



# Etude de l'utilisation d'un PV pour une cogénération solaire

Loubna Hadhoum<sup>#1</sup>, Naim Akkouche<sup>\*2</sup>, Mourad Balistrrou<sup>#3</sup>

<sup>#</sup>Laboratoire Energétique- Mécanique et Ingénierie (LEMI), Université M'hamad Bougara de Boumerdes, FSI-UMBB  
Boumerdes 3500 ALGERIE

<sup>1</sup>hadhoumloubna@gmail.com

<sup>3</sup>mouradbalistrrou@yahoo.fr

<sup>#</sup>Laboratoire Energétique-Mécanique et Ingénierie (LEMI), Université M'hamad Bougara de Boumerdes, FSI-UMBB  
Boumerdes 3500 ALGERIE

<sup>2</sup>akkouchenaim@yahoo.fr

**Abstract**— In this work, we applied a generalized model that describes the current - voltage characteristic of a photovoltaic module under different conditions of illumination and temperature. Modeling and simulation of photovoltaic generating system is then carried out using the Matlab / Simulink software. The photovoltaic/ thermal (PV / T) hybrid collector converts solar energy into heat and electricity. The advantages to combine a heat thermal collector and a photovoltaic panel only one sensor are the increase of the total efficiency of solar energy conversion. The hybrid solar collector, the fluid flow in the thermal part to be warmed can also cool the photovoltaic cell thus increase efficiency by lowering their temperature.

Our study focuses on energy cogeneration system consists a cooling of photovoltaic sensor we proposed three methods of cooling to optimize the best mode in thermal and electrical power, the results show that the simulation tool Matlab valid the electric models photovoltaic and also allow that the photovoltaic panel is a heat energy generator that can be used to heat water or to preheat the space, or even associate with a pump heat for air conditioning.

**Keywords**— Générateur photovoltaïque, simulation, optimisation, caractéristique I-V

## I. INTRODUCTION

La conversion d'énergie solaire en électricité se fait par le biais de module photovoltaïque. Le mot "photo" qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom physicien Italien Alessandro volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique. L'inconvénient majeur des modules PV est l'augmentation de la température des cellules qui affecte le rendement électrique du panneau tout en diminuant sa puissance électrique. Les recherches engagées pour optimiser le fonctionnement d'un PV recommandent souvent le refroidissement des cellules avec un fluide caloporteur. Chose qui est à l'origine de la naissance des panneaux Volther et qui ont transformé le simple PV en une unité de cogénération tout en produisant de la chaleur et l'électricité en même temps. Solution que nous jugeons la plus optimal dans les pays du sud (majorité des pays en voies de développement) pour alimenter des machine frigorifique à absorption cela, du fait de la

consommation d'énergie électrique pour la production du froid coïncide exactement avec le pic de disponibilité du rayonnement solaire. En effet, les machines frigorifique à absorption produisent du froid tout en consommant de l'énergie électrique au niveau de la pompe de solution, et l'énergie thermique au niveau du désorbteur.

## II. CHOIX DE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Nous avons choisi le modèle "MINI-EESF" compose de 36 cellules en silicium ploycristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 66 W est considéré dans les conditions standards  $G=1000W/m^2$ ,  $T=25^{\circ}C$  les différents paramètres de références de ce modèle dont la tension de circuit ouvert, le courant de court, la tension et courant au point de puissance maximale, sont références dans le tableau 1 avec d'autre paramètres. Pour réaliser le modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme utile de testes de simulation.

TABLE I  
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET PHYSIQUES DU MODULE MINI-EESF

Caractéristiques	valeurs
$n_{cell}$ en série	36 cellules
$P_m$	66W
$V_{oc}$	22.25 V
$I_{sc}$	4.05 A
$V_{mp}$	17.8 V
$I_{mp}$	3.7 A
Dimension	778×659×35 mm
poid	6.2 Kg

L'expérience montre que les performances d'un PV, notamment sa puissance, sont très sensible à la température de la cellule, et par conséquent du PV, évolue d'une manière inversement proportionnelle à sa températures. C'est pour cette raison que nous avons étudié le refroidissement du panneau pour augmenter sa puissance d'une part, et récupérer une énergie supplémentaires sous forme de chaleur d'autre



part.

