

INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Anne Labouret, Michel Villosz

INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Conception et dimensionnement d'installations
raccordées au réseau

5^e édition

EDITIONS
LE MONITEUR



DUNOD

Photo de couverture : © Attila Nemeth – Fotolia.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^{er} 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, Paris, 2012
ISBN 978-2-10-057247-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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

À propos des compléments en ligne	7
Introduction	9
Chapitre 1 : Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque	15
1.1 La lumière sous toutes ses formes	15
1.2 Le rayonnement solaire terrestre	22
1.3 La conversion photovoltaïque	37
1.4 Le fonctionnement de la jonction photovoltaïque	47
Chapitre 2 : Technologie des panneaux solaires	53
2.1 Cellules et panneaux au silicium cristallin	54
2.2 Cellules et panneaux au silicium en couche mince	80
2.3 Panneaux au CdTe	92
2.4 Panneaux au CIS et CIGS	95
2.5 Panneaux spéciaux	97
Chapitre 3 : Équipements pour installations raccordées au réseau	107
3.1 Panneaux solaires	108
3.2 Installation mécanique des panneaux	114
3.3 Onduleurs	119
Chapitre 4 : Systèmes basse puissance	127
4.1 Étapes du projet	127
4.2 Dimensionnement	128
4.3 Exemple d'intégration	135
4.4 Montage et câblage	137
4.5 Effets d'ombrages	139

Chapitre 5 : Centrales de forte puissance	141
5.1 Centrale en plein champ	142
5.2 Toiture photovoltaïque	172
5.3 Centrale à suiveurs	179
5.4 Précision de la simulation	185
Chapitre 6 : Suivi et maintenance d'une centrale photovoltaïque	191
6.1 Centrale de forte puissance	192
6.2 Centrale de basse puissance	196
ANNEXES	
Annexe 1 : Grandeurs physiques et unités	201
Caractéristiques électriques d'un récepteur	201
Rayonnement lumineux	202
Annexe 2 : Données d'ensoleillement	205
Bibliographie	215
Organismes et associations	217
Index	219

À propos des compléments en ligne

Sont accessibles dans les compléments en ligne de cet ouvrage, sur le site internet www.dunod.com :

- ▶ **un accès privilégié au logiciel PVsyst**, abondamment décrit dans cet ouvrage, sous forme d'une durée exceptionnelle de 2 mois d'essai gratuit de la dernière version complète (fonctionnant sous Windows). Cela permet ainsi de se familiariser avec ce logiciel très performant qui est considéré aujourd'hui comme la référence pour de nombreux professionnels et institutions financières ;
- ▶ **de nombreuses références** sur :
 - ▷ les statistiques de production du photovoltaïque,
 - ▷ les producteurs de panneaux solaires, d'onduleurs,
 - ▷ les fiches techniques des matériels,
 - ▷ les sites gratuits et payants proposant des statistiques d'ensoleillement,
 - ▷ les normes en vigueur,
 - ▷ les organismes de certification,
 - ▷ les laboratoires de recherche,
 - ▷ les formations,
 - ▷ les salons et conférences ;
- ▶ **des newsletters et des revues professionnelles** pertinentes.

Introduction

L'utilisation *photovoltaïque* de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour ce faire des *modules ou panneaux photovoltaïques*, composés de *cellules solaires* ou de *photopiles* qui réalisent cette transformation d'énergie. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de *photons* dans un matériau *semi-conducteur* qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur (cf. chapitre 1).

