

Astronomie et photovoltaïque

Thierry Piou sociétaire du Club d'astronomie "Pêcheurs d'étoiles" La Baule

Nous allons étudier dans ce document l'influence des paramètres astronomiques sur la production d'électricité photovoltaïque. Afin d'appréhender au mieux le sujet, nous allons revenir sur quelques notions élémentaires d'astronomie de position.

1.1 Les deux principaux mouvements de la Terre.

La Terre, dont la forme est sensiblement sphérique, est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe Nord-Sud. A chaque instant, une moitié de sa surface est éclairée, l'autre est dans l'ombre. La Terre tourne sur elle-même, de l'Ouest vers l'Est. Ce mouvement fait passer sous nos latitudes chaque point alternativement dans l'hémisphère éclairé par le Soleil et dans l'hémisphère obscur : d'où la succession des journées¹ et des nuits (figure 1). La Terre fait un tour sur elle-même en un jour. Nous précisons cette notion un peu plus loin.



Le sens de rotation de la Terre. Un observateur qui est en A voit le Soleil dans la direction de l'Est. C'est le matin, la nuit vient de s'achever. La Terre tourne d'Ouest en Est, notre personnage passe de la nuit à la journée et observe le Lever du Soleil.

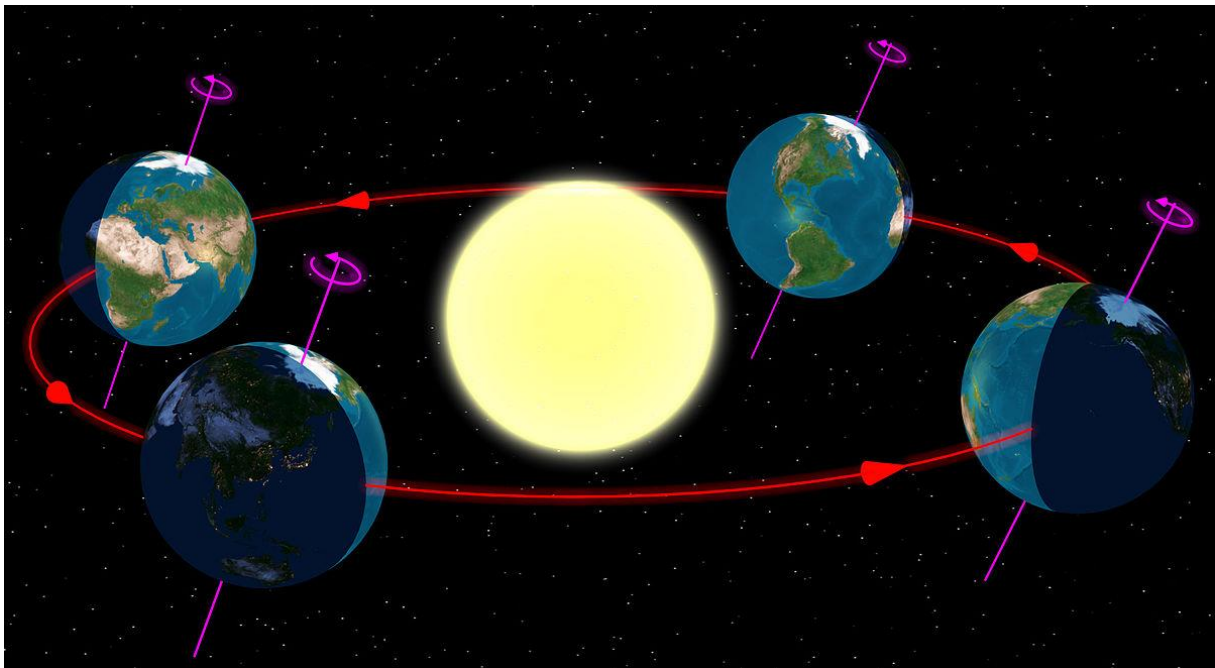
Fig.1

Pour l'observateur entraîné à son insu, tout se passe comme si le Soleil tournait autour de la Terre dans le sens opposé c'est-à-dire de l'Est vers l'Ouest. En effet, le Soleil se lève à l'horizon Est, puis il monte peu à peu dans le ciel, il atteint sa plus grande hauteur au Sud, enfin il s'abaisse vers l'horizon Ouest où il se couche.

Outre son mouvement de rotation sur elle-même, la Terre est animée d'un mouvement de révolution autour du Soleil dont la durée est d'une année. Cette durée est différente selon le point de vue considéré. L'année tropique est celle des saisons, c'est la durée séparant un équinoxe de printemps au suivant. La durée moyenne d'une année tropique est de 365,2422 jours.

On appelle écliptique le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil, ce plan contient l'axe passant par les centres du Soleil et de la Terre. (figure 2). Remarquons que l'axe de rotation de la Terre forme un angle par rapport à la perpendiculaire de ce plan.

¹ Nous appellerons dans ce document journée l'intervalle de temps séparant le Lever du Soleil de son Couché.



Le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil

Fig.2

Précisons ce point par une représentation conventionnelle.

Imaginons un plan d'eau sur lequel repose deux ballons représentant respectivement la Terre et le Soleil (figure3)