L'étude consiste à refroidir les 36 cellules du PV, réparties en 4 colonnes de 9 cellules chacune, de trois manières

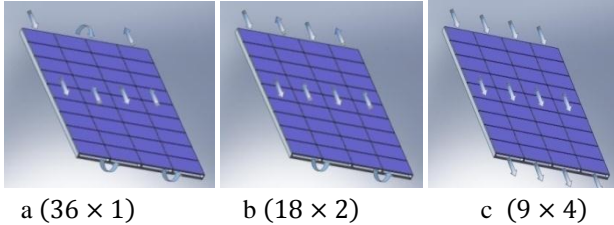


Fig. 1 les Modes refroidissement

Le premier mode, appelé mode 36 × 1 (Fig. 1-a), consiste à refroidir les 36 cellules en série. Le fluide de refroidissement sortant de la première colonne se dirige vers la deuxième colonne, puis vers la troisième et en fin vers la dernière colonne.

Le deuxième mode, appelé 18 × 2 (Fig. 1-b), consiste à refroidir en deux courants. Un courant pour refroidir les premières cellules en série. Cela, tout en réinjectant le courant sortant d'une colonne dans celle qui le suit.

Le troisième mode, appelé mode 9 × 4 (Fig. 1-c), consiste à refroidir en quatre courants. Chaque sert à refroidir les 9 cellules d'une colonne en série.

### III. MODILISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur [1].

La caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la Fig. 1. Ce circuit introduit un générateur de courant  $I_{CC}$  en parallèle avec la diode  $D$  qui décrit les propriétés semi-conducteur de la cellule photovoltaïque, ainsi que des résistances en série  $R_s$  (modélisent les pertes ohmiques du matériau) et en parallèle  $R_{sh}$  (modélisent les courants parasites qui traversent la cellule) pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [2].

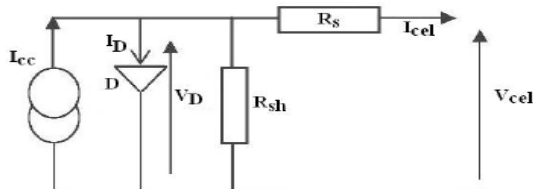


Fig. 2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

### A. equation associées au model

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{cc} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

Avec  $I_{cc}$  photo courant,  $I_d$  courant de la diode et  $I_{sh}$  le courant shunt.

Afin de modéliser une cellule photovoltaïque, des hypothèses simplificatrices sont à prendre en considération :

L'effet des courants parasites qui traversent la cellule, qui sont faible se modélise par l'hypothèse que  $I_{sh}$  est très grande, ce qui implique  $I_{sh} \nearrow \Rightarrow I_{sh} \rightarrow 0$

Le bilan d'une cellule se donne par les équations (3, 4, 5) suivantes :

$$I_{cc} = I + I_d \quad (3)$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$V_d = V + (R_s I) \quad (5)$$

$$I_{cc} = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$\exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) \gg 1 \quad (7)$$

$$I_{cc} = I_s \exp\left(\frac{q(V_{pm} + R_s I_{pm})}{nKT}\right) + I_{pm} \quad (8)$$

On obtient:

$$\frac{I_{cc} - I_{pm}}{I_s} = \exp\left(\frac{(V_{pm} + R_s I_{pm})}{\left(\frac{I_{pm} - V_{pm}}{I_{pm}}\right)}\right) \quad (9)$$

La valeur de  $R_s$  se déduit de l'équation :

$$R_s = n_{cell} V_t \left( \frac{(I_{cc} - I_{pm})}{\frac{I_s}{\left(\frac{I_{pm} - V_{pm}}{I_{pm}}\right)}} \right) \quad (10)$$

### IV. REFOUDDISSEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

Afin de simuler les échanges thermiques, des hypothèses simplificatrices ont été supposé :

La cellule photovoltaïque est assimilée à une plaque plane noir, d'émissivité ( $\epsilon = 0.97$ ), dont la surface supérieure est en contact direct avec l'air ambiant (rayonnement en convection naturel), et la surface inférieure en contact avec l'eau de refroidissement (convection forcée).

