

**Anne Labouret**

**Michel Villos**

**Adrien Villos**

# **INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES**

**Conception et dimensionnement  
d'installations raccordées au réseau**

**6<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

*Direction artistique : Nicolas Wiel*  
*Graphisme de couverture : Élizabeth Riba*  
*Illustration de couverture : Artjazz/shutterstock.com*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-083687-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	VII
<b>Chapitre 1 ■ Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque</b>	1
1.1 La lumière sous toutes ses formes	1
1.1.1 Dualité onde-particule	2
1.1.2 Sources de lumière	4
1.2 Le rayonnement solaire terrestre	8
1.2.1 Géométrie Terre-Soleil	8
1.2.2 Caractéristiques du rayonnement solaire	11
1.2.3 Le rayonnement solaire sur notre planète	16
1.3 La conversion photovoltaïque	24
1.3.1 L'absorption de la lumière	25
1.3.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	28
1.3.3 La collecte des charges	32
1.4 Le fonctionnement de la jonction photovoltaïque	35
1.4.1 Caractéristique courant/tension	35
1.4.2 Réponse spectrale	39
<b>Chapitre 2 ■ Technologie des panneaux solaires</b>	41
2.1 Cellules et panneaux au silicium cristallin	42
2.1.1 Préparation du silicium et des cellules	42
2.1.2 Propriétés des cellules cristallines	55
2.1.3 De la cellule au panneau photovoltaïque	60
2.1.4 Caractéristiques électriques et climatiques des panneaux	65
2.1.5 Assemblage de panneaux	72
2.2 Cellules et panneaux couches minces	77
2.2.1 La particularité des couches minces	77
2.3 Panneaux au CdTe	77
2.4 Panneaux au CIS et CIGS	79
2.5 Panneaux spéciaux	79
2.5.1 Panneaux souples	79
2.5.2 Éléments architecturaux	80

<b>Chapitre 3 ■ Équipements pour installations raccordées au réseau</b>	<b>85</b>
3.1 Panneaux solaires	86
3.1.1 Grands panneaux à cellules de 166, 182 ou 210 mm	87
3.1.2 Panneau en couches minces de 440 W	89
3.1.3 Vieillessement, points critiques	91
3.1.4 Fiabilité des producteurs	92
3.1.5 Retour d'expérience	92
3.1.6 Vieillessement actuel	93
3.2 Installation mécanique des panneaux	94
3.2.1 Structures support	94
3.2.2 Types de montage	95
3.2.3 Panneaux solaires pour intégration en toiture	97
3.3 Onduleurs	98
3.3.1 Critères de choix	99
3.3.2 Rendement de l'ondeur	100
3.3.3 Rendement européen	101
3.3.4 Transformateur d'isolement et mise à la terre	102
3.3.5 Tension de l'ondeur	104
<b>Chapitre 4 ■ Systèmes basse puissance</b>	<b>107</b>
4.1 Choix techniques	107
4.2 Étapes du projet	108
4.3 Dimensionnement	109
4.3.1 Localisation du bâtiment	110
4.3.2 Données météorologiques	110
4.3.3 Autoconsommation et stockage	120
4.4 Dessin 3D et calcul des ombrages	125
4.4.1 Importance de l'environnement	131
4.4.2 Puissance de l'ondeur et du champ photovoltaïque	134
4.5 Exemple d'intégration	135
4.6 Montage et câblage	136
4.7 Effets d'ombrages	137
Conclusion	138
<b>Chapitre 5 ■ Centrales photovoltaïques</b>	<b>139</b>
5.1 Montage en dômes	139
5.2 Montage en sheds fixes et suiveurs	140
5.3 Données climatiques	141
5.4 Étapes du projet	142

5.5 Dimensionnement	144
5.5.1 Variante modules standards	144
5.5.2 Variante modules bifaciaux	160
5.5.3 Variante suiveurs standards	162
5.5.4 Variante suiveurs bifaciaux	166
5.6 Centrale solaire	168
5.6.1 Variante centrale à – 20 degrés est	169
5.6.2 Variante centrale à sheds orientés sud	172
5.6.3 Terrain – sol irrégulier	175
5.7 Variabilité, P90, TMY	179
5.7.1 Variabilité	179
5.7.2 P90	180
5.7.3 TMY	181
Conclusion	182
<b>Chapitre 6 ■ Contrôle et maintenance des systèmes photovoltaïques</b>	<b>183</b>
6.1 Précision de la simulation	184
6.2 Simulation « ciel clair »	189
6.2.1 Salissures	189
6.2.2 Vieillissement	191
<b>Conclusion</b>	<b>197</b>
<b>Annexes</b>	<b>199</b>
1 Grandeurs physiques et unités	201
2 Données d’ensoleillement	205
<b>Bibliographie</b>	<b>206</b>
<b>Organismes et associations</b>	<b>209</b>
<b>Lexique</b>	<b>211</b>
<b>Index</b>	<b>213</b>



# Avant-propos

Cette sixième édition d'un ouvrage paru la première fois en 2006 n'a plus besoin de présenter l'énergie solaire photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques sont devenus courants dans le paysage avec de nombreuses utilisations, sur des toitures, pour l'alimentation de candélabres ou autres besoins isolés du réseau, ou dans les centrales en plein champ.

Aujourd'hui, c'est la source d'électricité la moins chère et les derniers grands projets de plusieurs centaines de mégawatts au Moyen-Orient ont été adjugés à des promoteurs offrant un courant à moins de 0,02 €/kWh.