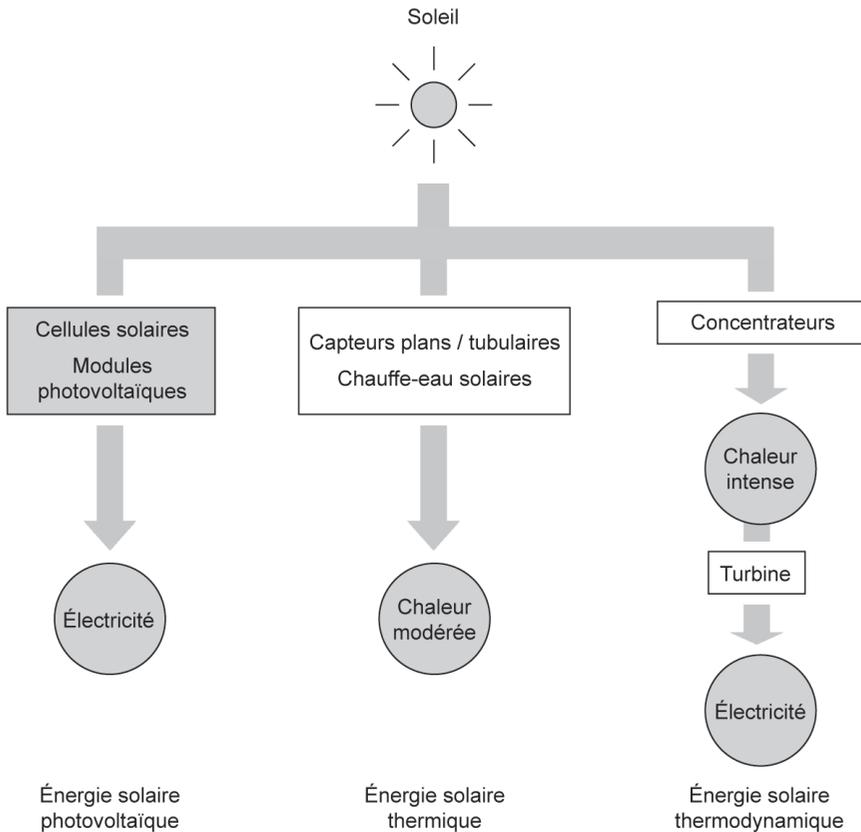


Figure 1 – Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire.

L'énergie solaire *thermique*, quant à elle, produit de la *chaleur* à partir du rayonnement solaire infrarouge du Soleil afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide. La technologie est plus simple que le photovoltaïque, donc moins onéreuse. Il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbantes de la chaleur, des tubes métalliques peints en noir par exemple. Cela permet de réaliser des chauffe-eau solaires individuels ou collectifs.

L'énergie solaire *thermodynamique*, quant à elle, concerne de grandes centrales équipées de concentrateurs des rayons solaires, sous forme de miroirs galbés, dont la fonction est de chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine à vapeur par exemple.

Ces aspects thermiques de l'énergie solaire ne sont pas traités dans cet ouvrage, qui est strictement dédié à l'énergie photovoltaïque, et plus particulièrement aux installations connectées au réseau.

Faut-il nécessairement du soleil pour produire du courant ?

La réponse est non, bien entendu. Sinon, on ne pourrait pas employer le photovoltaïque dans nos pays tempérés. Toute source de lumière peut être convertie en électricité. Le terme énergie solaire est donc un peu faux, certains préféreront pour cette raison l'expression *énergie lumière*.

Ceci dit, le Soleil étant la source la plus intense de notre environnement, la production est toujours supérieure sous exposition au soleil. On dispose, très nettement, de moins de flux lumineux en intérieur (dans un bâtiment, sous éclairage artificiel) et les applications ne peuvent pas être les mêmes. Notre pupille, elle, s'adapte aux divers éclairagements et atténue ces contrastes lumineux. Schématiquement, si l'on attribue le chiffre 1 000 à un ensoleillement maximum de type « temps radieux », correspondant à un flux solaire de $1\,000\text{ W/m}^2$, un ciel nuageux, quant à lui, rayonnera entre 100 et 500 ($100\text{ à }500\text{ W/m}^2$), et une ambiance intérieure entre 1 et 10 (100 à 1 000 lux). Dans une ambiance intérieure, on pourra développer des applications électroniques, horlogères et autres, de très faible consommation électrique.

La quantité d'énergie solaire disponible en extérieur est aussi très variable d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre, d'une saison à l'autre. Sur une journée complète, le Soleil fournit sur Terre de 0 à 7 kWh/m^2 de rayonnement incident. Connaître et quantifier précisément cette énergie lumineuse est indispensable à la maîtrise de l'énergie photovoltaïque. Nous y revenons au chapitre 1.

