

# Chapitre I

## Energie Solaire

### I.1 Introduction

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. Cependant, ce rayonnement est sujet à plusieurs perturbations, qui varient avec la constitution verticale de l'atmosphère terrestre (nuage, aérosol, etc.), qui constitue une barrière empêchant ainsi l'irradiation solaire de passer.

Il serait tout d'abord intéressant de connaître quelques notions sur le rayonnement solaire (caractéristique, nature, intensité), avec ses différentes composantes qui le sont liées, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, la connaissance de ces divers paramètres permet d'établir un bilan radiatif du système terre- soleil et avec quelques avantages et inconvénients de cette énergie, ceci est présenté en détail dans ce chapitre.

### I.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est avant tout l'élément essentiel rendant la vie organique possible sur terre (chaleur, photosynthèse, et création des énergies fossiles). Le soleil est une sphère gazeuse chaude composée principalement d'Hydrogène (73.5%) et d'Hélium (24.9%). Son diamètre est de 1.39 millions de kilomètres, ce qui correspond à une surface totale égale à  $6.08 \times 10^{18} \text{ m}^2$  et se trouve à une distance moyenne de 150 millions de kilomètres de la terre. Cette distance varie entre 152 millions de kilomètres (le premier juillet) et 147 millions de kilomètres (le premier janvier). Vu depuis la terre, le soleil présente un angle solide de  $6.8 \times 10^{-5} \text{ rad}$  et une ouverture angulaire de  $0.53^\circ$ . Il émet du rayonnement dans des longueurs d'onde qui varient de 250 à 5000 nm. La terre reçoit une partie de ce rayonnement. Le flux énergétique reçu par la terre est appelé éclairement énergétique, abrégé en éclairement. La moyenne

annuelle de cet éclairement reçu sur un plan normal aux rayons du soleil situé au sommet de l'atmosphère est appelée constante solaire.

Le soleil peut être assimilé à un corps noir qui émet un rayonnement électromagnétique dont le spectre est présenté dans la figure I.1. Sur ce spectre, on note la différence entre le rayonnement arrivant au sommet de l'atmosphère et le rayonnement arrivant au niveau du sol. Cette différence est liée aux bandes d'absorption des gaz de l'atmosphère. La distribution de l'énergie émise par le soleil peut être divisée en : lumière visible 39.8%, ultraviolet (UV) 9% et infrarouge (IR) 51.2%.

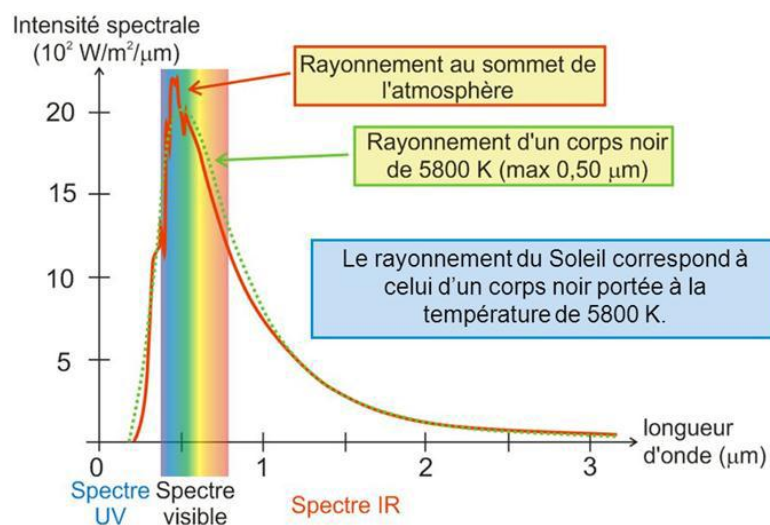


FIGURE I.1 Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère [7].

Le rayonnement solaire atteint le sol sous différentes formes à savoir, le rayonnement dispersé atteignant la surface de la terre désigné sous le nom du rayonnement diffus, le rayonnement direct provenant directement du disque solaire sans subir des modifications et également le rayonnement réfléti par la terre à différentes longueurs d'onde dues à la température de sa surface. Le rayonnement réfléchi par la surface terrestre est renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope. La quantité d'énergie transportée par le rayonnement solaire à la surface terrestre dépend de certaines considérations géométriques dues au mouvement apparent du soleil et aux mouvements de la terre.

### I.2.1 Constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée constante solaire. La constante solaire  $C$  a été estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$  par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), avec une incertitude de l'ordre de 1%. Cette valeur a été adoptée par la commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en octobre 1981. En première approximation, on peut calculer sa valeur en fonction du numéro du jour de l'année  $n$  par [8]:

$$G_0 = 1367(1 + 0.033 \cos(0.9856 n)) \text{ W/m}^2 \quad (\text{I.1})$$

Où  $n$  représente le numéro du jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

### I.2.2 Masse d'air

Le rayonnement solaire traversant l'atmosphère au cours de la journée dépend de la position relative du soleil dans le ciel, pour tenir compte de cette position qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux, on définit un coefficient  $m$  appelé masse atmosphérique ou nombre masse d'air, défini par [9]:

$$m = \frac{P}{1013 \sin A} \exp\left(-\frac{Z}{7.8}\right) \quad (\text{I.2})$$

7.8 : L'épaisseur verticale moyenne standard de l'atmosphère exprimée en km ;

Z: L'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire exprimée en km ;

P : Pression atmosphérique N/ m<sup>2</sup>.

A: Élévation du soleil en degré.