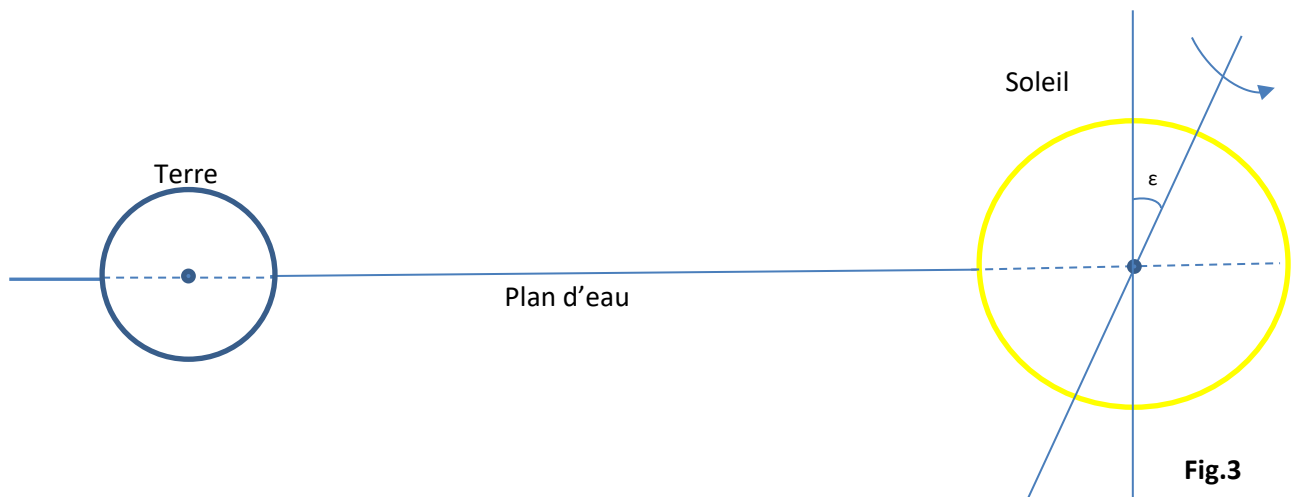


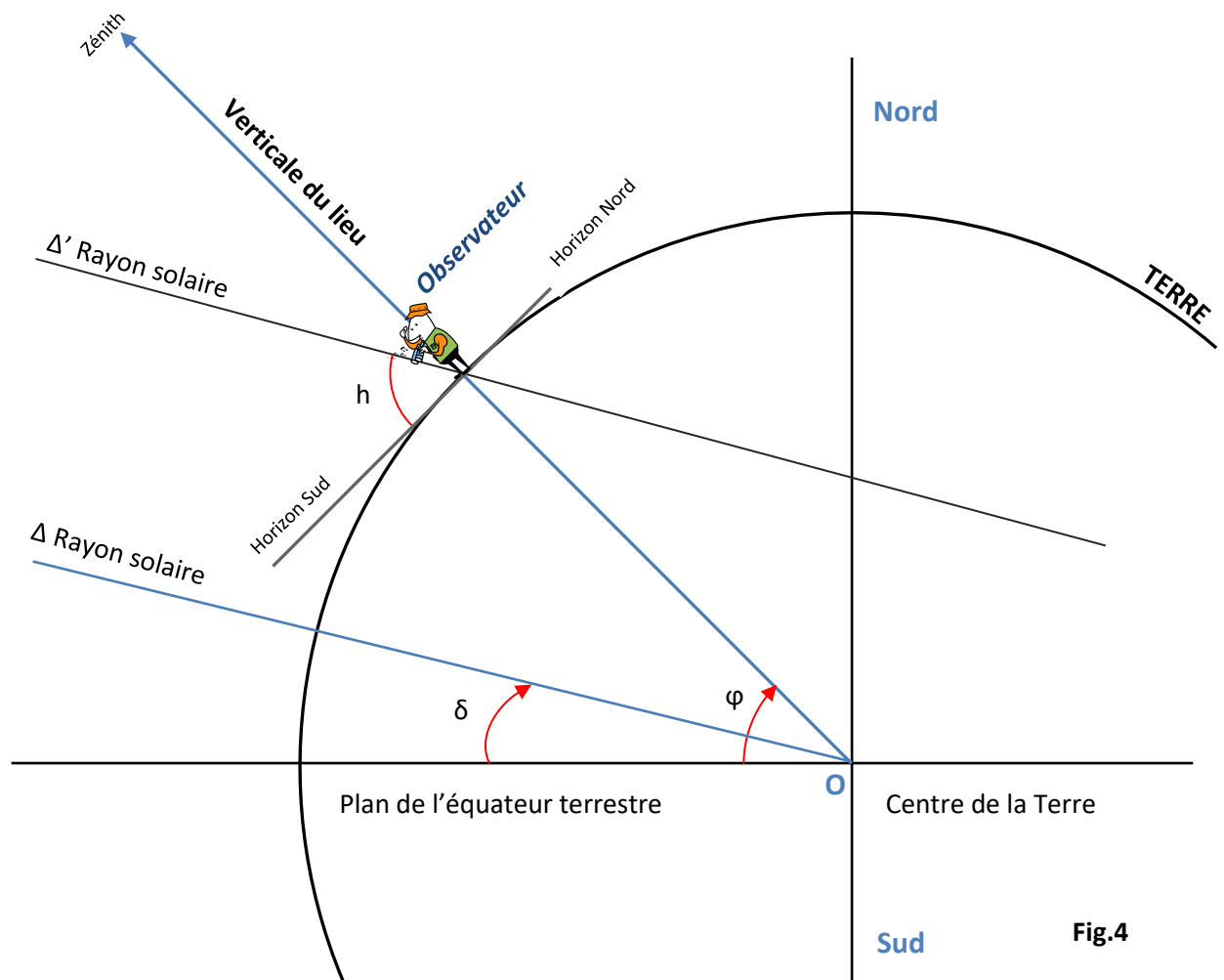
Fig.3

Les centres respectifs de la Terre et du Soleil sont situés au niveau du plan d'eau qui représente le plan de l'écliptique, nous constatons ensuite que l'axe de de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan d'eau mais fait avec celle-ci un angle ϵ de $23,4^\circ$.

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique associée au mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil est à l'origine des saisons.

1.2 Mouvement diurne. Hauteur du Soleil à midi solaire vrai.

Maintenant que nous avons défini les deux principaux mouvements de notre planète, nous allons voir maintenant comment ceux-ci se manifestent concrètement pour un observateur situé sur la Terre en commençant par le mouvement diurne (figure 4).



Il convient dans un premier temps de définir le repère de notre observateur.

La direction verticale de notre personnage 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. Nous pouvons réduire ce plan à un cercle dont l'observateur occupe le centre. Les diamètres Nord Sud et Est Ouest de ce cercle sont perpendiculaires.

Le plan contenant l'axe Nord-Sud et l'observateur se nomme plan méridien. La latitude est l'angle formé par la verticale du lieu d'observation et le plan équatorial, elle est dénotée φ sur la figure 4.

La hauteur h 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.

Bien entendu, l'astre qui nous intéresse ici est le Soleil. Nous avons vu qu'il se lève dans la direction de l'Est et qu'il s'élève peu à peu avant d'atteindre une hauteur maximale puis il s'abaisse avant de se coucher dans la direction de l'Ouest. Nous pouvons maintenant définir le midi solaire vrai de la manière suivante :

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 de l'observateur (Plein Sud en France). C'est aussi à cet instant de la journée que sa hauteur est maximale. Le jour solaire vrai est, par définition, l'intervalle de deux midis vrais consécutifs.

Il est simple de déterminer la hauteur du Soleil puisque nous sommes ramenés ici à un problème de géométrie plane. On considère, avec une très bonne approximation, que les rayons solaires parvenant sur la Terre sont parallèles entre-eux. La figure 4 nous indique alors que la hauteur du Soleil s'exprime par la relation :

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

Remarque :

En géométrie plane, l'unité d'angle est l'angle droit que l'on dénote souvent $1d$. Un angle valant $2d$ est donc un angle plat.

δ est la déclinaison du Soleil, il s'agit d'un angle qui évolue de façon périodique. Nous reviendrons plus loin sur cette grandeur.

Exemples de hauteurs à midi solaire vrai.

Considérons la ville de Guérande dont la latitude est 47°N

- Lors du solstice d'été, $\delta=23,4^\circ$, la hauteur du Soleil, à midi, est donc, selon la formule,

$$h = 1d - (47 - 23,4) = 66,4^\circ$$

- Lors des équinoxes de printemps et d'automne, $\delta=0$ nous avons :

$$h = 1d - 47 = 43^\circ$$

- Enfin lors du solstice d'hiver, $\delta=-23,4^\circ$:

$$h = 1d - (47 - (-23,4)) = 19,6^\circ$$

1.3 Lois du mouvement apparent du Soleil sur la sphère des fixes.

Comme les étoiles, le Soleil participe au mouvement diurne mais il n'est pas représenté comme elles par un point invariable sur la sphère des fixes². Les journées sont plus courtes en hiver qu'en été et sa hauteur, comme nous venons de le voir avec les exemples ci-dessus, est beaucoup plus grande en été qu'en hiver. Sa déclinaison est donc variable.

Précisons ce point.

La figure 4 est un système local rapporté au zénith et au plan horizontal, nous allons introduire un autre système de coordonnées locales rapportées au pôle céleste et au plan horizontal.

² On donne le nom de sphère des fixes (c'est-à-dire des étoiles fixes) à la sphère céleste qui porte les points figuratifs des étoiles et les entraîne dans son mouvement de rotation uniforme autour de l'axe du monde.

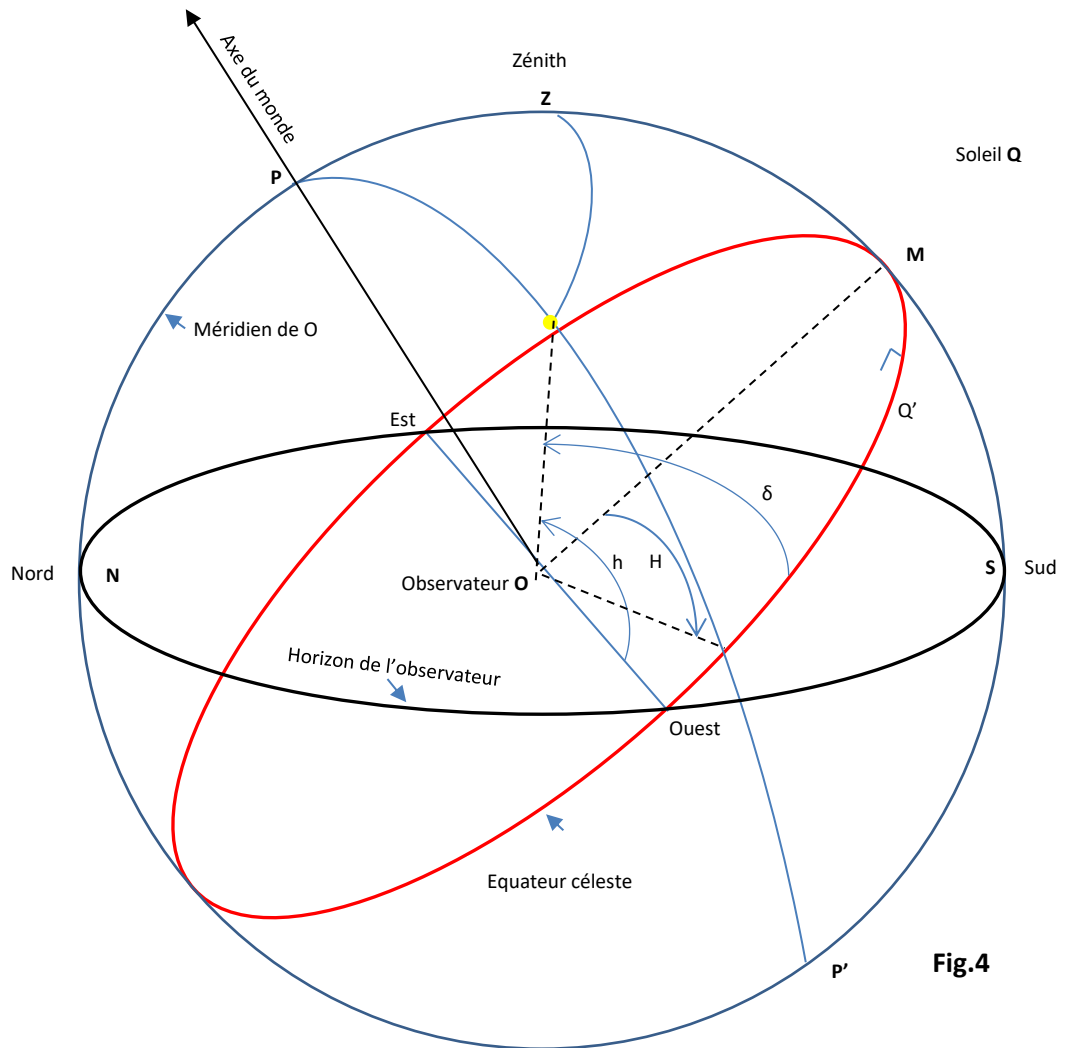


Fig.4

L'observateur est placé en O ; ce point est au centre du repère (l'observateur est au centre du monde). Les étoiles, y compris le Soleil semble appartenir à une voute, la voute céleste : On les voit selon une certaine direction, indépendamment de leur distance, comme si elles appartenaient à une même grande sphère centrée sur l'observateur.

La direction OP est parallèle à l'axe des pôles. Pour l'observateur l'ensemble des étoiles semble tourner dans le sens direct autour du point P au cours de la nuit. La direction OP est aussi appelée axe du monde.

