

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée

Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique

Faculté de Technologie

Université Batna 2

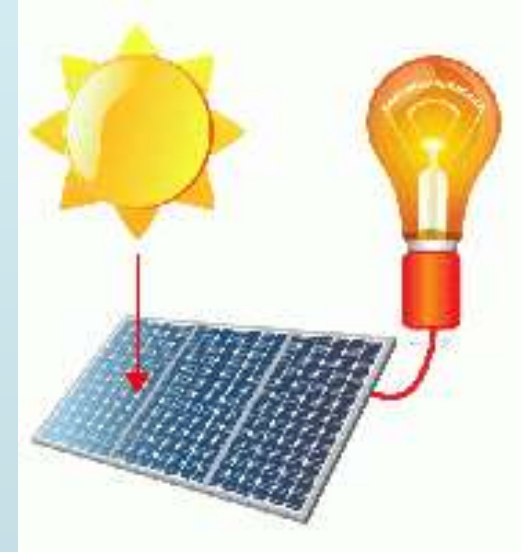
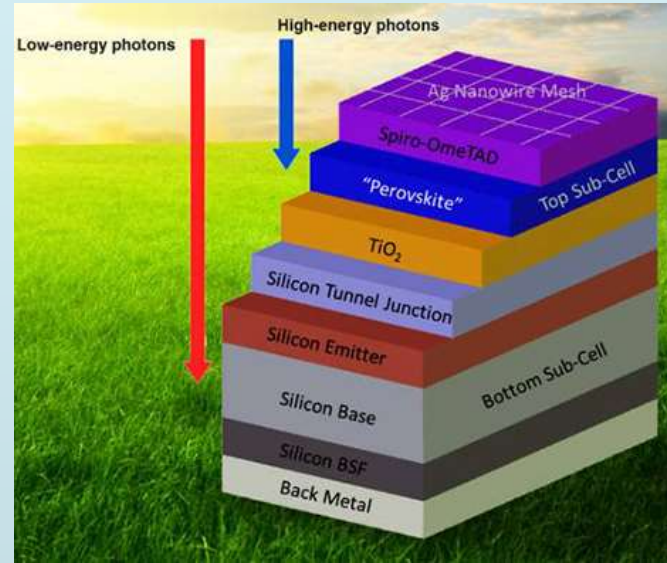
Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs

(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batn2a.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84



Cellules photovoltaïques

De la technologie des couches actives
au panneau solaire photovoltaïque

Plan de l'exposé

2^{ème} Partie

- ▶ **Aspects Technologiques**
 - ▶ **Différentes technologies**
 - ▶ **Différentes structures**
 - ▶ **Cellules organiques**
 - ▶ **Relation Technologie-Matériaux**
- ▶ **Caractérisation des cellules photovoltaïques**
- ▶ **Cellule, Module, Panneau et Générateur photovoltaïques**
- ▶ **Résultats récents**
- ▶ **Feuille de route japonaise**

Aspects Technologiques

Cellules Photovoltaïques

Différentes générations

- ▶ Les cellules de **1^{ère} génération**, en silicium massif (0.4-0.5mm), rendement limité, 15 %
- ▶ Les cellules de **2^{ème} génération**, un film mince de silicium (environ 10 micromètres) déposé sur un substrat moins cher (des plaquettes de verre ou de céramique)
- ▶ Les cellules de **3^{ème} génération** à base de **Cellules multicouches** ou celles à base de **nanoparticules de silicium** ou de **germanium** (5 nanomètres de diamètre) dans une fine couche de verre placée à la surface de la cellule pour que la lumière solaire soit mieux absorbée, cellules organiques, etc,

Cellules photovoltaïques

Pourquoi les couches minces

Solar cell	Si raw material	Present efficiency	Future efficiency	Peak Power	Peak Power
c-Si	1200-1500 g/m ²	14 %	16 %	160 W _p /m ²	0.13 W _p /g
TF Si	4-5 g/m ²	7 %	10 %	100 W _p /m ²	20 W _p /g

Massif

Couche mince

Advantages of thin film PV technologies:

- savings in material and energy consumption
- large area deposition
- monolithic integration
- energy pay back time
- implementation in building industry

Cellules Photovoltaïques organiques

Différentes technologies

les cellules à base de **matériaux inorganiques**.

Exemples:

- ▶ Cellules à base de silicium cristallin (rendement 16 à 24%);
- ▶ Cellules à base de silicium polycristallin (rendement 14 à 18%);
- ▶ Cellules à base de silicium amorphe (rendement 8 à 12% mais instable).

Cellules photovoltaïques organiques

Différentes technologies

Cellules « sensibilisées avec des colorants » dites **cellule Grätzel**.

- ▶ Ces cellules comportent :
 - ▶ un matériau organique qui absorbe la lumière (colorant),
 - ▶ un oxyde nano-structuré pour transporter les électrons (généralement TiO_2 ou ZnO) ;
 - ▶ les charges positives sont transportées dans un électrolyte.
- ▶ NB.
 - ▶ Les cellules à électrolyte liquide ont un rendements de 10,5 % ;
 - ▶ Les celles comportant un électrolyte solide sont en cours de développement et conduisent pour le moment à des rendements de 4 %.

Cellules Photovoltaïques organiques

Différentes technologies

les cellules à base de **composites organique – inorganique.**

Exemple:

Nanocristaux de CdSe ou CdTe, par exemple, sont dispersés dans une matrice organique.

Rendement:

Les meilleurs rendements de conversion atteints sont de de l'ordre de 1,7 %.

Cellules photovoltaïques organiques

Différentes technologies

Cellules **tout organique** composées de deux matériaux organiques.

