

Mesures et estimations des composantes solaires sur plan horizontal



Etudiants :

Edouard JEANMOUGIN

Alexandre PELTIER

Ilany LABDAOUI

Mathilde VANFLETEREN

Massyl LAGHA

Jiakun YANG

Enseignant-responsable du projet :

Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **17/06/2012**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2012 – 10**

Intitulé du projet : **Mesures et estimations des composantes solaires sur plan horizontal**

Type de projet : **Bibliographie / Calcul / Expérimentation**

Objectifs du projet :

L'objectif principal du projet est le calcul des composantes solaires de façon expérimentale et théorique. La méthode expérimentale se fera à travers l'utilisation d'un outil de mesure spécifique : le solarimètre. La méthode théorique quant à elle se fera à travers le recours à un des modèles mathématique déjà existant. Une comparaison des deux méthodes sera ensuite faite pour en évaluer la fiabilité de manière bilatérale. Pour des raisons évidentes, nous avons choisi Rouen pour effectuer nos mesures. Ce projet a aussi pour but d'améliorer nos capacités à mener des projets en groupe.

Mots-clefs du projet : **Solarimètre, énergie, composante, solaire**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	5
2. Organisation du travail	6
3. Définition des composantes solaires	8
4. Estimations des composantes solaires sur un plan horizontal	9
4.1. Données initiales	9
4.1.1. Jour de l'année	9
4.1.2. Latitude	9
4.1.3. Insolation	9
4.2. Variables calculées	9
4.2.1. La déclinaison solaire	9
4.2.2. La constante solaire	9
4.2.3. L'angle horaire ω	10
4.2.4. La fraction d'insolation solaire σ	10
4.2.5. La constante solaire sur surface horizontale hors atmosphère C_{hi}	10
4.2.6. L'irradiation sur un plan horizontal au sol G_{hi}	11
4.2.7. L'indice de clarté K_t	11
4.2.8. Rapport R_{diffh}/G_{hi}	11
4.2.9. Le rayonnement diffus sur plan horizontal R_{diffh}	11
4.2.10. Le rayonnement direct sur plan horizontal au sol $R_{directh}$	11
5. Mesures expérimentales	13
5.1. Utilisation du solarimètre	13
5.2. Résultats expérimentaux	15
5.2.1. Comparaison expérimentale entre les composantes solaires	17
5.2.2. Confrontation des mesures à d'autres modèles	18
6. Apports du projet	21
7. Conclusion et perspectives	21
8. Bibliographie	23
9. Annexes	24
9.1. Documentation technique	24

1. INTRODUCTION

L'homme durant son évolution a eu, au fil du temps, un besoin grandissant en énergie. Il a tout d'abord commencé par la puiser dans le vivant, que ce soit en lui ou dans les animaux qu'il a réussi à domestiquer. Il s'est ensuite tourné vers les énergies fossiles, telles le charbon et le pétrole. Aujourd'hui, face à la menace grandissante du manque de pétrole dans le monde et dans un souci d'écologie, nous nous trouvons dans l'obligation de faire appel aux énergies renouvelables.

On nomme énergie renouvelable toute forme d'énergie dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine. Il faut noter que le soleil est la principale source d'énergie renouvelable, ce qui en fait le candidat parfait pour se tourner vers une production d'énergie plus propre. Cette perspective nous met très vite face aux questions : Comment se présente cette énergie ? Selon quels paramètres varie-t-elle? Comment la mesurer? C'est à ces interrogations là que nous allons essayer de répondre à travers ce projet. D'une part en exposant l'outil de mesure mis à notre disposition : un solarimètre. D'autre part en confrontant les résultats obtenus aux modèles théoriques présentés par John DUFFIE et William BECKMAN dans leur ouvrage Solar Engineering for Thermal Process. Nous avons par ailleurs confronté les mesures prises à d'autres résultats expérimentaux facilement accessibles sur internet. Les comparaisons ont été fructueuses et le modèle théorique s'est donc avéré bon et assez représentatif de la réalité.

Le calcul des composantes solaires recèle une importance primordiale dans l'implantation des panneaux solaires. Particulièrement, quand on considère le coût élevé des panneaux photovoltaïques, principal argument utilisé par les réfractaires des énergies renouvelables pour entraver la généralisation de l'énergie solaire. La méthode exposée dans ce dossier montre qu'il est possible d'effectuer des calculs très précis de l'énergie solaire pouvant être captée à un endroit donné. Elle montre aussi que ces calculs peuvent être confirmés par la prise de mesures expérimentales. Il est ainsi possible d'estimer l'apport économique d'une installation solaire avant sa mise en place. Ce qui permet d'éviter d'éventuelles erreurs d'investissement.

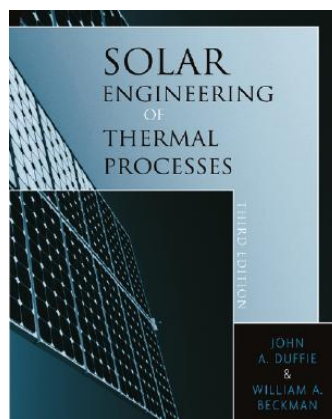


Figure 1 : Couverture de la principale source utilisée



2. ORGANISATION DU TRAVAIL

Dès la première séance, nous nous sommes rendu compte que nos connaissances au niveau des composantes solaires et de la manière de les mesurer étaient très limitées. En effet, notre professeur encadrant nous a distribué à chacun une feuille lors de la première séance sur laquelle il nous était demandé d'estimer notre niveau de connaissance (avec une note de 1 à 10) sur des sujets concernant le projet : spectre solaire, composantes de l'énergie solaire, ordres de grandeurs des composantes solaires, calculer les composantes solaires et mesurer les composantes solaires.

Nous devons aussi noter de 1 à 10 certaines de nos compétences relatives à la conduite de projet : travail en équipe, démarche scientifique, prestation orale et écrite, autonomie ...

Grâce à cette feuille nous avons très vite réalisé notre faible niveau de connaissances concernant le sujet du projet et qu'il allait falloir pallier à ce manque. En revanche nous avons estimé que notre niveau de travail en équipe allait être un avantage. En effet, les différents projets que nous avons conduit à l'INSA nous y ont préparés.

Nous avons donc décidé de commencer par chercher des ouvrages sur le sujet et des informations sur internet. Sur internet, les informations que nous avons trouvées n'étaient pas satisfaisantes : à part quelques articles très bien détaillés sur Wikipedia, le reste était confus et parfois contradictoire.

En revanche, en ce qui concerne les livres, nous avons trouvé tout ce dont nous avons besoin, notamment dans Solar Engineering of Thermal Processes par John A. DUFFIE et William A. BECKMAN. Ce livre est complet et détaillé, et il nous a permis de comprendre tous les aspects que nous aurions à traiter dans ce projet physique.

Après avoir récolté ces informations, nous avons décidé de nous répartir le travail afin d'être plus efficaces (schéma sur la page suivante) : Trois étudiants pour se pencher sur l'aspect expérimentale du projet (mesures au solarimètre, recherche de bases de données externes, mise en critique des résultats...) et trois étudiants pour estimer les composantes solaires de manière plus théorique.

Une fois ceci effectué, nous avons comparé les valeurs expérimentales que nous avons récoltées aux valeurs attendues d'après le modèle théorique.



