

Les CPGE du lycée VIELJEUX	Domaine du calcul : proposer un modèle	TD2 S2 Pajol Modèle		
	Compétence : Proposer et valider un modèle pour la ferme photovoltaïque de la ZAC Pajol	<b>TSI1</b>		
		Situation dans le temps		
		S2		
	durée : 1 h	Niveau de difficulté : 2		

**Compétences visées : Le choix d'un modèle électrique de comportement d'un panneau solaire est établi dans le but de mener une étude analytique comparative d'efficacité énergétique entre deux constructeurs de panneaux solaires photovoltaïques (PSPV). Ceci afin de caractériser les performances énergétiques des panneaux au regard du cahier des charges.**

### Choisir un modèle de comportement et le mettre en œuvre

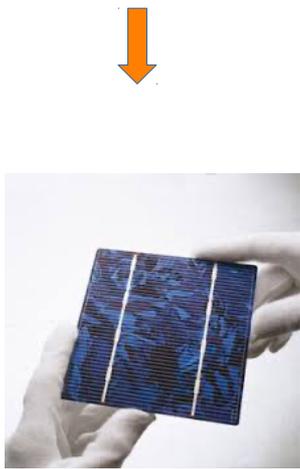
Le comportement des panneaux solaires et le principe de fonctionnement sont assez bien connus. Transformer l'énergie solaire en énergie électrique est la fonction principale des PSPV. Mais prévoir et caractériser plus précisément leur fonctionnement afin de comparer leurs performances nécessite de disposer d'un modèle de comportement à la fois simple et proche du système réel. Les outils de simulation ont fait d'énormes progrès en la matière mais restent pour autant de simples outils qui ne feront pas de choix de manière autonome. Un tour d'horizon des principaux modèles existants doit permettre de choisir l'un d'entre eux afin de poursuivre l'étude comparative entre deux panneaux solaires provenant de deux fournisseurs différents et concurrents.

### Objectifs :

Choisir un modèle qui remplacera les panneaux solaires dans des test de simulation afin de déterminer le meilleur fournisseur pour une utilisation déterminée.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est déduit du comportement d'une diode « normale » dont la caractéristique courant-tension  $I(V)$  se décale selon l'axe des courants de manière à ce que cette « diode » devienne génératrice. C'est l'irradiance qui provoque ce décalage.

En fait, une cellule photovoltaïque se comporte comme une diode, un peu particulière, certes, puisqu'elle peut travailler dans 3 quadrants



La cellule

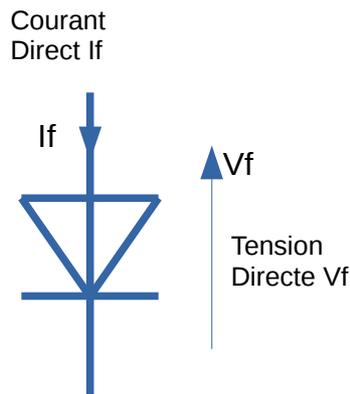
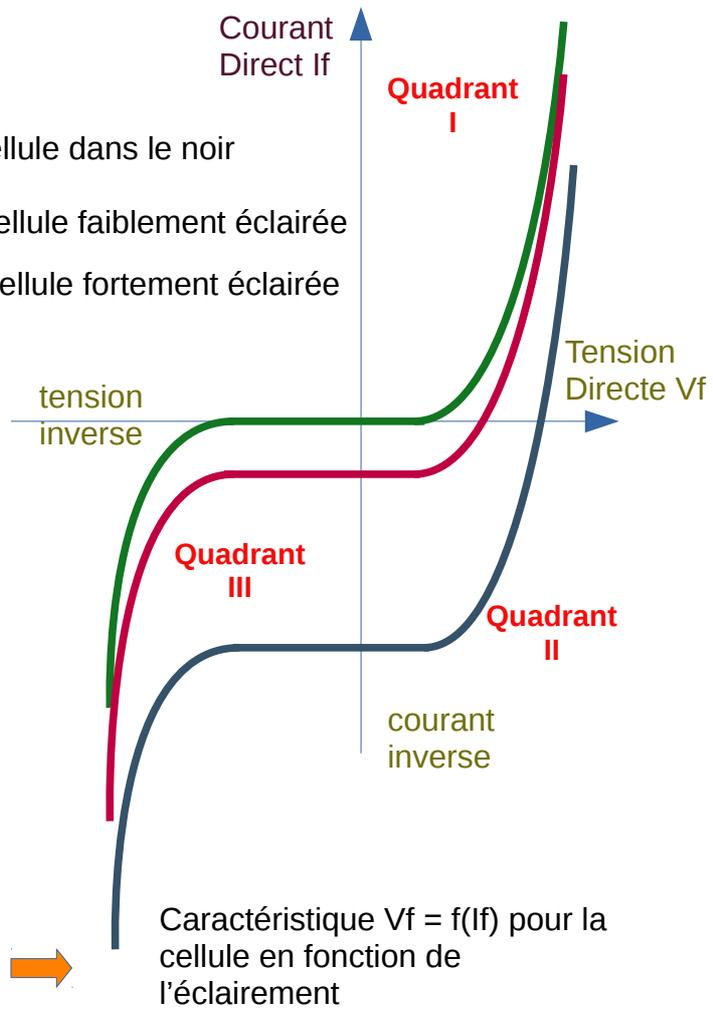


