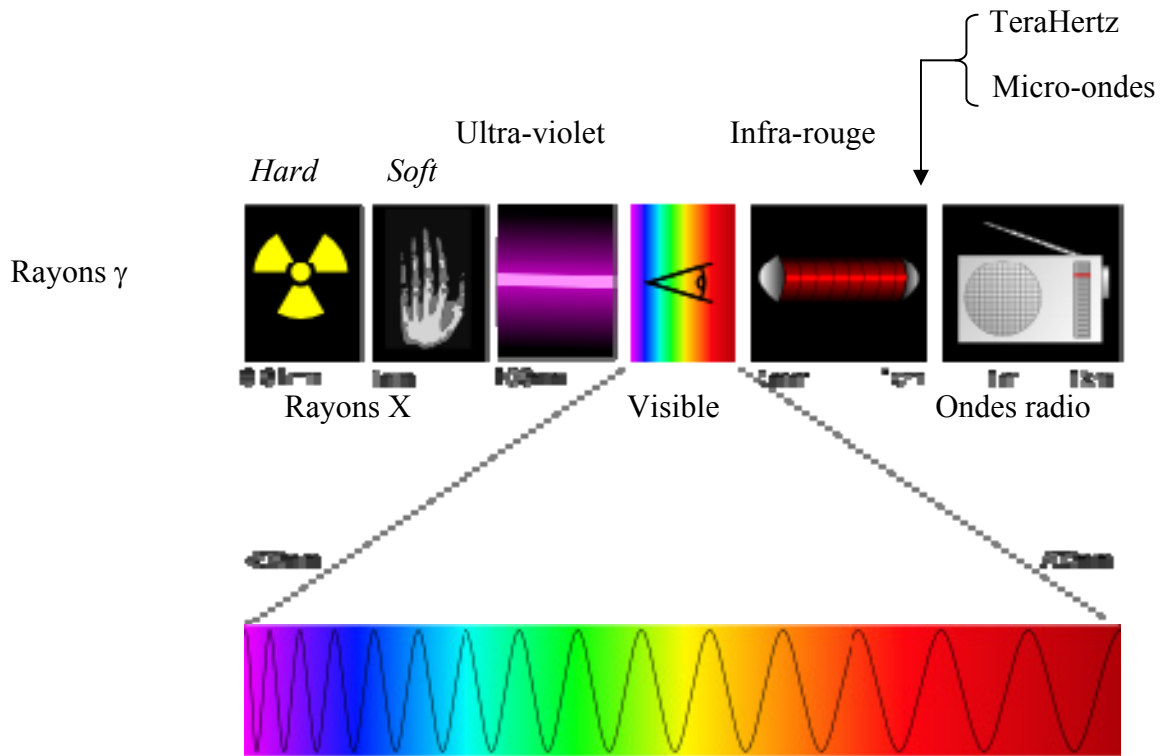


Figure 1 : Le spectre électromagnétique

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.

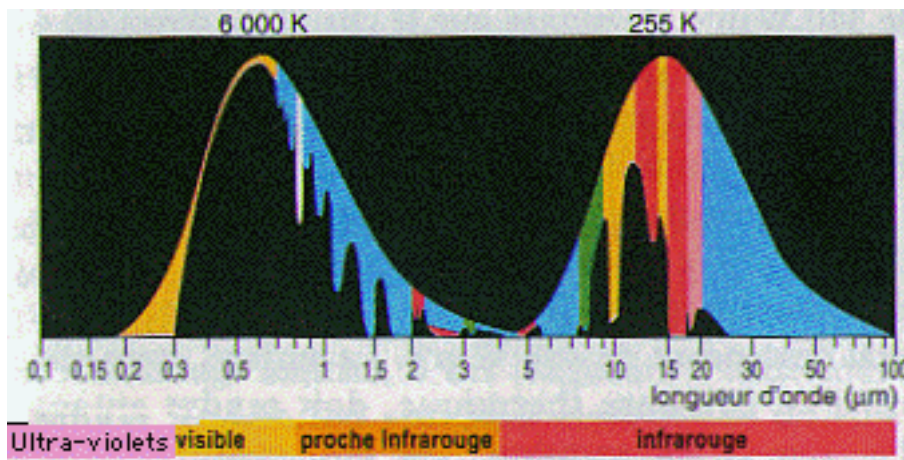


Figure 2 : Spectre des rayonnements thermiques naturels avec les raies d'absorption des principaux composés gazeux atmosphériques (O_3 , orange, CO_2 , rouge, H_2O , bleu)

- 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**).

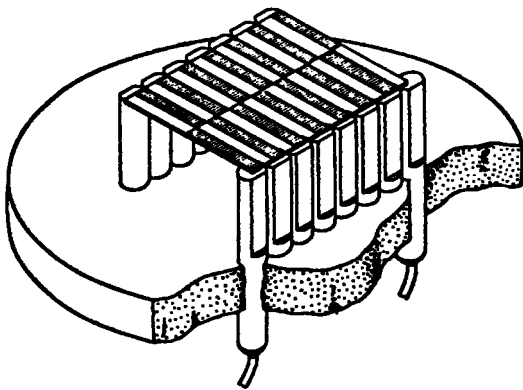


Figure 3 : Thermopile de Moll – Gorczynski

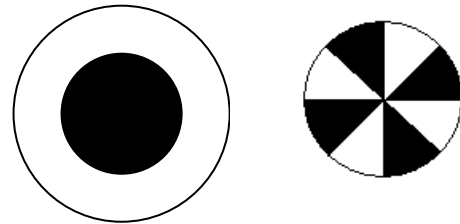


Figure 4 : Thermopile Noir/Blanc (Linke, Cimel ...)