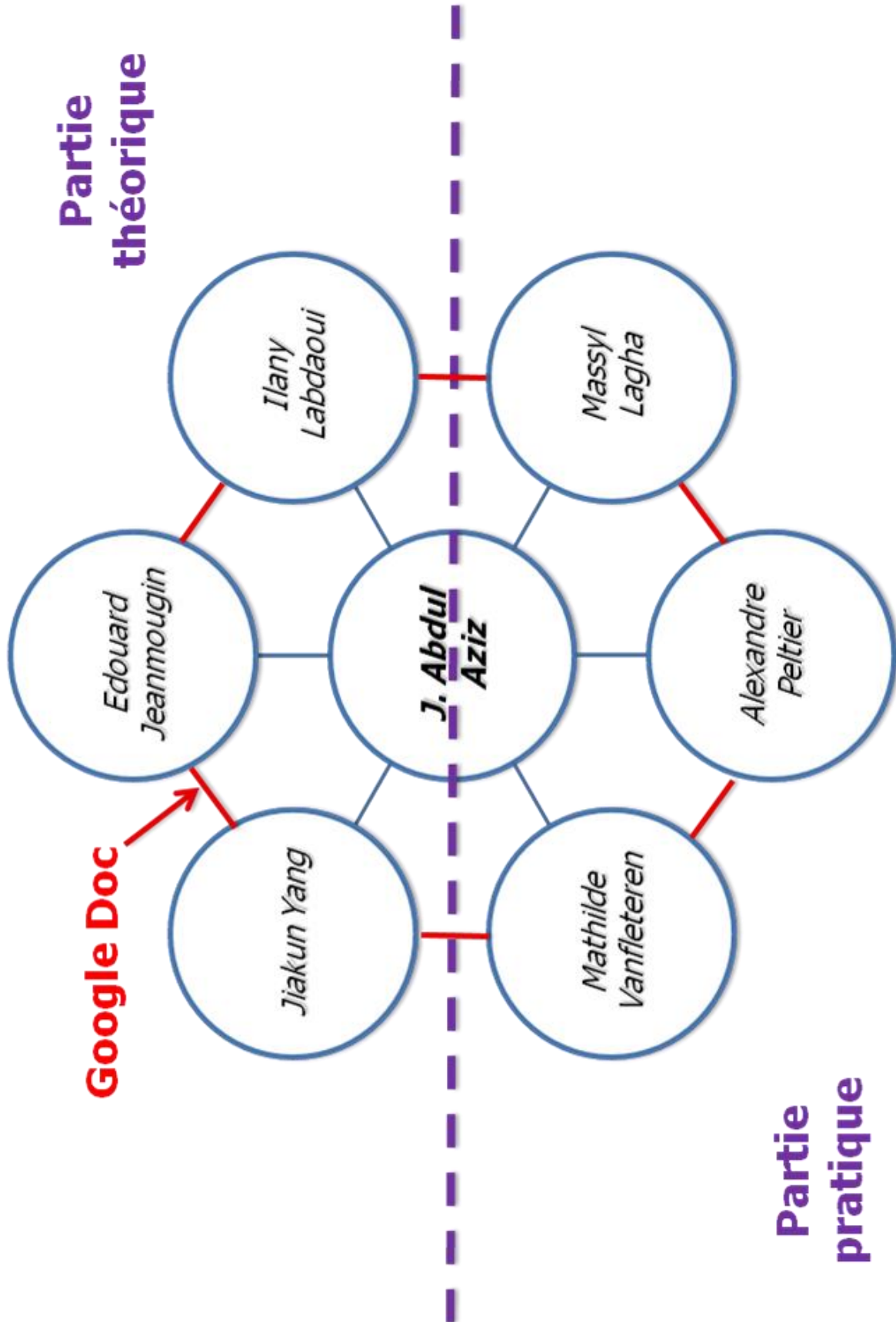


Figure 2 : Schéma de la répartition globale du travail au sein du groupe



TRAVAIL REALISÉ ET RESULTATS

3. DEFINITION DES COMPOSANTES SOLAIRES

Dans tout travail scientifique, avant d'entamer les calculs il faut d'abord définir les grandeurs à calculer. Nous allons donc commencer par définir ce que sont les composantes solaires.

On appelle composantes solaire la densité de flux d'énergie thermique émise par le soleil, atteignant une paroi ; elle est calculée en W/m^2 . Les composantes solaires sont au nombre de trois :

- La composante directe représente le flux solaire atteignant directement la paroi exposée au soleil ;
- la composante diffuse représente le flux solaire atteignant la paroi après avoir subi une diffusion due aux nuages et aux gaz atmosphériques ;
- la composante réfléchi représente le flux solaire réfléchi par les nuages avant d'atteindre la paroi.

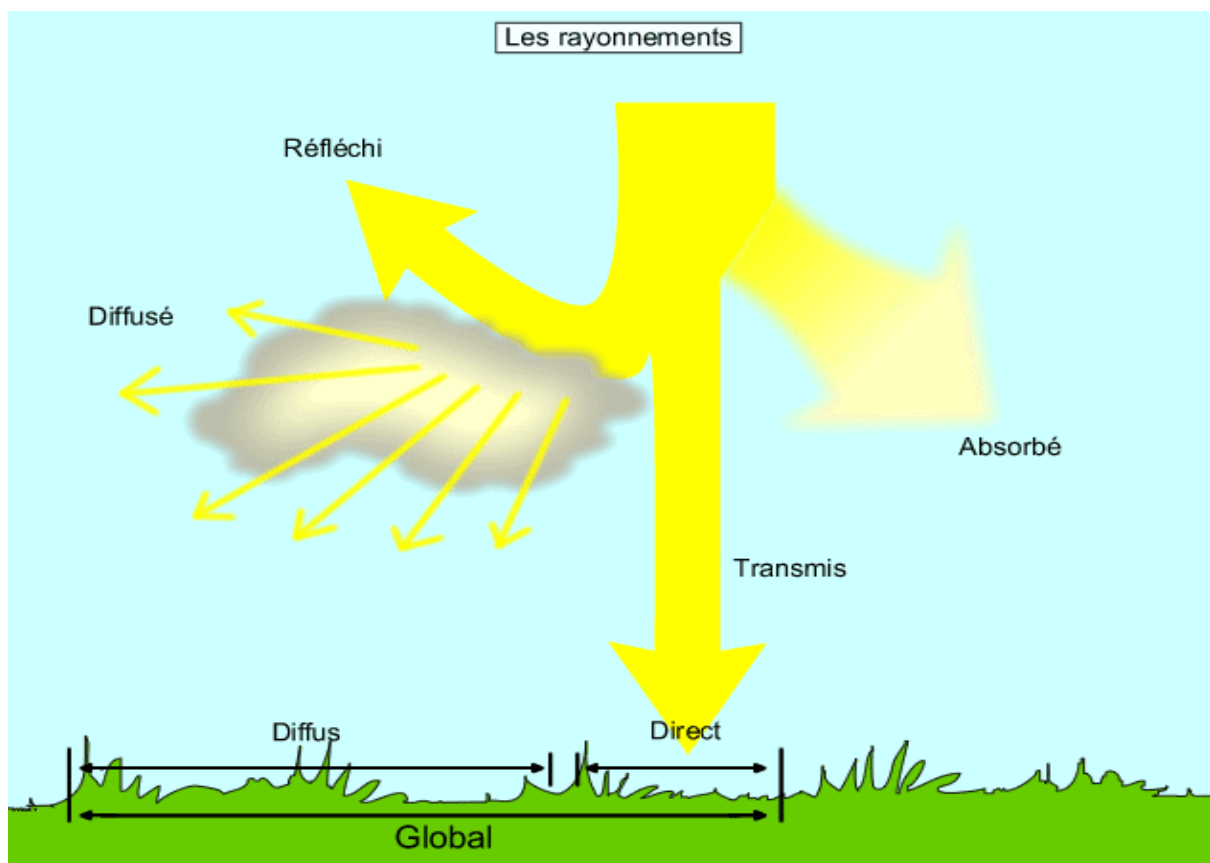


Figure 3 : Schéma explicatif des composantes solaires

Nous allons nous intéresser lors de notre projet aux deux premières composantes dont la somme est appelée composante solaire globale.



4. ESTIMATIONS DES COMPOSANTES SOLAIRES SUR UN PLAN HORIZONTAL

4.1. Données initiales

4.1.1. Jour de l'année

Nombre compris entre 1 et 366 correspondant au jour de l'année, le compte commençant au premier janvier.

4.1.2. Latitude

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Lorsque reliés entre eux, tous les endroits de la Terre ayant une même latitude forment un cercle, cercle dont le plan est parallèle à celui de l'équateur, d'où l'autre terme «parallèle» permettant de nommer une latitude.

4.1.3. Insolation

Insolation correspond à la durée, calculée en heure, où la valeur de la composante solaire directe est supérieure à 120 W/m².