### I.2.3 Bilan énergétique du système terre / atmosphère

La moyenne annuelle de rayonnement arrivant au sommet de l'atmosphère est la constante solaire  $S$  ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) [10]. Il s'agit de la quantité de rayonnement électromagnétique qui serait reçue sur un plan perpendiculaire aux rayons, à une distance de 1<sup>re</sup> unité astronomique (UA). En considérant la rotation de la Terre et l'angle avec lequel les rayons atteignent l'atmosphère selon l'endroit considéré, le rayonnement solaire moyen reçu est estimé à un quart de la constante solaire ( $340 \text{ W/m}^2$ ). C'est la valeur de référence

pour la figure I.2 qui présente un bilan énergétique global du rayonnement solaire sur Terre. En moyenne, seul 48% du rayonnement incident parvient au sol, l'atmosphère et les nuages retenant l'autre moitié soit par réflexion ou par absorption. L'étude de la couverture nuageuse et des paramètres de l'atmosphère joue donc un rôle capital pour l'étude du rayonnement global reçu au sol, ce qui constitue l'enjeu principal de plusieurs études.

L'éclairement solaire incident au sommet de l'atmosphère est estimé à environ  $342 \text{ W/m}^2$  en moyenne annuelle. Une fraction du rayonnement qui arrive au sommet de l'atmosphère (environ 30%) est réfléchi et renvoyée vers l'espace par les différentes composantes de l'atmosphère (6 % par l'air, 20 % par les nuages) et par les surfaces terrestres (4%). L'albédo global terrestre exprime cette fraction. Lors de sa traversée de l'atmosphère, environ 19% du rayonnement est absorbé par un mélange de gaz et de particules en suspension (gaz, poussières et nuages). Seulement 53% de l'éclairement solaire incident parvient à la surface. L'énergie disponible en surface dépend en plus des fractions réfléchies et absorbées par l'atmosphère terrestre elle-même. L'atténuation du rayonnement à travers l'atmosphère est en fonction de la densité, de la taille et de la nature des molécules et des particules rencontrées. Elle varie aussi avec la longueur de la trajectoire des rayons solaires à travers l'atmosphère. Cette longueur est caractérisée par la 'masse atmosphérique', appelée aussi masse d'air optique.

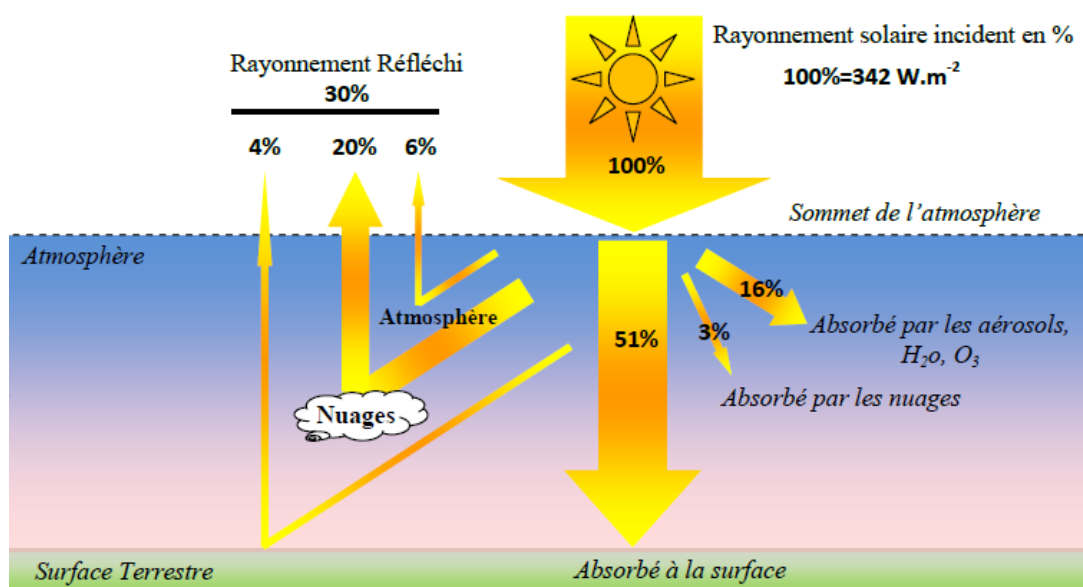


FIGURE I.2 Bilan énergétique annuel du système Terre-Atmosphère.

### I.2.4 Nuages

Les nuages sont constitués de petites gouttes d'eau et de cristaux de glace en suspension dans l'air. La plupart des nuages sont situés dans la troposphère. Ils se forment par condensation habituellement au niveau des courants ascendants. Selon leur altitude et leur composition, ils présentent diverses formes et propriétés. L'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) propose une classification des nuages en 10 principales classes (figure I.3)

L'impact des nuages sur le rayonnement perçu au sol est difficile à décrire de façon quantitative. En effet, les nuages d'un même type peuvent avoir un effet d'atténuation différent en fonction de leurs propriétés macroscopiques et microscopiques (géométrie, épaisseur optique, quantité d'eau liquide, etc.). Cependant, les nuages ont généralement un effet réducteur sur le rayonnement reçu au sol puisqu'ils réfléchissent une partie de la lumière incidente vers l'espace.

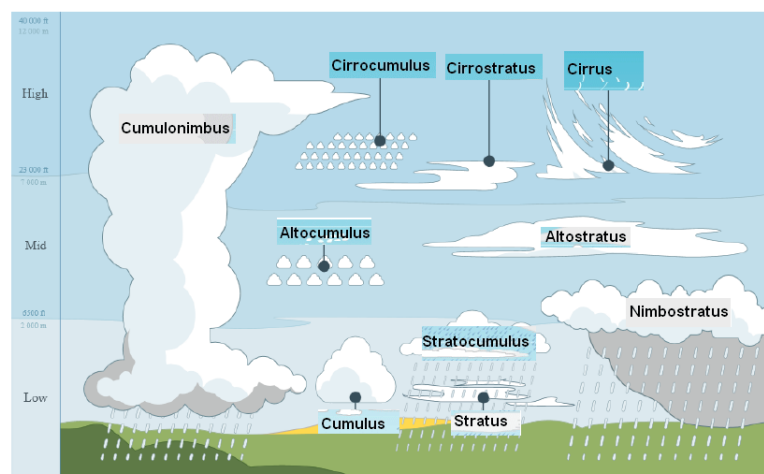


FIGURE I.3 Classification des types de nuages [11].