- 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**).

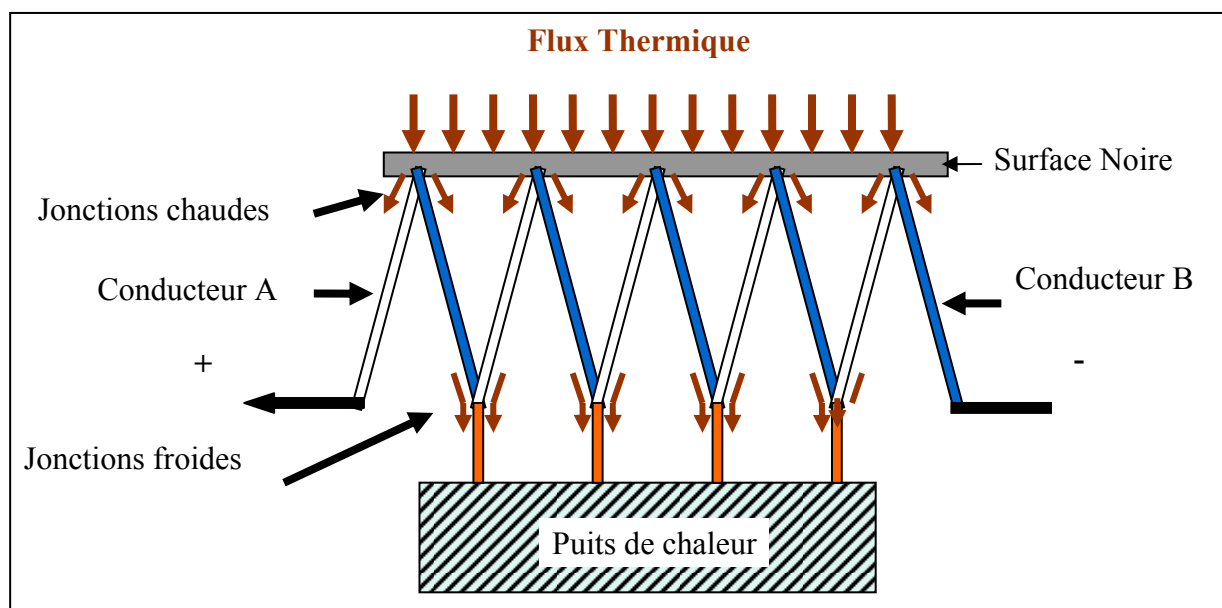


Figure 5 : Schéma de principe d'une thermopile à échanges thermiques verticaux

- 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.

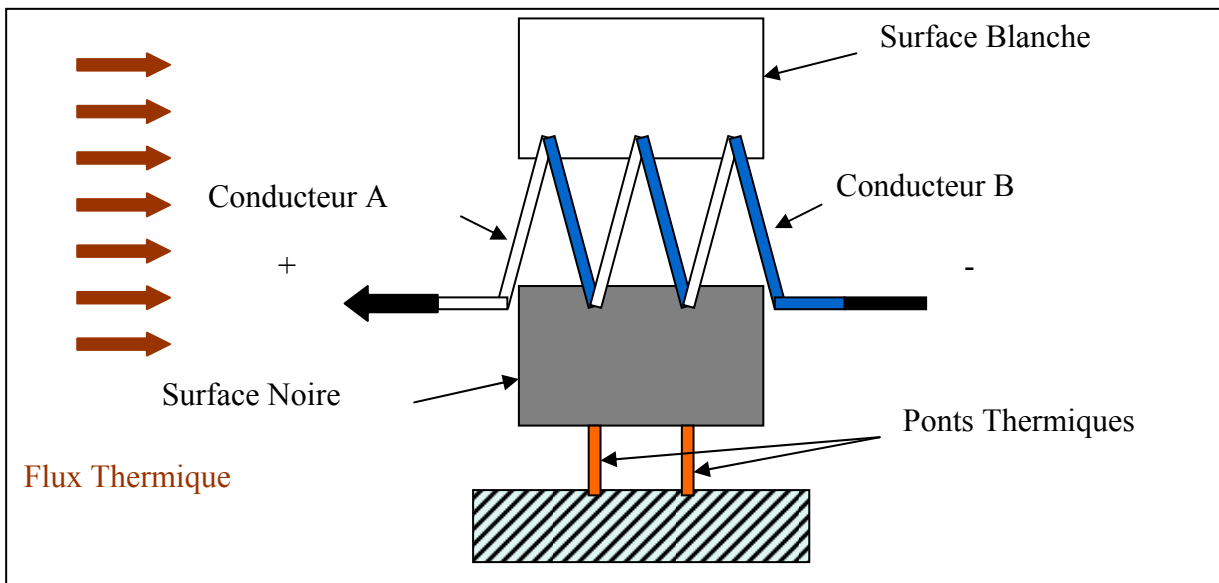


Figure 6 : Schéma de principe d'une thermopile à échanges thermiques horizontaux

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**).

