

Electricité photovoltaïque et astronomie de position.

Introduction

On ne trouve pas l'électricité à l'état naturel sur notre planète, elle doit être produite à partir d'une source d'énergie primaire comme les hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon), ou bien à partir de minerais radioactifs (uranium, plutonium) en utilisant le procédé de fission du noyau atomique de ces métaux.

Une autre possibilité, séduisante à priori, est d'utiliser les énergies dites "renouvelables" c'est-à-dire inépuisables, comme la gravité (hydroélectricité), le vent ou l'énergie solaire.

C'est cette dernière forme d'énergie que nous allons étudier d'un point de vue astronomique. Quelques notions d'astronomie de position, très simples par ailleurs, sont en effet nécessaires pour recueillir le maximum d'énergie solaire d'une surface donnée.

Le document est composé des chapitres suivants :

- Comment se repérer dans l'espace
- Le mécanisme des saisons
- L'énergie solaire
- Application aux cellules photovoltaïques
- Les limites de l'électricité photovoltaïque

Les encadrés grisés complètent le texte en apportant des explications et des définitions complémentaires

Comment se repérer dans l'espace - repère local- hauteur et azimut

On peut définir une sphère locale, c'est le repère le plus simple, telle que l'observateur soit au centre de cette sphère. La direction verticale est celle donnée par un fil à plomb dans sa position d'équilibre. Dans cette direction, au-dessus de la tête de l'observateur, se trouve le Zénith. Le point diamétralement opposé au zénith se nomme le Nadir.

Le plan perpendiculaire à la verticale se nomme plan horizontal. Dans notre sphère ce plan est réduit à un cercle dont l'observateur est le centre. Les diamètres Nord Sud et Est Ouest de ce cercle sont perpendiculaires.

Le méridien du lieu est le grand cercle qui passe par le Nord géographique, le pôle céleste Nord, le Zénith et le pôle Sud géographique.

La hauteur

La hauteur est un angle vertical. La hauteur d'un objet céleste est la distance angulaire entre le plan horizontal et cet objet. Si l'astre est à l'horizon sa hauteur est de 0° . Elle vaut 90° si l'astre est au Zénith.

Dans notre sphère locale, il existe une hauteur remarquable qui est celle du Pôle Nord céleste qui est égale à la latitude du lieu d'observation.

L'azimut

L'azimut est un angle horizontal. L'azimut d'un objet céleste est la distance angulaire entre une direction de référence et cet objet. La direction de référence est le Nord géographique qui vaut 0° . C'est la convention retenue par les géographes, les marins et les aviateurs. La progression se fait dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre) c'est-à-dire que l'Est est à 90° , le Sud à 180° , l'Ouest à 270° (figure1)

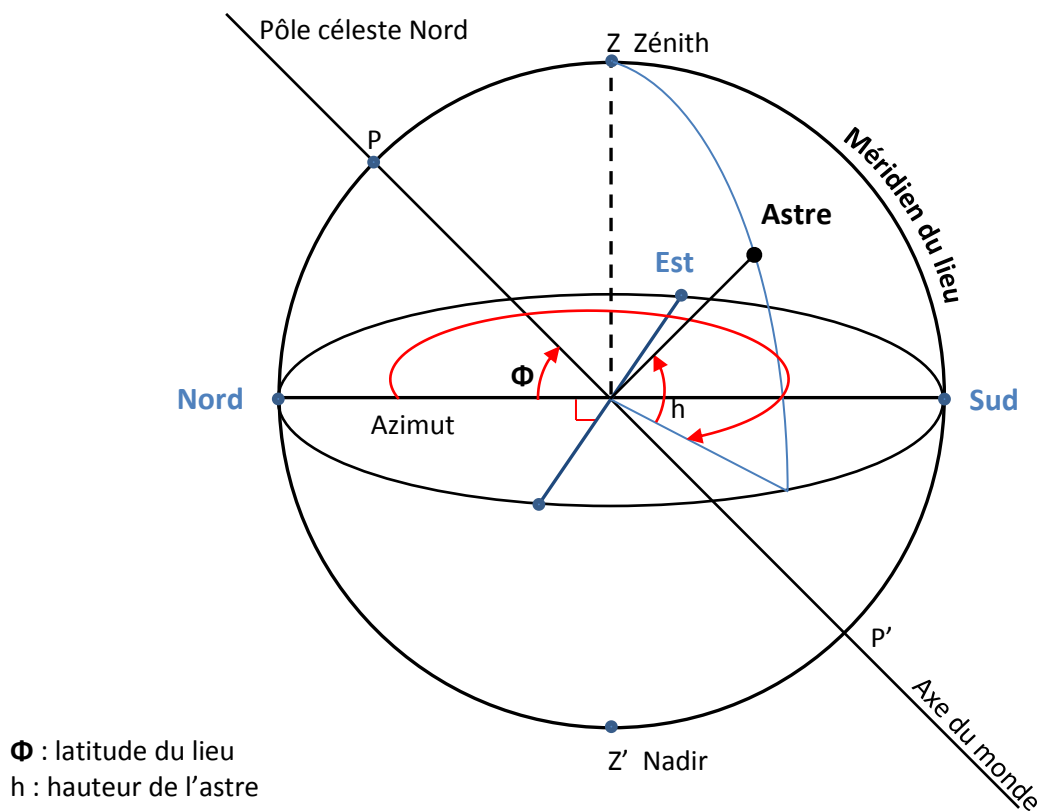


Figure 1

Le mécanisme des saisons

Généralités

En France (disons en général à une latitude de 45° Nord), la durée de la journée varie en fonction de la date. Les journées sont courtes en hiver et plus longues en été. Ce phénomène est dû à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre de $23,4^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite (figure2).

L'écliptique est le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Les centres de la Terre et du Soleil sont donc situés dans ce plan.

Une orbite est la courbe décrite par une planète autour du Soleil. En première approximation on peut dire que l'orbite de la Terre est un cercle.

Si l'axe de rotation de la Terre était perpendiculaire à l'écliptique, il n'y aurait pas de saisons (figure3), les durées des journées et des nuits seraient rigoureusement égales toute l'année.

