

# Quantification mathématique et expérimentale de l'effet de l'inclinaison et de l'orientation sur l'ensoleillement reçu par les panneaux photovoltaïques

Khaled TLILI, Moufida KSOURI, Yosra Hammi  
Laboratoire d'Analyse, de Conception et de Commande des Systèmes  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis  
Tunis, La Tunisie  
tlili.khaled@gmail.com

**Résumé:** Dans un contexte énergétique et économique sévère, les attentes en termes de rentabilité des systèmes de production des énergies renouvelables deviennent de plus en plus importantes. Spécialement pour l'énergie solaire photovoltaïque qui est considérée comme l'un des axes de recherches les plus suivis. Ce qui a permis de diversifier ses domaines d'application depuis sa découverte en 1839 par le physicien Français Edmond Becquerel [1]. D'où on trouve, de nos jours, l'exploitation de cette énergie dans l'électrification des stations spatiales, l'éclairage public, l'électrification rurale, le pompage des eaux de l'agriculture...etc.

Dans ce contexte et dans l'objectif d'optimiser la rentabilité de cette énergie, ce travail est consacré à quantifier mathématiquement et expérimentalement deux facteurs dont l'influence sur la production des panneaux photovoltaïques est très importante. Ces deux facteurs sont l'inclinaison et l'orientation des panneaux photovoltaïques (PV).

**Mots clés :** Photovoltaïque, influence de l'inclinaison, influence de l'orientation, ensoleillement

## I. INTRODUCTION :

Le choix de la position de fixation des panneaux photovoltaïques influe considérablement sur la production de ces panneaux [2]. Et vu que notre source lumineuse, le soleil, parcourt une trajectoire différente d'une saison à l'autre et d'une région à l'autre, l'étude de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux PV demeure assez importante dans l'objectif d'optimiser la production des panneaux PV et par la suite améliorer la rentabilité de ce système.

Plusieurs recherches ont été élaborés dans l'objectif d'optimiser la rentabilité des systèmes photovoltaïques en étudiant soit les suiveurs solaires appelés aussi 'tracker' [3-5], soit les concentrateurs [6-9] qui augmentent le flux lumineux reçu par les panneaux. Tous ces systèmes fonctionnent en ajoutant d'autres éléments, comme des moteurs, des lentilles, des miroirs...etc. Mais dans ce travail, nous allons étudier l'influence du mouvement solaire sur la production de

l'énergie électrique produite par des panneaux photovoltaïques maintenus fixes et sans l'ajout d'aucun autre élément de poursuite ou de concentration.

Cette étude de l'influence du mouvement solaire sur la production des panneaux photovoltaïques pourra nous donner une bonne visibilité sur la faisabilité d'utiliser des suiveurs solaires afin d'optimiser l'énergie produite.

Dans la suite nous allons déterminer mathématiquement l'effet de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux PV sur l'ensoleillement reçu par un panneau PV, et ensuite nous allons présenter une maquette de test que nous avons réalisé dans le laboratoire et qui nous a permis de renforcer les résultats grâce à quelques expériences.

## II. QUANTIFICATION MATHÉMATIQUE DE L'EFFET DE L'INCLINAISON ET DE L'ORIENTATION SUR L'ENSOLEILLEMENT REÇU PAR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES :

### A. Effet de l'inclinaison sur l'ensoleillement reçu par un panneau PV :

Généralement, on a intérêt à mettre les panneaux PV perpendiculairement aux rayons solaires. Néanmoins la position du soleil n'est pas fixe, voir la figure suivante, ce qui nous pousse parfois à adopter la solution des suiveurs solaires. Mais dans ce cas, nous serons demandés de réétudier la rentabilité du système à cause de cette augmentation du coût.

