

Le Convertisseur Photovoltaïque Ideal

Plan du Cours

I. La cellule solaire

I.1: Définition

I.2: 1^e processus de l'effet photovoltaïque: Génération des porteurs de charge (électrons et trous)

I.3: **Séparation** (2^e processus), **recombinaisons** (3^e processus) et **Collecte** (4^e processus) des paires électrons-trous

I.4: Paramètres centraux dans la fabrication et la performance de la cellule solaire

I.5: Quelques exemples de cellules solaires

I.6: Les technologies photovoltaïques

I.7: Caractérisation des cellules solaires

II. Le module et champ Photovoltaïques

II.1: Définition et généralités

II.2: Caractéristiques I-V des modules solaires

II.3: Les systèmes photovoltaïques

III. Les paramètres de performances

III. 1: Les paramètres de performances des cellules solaires et des modules PV

III. 2: Les paramètres de performances des systèmes PV

III. 3: Les pertes de fonctionnement

I. La cellule Solaire

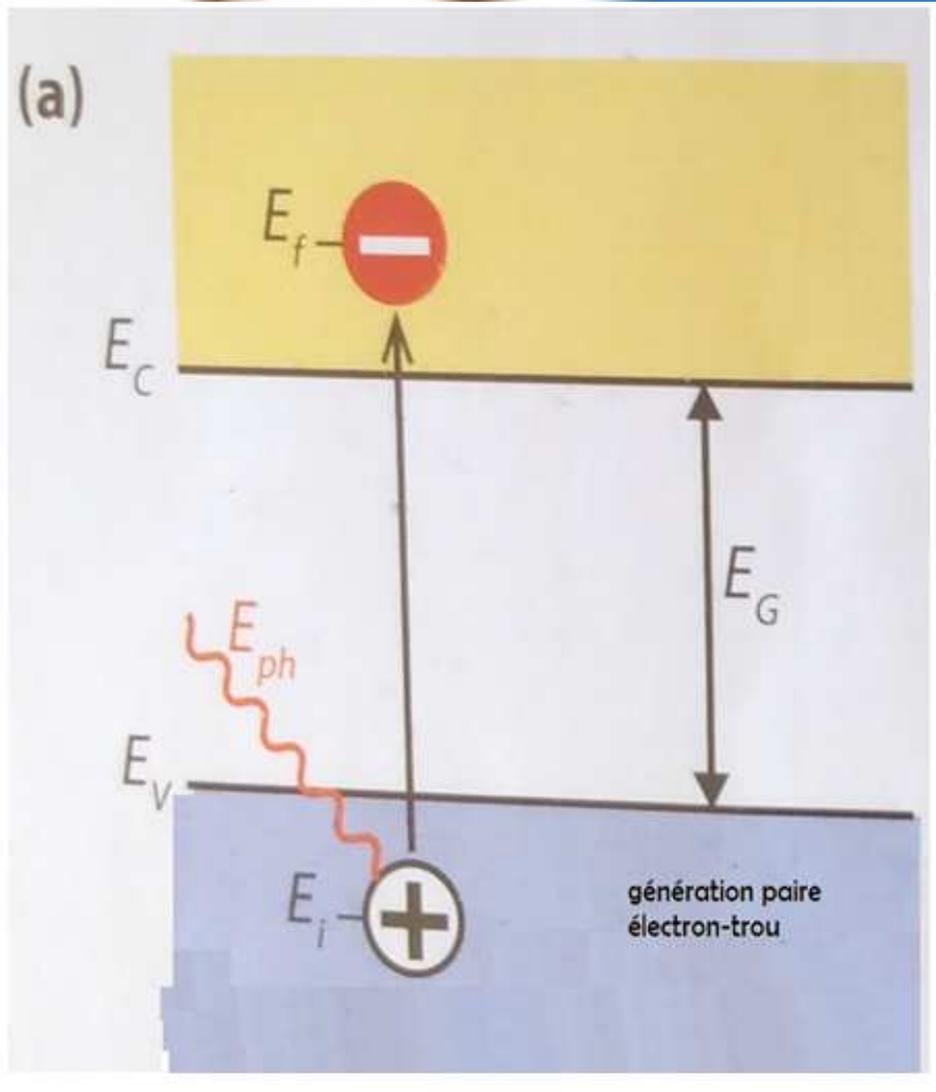
I.1: Définition/ Exemples

Une cellule photovoltaïque constitue l'élément de base du système photovoltaïque qui permet la conversion du rayonnement solaire en électricité.

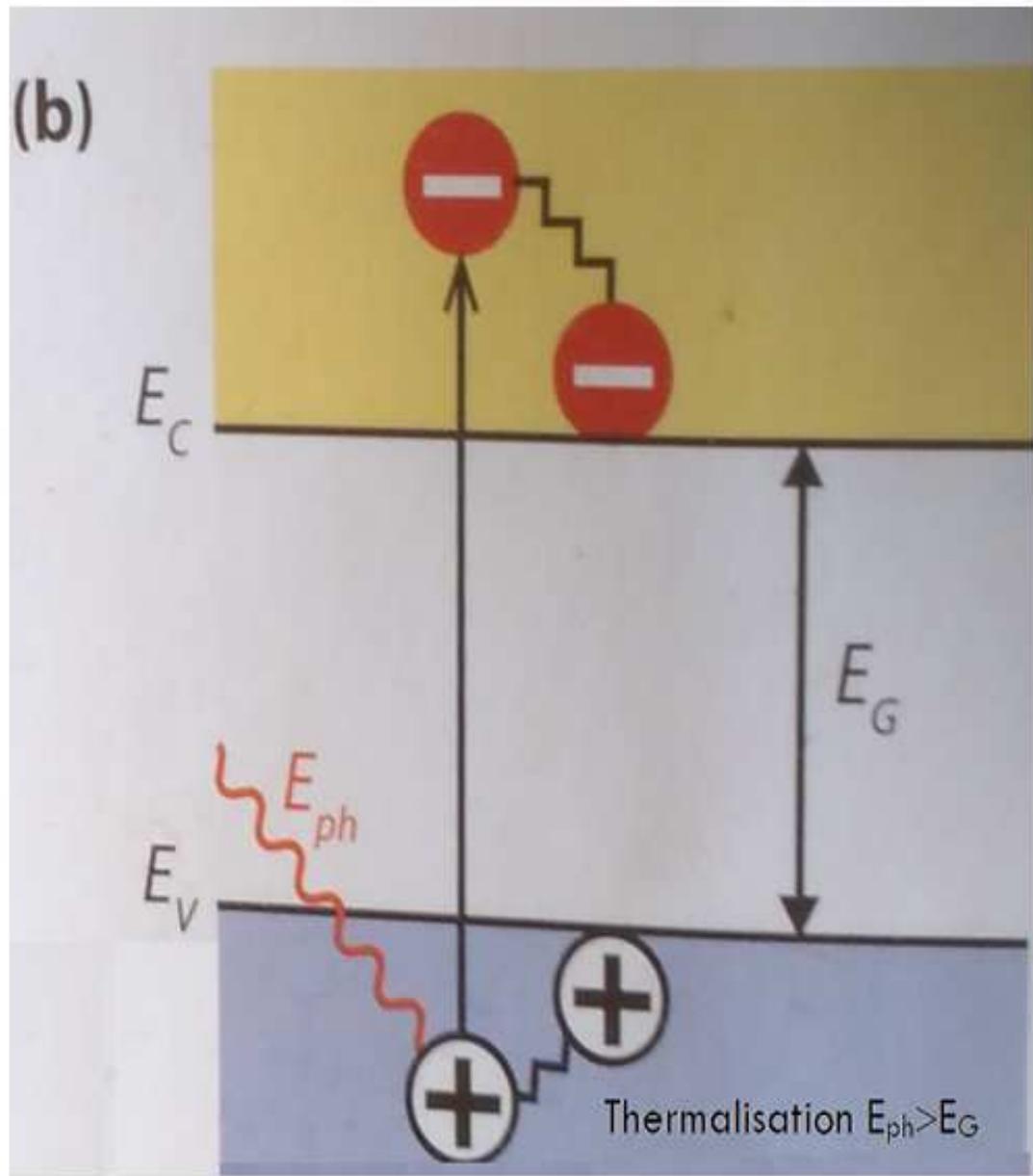
- le principe de fonctionnement d'une cellule solaire se base sur l'effet photovoltaïque;
- l'effet photovoltaïque est propre à certains matériaux (semi-conducteurs ou organiques);
- l'effet photovoltaïque correspond à la génération d'une différence de potentiel à la jonction en réponse à une radiation électromagnétique.

- une cellule solaire est faite de plusieurs couches, d'une jonction **ou de plusieurs jonctions**, et de grilles collectrices, un revêtement antireflet;
- la jonction, obtenue par le contact entre les couches **N** et **P**, repousse les électrons de la couche **N** vers la couche **P** et les trous de la couche **P** vers la couche **N**;
- une cellule solaire est le siège de trois types d'énergie: énergie radiative (photon), énergie chimique (électron-trou), énergie électrique (courant produit).