### I.2.5 Caractéristiques physiques

#### I.2.5.1 Trajectoire terre – soleil

La terre crée autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique comme indiqué sur la figure I.4. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est très près du soleil avec 147 millions de km de distance et au solstice d'été qu'elle en est la plus éloignée : avec 153 millions de km, et la distance moyenne étant de 149,5 millions de km, la terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à

une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique. L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison  $\delta$ , l'angle formé par l'axe Terre -Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de  $+23^{\circ}27'$  solstice d'été (21 juin), à  $-23^{\circ}27'$  Solstice d'hiver (21 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 mars et 23 septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes, la déclinaison passe par  $0^{\circ}$  ( $-23^{\circ}27' < \delta < +23^{\circ}27'$ ) [10,12].

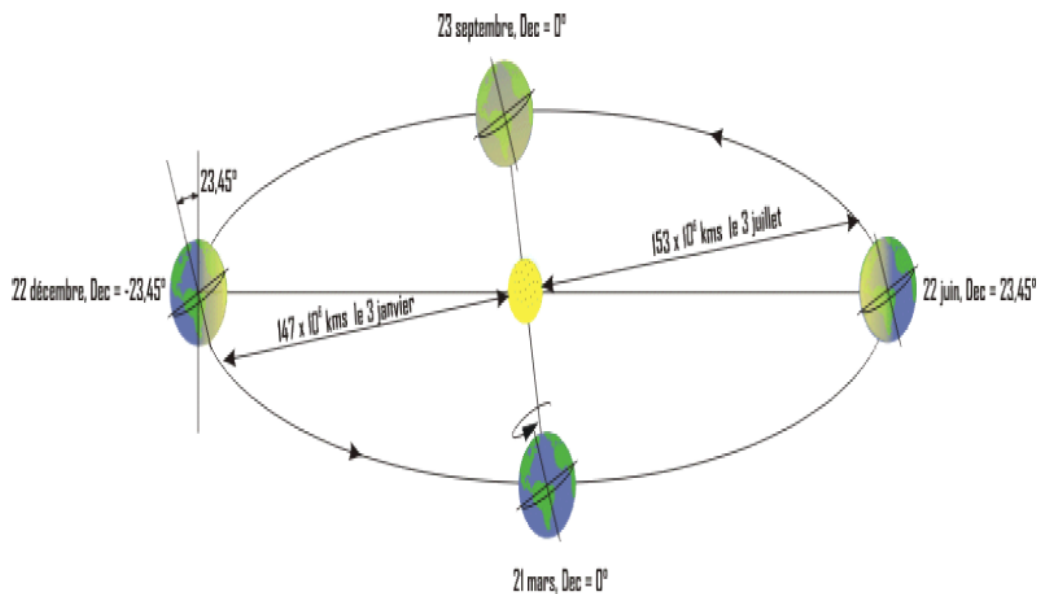


FIGURE I.4 Le mouvement de la terre autour du soleil [8].

### I.2.5.2 Facteur de correction de la distance terre-soleil

La distance entre la terre et le soleil varie sensiblement en raison de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil. Cette distance peut alors atteindre 153 millions de Km au maximum le 3 juillet, et 147 millions de Km au minimum le 3 janvier. Ce facteur dépend du numéro du jour de l'année  $j$ , la correction de la distance terre-soleil ( $c_{t-s}$ ) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [13] :

$$C_{t-s} = 1 + 0.033 \cos \left[ \frac{360n}{365} \right] \quad (I.3)$$

avec

$n$ : Le numéro du jour de l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier.

### I.2.6. La Position du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux référentiels différents, grâce à deux plans, plan horizontal du lieu et plan équatorial de la terre. Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

#### I.2.6.1 Coordonnées équatoriales

Dans ce référentiel, le soleil est localisé au moyen de deux angles, la déclinaison solaire  $\delta$  donnée par l'équation (4) et l'angle horaire  $\Omega$  défini par [14]:

$$\Omega = 14(TSV - 12)$$

$$TSV = TL - GMT + \left( \frac{Et + 4\lambda}{60} \right) \quad (I.4)$$

$$Et = 9.87 \sin 2N - 7.35 \cos N - 1.5 \sin N \quad (I.5)$$

$$N = \frac{360}{365} (n - 81) \quad (I.6)$$

*GMT* : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich ;

*TSV* : temps solaire vrai ;

*TL* : temps légal (donné par une montre) ;

*Et* : l'équation de correction du temps ;

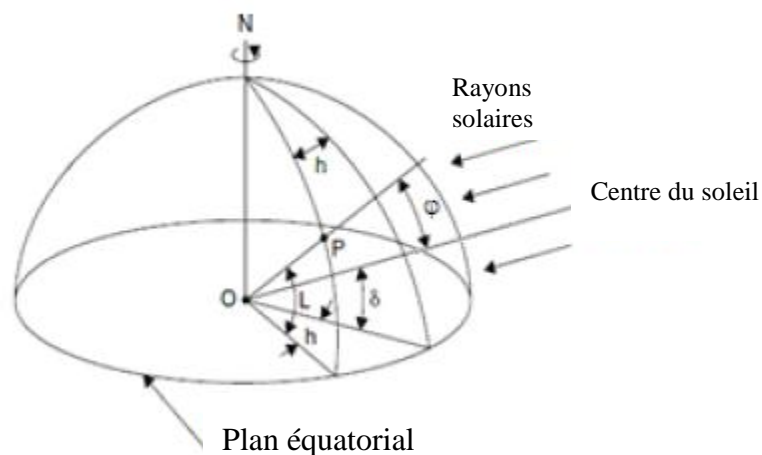
$\lambda$ : Longitude du lieu ;

L'angle horaire  $\Omega$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , prend la valeur nulle à midi *TSV*, négative durant la période avant midi *TSV* et positive après.