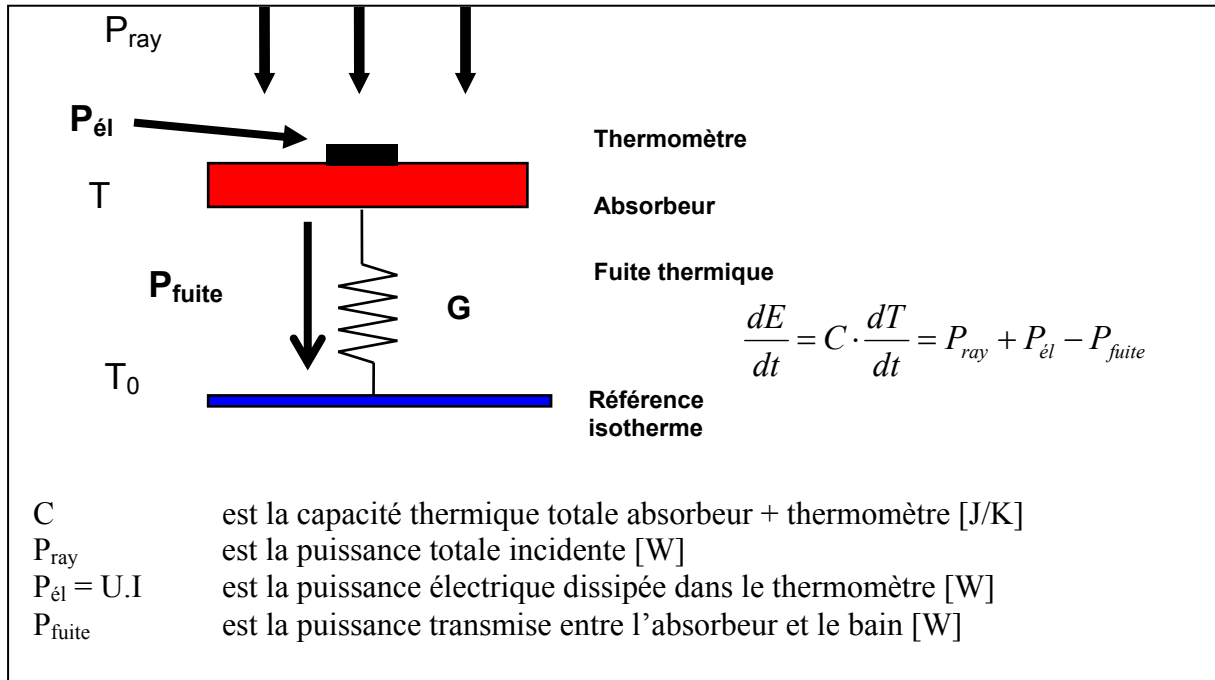


Figure 7 : Schéma de principe et de fonctionnement du bolomètre

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

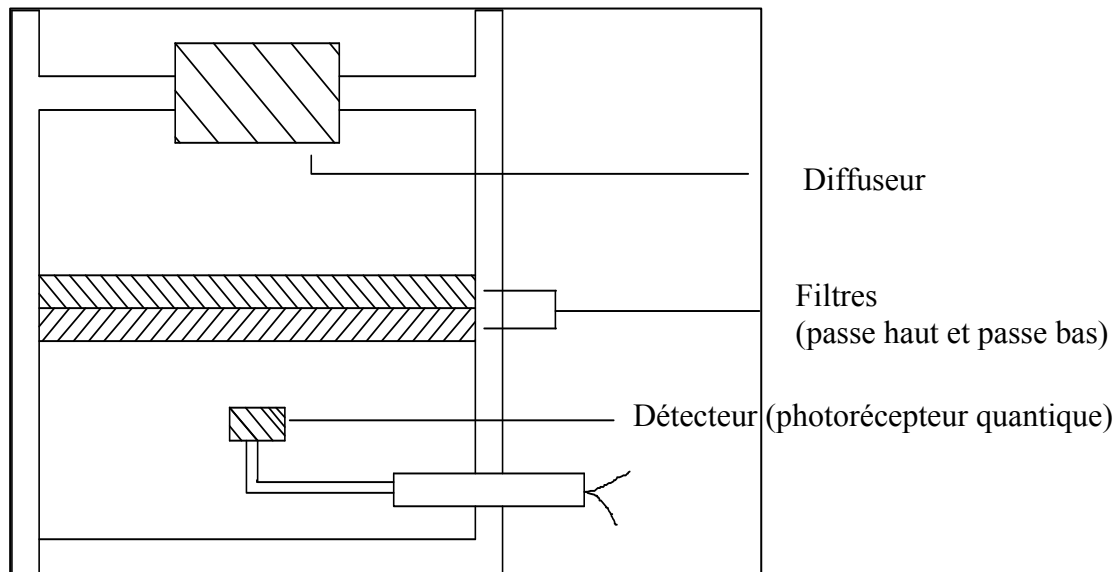


Figure 8 : Schéma de principe d'un quantum-mètre ou capteur quantique

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**).