I.2_ 1^e processus de l'effet photovoltaïque: Génération des porteurs de charge (électrons et trous)



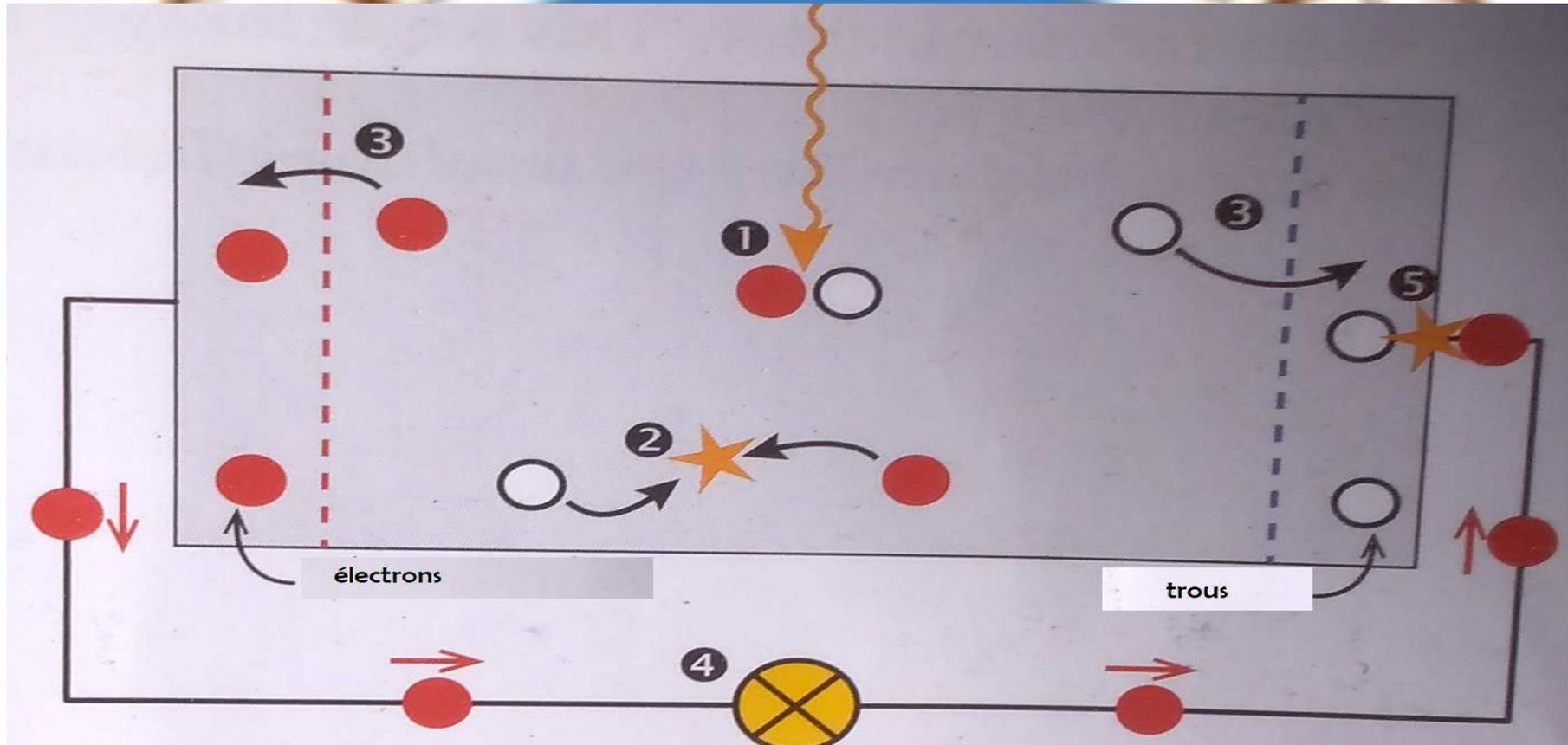
- absorption d'un photon, d'énergie E_{ph} , dans le matériel pour exciter l'électron d'une énergie E_i à une énergie E_f ;
- Il y a absorption si :
 $E_{ph} = E_f - E_i$ avec $E_{ph} = h\nu$
 - ❖ E_V : énergie de valence;
 - ❖ E_C : énergie de conduction;
 - ❖ $E_G = E_C - E_V$: énergie de la bande interdite/ pas d'états d'énergie
- Si $E_{ph} < E_G$, le photon n'est pas absorbé, il traverse le matériau semi-conducteurs sans interaction.



- $E_{ph} > E_G$: une partie de l'énergie du photon incident est perdue par thermalisation

Semi-conducteur idéal

I.3 **Séparation** (2^e processus), **recombinaison** (3^e processus) et **Collecte** (4^e processus) des paires électrons-trous.



1. génération d'une paire électron-trou;
2. recombinaison d'une paire électron-trou;
3. séparation des électrons et des trous à cause de la membrane semi-perméable (**jonction**);

4. électrons participant au courant;
5. recombinaison après la traversé du circuit électrique.

Remarque: mécanismes de perte

- ❑ la thermalisation et la non conversion des photons d'énergies inférieures à E_G constituent les principaux mécanismes de pertes;
- ❑ pour une seule bande interdite, 50% de la radiation solaire incidente est perdue du fait de ces deux mécanismes dans le processus de conversion.

I.4 Paramètres centraux dans la fabrication et la performance de la cellule solaire:

- concentration des atomes donneurs, N_D ;
- concentration des atomes accepteurs, N_A ;
- les paramètres de transport:
 - la mobilité μ due à la déviation;
 - le coefficient de diffusion D due à la diffusion;
- les processus de génération et de recombinaison:
 - la durée de vie: τ ;
 - la longueur de diffusion: L ;
- l'énergie de Gap E_G et l'indice de réfraction $n - ik$ où k est lié au coefficient d'absorption α ; k vecteur d'onde.

I.5 Quelques exemples de cellules solaires

- Il y a plusieurs types de cellules solaires:
 - la cellule conventionnelle N^+P ;
 - la Cellule Bifaciale NPP^+ ;
 - la cellule à jonctions verticales;
 - les cellules tandems;
 - les cellules à couches minces/ Exemple des cellules Perovskites
 - les cellules de Grätzel ([Michael Grätzel](#)) ou [Dye-sensitized solar cells](#)

Elle sont des systèmes photo électrochimiques à l'image de la photosynthèse

- les cellules solaires organiques;
- etc.

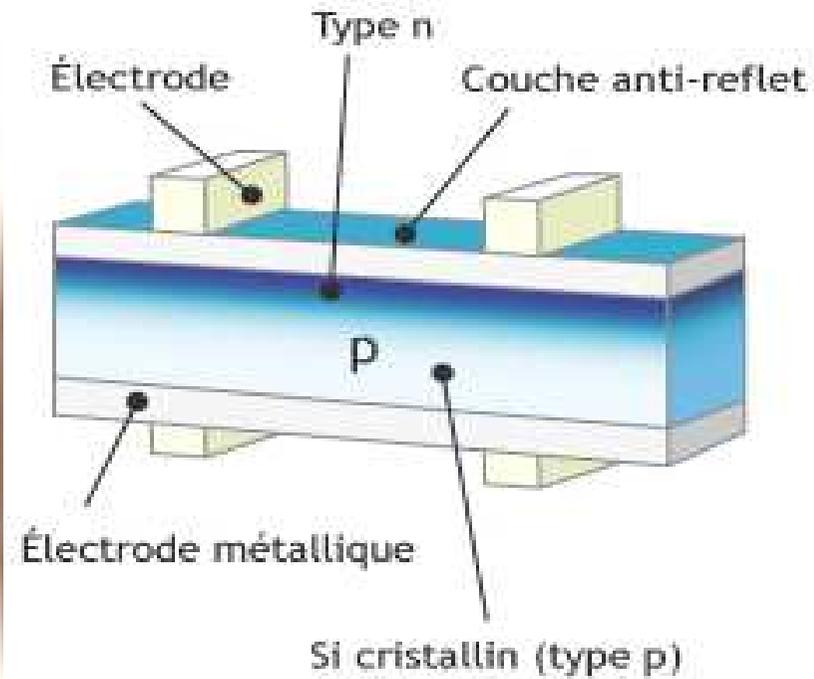


Figure 1.a : Cellule Photovoltaïque N⁺P [1]

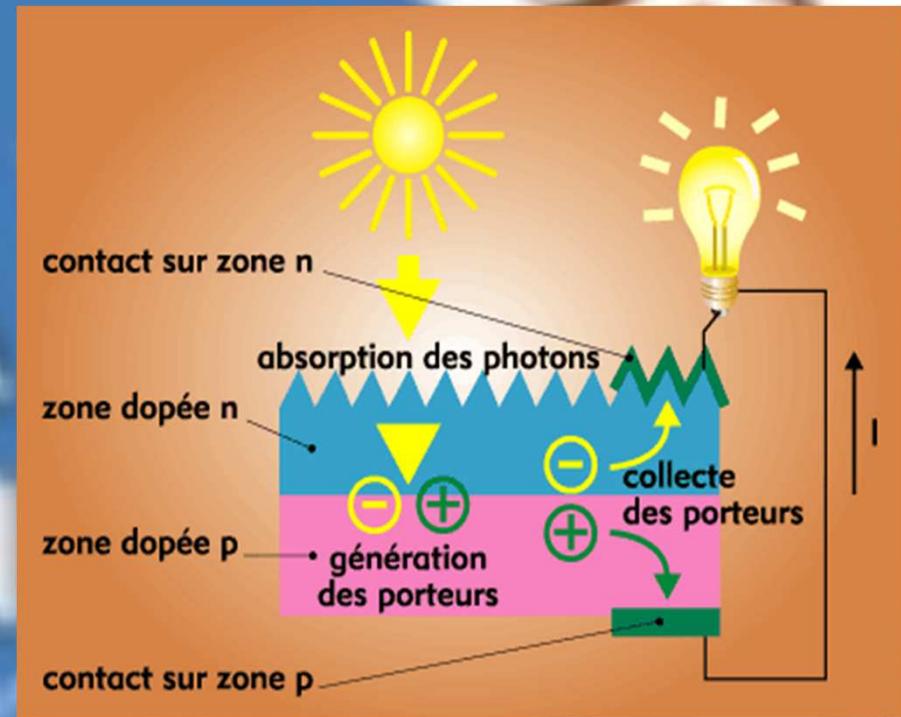


Figure 1.b : Cellule Photovoltaïque N⁺P [1]