Qu'est-ce qu'un panneau photovoltaïque ?

Un panneau (ou module) photovoltaïque est un bloc composé de plusieurs cellules généralement montées sous une plaque de verre, d'une dimension de 0,1 à 3 m^2

typiquement. Ces panneaux ont pour fonction de réunir assez de cellules pour créer un convertisseur d'énergie, ces cellules devant être protégées des chocs et des intempéries. Leur puissance varie selon le nombre et la taille des cellules qui les composent, de 1 à 300 W typiquement. Pour disposer de plus de puissance sur une installation, on associe plusieurs modules en créant un champ photovoltaïque.

Les panneaux photovoltaïques ne seront pas les mêmes selon les applications, les technologies étant adaptées, pour certaines, aux moyens et forts éclairagements (sous éclairage naturel) et, pour d'autres, aux faibles éclairagements (sous éclairage intérieur).

Le chapitre 2 détaille les technologies de ces cellules, panneaux, et la façon de composer des champs photovoltaïques.

Le courant produit est-il continu ou alternatif ?

Les cellules solaires et les modules photovoltaïques produisent de l'électricité en *courant continu* (DC = Direct Current) comme les batteries, et non pas comme celle du secteur, qui en France est en *courant alternatif* 220 VAC (AC = *Alternative Current*) à la fréquence de 50 Hz. Pour alimenter des appareils en courant alternatif ou pour se connecter au réseau et y injecter l'électricité produite à partir de l'énergie photovoltaïque, on a donc besoin de convertisseurs DC/AC qui produisent un courant alternatif à partir du continu, autrement dit des *onduleurs*.

Les tensions continues générées par les panneaux photovoltaïques disponibles sur le marché sont variables selon leur emploi : pour la charge de batteries au plomb, les panneaux sont en 12 V ou 24 V, alors que pour la connexion au réseau leur tension est souvent plus élevée, 40 ou 72 V par exemple, selon la taille du champ solaire qui sera construit et la tension d'entrée de l'onduleur.

Faut-il stocker l'énergie ?

Les panneaux solaires ne sont que des *convertisseurs* d'énergie et non des réservoirs (comme les piles). Ils transforment l'énergie mais ne la stockent pas. Si l'application demande de l'énergie en dehors des périodes de production, c'est-à-dire dans l'obscurité, il faudra nécessairement la récupérer dans un stockage (batterie, accumulateur) ou sur une autre source d'énergie.

Les applications possibles sans batterie fonctionnent soit en alimentation directe (en présence de lumière uniquement), soit grâce à un stockage hydraulique (pompage de l'eau), soit lorsque l'installation est connectée au réseau (objet de cet ouvrage). Dans tous les autres cas, une batterie de stockage sera employée pour fournir de l'électricité dans l'obscurité et également lorsque le courant demandé est supérieur au courant fourni à cet instant par les panneaux (démarrage d'un moteur par exemple).

De quoi se compose un générateur photovoltaïque ?

Les systèmes photovoltaïques se répartissent en deux grandes catégories :

- ▶ les installations *raccordées au réseau* dont l'électricité produite est injectée dans le réseau collectif (EDF ou autre) ;
- ▶ les installations *autonomes* destinées à alimenter un appareil sans fil, ou un site isolé, non raccordé au secteur.

Dans cette deuxième catégorie, on trouve tous les systèmes sur batterie : électrification rurale en site isolé, chalets, sites insulaires, alimentations de relais télécoms, signalisation, appareils de mesure... ainsi que les systèmes en alimentation directe, sans batterie, comme certaines ventilations, calculettes et systèmes de pompage. Dans le cas des pompes photovoltaïques, le stockage est hydraulique : la pompe fonctionne « au fil du soleil », monte l'eau dans une citerne qui sert de réservoir pour fournir de l'eau à la demande, même en dehors des périodes de fonctionnement de la pompe.