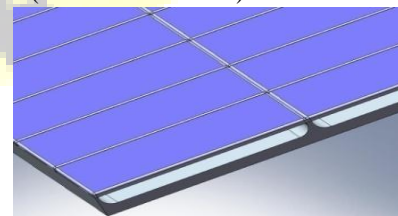


Fig. 3 section de passage du fluide caloporteur

Les échanges de chaleur par conduction au niveau des cellules sont négligés.



La paroi inférieure du collecteur d'eau du refroidissement est isolée (pertes thermique négligées).

La chaleur engendrée par effet de joule ainsi que l'énergie électrique générée au niveau de la cellule est modélisée par une source d'énergie interne de la cellule.

La température de la paroi de la cellule sera calculée par itération. C'est la température d'équilibre des énergies échangées.

La variation de températures du fluide de refroidissement, entre l'entrée et la sortie, est suppose linéaire.

#### A. Coefficients de transfert thermique

##### 1) Surface supérieure du panneau photovoltaïque:

Il s'agit d'échange radiatifs entre la cellule à  $T_c$  et le ciel à la température  $T_\infty$  que l'on peut calculer par la formule empirique suivante (relation Swinbank) [6]:

$$T_c = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (11)$$

Lorsque nous avons une face supérieure d'une plaque chaude, il existe une corrélation empirique qui permet le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle [7]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m \quad (12)$$

$Gr \cdot Pr$ :  $2 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^6$  ( $Gr$ : le nombre de Grashoff;  $Pr$ : le nombre de Prandtl)

$$C = 0,54 \quad m = 0,25$$

Le nombre du Nusselt exprime l'intensité du transfert par convection par rapport à la conduction

$$Nu = \frac{h_r \times L}{\lambda}$$

en déduisant : 
$$h_r = \frac{Nu \times \lambda}{L}$$

##### 2) Surface inférieure du panneau photovoltaïque:

Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'eau et le module modélise la chaleur entre le panneau et l'eau se fait par convection force.

On calcul le nombre de Prandtl: 
$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{\lambda}$$

Le nombre de Reynolds exprime l'intensité d'un écoulement force:

$$Re_L = \frac{\rho \times V \times L}{\mu} = \frac{\rho \times L \times Q_v}{\mu \times S}$$

Pour un écoulement sur un plan, il existe des corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection force. Dans le cas d'un écoulement turbulent ( $Re > 5 \cdot 10^5$  et  $Pr \geq 0,5$ ) [7]:

$$\overline{Nu}_L = 0,035 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (13)$$

$\overline{Nu}_L$ : Nombre de nusselt moyen sur la longueur  $L$  du panneau.

#### B. Bilan d'énergie thermique du panneau photovoltaïque :

Les échanges thermique qui gouvernent le refroidissement du panneau peuvent être schématisés par la figure suivante:

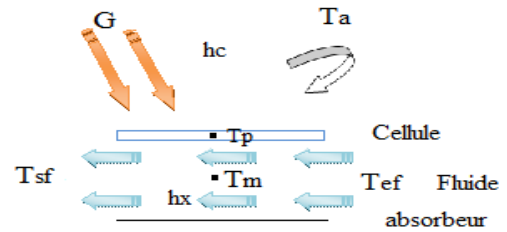


Fig. 4 Représentation de passage du fluide entre la cellule et l'absorbant

Le bilan thermique permet de déterminer le rendement du capteur. Par unité de surface, il s'écrit par [8]:

$$Q^* = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a + \dot{Q}_s \quad (14)$$

Avec:

$Q^*$ : désigne le flux solaire absorbé à la surface du panneau.

$\dot{Q}_u$ : La puissance utile récupérée par le fluide de refroidissement.

$\dot{Q}_a$ : Puissance perdue par convection et par rayonnement vers la face supérieure du capteur.

$\dot{Q}_s$ : Puissance thermique par effet Joule et électrique par effet photovoltaïque générée par le capteur.

$$\dot{Q}^* = \alpha_p \cdot G^* \quad (15)$$

$$\dot{Q}_a = \varepsilon_p \sigma^0 (T_p^4 - T_\infty^4) + h_c (T_p - T_a) \quad (16)$$

$$\dot{Q}_u = h_x S_u (T_p - T_m) \quad (17)$$

L'équation qui sera utilisée pour le calcul de la température d'équilibre de la cellule est la suivante:

$$S_u \left( \alpha_p \cdot G^* - \varepsilon_p \sigma^0 (T_p^4 - T_\infty^4) - h_c (T_p - T_a) \right) - S_u h_x (T_p - T_m) - S_u \left( \frac{\dot{Q}_s}{36} \right) = 0 \quad (18)$$

$G^*$ : Irradiation solaire.