Schéma électrique de la cellule en l'absence de lumière

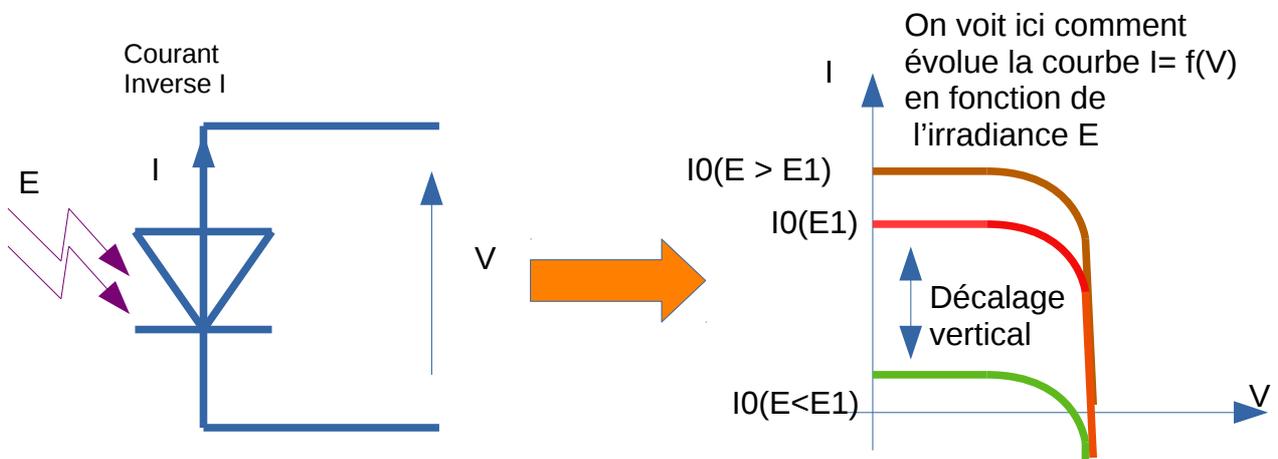


Caractéristique  $V_f = f(I_f)$  pour la cellule en fonction de l'éclairement

Dans les quadrants **I** et **III** la cellule est réceptrice d'énergie tandis que dans le quadrant **II** elle est émettrice d'énergie. Génératrice, donc, c'est l'effet recherché. Cette énergie provient du rayonnement solaire et plus particulièrement de l'irradiance solaire dont la valeur (exprimée en  $W/m^2$ ) modifie la caractéristique  $I_f = f(V_f)$  en la déplaçant selon l'axe des courants.

