

*Projet de Physique P6*  
*STPI/P6/2014 – 40*

ESTIMATION ET MESURE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE  
PAR SOLARIMÈTRE SUR PLAN INCLINÉ



**Étudiants :**

Mickaël CHIN

Sékolène HOUDUS

Farès TABTI

Émilie COOMBS

Valentin PETITCOLAS

**Enseignant-responsable du projet :**

Jamil ABDUL-AZIZ



Date de remise du rapport : **26/05/2014**

Référence du projet : **STPI/P6/2014 – 40**

Intitulé du projet :

**Estimation et mesure de l'énergie solaire par solarimètre sur plan incliné**

Type de projet :

- Expérimental
- Calculatoire

Objectifs du projet :

- Mesurer l'énergie solaire grâce à un solarimètre sur un plan incliné.
- Établir un modèle théorique permettant de calculer le rayonnement solaire sur plan incliné.
- Comparer les résultats expérimentaux à ceux du modèle théorique, tout en ayant un regard critique.
- Étudier les variations de l'angle optimal selon la position azimutale du soleil au cours de la journée et de la saison.
- Faire le lien entre les résultats obtenus et les applications possibles dans le quotidien.
- S'adapter au travail en groupe et développer sa culture scientifique.

Mots-clefs du projet :

- Énergie solaire
- Solarimètre
- Angle optimal

# TABLES DES MATIÈRES

---

INTRODUCTION.....	5
MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL.....	6
TRVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS.....	7
1. PARTIE THÉORIQUE.....	7
1.1. Notions préalables .....	7
1.1.1. Les composantes du rayonnement solaire .....	7
1.1.2. Les variables du modèle théorique .....	8
1.1.1.1 Les angles .....	8
1.1.1.2 Les autres paramètres.....	10
1.2. Calcul du rayonnement solaire sur plan incliné.....	10
1.2.1. Un outil pour calculer le rayonnement solaire .....	10
1.2.2. Le rayonnement hors atmosphère journalier sur surface horizontale $H_o$ .....	10
1.2.3. Estimation du rayonnement solaire moyen $\bar{H}$ .....	12
1.2.4. La composante diffuse $\bar{H}_d$ .....	13
1.1.2.1 L'indice de clarté moyen $\bar{K}_t$ .....	13
1.1.2.2 Rapport $\bar{H}_d / \bar{H}$ .....	13
1.2.5. La composante directe $\bar{H}_b$ .....	13
1.2.6. Formule finale .....	13
1.2.7. Application numérique de la formule .....	14
2. PARTIE EXPÉRIMENTALE .....	17
2.1. Le solarimètre .....	17
2.2. Le support incliné .....	17
2.3. La prise de mesures .....	19
2.4. Analyse des résultats.....	20
2.4.1. Comparaison entre le modèle théorique et nos mesures.....	20
2.4.2. Comparaison avec les données externes .....	21
2.5. Les applications .....	22
2.5.1. Les panneaux solaires .....	22
2.5.2. L'expérience du tracker solaire .....	24
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	26
APPORTS PERSONNELS.....	27
BIBLIOGRAPHIE.....	28
ANNEXES.....	29

## INTRODUCTION

---

Aujourd'hui, nous sommes confrontés aux réalités de la fin des énergies fossiles et à des risques majeurs liés à l'énergie nucléaire. C'est pourquoi de nombreux scientifiques et chefs d'états se tournent vers de nouvelles sources de production d'énergie.

L'énergie solaire est considérée comme inépuisable (d'ici les 5 prochains millions d'années) et son exploitation a peu d'impact négatif sur l'environnement, sans oublier qu'elle est disponible partout sur Terre. Cependant, la disponibilité de l'énergie solaire est variable au cours de la journée et dépend aussi des saisons : c'est ce qui va nous intéresser dans ce projet.

Ce dernier traite de l'estimation solaire et de la mesure de l'énergie solaire sur plan incliné grâce à un solarimètre (appareil de mesure de puissance solaire). Il s'agit donc d'obtenir des mesures de l'énergie solaire relevées tout au long de la journée sur un plan incliné grâce au solarimètre. L'étude de l'énergie solaire sur un plan incliné et la détermination de l'angle d'inclinaison optimal peut être facilement rattachée à l'emploi de panneaux photovoltaïques et thermiques.

Ainsi, nous avons pu comparer les résultats obtenus par nos mesures à nos valeurs théoriques obtenues grâce au modèle déterminé par John A. Duffie et William A. Beckkam dans *Solar Engineering of Thermal Processes*.

Par rapport au projet de l'année dernière sur le même sujet, nous avons essayé de nous concentrer sur la compréhension et l'explication des nombreuses variables utilisées dans le modèle théorique du calcul de l'énergie solaire en fonction de l'angle d'inclinaison. De plus, nous avons construit un autre support pour maintenir le solarimètre dans un but de précision de la valeur de l'angle d'inclinaison étudié. Enfin, nous avons choisi de retenir et de présenter quelques utilisations des résultats obtenus dans la vie courante.



## MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce projet, il nous a fallu procéder à une certaine organisation. Dès la première séance, nous avons pris connaissance du sujet et feuilleté le rapport de l'année dernière, afin de nous faire une idée globale. Puis, nous avons fait une ébauche de plan contenant une partie théorique et pratique. Ainsi, le partage des tâches a été assez rapide : trois membres du groupe se sont d'abord penchés sur le modèle théorique avec la compréhension des variables et des multiples formules. D'un autre côté, deux membres se sont occupés de la partie expérimentale en se familiarisant avec le solarimètre, en réfléchissant à l'élaboration d'un support incliné et en établissant un calendrier prévisionnel des mesures.

Après trois séances, nous nous sommes tous mis à travailler sur la partie théorique, qui requiert en effet plus de compréhension. Dès que la météo nous l'a permis, nous avons fait un maximum de mesures, et ceci dès le début du mois de mars. Après cela, nous avons continué à déterminer le modèle mathématique afin de le comparer aux valeurs expérimentales. Enfin, nous avons peaufiné le rapport, en ajoutant une partie sur les applications liées à l'énergie solaire et en se procurant des données externes afin d'avoir une troisième source de comparaison.

À chaque fin de séance, nous nous répartissions le travail à faire pour la semaine suivante. Un membre du groupe était chargé de rédiger un rapport de chaque séance.

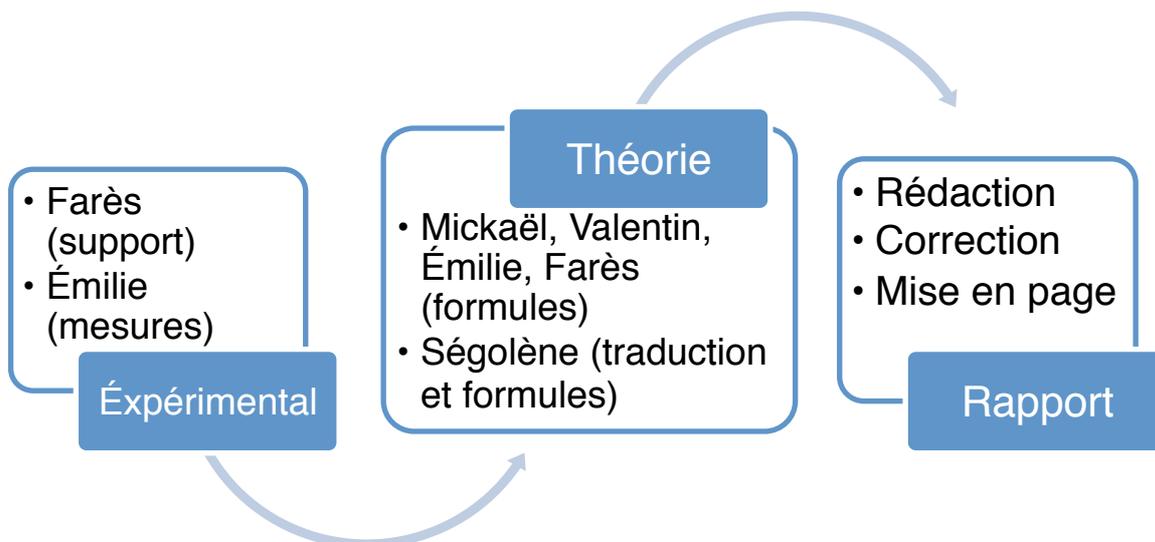


Figure 1 : organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés



# TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

## 1. PARTIE THEORIQUE

Dans cette partie, nous commencerons par introduire quelques notions à propos du rayonnement solaire. Ensuite, nous expliciterons les variables du modèle théorique permettant de calculer le rayonnement solaire sur une surface inclinée. Enfin, nous déterminerons les formules théoriques pour calculer ce rayonnement et trouver l'angle optimal.

### 1.1. Notions préalables

#### 1.1.1. Les composantes du rayonnement solaire

À leur entrée dans l'atmosphère, les rayons solaires se divisent : une partie est réfléchi et dispersée dans l'espace tandis que le reste est soit absorbé, diffus ou réfléchi. Il existe donc trois composantes solaires :

- La **composante diffuse** provient des phénomènes de diffraction et de réflexion du rayonnement solaire sur les particules présentes dans l'atmosphère ; la plupart du temps, il s'agit des particules d'eau des nuages.
- La **composante réfléchi** résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui dépend de l'**albédo**. Il correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchi et l'énergie solaire incidente. Ses valeurs se situent entre 0 et 1 pour une surface totalement réfléchissante. Voici certaines de ses valeurs :

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Calcaire	environ 0,40
Glace	environ 0,60
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir parfait	1

- La **composante directe** correspond aux rayons qui arrivent directement sur la surface exposée au soleil. Leur intensité dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré.