$T_a$ : Température ambiante

$T_m$ : Température de la paroi (cellule).

$T_{ef}$ : Température moyenne du fluide.

$T_{sf}$ : Température du fluide à l'entrée.

$T_{sf}$ : Température du fluide à la sortie.

$h_c$ : Coefficient d'échange externe (avec l'ambiance).

$h_x$ : Coefficient d'échange interne (avec le fluide de refroidissement)

Dans notre étude, le coefficient de transfert  $h_x$  thermique interne (par convection force), sera estimé pour chaque régime, et par conséquent pour chaque débit.

Puisque:  $Re_L > 5 \times 10^5$  et  $Pr \geq 0,5$  l'écoulement est turbulent.

$$\overline{Nu}_L = 174297,783 \cdot Q_v^{0,8} \quad (19)$$

$$h_{L1} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot \lambda}{L_1} = 1209778,956 \cdot Q_v^{0,8} \quad (20)$$





V. RESULTATS DE LA SIMULATION ET VALIDATION DU  
MODELE

Pour vérifier la validation de notre modèle, nous donnons sur les figures 2 et 3 l'évaluation des deux principales caractéristiques I-V et P-V pour les mêmes caractéristiques sur l'effet de différentes températures. De même nous donnons sur les figures 4 et 5 différents éclairagements dus au rayonnement global les points sur chacune des courbes (P, V) correspondent par le programme qu'avons établis.

A. Facteurs affectant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1) Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïque parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température. Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant ( $G=1000W/m^2$ ) à différentes températures (25°C, 40°C, 55°C, 70°C, 85°C). La courbe des caractéristiques va présenter des allures différentes selon les températures.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V :

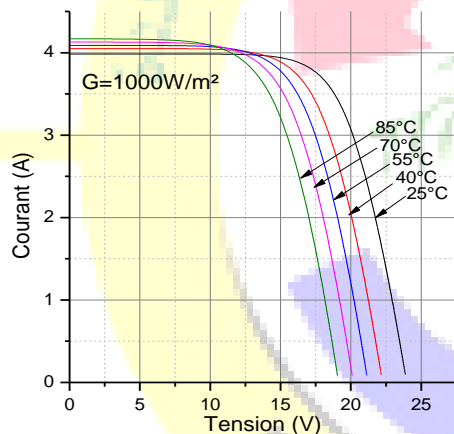


Fig. 5 Caractéristique I(V) d'un module pour différentes températures

Nous remarquons que l'augmentation de la température avec l'éclairage fixe entraîne une diminution nette de la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  et une augmentation du courant du court circuit  $I_{cc}$ , ainsi qu'une diminution de la puissance maximale  $P_{max}$ , la température a donc une influence non négligeable sur la puissance du générateur PV.

Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente. L'influence de la température est plus réduite par rapport à celui de l'ensoleillement, mais il n'est plus négligeable sur la caractéristique courant/ tension d'un générateur. Pour une température qui change de 25°C à 85°C, on peut voir que la variation de la tension change

beaucoup plus que le courant.

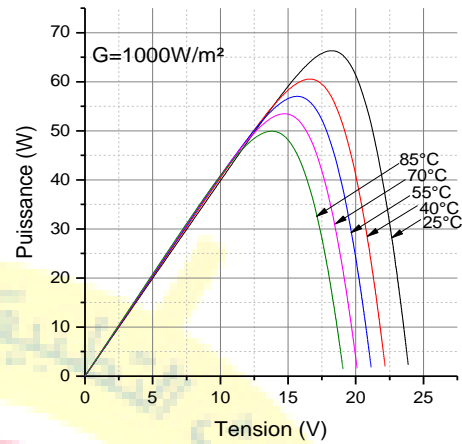


Fig. 6. Caractéristique P(V) d'un module pour différentes températures

Contrairement à la tension, le courant de court-circuit, quant à lui, augmente avec une hausse de température. Ceci s'explique par une meilleure absorption de la lumière, le gap optique baissant avec la hausse. Toutefois cet accroissement d'intensité étant très faible, il peut être négligé au point de la puissance maximale. Nous pouvons déduire:

- Une élévation de température => une légère augmentation du courant.
- Une élévation de la température => une diminution importante de la tension.
- Une baisse de température => une légère diminution du courant.
- Une baisse de température => Une forte diminution de tension.