\*  $V_f$  avec un  $f$  pour forward (direct), dans le sens passant de la diode, idem pour le courant

Du coup, c'est seulement le quadrant **II** qui est intéressant, car il est producteur d'énergie. Pour la suite, et par commodité, ce quadrant sera « retourné » pour ne trouver que des grandeurs positives et nous ne parlerons plus que du courant  $I$  (inverse) et de la tension  $V$  (directe).

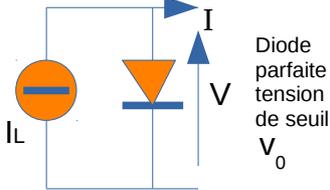
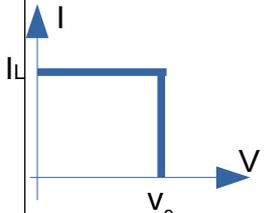
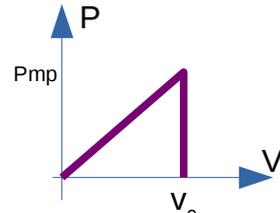
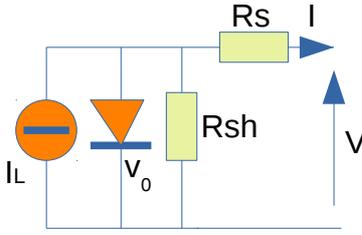
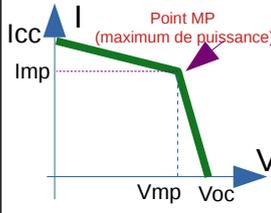
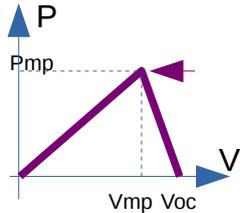
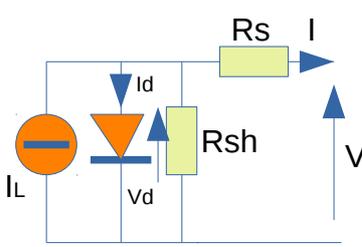
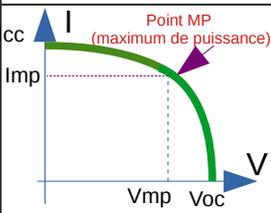
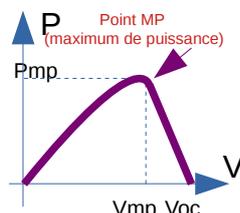


On voit ici comment évolue la courbe  $I = f(V)$  en fonction de l'irradiance  $E$

On appelle le point MP (maximum de puissance) ou MPPT, le point de la courbe (I,V) où le produit  $V \cdot I$  passe par un maximum. C'est exactement au niveau du coude de la courbe (I,V).

Il faut toujours chercher à s'y placer pour extraire le maximum de puissance d'une cellule, d'un panneau ou d'une installation complète.

Les modèles de comportement sont assez nombreux. On peut en dégager quelques uns parmi les plus utilisés.

N°	Schéma électrique	Equation	Caractéristiques $I = f(V)$	Caractéristiques $P = f(V)$
1	 <p>Diode parfaite tension de seuil <math>V_0</math></p> <p>Modèle à 2 paramètres : <math>I_L</math> et <math>V_0</math></p>	$I = I_L$ si $V < V_0$ $I = 0$ si $V \geq V_0$		
2	 <p>La diode est toujours parfaite, sa tension de seuil vaut <math>V_0</math>  Modèle à 4 paramètres : <math>I_L</math>, <math>V_0</math>, <math>R_s</math> et <math>R_{sh}</math></p>	<p>Si la diode est bloquée :</p> $I = \frac{-V}{R_s + R_{sh}} + \frac{I_L \cdot R_{sh}}{R_{sh} + R_s}$ <p>Si la diode est passante :</p> $I = \frac{-V}{R_s} + \frac{V_0}{R_s}$	 <p>La caractéristique est constituée de 2 segments de droite</p>	<p>Le point MP se situe juste à la mise en conduction de la diode</p> 
3	 <p>La diode est réelle</p> <p>Modèle à 5 paramètres : <math>I_L</math>, <math>I_0</math>, <math>N_{id}</math>, <math>R_s</math>, <math>R_{sh}</math>  Les paramètres <math>R_s</math> et <math>R_{sh}</math> varient avec la température.</p>	<p>On a :</p> $V = V_d - R_s \cdot I$ <p>Ce qui donne une relation <math>I = f(V)</math> qui est assez compliquée</p> $I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right)$ $V_T = \frac{kT}{q} \cdot N_{id}$ <p><math>N_{id}</math> est un facteur d'idéalité, en général <math>N_{id} = 1</math></p>		<p>Il n'y a plus de discontinuité de conduction de la diode</p> 

