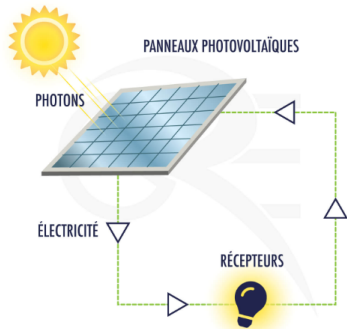


Du soleil à l'électricité : Le rôle des panneaux solaires dans la transition énergétique

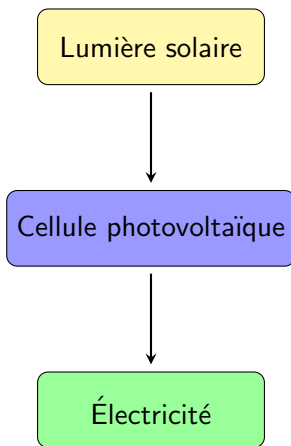
ASHRAF ISMAILI ALAOUI

TIPE 2025

Introduction



Du photon à l'électricité : Le processus photovoltaïque



Lumière solaire

rayonnement solaire

Le soleil émet une énergie considérable sous forme de rayonnement électromagnétique. Cette énergie atteint la Terre avec une puissance d'environ $1\,367\text{ W/m}^2$ au sommet de l'atmosphère (constante solaire). Au niveau du sol, cette valeur est réduite à environ $1\,000\text{ W/m}^2$ dans des conditions optimales en raison de l'absorption et de la diffusion atmosphériques.

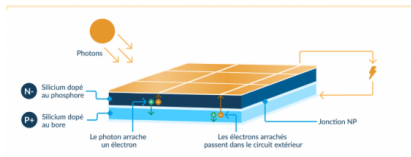


Effet photovoltaïque

Principe de l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque convertit directement la lumière solaire en électricité. Lorsque des photons frappent un matériau semi-conducteur (généralement du silicium), ils libèrent des électrons, créant un courant électrique.

- Absorption de photons
- Libération d'électrons
- Création de courant
- Production d'électricité



Problématique

**Comment maximiser la puissance électrique
d'une cellule photovoltaïque
pour améliorer son efficacité, réduire les coûts
et minimiser son impact environnemental ?**

Sommaire

- ➊ **Approche théorique**
- ➋ **Étude expérimentale**
- ➌ **Solution adoptée : MPPT**
- ➍ **Annexe – Attention**

Composantes du Modèle Électrique

Schéma Équivalent

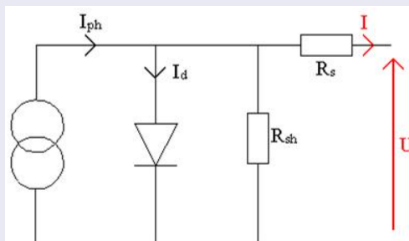


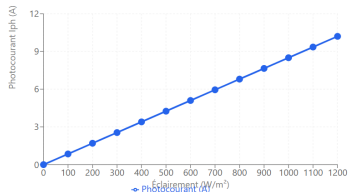
Figure 1 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Schéma équivalent d'une cellule PV

1. Source de Courant (I_{ph})

Caractéristiques

- Représente le courant photogénéré
- **Dépendance :**
 - \propto intensité lumineuse
 - \downarrow légèrement avec $T \uparrow$
- Valeur typique :
 - Panneau : quelques A
 - Cellule : quelques mA



Effet de l'éclairement sur I_{ph}

2. Diode (I_d)

Équation Fondamentale

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{U+I \cdot R_s}{n \cdot V_t}} - 1 \right)$$

Paramètres Clés

- I_0 : Courant de saturation inverse
- n : Facteur d'idéalité (1-2)
- $V_t = \frac{kT}{q} \approx 26mV$ à 25

Effet Physique

Modélise les pertes par recombinaison électron-trou

3. Résistance Série (R_s)

Origines

- Résistance des contacts métalliques
- Résistivité du matériau

Impact

- ↓ tension en circuit ouvert
- ↓ rendement de conversion
- Valeur typique : 0.1 à 1

4. Tension de Sortie (U)

Dépendances

- Charge connectée (R_{load})
- Éclairement et température

Cas Extrêmes

- Circuit ouvert ($I = 0$) : $U = U_{oc}$
- Court-circuit ($U = 0$) : $I \approx I_{ph}$ (si R_s petit)