La qualité des composants solaires a progressé avec une fabrication fortement robotisée et le rendement des modules a augmenté régulièrement, en particulier depuis le recours à la technologie PERC<sup>1</sup> qui a permis de gagner en moyenne 0,5 % d'amélioration par an ces dix dernières années. Le rendement typique des modules est ainsi passé de 15 à 20 % durant cette période.

On peut citer quelques grandes tendances appelées à beaucoup se développer ces prochaines années :

- Le montage de centrales sur des plans d'eau se développera en particulier sur des lacs de barrage où la surface solaire, tout en assurant une production électrique, limite l'évaporation de l'eau et augmente ainsi le potentiel hydroélectrique du site. Un deuxième avantage de ce type de montage est la perte thermique plus faible des modules sur un plan d'eau, moins chaud que la terre ferme au même endroit.
- L'agrivoltaïque est un autre créneau intéressant sous certains climats et en particulier en pays chauds, où certaines cultures poussent mieux à l'ombre qu'en plein soleil. On dispose pour ce faire les modules solaires en hauteur au-dessus des plantes à protéger et la surface agricole est ainsi mieux rentabilisée avec cette double utilisation du champ. Un exemple de grande centrale de plus de 1 GW au Tibet montre que le terrain sec reverdit sous les panneaux grâce à la réduction de l'évaporation. On peut ainsi nourrir des milliers de moutons. Ceux-ci se réfugient sous les modules lors

---

1 PERC : *Passivated Emitter and Rear Cell*, « Passivation du contact arrière ».

des pluies et des périodes de chaleur. C'est la plus simple utilisation de l'agrivoltaïque, qui contribue ainsi au bien-être animal.

- Avec le choix de modules bifaciaux, montés verticalement en longues rangées nord-sud tous les 10 à 15 m de distance, un terrain agricole ne perd qu'une faible proportion de sa surface de production tout en engrangeant un revenu énergétique.
- Partout où les surfaces agricoles non exploitées sont rares, on privilégie le montage sur les grands toits industriels ou les maisons individuelles avec des avantages tarifaires pour les petits systèmes.

Les composants solaires qui ont été développés d'abord en Europe, aux États-Unis et au Japon sont aujourd'hui produits à plus de 90 % en Extrême-Orient. Cette mainmise de la production organisée depuis la Chine suit la tendance actuelle des autres biens de consommation. La Chine est le premier fabricant mais aussi le premier marché où en 2020 une puissance de 48 GW a été installée pour un global mondial de 140 GW. Toujours en 2020, les dix premiers fabricants écoulaient 81,5 % de cette puissance globale, soit 114,1 GW et on y trouvait huit Chinois, un Coréen et un Américain. En 2021, le premier producteur a écoulé plus de 38 GW, ce qui correspond à environ 100 millions de modules de 380 W en un an, soit 270 000 modules par jour. Sachant qu'environ 668 modules de 72 cellules (environ 2 m<sup>2</sup>) sont transportés par container de 40 pieds (soit 67 m<sup>3</sup>), on obtient le chiffre de 400 grands containers par jour pour ce fabricant.

Pour l'ingénieur décidant de se former dans cette spécialité, nous présentons dans cet ouvrage les bases de fonctionnement des composants solaires et un logiciel qui permet d'évaluer les performances d'un système, soit pour sa conception, soit dans son analyse de fonctionnement.



## Chapitre 1

# Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque

## 1.1 La lumière sous toutes ses formes

Quand on évoque la lumière en physique, une des premières grandeurs qui vient à l'esprit est la vitesse de la lumière, qui ne peut être égalée et encore moins dépassée. Rien ne peut aller plus vite que la lumière, et c'est la célèbre formule rendue célèbre par Einstein. Elle met en évidence que la matière ( $m$ ) est énergie ( $E$ ), et *vice versa*, et que ces grandeurs sont liées par la vitesse de la lumière au carré :  $E = mc^2$ . Dans le vide, la vitesse de cette lumière  $C$  (pour célérité) est de 299 792 458 m/s, à peine plus d'une seconde pour parcourir la distance Terre-Lune<sup>1</sup>.

Cette lumière apparaît donc à nos yeux comme un rayon se propageant en ligne droite et obéissant à certaines lois, décrites par l'optique dite « géométrique » : réflexion sur une surface, réfraction (déviation du faisceau à l'entrée dans un milieu), focalisation par une lentille, diffusion sur une surface rugueuse... Tous ces phénomènes sont concernés quand il s'agit de capter la lumière dans une cellule photovoltaïque (§ 1.3.1).

Mais ils n'expliquent pas tout, loin de là. Pourquoi faut-il de la lumière pour que notre œil perçoive son environnement ? Comment la lumière peut-elle traverser le verre ? Comment se forme un arc-en-ciel ?... Les questions sont multiples. Pour rendre compte de toutes les observations, depuis le

---

<sup>1</sup> Pour en savoir plus, voir par exemple l'excellent ouvrage de vulgarisation *Lumière Matière*, de Séverine Martrenchard-Barra, collection « Nature des Sciences », Centre de vulgarisation de la connaissance, CNRS Éditions.

Moyen Âge les scientifiques ont cherché à décrire la nature profonde de la lumière et élaboré de nombreuses théories, parfois contradictoires.