La verticale en O coupe la voute céleste en un point Z appelé, nous l'avons vu, le zénith. Le plan déterminé par la verticale et l'axe du monde détermine un plan qui coupe l'horizon selon la ligne Nord-Sud que l'on nomme méridienne du lieu d'observation. Le plan représenté par le grand cercle NPZS est le méridien géographique ou astronomique du lieu.

Sur la figure 5, nous retrouvons la hauteur h qui, rappelons-le, est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal et la déclinaison δ qui est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan équatorial.

Au Solstice d'été (figure6a), le Soleil est situé "au-dessus" de l'équateur céleste c'est-à-dire dans l'hémisphère boréal. Sa déclinaison est positive et égale en valeur absolue à l'obliquité de l'axe de la Terre soit $23,4^\circ$

Au Solstice d'hiver, (figure 6b), le Soleil est situé "au-dessous" de l'équateur céleste c'est-à-dire dans l'hémisphère austral. Sa déclinaison est négative et égale en valeur absolue à l'obliquité de l'axe de la Terre.

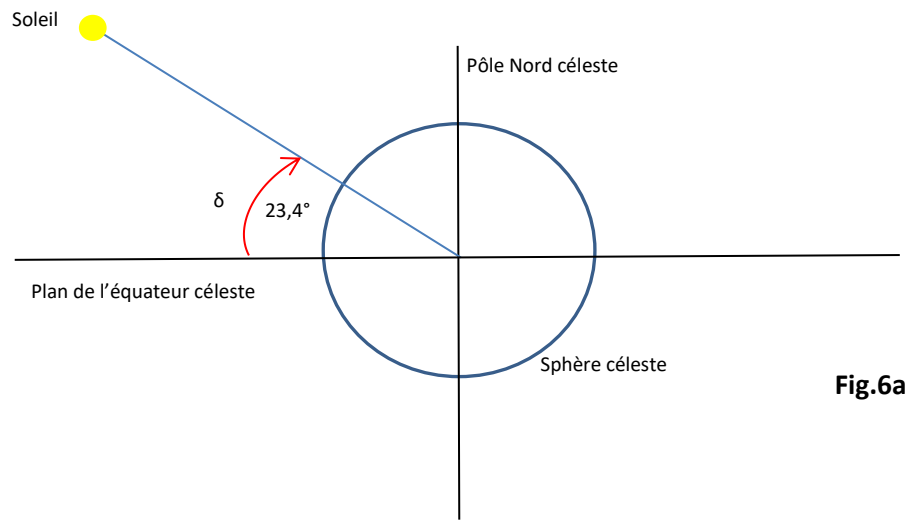


Fig.6a

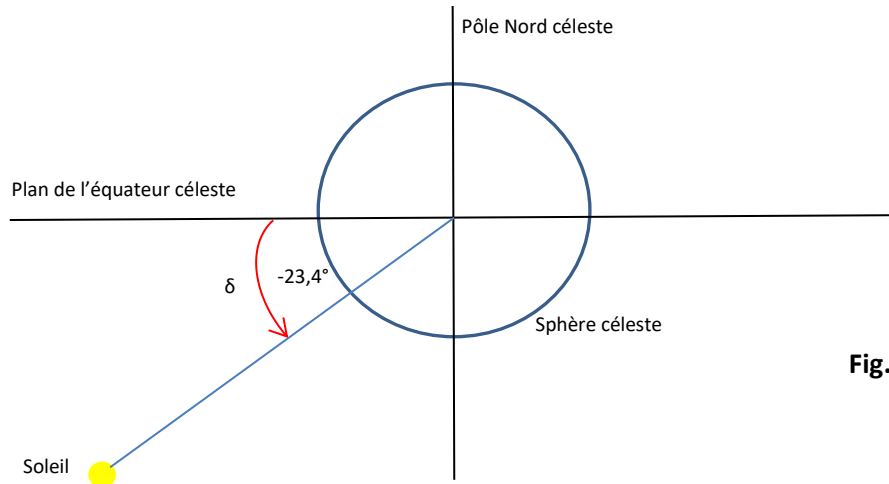


Fig.6b

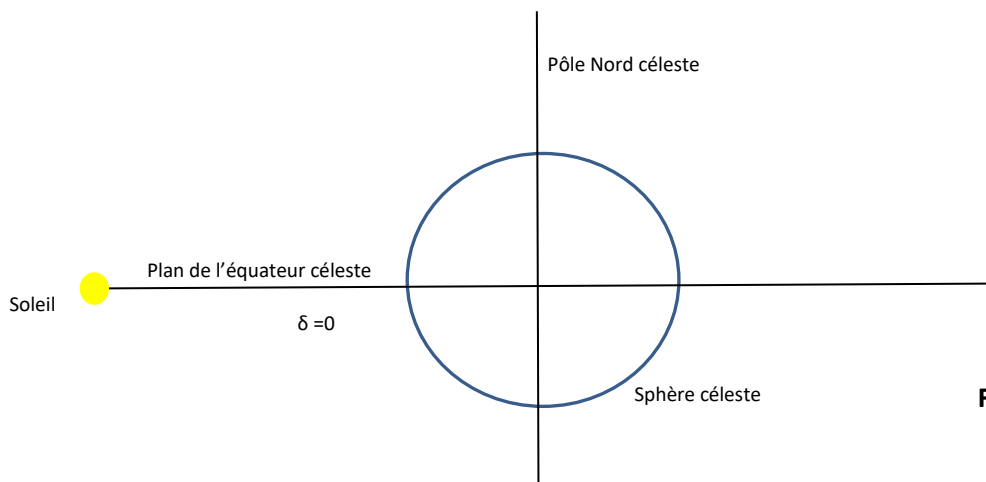


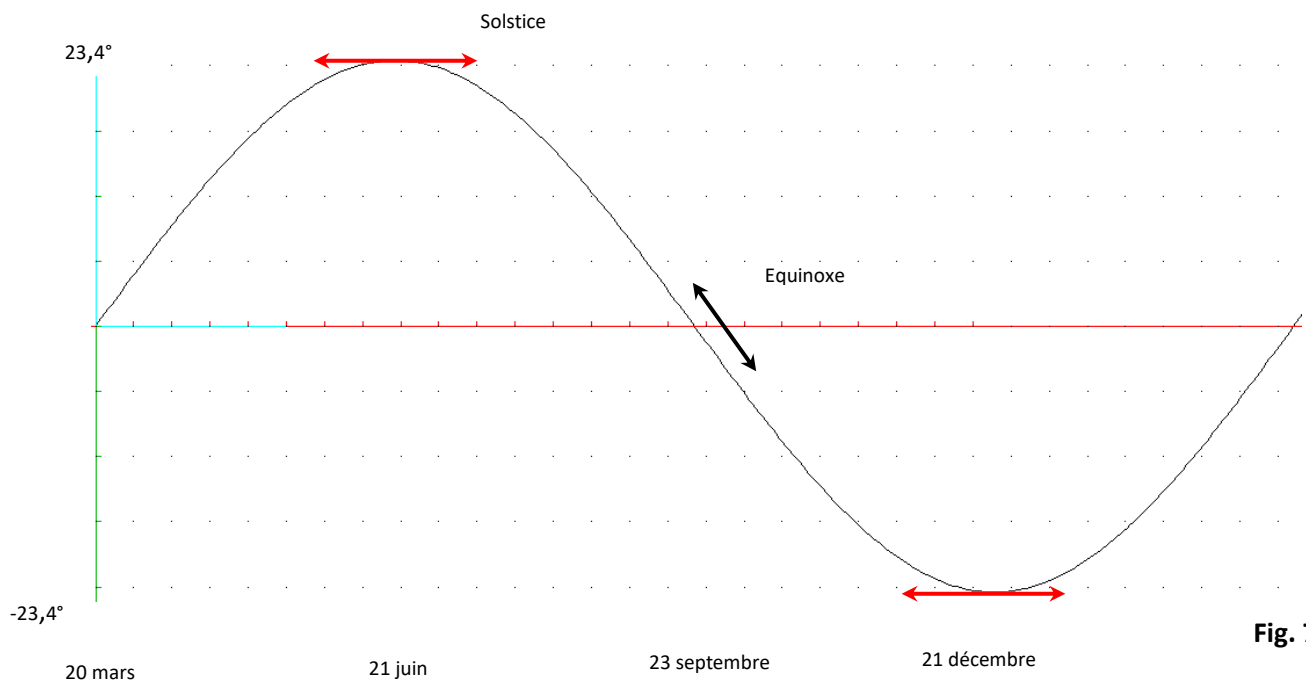
Fig.6c

Aux équinoxes de printemps et d'automne, le Soleil est dans le plan de l'équateur de céleste (figure 6c). Sa déclinaison est nulle.

La déclinaison du Soleil étant variable, il ne se maintient pas sur un parallèle déterminé. Entre deux midis vrais consécutifs, c'est-à-dire entre deux passages au méridien, sa déclinaison ayant varié de δ_0 à δ_1 il a décrit sur la sphère céleste locale une courbe comprise entre les deux parallèles correspondants. Du Solstice d'été au Solstice d'hiver, l'ensemble des courbes diurnes forme une spirale descendante, comprise entre les deux parallèles ayant pour déclinaison $+\delta$ à $-\delta$ auxquelles elle est tangente.

Du Solstice d'hiver au Solstice d'été, le Soleil décrit une spirale ascendante entre les mêmes parallèles.