#### I.2.6.2 Coordonnées horizontales

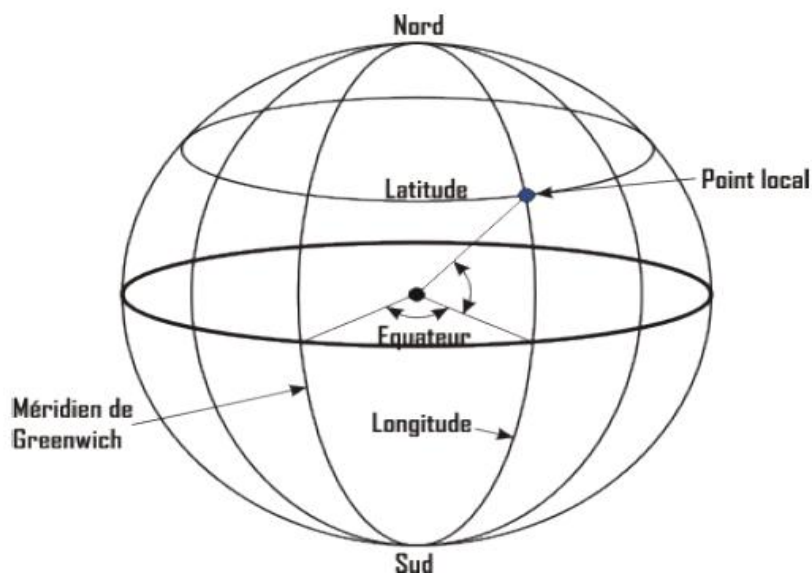
- **Latitude et longitude**

La latitude  $\varphi$  permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle nord. L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ .



FIGUREI.5 Référentiel du plan équatorial.

Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par la lettre ( $\varphi$ ), et peut ainsi être composée entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ . La longitude c'est l'angle  $\lambda$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180$  (vers l'ouest) et  $+180$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes comme illustrée dans la figure.I.5.



FIGUREI.6 Coordonnées terrestres.

### • Equation du temps

Tous les points à longitude constante font l'expérience de midi et de toute autre heure à la même heure. L'heure locale ( $LT$ ), également appelée heure solaire, est une mesure de la position du Soleil par rapport à une localité. À midi heure locale, le soleil traverse sa position la plus haute dans le ciel. La figure I.7 représente graphiquement l'équation du temps en fonction du jour Julien et de sa déclinaison. Le temps universel (TU) peut être défini comme l'heure locale au méridien zéro. Pour éviter toute confusion due à des heures locales infinies, des fuseaux horaires ont été introduits sous le concept d'heure standard. L'Heure Standard (SDT) a été proposé par Sandford Fleming en 1879[15]; cela consistait à diviser le monde en 24 fuseaux horaires, chacun couvrant exactement  $15^\circ$ , car la Terre tourne de  $15^\circ$  par heure. A cause des considérations politiques, ils ont maintenant augmenté le nombre de fuseaux horaires standard à 39. L'heure locale standard (LST) est la même heure dans tout le fuseau horaire. De plus, l'horloge est généralement décalée d'une heure entre avril et octobre pour mieux utiliser la lumière du soleil, prétendument pour économiser de l'énergie. La figure I.7 illustre l'équation du temps en fonction du jour de l'année et de la déclinaison  $\delta$ .

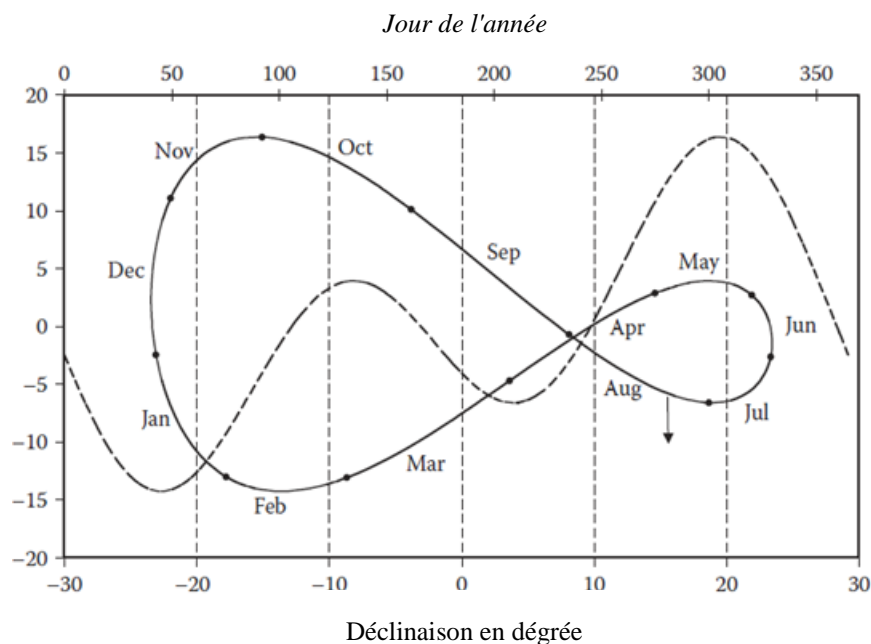


FIGURE 1.7 Equation du temps en fonction du jour de l'année et de la déclinaison.