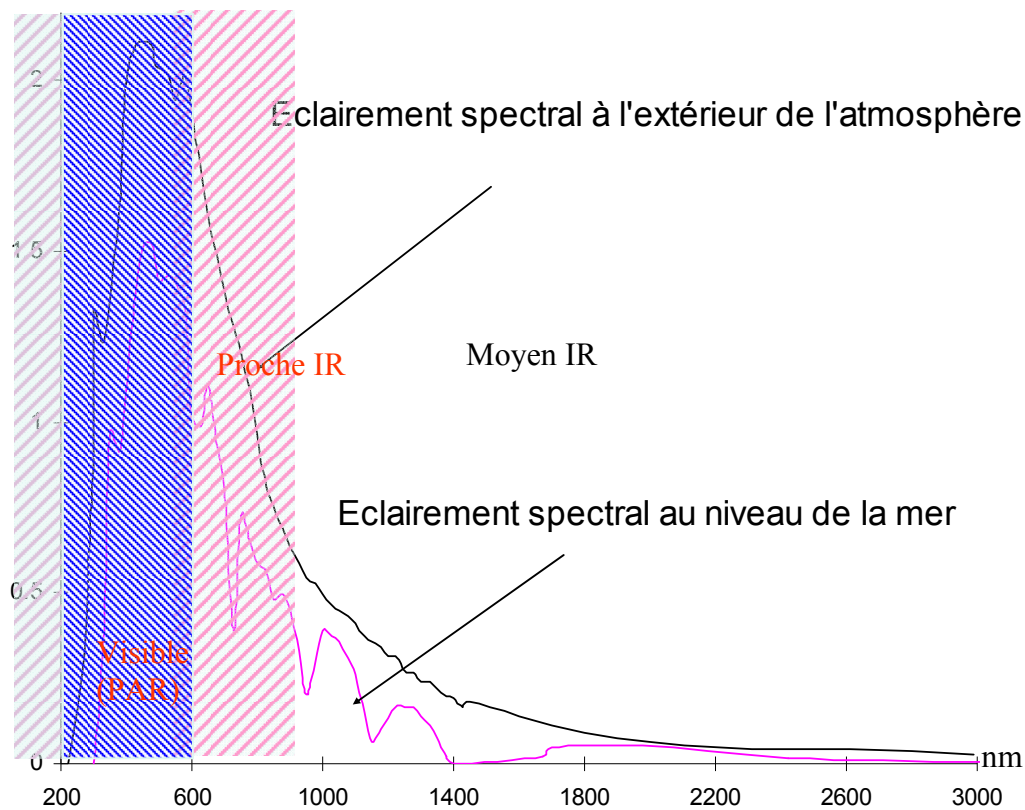


Figure 9 : Répartition en énergie de l'éclairement solaire

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.

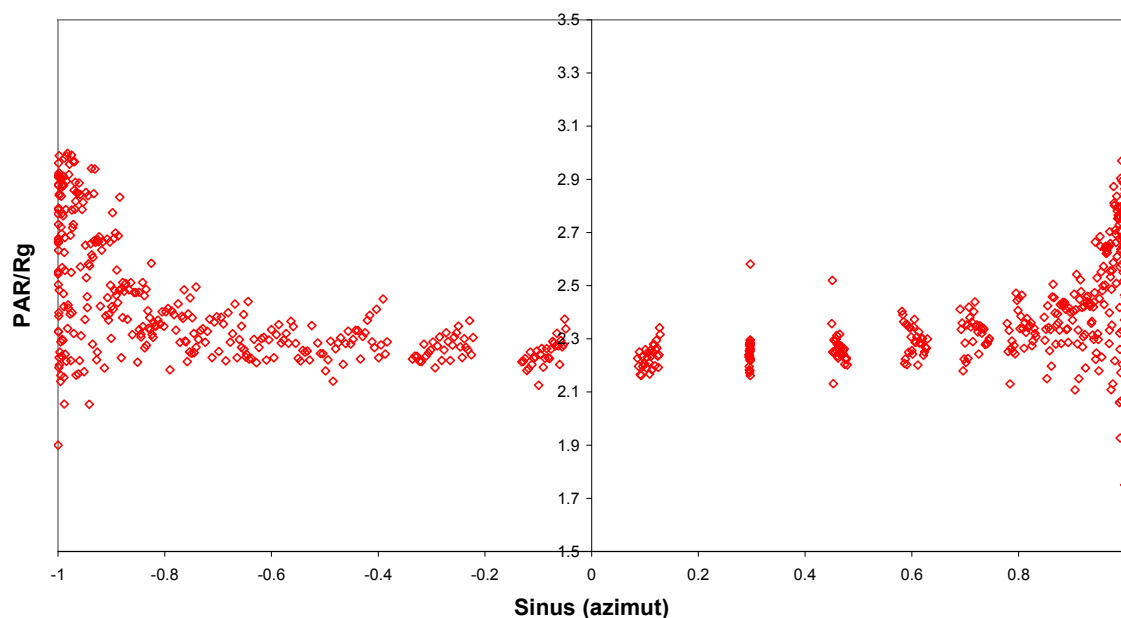


Figure 10 : Relation PAR/Rg en fonction du sinus de l'azimut solaire

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**.