La figure 7 représente l'évolution de la déclinaison en fonction du temps.



La déclinaison varie le plus rapidement aux équinoxes cela se traduit pratiquement par une grande variation de la durée de la journée et de la hauteur du Soleil³ d'un jour à l'autre. A contrario la déclinaison varie lentement aux Solstices, la durée de la journée et la hauteur varient peu d'un jour au suivant.

1.4 Hauteur du Soleil en fonction du temps.

Nous avons vu comment calculer la hauteur du Soleil lorsque ce dernier est dans le plan méridien. La situation est plus complexe lorsque l'on veut généraliser le problème et calculer la hauteur du Soleil à n'importe quelle date de la journée, il convient dans ce cas de faire usage de la trigonométrie sphérique. L'établissement des formules du mouvement diurne est alors immédiat. Si l'on s'en tient à la trigonométrie plane, il faut implicitement reconstituer les formules des triangles sphériques pour parvenir au même but.

La figure 5 fait apparaître une grandeur dont nous n'avons pas encore parlé, l'angle horaire H du Soleil.

³ Pour une heure donnée bien entendu.

L'angle horaire du point Q (le Soleil ici) est, par définition, l'angle de son cercle horaire et du demi-méridien PZMP' dirigé vers le Sud. Il est mesuré par l'arc MQ', compté positivement vers l'Ouest de 0° à 180°, négativement vers l'Est de 0° à -180°.

La hauteur du Soleil en un lieu donné à un instant donné va s'exprimer en fonction de la déclinaison δ du Soleil, de son angle horaire H et de la latitude φ du lieu d'observation. Remarquons que la déclinaison δ varie lentement (variation à l'échelle du mois) tandis que l'angle horaire H varie rapidement (variation à l'échelle de l'heure).

Considérons la figure 8 :

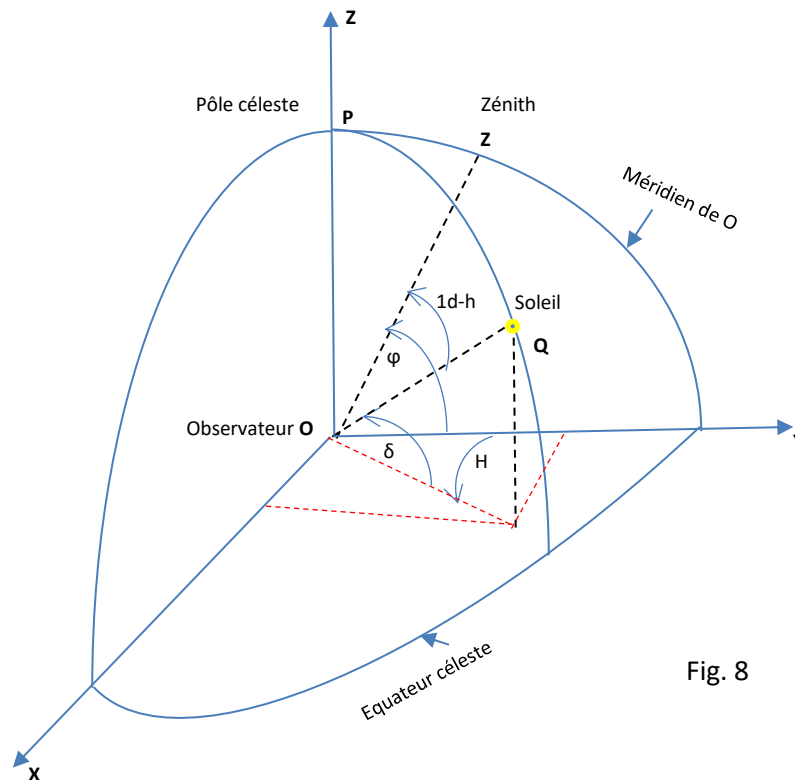


Fig. 8

On y retrouve les éléments de la figure 5, la référence est le plan de l'équateur céleste et sa perpendiculaire. φ , la latitude de l'observateur, est l'angle entre le plan équatorial OXY et le zénith Z ; la déclinaison δ , est l'angle entre le plan équatorial et la direction du Soleil OQ. ; l'angle horaire H est l'angle entre le plan méridien de l'observateur OYZ et le plan OZQ contenant le Soleil (il est midi solaire vrai sur le méridien, donc H est nul dans le plan OYZ) ; la hauteur h du Soleil, est le complémentaire de l'angle entre la direction du Soleil OQ et la direction du zénith OZ.

On exprime le produit scalaire $\vec{OQ} \cdot \vec{OZ}$ de deux façons différentes en attribuant la valeur unité au rayon $OQ = OZ$. Tous calculs faits, on obtient :

$$\sin h = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos H \quad (2)$$

L'expression (2) peut paraître complexe, elle est en réalité très simple à utiliser : la latitude φ est constante pour un lieu donné, et on peut aussi considérer la déclinaison comme étant constante sur la durée d'une journée⁴. Finalement la seule variable de l'expression (2) est l'angle horaire du Soleil.

⁴ La déclinaison varie de 0,26° par jour si l'on prend pour hypothèse un mouvement de révolution circulaire uniforme de la Terre autour du Soleil.

Un exemple de l'évolution de la hauteur en fonction du temps est donné à la figure 9, elle correspond à la journée du 6 avril ($\delta=6,21^\circ$) et à une latitude de 47°N

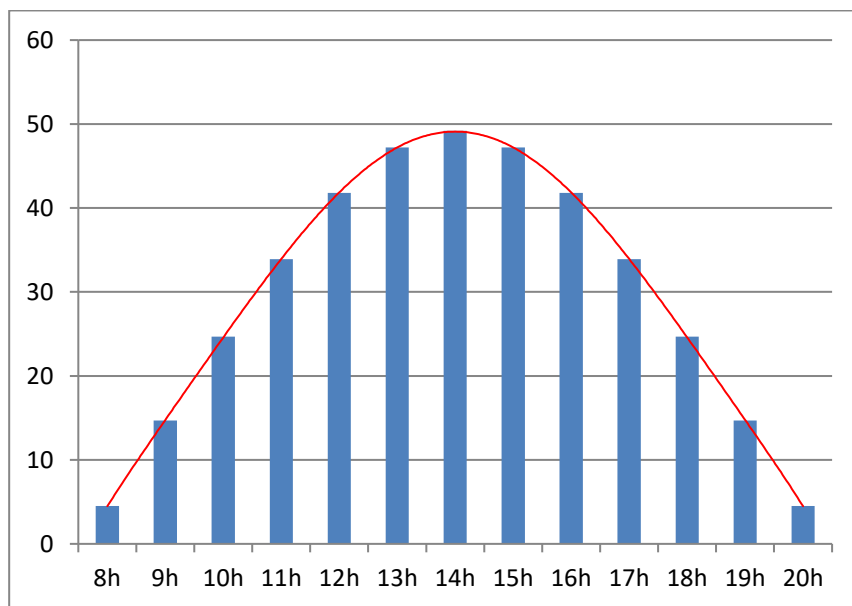


Fig. 9

Variation de la hauteur du Soleil pour la journée de 6 avril à une latitude de 47°N .
La réfraction atmosphérique est négligée ainsi que le diamètre du Soleil.

Afin de rendre la lecture plus aisée, l'axe des abscisses est gradué en temps légal. On constate que la hauteur maximale, $49,2^\circ$, est atteinte à 14h^5 et que la courbe d'approximation est symétrique par rapport à la droite d'équation $t=14$.

La théorie étant établie, il est temps (enfin ...) de passer à la pratique.

2.1 L'observatoire météo de Saillé de Guérande. Le pyranomètre.

Commençons par un peu d'histoire.

Depuis des siècles, les paludiers de la Presqu'île de Guérande ont utilisé leur environnement : les marées, les terres et le climat. Ce dernier paramètre est capricieux, changeant et à défaut d'en maîtriser les variations, il est important d'en comprendre les principes généraux. L'étude locale de ceux-ci permet de mettre en évidence les phénomènes mis en œuvre pour obtenir l'évaporation.



Coucher de Soleil sur les marais salants de la Presqu'île de Guérande.

⁵ En règle générale, il faut tenir compte de la longitude du lieu et de l'équation du temps pour obtenir l'heure légale exacte du passage du Soleil au méridien.

En 1994, l'association locale des paludiers fait l'acquisition d'une station météorologique automatique afin de connaître avec précision et fiabilité les données climatiques relevées au cœur des marais salants. Le suivi météorologique des capteurs est assuré par les techniciens de Météo-France conformément aux normes en vigueur. En 2011, l'association acquiert un pyranomètre. Cet instrument mesure l'éclairement solaire global⁶, un courant électrique proportionnel au rayonnement reçu, est fourni par une thermopile protégée par deux hémisphères qui sont transparents aux longueurs d'ondes comprises dans la bande 0,3-3 μm c'est-à-dire des UV-A à l'infrarouge lointain.

L'appareil, monté horizontalement, donne la valeur recherchée, cette grandeur s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. L'intégration de cette quantité par rapport au temps définit l'irradiation, qui s'exprime en Joules par unité de surface.



Un exemple de pyranomètre

2.2 Eclairement solaire. Journée du 6 avril 2017.

La journée du 6 avril 2017 se caractérise par un ciel dégagé sur pratiquement l'ensemble du territoire métropolitain. La figure 10 montre l'éclairement global mesuré par le pyranomètre de l'observatoire de Saillé de Guérande.