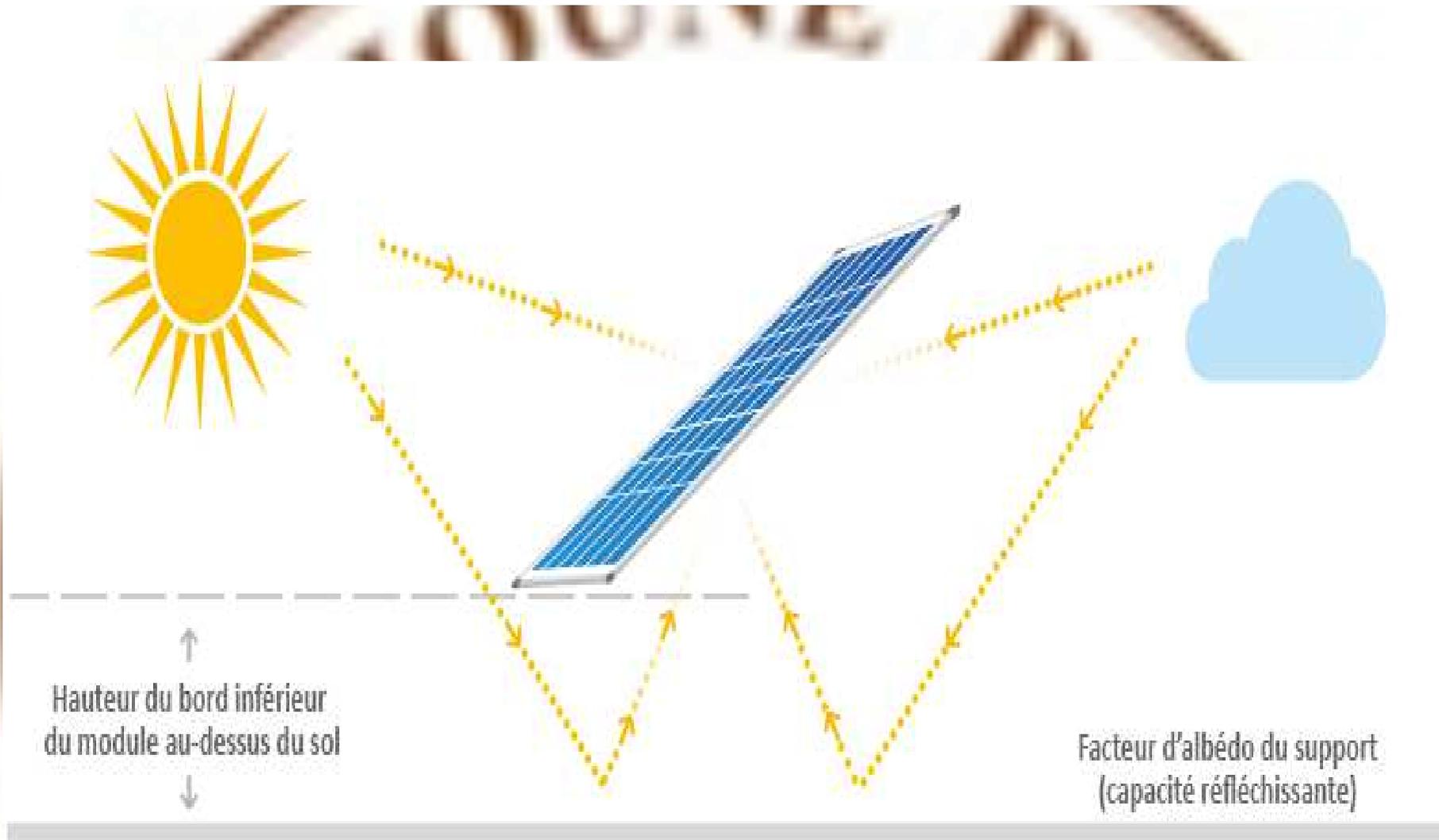


Figure 2: solaire bifaciale exposée au soleil[2,3,4]

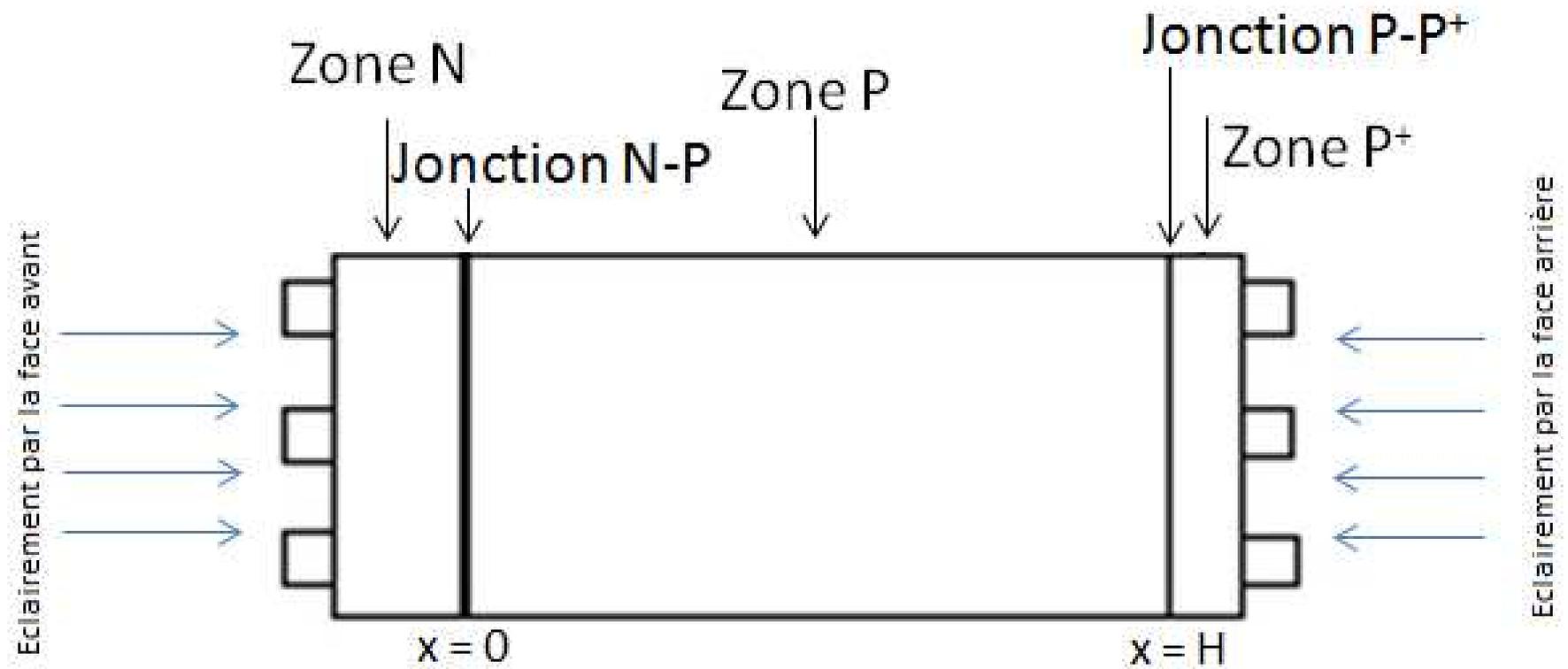


Figure 3: Cellule solaire bifaciale [2,3,4]