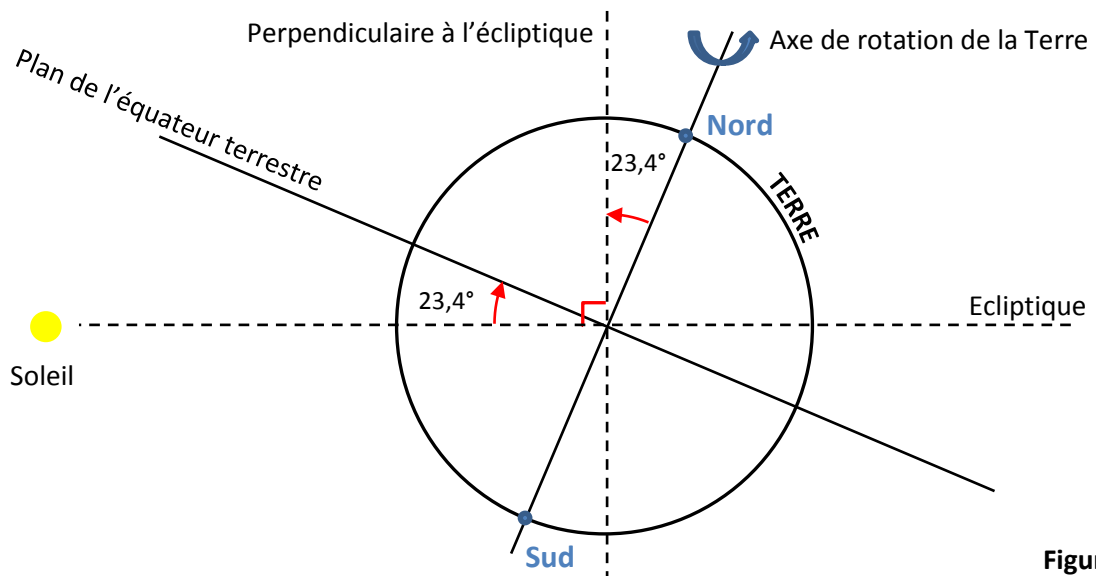


Figure 2

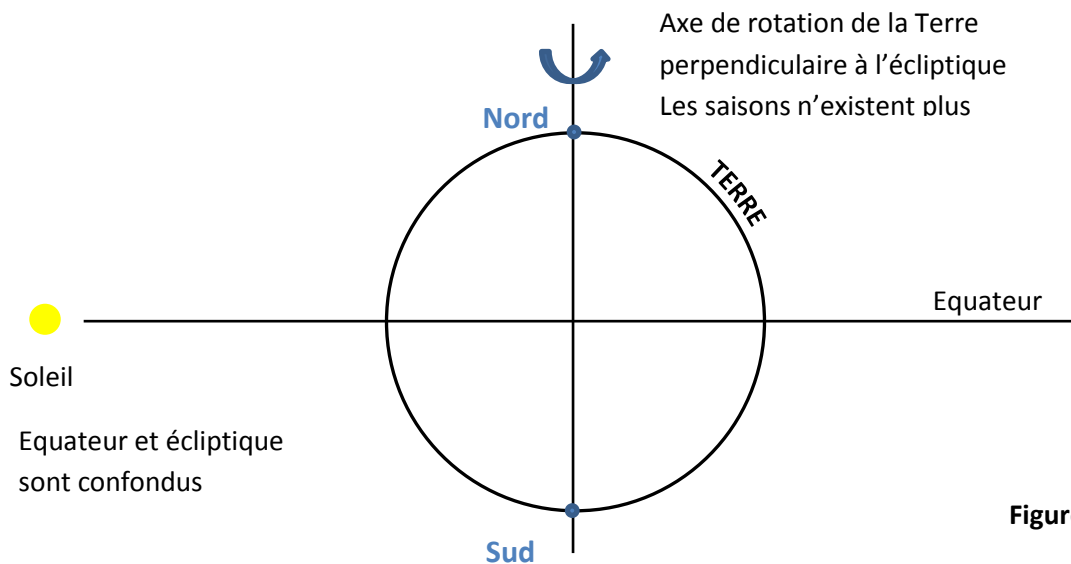


Figure 3

Les variations de la déclinaison du Soleil

La déclinaison du Soleil est mesurée par rapport au plan de l'équateur. Nous allons utiliser un modèle très simple qui permet cependant de décrire le mécanisme des saisons de manière suffisamment précise pour nos besoins.

Aux équinoxes de printemps et d'automne le Soleil est dans le plan de l'équateur (figure 4) : il a une déclinaison nulle. C'est d'ailleurs la cause des grandes marées à ces époques.

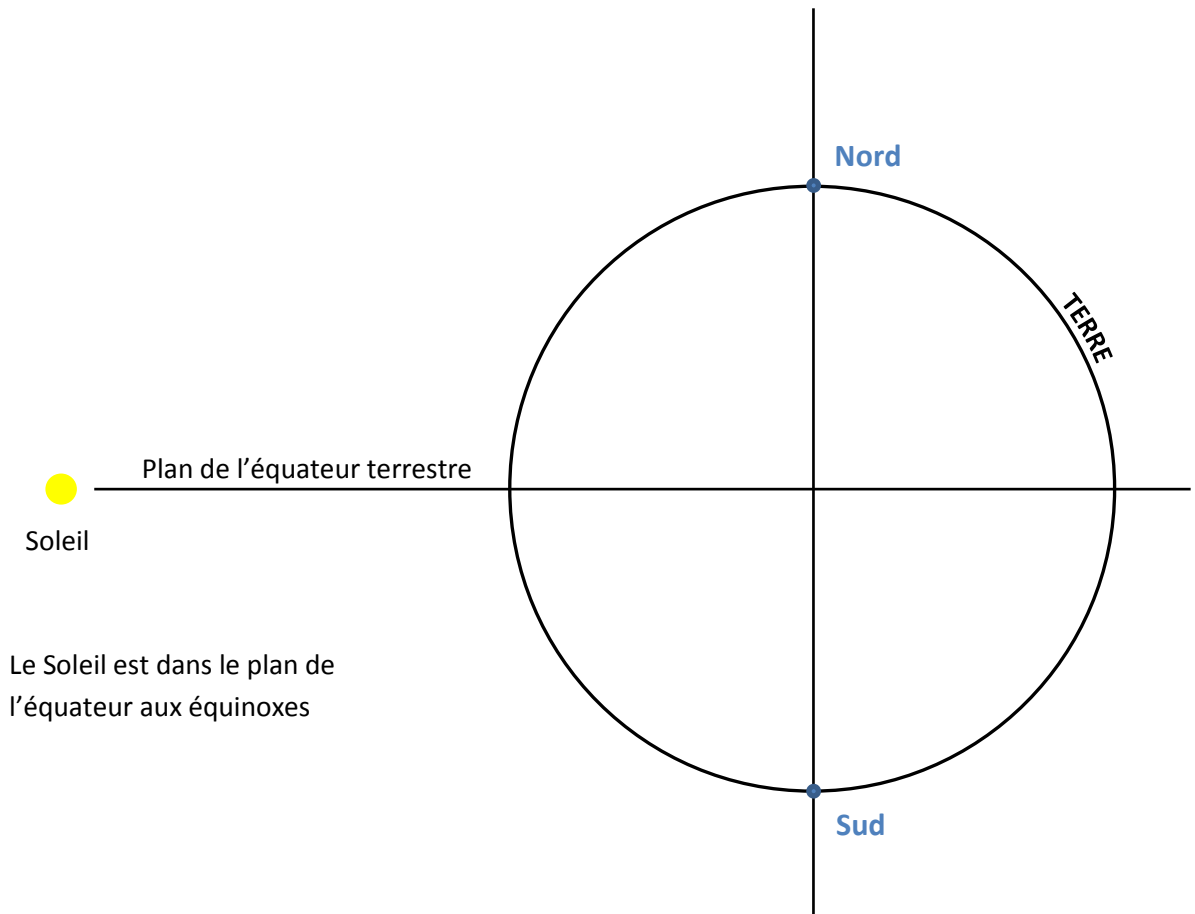


Figure 4

Au solstice d'été, il est situé "au-dessus" de l'équateur, c'est-à-dire au nord du plan de l'équateur :

Sa déclinaison δ est positive et est égale à ϵ , l'obliquité de l'axe de la Terre soit $23,4^\circ$ (figure 5).

La déclinaison et l'obliquité de l'axe de la Terre étant des grandeurs fondamentales, les astronomes leurs ont attribuées deux lettres grecques minuscules δ (delta) et ϵ (epsilon)

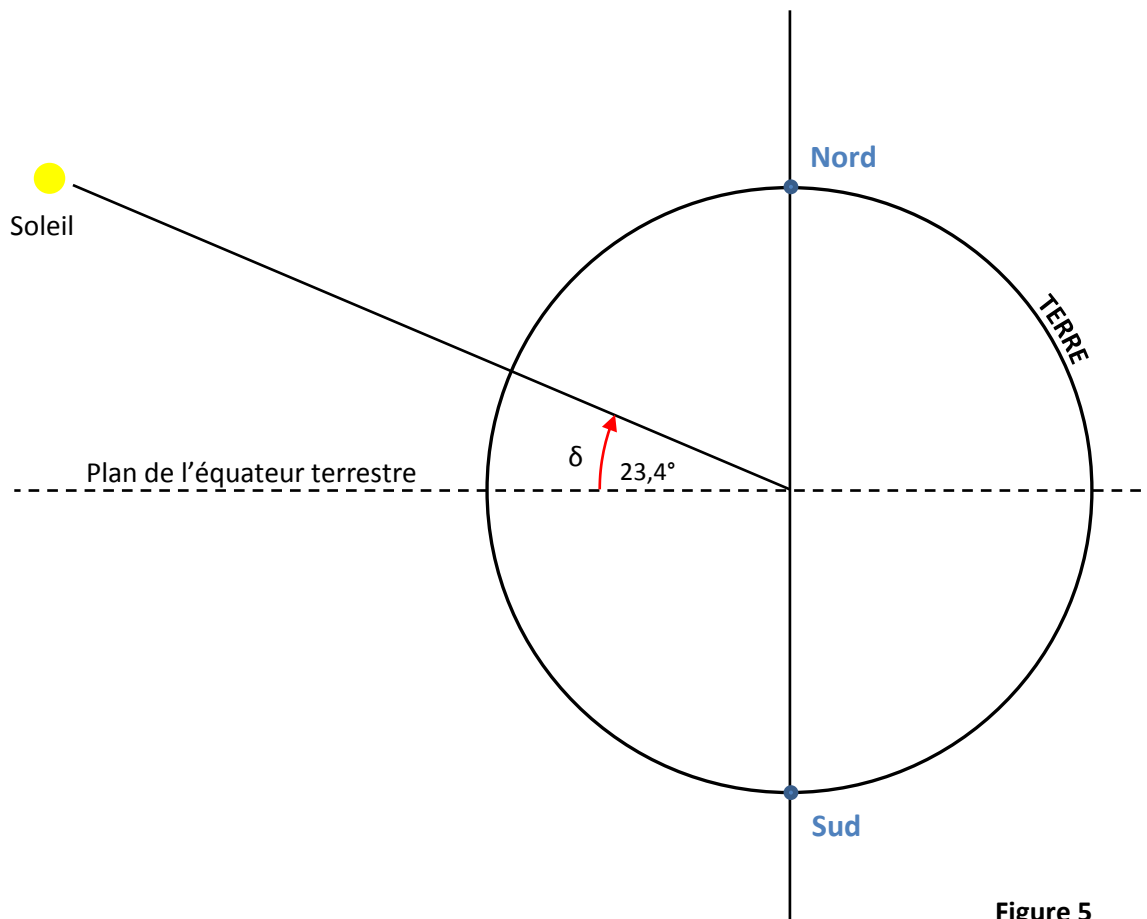


Figure 5

Au solstice d'hiver, le Soleil est "en-dessous" ou au sud du plan de l'équateur : sa déclinaison est négative et vaut $-23,4^\circ$ (figure 6)