La relation entre l'heure solaire et l'heure standard doit être connue pour décrire la position du soleil. Pour la plupart des endroits où les zones standards avancent d'une heure à l'autre, l'ajustement de l'heure solaire pour la longitude peut être effectué en soustrayant la longitude de l'observateur ( $\lambda_{local}$ ) à la longitude du méridien standard ( $\lambda_{STD}$ ) du fuseau

horaire de l'observateur et en la multipliant par *4minutes*. Le soleil prend pour se déplacer  $1^\circ$  à travers le ciel. L'équation 1.7 estime la différence de temps en minutes entre l'heure solaire et l'heure standard plus une correction due à l'irrégularité de la durée naturelle d'un jour. Cette irrégularité est provoquée par l'orbite non circulaire de la Terre qui tourne autour du Soleil et par l'inclinaison de l'axe nord-sud par rapport au Soleil:

$$LT - STD = 4(\lambda_{STD} - \lambda_{local}) + E_t \quad (I.7)$$

où  $E_t$  est appelée l'équation du temps en fonction de l'angle quotidien  $\Gamma$  donné par l'équation I.8.

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (I.8)$$

- **La déclinaison et l'angle horaire**

La déclinaison ( $\delta$ ) est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année. Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Gueymard[16].

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(n + 284)\right] \quad (I.9)$$

où :  $n$  est le numéro du jour de l'année.

La figure I.8 montre le changement de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année.

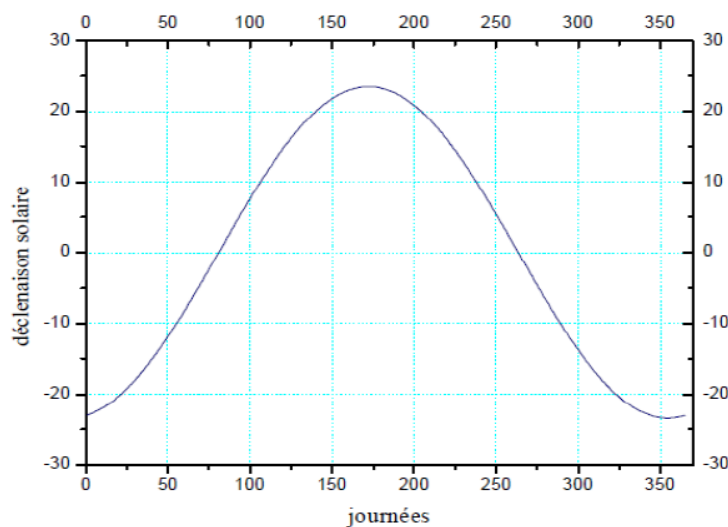


FIGURE I.8 Schéma représentant la variation annuelle de la déclinaison du soleil.

L'angle horaire  $\omega$  mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante [17,18]:

$$\omega = 15(T_{SV} - 12) \quad (I.10)$$

Où  $T_{SV}$  représente le temps solaire vrai en heure basé sur la rotation de la terre autour de son axe polaire et de sa révolution autour du soleil. La durée du jour solaire varie durant l'année du fait que : la terre balaye des surfaces différentes dans sa rotation autour du soleil et l'axe de la terre est incliné par rapport au plan écliptique.

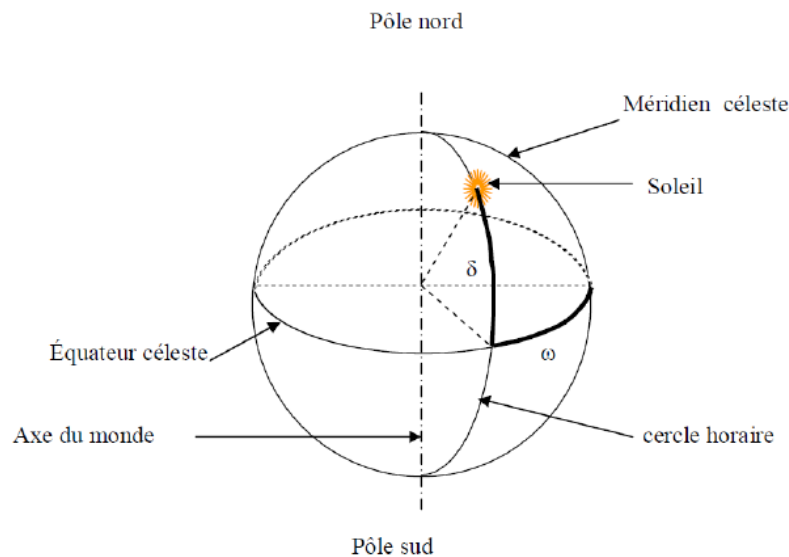


FIGURE I.9. Angle horaire  $\omega$  du soleil.

- **Azimut  $A_Z$**

C'est l'angle horizontal de la direction du soleil avec la direction du sud. La connaissance de l'azimut ' $A_Z$ ' permet de calculer l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale.

- **Hauteur angulaire**

C'est l'angle vertical de la direction du soleil avec le plan horizontal, parfois on parle de l'angle zénithal qui est le complément de  $h$ , tel que  $A_Z = 90^\circ - h$ . La hauteur angulaire du soleil  $h$  mesure la distance angulaire du soleil à partir de l'horizon.