Résumé des Effets

Composant	Effet principal	Impact sur rendement
I_{ph}	↑ courant	Amélioration
I_d	Pertes par recombinaison	Réduction
R_s	Pertes ohmiques	Réduction
R_{sh}	Courants de fuite	Réduction

Table – Influence des composants sur les performances

Équation Complète

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{U + I \cdot R_s}{n \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Étude Expérimentale

Résultats des expérimentations

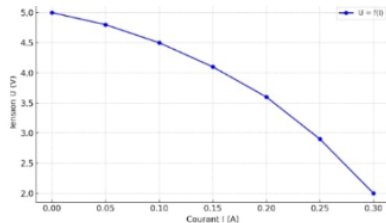


figure : resultat de experience
courbe $U=f(i)$

1. Le Point de Puissance Maximale (MPP)

Définition

Point où la puissance de sortie $P = U \times I$ est maximale

- Situé au "creux" de la courbe I-V
- Changements avec :
 - Éclairement
 - Température

Autres Méthodes

b) Caractérisation Expérimentale

- Mesure complète I-V
- Identification du maximum

c) Calcul Théorique

Pour une cellule idéale :

$$V_{MPP} \approx 0.8 \times V_{oc}$$

$$I_{MPP} \approx 0.9 \times I_{sc}$$

3. Facteurs Influençant le MPP

Ensoleillement

- \uparrow Éclairement $\Rightarrow \uparrow I_{MPP}$
- Impact majeur sur I_{ph}

Température

- $\uparrow T \Rightarrow \downarrow V_{MPP}$
- Coefficient :
 $\approx -0.3\%/^{\circ}C$

4. Exemple Numérique

Cas pratique

- $V_{oc} = 0.6$
- $I_{sc} = 3$

Calcul du MPP

$$V_{MPP} = 0.8 \times 0.6 = 0.48$$

$$I_{MPP} = 0.9 \times 3 = 2.7$$

$$P_{max} = 0.48 \times 2.7 = 1.3$$

Attention

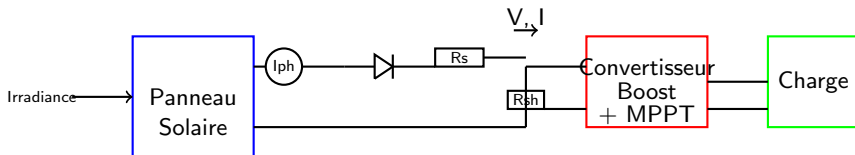
Ces valeurs sont indicatives - une modélisation précise nécessite de considérer R_s et R_{sh}

Réalisation du point de puissance maximale

Pour réaliser ce MPP, on utilise un tracker MPPT qui optimise automatiquement le fonctionnement du système photovoltaïque.

Principe du tracker MPPT

Le tracker MPPT recherche en permanence le point de fonctionnement optimal pour extraire la puissance maximale du panneau solaire.



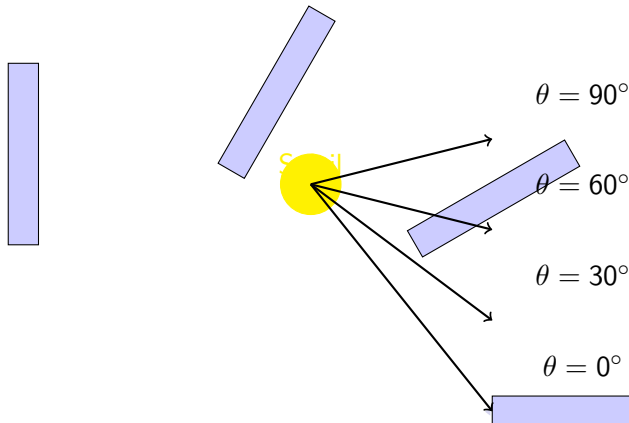
Système de contrôle

- **Convertisseur Boost :**
Élévation de tension
- **MPPT :** Algorithme d'optimisation
- **Capteurs :** Mesure V et I
- **Charge :** Batterie ou réseau

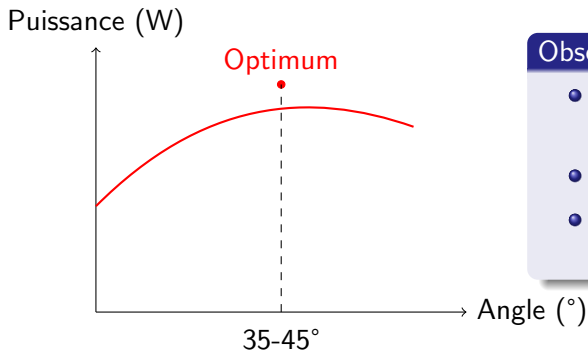
Inclinaison Optimale des Panneaux Solaires