### 1.1.1 Dualité onde-particule

Lorsqu'un faisceau lumineux passe par deux fentes assez rapprochées, cela produit sur un écran placé derrière non pas deux taches de lumière mais un ensemble de taches sombres et lumineuses alternées : ce sont des *interférences*. Ce phénomène ne peut s'expliquer que si la lumière est une onde qui se propage dans l'espace. En effet, lorsque deux ondes arrivent au même point, elles peuvent soit se renforcer, soit s'annuler – d'où les alternances de taches sombres et brillantes sur l'écran. De nombreuses expériences vinrent conforter cette théorie ondulatoire, notamment les observations de l'astronome Huygens, les travaux de Young, Fresnel, Arago, et enfin Maxwell, qui mit en équations la propagation des ondes lumineuses.

Certains physiciens, comme Newton, défendaient une autre conception de la lumière, celle d'un faisceau de particules, pour expliquer la réflexion : les grains de lumière « rebondissent » sur le miroir (comme des balles).

Ce n'est qu'au  $xx^e$  siècle que furent enfin réconciliées ces deux théories dites *ondulatoire* et *corpusculaire* de la lumière, grâce à la découverte du *photon* par Planck et Einstein. En pratique, la lumière a bien une double nature.

– **C'est une onde électromagnétique**, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde  $\lambda$  (périodicité spatiale, cf. figure 1.1) ou sa fréquence  $\nu$  : plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est faible et inversement :

$$\nu = C/\lambda$$

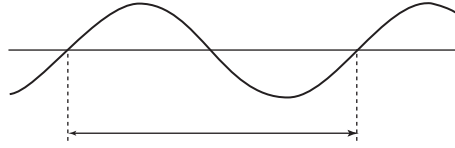
où  $C$  est la célérité de la lumière. Dans la partie visible du spectre solaire (§ 2.2.2), la longueur d'onde se manifeste par la « couleur » de la lumière.

– **C'est aussi un faisceau de photons** qui sont comme des « grains de lumière » porteurs d'une quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde, selon la formule de Louis de Broglie (1924) :

$$E = h\nu = \frac{hC}{\lambda}$$

où  $h$  est la constante de Planck.

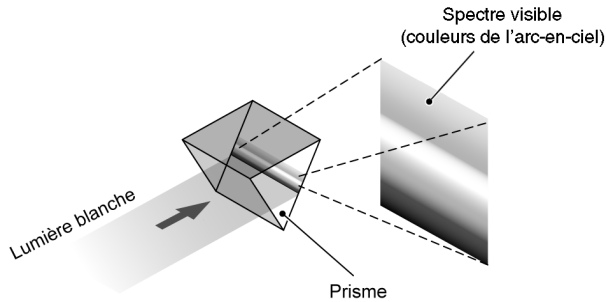
C'est cette énergie portée par les photons qui est à l'origine de la conversion photovoltaïque : elle va libérer des charges électriques contenues dans le matériau (§ 1.3.2).



**Figure 1.1** – Définition de la longueur d'onde d'une onde électromagnétique ( $\lambda$ )

## Répartition spectrale des ondes électromagnétiques

On appelle *répartition spectrale* ou *spectre* la répartition des ondes d'une source lumineuse selon leur longueur d'onde. La lumière blanche, par exemple, est en fait composée de plusieurs couleurs, visibles par décomposition à travers un prisme (cf. figure 1.2) ou dans l'arc-en-ciel. Mais les ondes électromagnétiques ne se réduisent pas à la seule lumière visible, qui ne représente en réalité qu'une infime portion de tous les rayonnements électromagnétiques connus. Évidemment le terme de *lumière* est plutôt adapté à cette partie visible par l'homme, mais par extension, il est souvent appliqué à tout le spectre solaire qui va de l'ultraviolet proche (250 nm) à l'infrarouge (10  $\mu\text{m}$ ). Voir les détails au paragraphe 1.2.2.



**Figure 1.2** – Décomposition de la lumière blanche par un prisme

Le tableau 1.1 décrit brièvement l'ensemble des ondes électromagnétiques, leur domaine de longueur d'onde et quelques-unes de leurs applications.

**Tableau 1.1** – Répartition en longueur d’onde des ondes électromagnétiques

	<b>Longueur d’onde</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Exemples d’applications</b>
Rayons $\gamma$	< 0,01 nm		
Rayons X	0,01-10 nm		Radiographie
Ultraviolet	10-400 nm		Bronzage, purification de l’eau
Visible	400-800 nm		Vision diurne, photosynthèse
Proche infrarouge	800 nm-10 $\mu$ m		Vision nocturne
Infrarouge thermique	10 $\mu$ m-1 mm		Chauffage, cuisson
Micro-ondes	1 mm-10 cm		Fours de cuisine
Ondes radar	10 cm-1 m	3 GHz-300 MHz	Téléphones portables, détection de vitesse
Ondes radio	> 1 m	< 300 MHz	Radio, TV, télécoms

## 1.1.2 Sources de lumière

Intéressons-nous maintenant à ce qui produit de la lumière dans notre environnement. La lumière naturelle par excellence est bien entendu celle du Soleil, et c’est de loin la plus énergétique. Nous y revenons en détail plus loin (§ 1.2). Les dispositifs photovoltaïques et solaires thermiques ont par définition été développés pour convertir cette énergie d’origine solaire.

