

*@Manuel de travaux pratiques*¹

TP Énergie Photovoltaïque

Adil Chahboun

Faculté des Sciences et Techniques de Tanger

2016

Ce manuel de travaux pratiques pour des applications en photovoltaïque comporte une petite introduction suivie par des propositions de manipulations.

AC

¹ rédigé avec L^AT_EX

Contents

0.1	Les paramètres d'une cellule photovoltaïque	3
0.2	Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque	4
0.3	Structure d'une cellule PV	6
0.4	Caractéristiques techniques d'un module	7
0.5	Effet de l'ombrage	8
0.5.1	Diodes séries et by-pass	8
0.6	Effet de la température	9
0.7	Caractéristique I-V d'une cellule PV	11
0.7.1	Détermination du courant de saturation I_s	11
0.8	Effet de la luminescence sur V_{co}	12
0.9	Mesure de l'énergie solaire	13
0.9.1	Procédure pratique	13
0.10	Détermination de la distribution des cellules sur un module solaire	15
0.11	Resistances connectés au 12VDC	15
0.11.1	Procédure	16
0.12	ManipI: Détermination des paramètres typiques d'un mod- ule solaire	18
0.12.1	Procédure à suivre	18
0.12.2	Resultats	19
0.13	ManipII: Etude de la relation entre la puissance convertie et la puissance incidente	20
0.14	ManipIII: Etude de la conversion maximale des modules solaires	22
0.14.1	Procédure à suivre	22
0.15	Effet de la température	24
0.15.1	Procédure	24

Rappel théorique

Le principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est la jonction $p - n$. Le courant électrique délivré par une cellule photovoltaïque à travers une charge est formé de deux composantes opposées:

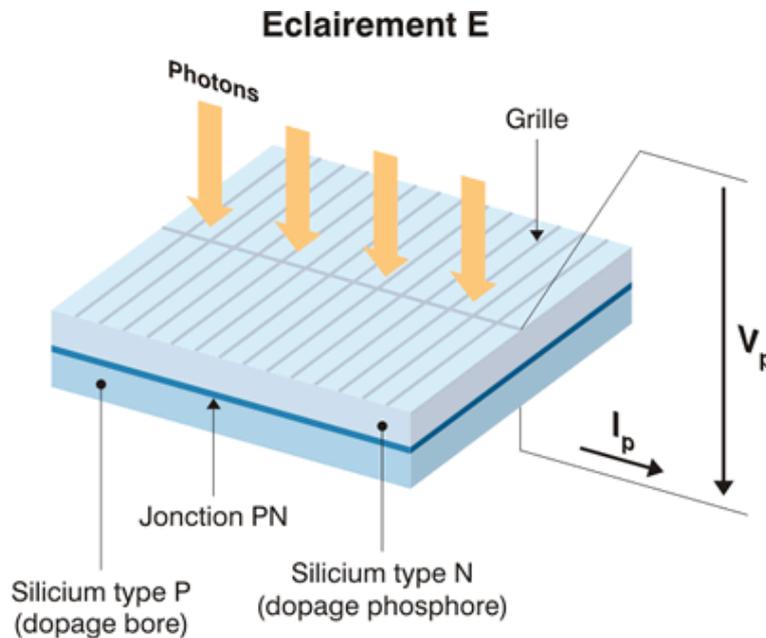


Figure 1: Image illustrant une cellule PV. <http://www.energieplus-lesite.be>

1. Le courant dû à l'illumination (I_L): résultat de l'illumination de la cellule
2. Le courant du noir (dark current) (I_0): résultat des recombinaisons dans la jonction $p - n$

Donc la cellule photovoltaïque se comporte en absence de l'illumination comme une diode. La variation du courant en fonction de la tension est donnée par l'équation classique d'une diode:

$$I \approx I_0(T) \left(\exp \frac{eV}{nkT} - 1 \right) \quad (1)$$

où e est la charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Coulombs}$), k la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{Joule}/^\circ\text{K}$), T est la température absolue en $^\circ\text{K}$, n est le facteur d'idéalité de la diode. Il est généralement compris entre 1 et 2 ($1 \leq n \leq 2$) et I_0 est le courant inverse de saturation de la diode. Il varie en fonction de la température suivant la relation suivante:

$$I_0(T) = \exp \frac{-E_g}{kT} \quad (2)$$

Donc le courant qui traverse une impédance en parallèle avec la cellule photovoltaïque est:

$$I = I_0(T) \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) - I_L \quad (3)$$

Comme l'illustre bien l'expression 3, le courant est la superposition de deux composantes. A faible voltage, on a $I \approx I_L \equiv I_{sc}$. I_{sc} étant le courant de court circuit (short cut current).