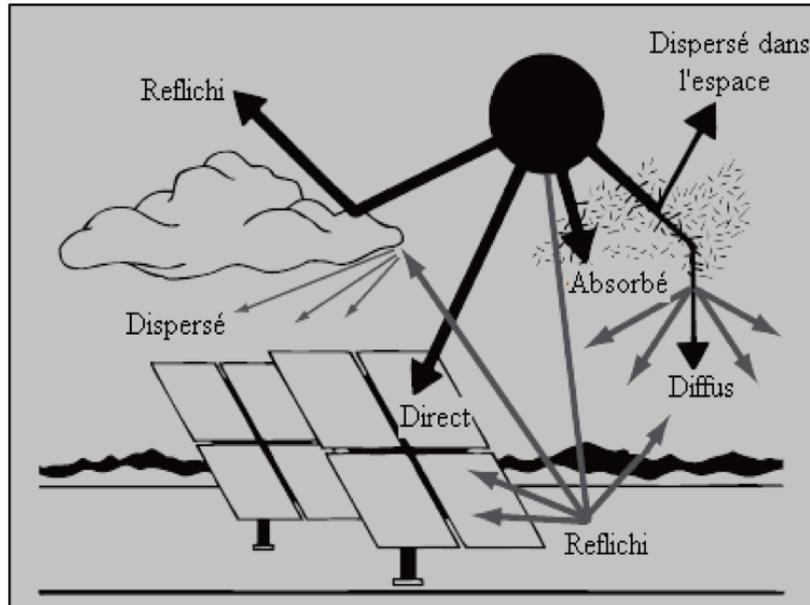


Figure 2 : les composantes solaires

En conséquence, l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un système dépend de plusieurs facteurs :

- La position et l'inclinaison du système ;
- La couverture nuageuse ;
- La réflectivité des surfaces voisines du système ;
- Le jour de l'année : en effet, plus le soleil est haut dans le ciel, en été ou à midi, et plus la distance parcourue de ses rayons est petite, et donc plus l'intensité du rayonnement est forte. À l'inverse, en hiver ou tôt le matin, la distance parcourue de ses rayons est plus grande, donc l'intensité du rayonnement est plus faible.

### 1.1.2. Les variables du modèle théorique

#### 1.1.1.1 Les angles

Différents angles sont nécessaires au calcul du rayonnement solaire :

- La **latitude  $\phi$**  : c'est une valeur angulaire qui donne la position d'un point à la surface de la Terre au nord ou au sud de l'équateur. À Crespières, lieu de prise des mesures, la latitude est de  $48^{\circ}69'$ .
- La **penne  $\beta$**  : c'est tout simplement l'angle entre l'horizontale et la surface du support incliné. Nous le ferons varier entre  $0^{\circ}$  et  $50^{\circ}$ .
- La **déclinaison solaire  $\delta$**  : c'est la position angulaire du soleil à son zénith, (c'est-à-dire lorsque le soleil est positionné sur le méridien local) par rapport au plan de l'équateur. La formule du physicien Léon Neil Cooper établie en 1969 permet de calculer la déclinaison en fonction du jour  $n$  de l'année :



$$\delta = 23,45 \times \sin \frac{360 \times (284 + n)}{365}$$

- L'**angle horaire**  $\omega_s$  : c'est le déplacement angulaire du soleil vers l'est ou l'ouest par rapport au méridien local dû à la rotation de la Terre à 15° par heure sur son axe. Il dépend donc de la latitude et de la déclinaison solaire.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta)$$

On introduit également l'angle  $\omega'_s$  qui prend en compte la pente  $\beta$  :

$$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \times \tan \delta) \end{array} \right]$$

- L'**angle zénithal**  $\theta_z$  : c'est l'angle entre la verticale à la surface de la terre et la droite qui nous relie au soleil.

*Il faut noter que lors des calculs, tous les angles seront exprimés en degrés, seul l'angle horaire sera converti en radians.*

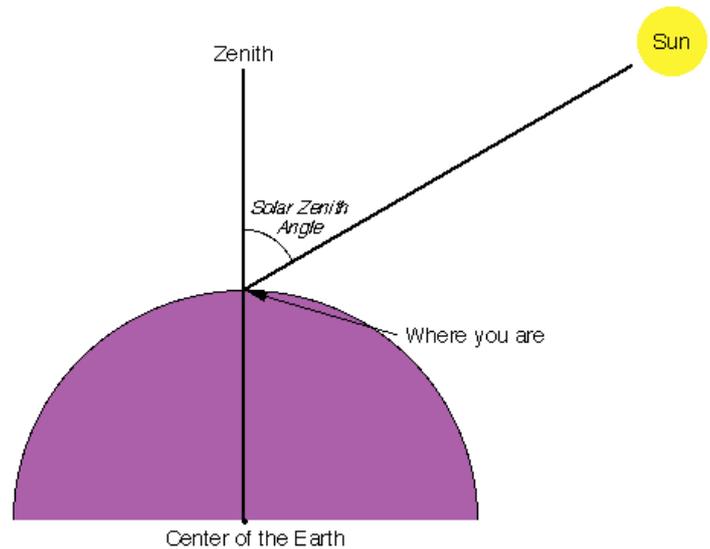


Figure 3 : schéma de l'angle zénithal

### 1.1.3. Les autres paramètres

D'autres paramètres entrent aussi en compte dans le calcul du rayonnement solaire :

- La **constante solaire**  $G_{sc}$  (W/m<sup>2</sup>) : elle exprime la quantité d'énergie solaire reçue sur une surface de 1 m<sup>2</sup> située à une distance Terre-Soleil, exposée perpendiculairement aux rayons du soleil, et ceci hors atmosphère.
- La **durée moyenne du jour**  $\bar{N}$  (h) : c'est le temps compris chaque jour entre le lever et le coucher du soleil.
- La **durée d'insolation**  $\bar{n}$  (h) : c'est le temps chaque jour pendant lequel le rayonnement solaire dépasse le seuil de 120 W/m<sup>2</sup>.
- La **fraction d'insolation**  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$  : c'est tout simplement le rapport entre la durée moyenne du jour et la durée d'insolation.



## 1.2. Calcul du rayonnement solaire sur plan incliné

### 1.2.1. Un outil pour calculer le rayonnement solaire

Comme indiqué précédemment, en plus des rayons directs et diffus, une surface inclinée est aussi frappée par les rayons qui se reflètent sur le sol. En conséquence, le rayonnement sur un plan incliné est composé de trois éléments :

$$H_{global} = H_{direct} + H_{diffus} + H_{réfléchi}$$

Selon Hottel et Woertz (1942), la combinaison des rayonnements diffus et réfléchis est isotrope (ils sont invariants selon la direction). Liu et Jordan (1963) ont amélioré ce modèle et ont démontré que, pour une surface orientée sud, le rapport du rayonnement journalier direct moyen du mois sur plan incliné et du rayonnement journalier direct moyen du mois sur un plan horizontal est :

$$\overline{R_b} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \phi \sin \delta}$$

$\overline{R_b}$  est un outil géométrique qui dépend de l'angle d'inclinaison  $\beta$ , de la déclinaison solaire  $\delta$ , de l'angle horaire  $\omega_s$  et de la latitude  $\phi$ .

### 1.2.2. Le rayonnement hors atmosphère sur surface horizontale $H_0$

La variation de la distance Terre-Soleil entraîne une variation du rayonnement hors atmosphère de plus ou moins 3%. Pour prendre en compte la dépendance du rayonnement hors atmosphère au jour de l'année on utilise la formule suivante :

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \quad (EQ1)$$

avec :  $G_{on}$  le rayonnement hors atmosphère mesuré sur un plan normal au rayonnement au  $n^{ième}$  jour de l'année ( $W/m^2$ )

$G_{sc} = 1367 W/m^2$  est la constante solaire

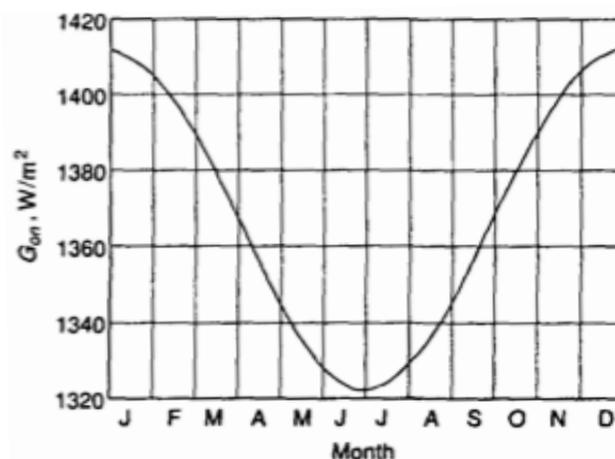


Figure 4 : variation du rayonnement solaire hors atmosphère en fonction des mois de l'année

Pour calculer le niveau de rayonnement, nous utilisons généralement les taux de rayonnements normalisés, c'est-à-dire, le rapport du taux de rayonnement sur la valeur théorique des rayonnements en considérant qu'il n'y a pas d'atmosphère.

À n'importe quel moment, nous considérons le rayon solaire incident sur un plan horizontal hors atmosphère (EQ1) comme le rayonnement solaire normal incident divisé par  $R_b$ :

$$H_0 = G_{on} \cos(\theta_z) \tag{EQ2}$$

En combinant l'équation  $\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega_s) + \sin(\phi) \sin(\delta)$  avec l'équation (EQ2), nous obtenons le rayonnement solaire hors atmosphère sur une surface horizontale  $H_0$  à n'importe quel moment entre le lever et le coucher du soleil :

$$H_0 = G_{on} (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega_s) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \tag{EQ3}$$

Pour calculer le rayonnement solaire journalier, il faut intégrer l'équation (EQ3) sur la période du lever au coucher du soleil pour obtenir le rayonnement journalier hors atmosphère sur surface horizontale :

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \times G_{on}}{\pi} (\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\phi) \sin(\delta)) \tag{EQ4}$$

*NB : Si  $G_{sc}$  est en  $W/m^2$ , alors  $H_0$  est en  $J/m^2$*

Le rayonnement journalier moyen du mois hors atmosphère,  $\overline{H_0}$  est une quantité très utile pour le calcul du rayonnement solaire.

Pour des latitudes de  $+60^\circ$  à  $-60^\circ$ , nous pouvons la calculer avec l'équation (EQ4) en prenant  $n$  et  $\delta$  pour le jour moyen du mois (cf. le tableau ci-dessous).

Month	n for ith Day of Month	For the Average Day of the Month		
		Date	n, Day of Year	$\delta$ , Declination
January	$i$	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

Figure 5 : valeurs moyennes du jour de l'année et de la déclinaison en fonction des mois



$H_0$  est calculé comme une fonction de la latitude pour les hémisphères nord et sud (comme montré **Figure 13** en annexe). Les courbes correspondent aux dates qui représentent le rayonnement moyen du mois, et donc représentent  $\overline{H_0}$ . Les valeurs exactes de  $\overline{H_0}$  pour toutes les latitudes sont données dans le tableau **Figure 14** en annexe.

### 1.2.3. Estimation du rayonnement solaire moyen $\overline{H}$

Les données sur l'ensoleillement sont les meilleures sources d'information pour estimer le rayonnement incident moyen. Dans notre cas, il va falloir utiliser des relations empiriques pour estimer ce rayonnement.

L'équation de régression originale de type Angström est liée au rayonnement journalier moyen par mois dans le lieu choisi et à la fraction moyenne d'insolation :

$$\frac{\overline{H}}{H_c} = a' + b' \frac{\overline{n}}{N}$$

avec :  $\overline{H}$  le rayonnement journalier moyen par mois sur une surface horizontale

$H_c$  le rayonnement journalier moyen par beau temps en fonction du lieu et du mois en question

$a'$  et  $b'$  des constantes empiriques

$\frac{\overline{n}}{N}$  la fraction d'insolation

L'ambiguïté de la fraction d'insolation est due aux mesures expérimentales de la durée d'ensoleillement.  $\overline{H_c}$  est aussi incertain car il se base sur la définition d'un temps clair.