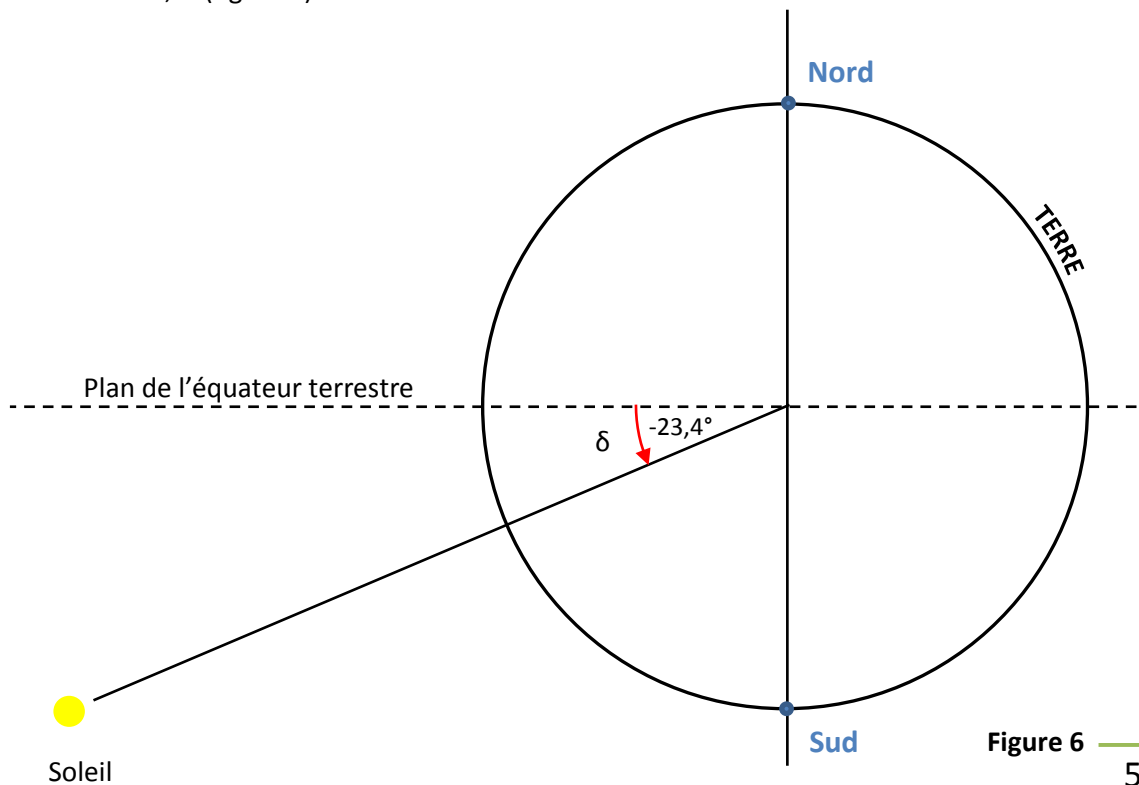


Figure 6

Hauteur du Soleil à midi solaire vrai.

Le midi solaire vrai correspond au milieu de la journée entre le lever et le coucher du Soleil. A cet instant précis, le Soleil est dans le plan du Méridien (Plein Sud en France). C'est aussi à cet instant de la journée que sa hauteur est maximale et que l'énergie reçue sur un plan horizontal est maximale également. Le midi solaire vrai correspond à 14h (heure légale) en été et à 13h en hiver. (A plus ou moins $\frac{1}{4}$ h près car l'orbite de la Terre n'est pas rigoureusement circulaire).

Nous allons voir maintenant comment calculer la hauteur du Soleil à midi solaire vrai à n'importe quel moment de l'année connaissant la latitude du lieu considéré et la déclinaison du Soleil. Le calcul est très simple (figure 7)

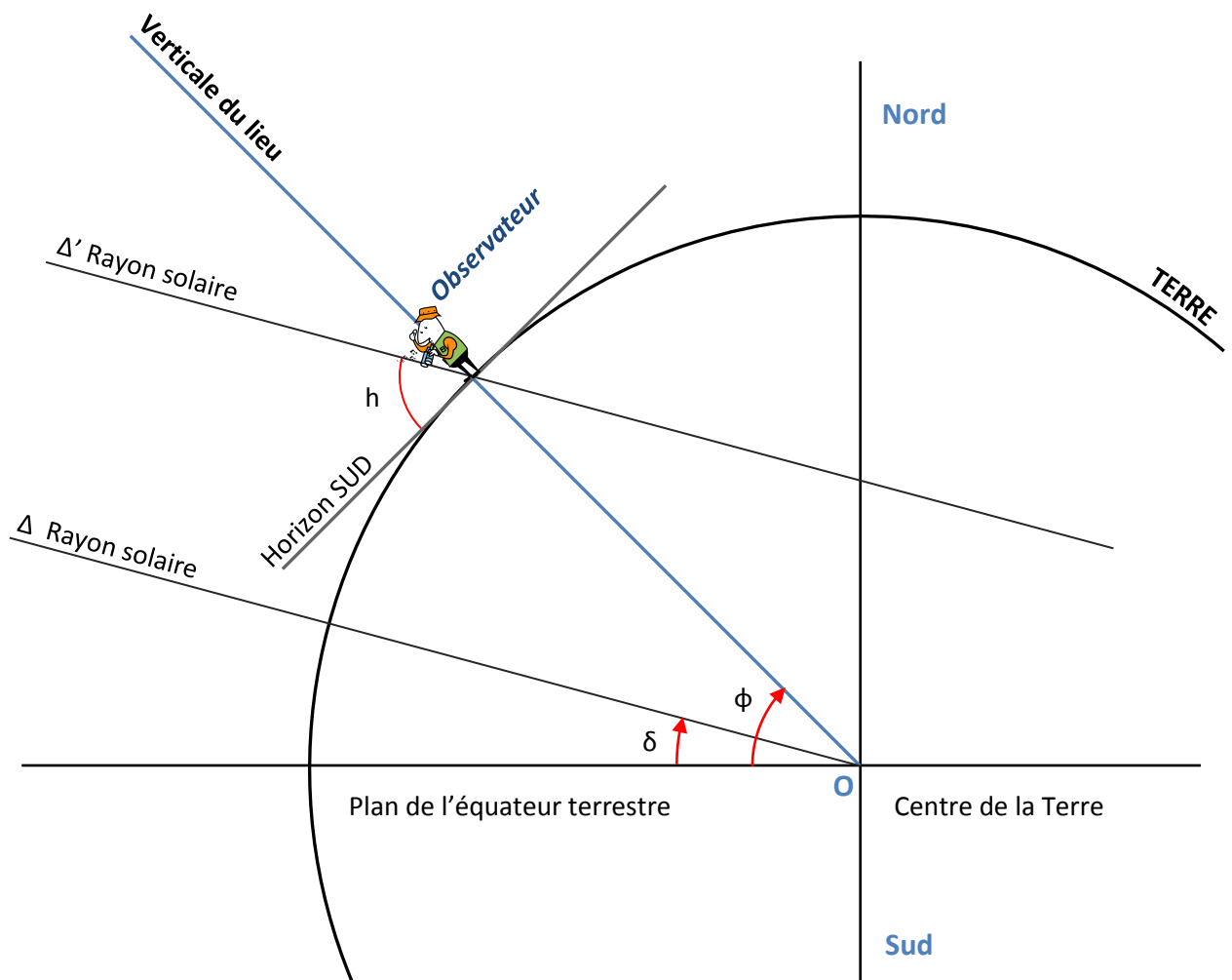


Figure 7

Les données du problème.

- Δ et Δ' sont deux droites parallèles représentant les rayons du Soleil. Ce dernier étant très éloigné de la Terre, on considère que les rayons lumineux atteignant notre planète sont parallèles entre eux.
- δ est la déclinaison du Soleil
- ϕ est la latitude du lieu d'observation.