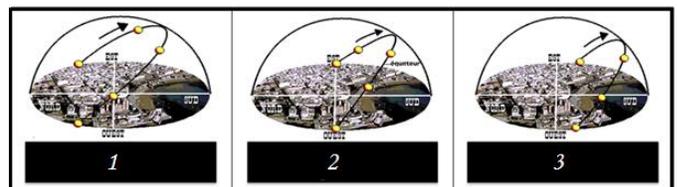


Figure 1 : Mouvement solaire [10]

- 1 : trajectoire du soleil au solstice d'été
- 2 : trajectoire du soleil aux équinoxes
- 3 : trajectoire du soleil au solstice d'hiver

Dans les deux parties suivantes nous allons essayer de comparer l'ensoleillement reçu par un panneau PV dans le cas où il est placé à une inclinaison optimale et dans le cas où il est incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à cette inclinaison optimale.

1) *Calcul de l'ensoleillement reçu et les pertes en pourcentage de l'ensoleillement reçu pour un panneau photovoltaïque placé perpendiculairement aux rayons solaires (inclinaison optimale) :*

L'irradiance solaire au sol c'est la quantité d'ensoleillement reçue par une surface de  $1m^2$  perpendiculaire aux rayons solaires au niveau du sol. Cette énergie diminue en traversant l'atmosphère terrestre et elle varie suivant l'épaisseur de l'atmosphère traversée. Le coefficient AM appelé air masse, donne une approximation de cet épaisseur et généralement il varie entre [0 et 2]. Voir figure suivante :

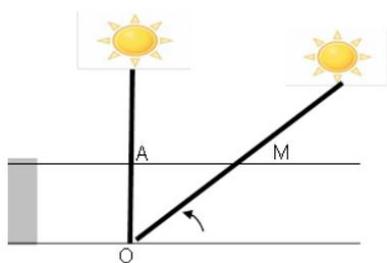


Figure 2 : Notion d'air Masse AM [10]

Quel que soit l'épaisseur de l'atmosphère traversée, l'irradiance au sol ne dépasse pas  $1200 W/m^2$  [11]

Dans les conditions standards de tests, on prend l'irradiance égale à  $Csts=1000 w/m^2$  pour un  $AM =1.5$  et une température égale à  $25^\circ$ . Pour déterminer l'ensoleillement reçu par un panneau PV, on va utiliser un panneau de dimensions  $H_p$  et  $L_p$  comme montré dans la figure suivante :

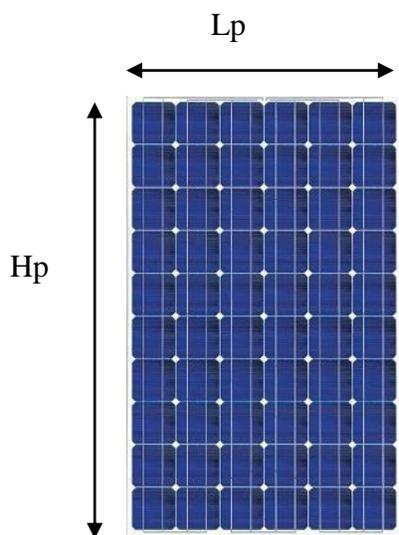


Figure 2. Panneau photovoltaïque

Aussi on prendra comme notations :

$H_s$  : la hauteur ensoleillée perpendiculaire aux rayons solaires

$L_s$  : la largeur ensoleillée perpendiculaire aux rayons solaires

$Scs$  : la surface du champ solaire qui sera projetée sur le panneau photovoltaïque

$$Scs=H_s \times L_s \quad (1)$$

$E_r$  : l'ensoleillement reçu par le panneau photovoltaïque

$$E_r = Scs \times Csts \quad (2)$$

$Pe(\%)$  : les pertes en pourcentages de l'ensoleillement reçu par un panneau PV

Aussi on notera ( $H_{s_i}$ ) ( $L_{s_i}$ ) ( $Scs_i$ ) ( $E_{r_i}$ ) et ( $Pe_i$ ) respectivement pour la hauteur, la largeur, la surface du champ solaire et les pertes en pourcentages de l'ensoleillement reçu par le panneau photovoltaïque étudié à l'exemple (i).