La tension de circuit ouvert V_{CO} peut être déduite à partir de l'équation 3. En effet:

$$V_{CO} \approx \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_0(T)} \right) \quad (4)$$

La caractéristique I(V) montrant les différentes caractéristiques est donnée par la figure

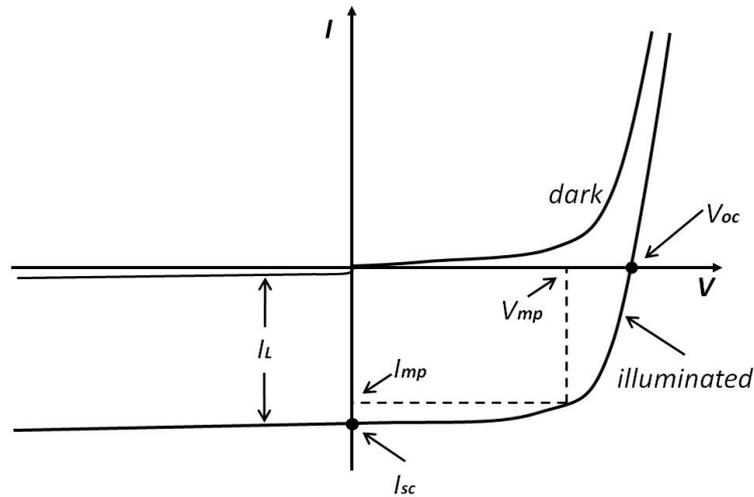


Figure 2: Caractéristique I-V d'une cellule PV dans le noir et éclairée

Une expression plus réaliste de la variation du courant en fonction de la tension appliquée à une impédance (charge) en parallèle à la cellule photovoltaïque doit tenir en compte des résistances en série (R_s) et des

résistances en parallèles (R_p). Les résistances en séries R_s sont dues aux contacts métalliques, à la grille formant le module, et à la résistance interne du semiconducteur (ici le silicium polycristallin). Les résistances en parallèles R_p sont dues aux défauts à l'interface de la jonction $p - n$ et sont responsables des courants de fuite. En tenant compte de ces deux facteurs, la caractéristique courant-tension deviendra:

$$I = I_L - I_0(T) \left[\exp\left(\frac{eV + R_s I}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (5)$$

Le circuit électronique équivalent est donné par la figure

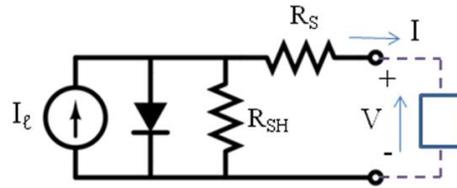


Figure 3: Circuit Equivalent d'une cellule photovoltaïque

0.1 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque donnée par la figure . A partir de cette courbe on peut déduire les différents paramètres qui définissent la qualité et l'efficacité de conversion d'une cellule. Ces paramètres sont:

1. **Courant de court-circuit** I_{cc}
C'est le courant qu'on mesure en court circuitant la cellule. Il dépend de la nature de la surface et l'intensité de la lumière incidente. Sa valeur est en général de l'ordre de $10 - 35 mA/cm^2$
2. **Tension de circuit ouvert** V_{co}
Cette tension peut être mesurée en mettant la jonction à vide. Elle représente la tension maximale que peut délivrer la cellule.
3. **Point de puissance maximale** M_{pp}
C'est un point qu'on détermine à partir de la courbe $I(V)$ et pour lequel la cellule délivre le maximum de puissance.
4. **Facteur de forme** FF
Ce facteur est défini par l'expression suivante:

$$FF = \frac{I_p V_p}{I_{cc} V_{co}} \quad (6)$$

4 0.2. Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque

Le facteur de forme FF est généralement inférieur à 1. Pour les cellules commerciales sa valeur oscille entre 0.7 et 0.8. Il donne une idée sur la qualité de la cellule.