Exemple

Cellules à hétérojonctions volumiques à base de P3HT (On appelle **P3HT** — **poly(3-hexylthiophène)**, voire **poly(3-hexylthiophène-2,5-diyl)**) est un polymère semi-conducteur de type *p* (donneur d'électrons) et de PCBM **{[6,6]-phényl-C₆₁-butanoate de méthyle** — est un semi-conducteur de type *n* (accepteur d'électrons)}

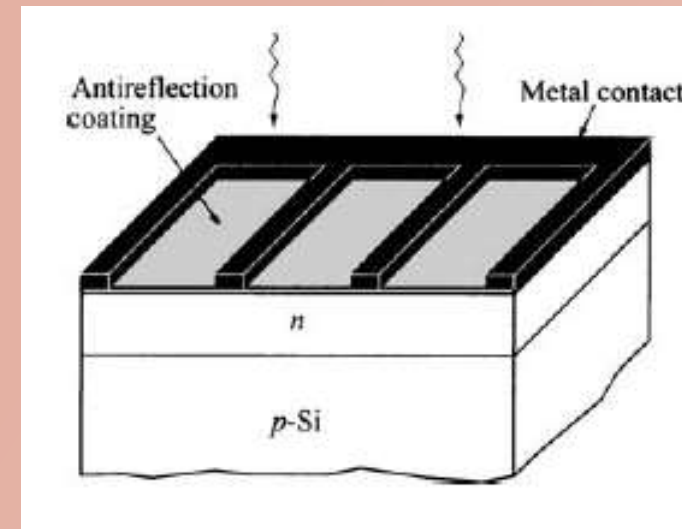
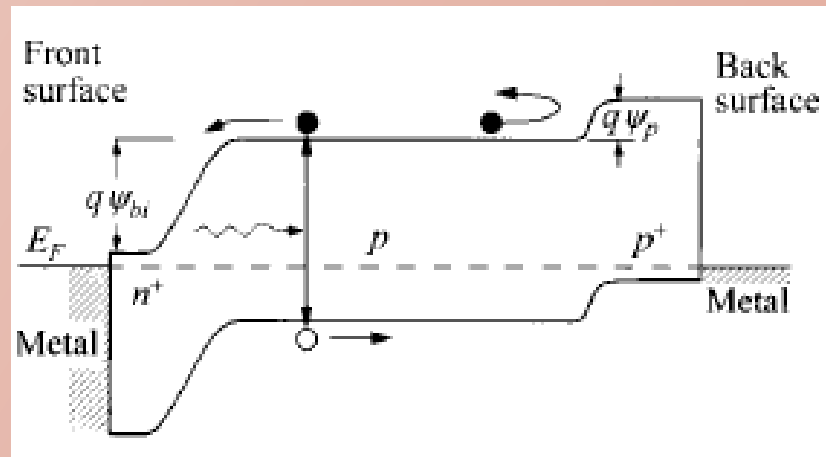
Rendement:

Les meilleurs rendements sont aujourd'hui de l'ordre de 5 %, plus récemment, ils avoisinent les 9%.

Cellules Photovoltaïques

Différentes Structures

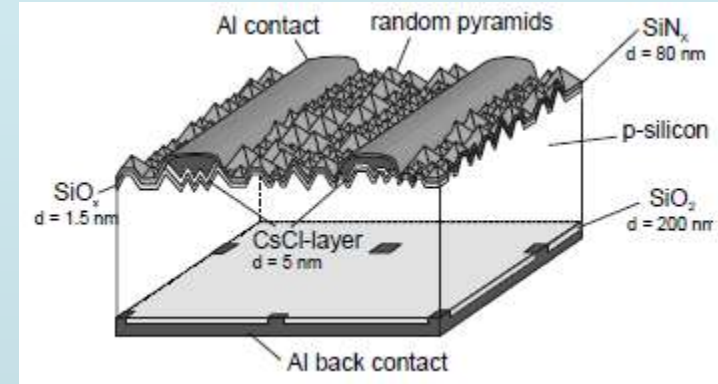
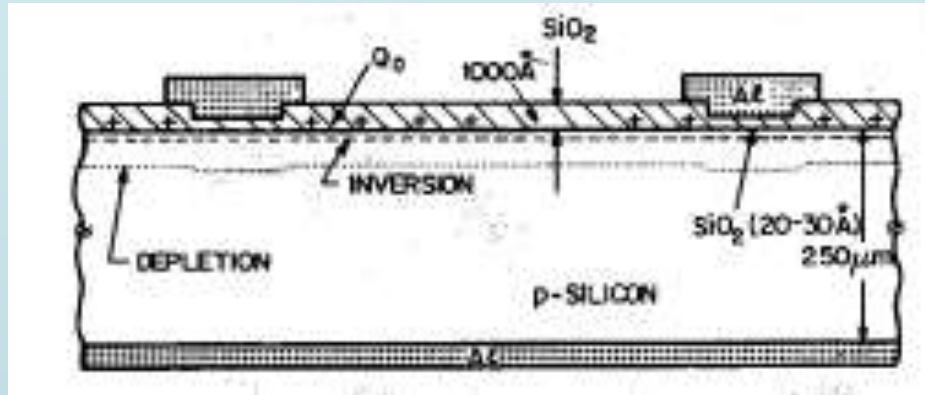
Jonction pn (problème: pertes résultant de la non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$)



Cellules Photovoltaïques

Différentes Structures

Structure MIS



MIS Inversion Layer Silicon Solar Cells with 19.6 % efficiency

C. Peters, R. Meyer and R. Hezel
 Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal (ISFH),
 Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany
 Phone: +49 (0) 5151 999 313, Fax: +49 (0) 5151 999 400
 Email: peters@isfh.de,