Le présent ouvrage concerne la première catégorie, soit *les installations photovoltaïques raccordées au réseau*. Ces installations, au lieu d'alimenter directement des appareils sur place, injectent leur production électrique dans un réseau collectif comme celui de l'EDF en France. Les panneaux s'installent soit sur des châssis posés au sol (centrales solaires), soit sur des habitations ou des bâtiments professionnels ayant de la place, et de préférence qui bénéficient d'un bon ensoleillement. L'autorisation de se connecter et la signature d'un contrat de rachat du courant par la compagnie d'électricité sont indispensables pour réaliser et rentabiliser l'opération. Dans un système autonome, la production est écrêtée lors des périodes de fort ensoleillement, puisque dès que la batterie est pleine, l'excédent d'énergie fournie est perdu (essentiellement en été sous nos latitudes). À l'opposé, l'énorme avantage d'une installation raccordée au réseau, c'est que le réseau joue le rôle de « stockage illimité », et donc l'intégralité de l'énergie produite dans l'année est récupérée. L'électricité produite par les panneaux solaires en courant continu doit cependant être mise en forme en courant alternatif au travers d'un onduleur DC/AC qui doit être soigneusement conçu, dimensionné, et respecter des normes de qualité et de sécurité.

Si le site de production est également un site de consommation (une habitation par exemple), il y a deux solutions possibles : soit la vente de la totalité du courant produit et la consommation par ailleurs du courant fourni par la compagnie, soit la vente seulement du surplus de courant non consommé. Souvent la première solution est plus rentable pour le propriétaire du générateur photovoltaïque raccordé, tout simplement parce que le tarif de rachat de son courant photovoltaïque par la compagnie d'électricité est nettement plus élevé (jusqu'à 0,60 €/kWh en 2009 en France,

moins par la suite) que celui auquel il lui achète de façon traditionnelle. D'autres systèmes d'aide à l'investissement existent également : des prêts avantageux pour financer les nouvelles installations, des subventions régionales, des crédits d'impôt, TVA réduite... selon les pays.

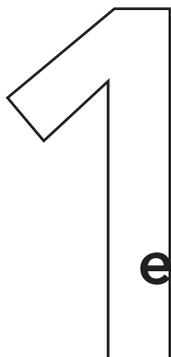
En quoi le photovoltaïque participe-t-il au développement durable ?

Les énergies renouvelables en général et le photovoltaïque en particulier sont souvent considérés comme des solutions alternatives durables aux problèmes actuels de la ressource énergétique, au moins dans le domaine de l'électricité. Voyons concrètement les arguments qui soutiennent cette affirmation.

- ▶ L'énergie du Soleil est la source la plus renouvelable de toutes, c'est même l'énergie primaire de toutes les énergies présentes sur la Terre, à l'exception de la géothermie, qui puise son énergie au cœur de la Terre.
- ▶ Le silicium, matériau le plus employé pour les cellules solaires, est le deuxième matériau le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène, donc si elle continue à exploiter le silicium, l'énergie solaire photovoltaïque préserve les ressources naturelles.
- ▶ L'utilisation du photovoltaïque réduit la quantité d'énergie consommée pour produire de l'électricité. On estime aujourd'hui qu'un panneau solaire produit en quelques années seulement (4 à 6 selon les technologies) l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.
- ▶ La production d'électricité par un générateur photovoltaïque n'émet pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de pollution comparable à celle des modes de production traditionnels. En 2030, selon l'EPIA, l'association européenne du photovoltaïque¹, le solaire photovoltaïque permettra de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 1,6 milliard de tonnes par an, soit l'équivalent de 450 centrales au charbon d'une puissance moyenne de 750 MW.
- ▶ C'est une énergie fiable et durable : les générateurs photovoltaïques sont modulaires, faciles à mettre en œuvre et à entretenir. Ils n'ont que très peu d'usure intrinsèque. Leur durée de vie est de 20 à 30 ans.
- ▶ Cette industrie minimise les déchets toxiques. La pollution émise lors de la fabrication des cellules solaires est relativement faible (sauf en ce qui concerne certains matériaux à risque comme le cadmium, cf. § 2.3). Et il n'y a absolument aucune émission toxique lors de la génération d'électricité par les panneaux solaires.