5. Coefficient de conversion

Ce rapport donne une idée sur l'efficacité de conversion solaire. C'est le rapport entre la puissance électrique délivrée par la cellule et la puissance de la lumière incidente:

$$\eta = \frac{W_p}{W_r} \quad (7)$$

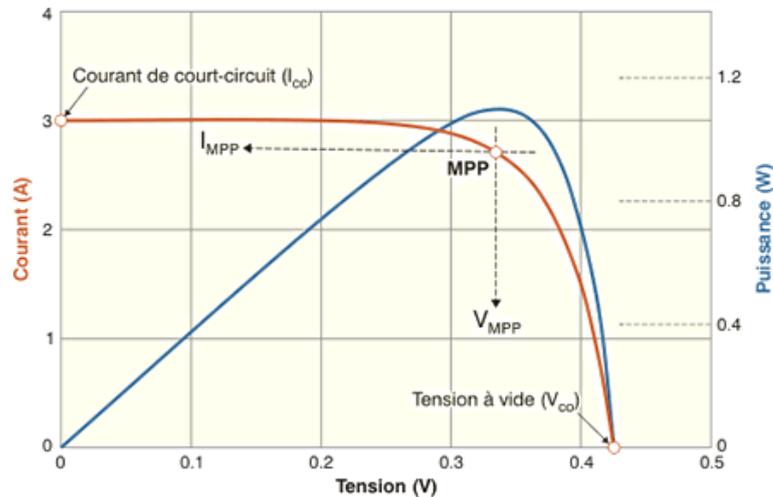


Figure 4: Courbe I-V d'une cellule PV. Source: <http://www.energieplus-lesite.be>

0.2 Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque

Comme a été signalé en haut, une cellule PV peut être décrite d'une manière assez "rigoureuse" en suivant l'expression 5. Cependant, si on considère un module, sa caractéristique va dépendre du nombre de cellules en série et le nombre de cellules en parallèles. En assumant que les cellules sont parfaitement identiques, alors le courant que génère le module doit être égal au nombre de cellules parallèles multiplié par le courant que génère une cellule. Alors que la tension délivrée par le module est égale à la tension délivrée par chaque cellule multipliée par le nombre de cellules en série.

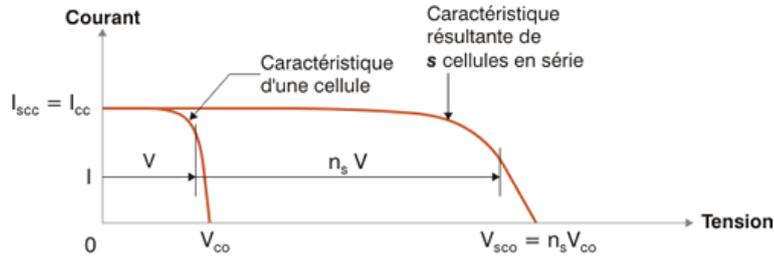


Figure 5: Coube I-V d'un module de s cellules en série.