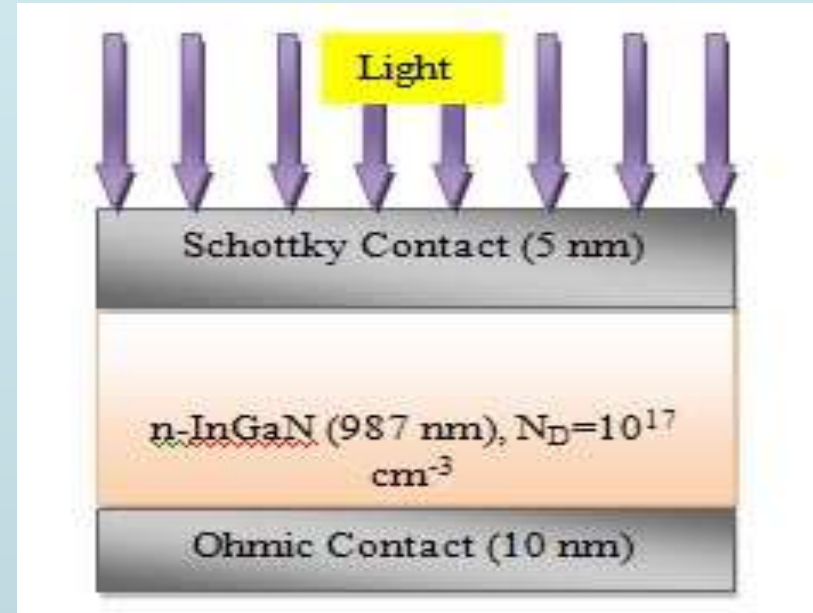
	MIS _{Al}	MIS _{Al+CsCl}	previous cell [5]
V_{oc} [mV]	606	627	615
J_{sc} [mA/cm ²]	40.3	40.4	39.3
FF [%]	74.1	77.4	76.7
η [%]	18.1	19.6	18.5

Tab. 4: Parameters of the textured MIS-IL solar cells presented in this work, compared to the cells reported in [5]. All cells are fabricated on 0.5 Ω cm p-type FZ silicon with an aperture area of ~ 4 cm². (AM1.5G, 100 mW/cm², 25°C)

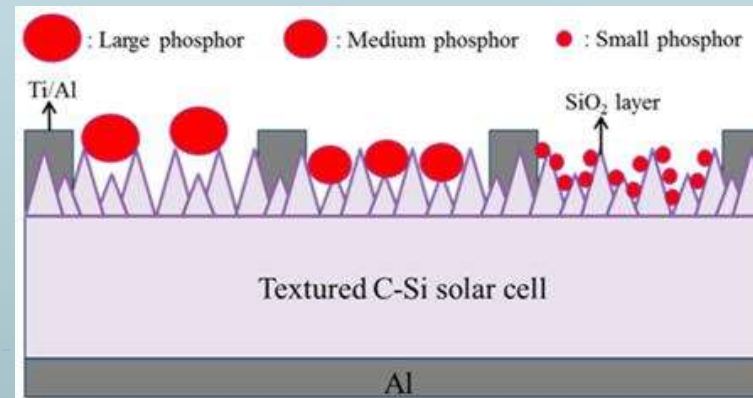
Cellules Photovoltaïques

Différentes Structures

Indium-gallium nitride (InGaN)
Schottky junction solar cell



Silicon Schottky junction solar cell



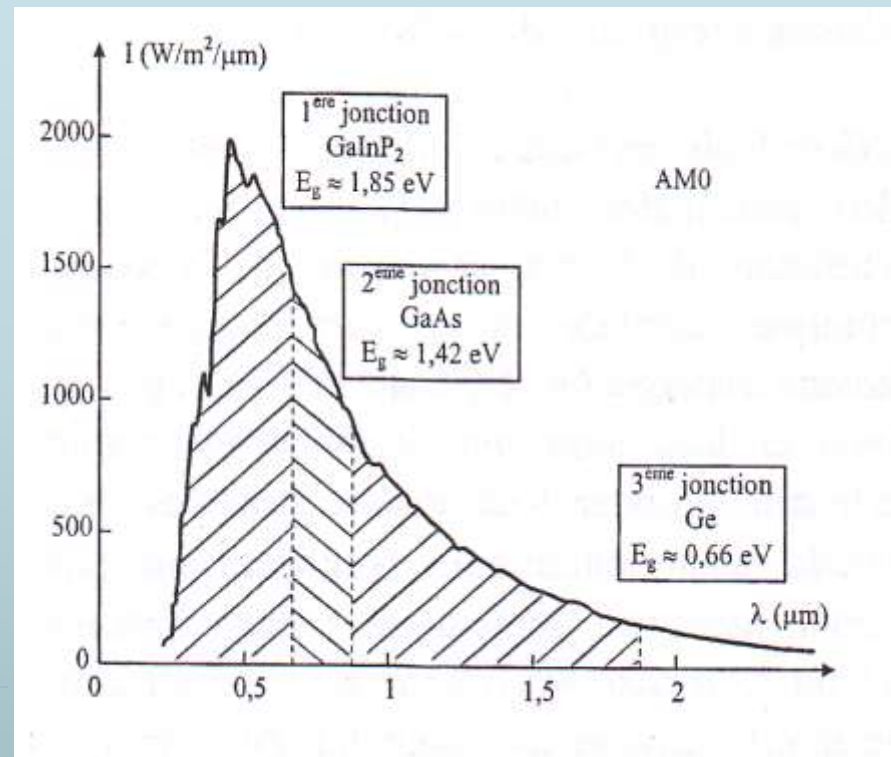
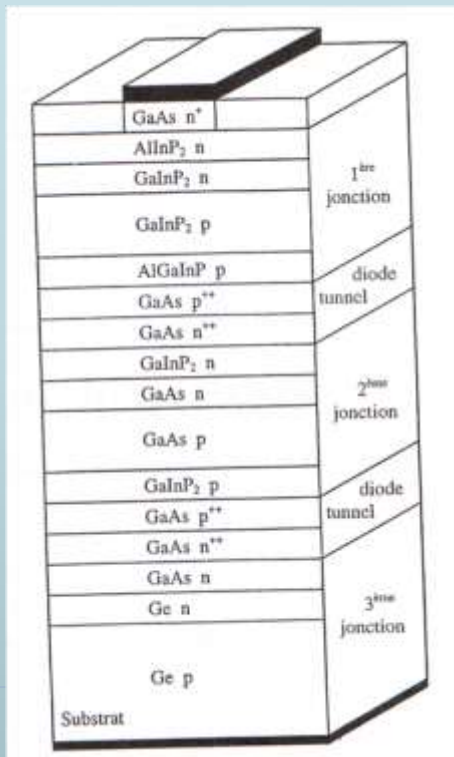
Cellules Photovoltaïques