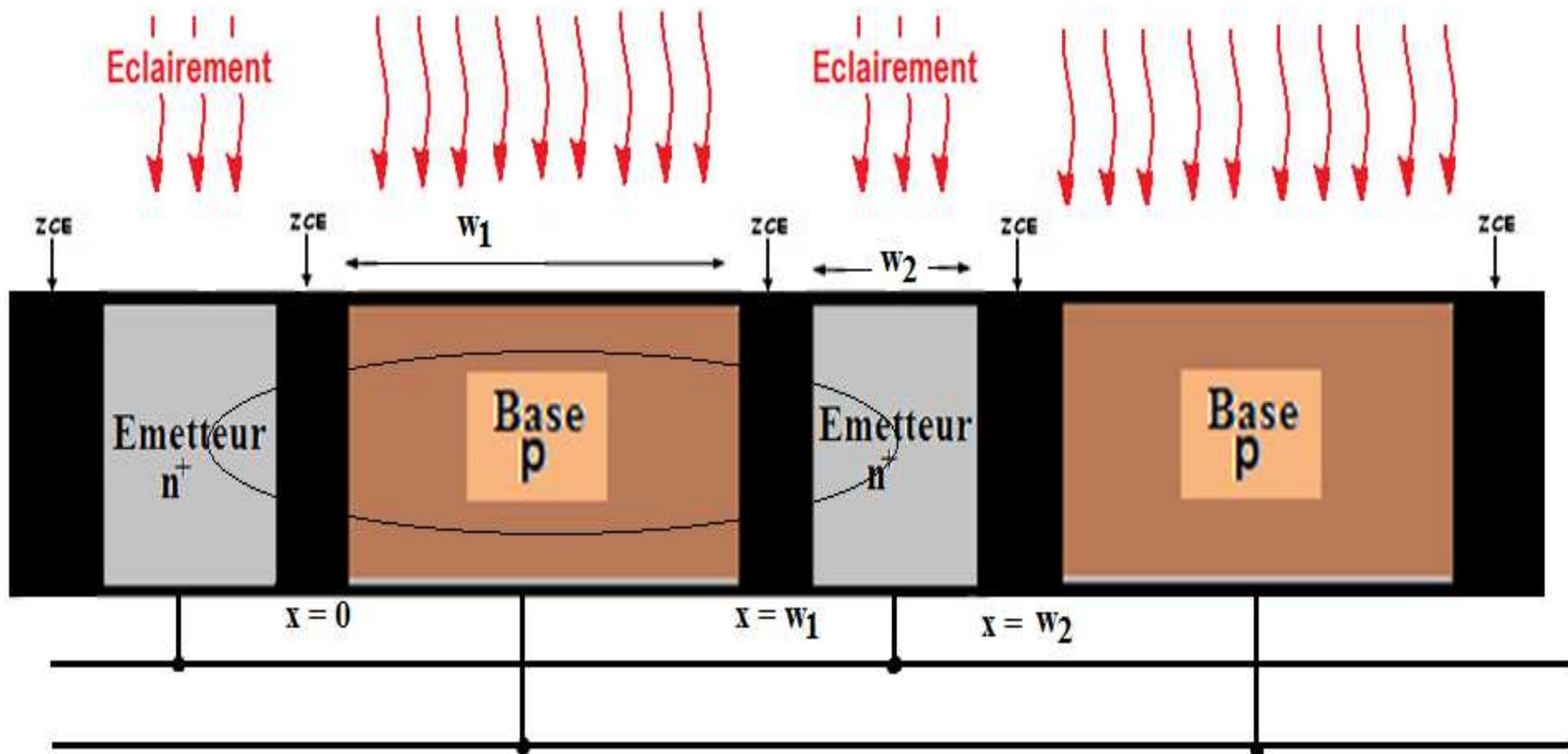
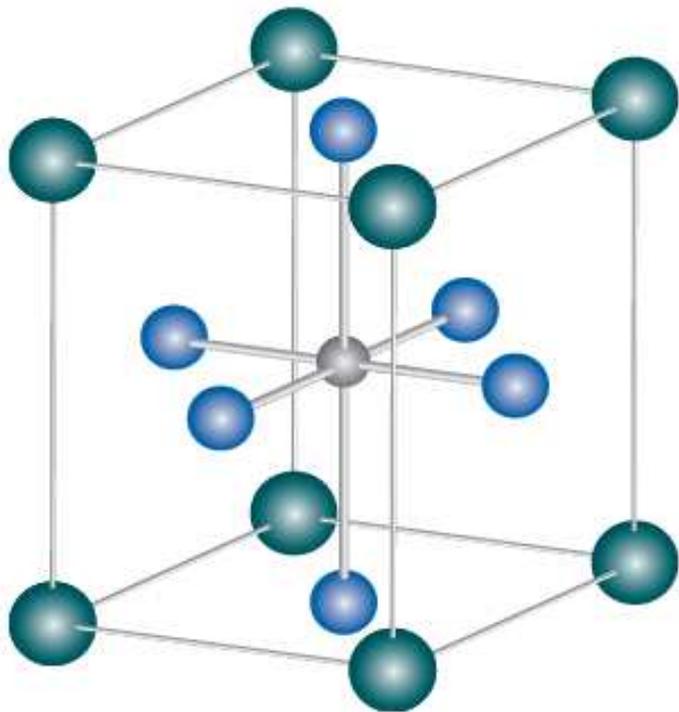


Figure 4: Structure d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle [5-6]

Cellule Tandem:[7]

- une succession de cellules indépendantes les une des autres, placées sur le même trajet optique;
- les cellules indépendantes ne peuvent être réalisées en un seul bloc monolithique du fait que les matériaux dont elles sont faites présentent des désaccords de maille et/ou de coefficients de dilatation thermique.

Cellule Perovskite [8]



- A  Cation organique (CH_3NH_3)⁺
- B  Un cation inorganique volumineux (Pb^{2+})
- X  Anion halogène non volumineux en général du Cl^- ou I^-

I.6 Les technologies photovoltaïques

a. Silicium cristallin[9];

- ❑ silicium monocristallin (sc-Si)

- ❑ Silicium poly cristallin (ms-Si);

- ❖ Existence de joints de grain, siège de recombinaisons (Cf. physique des photopiles);

- ❖ modèle 3D: modèle colonnaire cubique ou parallélépipédique, modèle cylindrique (Cf. physique des photopiles), modèles sphériques (pas très développés mais qui permettraient de bien prendre en compte les points quantiques)

b. couches minces [10];

on dépose plusieurs couches très minces du matériau semi-conducteur sur un substrat de verre;

Silicium amorphe (α -Si), filière la plus répandue;

Tellure de cadmium (CdTe), le Cuivre, l'indium et sélénium (CIS), le cuivre, l'Indium, le sélénium et le gallium (CIGS)

les cellules pérovskite;

c. les cellules organiques:

cellules à colorant;

cellules à polymère.

Table 1: Exemples de rendements de quelques cellules solaire; sous AM1,5; puissance de 1000W/m² , à 25°C [10]

Type de cellules	Rendements (Nov.2015)	Avantages	Inconvénients
sc-Si	25.6±0.5	efficaces durables	
mc-Si	21.25±0.4		
Couche mince/ CdTe	21.0±0.4	Fabrication moins chère Profitent mieux du rayonnement diffus Moins sensible à la température et à l'ombrage	Rendement faible par rapport à la technologie cristalline Rareté des matières premières Rapide dégradation de la puissance initiale (20% au bout de quelques mois)
Dye	11.9±0.4	Fonctionne sans ensoleillement direct/ faible éclairage	
Couche mince/ Perovskite	15.6±0.6		
Organique	11.0±0.3		

I.7: Caractérisation des cellules solaires

I.7.1: Régime de fonctionnement

□ Régime statique (RS)[2-4]

-l'éclairement est constant en monochromatique ou en polychromatique

Taux de génération des porteurs:

Monochromatique:

$$G_d(z) = \alpha \cdot I_0 \cdot (1 - R) \cdot (\exp(-\alpha \cdot z) + \exp(-\alpha \cdot (H - z)))$$

α : coefficient d'absorption;

R: coefficient de réflexion;

I_0 : flux incident;

H: épaisseur de la base de la photopile.

Polychromatique:

$$G_u(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot [\varepsilon \cdot \exp(-b_i x) + \gamma \cdot \exp(-b_i (H - x))]$$

□ Régime dynamique fréquentiel (RDF)[11]

- l'éclairement est fonction de la fréquence suivant l'expression du taux de génération des porteurs: $G(z,t) = g(z)\exp(j\omega t)$

$g(z)$: le taux de génération dépendant de l'épaisseur de la base, il est fonction du flux incident et des coefficients de réflexion et d'absorption.

□ Régime dynamique obtenu par variation du point de fonctionnement (RDVF)[3-12]

- l'éclairement est constant;

- le régime dynamique est obtenu par variation du point de fonctionnement à l'aide d'un transistor Mosfet et d'un générateur de signaux carrés

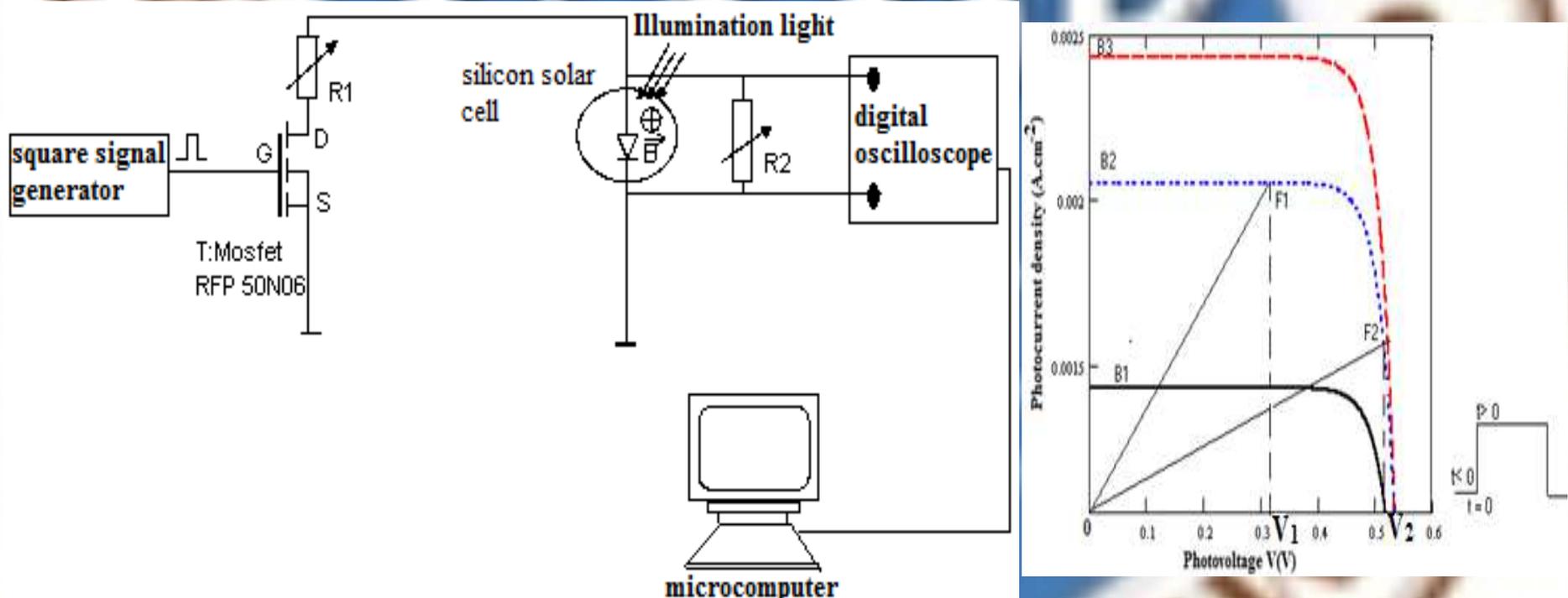


Figure 5: Dispositif expérimental pour l'observation du régime dynamique obtenue par variation du point de fonctionnement[3-12]