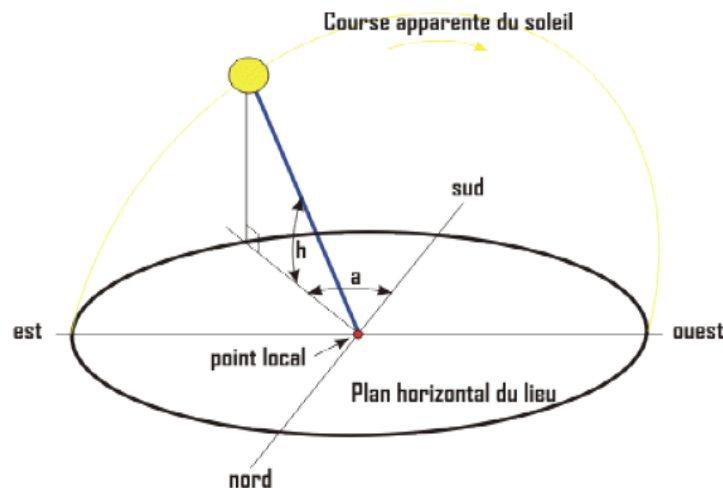


FIGURE I.10 Système de coordonnées horizontales.

### I.3 Le rayonnement solaire au sol

L'irradiation solaire arrive au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques. Elle se subdivise premièrement en deux parties: La première est directement réfléchi vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère et la deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractions et des diffractions pour être à son tour soit renvoyée vers l'espace soit vers le sol. Ces phénomènes font que l'on peut regrouper les rayons solaires parvenant au sol en trois composantes principales, qui sont le direct, le diffus et le réfléchi [19].

#### I.3.1 Le rayonnement solaire direct normal $I_N$

C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration (four solaire, centrales thermo-solaires et photovoltaïques).

#### I.3.2 Le rayonnement solaire diffus $D$

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples dispersions par les molécules et les *aérosols* de l'atmosphère qui sont définis comme des éléments fins solides et/ou liquides en suspension dans l'atmosphère, ils peuvent être attribués aux activités humaines (anthropiques) ou à des sources naturelles. Les principales sources naturelles d'aérosols sont les océans, les déserts et les volcans. C'est un rayonnement qui provient de

l'atmosphère, il contribue à l'éclairement mais, il ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct). Le rayonnement diffus, produit par des processus complexes, est beaucoup plus difficile à analyser que le rayonnement direct.

### I.3.3 Rayonnement solaire réfléchi $d_{re}$

Le rayonnement solaire qui arrive sur le sol est en partie réfléchi. La réflexion du rayonnement solaire par le sol se fait de façon sélective (couleur des corps). Par temps clair, le problème est compliqué par la présence des zones d'ombre. Pour caractériser de façon globale les propriétés réfléchives du sol, on utilise son *albédo*, c'est-à-dire le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident sur toutes les fréquences et tous les angles d'incidences.

La fraction d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente est appelée *Albédo*. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Il dépend fortement de la nature du sol et de l'état de la surface. L'albédo total du système Terre/Atmosphère vaut environ 0.3 ce qui signifie que 30% du rayonnement solaire est réfléchi et 70% est absorbé. L'albédo des forêts est proche de 0.15, celui des surfaces désertiques vaut environ 0.35, tandis que celui des surfaces englacées s'élève à 0.6 [8].

### I.3.4 Le rayonnement solaire global $G_h$

C'est le rayonnement reçu sur une surface provenant de toute la voûte céleste et du disque solaire

#### I.3.4.1 Rayonnement global sur une surface horizontale $G_h$

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale  $G_h$  est la somme du rayonnement direct et du diffus (figure I.11), selon la formule suivante :

$$G_h = D_h + I_N \cos(\theta_s) \quad (I.11)$$

Ou  $\theta_s$  est l'angle zénithal.

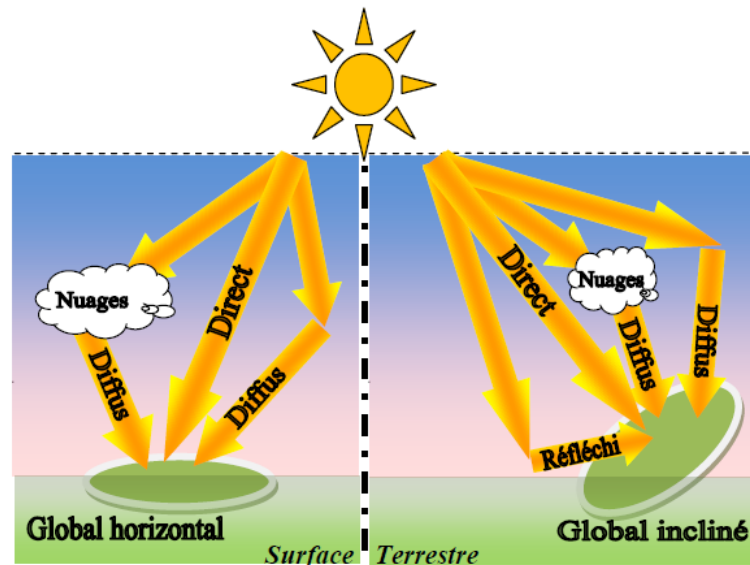


FIGURE I.11 Composantes principales du rayonnement solaire.

#### I.3.4.2 Le rayonnement global sur une surface inclinée

Le rayonnement solaire global sur une surface arbitraire ayant une inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontale et un angle azimutal  $\gamma$  est la somme des trois composantes directe, diffuse et réfléchi par le sol du rayonnement solaire (figure I.11)[8, 20].

$$G_{\beta} = D_{\beta} + I_{N_{\beta}} + d_{re} \quad (I.12)$$

L'énergie solaire varie en fonction de :

- La latitude du lieu ;
- L'orientation et l'inclinaison du plan de collecte ;
- La saison (maximale en été, minimale en hiver) ;
- La situation atmosphérique (ciel clair ou couvert) ;
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maximale à midi solaire).