Il en existe bien d'autres, notamment de celui de Bishop, qui tient compte des aléas de fonctionnement.

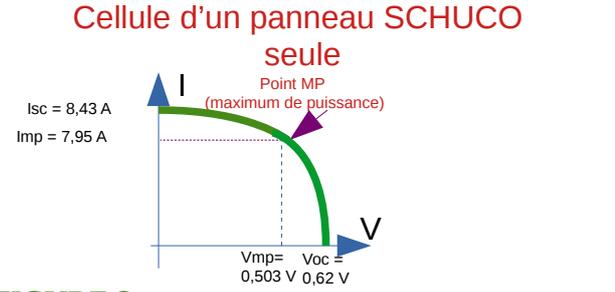
Le nom des grandeurs utilisées est défini ci-dessous :

Nom des grandeurs	Définition	Unités
$R_s$	Résistance série	$\Omega$
$R_{sh}$	Résistance shunt	$\Omega$
$I_L$	Source de courant générée par la lumière	A
$V_d$	Tension directe aux bornes de la diode	V
$I_d$	Courant direct dans la diode	A
$N_{id}$	Facteur d'idéalité de la diode (qui en général est égal à 1)	Sans unité
$q$	Charge de l'électron ( en module)	$1.6 \cdot 10^{-19}$ C
$k$	Constant de Boltzman	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K <sup>-1</sup>
$T$	Température ambiante de la cellule photovoltaïque	K
$V_{oc}$	Valeur de la tension V si $I = 0$ (circuit ouvert)	V
$I_{sc}$	Courant de court circuit	A
$I_{mp}$	Courant au point MP ou MPPT	A
$V_{mp}$	Tension au point MP ou MPPT	V
$P_{max}$	Maximum de puissance au point MP	W

## I. Choisir d'un modèle pour une cellule

I.1 Sachant que les contraintes de température sont déterminantes et que les écarts entre les différents constructeurs sont assez ténus, quel modèle faudrait-il choisir, parmi les trois qui sont proposés, pour pouvoir comparer les performances des cellules ?

### Recherche des performances d'une cellule

<p>La caractéristique I(V) réelle d'une cellule -prise isolément- d'un panneau Schuco identique à ceux qui sont utilisés sur la toiture du la Zac Pajol est fournie ci-conytre.</p> <p>L'irradiance est fixée à <math>1\,000 \text{ W/m}^2</math> et la température est de <math>25^\circ\text{C}</math>.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Cellule d'un panneau SCHUCO seule</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>FIGURE 3</b></p>
---	---

I.2 Calculer, d'après la courbe de la figure 3, la puissance maximale  $P_{mp}$  que peut fournir cette cellule sous une irradiance de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .  
Que devient cette puissance si l'irradiance est seulement de  $500 \text{ W/m}^2$  ?

### Choisir un modèle

1.3 La caractéristique de la figure 3 est assimilée à celle du modèle 2.

I.3.1 Selon le modèle 2, déduire de la caractéristique  $I = f(V)$  précédente les valeurs des composants  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $V_0$  et  $I_L$  du modèle 2.

On s'aidera pour cela des formules données dans le tableau des modèles précédent..

On sait, de plus, que :

- lorsque la diode est passante alors la tension aux bornes de  $R_{sh}$  vaut  $V_0$
- et lorsque la diode est bloquée il n'y a aucun courant qui la traverse.

I.3.2 Calculer les valeurs numériques des composants  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $V_0$  et  $I_L$

I.3.3 Montrer que le courant  $I_L$  est pratiquement égal à  $I_{sc}$ .