1) Influence de l'éclairage :

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité  $I_{sh}$  est donc proportionnel à l'ensoleillement.

Les résultats de simulation de la caractéristique I-V du générateur PV sont représentés dans la figure pour différentes valeurs d'éclairage (400W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup>) et une température de 25°C.

Nous remarquons que l'augmentation de l'éclairage avec une température fixe engendre une augmentation de la puissance ou le générateur fonctionne comme un générateur de courant, cependant il y a une légère augmentation pour la tension en circuit ouvert. Il est noté que la tension de circuit ouvert est peu influencée par la variation de l'éclairage, contrairement au courant du court-circuit qui augmente d'une manière consistante.



Le courant (ainsi que le photo courant) est directement proportionnel à l'ensoleillement ou le courant de court circuit  $I_{cc}$  est clairement sensible à l'ensoleillement, par contre, la tension est relativement peu dégradée. On déduit donc que la cellule peut fournir une tension plus ou moins correcte, même à faible éclairage.

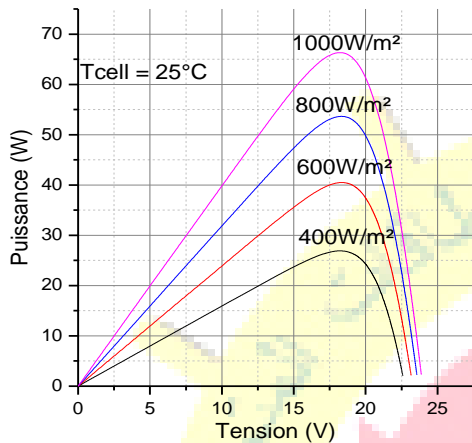


Fig. 7 Caractéristique P(V) pour différentes irradiations solaire

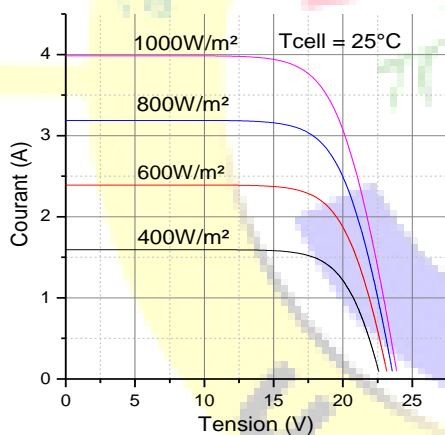


Fig. 8 Caractéristique I(V) pour différentes irradiations solaire.

2) Influence de la résistance de charge :

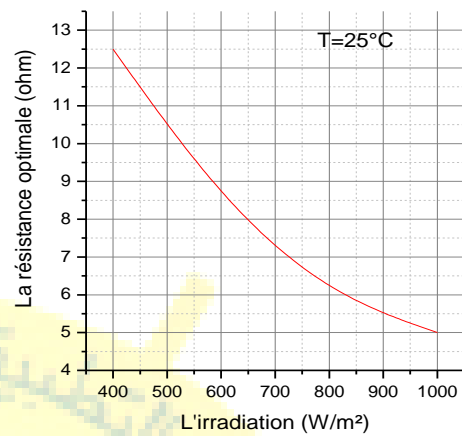


Fig. 9 La résistance en fonction de l'irradiation.

Cette courbe est très importante, elle permet de modéliser le fonctionnement optimal du panneau.

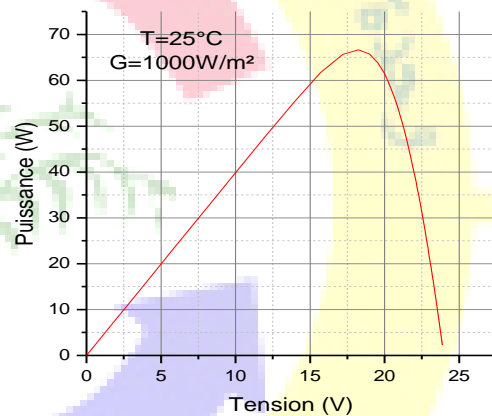


Fig. 10 La puissance en fonction de de l'irradiation.