Si le panneau est placé perpendiculairement aux rayons solaires c'est à dire à une inclinaison idéale, et en supposant que l'orientation est aussi idéale, on trouve  $L_{s_1}=L_p$  et  $H_{s_1}=H_p$

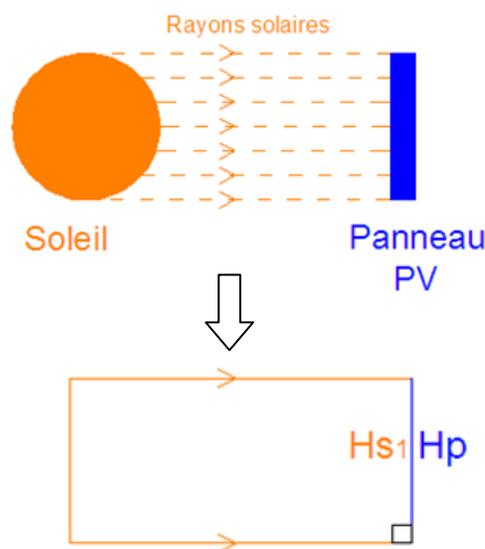


Figure 3. Schématisation du champ solaire reçu pour un panneau PV placé perpendiculairement aux rayons solaires

Exemple 1: Calculons l'ensoleillement reçu et les pertes ( $Pe$ ) pour un panneau PV avec  $L_p = 1m$  et  $H_p = 1.6m$  :

Calcul de la surface  $Scs_1$  :

$$\begin{aligned} Scs_1 &= H_{s_1} \times L_{s_1} \\ &= H_p \times L_p \\ \Rightarrow Scs_1 &= 1.6 \times 1 = 1.6m^2 \end{aligned}$$

Calcul de l'ensoleillement reçu  $E_{r_1}$  :

$$\begin{aligned} E_{r_1} &= Scs_1 \times Csts \\ \Rightarrow E_{r_1} &= 1.6 \times 1000 = 1600w \end{aligned}$$

Ce panneau est placé dans une position idéale vis-à-vis l'inclinaison et l'orientation donc les pertes de l'enseoillement reçu sont nuls, donc:

$$Pe_1(\%) = 0\%$$

2) *Calcul de l'enseoillement reçu et les pertes en pourcentage de l'enseoillement reçu pour un panneau PV incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'inclinaison optimale :*

Si on incline le panneau d'un angle  $\alpha$  par rapport à son inclinaison optimale et sans changer son orientation,  $L_s$  reste inchangée, alors que  $H_s$  diminue. D'après la figure ci-dessous,

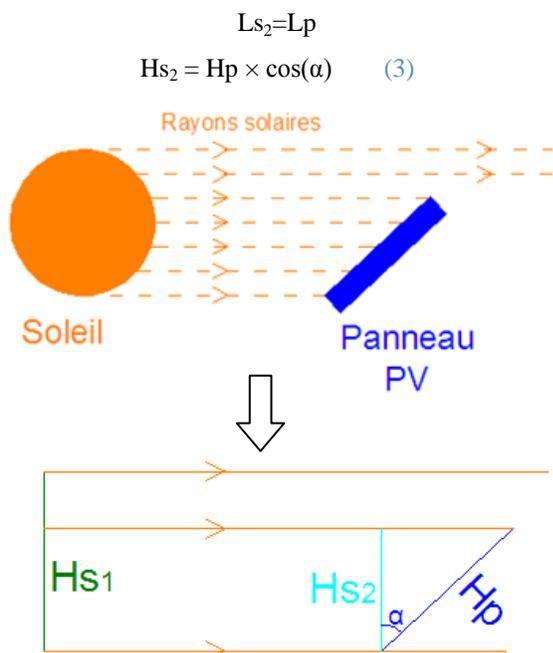


Figure 4. Schématisation du champ solaire reçu pour un panneau PV placé incliné d'un angle  $\alpha$

**Exemple 2:** Pour le même panneau utilisé dans l'exemple 1, calculons l'enseoillement reçu et les pertes (Pe) en prenant  $L_p=1m$  et  $H_p = 1.6m$  et  $\alpha = 30^\circ$  :

Calcul de la surface  $Scs_2$ :

$$\begin{aligned} Scs_2 &= Hs_2 \times Ls_2 \\ &= Hp \times \cos(\alpha) \times Lp \\ &= Scs_1 \times \cos(\alpha) \\ \Rightarrow Scs_2 &= 1.6 \times 1 \times \cos(30) = 1.386m^2 \end{aligned}$$

