

Conversion photovoltaïque

SOLUTION DE EXERCICE 1 : Rayonnement solaire et le rendement limite

1. Longueur d'onde de coupure

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,12 \times 1,602 \times 10^{-19}} \approx 1,107 \times 10^{-6} m = 1,107 \mu m$$

Interprétation : Seuls les photons de longueur d'onde inférieure à λ_c possèdent une énergie suffisante ($E \geq E_g$) pour créer une paire électron-trou et contribuer au photocourant.

2. Courant de court-circuit maximal

$$I_{sc} = q \cdot \Phi = 1,602 \times 10^{-19} \times 4,5 \times 10^{21} \approx 720,9 A/m^2$$

3. Tension de circuit ouvert

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right), n = 1, I_0 = 1 \times 10^{-8} A/m^2$$

$$\frac{kT}{q} = \frac{1,381 \times 10^{-23} \times 300}{1,602 \times 10^{-19}} \approx 0,02585 V$$

$$\frac{I_{sc}}{I_0} = \frac{720,9}{1 \times 10^{-8}} = 7,209 \times 10^{10}$$

$$V_{oc} = 0,02585 \times \ln(7,209 \times 10^{10}) \approx 0,02585 \times 25,00 \approx 0,646 V$$

4. Facteur de forme et rendement limite

$$v_{oc} = \frac{qV_{oc}}{nkT} = \frac{0,646}{0,02585} \approx 25,0$$

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} = \frac{25,0 - \ln(25,72)}{26} \approx \frac{25,0 - 3,247}{26} \approx 0,836.$$

Rendement limite :

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P} = \frac{720,9 \times 0,646 \times 0,836}{1000} \approx 0,389 = 38,9\%$$

Remarque : Ce rendement dépasse la limite de *Shockley-Queisser* pour le silicium ($\approx 33\%$) car le flux de photons donné ($4,5 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) est trop élevé par rapport au spectre *AM1,5G* réel. En pratique, on utilise $\Phi \approx 2,8 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ce qui donne $I_{sc} \approx 450 \text{ A/m}^2$ et $\eta \approx 33\%$.

5. Conclusion

Les cellules commerciales (18–22 %) sont moins performantes que la limite idéale à cause :

- Réflexions en surface,
- Recombinaisons volumiques et de surface,
- Résistances série et shunt,
- Spectre non parfaitement adapté (photons sous-bande perdus, sur-bande relaxés par chaleur).

SOLUTION DE EXERCICE 2 : Modèle à une diode

2. Tension de circuit ouvert

On pose $I=0$:

$$0 = I_{ph} - I_0 [\exp(\frac{qV_{oc}}{nkT}) - 1] \approx I_{ph} - I_0 \exp(\frac{qV_{oc}}{nkT})$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I_{ph}}{I_0})$$

$$\frac{kT}{q} = 1,602 \times 10^{-19} \times 1,381 \times 10^{-23} \times 298 \approx 0,02569 \text{ V}$$

$$\frac{nkT}{q} = 1,3 \times 0,02569 \approx 0,03340 \text{ V}$$

$$\frac{I_{ph}}{I_0} = \frac{3,5}{2 \times 10^{-7}} = 1,75 \times 10^7$$

$$V_{oc} = 0,03340 \times \ln(1,75 \times 10^7) \approx 0,03340 \times 16,68 \approx 0,557 \text{ V}$$

3. Puissance maximale

On donne $V_{mpp} \approx 0,52 \text{ V}$.

Calcul du courant au point de puissance max :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 [\exp(\frac{qV_{mpp}}{nkT}) - 1]$$

$$\frac{qV_{mpp}}{nkT} = \frac{0,52}{0,03340} \approx 15,57$$

$$\exp(15,57) \approx 5,78 \times 10^6$$

$$I_{mpp} = 3,5 - 2 \times 10^{-7} (5,78 \times 10^6 - 1) \approx 3,5 - 1,156 \approx 2,344 \text{ A}$$

$$P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp} = 0,52 \times 2,344 \approx 1,219 \text{ W}$$

4. Facteur de forme

$$FF = V_{OC} I_{SC} P_{max} = 0,557 \times 3,51,213 = 1,9501,213 = 0,622$$

5. Influence du facteur d'idéalité n

Un facteur d'idéalité plus élevé ($n=1,8$ au lieu de $1,3$) augmente V_{OC} mais réduit fortement le facteur de forme, car la caractéristique devient moins « carrée ». La puissance maximale diminue généralement. La cellule ne serait donc pas meilleure avec $n=1,8$.

EXERCICE 3 : Prise en compte des résistances série et shunt

1. Chute de tension due à R_s (en négligeant R_{sh})

À $I=I_{sc} \approx I_{ph}=3,2 \text{ A}$, la chute aux bornes de R_s est $V_{Rs}=I R_s= 3,2 \times 0,05 = 0,16 \text{ V}$.