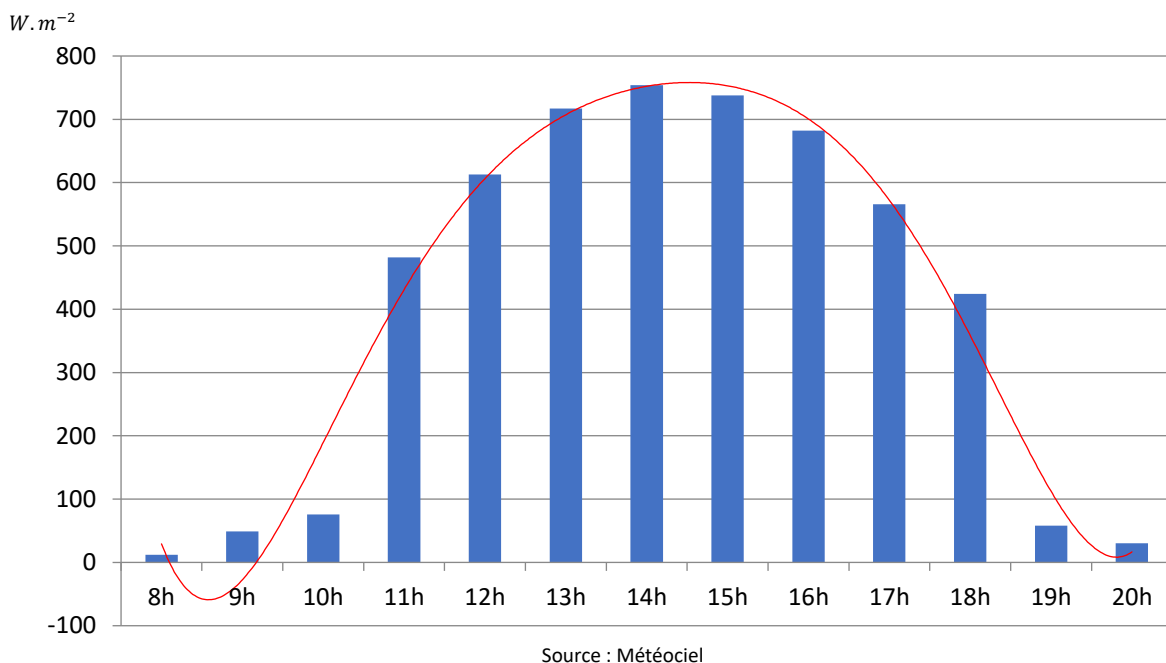


Fig. 10

⁶ On appelle éclairement global d'une surface la somme du rayonnement solaire direct d'une part et du rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par le sol d'autre part.

Si nous comparons les graphiques des figures 9 et 10 représentatifs respectivement de la hauteur du Soleil et de l'éclairement en fonction du temps nous remarquons quelques similitudes. Tout d'abord les valeurs maximales respectives sont atteintes à 14h ce qui correspond, nous l'avons vu, au passage du Soleil au méridien. Par ailleurs les deux fonctions sont strictement croissantes entre le Lever et le méridien puis strictement décroissantes entre le méridien et le Coucher, enfin elles sont nulles entre le Coucher et le Lever.

Ils existent cependant des différences. Tout d'abord, le graphique de la figure 10 ne présente pas d'axe de symétrie, ensuite entre 10 et 11h on constate un important accroissement de l'éclairement. Plus précisément cet accroissement est en première approximation de 44 Wm^{-2} par degré d'élévation du Soleil, alors qu'il est inférieur à 3 Wm^{-2} par degré d'élévation entre 9 et 10h. L'atténuation du rayonnement solaire est complexe et aléatoire puisque directement liée aux caractéristiques locales, elle dépend de la qualité de l'atmosphère, en particulier de la quantité d'eau qu'elle contient. Néanmoins on a cherché à définir certains paramètres utiles à la compréhension du phénomène et pouvant permettre une estimation de l'énergie reçue au sol.

2.3 Notion de masse atmosphérique.

Plus grande est la longueur du parcours de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre plus grande est l'atténuation de celle-ci avant d'atteindre un éventuel capteur. Pour tenir compte du trajet parcouru, on utilise la notion de masse atmosphérique. Celle-ci est égale au rapport, noté m , de la distance parcourue dans l'atmosphère par un rayon en provenance du Soleil à l'épaisseur verticale de l'atmosphère mesurée au niveau de la mer (figure 11)

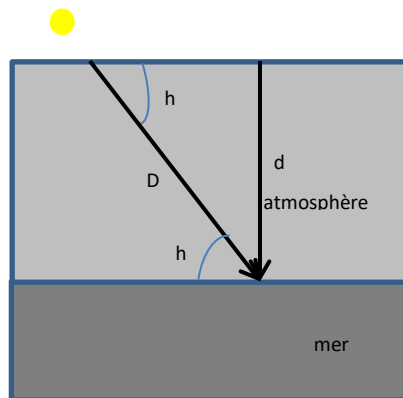


Fig. 11

d est l'épaisseur verticale de l'atmosphère mesurée au niveau de la mer, D est la distance parcourue dans l'atmosphère par un rayon en provenance du Soleil.

$$m = \frac{D}{d}$$

Par ailleurs, nous pouvons écrire :

$$\sin h = \frac{d}{D} \Rightarrow D \sin h = d$$

D'où :

$$m = \frac{D}{D \sin h}$$

Et finalement :

$$m = \frac{1}{\sin h} \quad (3)$$

Le tableau ci-dessous résume les différentes valeurs de m pour les angles remarquables de h :

h	0	30°	45°	60°	90°
m	∞	2	$\frac{2}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	1

Pour le Soleil au zénith ($h=90^\circ \Leftrightarrow h = \frac{\pi}{2}$), $m=1$ (AM1 ou Air Mass one en anglais) et pour le Soleil vu sous un angle $h = 30^\circ \Leftrightarrow h = \frac{\pi}{6}$, $m=2$ (AM2).

Le cas $m=0$ correspond à l'étude du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre (AM0). La formule (3) est approximative, en effet la réalité impose de tenir compte de la courbure de la Terre et de plus, la formule en question n'est applicable que pour une altitude nulle. Pour tenir compte des remarques ci-dessus, on utilise une formule plus complexe. Il n'en reste pas moins que pour des altitudes inférieures à 100 mètres et une élévation du Soleil supérieure à 15°, l'erreur relative de la formule (3) est inférieure à 1,5%.

Prenons pour exemple les données ci-dessus ; le 6 avril pour une latitude de 47°N, la hauteur du Soleil à midi solaire vrai est de 49,2°. Nous prendrons 30% comme albédo⁷ moyen du système Terre-atmosphère et considérons la constante solaire⁸ comme valant $1368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, l'éclairement s'exprime alors de la façon suivante :

$$E = 1368(1 - 0,3) * \sin h$$

Soit :

$$E = 1368 * 0,7 * \sin 49,2 = 725 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Cette valeur est cohérente avec celle mesurée par le pyranomètre à midi solaire vrai ($754 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Insistons cependant sur le caractère approximatif des formules fournies, elles ne peuvent qu'indiquer un ordre de grandeur. En effet nous avons considéré un albédo moyen de 30%, or ce dernier, toute chose égale par ailleurs, est fonction de la direction du rayon solaire incident. Plus précisément l'angle d'incidence dépend de la latitude du lieu et, pour un lieu donné, de l'élévation de Soleil par rapport au plan horizontal local.

Notons aussi que les formules données ne tiennent pas compte de la qualité de l'atmosphère. (quantité d'eau, aérosols...)

La courbe de production d'énergie électrique d'un panneau photovoltaïque disposé à proximité du pyranomètre sera sensiblement similaire⁹ à celle de la figure 10 à un facteur d'échelle près.

On peut en avoir un aperçu en consultant le graphique de la figure 12 qui représente la production photovoltaïque du territoire métropolitain pour la journée du 6 avril 2017. Précisons que le décalage horaire entre Brest et Strasbourg est d'environ 50 minutes : lorsque le Soleil est dans le plan méridien de Brest, il est midi solaire vrai passé de 50 minutes à Strasbourg.

⁷ L'albédo du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchiée vers l'espace.. Sa valeur est comprise entre 0 et 1.

⁸ 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 $1368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Il s'avère qu'en réalité cette constante ...n'est pas constante mais varie en fonction de l'activité solaire ; on parle alors de TSI (Total Solar Irradiance). Nous ne tiendrons cependant pas compte de cet aspect dans ce document.

⁹ La direction d'un panneau photovoltaïque est généralement fixe. Pour déterminer son éclairement il convient de prendre en compte non seulement la hauteur du Soleil mais aussi son azimut.