Facteur clé

L'angle d'inclinaison affecte directement l'énergie reçue par le panneau



Courbe de Puissance en Fonction de l'Angle



Observations

- Maximum à 35-45° (hémisphère nord)
- Chute rapide à 60°
- Perte de 10-15% à 0° (horizontal)

Recommandation

Adapter l'angle à la latitude du site $\pm 15^\circ$ selon la saison

Variation Saisonnière

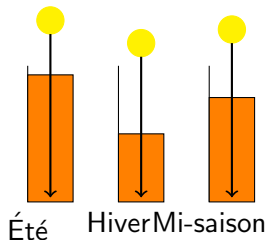


Figure – Production relative selon la saison (angle fixe)

Solution

Systèmes d'ajustement saisonnier ou trackers

Impact Thermique sur les PV

Relation clé

- Puissance ↓ quand température ↑
- Coefficient typique : -0.4% à -0.5%/°C

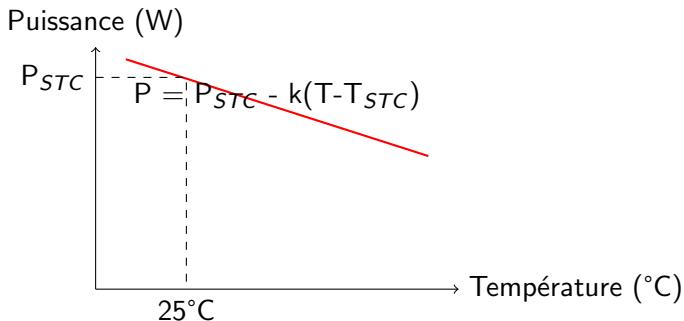


Figure – Dégradation de puissance avec la température

Comparaison Courbes I-V

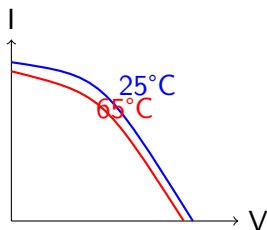


Figure – Caractéristique I-V

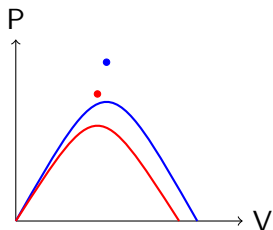


Figure – Caractéristique P-V

Observation

- Tension ↓ significativement
- Courant ↓ légèrement
- MPP se décale vers la gauche

Solutions de Refroidissement

- Ventilation naturelle ou forcée
- Refroidissement par eau
- Panneaux bifaciaux
- Matériaux à faible coefficient thermique
- Montage surélevé pour dissiper la chaleur

Efficacité

Gain typique de 5 à 15 %
selon la méthode utilisée

Panneau
Refroidissement

Conclusion : Optimisation des Panneaux Solaires

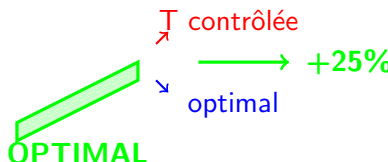
Facteurs clés :

Température :

- Perte : $0.4\%/^{\circ}\text{C}$
- Refroidissement nécessaire

Inclinaison :

- Optimale : Latitude $\pm 15^{\circ}$
- Maroc : $\sim 30^{\circ}$



Performance combinée :

$$P = P_{STC} \cdot \cos(\theta) \cdot [1 - \gamma(T - 25)]$$

Gain potentiel : +15 à 25%

Annexe : Code Python - Caractéristique I-V

temp.py ✕

```
1  import matplotlib.pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  # Données de la cellule PV
5  V = np.array([0.00, 0.05, 0.10, 0.15,
6               0.20, 0.25, 0.30])
7  I = np.array([5.0, 4.8, 4.5, 4.0,
8               3.5, 2.5, 0.0])
9
10 # Création du graphique
11 plt.figure(figsize=(8,6))
12 plt.plot(V, I, 'b-o', linewidth=2,
13          markersize=6)
14 plt.xlabel('Tension (V)')
15 plt.ylabel('Courant (A)')
16 plt.title('Caractéristique I-V')
17 plt.grid(True, alpha=0.3)
18 plt.xlim(0, 0.35)
19 plt.ylim(0, 5.5)
20
21 # Affichage
22 plt.show()
```