Nous remarquons pour les deux figures, si on prend une irradiation de 1000W/m² à T=25°C pour un bon fonctionnement à une puissance maximale, il nous faut une résistance de 5Ω cela ne veut pas dire que le capteur d'autre valeur mais donne une puissance moins important.

### VI. REFROIDISSEMENT ET OPTIMISATION

Les recherches engages pour optimiser le fonctionnement d'un photovoltaïque recommandent souvent le refroidissement des cellules avec un fluide caloporteur.

Nous avons étudié trois modes de refroidissement (36 × 1), (18 × 2), (9 × 4) pour déterminer le meilleur mode, qui nous permet d'obtenir une meilleur puissance électrique



maximale, l'irradiation solaire au moins de juillet pour les régions côtières atteint les 800W/m<sup>2</sup>.

A. Comparaison entre les trios modes de refroidissements

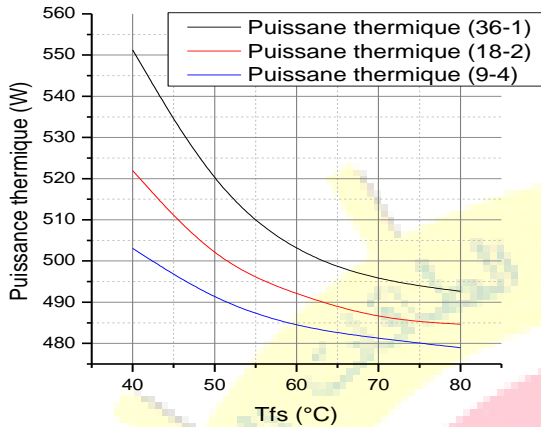


Fig. 11 L'évolution de la puissance thermique des trois modes de refroidissement.

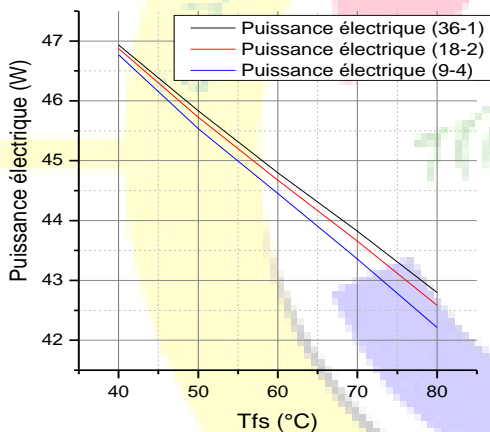


Fig. 12 L'évolution de la puissance électrique des trois modes de refroidissement.

D'après la figure 11 et 12 on constate que le mode (36 × 1) nous donne de meilleur résultats en puissance thermique et électrique.

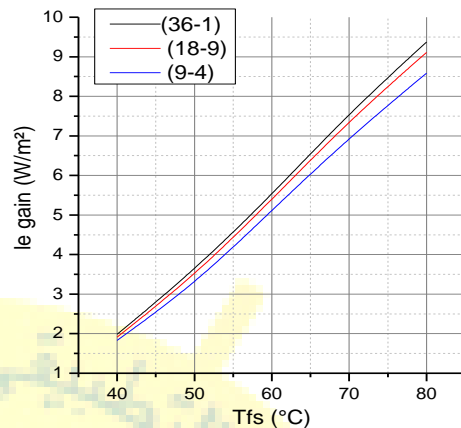


Fig. 13. Le gain en fonction de la température de la sortie.

Nous remarquons que le gain est plus important pour le mode (36 × 1).

La figure 14 représente le débit nécessaire pour une température de fluide à la sortie. Le débit diminue de la même manière pour les trois modes.

Le rendement dans cette figure est favorable pour le mode (36 × 1). Après avoir simulé les différents modes de refroidissement, nous avons opté pour le modèle (36 × 1) qui représente un gain remarquable que ce soit sur la puissance électrique ou sur la quantité de chaleur générer par le fluide caloporteur.