Le manque de précision des données nécessaires au calcul de cette équation ont amené Page et d'autres physiciens à modifier la méthode de calcul, pour la baser sur le rayonnement hors atmosphère sur plan horizontal plutôt que sur le rayonnement par temps clair. L'équation est donc :

$$\frac{\overline{H}}{H_0} = a + b \frac{\overline{n}}{N}$$

avec :  $\overline{H_0}$  le rayonnement hors atmosphère

$a$  et  $b$  des constantes dépendant du lieu : nous les avons déterminé grâce au logiciel SOLO 2000 :  $a = 0,19$  et  $b = 0,62$



**1.2.4. La composante diffuse  $\overline{H}_d$**

**1.1.1.2 L'indice de clarté moyen  $\overline{K}_t$**

Le rayonnement solaire varie d'un jour à l'autre en fonction du beau ou mauvais temps. Nous définissons donc un indice de clarté moyen mensuel  $\overline{K}_t$  qui correspond au rapport du rayonnement journalier moyen par mois sur une surface horizontale par le rayonnement journalier hors atmosphère moyen par mois, soit :

$$\overline{K}_t = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$$

**1.1.1.3 Rapport  $\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}$**

Afin de calculer la composante diffuse et en prenant les valeurs correspondant à notre projet :  $\omega_s < 81,4^\circ$  et  $0,3 \leq \overline{K}_t \leq 0,8$ , nous utilisons la formule suivante :

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,311 - 3,022 \overline{K}_t + 3,247 \overline{K}_t^2 - 1,821 \overline{K}_t^3$$

**1.2.5. La composante directe  $\overline{H}_b$**

Le rayonnement direct moyen est le rayonnement solaire atteignant directement la Terre depuis le soleil. Il est possible de l'évaluer en utilisant un pyrhéliomètre ou bien de le calculer avec la formule suivante :

$$\overline{H}_b = \overline{H} - \overline{H}_d$$

Figure 6 : un pyrhéliomètre



**1.2.6. Formule finale**

Ainsi, en ajoutant toutes les composantes solaires, nous pouvons finalement calculer le rayonnement solaire moyen journalier sur un plan incliné avec la formule suivante (établie en 1972 par Klein d'après une formule de Liu et Jordan en 1962) :

$$\overline{H}_t = \overline{H}_b R_b + \overline{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \overline{H} \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$



### 1.2.7. Application numérique de la formule

Maintenant que nous avons déterminé la formule finale permettant de calculer le rayonnement solaire en fonction de l'angle d'inclinaison du système, il faut procéder aux applications numériques, qui ont été réalisées sur Excel.

Nous avons d'abord fixé la latitude du lieu (Cresprières) et choisi un jour de l'année correspondant à la mi-mars. L'albédo est celui d'une surface sombre. Quant à la durée moyenne du jour, elle a été déterminée à partir du calendrier solaire du mois de mars 2014. Enfin, la durée d'insolation a été trouvée sur le site métrologique de météo France (203h / 31 j).

Voici d'abord un tableau qui présente les résultats numériques des variables qui restent constantes :

Latitude (°)	$\phi$	48,64
Rayonnement hors atmosphère sur plan normal (W/m <sup>2</sup> )	$G_{on}$	1359,4592
Jour de l'année	$n$	75
Albédo	$\rho$	0,15
Durée moyenne du jour (h)	$\bar{N}$	11,95
Durée moyenne d'insolation (h)	$\bar{n}$	6,55
Fraction moyenne d'insolation	$\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$	0,5439
Déclinaison solaire (°)	$\delta$	-2,4177
Angle horaire (rad)	$\omega_s$	1,5231

Voici maintenant un tableau qui présente les résultats numériques de nos calculs sur un **soutien horizontal** ; toutes les données sont moyennes et journalières :

Rayonnement hors atmosphère (kWh/m <sup>2</sup> )	$\bar{H}_0$	6,3694
Rayonnement dans l'atmosphère (kWh/m <sup>2</sup> )	$\bar{H}$	3,2654
Indice de clarté	$\bar{K}_t$	0,5127
Rayonnement diffus dans l'atmosphère (kWh/m <sup>2</sup> )	$\bar{H}_d$	1,3619
Rayonnement direct dans l'atmosphère (kWh/m <sup>2</sup> )	$\bar{H}_b$	1,9036



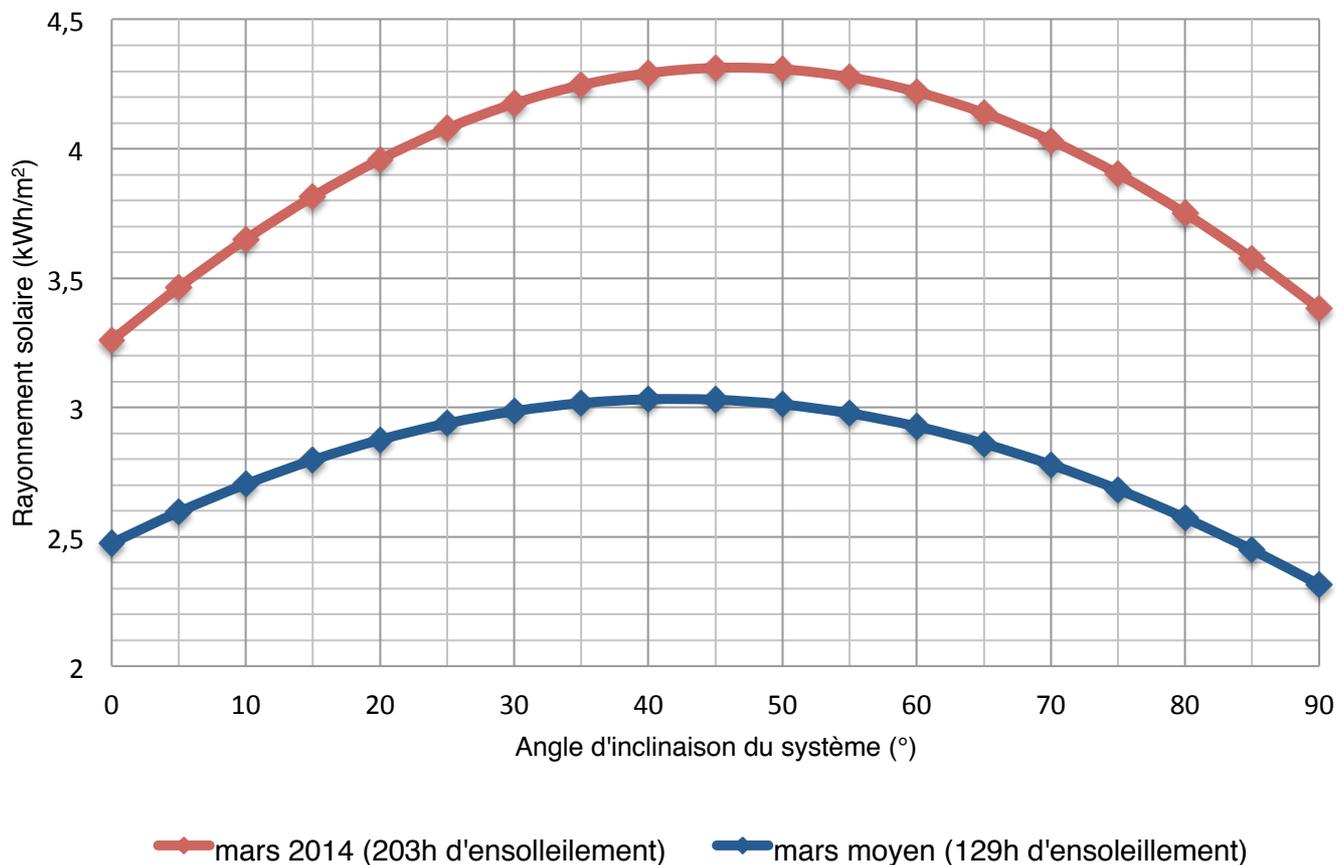
Enfin, voici un tableau qui présente les résultats numériques de nos calculs sur un **support incliné** ; l'angle d'inclinaison varie de 0° à 90° :

Angle d'inclinaison $\beta$ (°)	Rapport $\overline{R}_b$	Rayonnement solaire journalier $\overline{H}_t$ (kWh/m <sup>2</sup> )
0	0,9966	3,259
10	1,2056	3,650
20	1,3779	3,959
30	1,5084	4,175
40	1,5930	4,292
45	1,6173	4,313
50	1,6293	4,308
60	1,6160	4,220
70	1,5536	4,032
80	1,4440	3,750
90	1,2906	3,383

*Nous observons un rayonnement solaire maximal pour un angle d'inclinaison de 45°.*



### Évolution du rayonnement solaire en fonction de l'angle d'inclinaison du système



Comme il nous était possible de modifier aisément le tableur, nous avons aussi effectué les calculs numériques pour un mois de mars moyen, c'est-à-dire avec une durée d'insolation de 129 h pour le mois, et non de 203 h. Ainsi, nous observons un écart important entre les deux courbes. Celui-ci atteint 30% entre les deux valeurs maximales, avec un pic d'ensoleillement à 3,03 kWh/m<sup>2</sup> contrairement à 4,313 kWh/m<sup>2</sup> d'irradiance d'après nos mesures expérimentales.



## 2. PARTIE EXPERIMENTALE

*Nous avons réalisé dans la première partie de notre rapport un modèle théorique du rayonnement solaire. À la fin de cette partie, nous avons trouvé l'angle optimal sur support incliné qui permet de capter au mieux le rayonnement solaire. Celui-ci correspond à  $45^\circ$  pour le milieu du mois de mars. Il faut à présent vérifier ce modèle en réalisant des expériences qui consistent à mesurer le rayonnement solaire en modifiant notre angle de pente. Pour ce faire, nous devons au préalable établir un programme de mesure précis pour les effectuer dans les mêmes conditions. Nous devons choisir pour toutes les mesures le même emplacement, la même orientation, la même durée et des conditions météo à peu près similaires.*

### 2.1. Le solarimètre

Pour mener à bien notre expérience, nous avons effectué nos mesures à l'aide d'un solarimètre prêté par l'INSA.

Le solarimètre SL200 permet le contrôle, en test ou sur site, des équipements à base de capteurs thermiques ou photovoltaïques. Il est composé d'un boîtier et d'une cellule solaire d'une surface active d'un  $\text{cm}^2$ .