4.2. Variables calculées

Il existe différentes manières d'estimer les composantes solaires sur un plan horizontal. Dans tous les cas de figures, les variables utilisées pour l'estimation se doivent d'être les plus précises possible afin d'optimiser au mieux notre calcul. C'est précisément ce mode de calcul que nous allons développer dans cette partie en présentant les variables recherchées, les variables initiales qui vont nous servir dans le calcul et les équations utilisées.

Afin de calculer au mieux notre rayonnement solaire nous allons devoir déterminer des valeurs que nous allons présenter ci-après.

4.2.1. La déclinaison solaire

La déclinaison solaire notée δ est un angle mesuré en degré. C'est l'angle entre la direction Soleil-Terre et le plan équatorial. Une équation a été établie par le physicien américain Leon Neil Cooper en 1969 :

eq 1.
$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right)$$

Cette équation dépend du jour de l'année n auquel on veut établir la déclinaison.

4.2.2. La constante solaire

« La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface d'un mètre carré située à une distance d'une unité astronomique (distance moyenne terre-soleil) exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil si l'atmosphère terrestre n'existait pas. » (Wikipédia)



C'est une «fausse constante» : en effet la constante solaire correspond à un pourcentage de sa valeur actuelle fixée à $1\,360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$; cela s'explique par la hausse d'intensité des rayons émis par le soleil. Par exemple dans 4,7 milliards d'années la puissance solaire sera 67% supérieure à aujourd'hui. Et pour se rendre compte de l'impact sur la constante solaire, il est intéressant de noter que la constante solaire au cours du Trias (l'ère des dinosaures), la constante solaire était 2,5% moins élevée qu'aujourd'hui.

Afin de déterminer la constante solaire, nous utilisons la formule suivante :

eq 2.
$$Con = Ccs[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365}n\right)]$$

Avec

- $Ccs = 1361 \text{ W.m}^{-2}$

4.2.3. L'angle horaire ω

L'angle horaire, aussi appelé angle solaire est un angle mesuré en radian (rad). Cet angle est directement lié à notre position dans le monde. En effet, cet angle dépend d'un côté de la latitude mais aussi de la déclinaison solaire.

eq 3.
$$\omega = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \times \tan(\delta))$$

4.2.4. La fraction d'insolation solaire σ

La fraction d'insolation solaire est le rapport entre l'insolation et la durée du jour. Sa formule est la suivante :

eq 4.
$$\sigma = \frac{d_i}{d_j}$$

Avec

- d_i : durée d'insolation ;
- d_j : durée du jour.

4.2.5. La constante solaire sur surface horizontale hors atmosphère C_{hi}

Elle est mesurée en kWh/m².jour. Sa formule est :

eq 5.
$$C_{hi} = \left(24 \times 3600 \times \frac{Con}{\pi}\right) \times \left(\frac{Con}{1361}\right) \times \cos\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) \times \cos\left(\delta \frac{\pi}{180}\right) \sin \omega + \omega \times \sin\left(\varphi \times \frac{\pi}{180}\right) \times 0.2778 \times 10^{-6}$$

Avec

- Φ : la latitude ;
- δ : déclinaison solaire ;
- ω : angle horaire ;
- Con : constante solaire hors atmosphère.



4.2.6. L'irradiation sur un plan horizontal au sol G_{hi}

Elle est liée d'une part à deux coefficients A et B qui dépendent directement de la climatologie locale. Nous retiendrons par la suite : $A=0,19$ et $B=0,62$. Elle dépend aussi de la constante solaire sur un plan horizontal hors atmosphère C_{hi} et de la fraction d'insolation solaire σ .

eq 6.
$$G_{hi} = C_{hi} \times (0.19 + 0.62\sigma)$$

4.2.7. L'indice de clarté K_t

Grâce à la définition de l'irradiation sur un plan horizontal ci dessus, nous pouvons définir une nouvelle grandeur appelée l'indice de clarté. Cet indice est obtenu à partir du rapport entre l'irradiation sur un plan horizontal et la constante solaire sur surface horizontale hors atmosphère.

eq 7.
$$K_t = \frac{G_{hi}}{C_{hi}}$$

4.2.8. Rapport R_{diffh}/G_{hi}

eq 8.
$$\frac{R_{diffh}}{G_h} = \begin{cases} 0.99 & \text{si } K_t \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_t + 9,473K_t^2 - 21.865K_t^3 + 14.648K_t^4 & \text{si } 0.17 < K_t \leq 0.75 \\ 0.632 - 0.54K_t & \text{si } 0.75 < K_t \leq 0.8 \\ 0.2 & \text{si } K_t > 0.8 \end{cases}$$

4.2.9. Le rayonnement diffus sur plan horizontal R_{diffh}

Le rayonnement diffus consiste en la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et aussi en sa réfraction par le sol.

eq 9.
$$R_{diffh} = \frac{R_{diffh}}{G_{hi}} \times G_{hi}$$

4.2.10. Le rayonnement direct sur plan horizontal au sol $R_{directh}$

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la terre depuis le soleil. Sa valeur dépend de l'épaisseur de l'atmosphère et de l'inclination des rayons par rapport au soleil. On l'obtient en utilisant la formule suivante ou bien un pyréliomètre qui est un instrument permettant la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct.

eq 10.
$$R_{directh} = G_{hi} - R_{diffh}$$



Pour finir, voici un tableau récapitulant l'ensemble de nos calculs pour la ville de Rouen :

	Jan	Fev	Mar	avril	mai	juin	juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Déclinaison δ (deg)	-20,9	-12,95	-2,42	9,42	18,79	23,09	21,18	13,45	2,22	-9,6	-18,91	-23,05
Durée du jour d_j (h)	8,49	9,94	11,63	13,48	15,1	15,95	15,56	14,15	12,34	10,49	8,88	8,05
Jour de l'année n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
Latitude Φ (deg)	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25
Insolation d_i (h)	1,69	2,69	4,3	5,27	6,36	7,06	6,71	6,5	5,28	3,74	2,2	1,51
Angle horaire ω (rad)	1,11	1,3	1,52	1,76	1,98	2,09	2,04	1,85	1,62	1,37	1,16	1,05
Fraction insolation solaire σ	0,2	0,27	0,37	0,39	0,42	0,44	0,43	0,46	0,43	0,36	0,25	0,19
Cte solaire (W/m^2)	1404	1392	1373,4	1350,47	1330,28	1318,85	1317,68	1329,17	1348,97	1371,91	1392	1403,01
C_{hi} (kWh/m^2)	2,72	4,27	6,38	8,71	10,43	11,15	10,73	9,29	7,14	4,83	3,06	2,32
G_{hi} (kWh/m^2)	0,85	1,53	2,68	3,77	4,71	5,18	4,91	4,41	3,25	1,99	1,05	0,71
Clarté K_t	0,31	0,36	0,42	0,43	0,45	0,46	0,46	0,47	0,46	0,41	0,34	0,31
R_{diffh}/G_h	0,87	0,83	0,74	0,72	0,69	0,67	0,68	0,65	0,68	0,75	0,84	0,88
R_{diffh}	0,75	1,26	1,99	2,72	3,25	3,46	3,34	2,86	2,22	1,5	0,89	0,63
$R_{directh}$	0,11	0,27	0,69	1,05	1,46	1,72	1,57	1,55	1,03	0,49	0,17	0,08



5. MESURES EXPERIMENTALES

5.1. Utilisation du solarimètre



Figure 4 : Photographie du solarimètre utilisée

Afin de pouvoir comparer nos valeurs théoriques avec la réalité, l'INSA de Rouen nous a confié un solarimètre durant toute la durée de notre projet. Cet appareil de mesure a été indispensable à la réalisation de notre exposé et nous a permis d'expliciter toutes les valeurs que nous avons obtenu théoriquement.

La marque de notre solarimètre est KIMO et son modèle est LSL 200. Ce solarimètre est un appareil portable autonome qui mesure et affiche:



- L'éclairement énergétique ou irradiation, correspondant à la composante solaire globale, pour des ponctuelles en W/m^2 ;
- les valeurs minimales et maximales pour une durée horodatée;
- la valeur moyenne de l'éclairement énergétique pour une durée horodatée ;
- l'énergie cumulée ou exposition énergétique en Wh/m^2 pour une durée horodatée.

L'ensemble des valeurs est directement accessible sur l'écran ce qui permet une interprétation rapide. Néanmoins les données sont également transférables vers un ordinateur pour une exploitation directe.