Mais cette source de lumière n’est pas la seule, l’homme ayant, depuis la découverte du feu, inventé et fabriqué de multiples sources de lumière artificielle. Le feu, les torches, bougies, lampes à huile ou à pétrole, etc., qui produisent de la lumière par combustion illustrent on ne peut plus concrètement l’équivalence énergie/matière d’Einstein. En effet, c’est la décomposition de la matière (le combustible) qui produit l’émission de lumière. Ce sont les sources traditionnelles les plus anciennes utilisées par l’homme pour s’éclairer la nuit. Et les premiers physiciens qui ont cherché à quantifier la lumière ont tout naturellement eu recours à la quantité émise par une bougie ! Ainsi sont nées l’unité de la « bougie » puis celle de la « bougie nouvelle » et plus sérieusement de la « candela » définie plusieurs fois avant d’être figée en 1979<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> La candela est l’intensité lumineuse, dans une direction donnée, d’une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l’intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

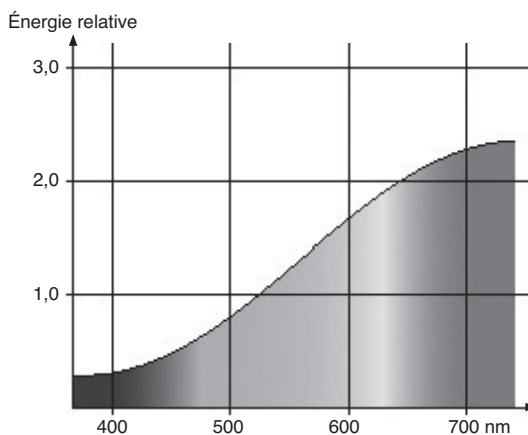
Avec la découverte de la fée électricité sont apparues ensuite de multiples sources de lumière électriques : les lampes à incandescence, puis halogènes, les tubes fluorescents, les lampes à décharge et à semi-conducteurs (diodes électroluminescentes, LED).

## Types de sources lumineuses

Toutes ces sources lumineuses peuvent être classées en quatre catégories, d'après le type de spectre qu'elles émettent, c'est-à-dire selon la répartition de l'énergie lumineuse émise dans les différentes longueurs d'onde.

### Spectre continu

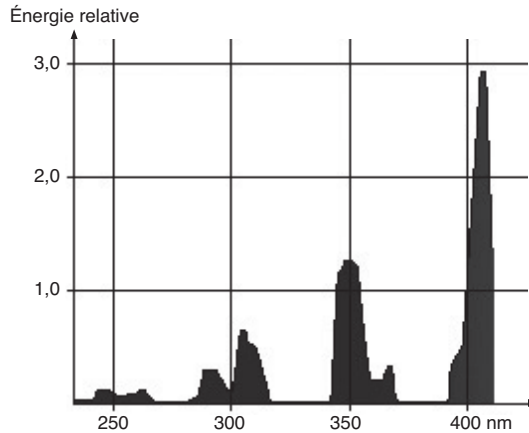
Dans un tel spectre, il y a émission d'énergie lumineuse de manière continue, à toutes les longueurs d'onde. Il s'agit essentiellement des sources dites thermiques, qui utilisent la chaleur comme source d'énergie. C'est le cas par exemple des ampoules à incandescence et halogènes, du soleil ou d'une bougie.



**Figure 1.3** – Spectre continu, émis par une ampoule halogène

### Spectre discontinu

Ce type de spectre présente de nombreux « trous », dans lesquels aucune énergie lumineuse n'est émise. Les sources utilisant une décharge électrique dans un gaz ionisé émettent généralement ce type de spectre discontinu.

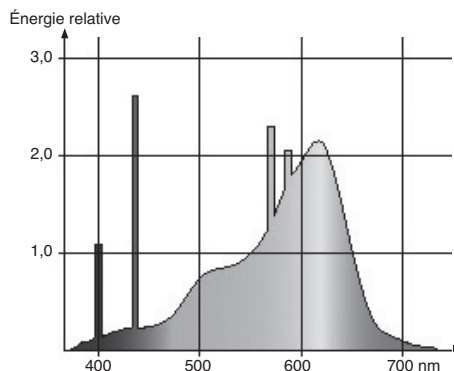


**Figure 1.4** – Spectre discontinu d'une lampe aux vapeurs de mercure, émettant dans les UV

## Spectre combiné

Il s'agit de la combinaison d'un spectre continu et d'un spectre discontinu. Ce type particulier est émis par des sources à décharge électrique modifiées, telles que les tubes fluorescents ou les diodes électroluminescentes (LED).

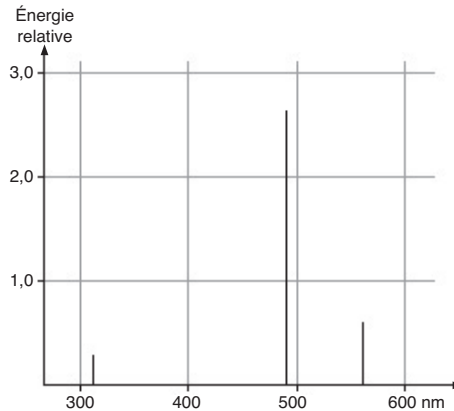
Ces deux dernières sources sont actuellement les plus utilisées pour notre éclairage artificiel au quotidien. Les LED actuelles ont largement dépassé le rendement des tubes fluo et offrent des possibilités infinies de sources lumineuses variées. Les cellules au silicium amorphe, par exemple, sont bien adaptées au spectre émis par les tubes fluorescents et les LED et utilisées pour alimenter principalement des usages en intérieur (sous ces éclairages artificiels). La forme de ces spectres est importante pour le photovoltaïque. Par exemple, les sources « combinées » comme les tubes fluo comportent une part importante de lumière bleue, bien absorbée par le matériau silicium amorphe.