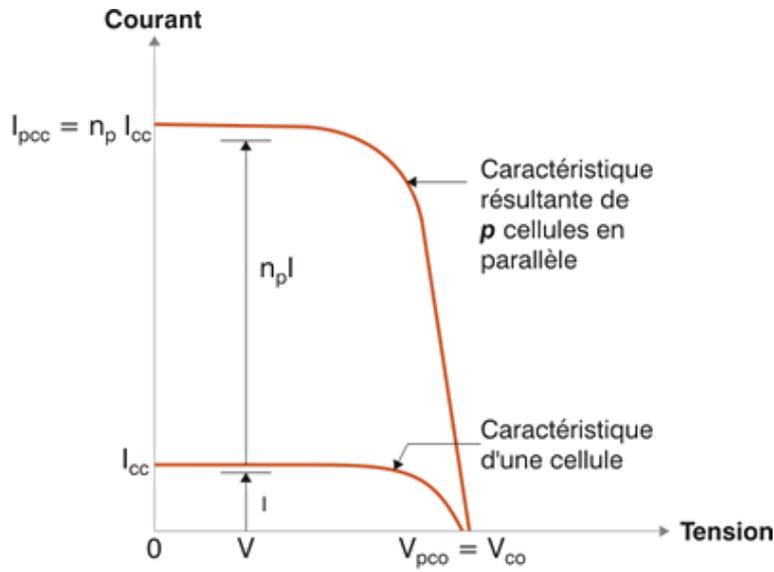


Figure 6: Coube I-V d'un module de p cellules en parralléle.

$$\begin{aligned} I_{mod} &= I_c N_p \\ V_{mod} &= V_c N_s \end{aligned} \tag{8}$$

où N_s et N_p sont les nombres des cellules en série et en parallèles, respectivement. La combinaison des équations 5 et 8 donne l'équation caractéristique d'un module en fonction des paramètres des cellules:

$$I = N_p (I_L - I_0(T) [\exp(\frac{eV/N_s + R_s I/N_p}{nkT}) - 1]) - \frac{V/N_s + R_s I/N_p}{R_p} \tag{9}$$

0.3 Structure d'une cellule PV

Pour collecter le photocourant d'une cellule PV deux contacts métalliques sont réalisés. L'un sur la face arrière et l'autre sur la face avant éclairée par la lumière (soleil). Un réseau de lignes métalliques très fines est réalisé sur la surface avant afin de collecter le courant, tout en laissant la lumière passer. La face avant est aussi couverte par une fine couche antireflective permettant un maximum d'absorption de la lumière et minimisant la réflexion. Une couche de verre auto adhésif est collée sur la face avant afin de la protéger des chocs mécaniques.

Une cellule solaire est la base du système PV. Typiquement, elle est de quelques cm^2 et produit une puissance de l'ordre de $1Watt$. Afin d'obtenir plus de puissance plusieurs cellules sont connectées en série et en parallèle, formant ainsi un module. Un réseau solaire est formé de plusieurs modules liés en série et en parallèle afin d'obtenir le courant et la tension voulus.

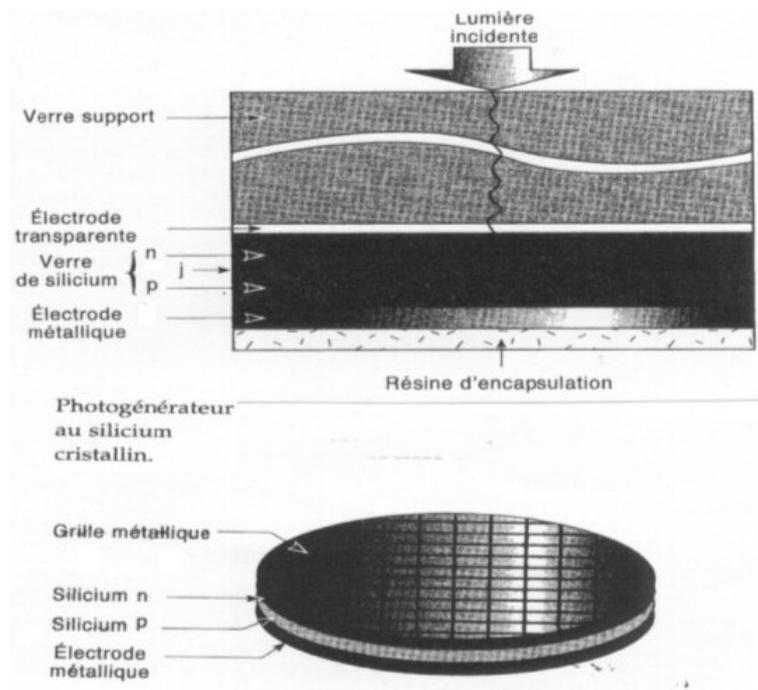


Figure 7:

0.4 Caractéristiques techniques d'un module

Les caractéristiques essentielles d'un module photovoltaïque sont :