1 *European Photovoltaic Industry Association* : www.epia.org

- ▶ C'est une technologie qui favorise la santé publique et le développement humain. En apportant l'électricité dans des endroits reculés, le photovoltaïque améliore considérablement le niveau de vie des habitants, tant dans le domaine de l'éducation que celui des activités agricoles et artisanales.
- ▶ Dans les pays producteurs de panneaux solaires mais aussi un peu partout où ils sont vendus, installés, entretenus, le photovoltaïque génère de l'activité économique et des emplois.



Énergie lumineuse et conversion photovoltaïque

Ce chapitre donne les bases physiques du phénomène lumineux, expose les caractéristiques du rayonnement solaire terrestre, sa mesure et les bases de données météorologiques. Il détaille également la conversion de la lumière en électricité.

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 sa vitesse, qui ne peut être égalée et encore moins dépassée. Rien ne peut aller plus vite que la lumière, et c'est sur ce postulat que repose la célèbre théorie de la relativité d'Einstein. Il a découvert que la matière (m) est énergie (E), et vice versa, et que ces grandeurs sont liées par la vitesse de la lumière au carré. C'est ce qu'exprime sa fameuse formule $E=mc^2$. 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-Lune¹.

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 l'arc-en-ciel ?... les questions sont multiples. Pour rendre compte de toutes les observations, depuis le Moyen Âge, les scientifiques ont cherché à décrire la nature profonde de la lumière et élaboré de nombreuses théories, parfois contradictoires.

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

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, 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 l'alternance 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 Maxwell, qui mit en équations la propagation des ondes lumineuses.

D'autres 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 seront enfin réconciliées ces deux théories dites *ondulatoire* et *corpusculaire* de la lumière, grâce à la découverte du *photon* par Planck et Einstein. Car en pratique la lumière a bien une double nature :

- C'est une onde électromagnétique, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ (périodicité spatiale, figure 1.1) ou sa fréquence ν : plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est faible et inversement :

$$\nu = \frac{C}{\lambda},$$

où C est la célérité de la lumière. Dans la partie visible du spectre solaire (§ 1.2.2), 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.

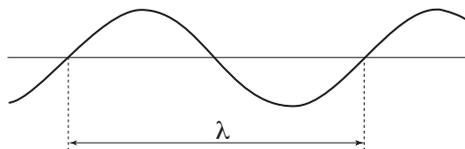


Figure 1.1 – Définition de la longueur d'onde (λ).

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).

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 (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) au proche infrarouge (10 μm). Voir les détails au paragraphe 1.2.2.

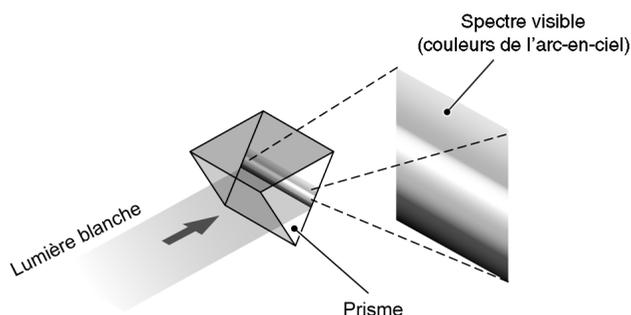


Figure 1.2 – Décomposition de la lumière blanche par un prisme.

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.

	Longueur d'onde	Fréquence	Exemples d'applications
Rayons γ	< 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 μm		Vision nocturne
Infrarouge thermique	10 μm -1 mm		Chauffage, cuisson
Micro-ondes	1 mm-10 cm		Fours de cuisine
Ondes radar	10 cm-1 m	3 GHz-300 MHz	Téléphone portable, 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 de loin la plus énergétique. Nous y revenons en détail ci-dessous (§ 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... 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 les hommes 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 les unités de la « bougie » puis de la « bougie nouvelle » et plus sérieusement de la « Candela » définie plusieurs fois puis figée en 1979¹.

Avec la découverte de la fée électricité sont nées 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.

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