La tension aux bornes de la diode est $V_d=V+I R_s$. En court-circuit ($V=0$), $V_d=0,16 \text{ V}$.

Avec $R_s=0$, $V_d=0$. La présence de R_s polarise légèrement la diode en direct même en court-circuit.

2. Perte par R_{sh} (en négligeant R_s)

À $V=0,5 \text{ V}$ et $I \approx 2,8 \text{ A}$, le courant shunt est $I_{sh}=V/R_{sh}=0,5/100=0,005 \text{ A}=5 \text{ mA}$.

Cette perte est négligeable devant $I_{ph}=3,2 \text{ A}$.

3. Tension de circuit ouvert avec R_s et R_{sh}

À V_{OC} , $I=0$. L'équation devient :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

En itérant, on trouve $V_{oc} \approx 0,6075 \text{ V}$ (identique au cas sans résistances car R_{sh} est grande).

4. Puissance maximale

On donne $V_{mpp}=0,48 \text{ V}$, $I_{mpp}=2,9 \text{ A}$.

$$P_{max}=0,48 \times 2,9=1,392 \text{ W}.$$

Dans le cas idéal (exercice 2 avec les mêmes paramètres mais sans R_s ni R_{sh}),

on obtiendrait $P_{max,ideal} \approx 1,565 \text{ W}$. La dégradation est due aux résistances.

5. Conclusion

- R_s Réduit le facteur de forme car il abaisse la tension aux bornes quand le courant est élevé.
- R_{sh} réduit V_{oc} en créant un courant de fuite.

Pour une perte de puissance inférieure à 1 %, on doit avoir :

$$\frac{V_{mpp}^2}{R_{sh}} < 0,01 P_{max} \Rightarrow R_{sh} > \frac{V_{mpp}^2}{0,01 P_{max}}$$

Avec $V_{mpp}=0,48$ V et $P_{max}=1,392$ W, on obtient $R_{sh}>16,6 \Omega$. La valeur $R_{sh}=100 \Omega$ est donc acceptable.

EXERCICE 4 : Association en série et effet de l'ombrage

1. Éclairement uniforme

- $I_{sc,module} = I_{ph} = 3A$
- $V_{oc,cellule} = nV_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) = 0,03102 \times \ln(1,5 \times 108) = 0,584V$
- $V_{oc,cellule} = 36 \times 0,584 = 21,02$

2. Cellule ombragée (sans diode bypass)

La cellule ombragée a $I_{ph,omb} = 1A$. En série, le courant est identique dans toutes les cellules.

Si le courant dépasse $1A$, la cellule ombragée est polarisée en inverse. Sans protection, elle peut entrer en claquage. Le courant maximal avant claquage est donc limité à environ $1A$.

3. Avec diode bypass (une par cellule)

Pour un courant de module $I=2,5A$ (supérieur à $1A$), la diode bypass de la cellule ombragée conduit lorsque la tension inverse atteint $-0,6V$. La cellule est alors court-circuitée par la diode, sa tension est fixée à $-0,6V$.

Les 35 cellules saines sont en direct. Leur tension individuelle vérifie :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_c}{nkT}\right) - 1 \right] \Rightarrow 2,5 = 3 - 2 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{V_c}{0,03102}\right)$$

On trouve $\frac{\exp(V_c)}{0,03102} = 2,5 \times 10^7$, $V_c = 0,5285V$.

Tension du module : $V_{module}=35 \times 0,5285 - 0,6 = 18,4975 - 0,6 = 17,90$.

Puissance : $P=2,5 \times 17,90 = 44,75W$.

4. Puissance avec et sans bypass pour $I=1,2A$

- **Sans bypass** : le courant ne peut pas dépasser $1A$ (limite par la cellule ombragée). À $I=1,2A$, la cellule ombragée serait en claquage ; la tension chute brutalement et la puissance est très faible (pratiquement nulle).

- **Avec bypass** (diode active) : pour $I=1,2 A$, les cellules saines donnent $V_c=0,568 V$ (calcul similaire).
 $V_{module}=35 \times 0,568 - 0,6 = 19,88 - 0,6 = 19,28 V$, $P=1,2 \times 19,28 = 23,14$.
 La diode bypass permet de récupérer une puissance significative.
- 5. Optimisation du nombre de cellules par diode bypass
- **Trop peu de cellules par diode** : coût élevé (nombreuses diodes) et chute de tension supplémentaire.
- **Trop de cellules par diode** : en cas d'ombrage partiel, la perte de puissance est importante car la diode bypass court-circuite un grand nombre de cellules.
 Pour un ombrage mobile (arbre), on choisit des groupes de 2 à 6 cellules par diode afin de minimiser les pertes tout en maîtrisant le coût.