Calcul de l'enseoillement reçu  $Er_2$ :

$$\begin{aligned} Er_2 &= Scs_2 \times Csts \\ &= Scs_1 \times \cos(\alpha) \times Csts \\ &= Er_1 \times \cos(\alpha) \\ \Rightarrow Er_2 &= 1386 \text{ w} \end{aligned}$$

Calcul des pertes d'enseoillement reçu  $Pe_2(\%)$ :

$$Pe_2(\%) = \frac{Er_1 - Er_2}{Er_1} \times 100 \quad (4)$$

$$Pe_2(\%) = \left( \frac{Er_1 - Er_1 \times \cos(\alpha)}{Er_1} \right) \times 100$$

$$Pe_2(\%) = (1 - \cos(\alpha)) \times 100$$

$$\Rightarrow Pe_2(\%) = 13.4\%$$

$\Rightarrow$

3) *Conclusion*

D'une manière générale on peut déduire que pour un panneau incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'inclinaison optimale, les pertes en pourcentages de l'enseoillement reçu par un panneau PV sont égales à

$$Pe(\%) = (1 - \cos(\alpha)) \times 100 \quad (5)$$

*B. Effet de l'orientation sur l'enseoillement reçu par un panneau PV :*

Chaque journée, le soleil parcourt une trajectoire en allant de l'est vers l'ouest. L'orientation des panneaux PV influe aussi sur la production. Généralement pour les panneaux fixes, on choisit l'orientation vers le Sud vu que le soleil passe par le sud au milieu de la journée, et à ce moment-là on peut capter le maximum de l'énergie solaire. Mais si on essaye de comparer à un moment quelconque de la journée les énergies solaires captées par un panneau PV directement orienté vers le soleil et un autre du même type mal orienté, on trouvera les résultats ci-dessous :

1) *Panneau orienté directement vers le soleil :*

Si le panneau est orienté directement vers le soleil, et en supposant que l'inclinaison est idéale, on trouve  $H_s=H_p$  et  $L_s=L_p$

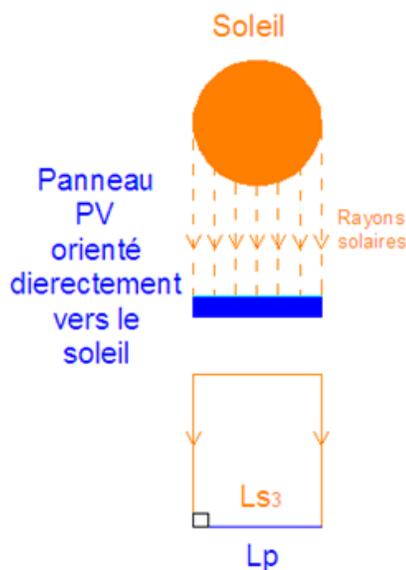


Figure 5. Schématisation du champ solaire reçu pour un panneau PV orienté directement vers le soleil

**Exemple 3:** pour le même panneau étudié précédemment, on trouve les mêmes résultats trouvés à l'exemple 1.

$$Cs_3 = Cs_1 ; Er_3 = Er_1 ; Pe_3 = Pe_1$$

2) *Panneau désorienté d'un angle  $\beta$  :*

Si on désoriente le même panneau d'un angle  $\beta$  sans changer son inclinaison,  $H_s$  reste inchangée, alors que  $L_s$  diminue. D'après la figure ci-dessous,