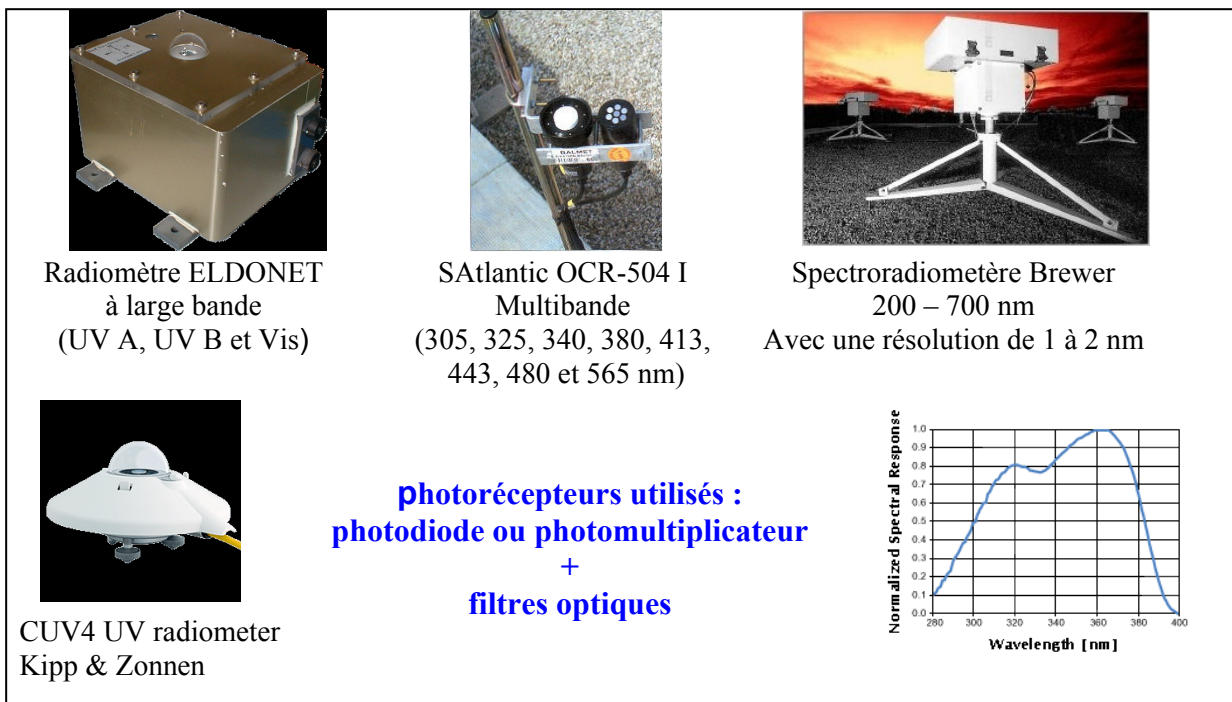


Figure 11 : Exemples de radiomètres UV

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**).