1.3.4 Vérifier que le calcul de la question I.3.2 est pratiquement impossible avec le modèle n°3. Conclure quant-à l'utilisation des outils de simulation.

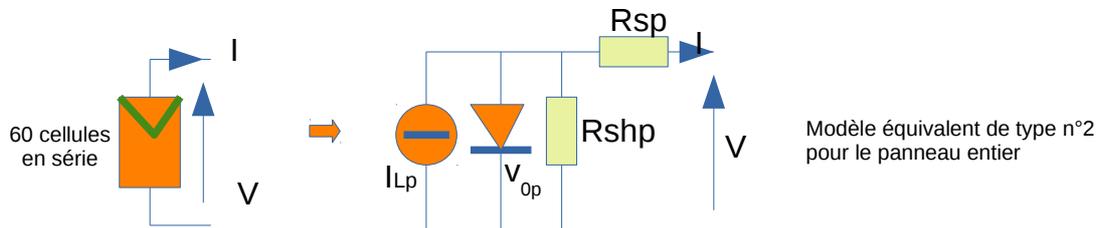
## II. Choisir un modèle pour un panneau entier constitué de 60 cellules en série

Comme la documentation le stipule, chaque panneau photovoltaïque est constitué de 60 cellules identiques reliées en série.

Nous restons sur le modèle n°2.

Toutes les cellules sont éclairées de manière identique.

Du coup, on admet que le modèle d'un panneau entier sera identique à celui d'une cellule, avec cependant des valeurs différentes de composants qui seront appelées :  $I_{Lp}$ ,  $V_{0p}$ ,  $R_{sp}$  et  $R_{shp}$ .



On cherche à établir un modèle pour le panneau entier, constitué de 60 cellules.

II.1 Exprimer dans ce cas les expressions des paramètres  $I_{Lp}$ ,  $V_{0p}$ ,  $R_{sp}$  et  $R_{shp}$  pour un panneau entier en fonction de  $I_L$ ,  $V_0$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$  et du nombre  $N$  de cellules en série.

On peut se rappeler que les cellules se comportent comme de petites piles.

II.2 Quelles seraient les expressions des coordonnées du point MPPT pour le panneau entier en fonction de  $I_L$ ,  $V_0$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$  ?

II.3 Montrer que la démarche est identique si l'on retient le modèle n°3.

II.4 Limites de validité du modèle en fonctionnement courant-tension

Montrer que, dans le cas où une partie des cellules est occultée tandis que l'autre est pleinement exposée, il y a un risque de destruction des cellules.

On s'appuiera pour cela sur la caractéristique  $I = f(V)$  d'une cellule qui traverse trois quadrants de fonctionnement. Voir plus haut.

Cet inconvénient est partiellement réglé en ajoutant des diodes appelées « by pass ». Cet aspect ne sera plus évoqué par la suite.

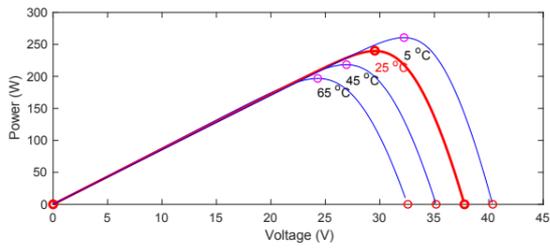
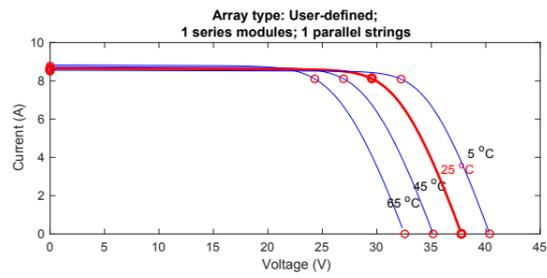
### III. Choisir un panneau

On a deux concurrents ; SCHUCO et SUNTECH, voici leurs caractéristiques :