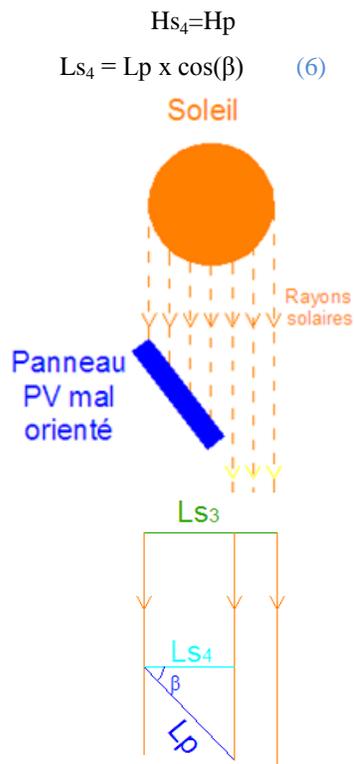


Figure 6. Schématisation du champ solaire reçu pour un panneau PV mal orienté

**Exemple 4:** Pour le même panneau précédemment utilisé, calculons l'ensoleillement reçu et les pertes (Pe) en prenant  $\beta=45^\circ$  :

Calcul de la surface  $Scs_4$  :

$$\begin{aligned} Scs_4 &= Hs_4 \times Ls_4 \\ &= Hp \times Lp \times \cos(\beta) \\ &= Scs_3 \times \cos(\beta) \\ \Rightarrow Scs_4 &= 1.6 \times 1 \times \cos(45) = 1.131m^2 \end{aligned}$$

Calcul de l'ensoleillement reçu  $Er_4$  :

$$\begin{aligned} Er_4 &= Scs_4 \times Csts \\ &= Scs_3 \times \cos(\beta) \times Csts \\ &= Er_3 \times \cos(\beta) \\ \Rightarrow Er_4 &= 1600 \times \cos(45) = 1131 \text{ w} \end{aligned}$$

Calcul des pertes d'ensoleillement reçu  $Pe_4(\%)$  :

$$\begin{aligned} Pe_4(\%) &= \frac{Er_3 - Er_4}{Er_3} \times 100 \\ Pe_4(\%) &= \left( \frac{Er_3 - Er_3 \times \cos(\beta)}{Er_3} \right) \times 100 \\ Pe_4(\%) &= (1 - \cos(\beta)) \times 100 \\ \Rightarrow Pe_4(\%) &= 29.3\% \end{aligned}$$

D'une manière générale on déduit que pour un panneau mal orienté d'un angle  $\beta$ , les pertes en pourcentages de l'ensoleillement reçu par un panneau PV,

$$Pe(\%) = (1 - \cos(\beta)) \times 100 \quad (7)$$

*C. Effet de la fixation d'un panneau PV mal incliné et mal orienté sur l'ensoleillement reçu :*

Dans cette partie on déduira l'impact de la fixation d'un panneau avec une mauvaise inclinaison et une mauvaise orientation sur l'ensoleillement qu'il reçoit suite aux exemples déjà étudiés.

Comme démontré à l'équation (3), si un panneau est mal incliné on trouve  $H_s = Hp \times \cos(\alpha)$ . Et comme démontré à l'équation (6), si un panneau est mal orienté on trouve :  $L_s = Lp \times \cos(\beta)$ . Donc si on essaye de déduire la surface du champ solaire qui sera projeté sur un panneau PV mal orienté et mal incliné, on trouvera

$$\begin{aligned} Scs_5 &= Hp \times \cos(\alpha) \times Lp \times \cos(\beta) \Rightarrow \\ Scs_5 &= Hp \times Lp \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \quad (8) \end{aligned}$$

Avec  $(\alpha)$  c'est la différence d'inclinaison du panneau par rapport à l'inclinaison optimale et  $(\beta)$  c'est la différence de l'orientation du panneau par rapport à l'orientation optimale.

**Exemple 5 :** Pour le même panneau précédemment utilisé, calculons l'ensoleillement reçu et les pertes (Pe) en prenant  $\alpha = 30^\circ$  et  $\beta = 45^\circ$

Calcul de la surface  $Scs_5$  :

$$\begin{aligned} Scs_5 &= Hs_4 \times Ls_5 \\ &= Hp \times \cos(\alpha) \times Lp \times \cos(\beta) \\ &= Scs_1 \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \\ \Rightarrow Scs_5 &= 1.6 \times 1 \times \cos(30) \times \cos(45) = 0.9798m^2 \end{aligned}$$