**Figure 1.5** – Spectre combiné d'un tube fluorescent de type *warm white*

## Spectre de raies

Certaines sources lumineuses, comme les lasers ou les diodes laser, n'émettent que dans d'étroites bandes d'énergie. Associées à des filtres à bande passante étroite, ces sources deviennent pratiquement monochromatiques (d'une seule couleur, soit d'une seule longueur d'onde).

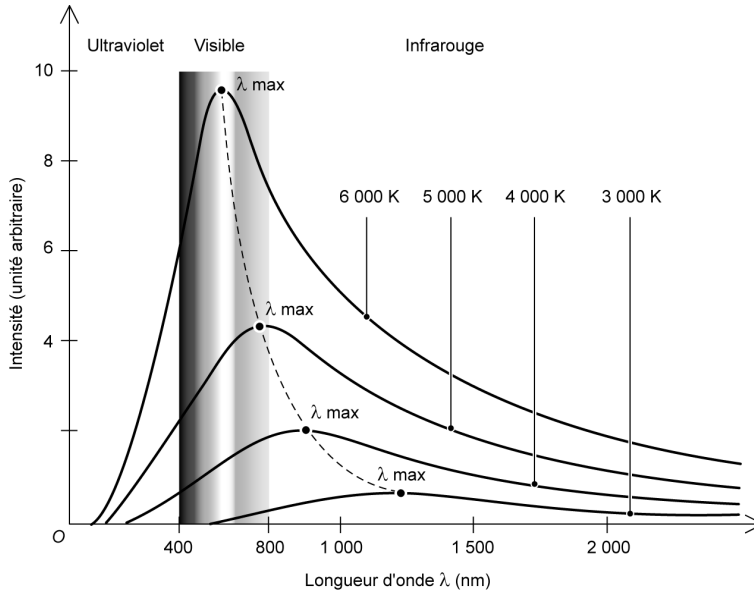


**Figure 1.6** – Les trois principales raies d'émission du laser argon-ion

## Température de couleur

En comparant le spectre continu émis par une source thermique à celui d'un « corps noir », objet idéal dont l'émission ne dépend que de la température, on peut assigner à chaque source thermique une valeur de température de couleur, exprimée en Kelvin, qui caractérise la répartition spectrale de cette source. Cette température décrit donc la couleur apparente de la source lumineuse, qui varie du rouge orangé de la flamme d'une bougie (1 800 K) au blanc bleuté dans le cas d'un flash électronique (entre 5 000 et 6 500 K selon les fabricants). C'est paradoxal car une lumière de couleur bleue, qui paraît plus froide à l'œil, correspond en fait à une température de couleur élevée, et une lumière plus rouge à une faible température de couleur.

- Bougie : 1 800 K
- Soleil à l'horizon : 2 000 K
- Lampe au sodium : 2 200 K
- Lampe à incandescence : 2 400 à 2 700 K
- Tube fluorescent blanc chaud : 2 700 à 3 000 K
- Lampe aux halogénures métalliques : 3 000 à 4 200 K
- Lampe halogène : 3 000 à 3 200 K



**Figure 1.7** – Spectre d'émission d'un corps noir en fonction de la température de couleur

- Tube fluorescent « blanc neutre » : 3 900 à 4 200 K
- Soleil en journée (ciel dégagé) : 5 500 K-5 800 K
- Spectre solaire AM0 (§ 1.2.2) : 5 900 K
- Tube fluorescent « lumière du jour » : 5 400 à 6 100 K
- Flash électronique : 5 000 à 6 500 K
- Ciel nuageux : 7 000 à 9 000 K

Quant à la lumière du Soleil, comme on le voit, sa répartition spectrale varie selon l'heure du jour. Elle va d'une source rougeâtre, à l'aube et au crépuscule, à une source beaucoup plus bleue sous les nuages. Cela n'est pas sans importance dans la compréhension des phénomènes photovoltaïques. Nous y revenons en comparant les technologies au chapitre 2.

## 1.2 Le rayonnement solaire terrestre

### 1.2.1 Géométrie Terre-Soleil

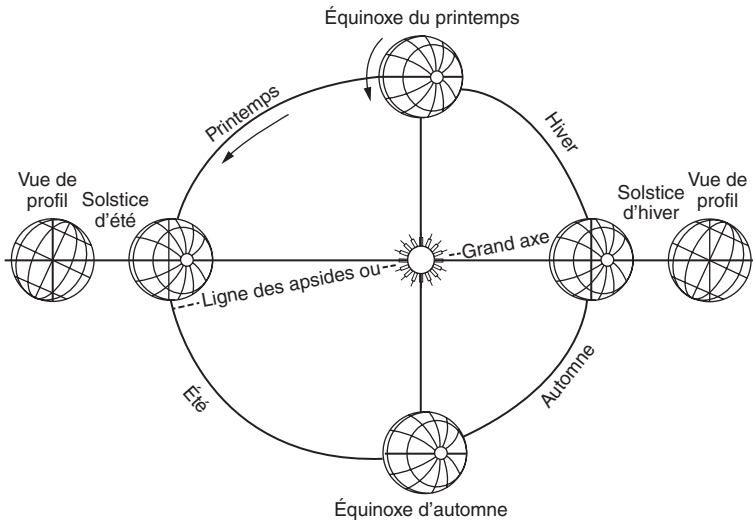
Le Soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de



l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint  $10^7$  K.

## Mouvements de la Terre

La Terre décrit autour du Soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le Soleil occupe un foyer (cf. figure 1.8). En fait, la distance qui les sépare varie de  $\pm 1,69$  % au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre ( $e = 0,017$ ).