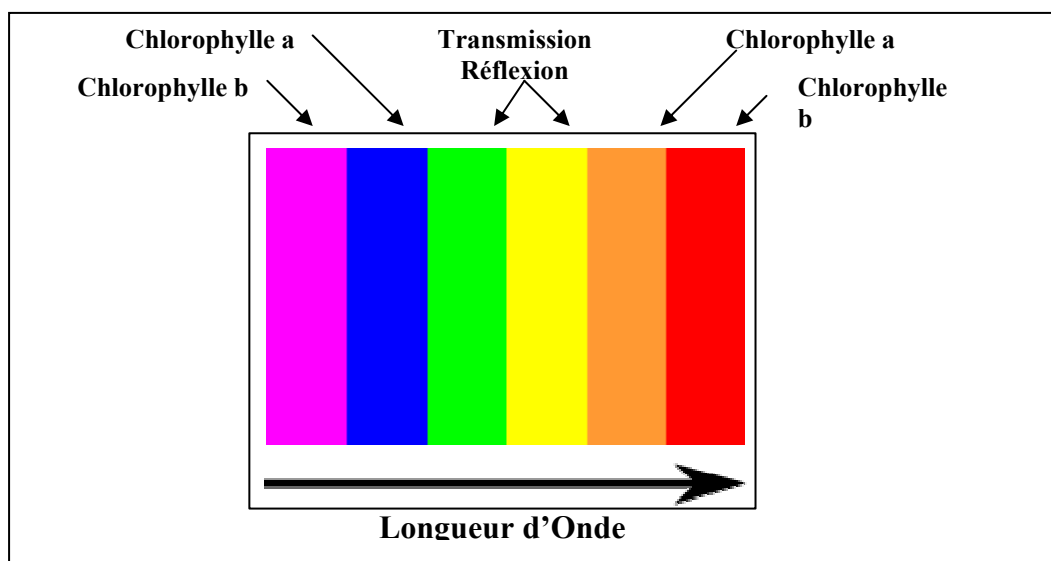


Figure 12 : Utilisation des différentes λ du P.A.R. par la végétation



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

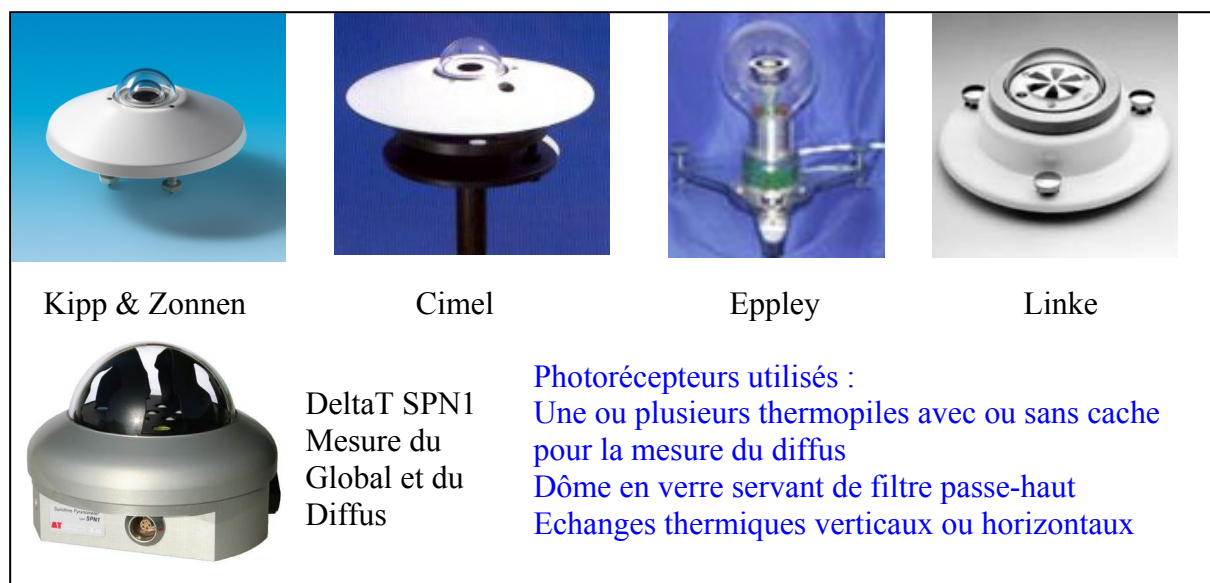


Figure 14 : Exemple de pyranomètres à photorécepteur thermique

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

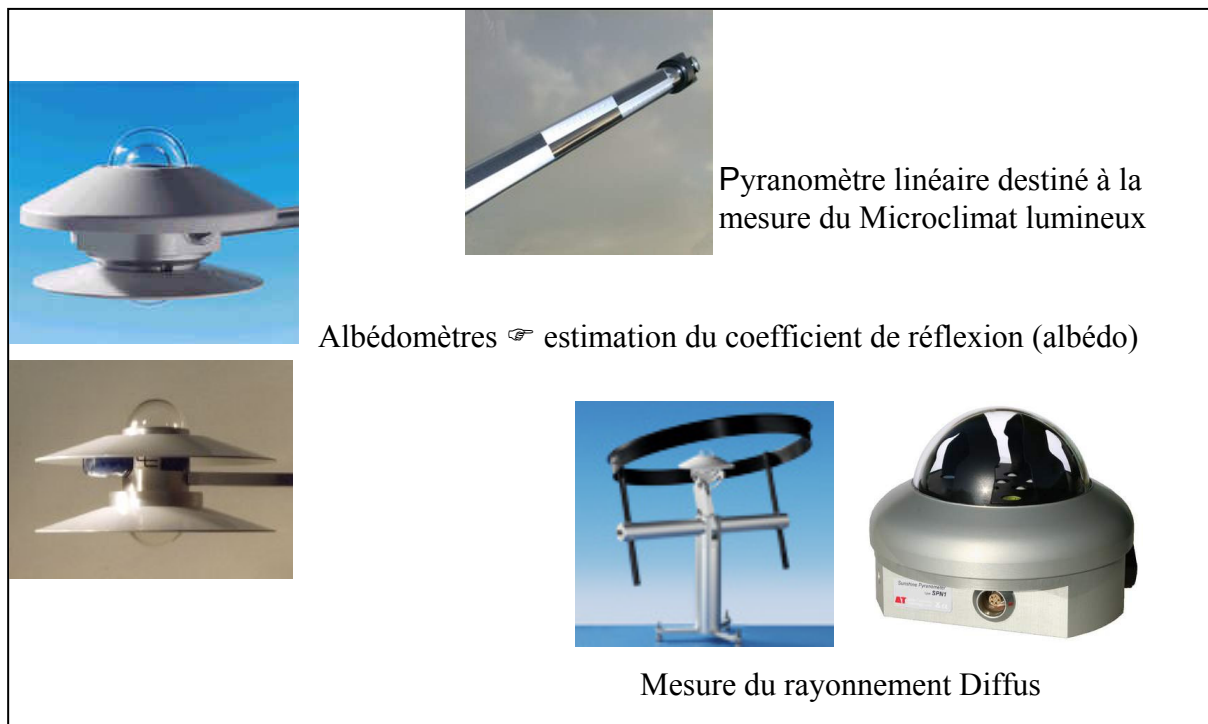


Figure 15 : Exemple de pyranomètres à photorécepteurs quantiques

<p>Temps de réponse de < 1s</p> <p>Justesse des capteurs :</p> <p>Allweather 3120 : ± 5%</p> <p>DeltaT ES2 : ± 3 %</p> <p>LiCor Li-200 : ± 5 %</p> <p>Kipp & Zonnen SP Lite : ± 3 %</p>

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 .