EXERCICE 5 : Extraction des paramètres à partir de mesures réelles

Données : $I_{sc} = 8,2 A$, $V_{oc}=0,62 V$, $P_{max}=4,1 W$ à $V_{mpp}=0,51 V$, $I_{mpp}=8,04 A$.

$T=25^{\circ}C=298 K$, $kT/q=0,02585 V$.

1. Estimation de I_{ph} et R_{sh} :

On prend $I_{ph} \approx I_{sc} = 8,2 A$ (car la diode et la résistance shunt ont un effet négligeable en court-circuit).

La pente au voisinage de I_{sc} est donnée $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I_{sc}} = -0,02 A/V$: (en valeur absolue, la vraie pente est négative).

$$R_{sh} \approx \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{sc}} = \frac{1}{\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I_{sc}}} = 50 \Omega$$

Une résistance shunt de 50Ω est tout à fait typique pour une cellule polycristalline de bonne qualité. Des valeurs inférieures à 10Ω indiqueraient des fuites importantes.

2. Estimation de R_s à partir de la pente près de V_{oc}

Pente donnée : $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I_{sc}} = -0,25 A/V$

En négligeant R_{sh} (car $R_{sh} = 4 \Omega$ est faible, mais on utilise l'approximation simple) :

$$R_s \approx \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc}} = \frac{1}{\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_{oc}}} = \frac{1}{-80} = 0,0125 \Omega = 12,5 m\Omega$$

Cette valeur est réaliste pour une cellule individuelle de taille standard (environ 156 mm × 156 mm). Les cellules industrielles ont typiquement R_s comprise entre 5 et 20 mΩ.

3. Détermination du facteur d'idéalité n et du courant de saturation I_0

Tension thermique :

$$V_{th} = \frac{kT}{q} = \frac{1,381 \times 10^{-23} \times 298}{1,602 \times 10^{-19}} \approx 0,02585V$$

On prend $n = 1,2$ (valeur typique pour une cellule polycristalline). Alors :

$$\frac{nkT}{q} = 1,2 \times 0,02585 = 0,03102 V$$

À partir de l'équation de V_{oc} (en négligeant R_s et R_{sh}) :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right)$$

$$\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) = \frac{V_{oc}q}{nkT} = \frac{0,62}{0,03102} \approx 20$$

$$\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 = e^{20} \approx 4,85 \times 10^8 \Rightarrow I_0 = \frac{8,2}{4,85 \times 10^8} \approx 1,69 \times 10^{-8} A$$

On propose $n=1$ (valeur typique). Alors :

$$\frac{nkT}{q} = 0,02585 V$$

$$\text{Alors } \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) = \frac{0,62}{0,02585} \approx 24,0, I_0 = 8,2/e^{24} \approx \frac{8,2}{2,65 \times 10^{10}} \approx 3,1 \times 10^{-10} A.$$

Le courant de saturation est très sensible à n : plus n est petit, plus I_0 est faible (meilleure qualité de la jonction).

4. Vérification de la cohérence du modèle

On utilise l'équation implicite du modèle à une diode :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_S}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{sh}}$$

Au point de puissance maximale : $V = V_{mpp} = 0,51 \text{ V}$, $I = I_{mpp}$ (à calculer).

On procède par une itération. On pose $I_{(0)} = I_{mpp, \text{mesure}} = 8,04 \text{ A}$ (point de départ).

Calcul de la tension aux bornes de la diode :

Nouvelle valeur du courant :

$$I^{(1)} = I_{ph} - I_{diode} - I_{shunt} = 8,2 - 5,97 - 0,0122 \approx 2,22 \text{ A}$$

Cette valeur est très différente de $8,04 \text{ A}$. **Pourquoi ?**

En réalité, l'équation est implicite : il faut résoudre pour I tel que V soit fixé. Notre calcul montre qu'avec $V = 0,51 \text{ V}$ et $I = 8,04 \text{ A}$, la diode est trop polarisée (V_d trop grand), ce qui fait chuter le courant calculé. Cela signifie que les paramètres extraits ($n = 1,2$, $I_0 = 1,69 \times 10^{-8} \text{ A}$) ne reproduisent pas exactement le point de puissance maximale mesuré. En pratique, on ajuste n ou R_s pour obtenir l'accord.

Conclusion: On accepte que le modèle à une diode avec les paramètres trouvés donne une bonne estimation de V_{oc} et des pentes, mais pour reproduire exactement P_{max} , il faudrait un ajustement fin (par exemple $n \approx 1,05$ ou R_s légèrement différente). L'étudiant est invité à discuter cette limite.