Sur le boîtier, SL200 mesure et affiche :

- en instantanée : l'éclairement énergétique ou irradiation pour des mesures ponctuelles en  $\text{W}/\text{m}^2$ .
- sur une durée de mesure horodatée : les valeurs Max et Min, la valeur moyenne de l'éclairement énergétique et l'énergie cumulée en  $\text{Wh}/\text{m}^2$ .

Dans notre recherche de l'angle optimal, nous allons plus particulièrement nous intéresser à l'énergie cumulée par jour et par angle. Nous pouvons aussi comparer la valeur maximale obtenue selon l'angle quand le soleil est à son zénith.

Un logiciel est fourni avec le solarimètre qui permet le paramétrage, la récupération et l'exploitation sur ordinateur des données stockées dans la mémoire sauvegardée de l'appareil. C'est-à-dire qu'il affiche à l'ordinateur les graphiques qui seront exploités dans le but de définir l'angle optimal pour un certain mois de l'année (ici mars).

### 2.2. Le support incliné

Pour mener à bien notre expérience, il nous faut un système capable de modifier l'inclinaison de la face sur laquelle nous mesurerons le rayonnement solaire.

Pour cela, nous avons commencé par imaginer différents systèmes possibles sur papier. Parmi ceux-ci, nous avons différents modèles tel qu'un simple plan soutenu par une tige qui se déplace le long d'un rail fixé au second plan parallèle au sol qui est lui-même relié au premier plan incliné par une tige pivot.



Finalement nous avons opté pour le système décrit ci-dessous.

Matériel nécessaire :

- 1 planche de MDF de 2mm d'épaisseur ;
- 1 planche de MDF de 6mm d'épaisseur ;
- 1 planche de MDF de 10mm d'épaisseur ;
- 1 charnière ;
- 1 tige filetée de 4mm de diamètre ;
- 2 écrous à oreilles ;

Fabrication :

Dans un premier temps, nous avons découpé deux planches de 8x16cm dans les planches de 10mm et 2mm d'épaisseur.



Nous les avons ensuite reliées avec la charnière, en sachant que la planche la plus fine est le support de la cellule du solarimètre.

Puis, nous avons découpé deux quarts de cercle de rayon 8cm dans la planche de 6mm d'épaisseur et percé tous les 5 degrés un trou de 4mm de diamètre. Ces deux pièces servent entre autre de rapporteur.

Enfin, nous avons cloué et collé ces deux quarts de cercle en s'assurant que leur centre coïncident bien avec l'axe de la charnière.

Figure 7 : quart de cercle troué

Utilisation :

Notre support incliné est réglable de 5° à 90° avec un pas de 5°. Il suffit d'insérer la tige filetée dans le trou adéquat et de serrer les deux écrous à oreilles de manière à maintenir le support. Pour avoir un plan horizontal, il suffit d'utiliser la planche qui pose sur le sol. Pendant la durée des expériences, nous avons scotché la cellule active du solarimètre sur le plan incliné le plus loin possible de façon à éviter l'ombrage de la cellule.



Figure 8 : Plan incliné à 15°

Plan incliné à 50°

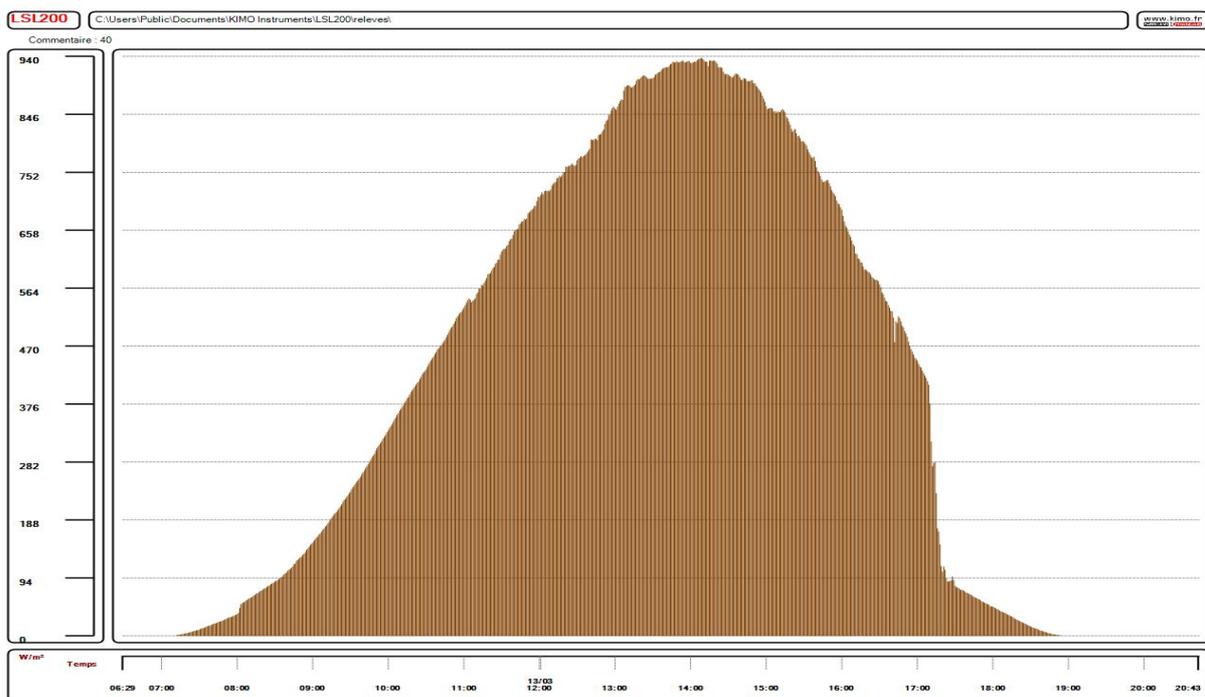


### 2.3. La prise de mesures

Maintenant que nous avons notre système opérationnel, il reste à l'utiliser pour obtenir les résultats de l'expérience. Pour cela, nous avons réalisé 7 mesures sur 7 jours différents sur le début du mois de mars avec un même angle par mesure et par jour. Les expériences ont été réalisées à Crespières dans les Yvelines sur une terrasse exposée plein sud. Nous avons positionné le plan incliné et donc la cellule active du solarimètre plein sud.

N'ayant pas encore obtenu de résultat théorique pour l'angle optimal, nous avons essayé de faire un large éventail d'angles différents allant de 0° à 50° pour l'inclinaison. Nous avons dans un premier temps prévu de faire plus de mesures mais malheureusement la météo n'était plus ensoleillée après la mi-mars et nous ne pouvions monopoliser le solarimètre puisque d'autres étudiants en avait besoin. Nous avons tout de même obtenu sept courbes qui présentent un beau pic. Dans cette partie du rapport, nous ne vous présentons qu'une seule courbe, celle avec un angle de 40°. Toutes les autres sont à la fin du rapport, en annexe, dans un souci de place.

Voici la courbe obtenue le 13 mars 2014 en ayant réglé sur le plan incliné un angle de 40° et en ayant une orientation plein sud :



**Figure 9 : courbe représentant l'irradiance instantanée (en kWh/m<sup>2</sup>) en fonction du temps (en h)**

*Nous remarquons sur la courbe une chute d'irradiance à partir de 17h. Cette chute correspond au fait que l'endroit de l'exposition se retrouve à l'ombre à cette heure de la journée.*



Voici un tableau récapitulatif de toutes les mesures que nous avons effectuées, du 6 au 14 mars 2014.

Angle (°)	0	15	20	30	40	50
Jour	6 mars	9 mars	8 mars	11 mars	13 mars	14 mars
Météo	ensoleillé	ensoleillé	ensoleillé	légèrement nuageux	ensoleillé	ensoleillé
Irradiance globale (kWh/m <sup>2</sup> )	4,122	4,831	4,766	4,624	5,514	5,184
Valeur de l'irradiance maximale (W/m <sup>2</sup> )	644	740	764	768	937	887

## 2.4. Analyse des résultats

### 2.4.1. Comparaison entre le modèle théorique et nos mesures

À présent, nous avons les résultats théoriques et expérimentaux ; nous pouvons donc les comparer afin de voir si ces derniers confirment nos calculs.

Voici un tableau récapitulatif de l'irradiance globale (en kWh/m<sup>2</sup>) selon l'angle d'inclinaison du plan incliné.

Angle (°)	0	15	20	30	40	50
Irradiance globale <b>théorique</b> (kWh/m <sup>2</sup> )	3,259	3,815	3,958	4,174	4,292	4,307
Irradiance globale <b>expérimentale</b> (kWh/m <sup>2</sup> )	4,122	4,831	4,766	4,624	5,514	5,184
Écart relatif entre théorie et pratique (%)	26,5	26,6	20,4	10,8	22,2	16,9

Nous obtenons un écart relatif en général particulièrement élevé par l'absence quasi totale de nuages et un ensoleillement particulièrement élevé. Même si nous avons pris en compte les 203 heures d'ensoleillement au lieu des 129 heures prévues pour le mois de mars, nos mesures ont été réalisées sur 7 jours et non sur le mois entier, ce qui peut expliquer cet écart. D'autre part, les incertitudes liées à la manipulation du support incliné doivent aussi être prises en compte.



L'écart relatif est plus important pour les angles de 0°, 15°, 20°, 40° et 50°. Cela est dû à un ciel bleu sans couverture nuageuse tandis que pour l'angle de 30°, il est plus faible car la couverture nuageuse était plus importante ce jour-là.