Calcul de l'ensoleillement reçu  $Er_5$  :

$$\begin{aligned} Er_5 &= Scs_5 \times Csts \\ &= Scs_1 \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \times Csts \\ &= Er_1 \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \\ \Rightarrow Er_5 &= 1600 \times \cos(30) \times \cos(45) = 979.8 \text{ w} \end{aligned}$$

Calcul des pertes d'ensoleillement reçu  $Pe_4(\%)$  :

$$\begin{aligned} Pe_5(\%) &= \frac{Er_1 - Er_5}{Er_1} \times 100 \\ Pe_5(\%) &= \left( \frac{Er_1 - Er_1 \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta)}{Er_1} \right) \times 100 \end{aligned}$$

$$Pe5(\%) = (1 - \cos(\alpha) \times \cos(\beta)) \times 100$$

$$\Rightarrow Pe5(\%) = 38.76\%$$

Conclusion : d'après les démonstrations déjà faites, on conclut que la position de fixation des panneaux PV influe considérablement sur leur production. Aussi pour un panneau fixé à n'importe quelle position, l'enseillement qu'il reçoit est égale à

$$Er = Er_1 \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \quad (9)$$

Avec :

Er1 : l'enseillement que peut recevoir un panneau PV fixé dans une position optimale.

$\alpha$  : l'angle que fait le panneau par rapport à l'inclinaison optimale.

$\beta$  : l'angle que fait le panneau par rapport à l'orientation optimale.

### III. QUANTIFICATION EXPERIMENTALE DE L'EFFET DE L'INCLINAISON ET DE L'ORIENTATION SUR L'ENSOLEILLEMENT REÇU PAR LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES :

#### A. Maquette de test fabriquée :

Afin d'étudier expérimentalement l'influence de l'inclinaison et de l'orientation sur l'énergie solaire directe reçu par un panneau PV, nous avons développé au laboratoire une maquette de test permettant de mesurer les pertes d'enseillement. Cette maquette est constituée par un cadre de cheminement de la lumière permettant d'avoir un champ lumineux rectangulaire (voir figure ci-dessous, pièce n°1), un tableau de visualisation permettant de mesurer les pertes d'enseillement (pièce n°2), un support de réglage (pièce n°3) et une ou des diode LED jouant le rôle du soleil (pièce n°4).

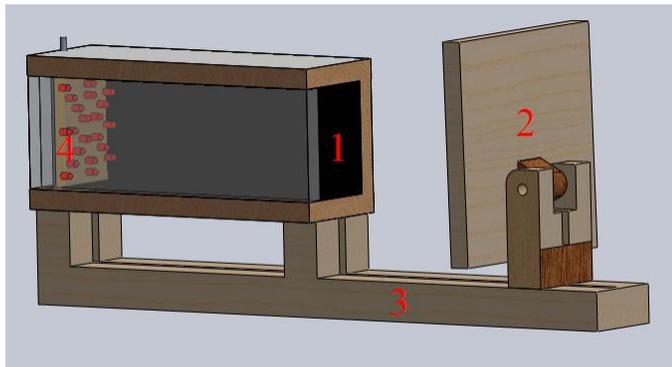


Figure 7. Conception en 3D de la Maquette de test

Après avoir fabriqué la maquette de test, voir figure suivante, nous avons réalisé un modèle de panneau photovoltaïque dont on peut changer l'inclinaison.

#### B. Résultats obtenus :

Le modèle du panneau PV a été mis à la fin du cadre de cheminement de la lumière, en changeant à chaque fois son inclinaison d'un angle  $\alpha = [0, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ]$  par rapport à l'inclinaison optimale qui permet au panneau de capter le maximum de l'énergie lumineuse.

A chaque fois, on mesure la surface des champs lumineux transmis vers le tableau de visualisation. Ce champ lumineux correspond aux pertes d'enseillement dûment à la fixation du panneau PV dans une position inclinée d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'inclinaison optimale.