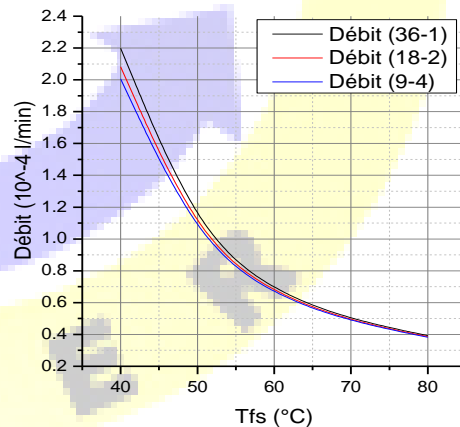


Fig. 14 Le débit des trois modes de refroidissement en fonction de la température de sortie.

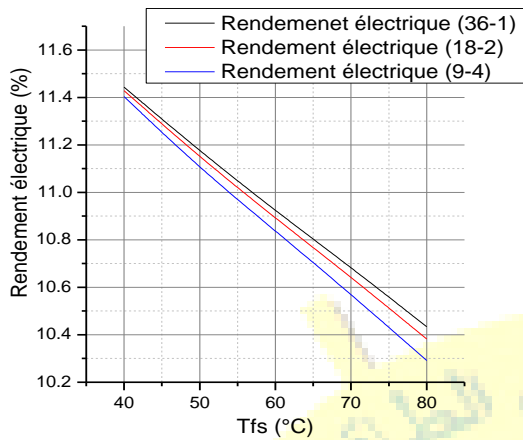


Fig. 15. Le rendement électrique des trois modes de refroidissement en fonction de la température de sortie.

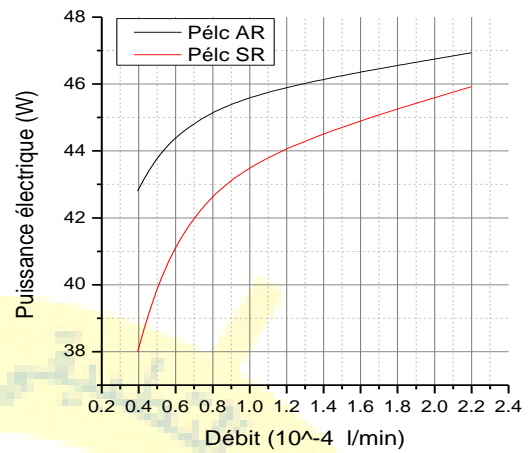


Fig. 17. Puissance électrique de PV (SR) et (AR) refroidissement en fonction du débit.

**B. Refroidissement par le mode (36 × 1)**

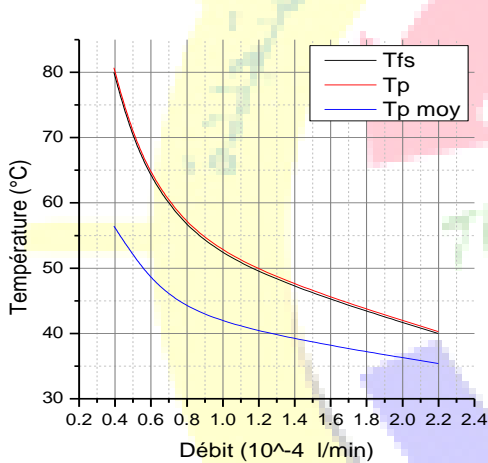


Fig. 16. L'évolution des températures en fonction du débit pour différents modes de refroidissement.

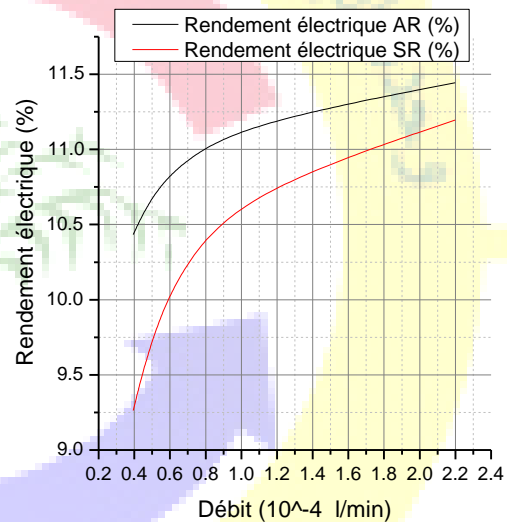


Fig. 18. Rendement électrique de PV (SR) et (AR) refroidissement en fonction du débit.