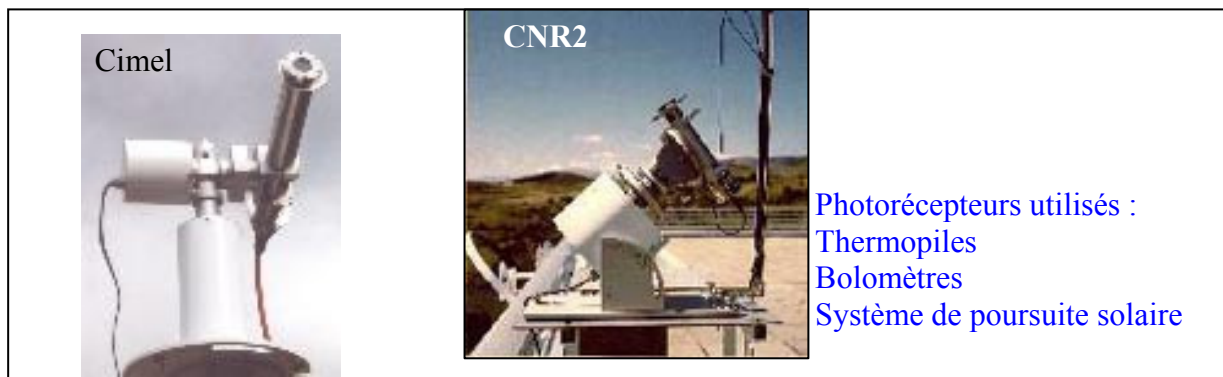


Figure 16 : *Exemples de pyréliomètres*

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**).

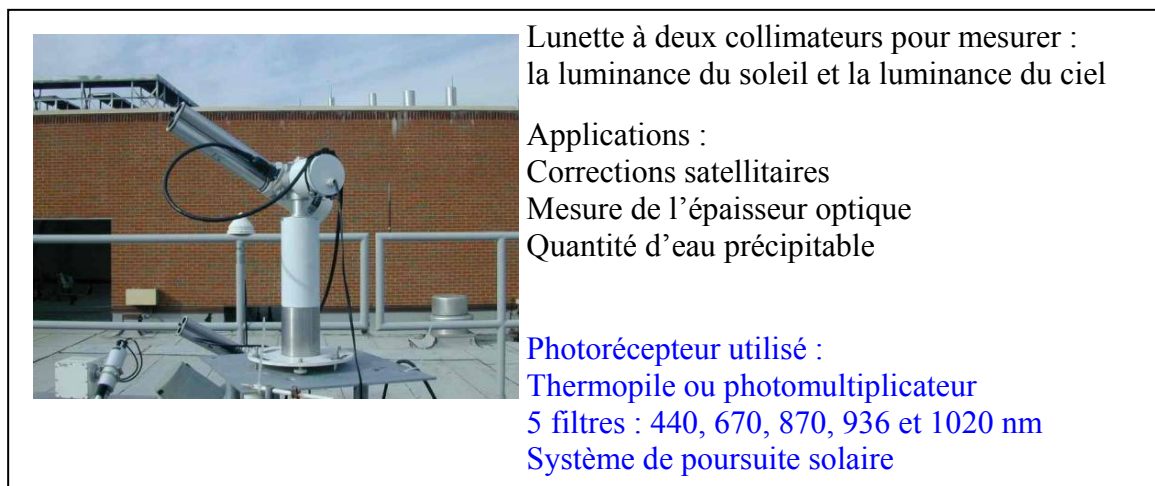


Figure 17 : *Exemple de photomètre*

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**)

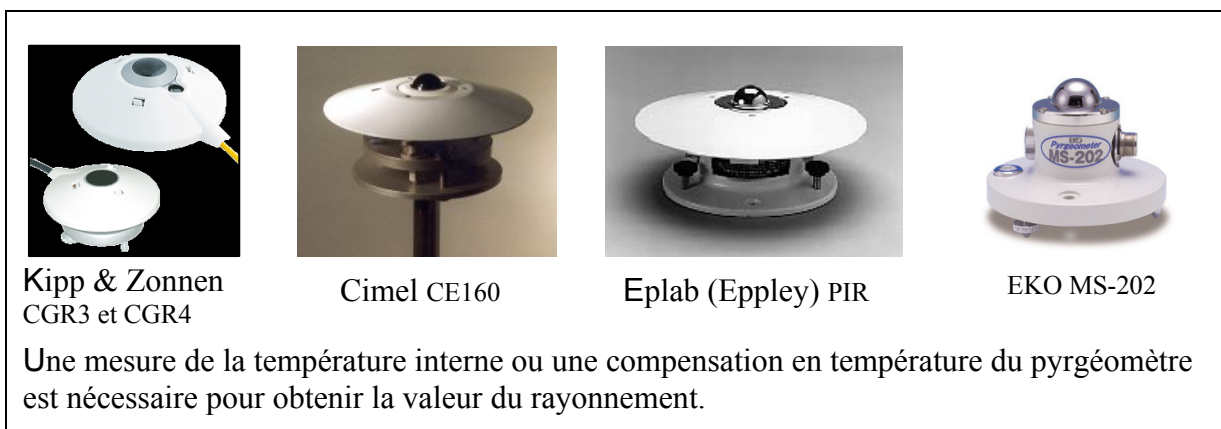


Figure 18 : Exemples de pyrgéomètres

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.