### I.4 Rayonnement solaire et production photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le rayonnement global est induit par un apport d'énergie à la surface terrestre. Cependant, outre l'aspect calorifique que ce dernier représente spontanément, il est possible à partir de cellules spécialement créées, de convertir cette énergie surfacique en énergie électrique. Ce processus passe par l'utilisation d'un module photovoltaïque intégré

dans un système photovoltaïque complet. Il est associé à un système de stockage (batterie,  $H_2$ , volant d'inertie, etc.) afin de stocker l'énergie produite.

### I.4.1 L'effet photoélectrique

#### I.4.1.1 Génération de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire

L'effet photoélectrique a été initialement découvert par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz (1886). Il réalisa expérimentalement qu'un matériau métallique exposé à la lumière pouvait émettre des électrons. Cette découverte fut appelée « effet photoélectrique ». Malheureusement, Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement le phénomène, car certaines caractéristiques de cet effet n'étaient pas formalisable avec la théorie classique de l'électromagnétisme de l'époque. En effet, ces dernières sont réalisées en associant deux matériaux semi-conducteurs de types différents, l'un est dopé *N* et l'autre est dopé *P*, comme le montre la figure II.12. De nombreuses technologies de cellules photovoltaïques existent. Les plus fréquentes sont celles en Silicium cristallin et les couches minces [21].

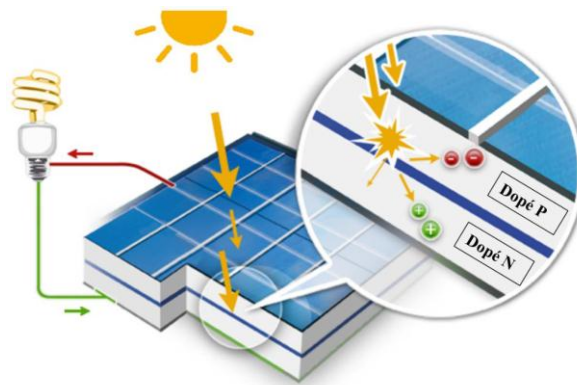


FIGURE I.12 L'effet photovoltaïque [22].

Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome de la surface du matériau photovoltaïque, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont des charges de signes opposés, et c'est cette opposition qui génère une différence de potentiel électrique (l'effet photovoltaïque). L'association de deux types de matériaux pour la création de la jonction permet de récupérer les charges avant la recombinaison des électrons dans le matériau (redevient alors neutre). La présence de la jonction PN permet ainsi le maintien d'une circulation d'un courant électrique continu jusqu'à ses bornes. Ce courant est alors recueilli par des fils métalliques très fins

connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en « champs ».

#### **I.4.1.2 Les systèmes photovoltaïques**

Dans des conditions d'ensoleillement standards ( $1000\text{W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$ ), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2,3\text{W}$  sous une tension de  $0,5\text{V}$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance, insuffisant en tant que tel pour la plupart des applications domestiques ou industrielles [23]. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. Outre cette juxtaposition de cellules, le courant généré par les cellules photovoltaïques produit uniquement du courant continu à partir du rayonnement solaire.

L'utilisation de ce courant continu diffère d'une installation à l'autre, selon le but de celle-ci. On distingue principalement deux types d'utilisation selon si l'installation photovoltaïque est connectée ou non à un réseau de distribution d'électricité. Les installations non connectées peuvent directement consommer l'électricité produite. C'est le cas des sites non raccordés au réseau électrique (en montagne, sur des îles ou des voiliers, un satellite,... etc.) qui peuvent en outre être équipés de batteries, d'accumulateurs pour disposer d'électricité au cours de périodes sans lumière (la nuit notamment).

Des installations photovoltaïques peuvent également être connectées à un réseau de distribution. Sur les grands réseaux de distribution (Amérique du Nord, Europe, Japon, etc.) des installations photovoltaïques produisent de l'électricité et l'injectent dans le réseau. Pour ce faire, ces installations transforment le courant continu en courant alternatif aux caractéristiques du réseau (fréquence de  $50\text{ Hz}$  en Europe ou  $60\text{ Hz}$  en Amérique du Nord par exemple). Elles n'ont pas besoin d'installation de stockage (batteries) car l'électricité est consommée à l'instant où elle est produite par les consommateurs les plus proches sur le réseau. Ce raccordement nécessite l'utilisation d'un onduleur, c'est-à-dire un dispositif qui a pour fonction de transformer un courant électrique continu en courant alternatif, identique à celui circulant sur le réseau. Il existe des onduleurs issus de différente technologie, cependant, leurs principes et objectifs sont les mêmes : faire passer l'énergie du *DC* (courant continu) à l'*AC* (courant alternatif).

Cette transition entraîne une modification des performances globales du système. Il convient d'introduire le facteur *PR* (performance ratio) qui dépend du choix des composants comme l'onduleur, la température, l'énergie perdue...etc., et peut modifier considérablement la production d'électricité au cours du temps. Le *PR* est calculé par le rapport entre le rendement mesuré et celui théorique. La figure 1.13 détaille le principe d'utilisation d'une source renouvelable d'énergie de type solaire raccordée au réseau électrique.