Le capteur du solarimètre est composé d'une cellule en silicium contrainte, peu sensible aux variations thermiques. Il absorbe le rayonnement solaire grâce à un diffuseur et à un filtre de correction.

Il faut savoir qu'avant même la mise en marche de l'appareil, il y a des paramètres à prendre en compte. En effet il faut impérativement positionner et orienter le solarimètre selon les plans de positionnement des capteurs solaires, éviter les zones d'ombre présentes ou à venir et éloigner l'appareil des zones réfléchissantes.

La mise en marche de l'appareil est très simple, il suffit d'appuyer sur la touche d'allumage et l'écran de mesure apparaît directement. Il nous suffit juste de presser le bouton PLAY pour débiter l'enregistrement des valeurs et réitérer l'opération pour le terminer. Nous avons ensuite branché l'appareil à l'ordinateur afin de pouvoir exploiter nos données.

Comme nous habitons tous dans les résidences étudiantes de l'INSA il, n'a pas été facile de prendre des mesures étant donné qu'il fallait le mettre dans un jardin, dans un espace dégagé. Nous avons donc profité du week-end pour pouvoir utiliser au mieux le solarimètre.

Les premières mesures ont été faites par Massyl à Caen en Basse-Normandie, le 23 Avril 2012. Caen est positionnée à $40^{\circ}10'59''$ Nord et $0^{\circ}22'10''$ Ouest. Par la suite Mathilde s'est occupée des prises de mesures à Bernay en Haute-Normandie, le 30 Avril 2012. Bernay est positionnée à $49^{\circ}05'22''$ Nord et $0^{\circ}35'57''$ Est. Nous avons rigoureusement suivi les conseils d'utilisation en posant le solarimètre à un endroit plat, pour que la cellule photovoltaïque soit sur un plan horizontal, en vérifiant qu'aucun arbre ne puisse lui faire de l'ombre.



5.2. Résultats expérimentaux

Les graphiques ainsi que les tableaux de valeurs qui vont suivre ont été obtenus à partir des mesures prises et grâce au logiciel fourni avec le solarimètre. La lecture sur les graphiques étant difficile à cause de la taille de la police, une version agrandie de chaque courbe a été mise en annexe.

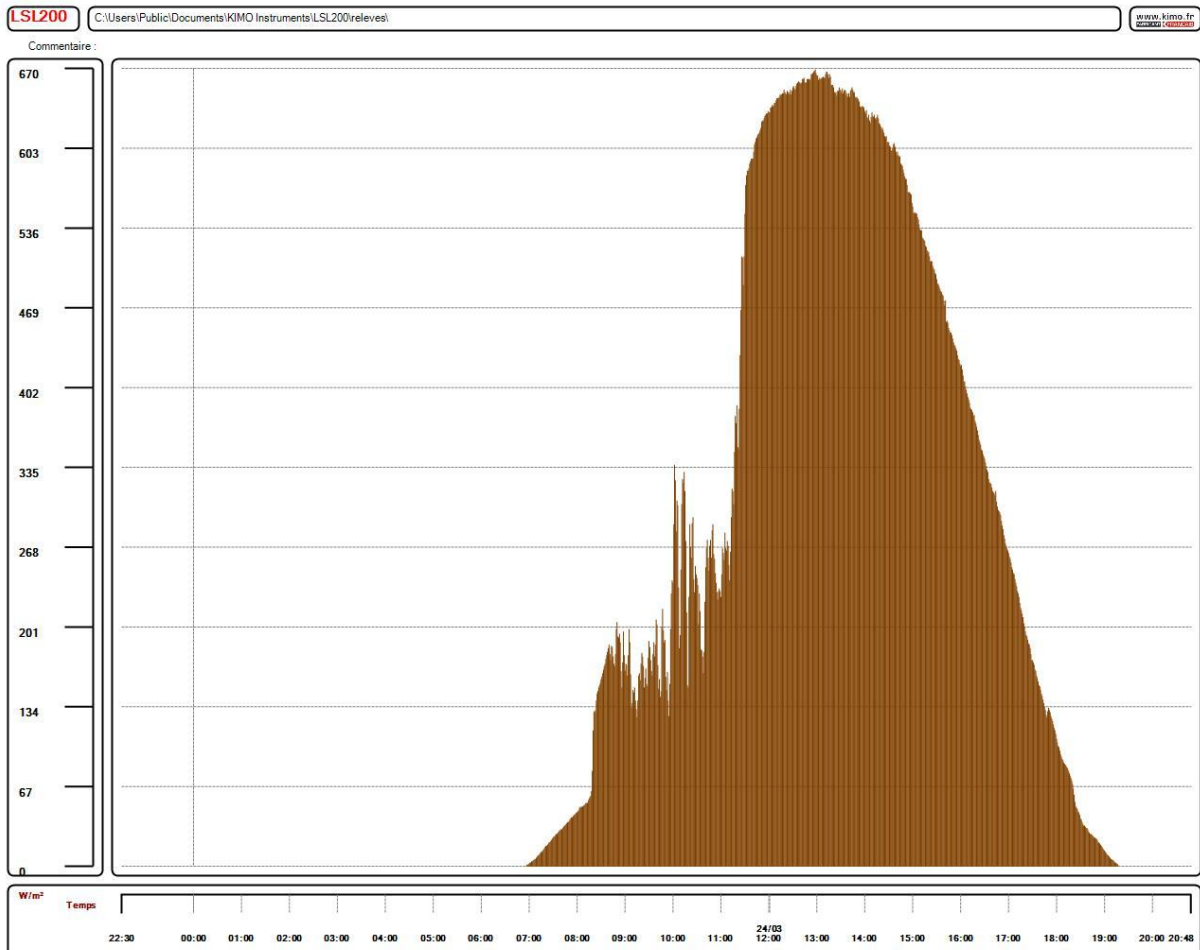


Figure 5 : Graphique de mesures de la composante globale en fonction du temps sur 24h (Caen le 23/03/2012)

Statistiques globales

Minimum	0 W/m ²
Maximum (à 13 :13)	669 W/m ²
Moyenne	180 W/m ²
Irradiation globale	4021 Wh/m ²

Comme mentionné plus haut, la première mesure fut effectuée à Caen. La journée ayant été exceptionnellement ensoleillée, les résultats obtenus furent au dessus de la moyenne théoriquement estimée à 2676 Wh/m² d'irradiation globale. On peut aussi remarquer que la courbe est relativement lisse et régulière. Ceci montre que l'ensoleillement était constant et sans couverture nuageuse.