Différentes Structures

Cellules Multicolores III-V
Ou multi-jonctions

Echantillonnage des structures Multicouches
dans le spectre solaire
Rendement théorique max =35% sous AM0

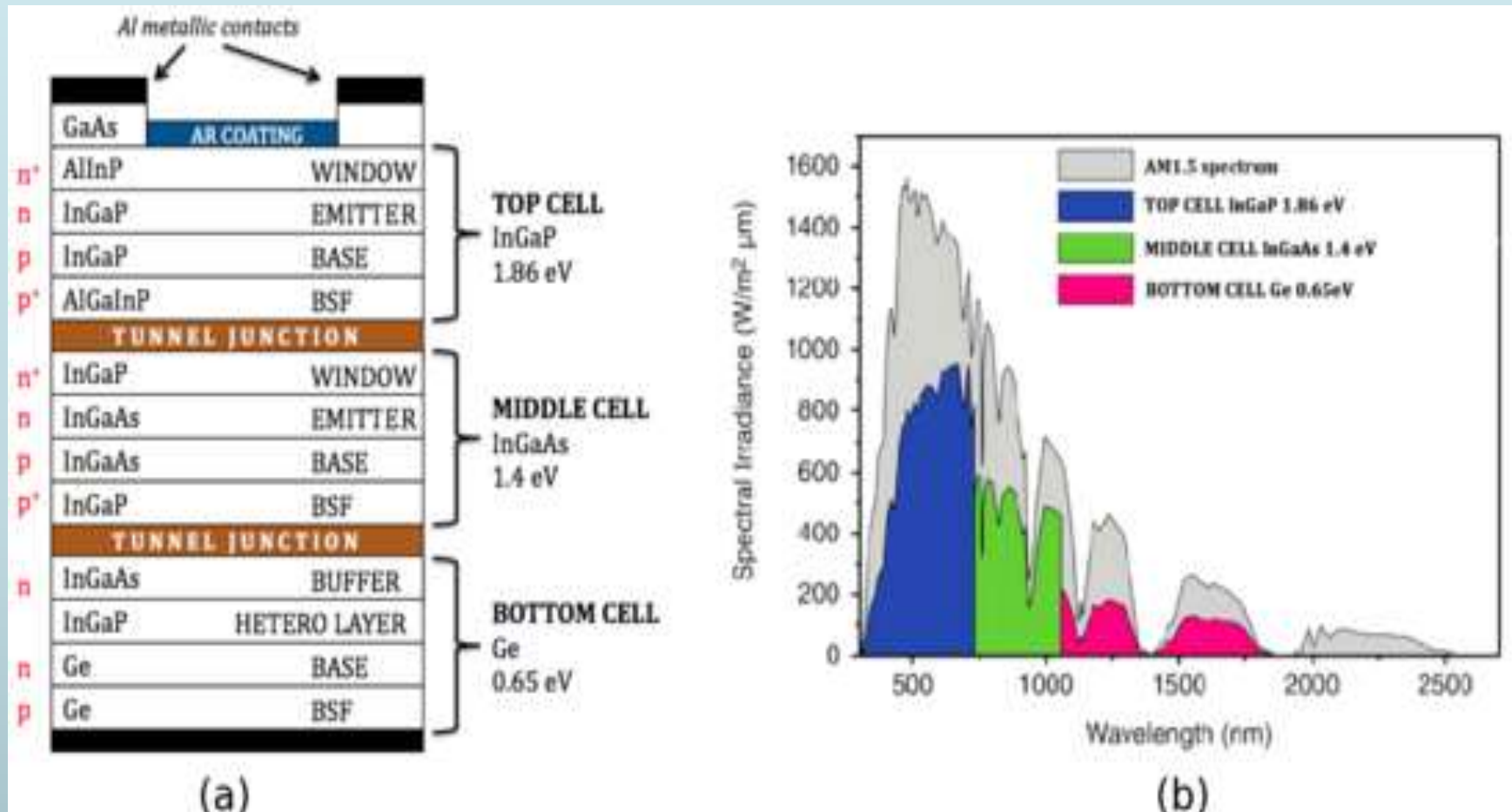
Les cellules solaires multi-jonctions (MJ) sont des cellules solaires avec plusieurs jonctions p-n en différents matériaux semi-conducteurs



Cellules Photovoltaïques

Différentes Structures

Cellules multi-jonctions (suite)



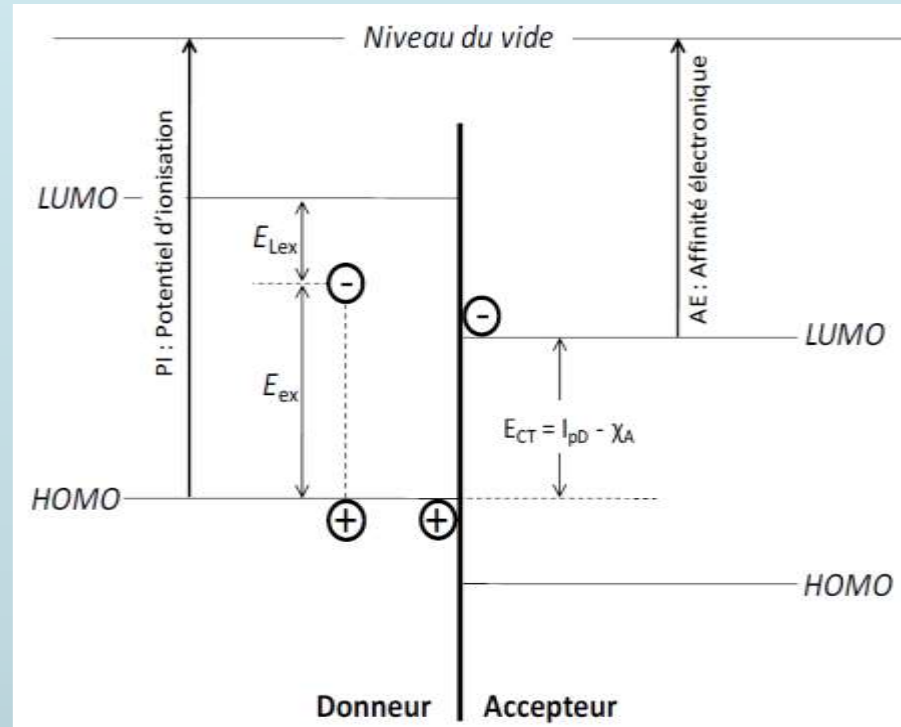
Cellules Photovoltaïques organiques semi-conducteur organique