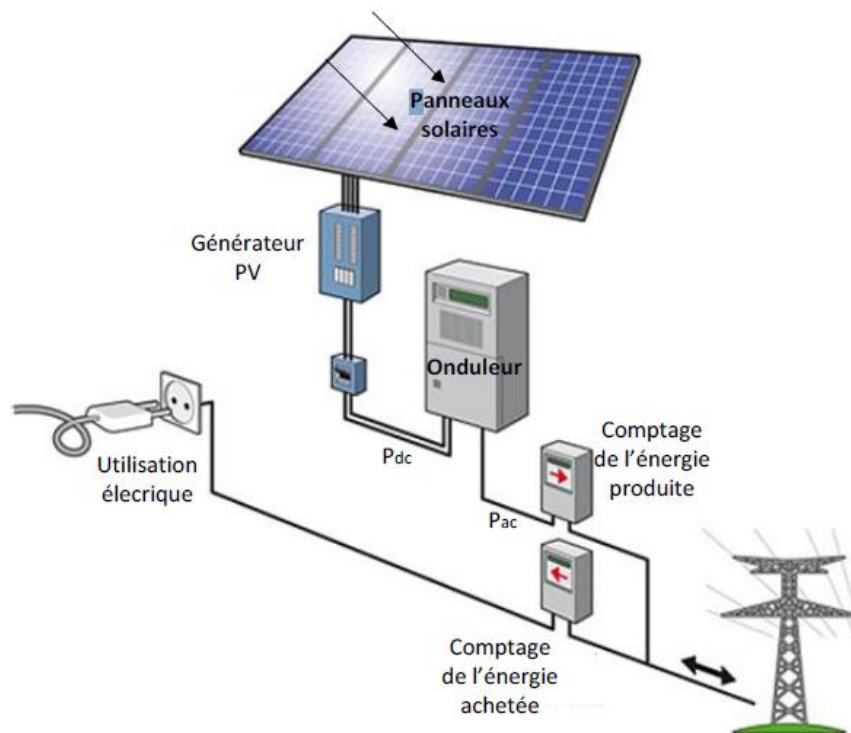


FIGURE 1.13 Principe du raccordement d'un module PV au réseau électrique.

#### I.4.1.3 L'énergie solaire thermique

Une grande partie du rayonnement solaire n'est pas convertie en électricité et accroît leur température entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires PVT hybrides sont des systèmes utilisant des modules photovoltaïques (PV) comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les modules PV à l'aide d'un fluide caloporteur, ces capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. Ils associent ainsi un capteur solaire photovoltaïque intégré au bâti et un capteur solaire thermique [24].

## **I.5 Applications des prédictions d'irradiation et d'énergie photovoltaïque**

Une utilisation efficace de la production d'énergie fluctuante des systèmes photovoltaïques nécessite des informations prévisionnelles fiables pour les stratégies de gestion et d'exploitation. Cette prédiction est nécessaire pour l'intégration au réseau des systèmes PV ainsi que pour les petits réseaux et les systèmes autonomes.

L'application la plus importante des prédictions d'énergie photovoltaïque est la prise en charge d'une intégration économique de grandes quantités d'énergie solaire dans le système d'alimentation en électricité. La contribution de la production d'énergie renouvelable en particulier des systèmes PV, des centrales thermiques solaires et des convertisseurs d'énergie éolienne à l'alimentation électrique est en augmentation constante. Les entreprises de services publics et les gestionnaires de réseau de transport doivent faire face à la fluctuation des apports de ces différentes sources d'énergie renouvelables.

L'un des principaux objectifs de la prévision de la puissance photovoltaïque consiste à optimiser la production et la consommation la valeur de l'énergie renouvelable produite sur le réseau. D'un point de vue technique, cet objectif est atteint en réduisant le besoin d'équilibrer l'énergie produite et l'énergie de réserve. Le besoin d'informations prévisionnelles sur la production prévue d'énergie solaire et éolienne augmente avec la quantité d'énergie installée. Aujourd'hui, les systèmes de prévision de l'énergie solaire sont largement utilisés au niveau opérationnel et ont montré leur fort impact économique et leurs avantages pour l'intégration de l'énergie solaire dans le réseau électrique [25,26]. En conséquence, la prévision des rendements solaires devient de plus en plus importante pour les services publics qui doivent intégrer des quantités croissantes d'énergie solaire, en particulier pour les pays où la législation encourage le déploiement de centrales solaires.

Il existe également une variété d'applications de prévisions d'irradiation non liées à la photovoltaïque. L'utilisation de prévisions d'irradiation directe pour optimiser les stratégies d'exploitation des centrales thermiques solaires est aussi important [27]. En outre, à très court terme (quelques minutes), les prévisions d'éclairement énergétique direct pourraient être utiles pour le contrôle des récepteurs dans les centrales solaires thermiques. D'autres exemples incluent l'utilisation des prévisions météorologiques et de l'énergie solaire pour le contrôle du chauffage, de la ventilation et du refroidissement des bâtiments, l'utilisation des prévisions d'irradiation pour améliorer la gestion des réseaux de chauffage urbain intégrant le chauffage solaire de l'eau et l'utilisation de prévisions en agriculture, par exemple pour la récolte[28].

## I.6 Conclusion

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. En exploitant le rayonnement solaire, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, et plus spécialement dans notre pays, ce type d'énergie offre une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles classiques avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts.

L'aspect intermittent de cette source d'énergie montre l'importance et la nécessité de connaître le potentiel solaire avant de procéder à l'installation de n'importe quel système solaire. Le meilleur moyen d'identifier ce potentiel sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures de différents paramètres de rayonnement au sol, ce qui n'est pas disponible dans plusieurs lieux et localités. Pour remédier au manque d'informations et mesures dans plusieurs situations, on fait recours aux modèles d'estimation et de prédiction de l'énergie solaire incidente sur le site en question.

Dans le prochain chapitre, nous présentons un état de l'art des méthodes de prédiction avec une petite définition sur des fondamentaux pour la prévision du GHI.