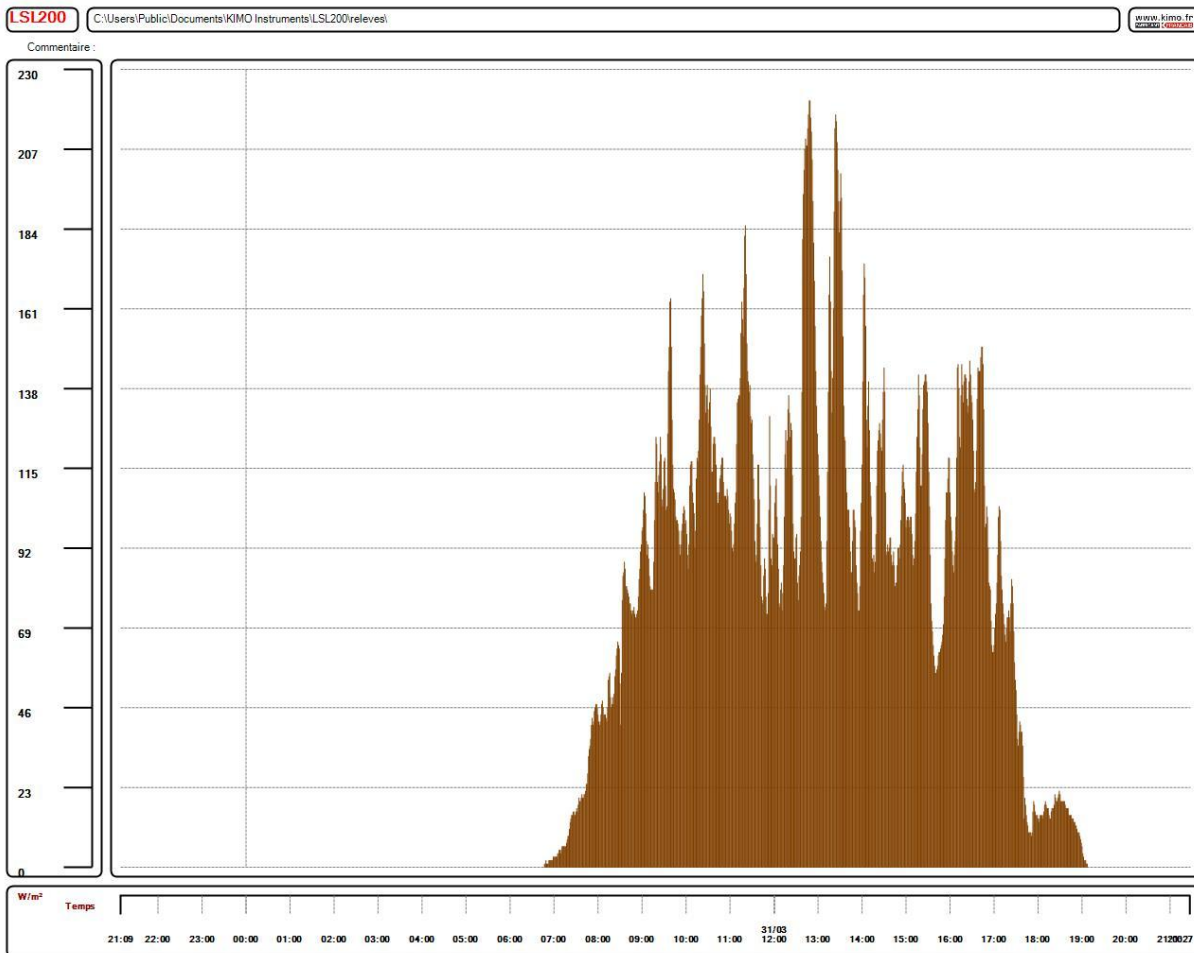


Figure 6 : Graphique de mesures de la composante globale en fonction du temps sur 24h (Bernay le 30/03/2012)

Statistiques globales

Minimum	0 W/m ²
Maximum (à 12 : 48)	221 W/m ²
Moyenne	44 W/m ²
Irradiation globale	1071 Wh/m ²

La seconde mesure a été effectuée à Bernay. Cette fois là, la journée fut moins ensoleillée et l'abondance de nuages a fait que les résultats obtenus se placent en dessous de la moyenne toujours fixé à 2676 Wh/m² d'irradiation globale. On distingue de même le caractère dégénéré de la courbe à cause de la couverture nuageuse.

A partir de ces mesures on peut facilement conclure que l'aspect aléatoire du climat affecte grandement les résultats obtenus. C'est pour cette raison que ce genre de mesures est effectué sur de très longues périodes (5 à 10 ans) afin que les résultats obtenus soient le plus représentatifs possible de la réalité.

Etant donné notre limite de temps évidente et le soleil très capricieux du mois de mai de cette année, nos mesures se sont principalement limitées à celles exposées ci-dessus.



Nous pouvons cependant effectuer une moyenne de l'irradiation globale qui nous donne 2546Wh/m². Il faut souligner que cette moyenne est très proche de la moyenne théorique de 2676Wh/m² avec un écart négligeable de 4,85%. Ce léger écart peut s'expliquer par le fait que les mesures n'ont pas été faites à Rouen même.

Le modèle théorique de calcul des composantes solaire présenté en première partie de ce dossier se révèle donc être assez fidèle.

5.2.1. Comparaison expérimentale entre les composantes solaires

Vu les différences obtenues lors des deux premières mesures à cause de la couverture nuageuse. Il nous a paru judicieux d'utiliser le solarimètre dans le but de comparer les différentes composantes solaires. Pour ce faire, il fallait quantifier la part de composante directe et de composante diffuse présente dans l'irradiation globale que mesure le solarimètre. Nous avons donc prit, pendant une heure, des mesures lors d'une journée très ensoleillé où le voile nuageux fut simulé grâce à un cache opaque dont l'ombre était projeté sur la cellule photosensible du solarimètre. En effet, l'ombre ainsi appliquée empêche la composante directe du soleil d'atteindre la cellule. Le solarimètre ne mesurera donc plus que la composante diffuse. Le cache fut successivement appliqué puis retiré afin de permettre plusieurs mesures dont les valeurs sont explicitées par le graphe suivant :

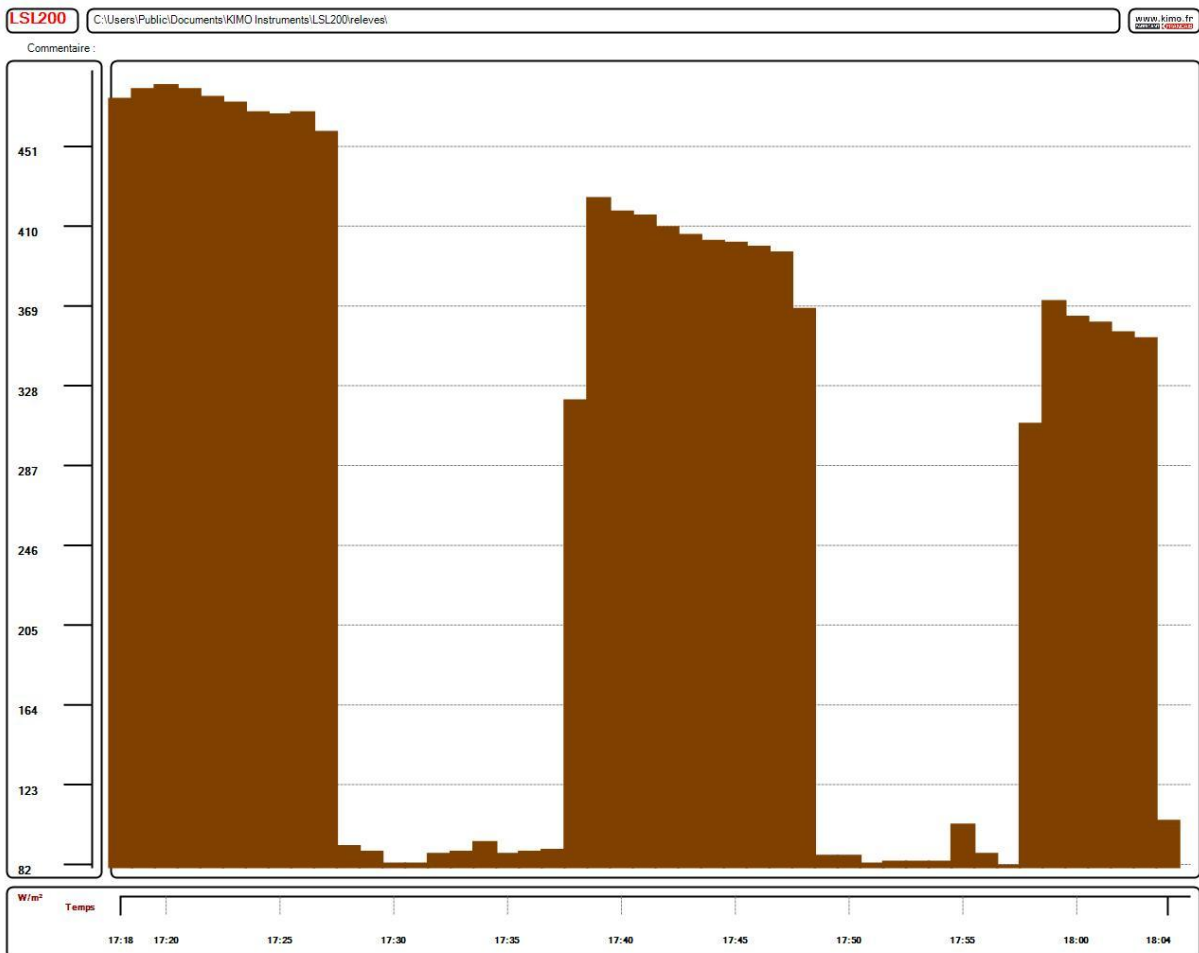


Figure 7 : Graphique de comparaison des différentes composantes solaires (mesures prises à Saint-Etienne-du-Rouvray le 02/04/2012 entre 17h et 18h)



Statistiques Globales

Minimum	82 W/m ²
Maximum	483 W/m ²
Moyenne	276 W/m ²
Irradiation globale	217 Wh/m ²

A partir de ces résultats on peut dire que :

- La composante globale, représentée par les pics élevés du graphique, s'estime en moyenne à 400 W/m² ;
- la composante diffuse, représentée par les bas plateaux du graphique et mesurée lors de l'application du cache, peut être estimée en moyenne à 100 W/m².