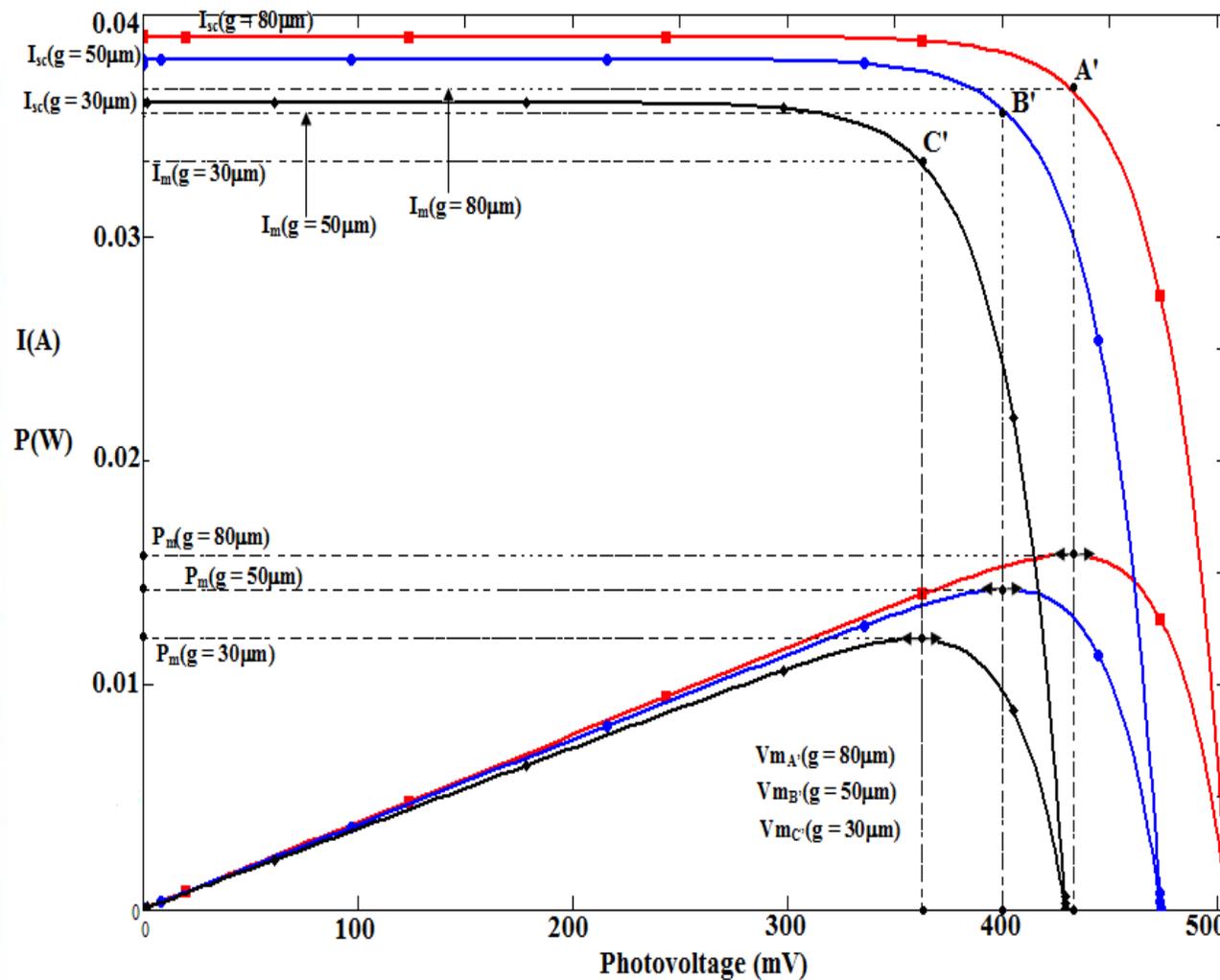
A travers ces régimes de fonctionnement, on détermine:

- la densité des porteurs de charge minoritaires (R_S, R_{DF}, R_{DVF});
- le photocourant (R_S, R_{DF}, R_{DVF});
- la phototension (R_S, R_{DF}, R_{DVF});
- la constante de temps (R_{DVF});
- la durée de vie (R_S, R_{DVF});
- la longueur de diffusion (R_S, R_{DVF});
- la vitesse de recombinaison à la face arrière (R_S, R_{DVF});
- les diagrammes de Bode et de Nyquist (R_{DF})

- la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction (S_f0) (RS);
- le facteur de forme et le rendement (RS);
- le rendement quantique interne (RS);
- les résistances shunt et séries (RS);
- la capacité de diffusion (RS);
- l'extension de la zone de charge d'espace (RS).

Ces régimes de fonctionnement permettent, en utilisant la vitesse dynamique à la jonction (S_f) [13], de déterminer les effets des champs magnétique, électrique, de la température sur les paramètres électriques de la cellule solaire.

I.7.2: Caractéristiques I-V et P-V d'une Cellule Solaire



Tension de circuit ouvert n'est pas verticale: existence de pertes traduites par R_s [14]

Courant de court-circuit n'est pas horizontale: existence de pertes et de défauts traduits par R_{sh} [14]

Figure 6: Caractéristiques I-V et P-V d'un grain de cellule solaire au silicium polycristallin [14]

I_{sc}/I_{cc} : Courant de court-circuit: on relie directement les bornes positive et négative de la cellule solaire

V_{oc}/V_{co} : tension de circuit ouvert; c'est la tension à vide de la cellule;

I_m : courant de puissance maximale;

V_m : tension de puissance maximale;

P_m : Puissance maximale.

I.7.3: Densité relative d'une Cellule Solaire/ Cas de la cellule solaire bifaciale

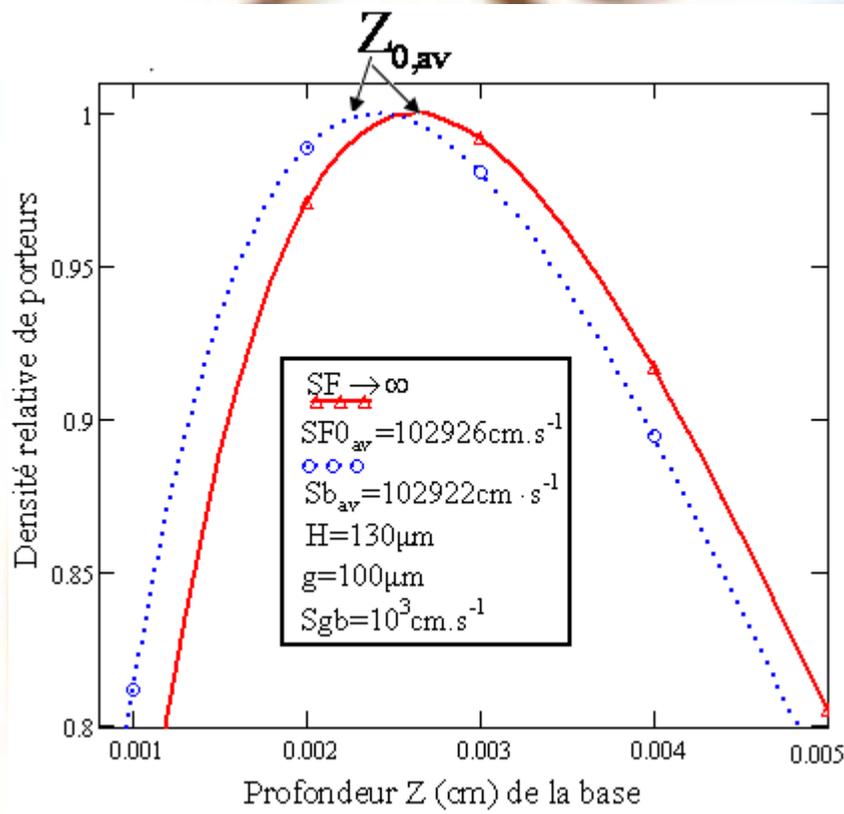


Figure 7: Densité relative en fonction de la profondeur Z (cm) pour différentes vitesses de recombinaison à la jonction: éclairement par la face avant [15].

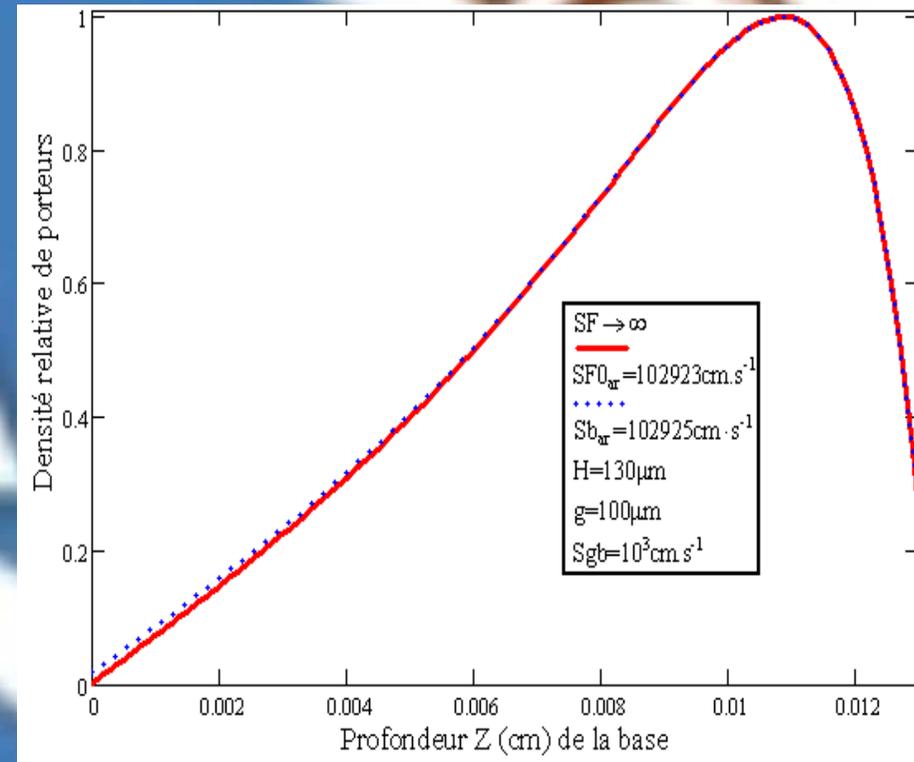


Figure 8: Densité relative en fonction de la profondeur Z (cm) pour différentes vitesses de recombinaison à la jonction: éclairement par la face arrière [15].