Démonstration

$$\Phi - \delta = 1d - h \quad (\text{angles correspondants})$$

Donc :

$$h = 1d - (\Phi - \delta) \quad (1)$$

En géométrie plane, l'unité d'angle est le droit qui vaut $\frac{1}{4}$ de cercle soit 90° et que l'on note $1d$. Un angle de $2d$ vaut donc 180° . Par ailleurs, nous avons les angles remarquables suivants :
Le sextant qui vaut $\frac{1}{6}$ de cercle soit 60°
L'octant qui vaut $\frac{1}{8}$ de cercle soit 45°

Exemples d'utilisation de la relation (1)

Aux équinoxes de printemps et d'automne, nous avons vu (figure 4) que le Soleil est dans le plan de l'équateur terrestre, et que sa déclinaison est nulle. Calculons la hauteur maximale atteinte par le Soleil à ces époques de l'année pour une latitude de 45° .

$$h = 1d - (45 - 0) = 45^\circ$$

Aux équinoxes, le Soleil est à la verticale de l'équateur terrestre

Au solstice d'été, le Soleil est "au-dessus" de l'équateur, sa déclinaison est positive et maximale soit $23,4^\circ$ (figure 5). La hauteur maximale atteinte par le Soleil ce jour-là (21 juin) pour une latitude de 45° est :

$$h = 1d - (45 - 23,4) = 68,4^\circ$$

C'est aussi la hauteur maximale atteinte par le Soleil au cours de l'année.

Au solstice d'été le Soleil est à la verticale du Tropique du Cancer dont la latitude est de $23,4^\circ$

Au solstice d'hiver, le Soleil est "au-dessous" de l'équateur, sa déclinaison est négative et minimale soit $-23,4^\circ$ (figure 6). La hauteur maximale atteinte par le Soleil ce jour-là (22 décembre) pour une latitude de 45° est :

$$h = 1d - [45 - (-23,4)] = 21,6^\circ$$

C'est aussi la hauteur minimale atteinte par le Soleil au cours de l'année à midi solaire vrai.

Au solstice d'hiver le Soleil est à la verticale du Tropique du Capricorne dont la latitude est de $-23,4^\circ$

Les variations de la durée de la journée.

Aux équinoxes, le Soleil se lève exactement à l'Est et se couche à l'Ouest. La durée de la journée est égale à la durée de la nuit soit 12 heures (figure 8)

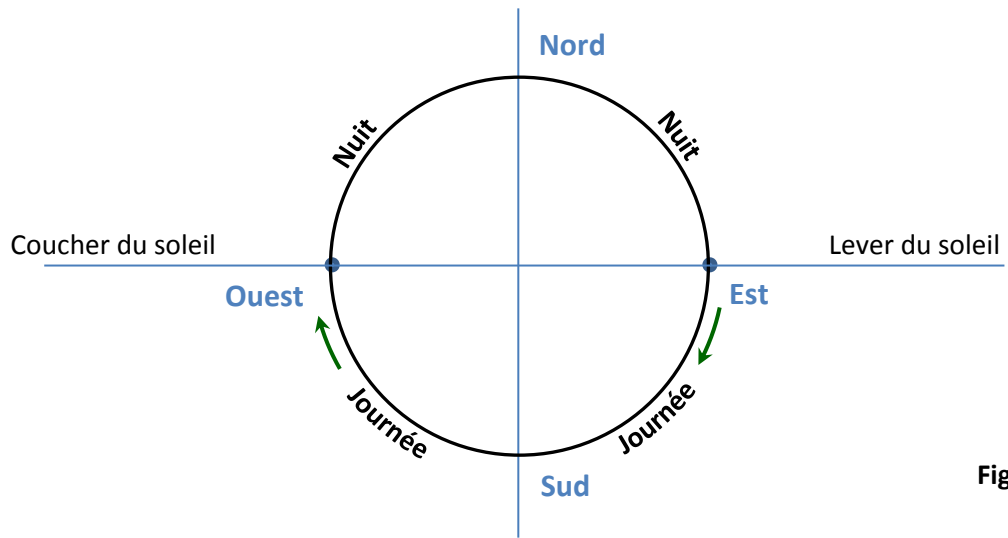


Figure 8

Au solstice d'été, le Soleil se lève au Nord-Est et se couche Nord-Ouest. La durée de la journée est de 16 heures et celle de la nuit est de 8h (figure 9). C'est la journée la plus longue de l'année et la nuit la plus courte.

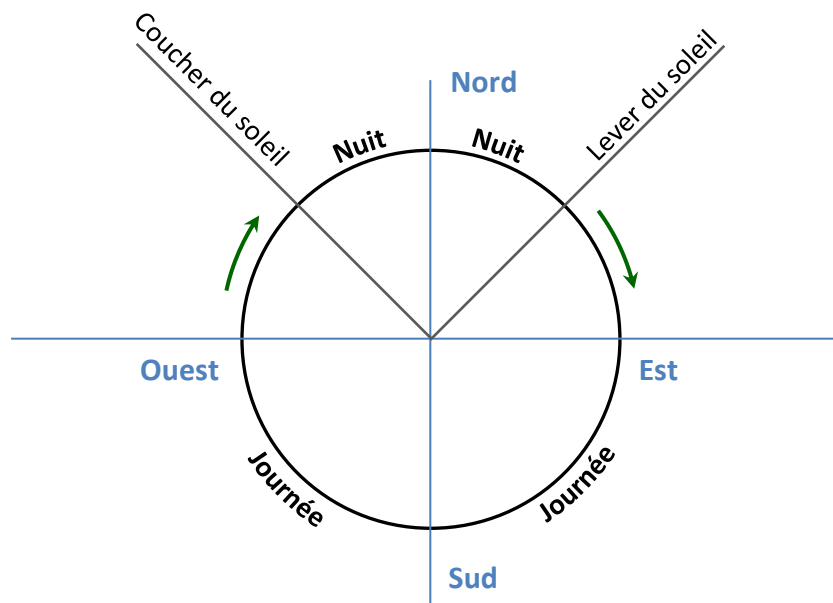


Figure 9

Au solstice d'hiver, le Soleil se lève au Sud-Est et se couche Sud-Ouest. La durée de la journée est de 8 heures et celle de la nuit de 16 heures. C'est la journée la plus courte de l'année et la nuit la plus longue (figure 10)

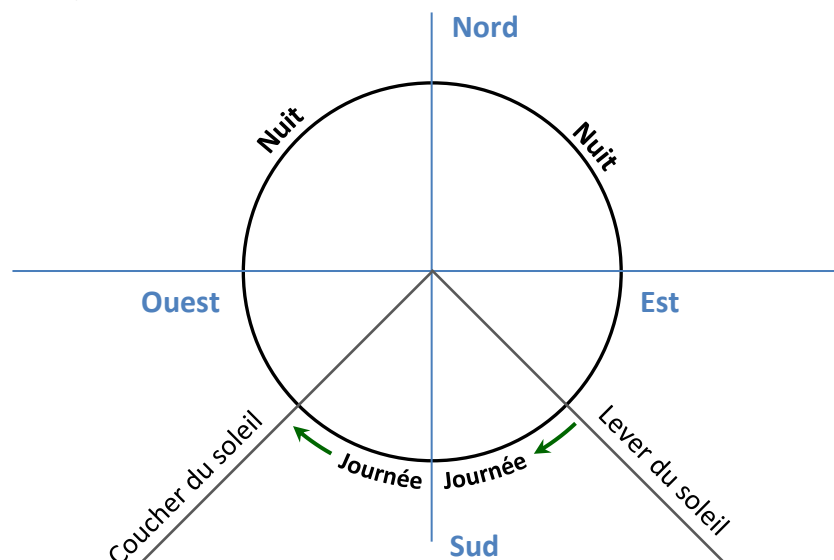


Figure 10 8

L'énergie solaire

La constante solaire – définition.

La constante solaire est *la puissance* reçue du Soleil au niveau de la Terre par une surface de 1m^2 placée perpendiculairement au rayonnement hors atmosphère. Elle vaut environ 1370W/m^2 .

C'est, par exemple, la quantité d'énergie susceptible d'être captée par les panneaux solaires des satellites qui naviguent autour de la Terre

Au niveau du sol, les choses sont plus compliquées : une partie de la lumière est réfléchiée dans l'espace par les couches supérieures de l'atmosphère, une seconde partie est absorbée par l'atmosphère et le reste parvient jusqu'au sol (figure 11)

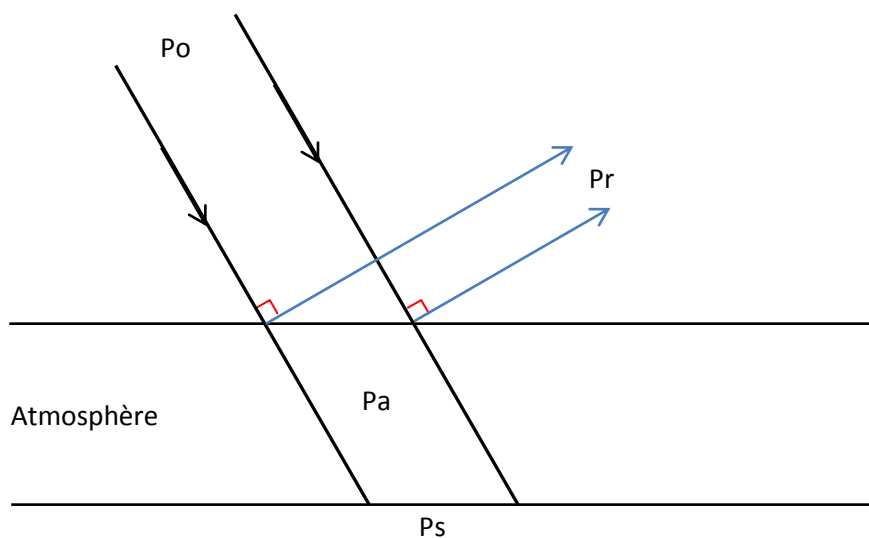


Figure 11

Avec

- P_o = puissance hors atmosphère
- P_r = puissance réfléchiée
- P_a = puissance absorbée
- P_s = puissance reçue au sol $P_s = P_o - P_r - P_a$

Au solstice d'hiver, on estime que la puissance reçue au sol est 62% de P_o . Au solstice d'été, on atteint 76% de P_o (source Météo France).