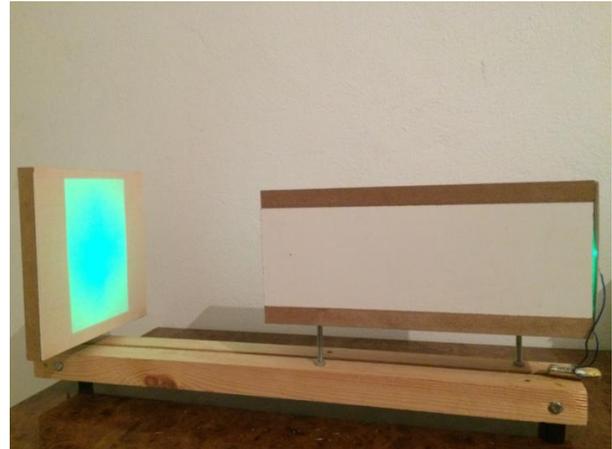


Figure 8. Maquette de test montrant le champ lumineux total que peut recevoir une surface perpendiculaire aux rayons lumineux reçus

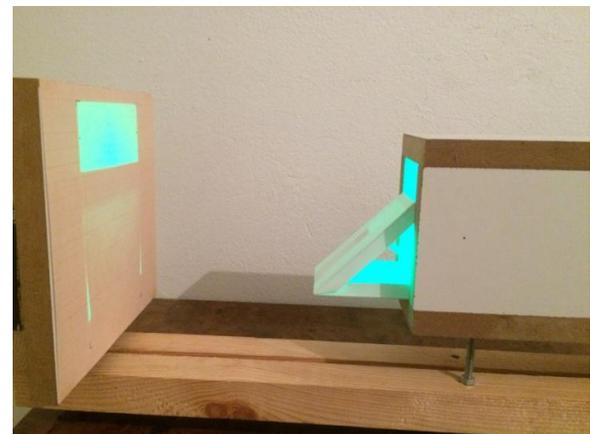


Figure 9. Maquette montrant les pertes pour  $\alpha=45^\circ$

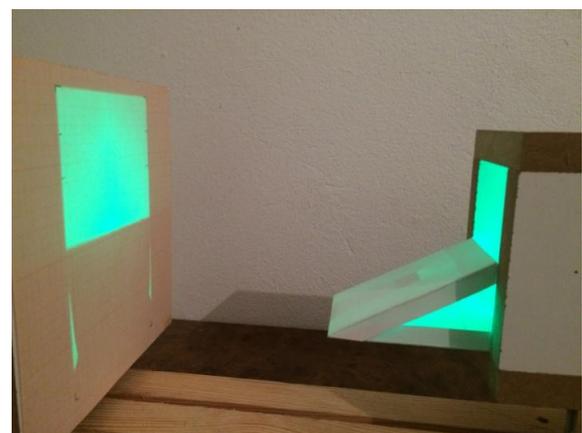


Figure 10. Maquette montrant les pertes pour  $\alpha=60^\circ$

Après avoir effectué quatre expériences pour  $\alpha = [0, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ]$ , nous avons résumé les résultats obtenus sur le graphe suivant :

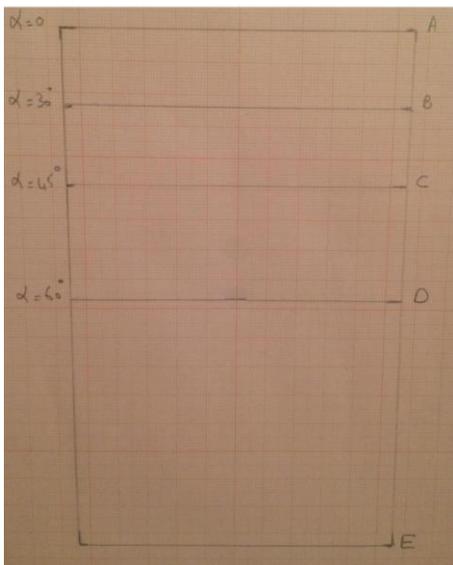


Figure 12. Graphe des diverses pertes des flux lumineux

D'après ce graphe on relève les distances suivantes :  $[AB]=2.4\text{cm}$  ;  $[AC]=4.9\text{cm}$  ;  $[AD]= 8.7\text{cm}$  et  $[AE]=17.5\text{cm}$ . Aussi, AB représente les pertes d'ensoleillement pour  $\alpha= 30^\circ$ , AC pour  $\alpha= 45^\circ$  et AD pour  $\alpha= 60^\circ$

Le champ lumineux total est indiqué par la distance AE.