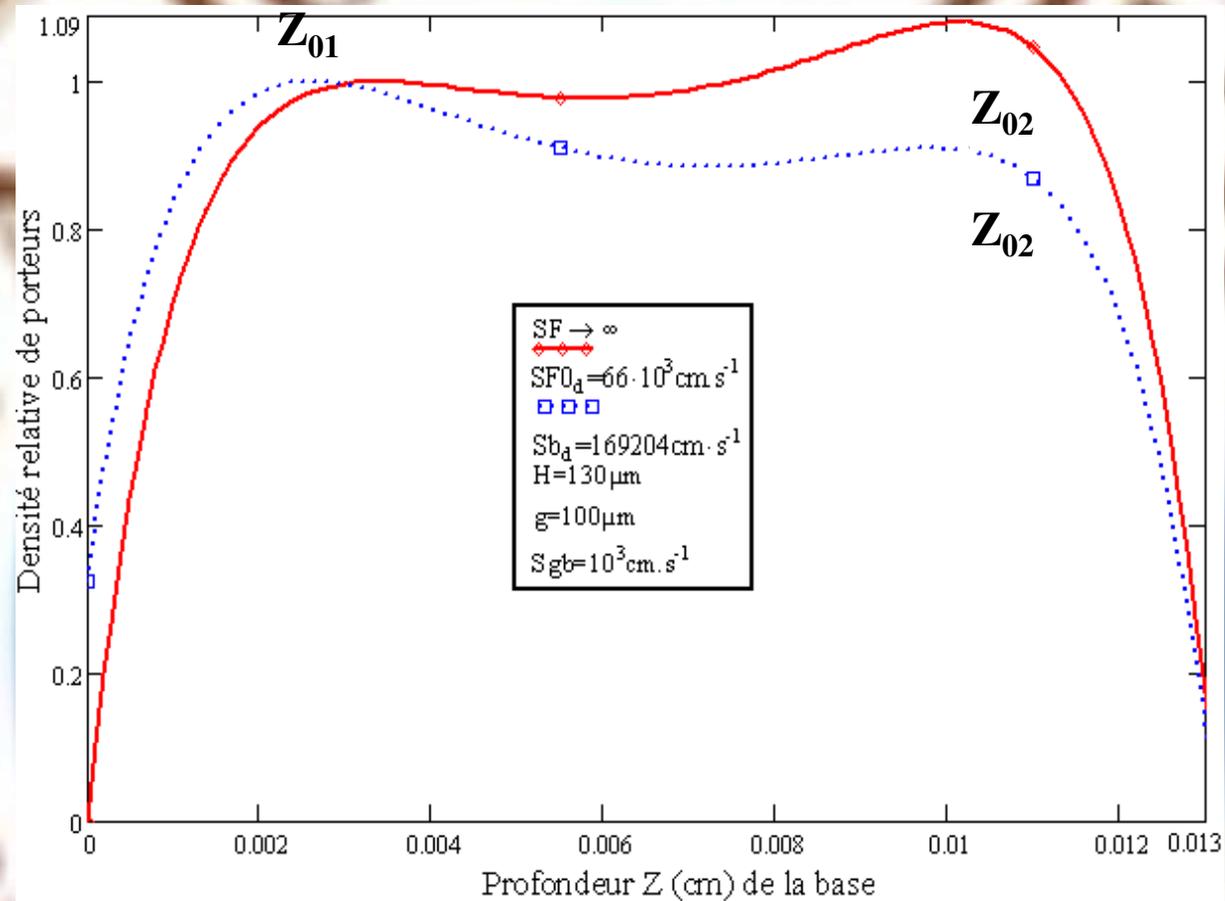


Figure 9: Densité relative en fonction de la profondeur Z (cm) de la base de la photopile éclairée par les deux faces pour différentes vitesses de recombinaison à la jonction [15].

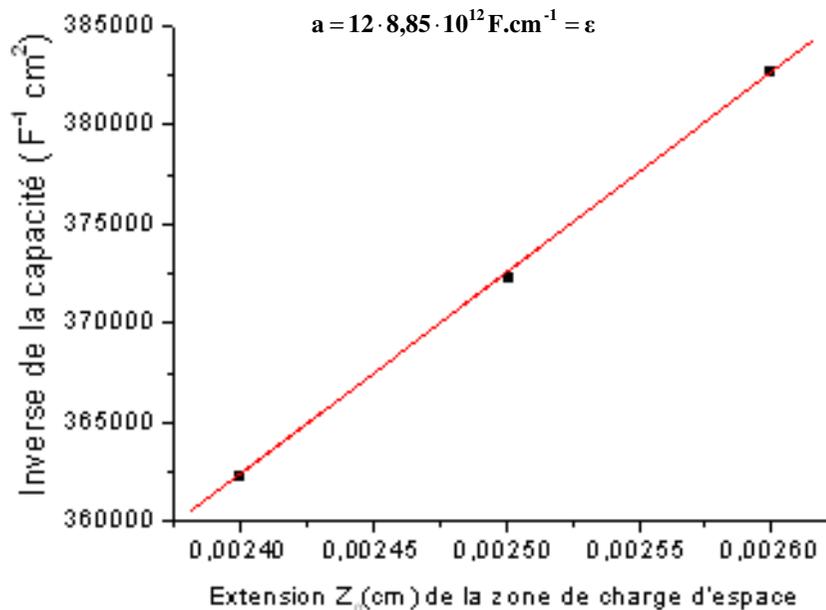


Figure 10 : Inverse de la capacité en fonction de la profondeur de la base, la vitesse de recombinaison SF_u à la jonction étant variable [15].

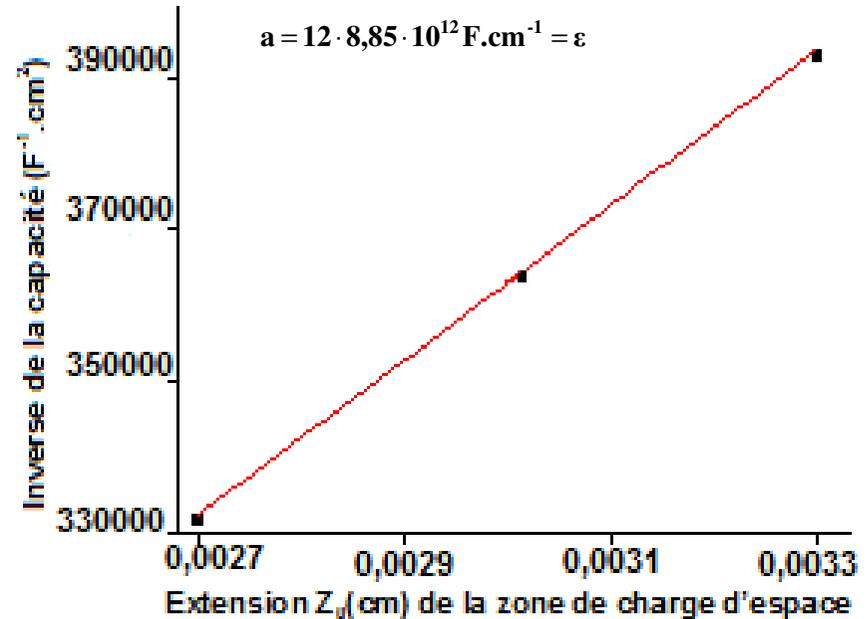


Figure 11 : Inverse de la capacité en fonction de la profondeur de la base, la vitesse de recombinaison SF_u à la jonction étant variable [15].

A partir des densités relatives, on déduit que:

Jonction = Condensateur plan.

1.7.4: Modèle mathématique de la Cellule Solaire

1.7.4.1: Modèle à deux diodes

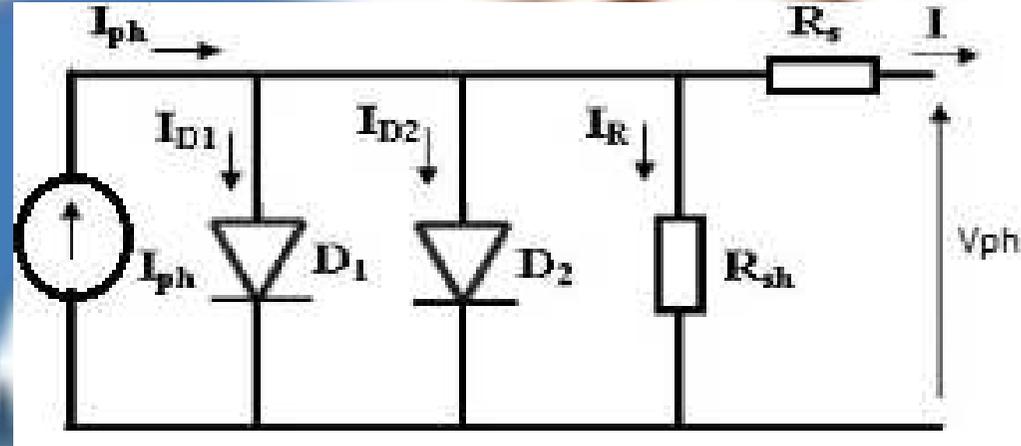


Figure 12 : Circuit équivalent du modèle à deux diodes [16].

$$I_{D1} = I_{01} \cdot \left(\frac{q \cdot (V_{ph} + I \cdot R_s)}{a_1 \cdot k \cdot T_c} - 1 \right) : \text{courant de saturation}$$

inverse de la diode (D1)

$$I_{D2} = I_{02} \cdot \left(\frac{q \cdot (V_{ph} + I \cdot R_s)}{a_2 \cdot k \cdot T_c} - 1 \right) : \text{courant de saturation}$$

inverse de la diode (D2)

$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$: constante de Boltzmann

a_1 et a_2 : facteurs d'idéalités des diodes D1 et D2, respectivement

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$: charge élémentaire

R_{sh} , résistance shunt: défaut de fabrication et peut être aussi liée à la conception (design) [15]. Elle est à l'origine d'un courant de fuite liée à la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction (S_f0).