1. P_c : Puissance crête en Watt crête W_c (Watt Peak- W_p -en anglais)

2. U_{co} : Tension continue à vide en Volt
3. U_{mpp} à P_{max} : Tension au point de puissance maximale
4. I_{cc} : Courant de court-circuit en Ampères
5. I_{mpp} à P_{max} : Courant au point de puissance maximale
6. *NOCT*: température normale de fonctionnement de la cellule (Normal Operating Cell Temperature)
7. Les coefficients de pertes de tension, de courant et de puissance, en fonction de la température
8. Dimension et poids

Les valeurs crêtes (Watt-crête, puissance crête) correspondent à des grandeurs électriques délivrées par le module dans des conditions standard définies de test, normalisées comme suit:

1. Ensoleillement: $1000W/m^2$
2. Température des cellules: $25^{\circ}C$

Les fabricants testent tous les modules sous ces conditions d'essais et ils leurs attribuent alors leurs caractéristiques électriques. Cela permet ainsi de comparer les performances des modules entre eux. Notez bien qu'il ne s'agit pas des conditions réelles de fonctionnement des panneaux solaires. En effet, la température de cellules également (disons entre 20 et $80^{\circ}C$ en fonctionnement, c'est à dire ensoleillées). L'ensoleillement quand à lui atteint péniblement les $1000W/m^2$ par beau temps à midi. La conséquence est que sous un beau soleil, vos panneaux vont plutôt délivrer une puissance de l'ordre de 70% de leur puissance crête.

Il existe des conditions de test normalisées qui permettent de déterminer la puissance du panneau photovoltaïque dans des conditions plus proches de la réalité. Il s'agit des conditions *NOCT*:

1. Ensoleillement: $800W/m^2$
2. Température ambiante: $25^{\circ}C$ (la température des cellules quant à elle varie en fonction des panneaux, cette valeur est indiquée sur les fiches techniques des modules)
3. Répartition spectrale du rayonnement *AM1.5*

Les modules solaires sont reliés entre eux en série pour augmenter la tension du générateur et en parallèle pour augmenter son courant. Le raccordement en série est effectué directement entre les modules, le raccordement en parallèle de chaque branche est effectué dans le boîtier.

0.5 Effet de l'ombrage

0.5.1 Diodes séries et by-pass

Le phénomène de Mismatching (courant différent délivré par des cellules en série) engendre des pertes et oblige à éviter les ombres (même partielles) sur le champ de panneaux et cela oblige aussi à regrouper sur une même branche les modules ayant un courant de court-circuit le plus proche possible. Le courant de l'ensemble de la chaîne de modules prend celui le courant le plus faible. Afin d'éviter que les modules ne se comportent comme des récepteurs et engendre un réchauffement des cellules en cas d'éclairage partiel (phénomène de "Hot spot"), il faut installer des diodes by-pass (également appelées anti-parallèles) sur chaque module. Il est également possible d'installer un autre type de diodes appelées "diodes de série". Ces diodes sont montées en série sur chaque branche de modules (une par branche) pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne celle-ci ne se comporte comme un récepteur et que le courant n'y circule en sens inverse. Ces diodes sont indispensables sur de gros systèmes. Cependant on a maintenant tendance à ne plus utiliser de diodes séries (qui génèrent une perte de tension et donc une perte de puissance...) et à préférer des fusibles. Par exemple le guide UTE C15-712 préconise l'utilisation de fusibles à partir de 4 strings de modules.

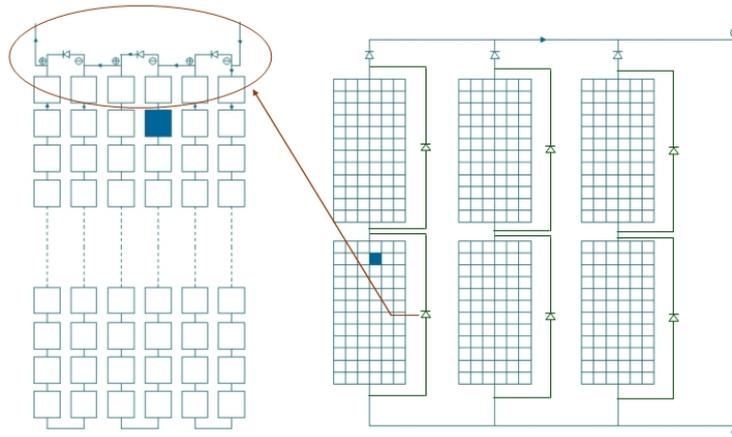


Figure 8:

0.6 Effet de la température

La température a un effet direct sur la mobilité des charges dans les sc. Cela influence évidemment le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. En effet, quand la température augmente le courant du court-circuit de la

cellule I_{cc} augmente, alors que la tension du circuit ouvert V_{co} diminue. Cela est bien illustré par la figure suivante:

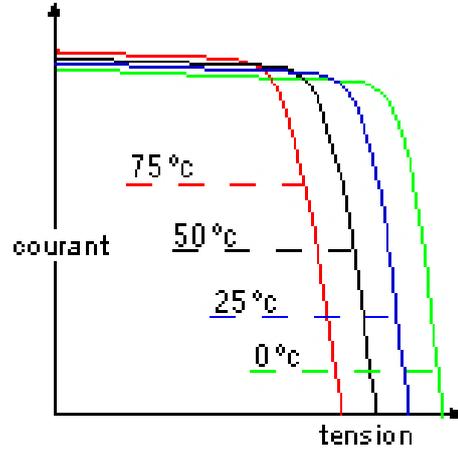


Figure 9:

L'effet de la température sur la puissance convertie peut être analysé en étudiant indépendamment l'effet sur le courant et la tension. Si on considère que I_0 et V_0 sont le courant et la tension de la cellule à température ambiante, l'augmentation de la température de ΔT provoque le changement suivant:

$$\begin{aligned} I_{cc} &= I_0(1 + \alpha \delta T) \\ V_{co} &= V_0(1 - \beta \delta T) \end{aligned} \quad (10)$$

La puissance convertie par la cellule va devenir alors:

$$P = VI = I_0(1 + \alpha \delta T) \cdot V_0(1 - \beta \delta T) \quad (11)$$

En négligeant le terme en $\alpha \beta$, on obtient:

$$P = P_0[1 + (\alpha - \beta) \cdot \delta T] \quad (12)$$

Pour une cellule de silicium monocristallin, α est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}/^\circ C$ et β est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6}/^\circ C$. Donc la puissance résultante après augmentation de la température de δT est:

$$P = P_0(1 - 0.0045 \delta T) \quad (13)$$

L'équation 13 montre que la puissance convertie diminue de 0.45% pour chaque augmentation de la température de $1^\circ C$.

Setup1:

0.7 Caractéristique I-V d'une cellule PV

Le but de cette manipulation est d'obtenir la caractéristique $I(V)$ de la cellule en absence de toute luminescence. Pour procéder il faut couvrir complètement la cellule PV et mesurer le courant I qui la traverse tout en variant la tension V .

Note importante: I doit rester inférieur à $200mA$ et la tension appliquée inférieure à $1V$.

1. Remplir le tableau suivant:

$I(mA)$	$V(Volt)$
200	

2. Tracer la courbe $I(V)$ et en déduire la tension seuil à partir de laquelle la diode $p - n$ commence à laisser passer le courant

0.7.1 Détermination du courant de saturation I_s

Dans cette partie on va essayer de déterminer le courant de saturation I_s en absence de toute illumination. En effet, si on introduit le logarithme népérien sur l'expression 1, on obtient:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eV}{nKT} \quad (14)$$

où $\frac{e}{nKT}$ est une constante à température constante. Donc si on trace $\ln I$ en fonction de $\frac{eV}{nKT}$ on obtiendra une droite avec comme pente $\frac{e}{nKT}$ et comme point d'intersection avec l'axe des y , $\ln I_0$.

0.8 Effet de la luminescence sur V_{co}

Cette manipulation va permettre d'étudier l'effet de la luminescence (%) sur la tension du circuit ouvert de la cellule PV, V_{co} . Pour cela, il faut couvrir partiellement la cellule et mesurer V_{co} .