Un semi-conducteur organique est un composé organique qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques.

La conduction est assurée par les **excitons** (paire électron-trou liés).

Sa structure de bande est caractérisée par la présence:

- d'une bande HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) qui est l'homologue de la bande de valence pour les semi-conducteurs inorganiques;
- d'une bande LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), l'homologue de la bande de conduction des semi-conducteurs inorganiques.
- d'une bande interdite.



Cellules Photovoltaïques organiques

semi-conducteur organique

Avantages

Les semi-conducteurs organiques offrent plusieurs avantages à savoir:

- Faible coût;
- Légèreté;
- Flexibilité;
- Facilité de fabrication (procédés par voie humide à température ambiante).

Inconvénients

Les semi-conducteurs organiques présentent cependant une limitation due à leur durée de vie relativement courte.

Cela est dû à la sensibilité des matériaux organiques vis à vis de:

- l'humidité;
- l'oxygène;
- la lumière.

Cellules Photovoltaïques organiques

Difficultés

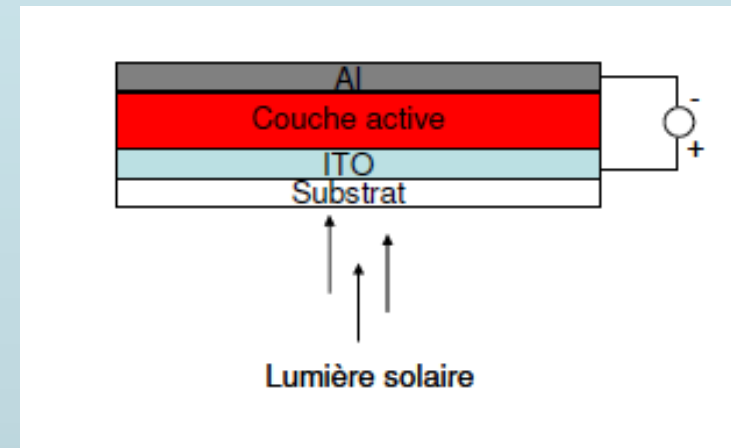
- ▶ Durée de vie des panneaux solaires à base de silicium est de 25 ans
- ▶ Les cellules organiques performantes durent moins de 5000 heures
- ▶ Problème de stabilité des matériaux organiques (phénomènes de dégradation purement chimique des matériaux et modifications de leurs morphologies).

Cellules Photovoltaïques organiques

Structure typique

Une cellule photovoltaïque organique est composée de:

- ▶ Substrat transparent (verre ou plastique).
- ▶ **Anode généralement d'ITO**
- ▶ **Couche active organique** (composée de deux matériaux, l'un transporteur de trous et l'autre transporteur d'électrons.)
- ▶ **Cathode en aluminium déposé par évaporation sur la couche active**

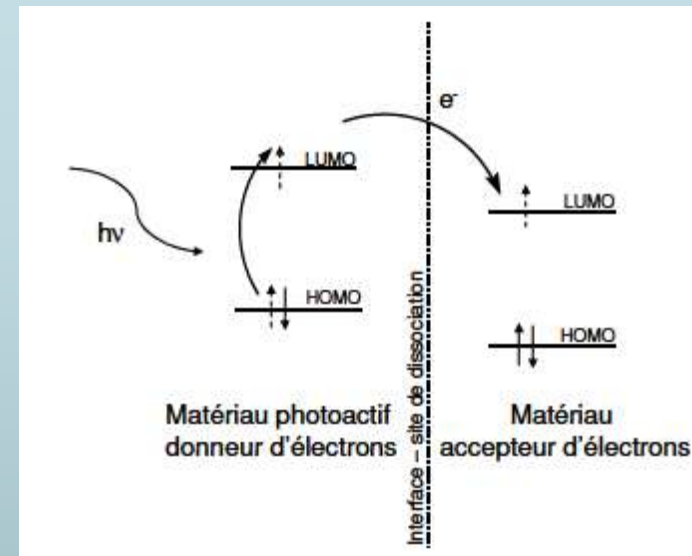
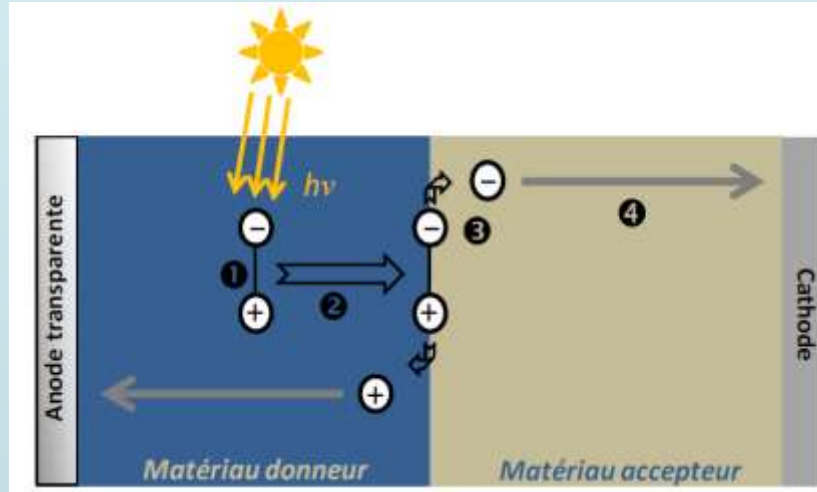