R_s , résistance série: due au mouvement des électrons dans la base, au contact métallique entre les grilles et le silicium et à la résistance des grilles à l'avant et à l'arrière de la photopile [15].

1.7.4.2: Modèle à une diode

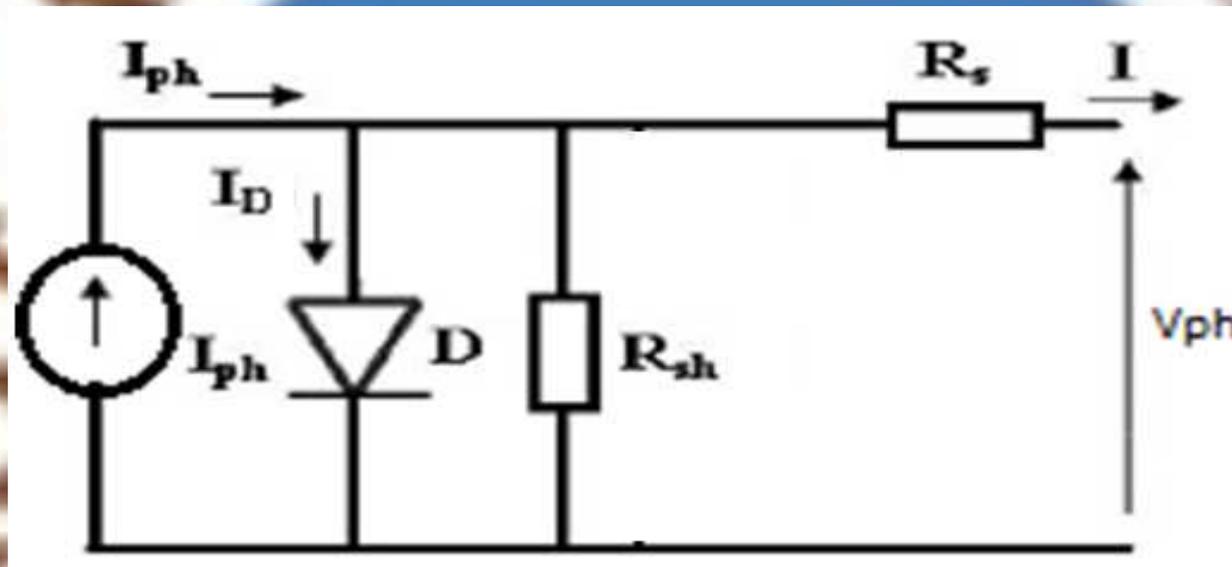


Figure 13 : Circuit équivalent du modèle à une diode[16].

1.7.4.3: Modèle idéal

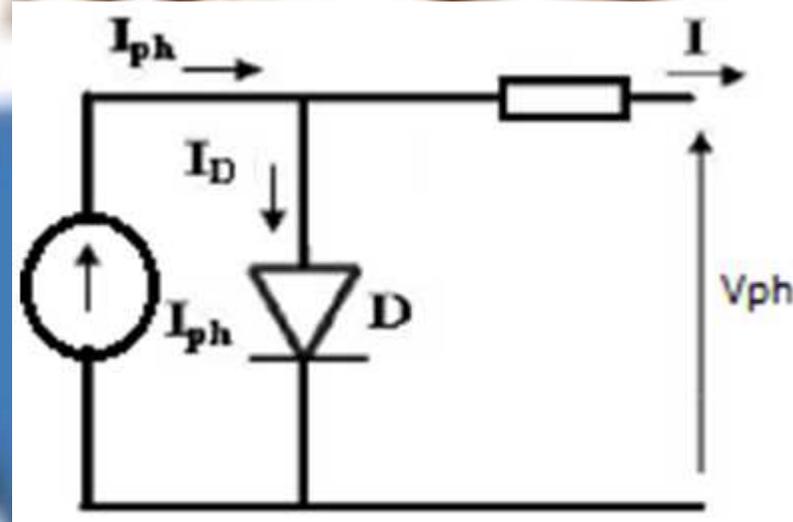


Figure 14 : Circuit équivalent du modèle de la cellule idéale [16].

1.7.4.4: Modèle de la jonction identique à une capacité

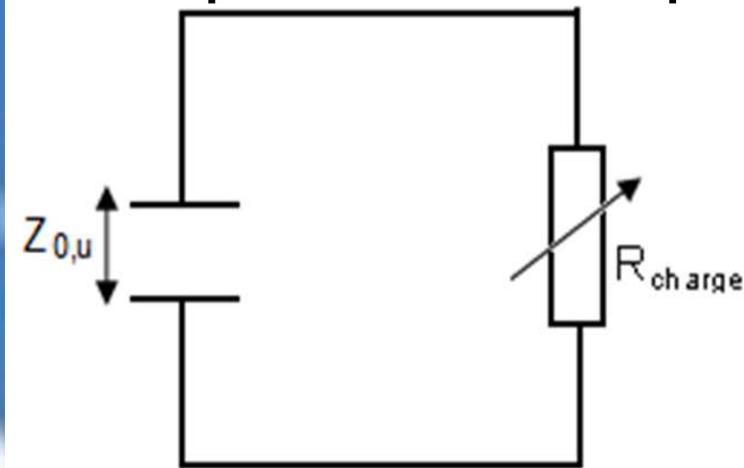


Figure 15 : Circuit équivalent de la jonction identique à une capacité [15].

II. Le module et champ Photovoltaïques

II.1: Définition et généralités

Un module PV est fait de plusieurs cellules connectées en série et en parallèle.

Une association de N_s cellules en série donne:

$$V_{PV} = V_{cell} N_s ;$$

V_{PV} : tension du module;

V_{cell} : tension d'une cellule;

N_s : nombre de cellules en série.

Une association de N_p cellules en parallèle donne:

$$I_{PV} = I_{cell} N_p ;$$

I_{PV} : photocourrant du module;

I_{cell} : photocourrant d'une cellule;

N_p : nombre de cellules en parallèle.

Le module solaire a deux fonctions, il:

- permet de délivrer une tension et un courant profitables à l'utilisation;
- protège les cellules de l'effet des paramètres environnementaux.

Le module photovoltaïque est constitué :

- d'une plaque en verre transparent;
- d'un encapsulant (en général du polymère éthylène vinyl acétate);
- d'une feuille arrière (feuilles composites adhésives)

Champ photovoltaïque: On connecte des modules en série et / ou en parallèle

II.2: Caractéristiques I-V des modules solaires

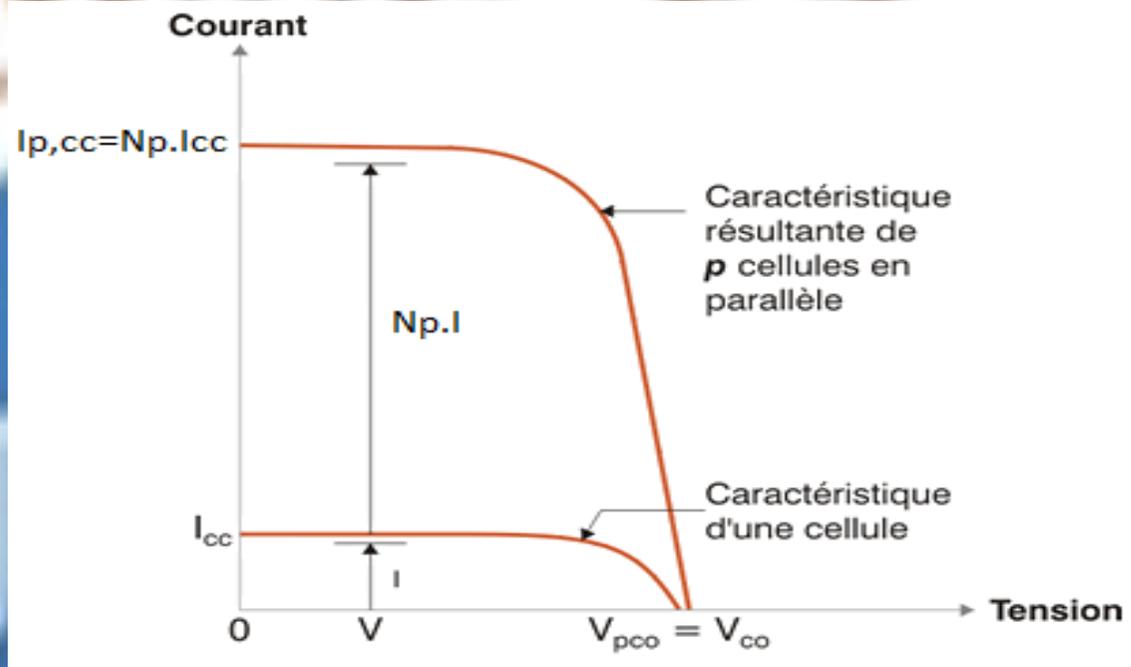


Figure 15 : Caractéristique I-V de N_p modules en parallèle [17].