1. Remplir le tableau suivant:

%	$V_{co}(Volt)$
100%	

2. Tracer la courbe $V_{co}(\%)$

0.9 Mesure de l'énergie solaire

Le but de cette manipulation est de mesurer la puissance électrique en fonction des angles d'exposition de la cellule PV. De cette manière on va essayer de déterminer l'angle optimum donnant le maximum de puissance.

0.9.1 Procédure pratique

1. Orienter le module vers le soleil (ou la lampe halogène)
2. Placer le module à un angle de 10° , et mesurer le courant (en utilisant le multimètre en mode courant) de court circuit circulant dans la cellule. Répéter la même opération pour mesurer la tension de circuit ouvert (en utilisant le multimètre en mode tension). Utiliser la table fournie par le constructeur pour en déduire la puissance (W/m^2) convertie. Répéter la même démarche pour différents angles ($\alpha = 10, 20, 30, 40, 50$).
3. Remplir le tableau suivant:

$\alpha(\text{deg})$	$P(W/m^2)$	$V_{co}(\text{Volt})$
10		
20		
30		
40		
50		

En bas on trouvera un tableau de calibration fourni par le constructeur:

$P(W/m^2)$	$I(mA)$
1000	324
950	307.8
900	291.6
800	259.2
750	243
600	194.4
500	162
400	129.6
300	97.2
250	81
225	40.5

4. Tracer les deux courbes courbe $P(\alpha)$ et $V_{co}(\alpha)$ sur un même graphe. Vérifier si la puissance est obtenue pour le maximum de V_{co} .

0.10 Détermination de la distribution des cellules sur un module solaire

Le but de cette manipulation est de déterminer l'arrangement des cellules dans le module. Pour procéder, on va utiliser le module PV, le régulateur et le voltmètre.

Procédure:

1. Placer le module à une inclinaison de l'ordre de 30 deg
2. Utiliser un cache pour couvrir les colonnes du module solaire en partant de la gauche vers la droite, et mesurer la tension du circuit ouvert V_{co} . Remplir le tableau suivant:

% caché	V_{oc}

3. Refaire la même chose en couvrant le module d'en bas vers le haut et en mesurant chaque fois V_{oc} .
4. Sachant que la tension du circuit ouvert "théorique" du module PV est de 22.25V et que celle d'une cellule solaire est de 0.6V, en déduire comment le module solaire est arrangé.
5. (a) quelles sont les avantages d'un module avec des cellules en parallèles?
 (b) quelles sont les avantages d'un module avec des cellules en réseau?
 (c) quelles sont les avantages d'un module avec des cellules en série?

0.11 Resistances connectés au 12VDC

Le but de cette manipulation est de voir le module photovoltaïque fonctionnant avec des charges en courant continu (DC).

0.11.1 Procédure

1. Placer le module à une inclinaison pour obtenir le maximum de conversion

2. Réaliser le montage où les deux lampes sont en parallèle
3. Noter les différentes valeurs données par le régulateur
4. Maintenant on refait la même chose, mais en plaçant les deux lampes charges en série. Essayer d'analyser comment le courant change et comment les différents paramètres changent au niveau du régulateur.

Setup 2

0.12 ManipI: Détermination des paramètres typiques d'un module solaire

Le but de cette manipulation est d'étudier un module photovoltaïque par la détermination de la courbe caractéristique $I(V)$ et d'autres paramètres comme le courant de court-circuit I_{cc} , la tension du circuit ouvert V_{co} et la puissance maximum P_{max} .