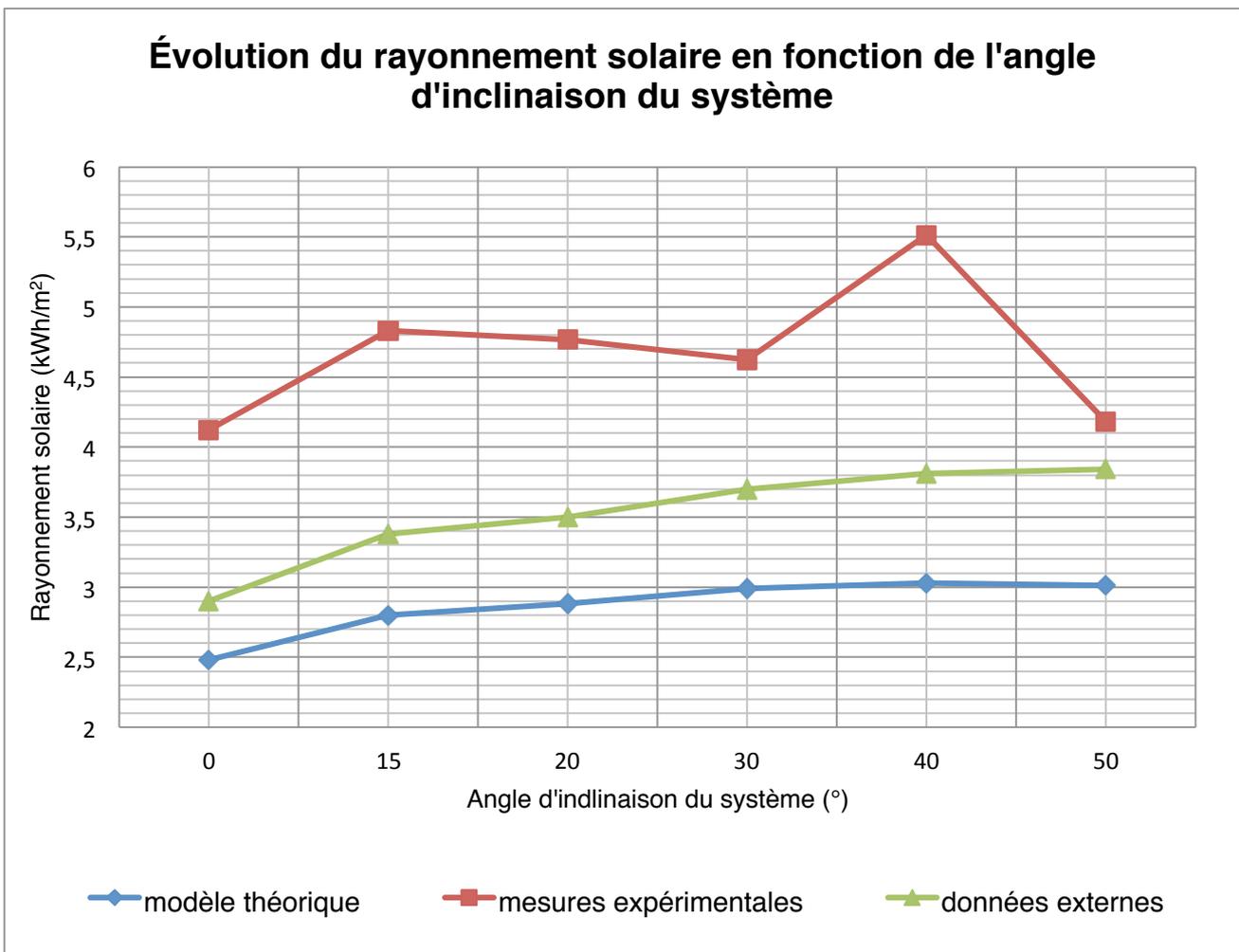
Nous voyons donc que l'angle optimal expérimental serait de 40°. Théoriquement, il est de 45° avec une irradiance de 4,313 kWh/m<sup>2</sup>. Comme les mesures ont été effectuées avant le calcul théorique de l'angle optimal, nous avons essayé de couvrir un intervalle d'angles le plus large possible sur une courte période (à cause de la météo). C'est pour cela que nous n'avons pas de mesure de l'irradiance globale pour un angle d'inclinaison de 45°.

**Nous tenons à rappeler que nos mesures ont été réalisées avec un ensoleillement exceptionnel, ce qui explique que nos valeurs expérimentales sont bien au dessus des valeurs théoriques. Cependant, nous avons préféré réaliser nos mesures dans des conditions météorologiques à peu près similaires (ici, nous avons eu la chance d'avoir une semaine ensoleillée) pour pouvoir vérifier avec le plus de précision possible l'angle optimal.**

#### 2.4.2. Comparaison avec les données externes

À l'aide du logiciel PVGIS Europe, nous avons pu nous procurer les valeurs de l'irradiance globale (équivalent au rayonnement solaire) pour les angles d'inclinaison souhaités. Il suffit juste d'entrer la latitude, l'exposition et l'angle d'inclinaison.

Pour avoir un aperçu global, voici un graphique qui compare les résultats du modèle théorique, de nos mesures expérimentales et des données externes :



Nous remarquons d'abord l'irrégularité de la courbe des mesures expérimentales. Ceci est tout à fait normal puisque les mesures sont instantanées et non pas des moyennes sur plusieurs années, et d'autre part, elles sont très dépendantes de la météo.

Par ailleurs, les courbes du modèle théorique et des données externes sont très proches. Ceci valide encore plus nos calculs. Cependant, il subsiste une légère différence, qui peut être due au modèle de calcul choisi.

En définitive, nous pouvons conclure que l'**angle optimal** d'inclinaison d'une cellule solaire, se trouvant généralement dans un panneau solaire, est de **45° pour une journée entière, pendant le mois de mars et dans les Yvelines**. Le résultat est le même pour la Normandie, se situant juste à côté des Yvelines.

Nous aurions voulu savoir si l'angle était le même pour un autre mois tel que le mois de mai mais malheureusement il n'a pas fait beau assez longtemps pour avoir des mesures correctes et comparatives. Cependant, en toute logique nous n'aurions pas trouvé le même angle puisque le soleil est plus haut dans le ciel plus le solstice est proche. Nous aurions donc trouvé un angle plus bas pour le mois de mai. Les données externes confirment cette supposition ; voici un tableau des résultats :

Angle (°)	0	10	15	20	25	30	40	50	60
Rayonnement solaire (kWh/m <sup>2</sup> )	5,28	5,43	5,47	5,48	5,47	5,42	5,25	4,97	4,59

Selon les données externes, l'angle optimal d'inclinaison pour le mois de mai serait de 20°.

## 2.5. Les applications

### 2.5.1. Les panneaux solaires

Le solarimètre a été conçu pour mesurer la puissance solaire pour le contrôle des installations photovoltaïques et thermiques. Quelle est la différence entre le photovoltaïque et le thermique ?

Les panneaux solaires thermiques convertissent la lumière en chaleur grâce au transfert thermique par rayonnement. Cette chaleur est ensuite communiquée à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) afin de contribuer à la production d'eau chaude.

Quant aux panneaux solaires photovoltaïques, ils transforment directement la lumière en électricité. Ils sont fabriqués à partir de deux couches de silicium cristallin. Ils se décomposent en deux variantes : le monocristallin et le polycristallin. Le rendement moyen du marché est de 14,5%.



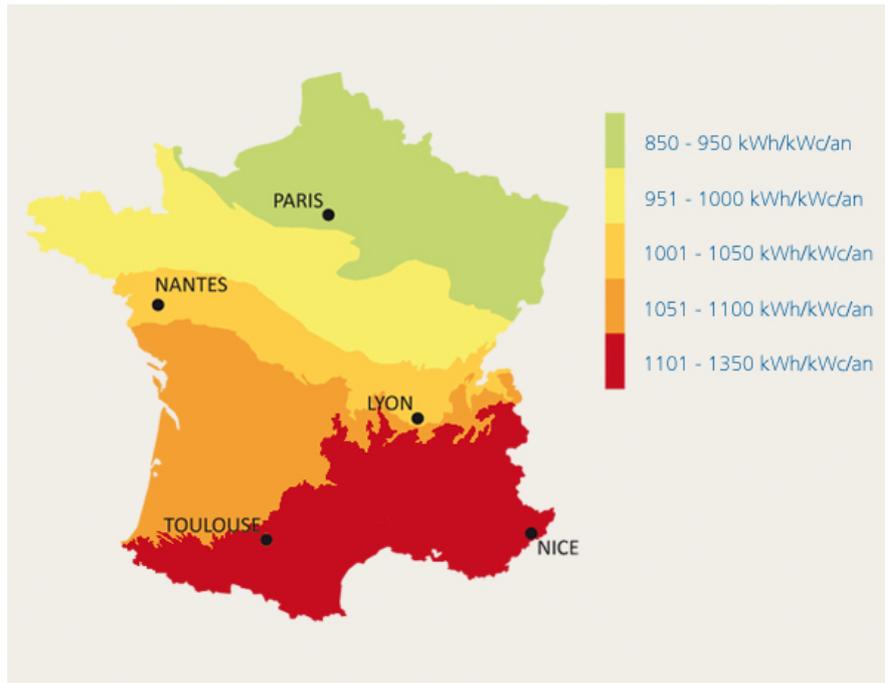


Figure 10 : les niveaux d'ensoleillement en France

Pour convertir au mieux l'énergie solaire en électricité, le photovoltaïque dépend de trois facteurs : la localisation géographique, l'orientation des panneaux et les éventuels ombrages.

Pour améliorer le rendement, les scientifiques ont mis au point de nouveaux panneaux appelés des « trackers solaires » ou suiveurs solaires. Cette technologie est basée sur le principe de l'héliostat ou du tournesol. Ces installations peuvent s'orienter vers le soleil tout au long de la journée ce qui a pour conséquence d'augmenter la production d'énergie solaire. En effet, la position de soleil change durant la journée mais aussi selon les saisons. Le tracker se positionne au mieux par rapport aux rayons solaires (perpendiculaire au rayonnement si possible). Il suit le soleil d'est en ouest à mesure de l'avancée de la journée, appelé en azimut et en hauteur, selon la saison. Néanmoins, beaucoup de trackers suivent seulement en azimut et la hauteur est fixée sur l'angle optimum local.

Un tracker peut augmenter le rendement des panneaux solaires jusqu'à 40% de plus par rapport à une installation fixe plein Sud.

La suivie du soleil se fait soit avec un mécanisme d'horlogerie programmée soit avec un mécanisme d'asservissement. Le mécanisme d'horlogerie se base sur les calculs que nous avons réalisés dans ce projet, en prenant en compte l'orientation optimale en fonction de la saison et l'heure. Le principe d'asservissement est de toujours **réduire l'écart entre l'ensoleillement maximum et l'ensoleillement perçu** par les panneaux en se basant sur une « sonde solaire » et un système de calcul. La puissance utilisée par les trackers pour modifier la position des capteurs est très faible, quelques watts, cela ne constitue pas un inconvénient.

Cependant, pour des raisons de sécurité, ces panneaux doivent être perpendiculaires au sol lors de forts vents.