Ce qui nous donne un rapport de 0,25 entre la composante globale et la composante diffuse (Rdiff/Gh). Notre modèle théorique lui nous indique un rapport de 0,75. Cette différence est significative et peut être expliquée par la formule utilisée. En effet, comme exposé plus haut dans le dossier, la fraction considérée est directement liée à la clarté. Ainsi, plus la clarté est grande, plus la part de composante directe est grande et donc le rapport Rdiff/Gh diminuera. Or la journée où les mesures ont été faites était particulièrement ensoleillée, ce qui implique une grande clarté et un rapport Rdiff/Gh proche de 0,2.

C'est ce phénomène de clarté qui conduit à de plus grandes valeurs de composante directe et donc à une plus grande production énergétique dans les pays du sud.

5.2.2. Confrontation des mesures à d'autres modèles

Dans le but d'aller plus loin dans notre étude des composantes solaires, nous avons jugé nécessaire de confronter nos résultats expérimentaux à des bases de données externes. Pour ce faire, nous avons cherché des résultats de mesures du même type que les nôtres sur internet. En effet, toutes les entreprises s'occupant de l'installation de panneaux solaires proposent ce genre de mesures sur leur site web.

A titre d'exemple, la société Tecsol¹ donne les mesures suivantes sur son site internet :

Station Météo	Rouen
Latitude du lieu	49°23
Inclinaison	0 ° /horizontale
Mois	Energie solaire sur plan horizontal (KWh/ m². jour)
Janvier	0,760
Février	1,450

¹ Tecsol - photovoltaïque raccordé réseau (http://www.tecsol.fr/spv/pv_reseau.htm)



Mars	2,620
Avril	3,990
Mai	5,090
Juin	5,580
Juillet	5,310
Août	4,450
Septembre	3,270
Octobre	1,920
Novembre	0,950
Décembre	0,620

Nous avons aussi trouvé sur le site de la commission européenne² des mesures prises par le *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (CM SAF) sous tutelle du ministère des transports, constructions et développement urbain allemand :

Latitude	49°26'35" Nord,
Longitude	1°5'59" Est
Mois	Energie solaire sur plan horizontal (KWh/ m². jour)
Janvier	0,803
Février	1,520
Mars	2,520
Avril	3,910
Mai	4,720
Juin	5,180
Juillet	5,290
Août	4,480

² Photovoltaic Geographical Information System (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>)



Septembre	3,180
Octobre	1,910
Novembre	1,070
Décembre	0,626

Nous pouvons donc voir une fois de plus que ces résultats s'accordent aussi bien avec le modèle théorique de DUFFIE-BECKMAN présenté, qu'avec les mesures prises grâce au solarimètre.

Si nous prenons l'exemple du mois de Mars durant lequel nous avons effectué nos mesures, il apparaît que nos résultats expérimentaux dont la moyenne donne une irradiation globale à 2546Wh/m² est très proche de la moyenne donnée par la commission européenne qui est à 2520Wh/m². Nous nous rappelons aussi que la moyenne donnée par le modèle théorique est de 2676Wh/m². L'écart entre la théorie et la pratique est donc ici de 156 Wh/m², ce qui représente 5.83%. Cette différence n'est pas significative et peut être expliquée par la couverture nuageuse qui peut fortement varier d'une année à une autre. Le modèle de DUFFIE-BECKMAN est ainsi une fois de plus confirmé.

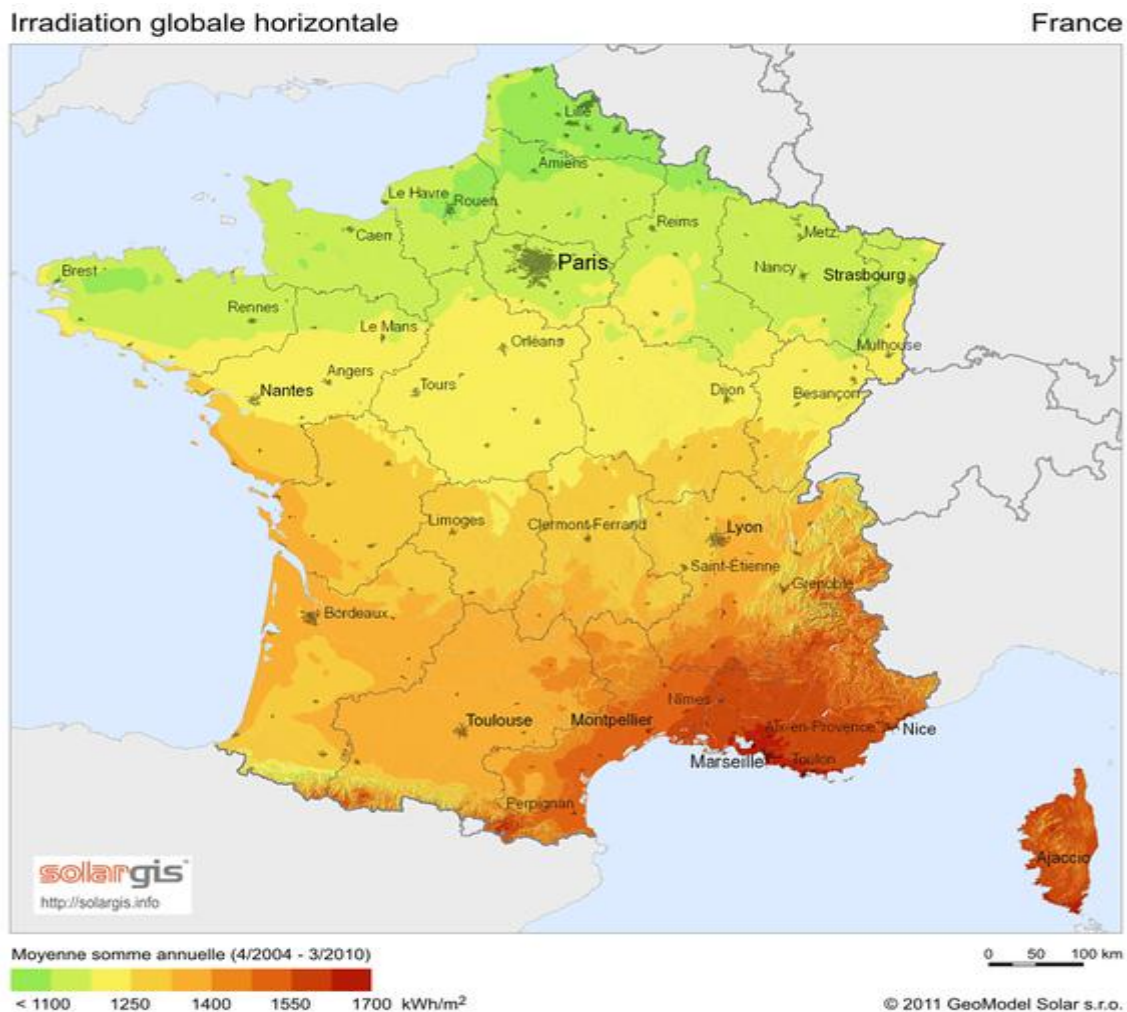


Figure 8 : Carte représentant l'irradiation globale en France



6. APPORTS DU PROJET

Tous les membres du groupe s'accordent à dire que les apports de ce projet ont été nombreux et variés. D'une part, nous avons acquis de nouvelles connaissances scientifiques et techniques et d'autre part nous avons pu nous perfectionner au niveau organisationnel.