**Figure 1.8** – Plan de l'écliptique : l'orbite terrestre et les saisons

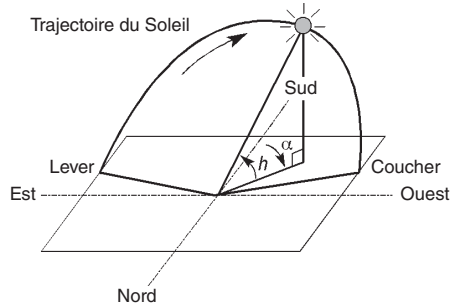
L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné de 23,45 degrés par rapport au *plan de l'écliptique* (plan de l'orbite terrestre). On appelle *déclinaison*  $\delta$  l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc + 23,45 degrés au solstice d'été, - 23,45 degrés au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans l'hémisphère nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé sur l'horizon en été, et plus bas en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes.

On sait également que l'activité solaire n'est pas constante et que l'astre subit des éruptions, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4 % de variation d'intensité du rayonnement émis.

## Trajectoire apparente du Soleil

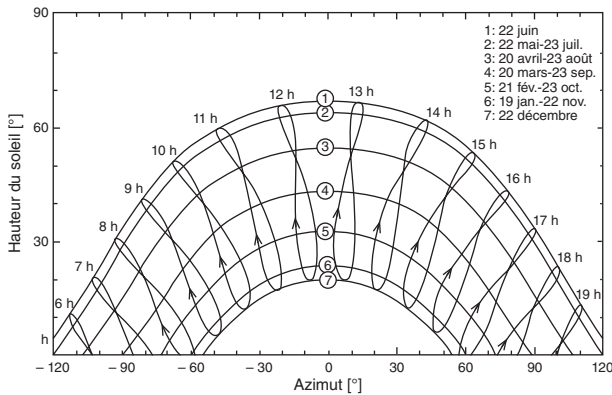
Pour un observateur situé sur la surface de la Terre, le Soleil décrit une *trajectoire apparente* qui dépend de la *latitude* et la *longitude* du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90 degrés dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les deux pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'est.

La position du Soleil en un point donné de la Terre est définie par deux angles : sa *hauteur angulaire*  $h$  – l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal du lieu – et son *azimut*  $\alpha$  – l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le Soleil, compté négativement vers l'est (cf. figure 1.9).



**Figure 1.9** – Définitions de la position du Soleil (hauteur et azimut)

La figure 1.10 est un exemple des trajectoires décrites par le soleil pour un lieu donné (ici, Genève). On peut y lire la hauteur et l'azimut du soleil à tout instant de l'année.



**Figure 1.10** – Trajectoires du soleil à Genève (lat. 46°12'N, long. 6°09'E)

## 1.2.2 Caractéristiques du rayonnement solaire

### Énergie renouvelable

L'énergie qui nous vient du Soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Bien entendu elle est d'abord disponible directement sous forme de lumière (dans sa partie visible) et de chaleur (dans sa partie infrarouge), mais elle est aussi à l'origine de la biomasse (grâce à la photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques et, sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, pétrole et charbon.

Les seules ressources énergétiques non solaires sur terre sont l'énergie calorifique interne (géothermie), les marées et l'énergie nucléaire.

L'énergie du Soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire qui s'y produisent : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques dans le domaine visible, ultraviolet et infrarouge.

### Rôle de l'atmosphère

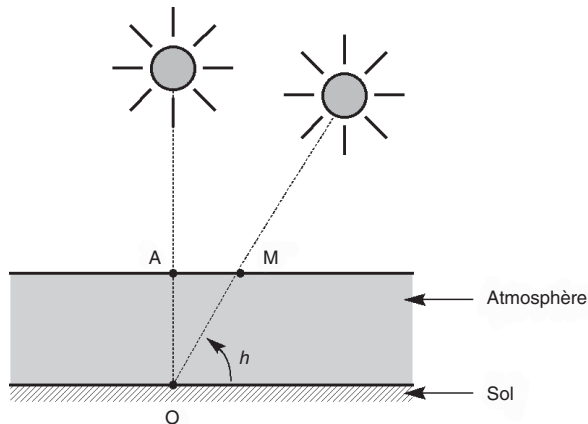
Cette énergie lumineuse dite « extraterrestre » avant son entrée dans l'atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut en instantané  $1\,357\text{ W/m}^2$ . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du Soleil). On appelle cette valeur *constante solaire*, mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil et de l'activité solaire, comme nous l'avons évoqué plus haut.

Cette énergie, qui descend en ligne droite vers notre planète, ne parvient pas sur la Terre en intégralité car elle subit des transformations par absorption et par diffusion en traversant l'atmosphère. En effet, l'atmosphère contient une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21 %), mais aussi de l'argon, du  $\text{CO}_2$ , de la vapeur d'eau, et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère, dont le rôle de filtrage des rayons ultraviolets les plus durs est si important. Les poussières et les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau, à ne pas confondre avec la vapeur d'eau qui, elle, est un gaz) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

## Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus son rayonnement va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations.

On appelle « masse d'air », ou *Air Mass* en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (cf. figure 1.11).



**Figure 1.11** – Définition de l'*Air Mass*

Elle dépend de la hauteur angulaire  $h$  du Soleil définie précédemment (cf. figure 1.9). À l'aide des points  $O$ ,  $A$  et  $M$  et de cet angle  $h$  représentés à la figure 1.11, on écrit la longueur du trajet du rayonnement solaire à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h}$$

$$\text{donc l'Air Mass} = 1 / \sin h$$

Dans l'expression  $AM_x$ ,  $x$  désigne ce rapport  $OM/OA$ .