Cellules Photovoltaïques organiques

Principe de fonctionnement

La conversion de la lumière en électricité par une cellule photovoltaïque organique passe par 4 principales étapes à savoir:

- ❑ Absorption d'un photon conduisant à la formation d'un état excité du matériau organique avec la création de paire électron-trou localisée en forte interaction (exciton) ①;
- ❑ Diffusion de l'exciton jusqu'à un site de dissociation ②;
- ❑ Dissociation de l'exciton et la création de porteurs de charges libres ③;
- ❑ Transport des charges (trous et électrons) dans chacun des matériaux organiques et la collection des charges aux électrodes ④.

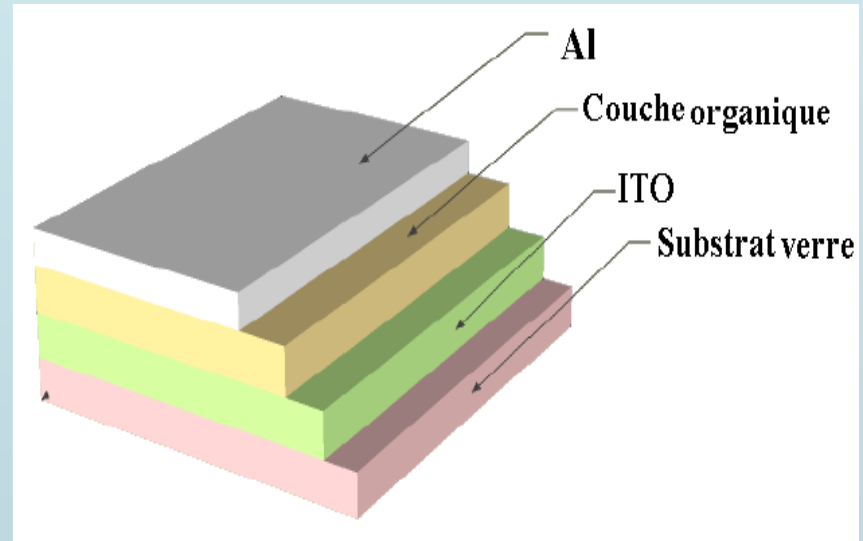


Cellules Photovoltaïques organiques

Structures

Structure monocouche

Ce type de cellules à été décrit comme étant **de type Schottky**, car une couche de matériau organique est prise en sandwich entre deux électrodes asymétriques, une présentant un contact ohmique et l'autre un contact redresseur



Cellules Photovoltaïques organiques

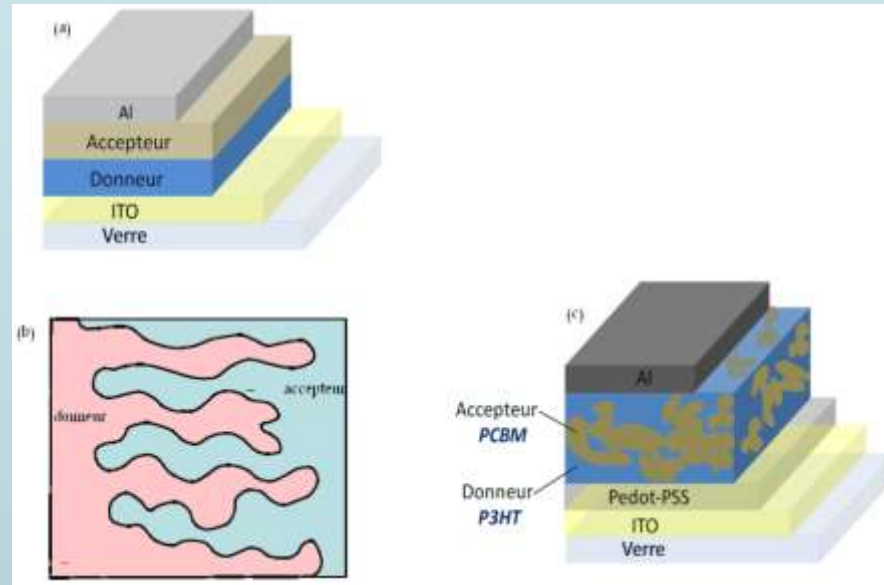
Structures

Structure bicouche

Appelée aussi structure **hétérojonction** ou **jonction PN**, elle est composée de deux matériaux de natures différentes (donneur et accepteur d'électrons) mis en contact entre deux électrodes.

Les cellules en structure bicouche peuvent être séparées en deux groupes:

- hétérojonctions planaires (Figure (a));
- hétérojonctions en volume: inter-digitée (Figure (b)), ou interpénétrée (Figure (c)).



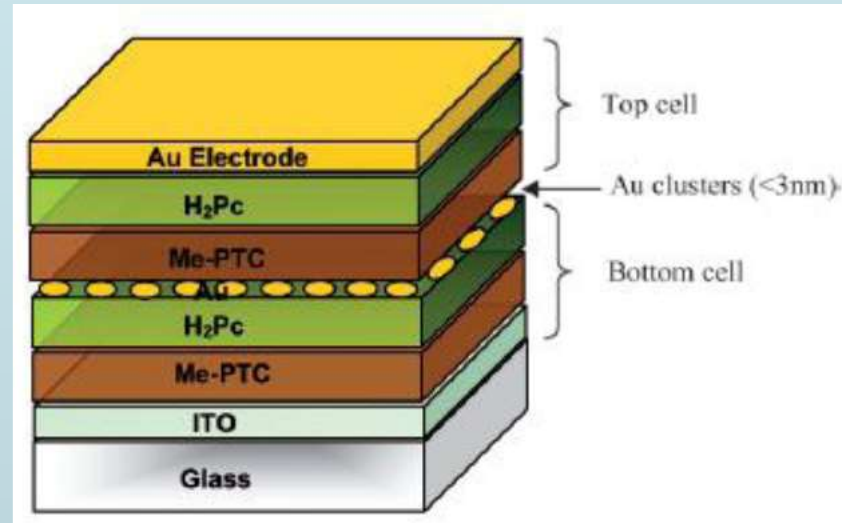
Cellules Photovoltaïques organiques

Structures

Structure des cellules tandem

Des améliorations peuvent être apportées en empilant les cellules les unes sur les autres.