Il faut néanmoins préciser que l'absorption d'énergie est très variable et dépend énormément de la qualité de l'atmosphère, en particulier de la quantité d'eau qu'elle contient.

En hiver, pour une surface de un mètre carré perpendiculaire au flux lumineux solaire, nous avons

$$P_s = 0,62 \cdot 1370 = 850\text{W}.$$

Dans les mêmes conditions, en été, nous avons :

$$P_s = 0,76 \cdot 1370 = 1040\text{W}$$

Eclairement d'une surface.

Considérons un faisceau de lumière de $1m^2$ de section en provenance du Soleil .Si celui-ci est vertical, il chauffera une surface horizontale de $1m^2$.Le rendement, pour une puissance donnée, est alors de 100%.S'il fait un angle h avec l'horizontale (figure 12), il devra chauffer une surface S plus importante dont la valeur est donnée par la relation (2). Le rendement sera d'autant inférieur à 100% que la surface éclairée sera plus grande.

$$S = \frac{1}{\sin h} \quad (2)$$

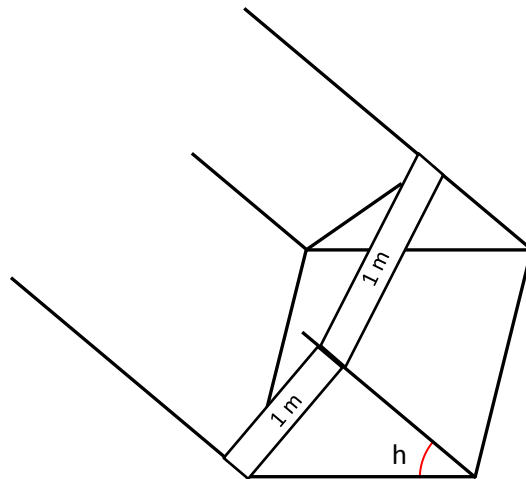


Figure 12

Exemples d'utilisation de la relation(2)

Au solstice d'été, nous avons vu que la hauteur du Soleil à midi solaire vrai est de $68,4^\circ$ pour une latitude de 45° .La surface à réchauffer est donc de :

$$S = \frac{1}{\sin 68,4^\circ} = 1,07m^2 \quad \text{soit un rendement de } 93,5\%$$

Au solstice d'hiver la hauteur du Soleil au midi solaire vrai est de $21,6^\circ$.La surface à réchauffer est donc de :

$$S = \frac{1}{\sin 21,6^\circ} = 2,71m^2 \quad \text{soit un rendement de } 37\%$$

On remarque qu'un même faisceau de lumière chauffe une plus petite surface en été qu'en hiver.

Nous connaissons maintenant les deux causes astronomiques qui expliquent que l'énergie reçue par une surface donnée pendant 24h est plus grande en été qu'en hiver :

- La hauteur du Soleil est plus grande en été.
- La journée est plus longue en été.

Cela se traduit concrètement par une élévation de la température du sol et de l'atmosphère.

Si on appelle E l'éclairement au sol, c'est-à-dire la puissance reçue par mètre carré horizontal et P_s la puissance du faisceau de $1m^2$ de section on a la relation suivante :

$$E = \frac{P_s}{S} = P_s * \sin h \quad (3)$$

L'éclairement de la surface est proportionnel au sinus de h

Exemples d'utilisation de la relation (3)

Considérons la puissance P_s du faisceau de lumière comme étant égale à 1000 W/m^2 , Au solstice d'été, nous avons un éclairement au sol de :

$$E = 1000 * \sin 68,4^\circ = 930 \text{ W/m}^2$$

Au solstice d'hiver, nous avons :

$$E = 1000 * \sin 21,6^\circ = 368 \text{ W/m}^2$$

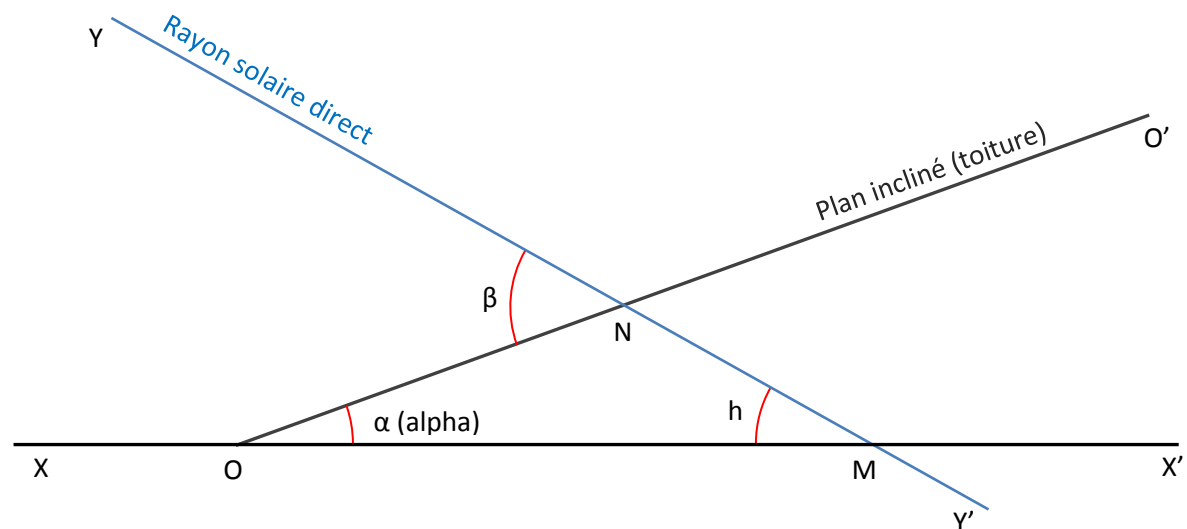
Application aux cellules photovoltaïques

Le plan incliné

Dans le cas d'une installation photovoltaïque chez un particulier, les cellules sont le plus souvent installées sur la toiture de la maison d'habitation. On peut considérer la toiture comme étant un plan incliné formant un angle avec l'horizontale (figure13). Nous nommerons par la lettre grecque minuscule α (alpha) cet angle.

L'*angle d'incidence*, est l'angle formé par les rayons du Soleil et le plan incliné Nous désignerons par la lettre minuscule grecque β (béta) cet angle.

Un rayon est dit *direct* ou *initial* lorsque émanant d'une source (lumineuse ou non), il atteint directement sa cible, contrairement au rayon *réfléchi* qui interagit avec un objet avant d'atteindre son objectif.



Observons la figure 13. Il s'agit d'exprimer β en fonction de la hauteur h du Soleil et de l'angle α .
Quels sont les grandeurs connues ?

Nous connaissons α qui est l'angle formé par le plan incliné (toiture) et la droite horizontale XX'

Nous connaissons également l'angle h formé par l'horizontale XX' et la droite YY'

Démonstration

Nous supposons tout d'abord que l'angle β est différent de 90° .

Les trois droites OO' , XX' et YY' forment le triangle OMN . Or nous savons que :

La somme des angles d'un triangle vaut 2 droits (180°)

Il est possible de calculer l'angle ONM :

$$ONM = 2d - \alpha - h$$

L'angle MNY est plat et vaut donc $2d$, il vient :

$$\begin{aligned} MNY &= ONM + \beta = 2d && \text{soit,} \\ \beta &= 2d - ONM && \text{soit en remplaçant } ONM \text{ par sa valeur :} \\ \beta &= 2d - (2d - \alpha - h) && \text{soit,} \end{aligned}$$

$\beta = \alpha + h$ (3)

L'angle d'incidence est la somme de la hauteur du Soleil et de l'inclinaison de la toiture par rapport au sol, c'est ce qu'il faut retenir.

Supposons maintenant que l'angle β soit droit (90°). Nous savons que c'est dans ces conditions que le rendement solaire est maximal.

Nous avons :

$$\beta = \alpha + h = 1d$$

Remplaçons h par la relation (1) vu plus haut :

$$\begin{aligned} \alpha + 1d - (\phi - \delta) &= 1d \\ \alpha - (\phi - \delta) &= 0 && \text{d'où} \end{aligned}$$

$\delta = \phi - \alpha$ (4)

Cette relation est remarquable. Lorsque le rayon direct est perpendiculaire au plan incliné, la déclinaison du Soleil est égale à la différence entre la latitude du lieu et l'angle entre le plan incliné et l'horizontale.