Figure 11: un tracker ou suiveur solaire

### 2.5.2. L'expérience du tracker solaire

Lors de ce projet, nous avons voulu tester l'efficacité de ces « trackers solaires ». Pour cela, nous avons réalisé une mesure du rayonnement solaire à l'aide de notre solarimètre sur une journée en changeant manuellement la position azimutale **selon un axe** de notre plan incliné. Nous avons réalisé cette mesure avec un angle de  $40^\circ$  pour le plan incliné. Voici la courbe que nous avons obtenue :

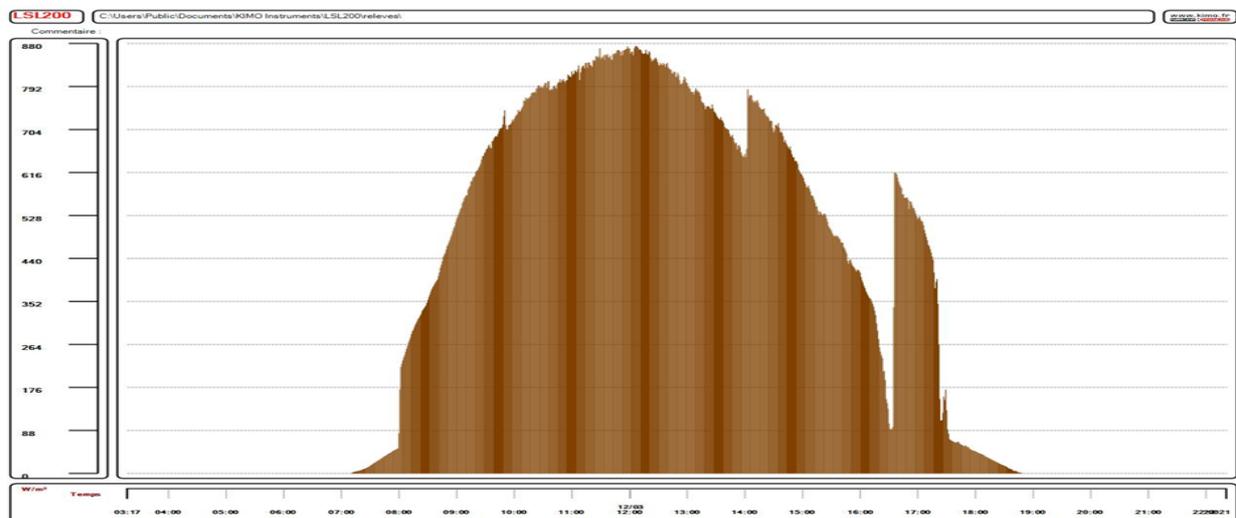


Figure 12: courbe représentant l'irradiance instantanée (en  $\text{kWh/m}^2$ ) en fonction du temps (en h)

*NB : Il existe des trackers solaires qui modifient leur position azimutale selon deux axes, ce qui augmente encore plus leur efficacité.*



Voici un tableau comparant la mesure sans modification azimutale et celle avec modification :

Angle (°)	40	40 (en pivotant)
Jour	13 mars	12 mars
Météo	ensoleillé	ensoleillé
Irradiance globale (kWh/m <sup>2</sup> )	5,514	6,058

Le résultat est impressionnant : avec le même angle, en changeant la position d'est en ouest au cours de la journée nous captions, dans cette expérience, 0,544 kWh/m<sup>2</sup> supplémentaire par rapport à une mesure sur solarimètre fixe. Cela revient à une augmentation de 9,87 %. Cela ne correspond pas aux 40% annoncés plus haut cependant, le mouvement ayant été fait manuellement et environ toutes les heures il est difficile d'être à la position idéale tout au long de la journée.

Cette expérience atteste du meilleur rendement des systèmes utilisant des « trackers solaires » par rapport aux systèmes avec des panneaux fixes.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

L'objectif de ce projet était d'estimer, à la fois théoriquement et expérimentalement l'énergie solaire reçue sur Terre. Nous avons également pu mesurer l'impact de l'inclinaison d'un capteur solaire vis à vis de l'énergie reçue.

Lors de la partie théorique, nous nous sommes basés sur un modèle de calcul qui nous a permis d'avoir une estimation de l'énergie solaire reçue très réaliste, étant donné les multiples variables qu'il prend en compte.

Lors de la phase pratique, nous avons vérifié et confirmé les calculs théoriques et défini l'inclinaison optimale d'un capteur solaire en fonction de la latitude, dans notre cas les Yvelines, et du moment de l'année, plus précisément au mois de mars. Nous avons aussi remarqué que les conditions météorologiques influencent beaucoup l'expérimentation.

Ce projet nous a permis d'appréhender et de mieux comprendre le rayonnement solaire et de découvrir le potentiel de l'énergie solaire. Nous avons pu mettre en évidence l'intérêt d'une démarche scientifique et du travail en équipe ; ainsi nous avons enrichi notre culture scientifique

Les perspectives pourraient être d'étudier l'effet de la variation de la température sur le capteur. L'élévation de la température semble diminuer l'énergie produite. Étudier comment trouver la course optimale des trackers serait également possible, soit avec une commande sur deux axes, soit une commande sur un seul axe.



## APPORTS PERSONNELS

### Mickaël CHIN

Ce projet m'a appris de nombreuses choses. Tout d'abord, il m'a donné l'occasion d'étudier dans le domaine du solaire notamment sur les composantes du rayonnement solaire et de son calcul. Ensuite, il m'a permis de travailler en groupe avec tout ce que cela implique, c'est à dire la répartition du travail et la mise en commun des informations.

### Émilie COOMBS

Ce projet m'a permis d'acquérir des connaissances sur l'énergie solaire avec en premier lieu les différents composants de cette énergie et ensuite comment mesurer et calculer ces composants. Cette culture scientifique me sera très utile car ayant choisi le département EP, je serai amenée à utiliser et à approfondir les connaissances sur l'énergie solaire acquises durant ce projet. J'ai également appris à utiliser un solarimètre et à comprendre les courbes données par celui afin d'en extraire les données importantes. De plus, le travail en équipe pendant ce projet a été bénéfique car je serais amenée dans la vie active à travailler de la même façon.

### Farès TABTI

Ce projet m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances à propos de l'énergie solaire. J'ai ainsi pu étudier en profondeur un modèle de calcul théorique qui permet de calculer avec efficacité le rayonnement solaire sur un plan incliné. J'ai aussi pu développer mon sens du bricolage en confectionnant le support incliné. Par ailleurs, j'ai pu me familiariser avec un outil de mesure, le solarimètre et travailler la compréhension de l'anglais technique. Enfin, ce projet m'a encore mis dans une situation de travail d'équipe, qui est un atout pour mon futur travail d'ingénieur.

### Valentin PETITCOLAS

Ce projet m'a permis d'apprendre à calculer et mesurer l'énergie solaire. J'ai découvert la méthode de calcul et les ordres de grandeurs des composantes solaires. L'analyse et l'interprétation des courbes du rayonnement solaire m'ont permis de développer l'esprit critique. Lors de ce projet j'ai pu améliorer mon sens du travail en équipe et de la communication.

### Ségoène HOUDUS

Pour mon projet de P6, j'ai voulu étudier l'énergie solaire parce que j'avais très peu de connaissances là dessus alors que le sujet m'intéresse énormément. Ainsi, j'ai été très curieuse de plus approfondir ce domaine. De plus, nos principales sources étant en anglais, j'ai trouvé ça très enrichissant d'apprendre et d'utiliser le vocabulaire correspondant dans nos recherches. J'ai également trouvé très formateur de devoir porter un esprit critique sur le projet de l'année précédente. D'ailleurs, c'est en confrontant les idées de chaque membre du groupe que nous avons pu avancer à bonne allure et ne pas rester bloqués trop longtemps sur un point. Finalement, je suis maintenant capable de dire que j'en connais un rayon sur le soleil !

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Lien internet image: <http://naturespicwallpaper.com/sunflower-sun-field-landscape-summer-sky-clouds-nature-wallpaper-for-free-mac/> (valide à la date du 24/05/2014).
- [2] John A. DUFFIE & William A. Beckman, "Solar Engineering of thermal processes", Editeur, 2000.
- [3] lien internet : [http://bib.convdocs.org/docs/4/3305/conv\\_1/file1.pdf](http://bib.convdocs.org/docs/4/3305/conv_1/file1.pdf) (valide à la date du 24/05/2014).
- [4] lien internet : <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf> (valide à la date du 24/05/2014).
- [5] lien internet : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Albédo> (valide à la date du 24/05/2014).
- [6] lien internet : [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1974\\_num\\_83\\_459\\_19632](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1974_num_83_459_19632) (valide à la date du 24/05/2014).
- [7] lien internet: <http://www.meteofrance.com/climat/france/relevés> (valide à la date du 24/05/2014).
- [8] lien internet: [https://donneespubliques.meteofrance.fr/donnees\\_libres/bulletins/BCMR/BCMR\\_10\\_201403.pdf](https://donneespubliques.meteofrance.fr/donnees_libres/bulletins/BCMR/BCMR_10_201403.pdf) (valide à la date du 24/05/2014).
- [9] lien internet: <http://www.meteo-paris.com/actualites/insolation-des-records-d-enseulement-sur-le-nord-en-mars-03-avril-2014.html> (valide à la date du 24/05/2014).
- [10] lien internet: <http://www.photovoltaique-energie.fr/pvgis-logiciel-en-ligne-de-simulation.html> (valide à la date du 24/05/2014).
- [11] lien internet : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=fr&map=europe> (valide à la date du 24/05/2014).
- [12] lien internet image: <http://www.edfenr.com/le-photovoltaique/rendement-des-panneaux-solaires-n800-1.aspx> (valide à la date du 24/05/2014).
- [13] lien internet : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Tracker\\_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tracker_solaire) (valide à la date du 24/05/2014).
- [14] lien internet image : <http://blog.solorea.com/tracker-solaire> (valide à la date du 24/05/2014).
- [15] lien internet documentation : [http://www.kimo.fr/produits/243/sl\\_100.html](http://www.kimo.fr/produits/243/sl_100.html) (valide à la date du 24/05/2014).
- [16] lien image : <http://science-edu.larc.nasa.gov/SCOOL/Francais/definition-fr.html> (valide à la date du 24/05/2014).
- [17] lien image : [http://www.kippzonen.fr/data/images/KippZonen\\_PG5-100\\_on\\_SOLYS2\\_Item.jpg](http://www.kippzonen.fr/data/images/KippZonen_PG5-100_on_SOLYS2_Item.jpg) (valide à la date du 24/05/2014).



## ANNEXES

VARIATIONS DU RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE JOURNALIER SUR SURFACE HORIZONTALE  $\overline{H}_0$ . LES COURBES SONT POUR LE JOUR MOYEN DU MOIS.