L'objectif étant d'absorber la plus grande partie du spectre solaire tout en limitant les pertes par thermalisation.



Cellules Photovoltaïques organiques

Avantages et inconvénients des cellules solaires organiques

Avantages

- ▶ **Légèreté et flexibilité**
- ▶ **La mise en forme à l'aide de procédés en solution**
- ▶ **plusieurs procédures de fabrication**
- ▶ **Dissociation excitonique plus efficace**
- ▶ **Facilité de fabrication**
- ▶ **Auto-assemblage**
- ▶ **Transparence**
 - ▶ **Utilisation bifaciale**
 - ▶ **Insertion dans des éléments architecturaux**
 - ▶ **Utilisation multicouche**

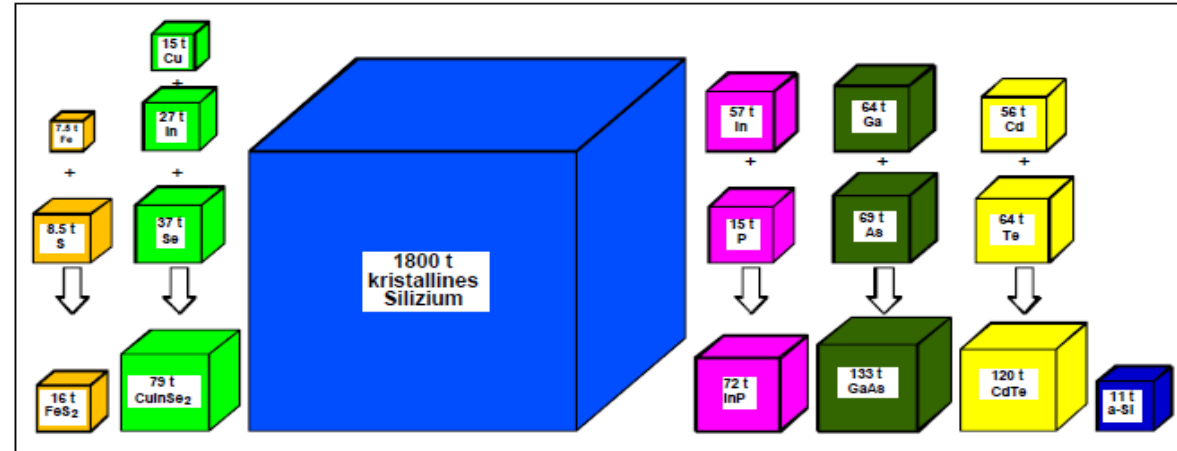
Inconvénients

- ▶ **Absorption limitée**
- ▶ **Limite du rendement de collecte**
- ▶ **Mobilité réduite**
- ▶ **Instabilité dans le temps**
- ▶ **Problème écologique**

Cellules Photovoltaïques

Rôle de la technologie

Material required for 1 MW_p



	16 t FeS ₂	79 t CuInSe ₂	1800 t c-Si	72 t InP	133 t GaAs	120 t CdTe	11 t a-Si
η(%)	3	12	20	20	20	10	10
d(μm)	0.1	2	150	3	5	2	0.5

Cellules Photovoltaïques

Rôle de la technologie

- ▶ **Energy pay back time:** the time required for an energy conversion system or device to produce as much energy as is consumed for its production

Solar cell	Efficiency	Energy pay back time
c-Si	12 %	2.1 years
TF Si	6 %	1.4 years
CuInSe ₂	10 %	1.25 years

Annual insolation 1800 kWh/(m² year)

Caractérisation des Cellules Photovoltaïques

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Il existe deux techniques électro-optiques importantes pour caractériser les cellules photovoltaïques.

- La première technique consiste à mesurer la caractéristique $I(V)$ sous un rayonnement polychromatique.
- La deuxième consiste à mesurer la réponse spectrale sous un rayonnement monochromatique

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

La caractéristique $I(V)$ est donnée par l'expression:

$$I(v) = I_{obs} - I_{ph}$$

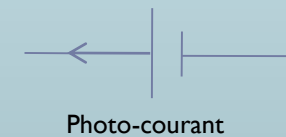
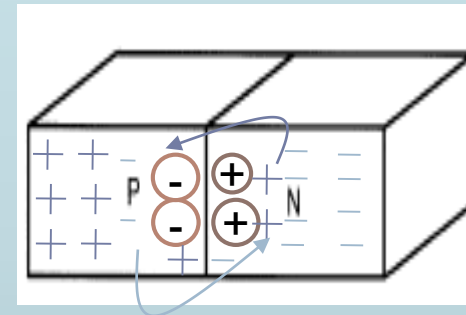
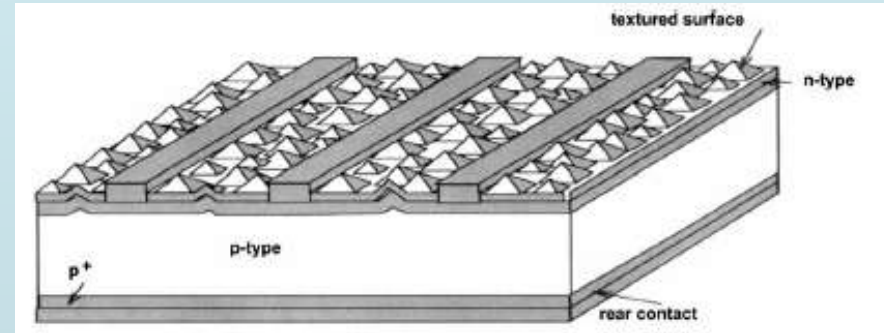
$$I(v) = I_0 \times \left(\exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