Exemples d'application de la relation (4)

Sur la Presqu'île Guérandaise, bon nombre de maisons individuelles ont une toiture faisant un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Appliquons la relation (4) en prenant comme latitude 45° . Nous avons :

$$\delta = \frac{1d}{2} - \frac{1d}{2} = 0$$

Comment interpréter ce résultat ?

Nous avons vu plus haut (figure 4) que lorsque la déclinaison est nulle, le Soleil est dans le plan de l'équateur terrestre et que cette situation se produit aux équinoxes.

Du 1^{er} janvier au 20 mars (équinoxe de printemps pour l'année 2011), la déclinaison du Soleil est négative et, pendant cette période les rayons incidents du Soleil ne seront jamais perpendiculaires à la toiture.

Le 20 mars lorsque le Soleil atteindra sa hauteur maximale, les rayons incidents seront perpendiculaires à la toiture.

Entre le 21 mars et le 22 septembre la déclinaison du Soleil est positive. Chaque jour pendant cette période les rayons incidents, lors de la phase ascendante du Soleil, vont être perpendiculaires à la toiture pendant un bref instant entre 12 et 14h, puis l'angle d'incidence sera supérieure à 90° pour atteindre son maximum vers 14h. Le Soleil va ensuite descendre sur l'horizon et de nouveau les rayons directs seront perpendiculaires à la toiture un bref instant entre 14 et 16h., l'angle d'incidence va ensuite diminuer régulièrement jusqu'au coucher du Soleil.

Le 23 septembre (équinoxe d'automne pour l'année 2011) lorsque le Soleil atteindra sa hauteur maximale, les rayons incidents seront perpendiculaires à la toiture.

Du 23 septembre au 31 décembre, la déclinaison du Soleil est négative et, pendant cette période les rayons incidents du Soleil ne seront de nouveau jamais perpendiculaires à la toiture.

Dans le Sud du Maine et Loire et en Vendée, les toitures des maisons individuelles récentes ont un angle de 22° par rapport à l'horizontale. Appliquons de nouveau la relation (4) :

$$\delta = 45 - 22 = 23^\circ$$

Nous avons vu (figure 5) que cette valeur correspond pratiquement au solstice d'été (21 juin en 2011).

Du 1^{er} janvier au 20 juin, les rayons incidents formeront toujours un angle inférieur à 90° avec la toiture.

Le 21 juin, lorsque le Soleil atteindra sa hauteur maximale (qui est aussi la hauteur maximale de l'année), les rayons solaires seront perpendiculaires à la toiture.

Du 22 juin au 31 décembre, l'angle d'incidence sera de nouveau inférieur à 90° .

On remarque qu'il n'y a qu'une journée dans l'année où le Soleil est perpendiculaire à la toiture et cette journée est celle du jour de l'été. L'angle d'incidence va ensuite diminuer chaque jour, cela permet de maintenir des températures relativement basses dans les maisons en été.

Influence de l'angle α sur le rendement énergétique

Les deux exemples ci-dessus montrent que l'angle α a une influence capitale sur l'angle d'incidence des rayons solaires et c'est ce que montre d'ailleurs la relation (3). Pour mettre en évidence cette influence, nous avons comparé les rendements mensuels de sept valeurs différentes de l'angle α .

Nous avons pris 52 points de mesure, un pour chaque semaine de l'année, chaque point étant espacé de sept jours. Pour chacun de ces points nous avons pris en compte la hauteur *maximale* du Soleil pour la journée retenue et considéré que cette hauteur maximale était constante entre deux points de mesure (ce qui est faux naturellement en réalité) puis nous faisons une moyenne sur un mois. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=40^\circ$	$\alpha=50^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=70^\circ$
janvier	56%	69%	81%	90%	96%	99%	100%
février	66%	78%	88%	94%	99%	100%	98%
mars	85%	93%	98%	100%	99%	95%	88%
avril	90%	96%	99%	99%	96%	91%	82%
mai	96%	99%	100%	97%	92%	84%	73%
juin	98%	99%	99%	95%	88%	79%	67%
juillet	96%	99%	100%	97%	91%	83%	72%
août	92%	97%	100%	99%	95%	89%	80%
septembre	82%	91%	96%	100%	99%	95%	90%
octobre	69%	81%	90%	96%	99%	99%	97%
novembre	60%	73%	86%	92%	97%	99%	99%
décembre	52%	67%	79%	88%	95%	99%	100%
Rendement annuel	78%	87%	93%	96%	95%	93%	87%

Tableau 1

Ces résultats souffrent d'un manque de précision (il faudrait beaucoup plus de points de mesure), cependant une tendance s'esquisse : on remarque que pour un angle entre la toiture et l'horizontale compris entre 40 et 50 degré le rendement est maximal.

En résumé, pour un rendement optimum il faut que :

$$40^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$$

Dans ce tableau, il n'est considéré que le rendement solaire selon l'angle d'incidence β . Pour obtenir le rendement des cellules photovoltaïques il convient de diviser par cinq les valeurs ci-dessus. En effet le rendement actuel (juillet 2011) des meilleures cellules solaires ne dépasse pas 20% : Pour 100W de puissance solaire, on obtient 20W de puissance électrique dans le meilleur des cas.

Influence de l'orientation azimutale du plan incliné.

Nous avons vu sur la figure 1 que nous sommes au centre d'une sphère et que notre horizon est un cercle. Rien ne nous empêche en théorie d'orienter comme nous le désirons notre plan incliné qui supporte les cellules photovoltaïques. Nous allons voir que l'orientation azimutale a une importance capitale sur le rendement de l'ensemble photovoltaïque.

Pour illustrer notre propos, nous allons considérer la date du 21 juin 2011, jour du solstice d'été et jour le plus long de l'année.

Dans le tableau ci-dessous, pour cette date du 21 juin, nous avons relevé toute les heures la position du Soleil depuis son Lever jusqu'à son Coucher pour une latitude de 45° et une longitude de $2^\circ 20' 22''$ Ouest (longitude de la Presqu'île Guérandaise)

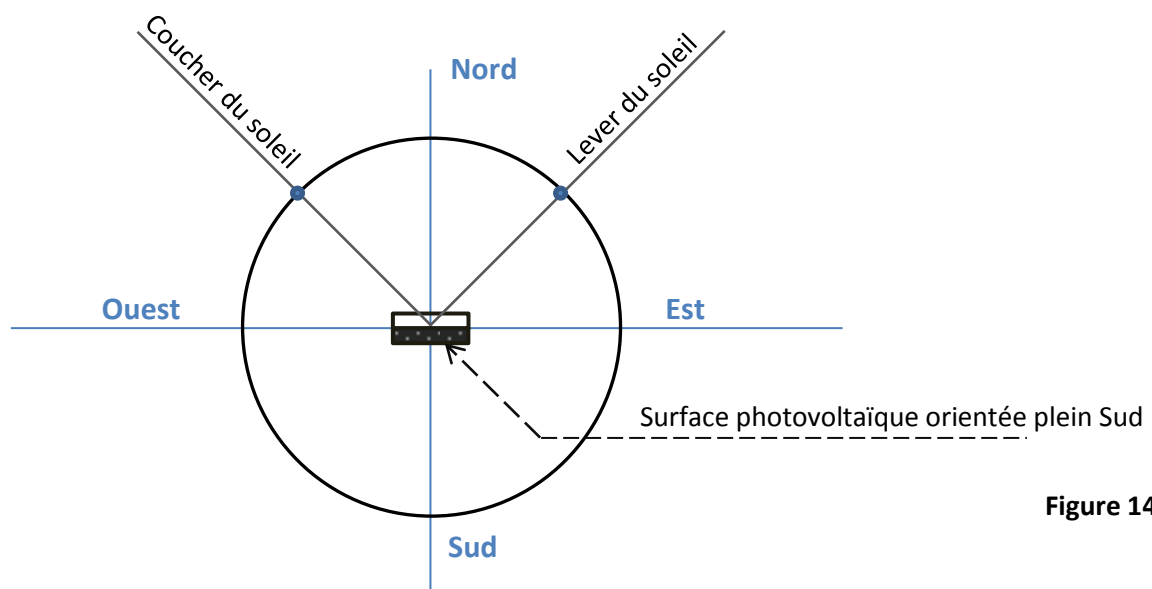
Horaire (heure légale)	Hauteur	Azimut
6h22	Lever du Soleil	55°
7h00	5°	61°
8h00	14°	71°
9h00	25°	80°
10h00	35°	91°
11h00	46°	102°
12h00	56°	118°
13h00	64°	140°
14h00	68°	173°
14h10	68°,4 (hauteur maximale atteinte par le Soleil au cours de l'année)	180°
15h00	66°	208°
16h00	59°	235°
17h00	49°	252°
18h00	39°	265°
19h00	28°	275°
20h00	18°	285°
21h00	8°	295°
21h57	Coucher du Soleil	305°

Tableau2

Considérons une maison individuelle orientée Plein Sud (figure14). L'un des versants de la toiture (celui qui supporte les cellules photovoltaïques) est sensible aux rayons directs du Soleil lorsque ce dernier est situé dans l'espace délimité par le demi-plan horizontal passant par les points Est, Sud et Ouest et par le plan vertical passant par le point Est, le Zénith et le point Ouest. Ce plan est perpendiculaire au méridien du lieu.