### Exemples

AM0 : désigne par convention le rayonnement solaire hors atmosphère.

AM1 : Soleil au zénith (reçu à la verticale, au niveau de la mer).

AM1.5 : Soleil à 41,8 degrés (choisi comme référence pour le photovoltaïque).

AM2 : Soleil à 30 degrés.

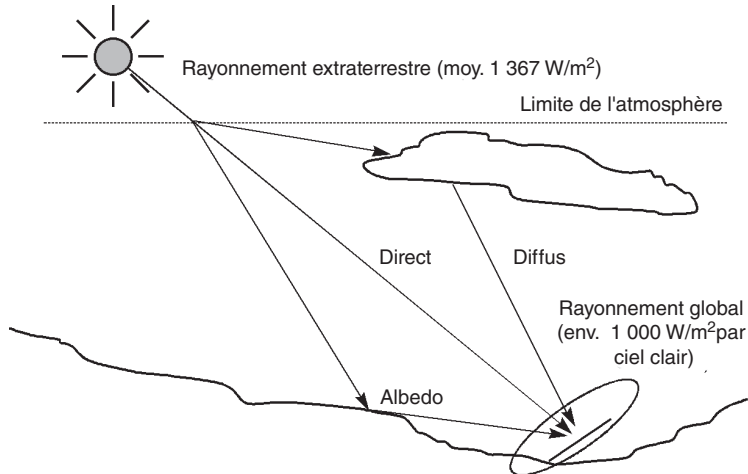
## Rayonnement direct, diffus et global

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est partiellement absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes.

Le *rayonnement direct* est reçu du Soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, le rayonnement direct forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

Le *rayonnement diffus* est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) ou d'aérosols, ainsi que les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est *isotrope*, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée *circumsolaire*) et souvent un renforcement sur l'horizon, la *bande horizon*.

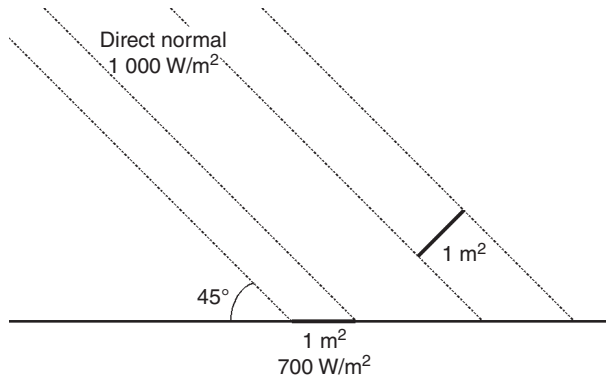
L'*albedo* est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux, alors qu'un asphalte noir n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. On s'intéresse aujourd'hui beaucoup plus à l'albedo lorsqu'on utilise des panneaux bifaciaux qui collectent également l'énergie solaire diffusée par le sol.



**Figure 1.12** – Composantes du rayonnement solaire au sol

Le *rayonnement global* est tout simplement la somme de ces diverses contributions, comme le montre la figure 1.12.

Lorsque l'on considère le rayonnement direct, on appelle rayonnement direct normal le rayonnement direct mesuré perpendiculairement aux rayons du Soleil. Sur un plan non perpendiculaire, le même rayonnement irradie une surface plus grande, il est donc moins intense, c'est ce que l'on appelle *l'effet cosinus*.



**Figure 1.13** – L'effet cosinus

C'est ce qui fait notamment que le rayonnement direct est toujours plus élevé dans le plan perpendiculaire au Soleil, et donc moins élevé sur un plan horizontal en général. Cependant, le rayonnement diffus peut être supérieur car le plan horizontal voit une plus grande part de la voûte céleste.

Ce phénomène conduit notamment les concepteurs d'alimentations solaires à installer à l'horizontale des panneaux solaires performants sous rayonnement diffus sur les sites géographiques qui ont très souvent un ciel couvert. En effet, lorsque le soleil est rarement visible, cela signifie que le rayonnement direct est peu intense ; aussi mieux vaut-il capter toute la voûte céleste pour récupérer un maximum de rayonnement diffus.

## Spectre solaire

Le *spectre* du Soleil, c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou en couleurs, comme on l'a vu plus haut. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde (§ 1.1.1).

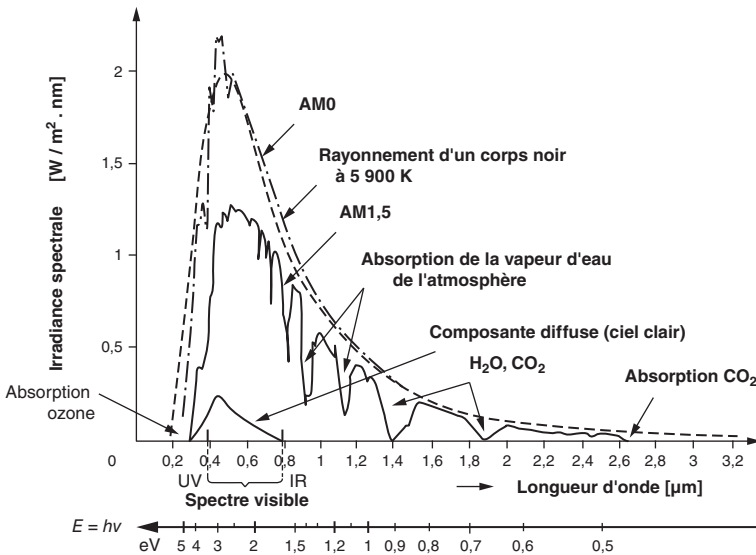
La courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre AM0, compilée selon les données recueillies par les satellites, est répartie comme suit :

<b>Ultraviolet (UV)</b>	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4 %
<b>Visible</b>	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48,0 %
<b>Infrarouge (IR)</b>	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6 %

(Pour les unités de mesures, se reporter à l'annexe 1).