En effet, nous avons découvert le vaste domaine des énergies renouvelables ; et plus particulièrement celui de l'énergie solaire. Avant le projet, nous n'avions pas idée de la complexité qui se cachait derrière ces panneaux solaires que nous voyons pourtant un peu partout. Nous ne soupçonnions pas non plus qu'une grande partie de l'étude de l'énergie solaire se consacrait à la mesure des composantes solaires : la solarimétrie.

A travers ce projet, nous avons donc appris à définir les différentes composantes solaires, nous nous sommes plongés dans les méthodes de calcul de celles-ci tant sur un plan théorique que pratique. Ainsi, nous avons appris à maîtriser les modèles mathématiques modélisant ce phénomène physique et nous sommes parvenus à utiliser les outils de mesures des composantes solaires (solarimètre).

Sur un point de vue organisationnel, mener un projet dans le domaine de la physique fut très enrichissant. Cette fois-ci, la particularité fut que les différents membres du groupe possédaient des emplois du temps différents étant donné les différentes thématiques de chacun. Cela a apporté une difficulté supplémentaire qu'il a fallu surmonter afin d'organiser les réunions de coordinations et d'échanges. Cette disparité des emplois du temps nous rapproche encore plus de la structure d'une entreprise, ce qui nous a permis d'approfondir nos compétences de gestion de projet en entreprise.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tout au long de ce projet nous avons été amenés à adopter une démarche scientifique : poser une problématique, choisir les aspects à étudier, effectuer des recherches, faire une étude théorique, effectuer des mesures expérimentales, comparer avec les données attendues afin de pouvoir répondre à la problématique.

Grâce à cette démarche, nous avons pu vérifier que le modèle de DUFFIE-BECKMAN que nous avons étudié est correct et assez représentatif de la réalité. Le travail effectué dans ce projet était assez nouveau pour nous, car notre seule consigne était « étude des composantes solaires par solarimétrie », aussi il nous a fallu d'abord faire des recherches conséquentes pour avoir une bonne compréhension du sujet et des composantes solaires puis nous avons dû étudier un modèle théorique et adopter une démarche critique et scientifique en effectuant nous-mêmes des mesures pour vérifier la validité de ce modèle. Ce projet a été enrichissant sur de nombreux aspects : travail en équipe, autonomie, esprit critique, initiative et organisation. En effet le travail demandé était assez important car la solarimétrie est un domaine complexe qu'aucun de nous ne connaissait avant ce projet.

Nous avons appris aussi grâce à ce projet l'importance d'effectuer des études théoriques avant de commencer la pratique et cela s'applique autant au monde de la recherche qu'au monde du travail. En effet, nous avons remarqué que des sites d'entreprises proposaient des devis aux particuliers qui souhaitaient installer des panneaux solaires ou photovoltaïques chez eux : une simulation leur permettait de savoir le rendement qu'ils pouvaient espérer et donc en combien de temps il leur serait possible d'amortir le coût



de l'installation du ou des panneaux. Ces services sont rendus possibles grâce aux avancées effectuées dans la recherche théorique concernant les composantes solaires.

Ce projet étant nouveau il va certainement évoluer au cours des prochaines années. On pourrait imaginer que le projet de l'année prochaine soit fait avec des mesures sur plan incliné afin de déterminer l'influence de cette nouvelle donnée. En effet en utilisant les résultats de notre projet, le groupe de l'année prochaine pourra aller plus loin dans l'étude des composantes solaires. Ce projet pourra ainsi évoluer au fur et à mesure si chaque groupe prend comme base de travail les projets des années précédentes. Et pourquoi pas un jour avoir comme projet de P6 la réalisation d'un panneau solaire thermique ou photovoltaïque ?



8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] John A.Duffie et A.Beckman, "Solar engineering of thermal processes", *Third Edition*, 2006.
- [2] http://www.cder.dz/download/Art12-2_15.pdf (valide à la date du 19 Mars 2012).
- [3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire (valide à la date du 23 Mars 2012)
- [4] https://www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/ecologie-forestiere/moyens/images/Carte_rayonnement_solaire.pdf (valide à la date du 9 Avril 2012).
- [5] http://michel.lalos.free.fr/cadrans_solaires/doc_cadrans/theorie_cs/heure_sol_leg.html (valide à la date du 10 Avril 2012).
- [6] <http://pgj.pagesperso-orange.fr/julien.htm> (valide à la date du 31 Avril 2012).
- [7] http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/solaire/geometrie_solaire.html (valide à la date du 11 Juin 2012).



9. ANNEXES

9.1. Documentation technique

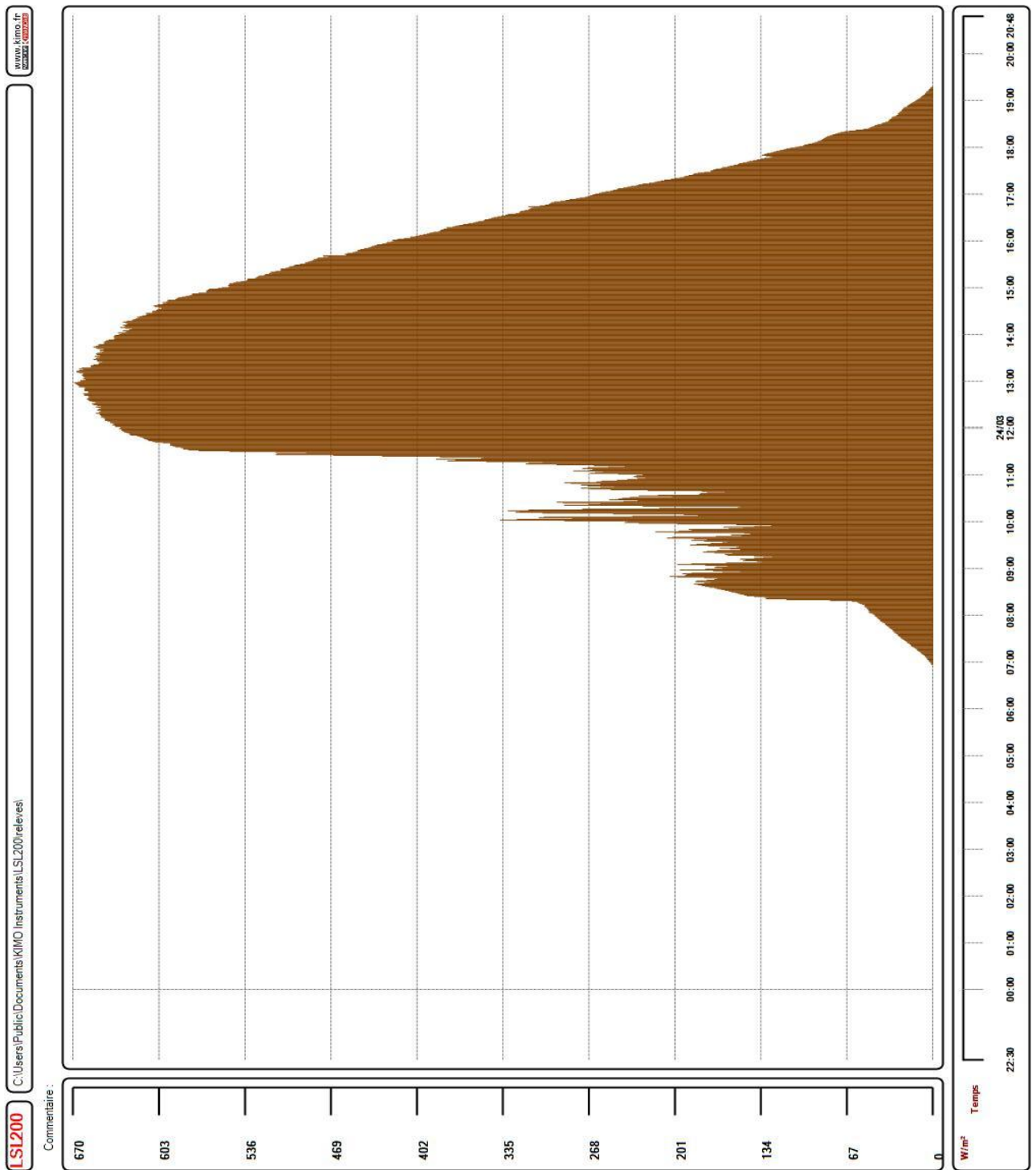


Figure 2 : Graphique de mesures de la composante globale en fonction du temps sur 24h (Caen le 23/03/2012)