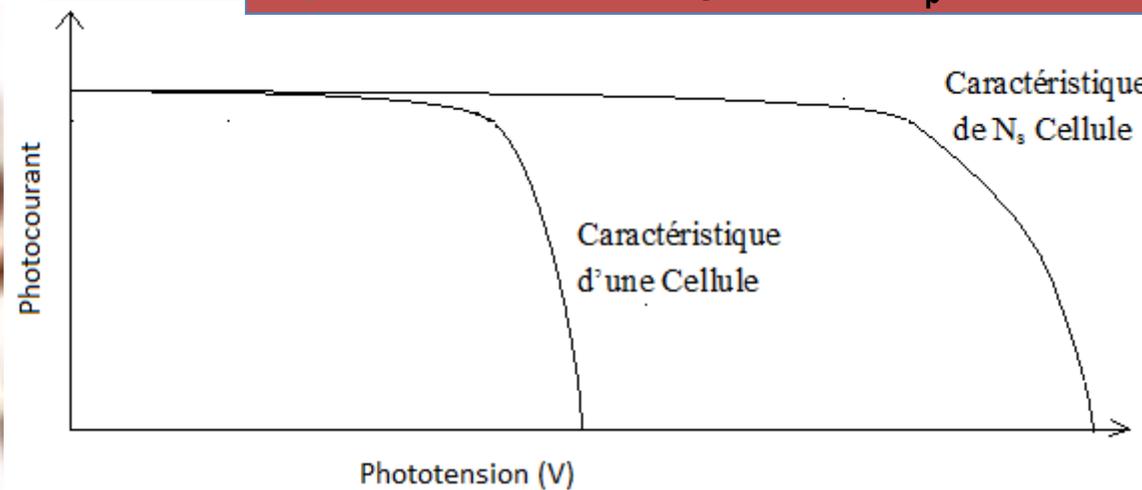


Figure 16 : Caractéristique I-V de N_s modules en série [17].

II.3: Les systèmes photovoltaïques

II.3.1: Système autonome avec charges à courant continu (DC)

Il est composé:

- du champ de modules;
- d'un régulateur de charge;
- d'un champ de batteries.

II.3.2: Système autonome avec charges à courant alternatif (AC). Il est constitué:

- du champ de modules;
- d'un régulateur de charge;
- d'un champ de batteries;
- d'un onduleur.

II.3.3: Système photovoltaïque hybride

Il combine un système photovoltaïque avec une ou plusieurs sources auxiliaires comme un aérogénérateur, un groupe électrogène, une turbine hydroélectrique, le réseau électrique.

III. Les paramètres de performances

III. 1: Les paramètres de performances des cellules solaires et des modules PV [11, 12, 13,18]

Les paramètres de performances des cellules solaires et des modules PV sont les suivants:

- la puissance nominale, donnée en Watt-crête (Wc);
- le courant de court-circuit, I_{cc} ;
- la tension de circuit ouvert, V_{co} ;
- le courant au point de puissance maximale (I_m) : il correspond au point de puissance maximale de la courbe P-V du module PV;
- la tension au point de puissance maximale (V_m) : elle correspond au point de puissance maximale de la courbe P-V du module PV;
- la puissance maximal ($P_m = I_m \cdot V_m$). Il est le point de fonctionnement désiré/ les commandes MMPT (Maximal Power Point Tracking) sont conçus pour déterminer ce point;
- le facteur de forme (fill facteur FF): $FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}}$

- le coefficient de température du courant (α) : il caractérise la dépendance du courant de court-circuit à l'augmentation de la température;
- le coefficient de température de la tension (β) : il caractérise la dépendance de la tension de circuit ouvert à l'augmentation de la température;
- le coefficient de température de la puissance (γ) : il caractérise la dépendance de la puissance à l'augmentation de la température;
- les résistances shunt et série;
- la vitesse de recombinaison intrinsèque S_f0 ;
- la vitesse de recombinaison à la face arrière S_b .

III. 2: Les paramètres de performances des systèmes PV

Pour évaluer les performances des systèmes PV, on considère plusieurs paramètres:

- **le rendement:** $\eta = \frac{P_{\text{nom}}}{A \cdot G}$

P_{nom} est la puissance nominale du champ PV;

A est la surface du champ PV;

G est l'éclairement global

- **le rendement surfacique (array yield Y_A):** $Y_A (\text{Wh/Wc}) = \frac{E_{\text{PV}}}{P_{\text{nom}}}$

E_{PV} : énergie produite par les modules dans un temps défini

- **l'indice de performance (performance ration, PR):** $PR = \frac{E_{\text{PV}}}{H \cdot A \cdot \eta_{\text{STC}}}$

H(Wh/m²): ensoleillement global

η_{STC} : rendement des modules dans les conditions STC

Remarque: Conditions de test des modules [19]

La détermination des paramètres intrinsèques selon les conditions suivantes:

- ❖ **STC: Standard Test Conditions;**
- ❖ **NOCT: Nominal Operation Conditions of Test;**
- ❖ **SOC: Standard Operation Condition**

Paramètres météorologiques	STC	NOCT	SOC
Eclairement (W/m^2)	1000	800	1000
Température ($^{\circ}C$)	25	20	20
Vitesse du vent (m/s)	-	1	1

III. 3: Les pertes de fonctionnement

Les pertes notées durant le fonctionnement d'une cellule solaire, d'un module ou d'un champ de PV sont attribuées aux facteurs suivants:

- **les paramètres climatiques :**
 - le fonctionnement dans des températures élevées ;
 - l'accumulation de la poussière sur la surface des modules PV
- **les paramètres de fonctionnement des modules :**
 - le vieillissement des modules engendré par les paramètres environnementaux tels que l'humidité, la température, la poussière, l'irradiation ultraviolette;
 - l'ombrage;
 - les pertes par effet Joule au niveau du câblage ;
 - les pertes dans les diodes;
 - l'exploitation non optimale de la puissance générée par les modules (mismatch);
- **la conversion de l'énergie à partir des convertisseurs (DC/AC, DC/DC) et des batteries dans le système PV.**

- [1]: GOETZBERGER, A., HEBLING, C. et SCHOCK, H.-W. (2003).
Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering : R : Reports*, 40(1):1–46.
- [2] Madougou S., F. Made, M. S. Boukary, G. Sissoko (2007b): Recombination Parameters Determination by Using Internal Quantum Efficiency (IQE) Data Of Bifacial Silicon Solar Cells. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Inc. Volume 18 until 19 pp. 313 - 324; (Zurich – Switzerland). ISSN 1022 6680.
- [3] S.MBODJI, A.S.MAIGA, M.DIENG, A.WEREME and G.SISSOKO. “Renoval Charge technic applied to a bifacial solar cell under constant magnetic field”
Global Journal of pure and applied sciences vol.15, No.1, 2009, pp125-132;
<http://www.globaljournalseries.com> - <http://www.ajol.info>
- [4] Madougou S. F. Made, M. S. Boukary, G. Sissoko (2007a): I –V characteristics for bifacial silicon solar cell studied under a magnetic field. *Advanced Materials Research*: Trans Tech Publications Inc. Volume 18 until 19 pp. 303 - 312; (Zurich – Switzerland). ISSN 1022 6680.
- [5] S. M. Sze, Kwok. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2006, 832 pages
- [6] Thèse Aminata Guèye Camara, FST-UCAD, 2016

- [7] R. Zerdoum et A. Gueddim, Optimisation d'un Tandem Mécanique de Cellules Solaires (AlGaAs/GaAs) / (SnO₂/SiO₂/Si), Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 87-93
- [8] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop; Solar cell efficiency tables (version 47); Prog. Photovolt: Res. Appl. 2016; 24:3–11
- [9] LUQUE, A. et HEGEDUS, S. (2011). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons
- [10] EL CHAAR, L. et EL ZEIN, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5):2165–2175
- [11] Dieng, A., Zerbo, I., Wade, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011) Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters. Semiconductors Sciences and Technologies, 26, Article ID: 095023. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095023>
- [12] Y.L.Bocande, A.Corréa, I.Gaye, M.L.Sow and G.Sissoko, Proc of the World Renewable Energy Congress, 3 (1994),1698-1700

- [13] [Senghane MBODJI](#), [Martial Zoungana](#), [Issa Zerbo](#), [Biram Dieng](#) and [Gregoire Sissoko](#), “Modelling Study of Magnetic Field’s Effects on Solar Cell’s Transient Decay”, World Journal of Condensed Matter Physics, 5, 284-293. Doi:[10.4236/wjcmp.2015.54029](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2015.54029).
- [14] S. MBODJI and G. SISSOKO, “A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the Junction recombination velocity (S_f).” Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 6(2) (2011), pp.103-114.
- [15] S. MBODJI, B. MBOW, F. I. BARRO and G. SISSOKO, “A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition”, TURKISH JOURNAL OF PHYSICS, Volume 15, Issue 3, 2011, pp 281-291
- [16] ISHAQUE, K., SALAM, Z., TAHERI, H. et SYAFARUDDIN (2011). Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. Simulation Modelling Practice and Theory, 19(7):1613–1626
- [17] CHANDEL, S., NAIK, M. N., SHARMA, V. et CHANDEL, R. (2015). Degradation analysis of 28 year field exposed mono-c-si photovoltaic modules of a direct coupled solar water pumping system in western himalayan region of india. Renewable Energy, 78:193–202.
- [18] ESRAM, T. et CHAPMAN, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC, 2(2):439.
- [19] SHARMA, V. et CHANDEL, S. (2013). Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems : A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27:753–767.