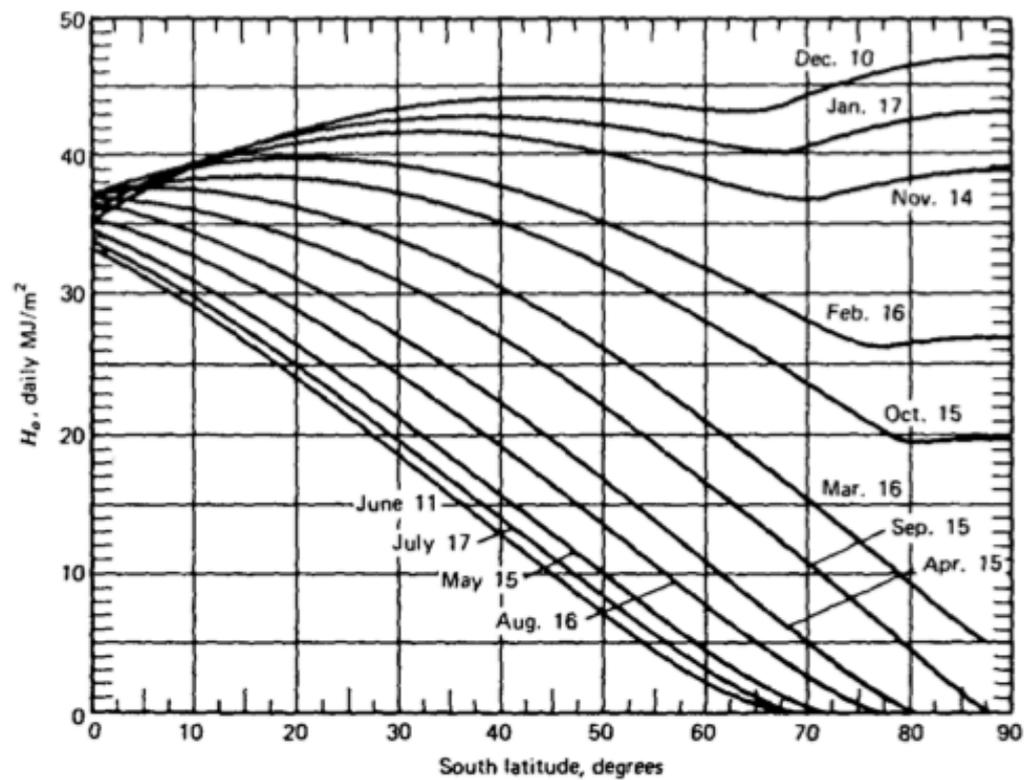
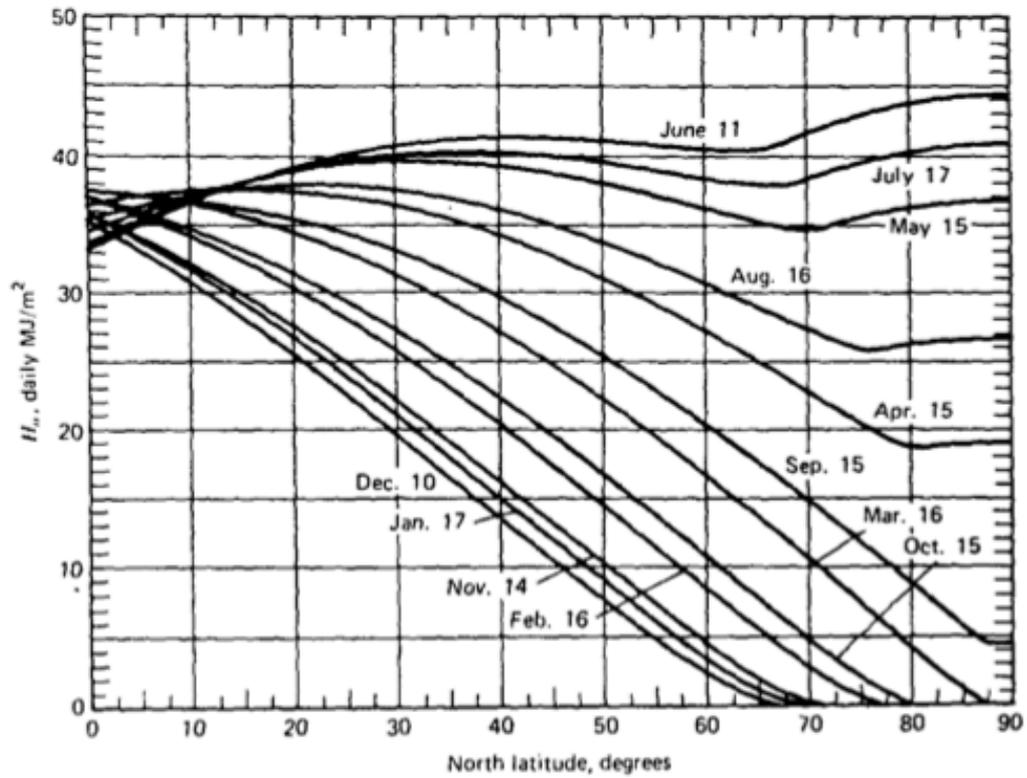


Figure 13

VALEURS MOYENNES DU RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE JOURNALIER SUR SURFACE HORIZONTALE  $\overline{H_0}$  EN MJ/M<sup>2</sup> EN FONCTION DE LA LATITUDE ET DU MOIS.

$\phi$	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	38.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	30.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
-5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
-10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
-15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
-20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.1	34.3	38.6	41.2	42.1
-25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
-30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
-35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
-40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
-45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
-50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
-55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
-60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
-65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
-70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
-75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
-80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
-85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
-90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

Figure 14



## FICHE TECHNIQUE DU SOLARIMETRE



### Fiche de Données Techniques

Pression • Température • Humidité • Vitesse d'air • Débit d'air • Combustion • Acoustique

## Solarimètre SL 100



### ■ Caractéristiques techniques

#### • Instrument SL100

Etendue de mesure puissance solaire	de 1 W/m <sup>2</sup> à 1300 W/m <sup>2</sup>
Etendue de mesure énergie cumulée	de 1 Wh/m <sup>2</sup> à 500 kWh/m <sup>2</sup>
Fréquence de la mesure	2 / s
Exactitude	5% de la mesure
Fréquence de calcul (W/m <sup>2</sup> )	1 / min (moyenne sur 60 secondes)
Capacité de mesure (Wh/m <sup>2</sup> )	3 jours – Résultat sauvegardé à l'arrêt de l'instrument
Température d'utilisation	de -10°C à +50°C
Température de stockage	de -10°C à +55°C
Dimensions du boîtier	58 x 120 x 33 mm
Autonomie	supérieure à 48H en mode continu capacité de mesure avec adaptateur secteur
Alimentation	3 piles LR3-AAA
Electronique	numérique
Carte électronique	vernie
Conformité	conforme aux directives RoHS



#### • Cellule solaire

Réponse spectrale	de 400 à 1100 nm
Sensibilité nominale	100mv pour 1000W/m <sup>2</sup> *
Réponse en cosinus	corrigée jusqu'à 80°
Coefficient en température	+0,1%/°C
Surface active	1 cm <sup>2</sup>
Température d'utilisation	de -30°C à +60°C
Humidité relative en continu	100%HR
Tenue aux UV	excellente (filtre PMMA)
Mode	photovoltaïque
Matériau	Silicium polycristallin
Face avant	PMMA translucide
Etanchéité	Résine PU et boîtier PMMA et polyacétol
Poids de la cellule	60g
Dimensions de la cellule	30 x 32 mm
Longueur du câble déconnectable	1,25 m

\* SL100 est livré avec un certificat d'étalonnage en référence à la RRM (Référence Radiométrique Mondiale)

\*\* Chronométré : la durée de la campagne de mesure est exprimée en JJ/HH/MM/SS



Le solarimètre portable autonome mesure la puissance solaire pour le contrôle des installations photovoltaïques et thermiques en test ou sur site :

#### - Mesure et contrôle ponctuel de la puissance solaire en W/m<sup>2</sup>

- instantanée,
- moyenne,
- valeurs min/max,
- fonction hold

#### - Calcule l'énergie cumulée en Wh/m<sup>2</sup>

durant la campagne de mesure chronométrée\*

#### - Sauvegarde du résultat (Wh/m<sup>2</sup>) à l'arrêt de l'appareil

### ■ SL 100

- Facile d'utilisation, pour un renseignement immédiat
- Estimation des puissances électriques produites et orientation optimale pour l'installation de panneaux solaires et suivi des performances.
- Choix et détermination des caractéristiques des générateurs thermiques ou photovoltaïques.



Pour les professionnels agréés QualiSol - QualiPV, les bureaux de contrôle pour la Garantie Résultat Solaire

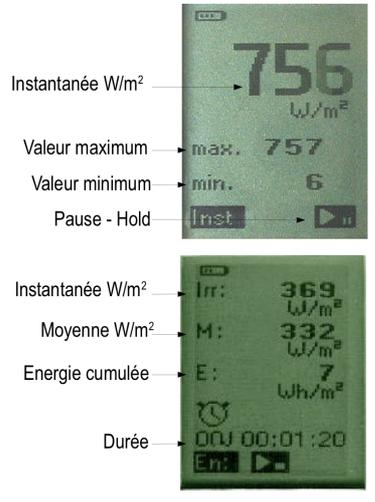


■ **Présentation**



- ① ② ③ Touches fonctions
- ④ Touche effacer et retour à l'écran précédent
- ⑤ Touche écran
- ⑥ Bouton marche / arrêt

**Mesure**



**Réglages**



Régler le contraste et activer le rétroéclairage



Rappeler la date de la dernière vérification



■ **Livré avec ...**

- Valise de rangement et de transport avec mousse de protection
- 3 piles LR3-AAA
- Notice d'utilisation
- Certificat d'étalonnage

■ **En option**

- Trépied
- Kit de fixation pour panneau solaire
- Rallonge : 4 m sur demande (possibilité d'en connecter deux au maximum)
- Adaptateur secteur



FT - SL100 - 10/08/11 - RCS(24) Périgueux 349 282 095 Document non contractuel - Nous nous réservons la possibilité de faire évoluer les caractéristiques de nos produits sans préavis.