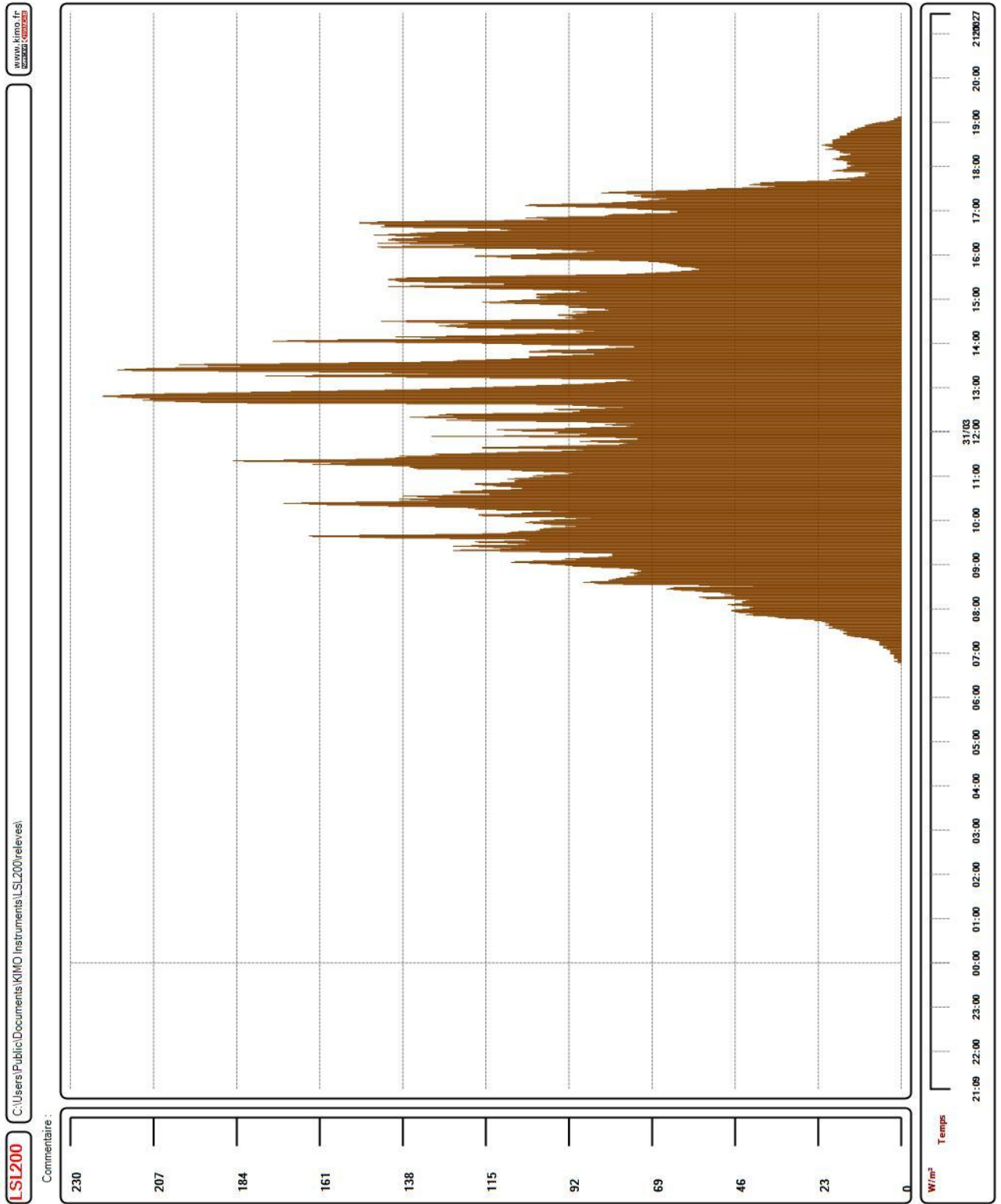


Figure 9 : Graphique de mesures de la composante globale en fonction du temps sur 24h (Bernay le 30/03/2012)



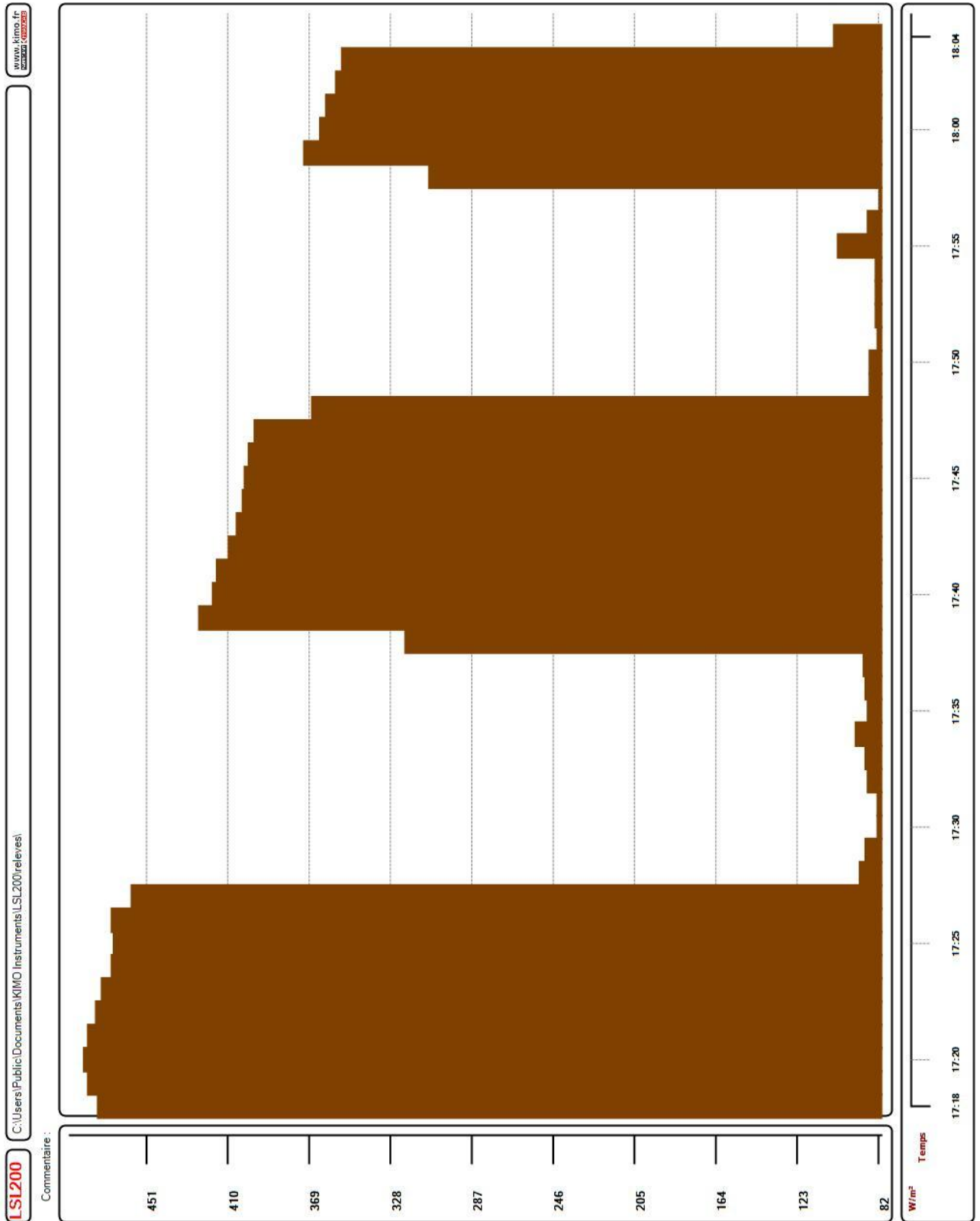


Figure 10 : Graphique de comparaison des différentes composantes solaires (mesures prises à Saint-Etienne-du-Rouvray le 02/04/2012 entre 17h et 18h)