On remarque dans le tableau 2 que nous sommes dans cette situation entre 10h (azimut 91°) et 19h (azimut 275°), c'est pendant ce laps de temps que la production d'énergie électrique est optimale.

Sur la figure 14, les directions Nord Est et Nord-Ouest indiquent les Lever et Coucher du Soleil. Lorsque le Soleil n'est plus dans l'espace délimité par les deux plans définis ci-dessus, les rayons solaires ne peuvent plus atteindre directement le versant de la toiture orientée Plein Sud. Seuls des rayons réfléchis, de directions et d'énergie indéfinie les atteignent, la quantité d'électricité produite est faible et n'est plus quantifiable.



Nous allons calculer l'énergie produite par un faisceau lumineux de $1m^2$ de section d'une puissance de 1000W sur une surface unitaire de $1m^2$ orienté Plein Sud et incliné à 45° par rapport à l'horizontale ($\alpha=45^\circ$). Pour ce faire, nous allons noter toutes les heures la hauteur du Soleil lors de sa course entre les azimuts 90 et 270° . Nous considérons la hauteur comme étant constante pendant l'intervalle d'une heure. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3

Le Joule(J) est une unité dérivé du système international(SI) utilisée pour quantifier l'énergie, le travail et la chaleur. Elle tend à remplacer l'ancienne Calorie (1 Calorie vaut 4,18 J et 1KJ (Kilojoules) vaut 239 Calories).
Le Joule est l'énergie fournit par une puissance de 1W pendant 1seconde. Le Joule étant une unité très petite, on préfère utiliser en électricité le Watt-heure qui correspond à l'énergie fournit par une puissance de 1 watt pendant 1 heure, soit 3600 Joules. Le Kilowatt-heure correspond à une énergie de 3,6MJ (mégajoules)

Horaires (heure légale)	Hauteur moyenne du Soleil	Energie solaire accumulée pendant une heure
10h00→11h00	40°	0,996 KWh
11h00→12h00	51°	0,994 KWh
12h00→13h00	60°	0,966 KWh
13h00→14h00	66°	0,933 KWh
14h00→15h00	67°	0,927 KWh
15h00→16h00	63°	0,951 KWh
16h00→17h00	54°	0,987 KWh
17h00→18h00	44°	0,999 KWh
18h00→19h00	34°	0,981 KWh

Tableau 3

Le total de l'énergie solaire accumulée entre 10h00 et 19h par la surface unitaire de $1m^2$ est de 8,73KWh. Rappelons-nous qu'il est nécessaire de diviser par cinq cette valeur pour obtenir l'énergie électrique fournie par la même surface unitaire photovoltaïque, soit ici 1,75KWh. Supposons maintenant que notre maison individuelle soit orientée Plein Ouest (figure 15). Le versant utile de la toiture est sensible aux rayons directs lorsque le Soleil est situé dans l'espace délimité par le demi-plan horizontal passant par les points Sud, Ouest et Nord et par le plan vertical passant par le point Sud, le Zénith et le point Nord. Ce plan est parallèle au méridien du lieu.

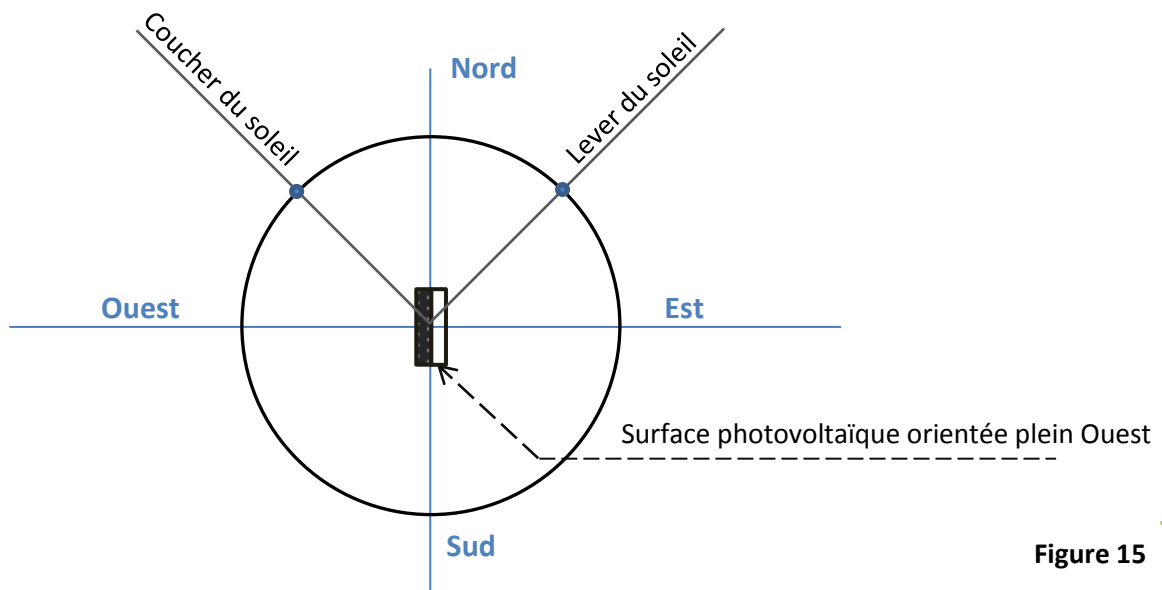


Figure 15 16

Nous allons procéder de la même manière que précédemment et noter la hauteur du Soleil lors de sa course entre les azimuts 180 et 305°. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4

Horaires (heure légale)	Hauteur moyenne du Soleil	Energie solaire accumulée pendant une heure
14h00→15h00	67°	0,927KWh
15h00→16h00	63°	0,951KWh
16h00→17h00	54°	0,987KWh
17h00→18h00	44°	0,999KWh
18h00→19h00	34°	0,981KWh
19h00→20h00	23°	0,927KWh
20h00→21h00	13°	0,848KWh
21h00→22h00	4°	0,754KWh

Tableau 4

Le total de l'énergie solaire accumulée entre 14h00 et 22h00 par la surface unitaire de $1m^2$ est de 7,37KWh. Cela représente, **dans le meilleur des cas**, 84,4% de l'énergie captée par cette même surface orientée Plein Sud. Il faut cependant prendre garde à ce que le Soleil ne soit pas masqué par des obstacles lorsqu'il est bas sur l'horizon. Nous avons vu par ailleurs (figure 11) que l'atmosphère absorbe une certaine quantité de la puissance solaire, cette absorption est d'autant plus importante que le Soleil est bas sur l'horizon. La puissance absorbée par l'atmosphère est malheureusement très difficile à quantifier et évolue au cours de la journée. (hauteur du Soleil, évaporation d'eau, poussières etc...)

On peut cependant considérer **le cas le plus défavorable** en supprimant les deux dernières lignes du tableau 4. L'énergie cumulée est alors de 5,78KWh ce qui représente 66,2% de l'énergie recueillie par la même surface orientée Plein Sud. Si l'on considère que, Plein Sud, le rendement est de 100%, pour une surface orientée Plein Ouest le rendement ζ (dzêta) est compris entre les valeurs :

$66,2\% \leq \zeta \leq 84,4\%$

Une habitation n'est que rarement dans l'axe des points cardinaux, supposons maintenant qu'elle soit alignée selon un axe Sud-Ouest (figure 16). Construisons dans le cercle azimutal le diamètre passant par l'axe longitudinal de la maison, ce diamètre XX' rencontre deux points azimutaux diamétralement opposés A et B. A partir du centre du cercle construisons la perpendiculaire à XX' dans la direction du Sud-Ouest, cette perpendiculaire rencontre un point azimutal C. Les points A, B et C définissent un demi-plan horizontal unique.