0.12.1 Procédure à suivre

1. Vérifier que le réostat est son maximum de résistance. Tourner doucement le bouton dans *le sens inverse de la montre* jusqu'à la fin de course. Mettre le bouton en position ON/UP
2. Placer le selecteur de charges (DC-Load) en position 2
3. Déconnecter les lampes (Bouton en position down/off) qui sont connectées en parallèles avec le rhéostat
4. Connecter le cable tri-phasé au secteur et vérifier que tous les fils sont connectés. Allumer le module et la console électronique.
5. Vérifier la position des différents interrupteurs: Ventilateurs en position OFF, les panneaux solaires sont en parallèles, et les charges (DC loads) sont placées avant le régulateur
6. Maintenir les panneaux en parallèle et glisser la position du contrôleur de SUN1 au maximum afin d'obtenir le maximum d'insolation. Noter à partir de l'afficheur le courant (*DC current*), la tension (*DC voltage*), et la puissance de la radiation (P_r).
7. mettre le rhéostat à 90% à peu près et noter les valeurs de I , V , et P_r
8. Répéter cette opération 7 fois jusqu'à atteindre 10% du rhéostat, et enfin 0% correspondant au court-circuit du module solaire.
Note importante: Il ne faut jamais laisser le rhéostat en position court-circuit pour une période prolongée. Cela peut provoquer une augmentation de la température ce qui peut dégrader les équipements.
9. Afin d'obtenir la tension du circuit ouvert du panneau, mettre le bouton de "DC Load" en **position 1**
10. On peut refaire la même chose pour le module 2.

0.12.2 Resultats

Remplir le tableau suivant:

Position $R(\%)$	Module 1			Module 2		
	$I(Amp)$	$V(Volts)$	$P_r(W/m^2)$	$I(Amp)$	$V(Volts)$	$P_r(W/m^2)$
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						
20						
10						
0						

Tracer les courbes $I(V)$ pour les deux modules et comparer la avec les courbes données par le constructeur.

une insulation maximum et une charge constante:

$$\eta_1 = P_1/P_{nom}$$

$$\eta_2 = P_2/P_{nom}$$

Determiner l'efficacité maximale de la conversion photovoltaïque pour les deux modules, en tenant compte de leur dimensions:

$$\eta_{1f} = P_{1-max}/P_{r-max} \eta_{2f} = P_{2-max}/P_{r-max}$$

0.14 ManipIII: Etude de la conversion maximale des modules solaires

Le but de cette manipulation est d'obtenir le point de puissance maximale pour différentes insulations. Les valeurs du courant de court circuit I_{cc} et de tension du circuit ouvert V_{co} obtenues dans la manipI seront utilisées.

0.14.1 Procédure à suivre

1. Vérifier que le réostat est son maximum de résistance. Tourner doucement le bouton dans *le sens inverse de la montre* jusqu'à la fin de course. Mettre le bouton en position ON/UP
2. Placer le selecteur de charges (DC-Load) en position 2
3. Déconnecter les lampes (Bouton en position down/off) qui sont connectées en parallèles avec le rhéostat
4. Connecter le cable tri-phasé au secteur et vérifier que tous les fils sont connectés. Allumer le module et la console électronique.
5. Verifier la position des differents interrupteurs: Ventilateurs en position OFF, les panneaux solaires sont en parallèles, et les charges (DC loads) sont placées avant le régulateur
6. Maintenir les panneaux en parallèle et glisser la position du controleur de SUN1 au maximum afin d'obtenir le maximum d'insulation.
7. Changer doucement la position du curseur du réostat de 100% à 0% tout en notant la puissance obtenue ($I \times V$). On essaye de chercher la puissance maximale (ça peut se déterminer à partir de la courbe I-V)
8. Repeter la procédure précédente tout en réduisant graduellement la puissance de l'insulation de SUN-I.
9. Tout en variant la résistance du rhéostat de 100% à 0%, remplir le tableau suivant:

<i>Sun1and/orSun2</i>	Module I		Module II	
	$P_{max}(W)$	$P_r(W/m^2)$	$P_{max}(W)$	$P_r(W/m^2)$
Maximum				
Minimum				
OFF				

Tracer la courbe $P_{max}(P_r)$ pour les deux modules. Essayer d'expliquer les resultats observés. En utilisant I_{cc} et V_{co} déterminer le facteur de forme pour chaque module pour le maximum d'insulation:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}}$$

Comparer ce resultat avec celui du tableau donné par le constructeur [0.13](#)

Tracer le graphe $V_{oc}(T)$ (Tension du circuit ouvert en fonction de la température ST-2) avec et sans ventilation. Sur chaque graphe indiquer la puissance d'insulation (P_r)