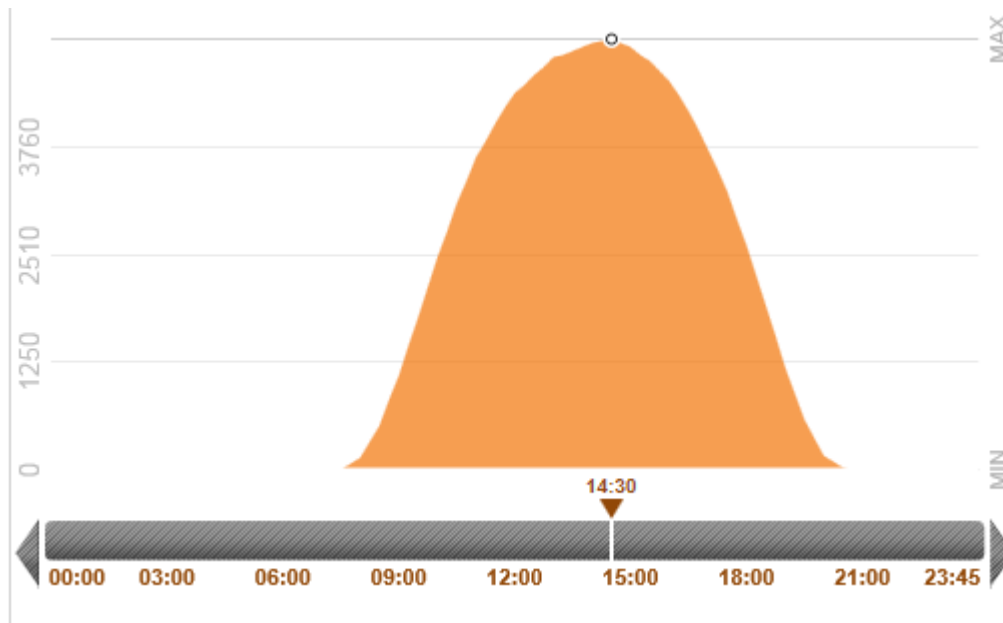


Fig. 12

Production photovoltaïque de la France métropolitaine le 6 avril 2017. Celle-ci fut maximale à 14h30, heure légale, et atteignit la puissance de 5019MW. L'énergie produite correspond à la surface colorée. Source : site Eco2mix

2.4 Nature de la production électrique photovoltaïque.

La figure 10 représente l'éclairement, image de la production photovoltaïque locale, d'une belle journée ensoleillée mais il n'en est pas toujours ainsi, la figure 13 représente la journée du 31 mars 2018 où l'éclairement à Saillé de Guérande était variable.

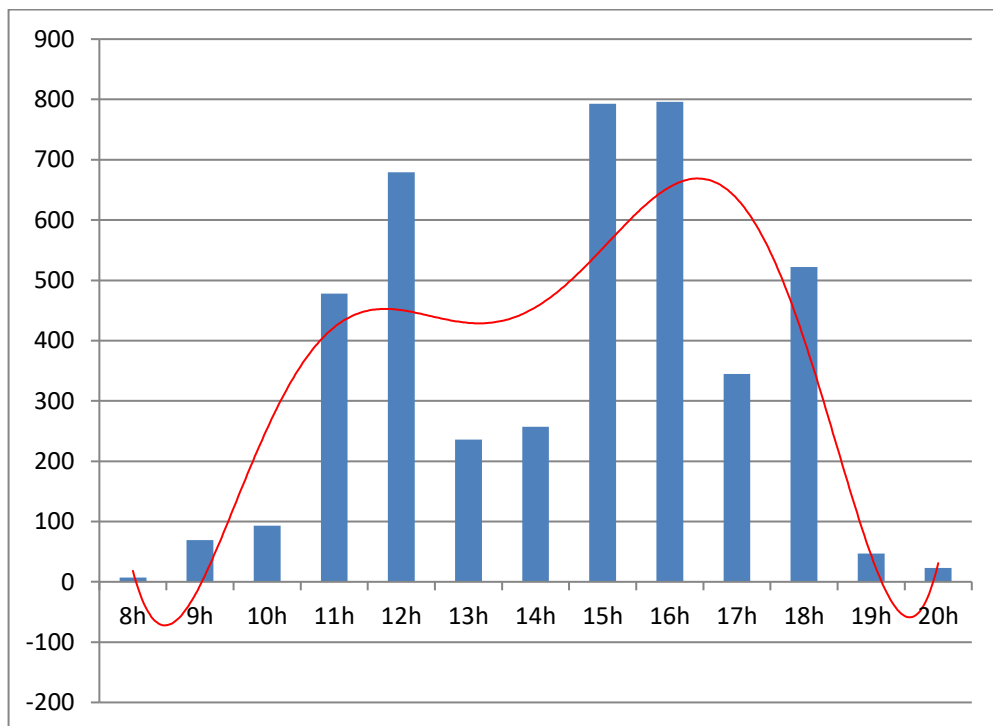


Fig. 13

Eclairement mesuré le 31 mars 2018 par l'observatoire météorologique de Saillé de Guérande. Source : Météociel

Comme pour la journée du 6 avril, le Soleil est dans le plan méridien vers 14h, or nous constatons que l'éclairement est maximal à 16h alors que l'élévation du Soleil est décroissante. Cette situation est dû aux phénomènes météorologiques que sont de natures aléatoires.

Comparons les figures 10 et 13, les histogrammes sont respectivement associés à une courbe d'approximation du 6^{ème} ordre et nous avons vu concernant la figure 10 que l'éclairement est

strictement croissant entre le Lever et le passage au méridien puis strictement décroissante jusqu'au Coucher, enfin il est nul jusqu'au prochain Lever. D'un point de vue mathématique on dira que la fonction $E_{fig.10} = f(t)$, c'est-à-dire l'éclairement en fonction du temps, est monotone sur les deux premiers intervalles considérés et nul sur le troisième.

Tel n'est pas le cas de la fonction $E_{fig.13} = f(t)$ de la figure 13, on l'on constate que sur l'intervalle Lever-passage au Méridien, elle est croissante entre 9 et 11h, présente une inflexion entre 11 et 12h puis est décroissante jusqu'à 13h30. Sur l'intervalle passage au Méridien-Coucher, elle est croissante entre 14 et 16h, et décroissante ensuite. Enfin, par définition, elle est nulle entre le Coucher et le Lever.

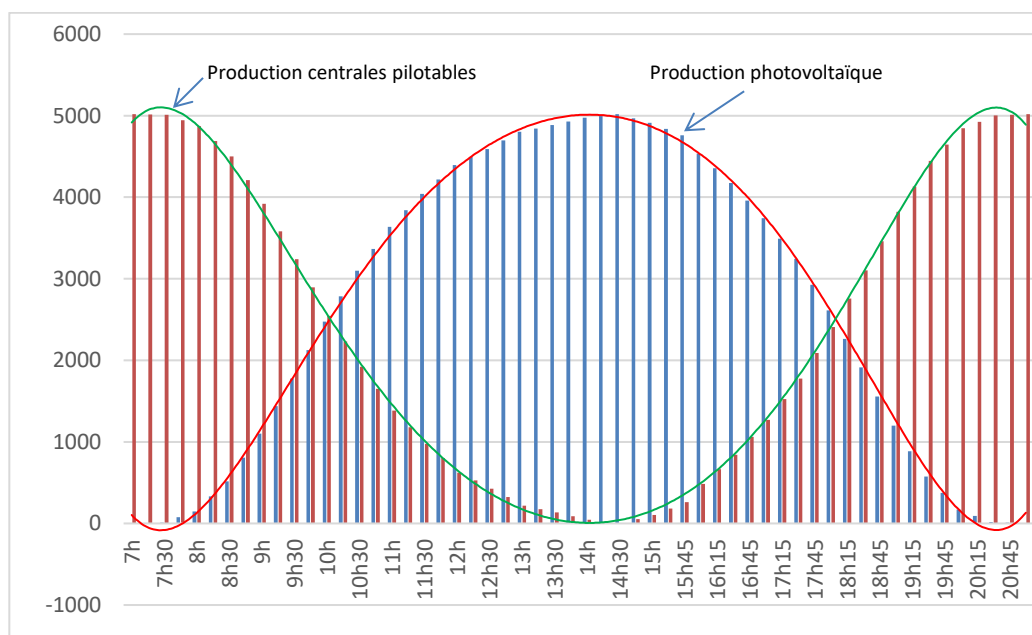
Si les fonctions $E_{fig.10} = f(t)$ et $E_{fig.13} = f(t)$ ont des propriétés mathématiques différentes elles ont cependant un point commun, elles sont continues. La définition de la continuité n'est pas évidente, disons simplement que graphiquement, une fonction est continue si l'on peut tracer sa courbe "sans lever le crayon". Nous pouvons à ce stade préciser un point important :

La production photovoltaïque est continûment variable entre le Lever et le Coucher et nulle entre le Coucher et le Lever. Elle ne présente aucune discontinuité. Parler d'énergie intermittente est donc un abus de langage.

En observant la figure 13 on discerne cependant les difficultés potentielles du gestionnaire du réseau électrique (RTE en France). Il n'existe pas en effet de "zone de stockage" entre une centrale électrique et le lieu de consommation. Le stockage, dans le cas d'une centrale pilotable, ne peut se faire qu'en amont de celle-ci sous forme d'énergie primaire (fioul, gaz, charbon, matière fissile, barrage hydraulique). Les lois de l'électrocinétique imposent la relation fondamentale suivante :

$$1 \text{ joule consommé à l'instant } t = 1 \text{ joule produit au même instant} \quad (4)$$

Nous allons illustrer ce point d'une importance capitale à travers un exemple simple. Imaginons que pour la journée du 6 avril 2017 nous souhaitons compenser à tout instant le graphique de la figure 12 de telle sorte qu'entre 7h et 20h45h la puissance fournie soit constante et égale à 5019MW. Il nous faut dans ce cas faire appel à des centrales pilotables telles que leurs productions soit l'exact complémentaire de celle de la figure 12. C'est ce que montre la figure 14



Compensation de la production photovoltaïque par des centrales pilotables pour la journée du 6 avril 2017
Graphique établi à partir des données du site Eco2mix

Fig. 14

A tout instant la somme des ordonnées des deux courbes est égale à la puissance de 5019 MW. Il est bien évident qu'avant 7h et après 20h45, l'énergie ne peut être fournie que par des centrales pilotables. Le même exercice peut-être fait pour la journée du 31 mars 2018.