Les points A, B et le Zénith définissent de leurs côtés un plan vertical unique. Les rayons directs atteignent le versant utile de la toiture lorsque le Soleil est situé dans l'espace délimité par les deux plans définis ci-dessus

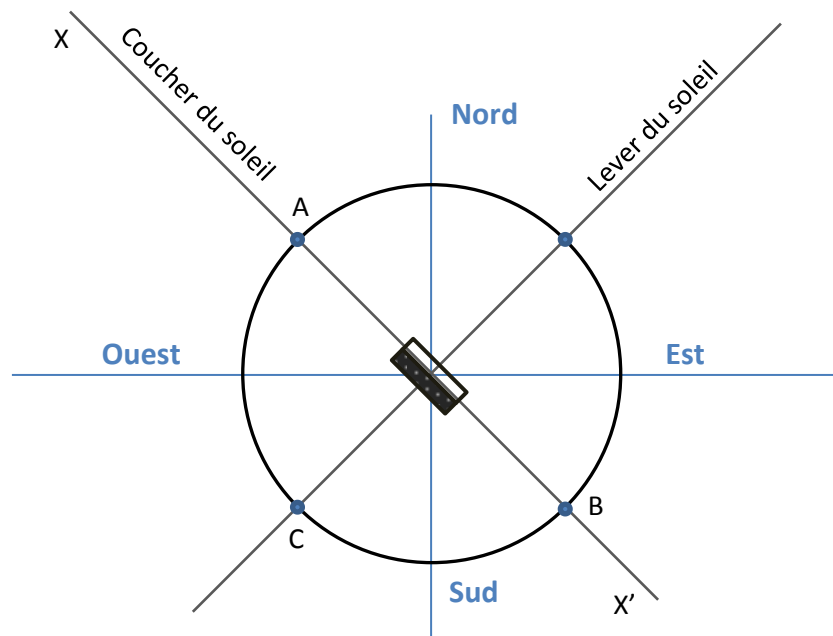


Figure 16

Comme pour les tableaux 3 et 4, nous allons noter la hauteur du Soleil entre les azimuts 135 et 305° (Coucher du Soleil). Les résultats sont rassemblés dans le tableau 5

Horaires (heure légale)	Hauteur moyenne du Soleil	Energie solaire accumulée pendant une heure
13h00→14h00	66°	0,933KWh
14h00→15h00	67°	0,927KWh
15h00→16h00	63°	0,951KWh
16h00→17h00	54°	0,987KWh
17h00→18h00	44°	0,999KWh
18h00→19h00	33°	0,978KWh
19h00→20h00	23°	0,927KWh
20h00→21h00	13°	0,848KWh
21h00→22h00	4°	0,754KWh

Tableau 5

Cette fois, le total de l'énergie accumulée entre 13h00 et 22h00 par la surface unitaire de $1m^2$ est de 8,3KWh. Cela représente, **dans le meilleur des cas**, un rendement de 95%.

Comme précédemment **le cas le plus défavorable** est obtenu en supprimant les deux dernières lignes du tableau 5. Le rendement est alors compris entre les valeurs :

$76,7\% \leq \zeta \leq 95\%$

A travers les trois exemples ci-dessus, on s'aperçoit que plus l'habitation est orientée en direction du Sud, meilleur sera le rendement global de l'installation.

Résumé

D'après ce qui a été vu plus haut, le rendement de l'installation est optimal (d'un point de vue astronomique) lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- Orientation Plein Sud des cellules photovoltaïques.
- L'angle formé par la surface photovoltaïque et le plan horizontal doit être compris entre 40 et 50°(en France).

Chaque cas doit faire l'objet d'une étude attentive et dans le cas d'une installation sur la toiture d'une habitation il convient (toujours d'un point de vue astronomique):

- De déterminer l'orientation de la maison.
- De prendre connaissance de l'angle que fait la toiture avec le plan horizontal.
- De posséder une carte d'ensoleillement annuel de la région où se situe l'habitation.
- De s'assurer qu'il n'y a pas d'ombre portée sur la surface photovoltaïque.

On appelle ombre portée, l'ombre projetée sur la surface photovoltaïque par un obstacle (arbre, bâtiments voisins, cheminées etc...). Il suffit qu'une petite fraction de la surface totale soit à l'ombre par altérer sensiblement le rendement de l'installation. Les technologies actuelles tendent à réduire cet inconvénient.

Les limites de l'électricité photovoltaïque

Les personnes intéressées par l'énergie photovoltaïque sont souvent noyées par la masse d'informations diffusées par la presse et internet. En réalité, il n'y a que peu de choses à retenir mais elles sont essentielles :

Souvent les professionnels évoquent la "puissance crête" (W_c) et l'énergie annuelle produite par une installation. Essayons d'expliquer la signification de ces grandeurs :

La "puissance crête" est la nouvelle grandeur physique à la mode dans le milieu électro-solaire. J'ai passé beaucoup de temps sur Internet à me renseigner sur la signification physique de cette grandeur et sur la méthodologie retenue pour quantifier la "puissance crête" d'une installation. En vain.

Nous avons cependant montré ci-dessus que la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque est maximale lorsque les rayons solaires directs sont perpendiculaires aux cellules.

Rappelons que pour une toiture dont l'angle est de 45° par rapport à l'horizontale :

- Les rayons ne sont jamais perpendiculaires à la toiture entre le 1^{er} janvier et l'équinoxe de printemps (20 mars)
- Les rayons sont perpendiculaires à la toiture à deux reprises pendant la journée (Soleil montant puis Soleil descendant) entre le 21 mars et l'équinoxe d'automne (23 septembre)
- Les rayons ne sont jamais perpendiculaires à la toiture entre le 24 septembre et le 31 décembre.

En résumé, de fin septembre à fin mars, les rayons ne sont jamais perpendiculaires à la toiture.

Pour une toiture dont l'angle est de 22° par rapport à l'horizontale :

- Les rayons ne sont perpendiculaires à la toiture que le jour du Solstice d'été (21 juin) lorsque le Soleil atteint ce jour-là sa hauteur maximale qui est aussi la hauteur maximale atteinte par le Soleil au cours de l'année.

La "puissance crête" n'a pas d'intérêt pour un particulier puisque les rayons ne sont perpendiculaires à la toiture que pendant un temps Δt très bref.

Cette grandeur est intéressante pour les fabricants de cellules solaires, car elle permet de faire des comparaisons en laboratoire, toute chose étant égale par ailleurs, entre différents types de produits.

L'énergie annuelle produite par une installation photovoltaïque

Tout dépend ici du point de vue dans lequel on se situe :

S'il s'agit de revendre l'électricité à EDF, l'énergie annuelle produite a en effet un sens puisqu'il s'agit ici de commerce et peu importe que cette électricité soit essentiellement produite l'été et pratiquement pas l'hiver. C'est ainsi que sont apparues les fermes solaires. Cependant EDF a tendance à diminuer le prix de rachat du kWh photovoltaïque et tout porte à croire qu'elle va poursuivre cette politique. Et ne remettra-t-elle pas en cause un jour les contrats déjà signés ? Qui peut affirmer le contraire aujourd'hui ?

Si l'on raisonne d'un point de vue purement énergétique, alors la notion d'énergie annuelle produite n'a plus de sens. Essayons de justifier cet argument :

De par sa nature l'électricité ne peut se stocker que sous forme de charges électriques (condensateurs) ou bien sous forme chimique (piles, accumulateurs) mais en très faible quantité et avec un mauvais rendement. C'est là d'ailleurs tout le drame de la voiture électrique. Si nous pouvions stocker aussi facilement l'électricité que les hydrocarbures, nous roulerions tous depuis longtemps en véhicules électriques.

Cette propriété de l'électricité **oblige** les producteurs à adapter en permanence la production à la consommation. Si cette dernière vient brutalement à s'accroître, la production doit croître dans la même proportion et au même moment. Il n'y a aucun "réservoir" tampon entre le producteur et le consommateur.

L'immense avantage de l'énergie électrique d'origine fossile est que la puissance délivrée est constante vingt-quatre heures sur vingt-quatre tous les jours de l'année. Cette constance n'est pas assurée, de par sa nature même, par l'électricité photovoltaïque. Sous nos latitudes, c'est en hiver que la consommation électrique est la plus élevée et que la production photovoltaïque est la plus faible. Plus ennuyeux, le photovoltaïque ne produit aucune énergie la nuit or c'est vers 19h en hiver, alors que le Soleil est couché depuis longtemps (17h19 le 22 décembre 2011, heure légale), que la consommation d'énergie électrique est la plus élevée.

Cependant le cas le plus rédhibitoire est peut-être celui-ci :

Dans ce document nous avons seulement considéré les phénomènes astronomiques qui sont faciles à quantifier et surtout périodiques et donc prévisibles, ce n'est malheureusement pas le cas de l'atmosphère terrestre dont le comportement est aléatoire par nature ce qui rend de facto la production photovoltaïque totalement imprévisible.

On voit bien que dans ces conditions les notions de "puissance crête" et d'énergie annuelle n'ont plus de sens.

L'important est de disposer à tout instant de la puissance minimale dont on a besoin.

Il est difficile d'imaginer que l'énergie électrique d'origine photovoltaïque puisse être une alternative crédible aux énergies fossiles qu'elles que soient leurs formes (charbon, gaz, pétrole, uranium).

Juillet 2011

Thierry Piou

Note : Les valeurs rassemblées dans les tableaux ont été relevées à l'aide du logiciel libre WinStar2.