La figure 1.14 montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5, soit l'équivalent d'une hauteur du Soleil de 41,8 degrés au niveau de la mer. L'irradiance spectrale est le flux solaire à une longueur d'onde donnée (et donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible).

Ce spectre de ciel clair, noté AM1.5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs solaires qui mesurent les modules en laboratoire emploient des lampes qui tentent de le reproduire aussi fidèlement que possible. On peut également remarquer le spectre du diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de la diffusion de Rayleigh sur l'air.



**Figure 1.14** – Répartition spectrale du rayonnement solaire, a : hors atmosphère (AM0) et b : à l'incidence 41,8 degrés (AM1.5)

On voit clairement sur le spectre AM1.5 les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau. Est représenté aussi sur la figure 1.13 le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5 900 K, très proche du spectre solaire AM0. En effet,

comme nous l'avons vu plus haut, le Soleil est souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement (§ 1.1.2).

Dans la pratique, il ne faut pas oublier que ce spectre décrit un ensoleillement de référence, certes, mais qui n'est pas du tout permanent. La réalité est beaucoup plus diverse et complexe. Par exemple, rappelons que la température de couleur et donc le spectre de la source solaire peuvent varier de 2 000 à 10 000 K.

### 1.2.3 Le rayonnement solaire sur notre planète

La conception de systèmes photovoltaïques nécessite une connaissance aussi précise que possible du rayonnement solaire exploitable sur le site d'installation, dans le plan des panneaux solaires. C'est un des paramètres essentiels de l'étude préalable, car la production électrique du site en dépend directement.

On serait tenté de penser que l'énergie solaire hors atmosphère étant connue, ainsi que la course du soleil en tout point du globe, il est assez simple de reconstituer l'énergie solaire reçue au sol. Ce serait oublier l'influence du climat sur l'atmosphère qui provoque la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident. Le diffus représente plus de 50 % du rayonnement annuel disponible dans les régions tempérées contre 30 à 45 % dans les pays ensoleillés et en montagne, et 15 à 20 % lors des belles journées, même dans les pays du Sud.

Car la modification par l'atmosphère du rayonnement solaire obéit à des phénomènes assez complexes et, surtout, en grande partie aléatoires. L'état de notre ciel et donc le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépendent d'un grand nombre de paramètres :

- gaz présents dans l'atmosphère ;
  - nuages ;
  - albedo (réflectivité du sol) ;
  - température ambiante ;
  - vent ;
  - humidité relative...
- Or, ces paramètres dépendent eux-mêmes :
- du lieu géographique ;
  - de la saison ;
  - de l'heure de la journée ;
  - des conditions météo du moment...



Bien sûr, les scientifiques, en particulier les climatologues, élaborent des modèles pour décrire et prédire ces phénomènes atmosphériques, mais le moyen le plus sûr pour disposer de données fiables est encore de recourir à des statistiques accumulées sur les années antérieures grâce à des instruments de mesure. Certes le climat évolue et il faut en tenir compte, mais c'est relativement lent. Avec le réchauffement climatique le climat hivernal a fortement évolué en pays tempérés et pour évaluer un système photovoltaïque il est fortement conseillé d'utiliser des statistiques récentes.

Voyons maintenant quels instruments sont utilisés pour quantifier le rayonnement solaire reçu sur la Terre.

## Instruments de mesure

L'*héliographe* est l'instrument le plus ancien. Il donne « la durée d'insolation » ou plus exactement la période du jour pendant laquelle le rayonnement solaire a dépassé un certain seuil. C'est sur un papier qui se déplace que le rayonnement solaire, concentré à l'aide d'un dispositif optique, laisse son empreinte en le brûlant sur une longueur qui donne la durée du jour. Cette donnée est importante notamment pour les horticulteurs et les éleveurs : certaines plantes se développent en fonction de cette durée, et les poules pondent davantage si l'on prolonge artificiellement la durée du jour !

Pour le photovoltaïque, cet appareil n'est pas très intéressant car il ne renseigne pas sur l'intensité du rayonnement.

Remarque : Il faut se méfier d'une erreur couramment répandue qui consiste à considérer une journée de huit heures, par exemple, comme équivalant à huit heures d'ensoleillement standard à  $1\,000\text{ W/m}^2$  AM1.5. En effet, le rayonnement solaire n'est absolument pas constant (voir plus loin « Grandeurs utiles »).

Le *pyranomètre* est l'appareil le plus utile puisqu'il quantifie, à l'aide d'un thermocouple, l'ensemble du rayonnement solaire (direct *et* diffus) sur une surface donnée, sur un très large spectre, de  $0,3$  à  $3\ \mu\text{m}$  de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande ouverture angulaire, proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants).

Il peut également mesurer uniquement la part diffuse du rayonnement : on masque alors le rayonnement direct avec un cache en forme d'arceau qui suit la trajectoire du Soleil pour éliminer la contribution directe du rayonnement.

Le *pyrhéliomètre*, quant à lui, ne mesure que le rayonnement direct. Il « suit le soleil » dans ses déplacements et mesure son rayonnement à l'aide d'un détecteur placé au fond d'un tube de visée à faible ouverture.