-Pour  $\alpha= 0$ , on n'observe pas un champ lumineux sur le tableau de visualisation donc il n'y a pas de pertes du point de vue rayons lumineux captés par le panneau.

-Pour  $\alpha= 30^\circ$ , on observe un champ lumineux limité par la distance AB sur le tableau de visualisation. Ce champ n'a pas été capté par le panneau donc il est considéré comme des pertes d'ensoleillement à cause de l'inclinaison du panneau PV d'un angle égale à  $30^\circ$  par rapport à l'inclinaison optimale.

Donc, pratiquement les pertes pratiques en pourcentages de l'ensoleillement reçu par le panneau PV, pour cette position ( $\alpha= 30^\circ$ ) sont égales à:  $Pep_2$  avec

$$Pep_2(\%) = \frac{AB}{AE} \times 100 \quad (10)$$

$$Pep_2(\%) = \frac{2.4}{17.5} \times 100 = 13.71\%$$

D'après l'équation (5), les pertes théoriques en pourcentage de l'ensoleillement reçu par le panneau PV sont égales à  $Pet_2(\%) = (1-\cos(\alpha)) \times 100$ , donc

$$Pet_2(\%) = (1-\cos(30)) \times 100 \Rightarrow Pet_2(\%) = 13.39\%$$

Calculons maintenant l'erreur de mesure  $E_{m2}$  entre les résultats théoriques et pratiques:

$$E_{m2} = |Pet_2 - Pep_2| \quad (11)$$

$$E_{m2} = |13,39\% - 13,71\%|$$

$$E_{m2} = 0.32\%$$

En reprenant le même travail déjà élaboré pour  $\alpha=45^\circ$  et  $\alpha=60^\circ$  on trouve les résultats suivants :

L'angle $\alpha$	Pertes théoriques (%)	Pertes pratiques (%)	Erreur de mesure $E_m(\%)$
$0^\circ$	0	0	-----
$30^\circ$	13.39%	13.71%	0.32%
$45^\circ$	29.29%	28%	1.29%
$60^\circ$	50%	49.7	0.3%

### C. Interprétation :

D'après le tableau précédent, on remarque qu'il y a une grande correspondance entre les résultats théoriques et les valeurs pratiques relevées et ce ceci ne dépasse pas une marge d'erreur de 1.3%, ce qui prouve mieux les résultats obtenus. Aussi, on peut remarquer que l'influence du mouvement solaire sur l'ensoleillement capté par les panneaux photovoltaïques est non négligeable.

### REFERENCES

- [1] Edmond Becquerrel ; « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires » ; C.R. Acad. Sci., 9 :561-567, (1839).
- [2] Site Web d'estimation de la production des panneaux photovoltaïques suivant la région, l'inclinaison de fixation, la saison et d'autres paramètres.. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=fr&map=europe>
- [3] Mohamed Aymen SAHNOUN, « Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV) » Thèse de Doctorat, Institut des Sciences et Technologies Paris Tech, 2015
- [4] Fateh FERROUDJI, « Conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes » Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2015
- [5] Mostafa MEHRTASH, « Performance evaluation of solar tracking photovoltaic systems operating in Canada » Thèse de Doctorat, Université du Québec, 2013
- [6] Pierre Besson, « Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés » Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2016
- [7] Romain COUDERC, « Étude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration » Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2015
- [8] O'Neill M., McDaniel A. J., Spears D., Stevenson C. & Gelbaum D., "Low-Cost 20X Silicon-Cell-Based Linear Fresnel Lens Concentrator Panel," AIP Conference Proceedings 1407, (2011).
- [9] Céline Michel. 'Etude d'un concentrateur solaire basé sur une combinaison optique diffractive/réfractive pour applications spatiales' Université de Liège - Hololab - Centre Spatial de Liège (2015)
- [10] Kaouther Jammali, « Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque de 200kwc » Projet de fin d'études, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, 2015
- [11] Saliha Aouifi, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Master de commande électrique, Université de Farhat ABBES, 2014