Nous remarquons qu'une augmentation du débit engendre une diminution de la température, pour une variété du débit la température de fluide à la sortie entre 40 et 80°C.

Nous remarquons dans la figure 17 qu'après avoir fait le refroidissement de capteur, la puissance électrique est devenue plus important de même pour le rendement électrique qui est représenté dans la figure 18.



# Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014

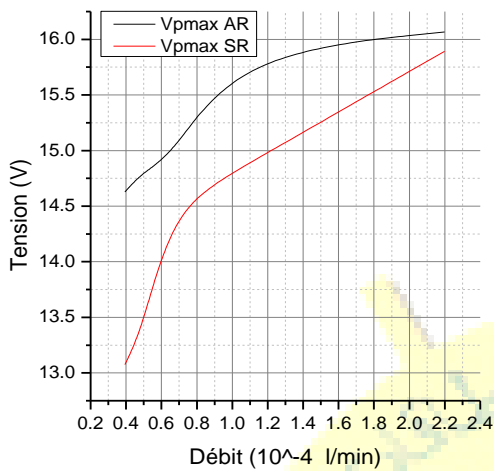


Fig. 19 Tension de puissance maximale du PV (SR) et (AR) en fonction du débit.

Dans les deux graphes l'évolution de la tension augmente, cette évolution est plus importante lorsque le panneau est refroidi.

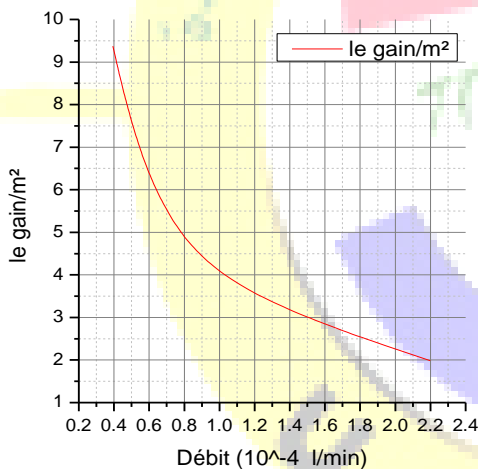


Fig. 20. Le gain en puissance électrique du PV après refroidissement en fonction du débit.

On remarque que le gain est important, il atteint les 10W/m<sup>2</sup>.

### VII. CONCLUSIONS

En effet, pour optimiser le fonctionnement du PV durant une journée, dont l'irradiation solaire est en fonction du temps, nous devons faire varier la résistance de charge avec le temps.

Nous avons transformé le simple capteur PV en unité de cogénération, qui est à l'origine de la naissance des capteurs Volther, tout en produisant de la chaleur et de l'électricité.

Pour améliorer les performances d'un capteur photovoltaïque, il faut adapter la résistance de charge et surtout refroidir les cellules photovoltaïques, il est très utile de prévoir la résistance de charge électrique à mettre en place pour faire fonctionner le panneau photovoltaïque en sa puissance maximale.

Nous pouvons dire que les panneaux photovoltaïques avec un système de refroidissement sont de véritables systèmes de cogénération permettant la production simultanée de l'énergie électrique et de l'énergie calorifique.

La solution que nous avons proposée pour produire simultanément de l'électricité et de la chaleur semble être inévitable si on cherche à produire du froid par des machines frigorifiques à absorption.

### REFERENCES

- [1] E. Lorenzo, "Solar Electricity of photovoltaic systems," Artes, Graphics Gala, Spain, 1955.
- [2] A. Celik, A. Acikgonz, "Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five parameter models," Applied Energy, vol. 84, Issue 1. January 2007.
- [3] J. A. Gow, et al, "development of photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies Fine particles," IEE Proceedings on Electric Power Application, vol. 146, pp.193-200, march 1999.
- [4] R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev. in press.
- [5] R. khezzar, "comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque," revue des énergies renouvelables, vol.13 N°3, PP.379-388, 2010.
- [6] J. Bernard, "énergie solaire calculs et optimisation," Ellipses édition Marketing S.A, pp.105-107, 2011.
- [7] Y. Jannot "cours transferts thermiques 2<sup>ème</sup> année Ecole des Mines Nancy".
- [8] Jean Mare Rajois. Ingénieur de l'école supérieure d'optique héliothermique conseil "Installation solaire à capteur plan" B268 pp. 1-5, 1980.