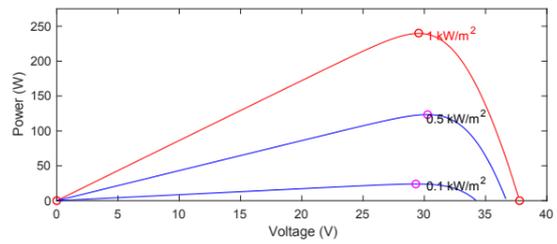
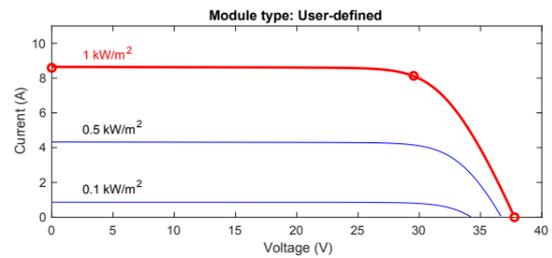
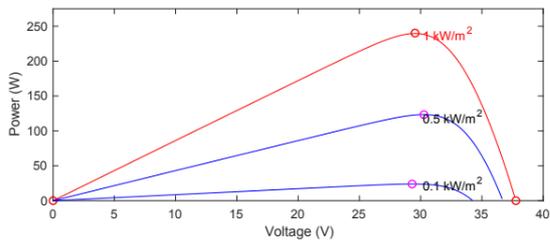
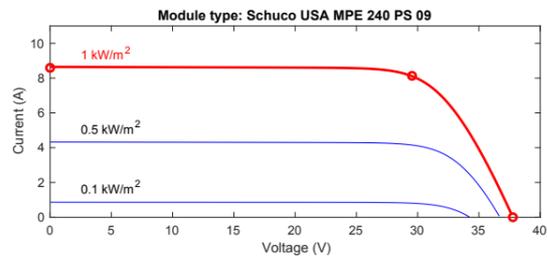
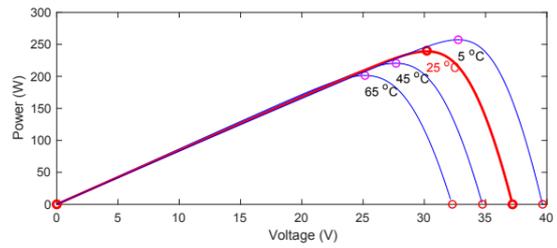
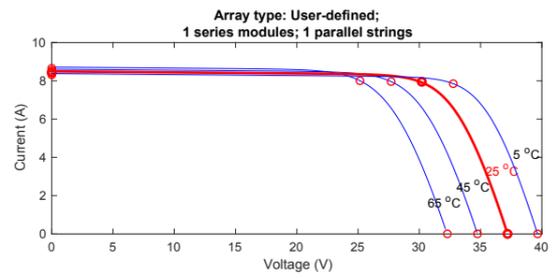
Caractéristiques	PV SCHUCO MPE 240 série PL 60	SUNTECH <b>STP240 - 20/Wd</b>
Puissance nominale Pmp	240 W	240 W
Tension nominale Ump	29,4 V	30,2 V
Courant nominal Imp	8,06 A	7,95 A
Tension à vide Voc	37,67 V	37,2 V
Courant de court-circuit Isc	8,47 A	8,43 A
Nombre de cellules	60 (6 x 10)	60
Taille des cellules	156 x 156 (en mm)	165 x 165 (en mm)
Coeff de température Puissance Pmp	-0,469 %/°C	-0,43 %/°C
Coeff de température Tension Voc	-0,344 %/°C	-0,33 %/°C
Coeff de température Courant Isc	0,052 %/°C	0,067 %/°C

Et voici les caractéristiques simulées  $I(V)$  et  $P(V)$  pour les deux types de panneau et pour différentes températures et différents niveaux d'irradiance en utilisant le modèle de comportement n°3.

## SCHUCO



## SUNTEC



III.1 Le choix ayant déjà été porté sur les panneaux SCHUCO, est-il nécessaire, au regard des courbes ci-dessus, d'envisager un autre fabricant ?