[www.kimo.fr](http://www.kimo.fr)



**Siège social et usine**  
Tél : 05 53 80 85 00  
Fax : 05 53 80 16 81

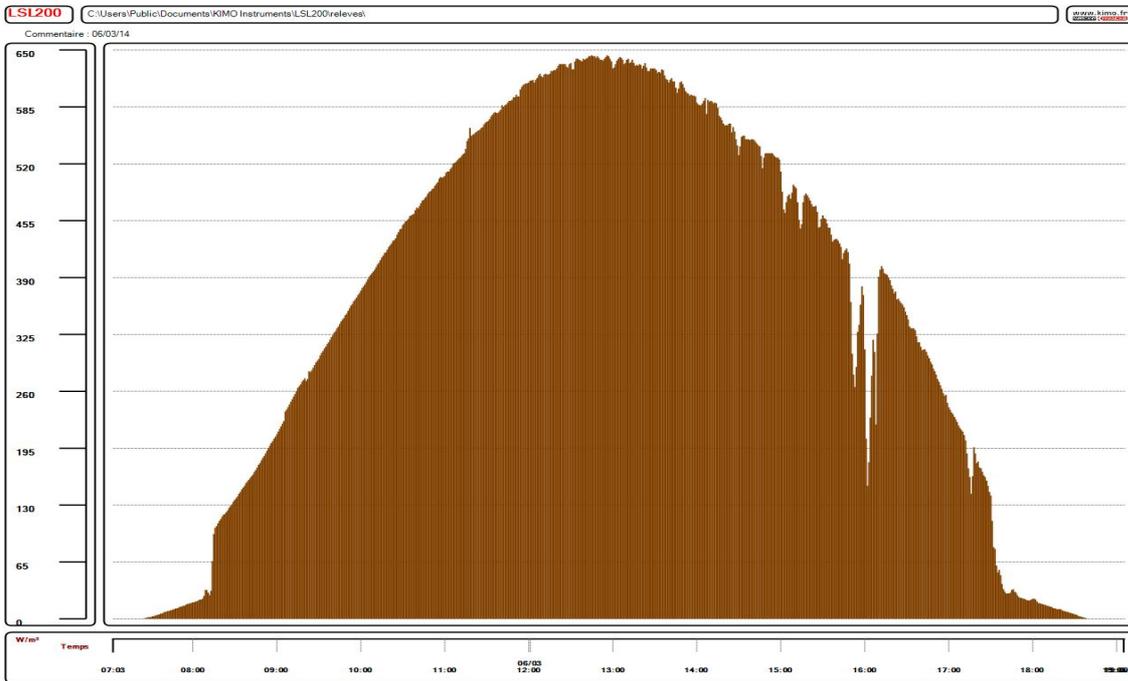
**Agence Rhône Alpes** : Tél : 04 72 15 88 72 - Fax : 04 72 15 63 82  
**Agence Bretagne** : Tél : 02 99 54 77 00 - Fax : 02 99 54 77 09  
**Agence PACA** : Tél : 04 42 97 33 94 - Fax : 04 42 97 33 98  
**Agence Midi Pyrénées** : Tél : 05 61 72 84 00 - Fax : 05 61 72 84 09

**Agence Paris Est** : Tél : 01 60 06 14 72 - Fax : 01 64 80 46 15  
**Agence Paris Ouest** : Tél : 01 30 02 81 20 - Fax : 01 30 02 81 21  
**Agence Est** : Tél : 03 88 48 16 90 - Fax : 03 88 48 22 08  
**Agence Nord** : Tél : 03 20 90 92 95 - Fax : 03 20 90 92 99

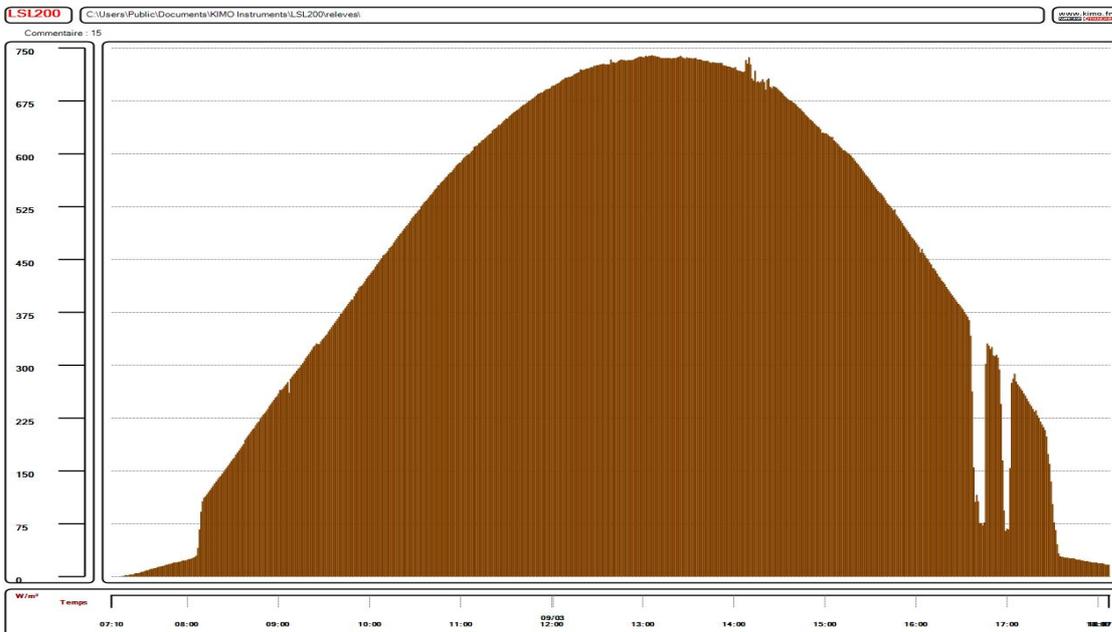


## COURBES DE L'EXPERIENCE PRATIQUE

*Météo : temps ensoleillé pour toutes les mesures*

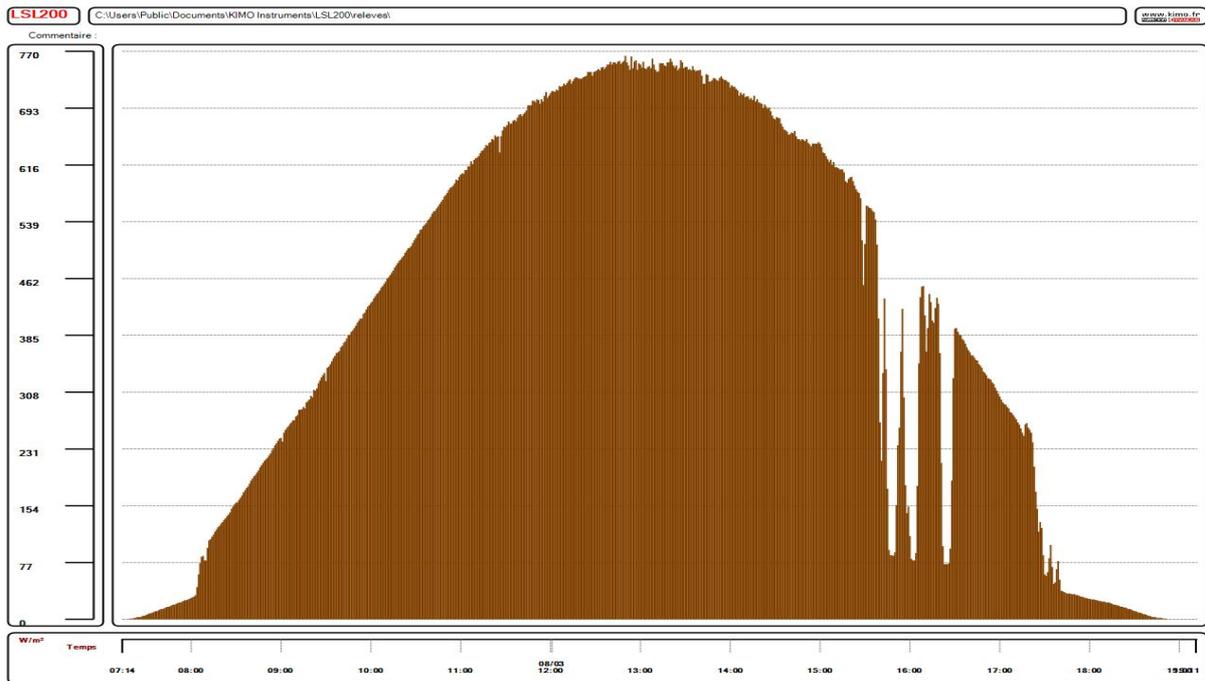


6 mars 2014 : angle 0°  
 Irradiance globale en kWh/m<sup>2</sup> : 4,122  
 Max en W/m<sup>2</sup> : 644

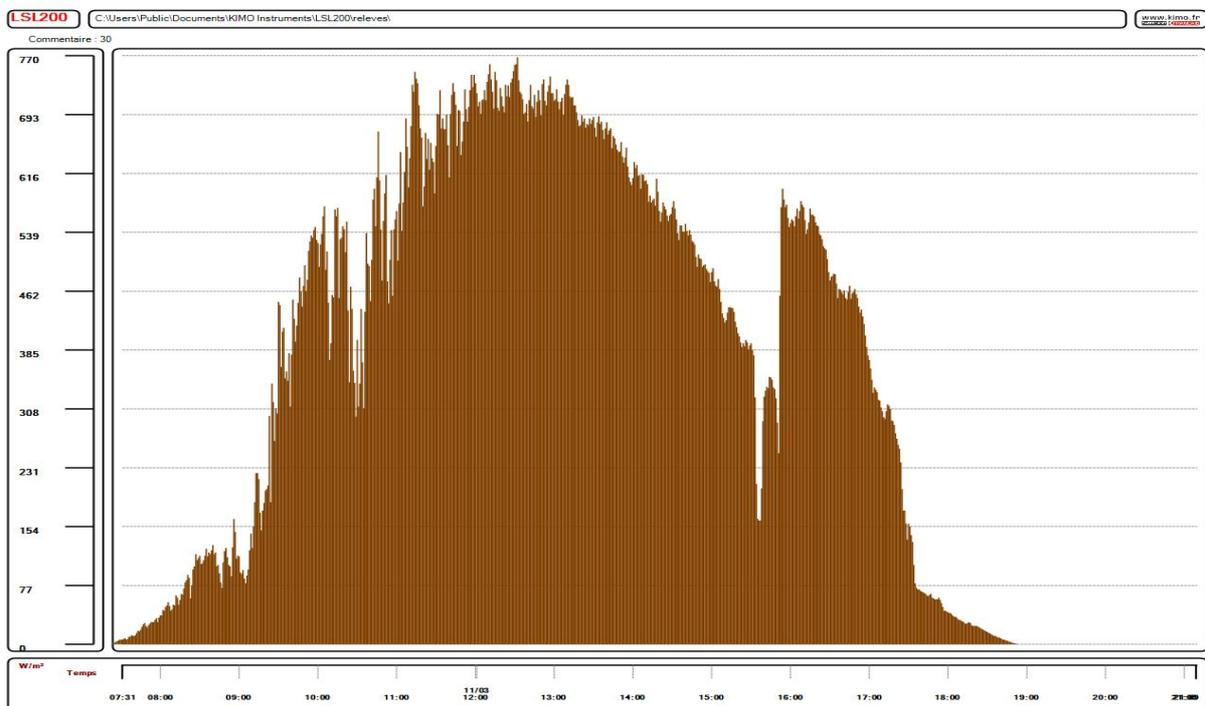


9 mars 2014 : angle 15°  
 Irradiance globale en kWh/m<sup>2</sup> : 4,831  
 Max en W/m<sup>2</sup> : 740





8 mars 2014 : angle 20°  
 Irradiance globale en kWh/m² : 4,766  
 Max en W/m² : 764



11 mars 2014 : angle 30° (quelques nuages)  
 Irradiance globale en kWh/m² : 4,624  
 Max en W/m² : 768