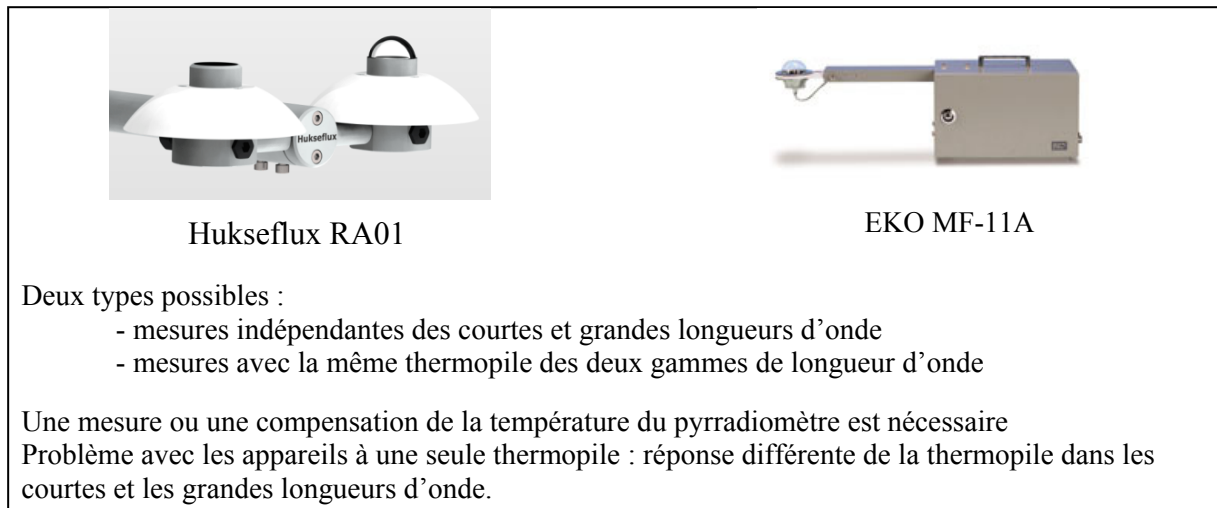


Figure 19 : Exemples de pyrromètres

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**).

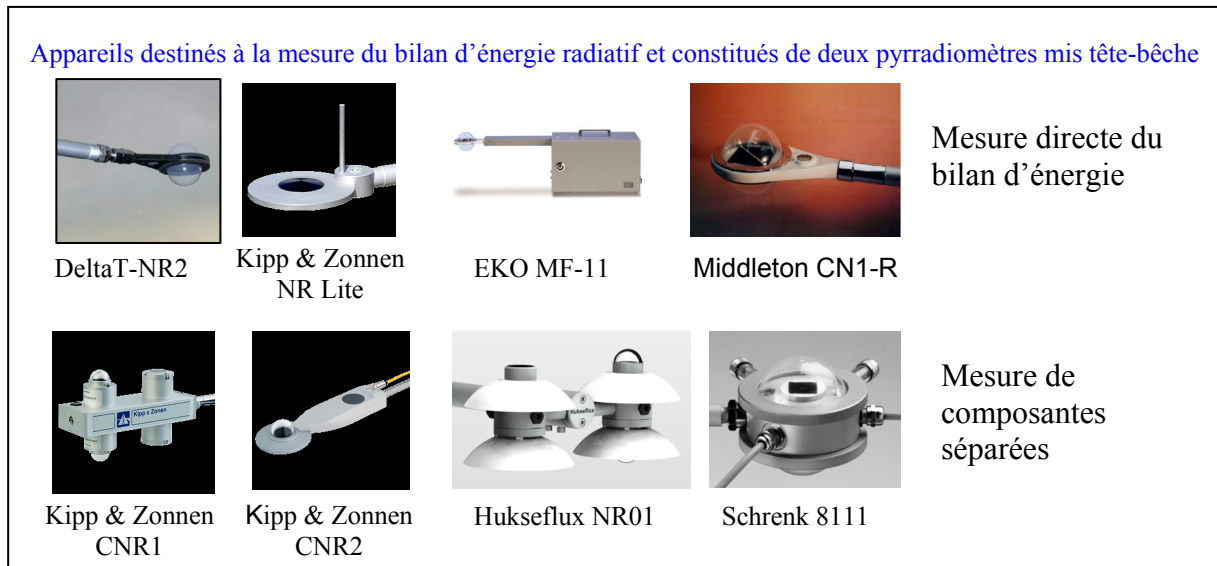


Figure 20 : Exemples de pyrromètres différentiels ou bilanmètres

	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.