On prend alors conscience de la difficile mission du gestionnaire de réseau qui doit en permanence faire face à la variabilité naturelle de la production photovoltaïque et la compenser instantanément. Exercice périlleux et non sans danger pour le réseau électrique quand on pense au caractère chaotique des phénomènes météorologiques.

Nous avons vu l'influence du mouvement diurne de la Terre sur la production photovoltaïque, il nous reste à voir celle de son mouvement de révolution autour du Soleil.

2.5 Influence du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil sur la production photovoltaïque.

Nous allons aborder le problème de façon tout à fait concrète.

Un habitant de Beaupréau dispose sur la toiture de sa maison d'une installation photovoltaïque dotée de douze panneaux d'une surface totale de $19,7 \text{ m}^2$ et dont la puissance maximale est de 3KW. La toiture fait un angle de 19° par rapport au plan horizontal, et est orientée Sud-Ouest. Sa production pour l'année 2017 est reportée dans le tableau 1 pour chaque mois de l'année.

Mois	Nb heures/mois	Energie théorique (KWh)	Energie réelle produite (KWh)	Rendement
jan_17	744	2232	139	6,22%
fev_17	672	2016	147	7,29%
mars_17	744	2232	243	10,88%
avril_17	720	2160	410	18,98%
Mai_17	744	2232	431	19,31%
juin_17	720	2160	457	21,15%
juillet_17	744	2232	381	17,06%
août_17	744	2232	356	15,95%
sept_17	720	2160	278	12,87%
oct_17	744	2232	201	9,00%
nov_17	720	2160	147	6,80%
dec_17	744	2232	85	3,81%

Tableau 1

L'énergie théorique est le produit du nombre d'heure par mois par la puissance maximale que peut fournir l'installation. Le rendement est le rapport de l'énergie réellement produite par la valeur théorique. On constate que celui-ci est maximal au mois de juin, c'est en effet à cette époque de l'année que les journées sont les plus longues et le Soleil atteint sa culmination annuelle le 21 juin (solstice d'été).

Il arrive parfois que le mois de juillet ait le meilleur rendement annuel, ce fut le cas en 2016 où le ciel du mois de juin fut particulièrement bâché. Juillet souffre deux inconvénients par rapport à juin, tout d'abord la journée diminue d'environ 1h entre le 1^{er} le 31 juillet tandis que l'élévation du Soleil lors du passage au méridien diminue de $4,7^\circ$ pendant cette même période. Le second inconvénient réside dans le fait que généralement les températures annuelles les plus élevées sont atteintes lors de la seconde moitié du mois de juillet, or des températures ambiantes élevées altèrent notablement le rendement des cellules photovoltaïques.

Les mois de décembre et janvier présentent logiquement les rendements les plus faibles, les journées y sont les plus courtes de l'année tandis le Soleil est bas sur l'horizon.

Le rendement annuel est de 12,44%, valeur classique pour ce genre d'installation¹⁰.

La courbe bleue de la figure 15 montre l'irradiation mesurée par la station de Guérande de Saillé, la courbe rouge est celle de la production photovoltaïque du Tableau 1 en fonction des douze mois de

¹⁰ A l'instant où ces lignes sont écrites, le prix de rachat par E.D.F de l'électricité produite par cette installation est d'environ 280 euros le Mégawattheure. Ce prix peut légèrement varier d'une année à l'autre.

l'année 2017. Les axes de coordonnées sont gradués en Mégajoules par mètre carré, l'axe de gauche correspondant à la courbe bleue, tandis que l'axe de droite correspond à la courbe rouge.

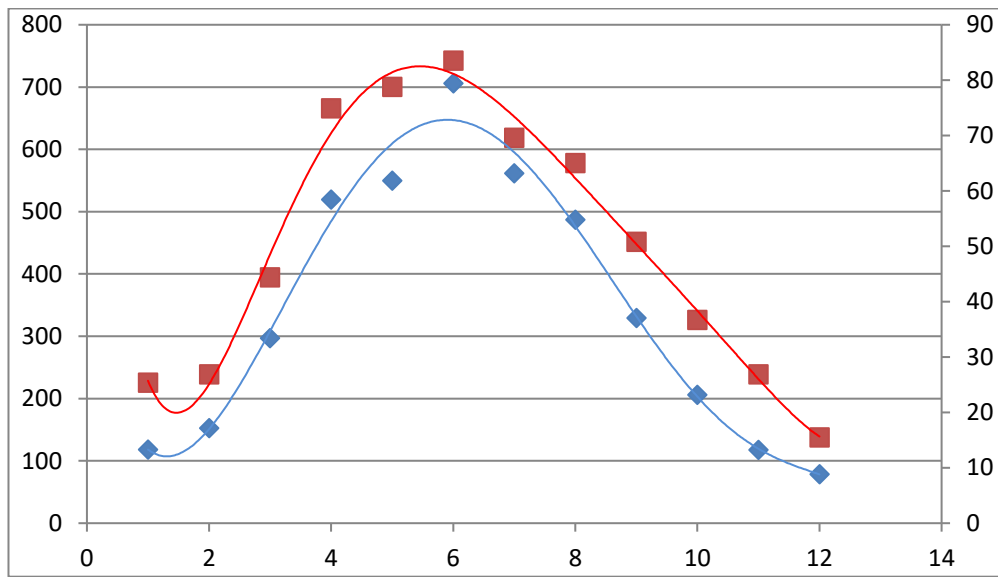


Fig. 15

Corrélation entre l'irradiation solaire, qui est fonction de la hauteur du Soleil et la production photovoltaïque.

Beaupréau étant distant d'environ 110 km de Guérande en ligne droite, il convient d'être prudent dans l'interprétation des courbes de la figure 15. Elle met néanmoins en évidence l'étroite corrélation entre l'irradiation solaire et la production photovoltaïque ainsi que l'influence du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, rappelons en effet que la hauteur du Soleil est fonction de la date de l'année pour une heure donnée.

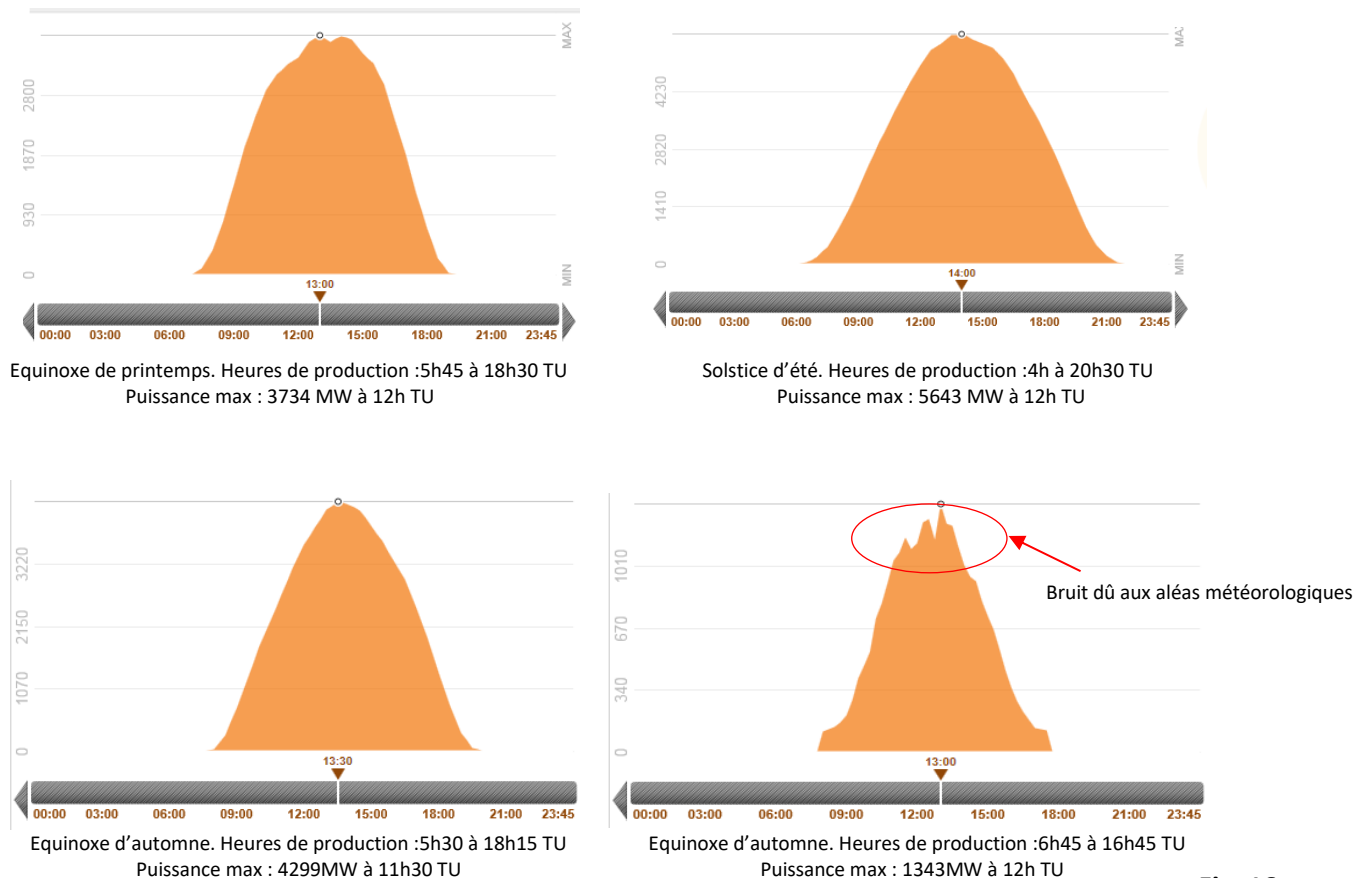
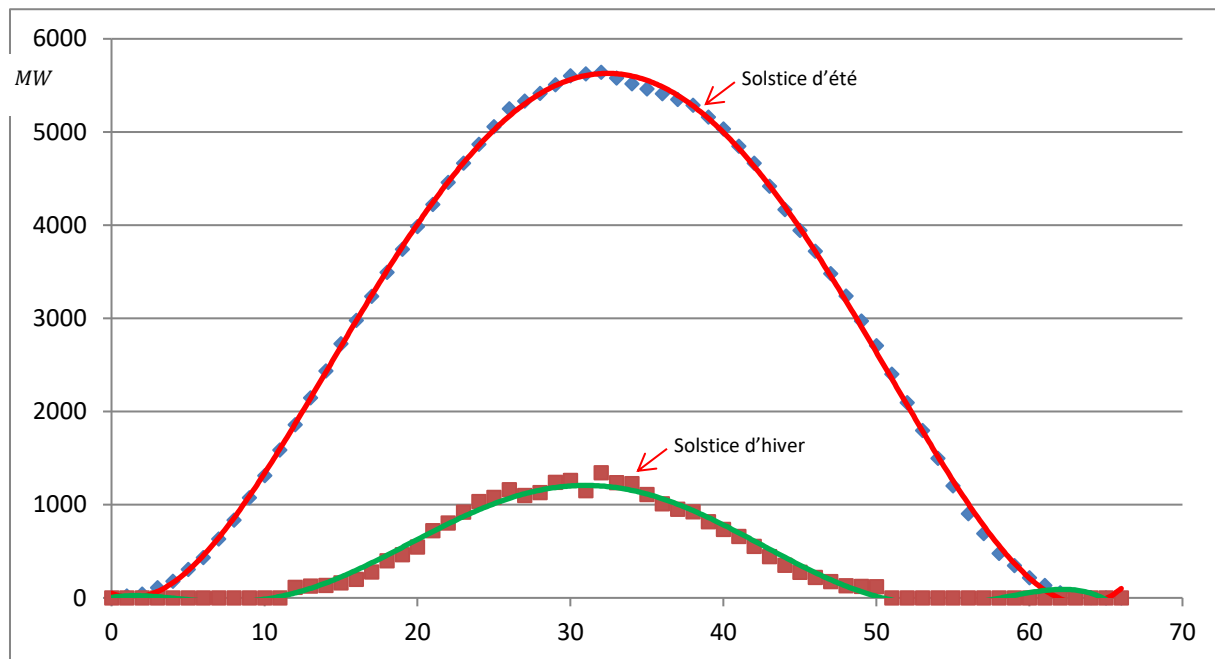


Fig. 16

La figure 16 montre la production photovoltaïque¹¹ du territoire métropolitain pour quatre dates remarquables de l'année 2018 : les équinoxes de printemps et d'automne ainsi que les solstices d'été et d'hiver. On y distingue l'influence du mouvement diurne : croissance de la puissance fournie entre le Lever et le méridien moyen, puis décroissance de la puissance jusqu'au Coucher. On remarquera que ces évolutions ne sont pas monotones : elles sont entachées du bruit dû aux aléas météorologiques. Les surfaces colorées représentent la quantité d'énergie produite. Elles mettent en évidence l'influence du mouvement de révolution de la Terre autour de notre étoile, cette influence est clairement mise en évidence à la figure 17 où les courbes des solstices d'été et d'hiver sont à la même échelle.



L'énergie produite correspond à la surface comprise entre la courbe considérée et l'axe des abscisses. L'écart est de 15 mn entre deux échantillons. Les courbes d'approximation polynomiales sont du 6^{ème} ordre. Source des données : Eco2mix, année 2018

Fig. 17

2.6 Puissance reçue par un capteur plan.

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 $1m^2$. L'efficacité, pour une puissance donnée, est alors de 100%. S'il fait un angle h avec l'horizontale (figure 18), il devra chauffer une surface plus importante dont la valeur est donnée par la formule (3) que nous avons vue plus haut :

$$S = \frac{1}{\sin h}$$

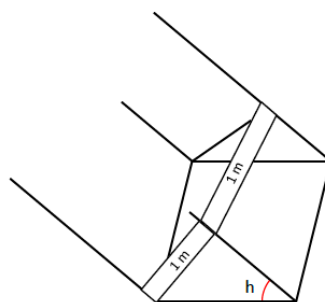


Fig. 18

¹¹ Source : site Eco2mix

L'efficacité sera d'autant plus faible que la surface éclairée sera plus grande.

Les panneaux photovoltaïques sont souvent inclinés par rapport au plan horizontal local, c'est le cas par exemple d'une installation située sur la toiture d'une maison. Notons α cet angle, l'angle d'incidence est l'angle formé par les rayons du Soleil et le plan incliné. Désignons-le par β (figure 19).

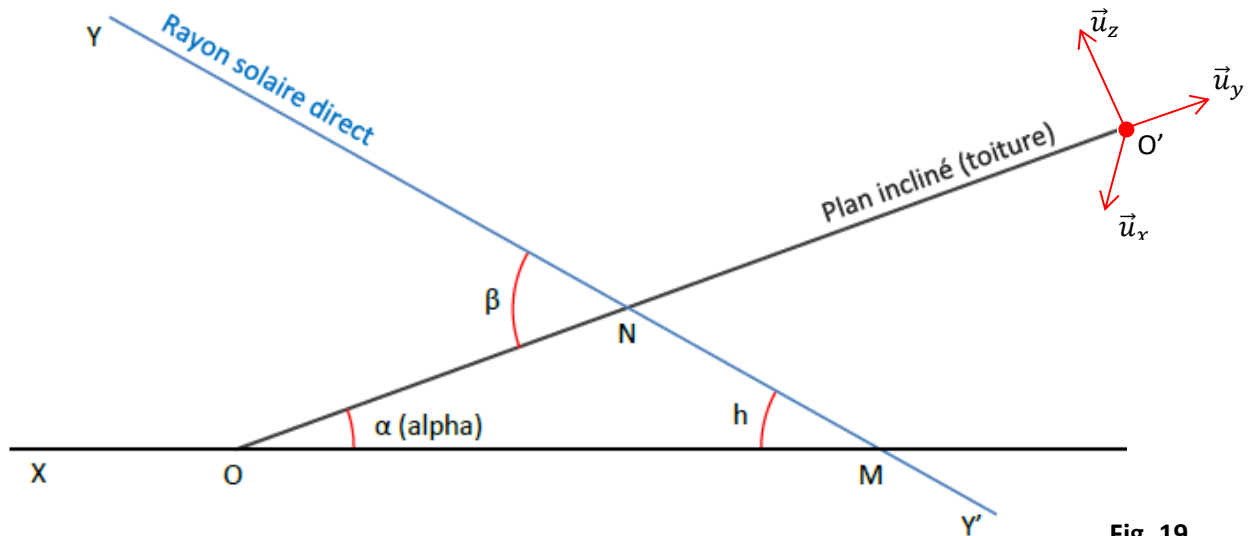


Fig. 19

Nous sommes ramenés à un simple problème de géométrie élémentaire lorsque le Soleil est dans le plan $(O', \vec{u}_y, \vec{u}_z)$. Dans ce cas, nous avons :

$$\beta = \alpha + h$$

Illustrons notre propos avec quelques exemples en prenant pour hypothèse une hauteur h de 30° et un éclairement solaire d'efficacité maximale de $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (ce qui correspond à ce l'on peut obtenir à midi solaire vrai au mois de novembre pour une latitude de 47° N).

- Pour $\alpha=19^\circ$ ¹² $\Rightarrow \beta=49^\circ \Rightarrow S = 1,32 \text{ m}^2$ soit une efficacité de 75,8% $\Rightarrow 303 \text{ Wm}^{-2}$
- Pour $\alpha=45^\circ \Rightarrow \beta=75^\circ \Rightarrow S = 1,03 \text{ m}^2$ soit une efficacité de 97% $\Rightarrow 388 \text{ Wm}^{-2}$
- Pour $\alpha=0^\circ \Rightarrow \beta=30^\circ \Rightarrow S = 2 \text{ m}^2$ soit une efficacité de 50% $\Rightarrow 200 \text{ Wm}^{-2}$

Conclusion.

Nous avons mis en évidence dans ce document l'importance des deux principaux mouvements de la Terre sur la production photovoltaïque. Ceux-ci sont beaucoup plus influents que les phénomènes météorologiques qui se traduisent par du bruit sur les courbes de production. Enfin nous avons constaté que le caractère continûment variable de cette source d'énergie nécessite l'appoint permanent de centrales pilotables et un réseau de distribution performant et renforcé capable de supporter ces productions éparpillées.

Thierry Piou.

Février 2019

¹² Les valeurs de 19° et 45° correspondent à des angles de toitures normalisés de maisons individuelles.