Où:

I_{obs} : le courant d'obscurité

I_0 : le courant de saturation

I_{ph} : le courant photonique ou de (court circuit) généré par la lumière



Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Photo-courant (cas d'une jonction pn)

Le courant dans la région quasi-neutre N : la densité du **photo-courant de trous** à la limite de la zone de déplétion est donnée par :

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x_j} = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \right] \times$$

$$\left[\frac{\left(\frac{s_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{s_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p} \right)}{\left(\frac{s_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right]$$

Photo-courant (cas d'une jonction pn)

Le courant dans la région quasi-neutre P: La densité du **photo-courant d'électrons** collectés à la limite de la zone de déplétion est donnée par :

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{x_j+w} = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] \times \exp(-\alpha(x_j + w)) \times$$

$$\left[\frac{\alpha l_n - \frac{s_n L_n}{D_n} \left(\cosh \frac{h'}{L_n} - \exp(-\alpha h') \right) + \sinh \frac{h'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha h')}{\left(\frac{s_n L_n}{D_n} \sinh \frac{h'}{L_n} + \cosh \frac{h'}{L_n} \right)} \right]$$

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Photo-courant (cas d'une jonction pn)

Le courant dans la région de déplétion : Le flux d'électrons et de trous est égale au nombre de paires électron trou créées dans la zone de déplétion. Son expression est donnée par :

$$\begin{aligned} J_{zce} &= -q \times (1 - R) \times \int_{x_j}^{x_j+w} \alpha \times F_0(\lambda) \times \exp(-\alpha(\lambda) \times x) dx \\ &= -q \times F_0(\lambda) \times (1 - R) \times [\exp(-\alpha \times (x_j + w)) - \exp(-\alpha \times x_j)] \\ &= q \times F_0(\lambda) \times (1 - R) \times \exp(-\alpha \times x_j) [1 - \exp(-\alpha w)] \end{aligned}$$

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Photo-courant total (cas d'une jonction pn)

La densité du photo-courant totale de la cellule représente la somme des trois composantes calculées ci-dessus en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est indépendant de la tension extérieure et est proportionnel à l'éclairement :

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda)$$

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Réponse spectrale (cas d'une jonction pn)

La réponse spectrale externe: C'est le rapport entre le nombre de paires d'électron-trou photogénérées collectées par les contacts ohmiques et le nombre de photons incidents pour une longueur d'onde donnée dont l'expression est:

$$RS(\lambda) = \frac{J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda)}{q \times F(\lambda)}$$

q=Charge électron
F(λ)=Nombre de photons incidents

La réponse spectrale interne: C'est le nombre de paires d'électron-trou photogénérées collectées par les contacts ohmiques divisé par le nombre de photons incidents absorbés pour une longueur d'onde donnée dont l'expression est:

$$RS(\lambda) = \frac{J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{zce}(\lambda)}{q \times F(\lambda) \times (1 - R(\lambda))}$$

Remarque: D'une manière générale, la région de courtes longueurs d'ondes dans le diagramme de la réponse spectrale fournit des informations concernant l'émetteur, et la région de moyennes et grandes longueurs d'onde fournit des informations concernant la région de déplétion et la base.

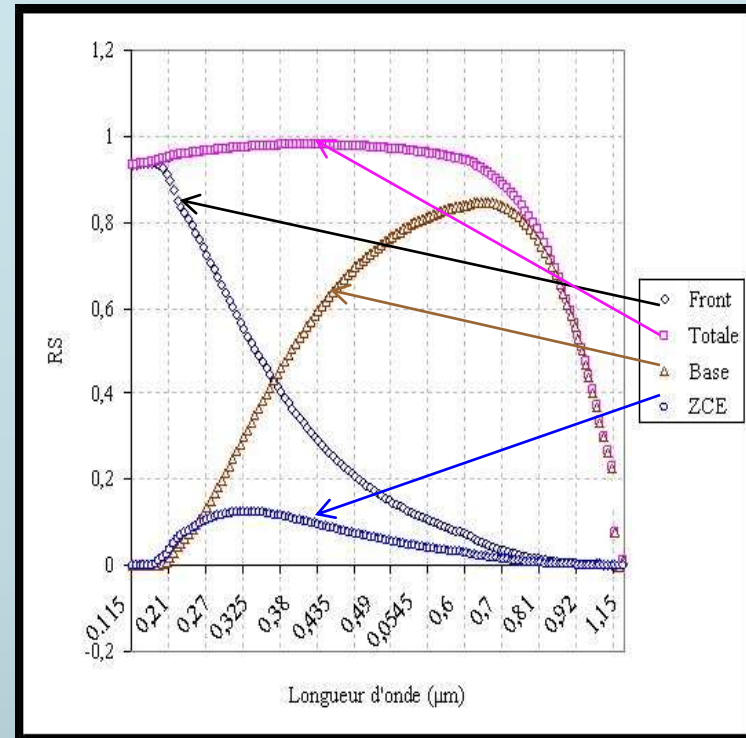
Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

- ▶ A partir de l'expression de la réponse spectrale, la densité du photo-courant en fonction de la longueur d'onde est donnée par :

$$J_{ph}(\lambda) = q \cdot F(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot RS(\lambda)$$

- ▶ La densité totale sur tout le spectre utilisé est obtenue par l'intégration de l'expression du photo-courant:

$$J_{ph} = q \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F(\lambda) \times (1 - R(\lambda)) \times RS(\lambda) \times d\lambda$$



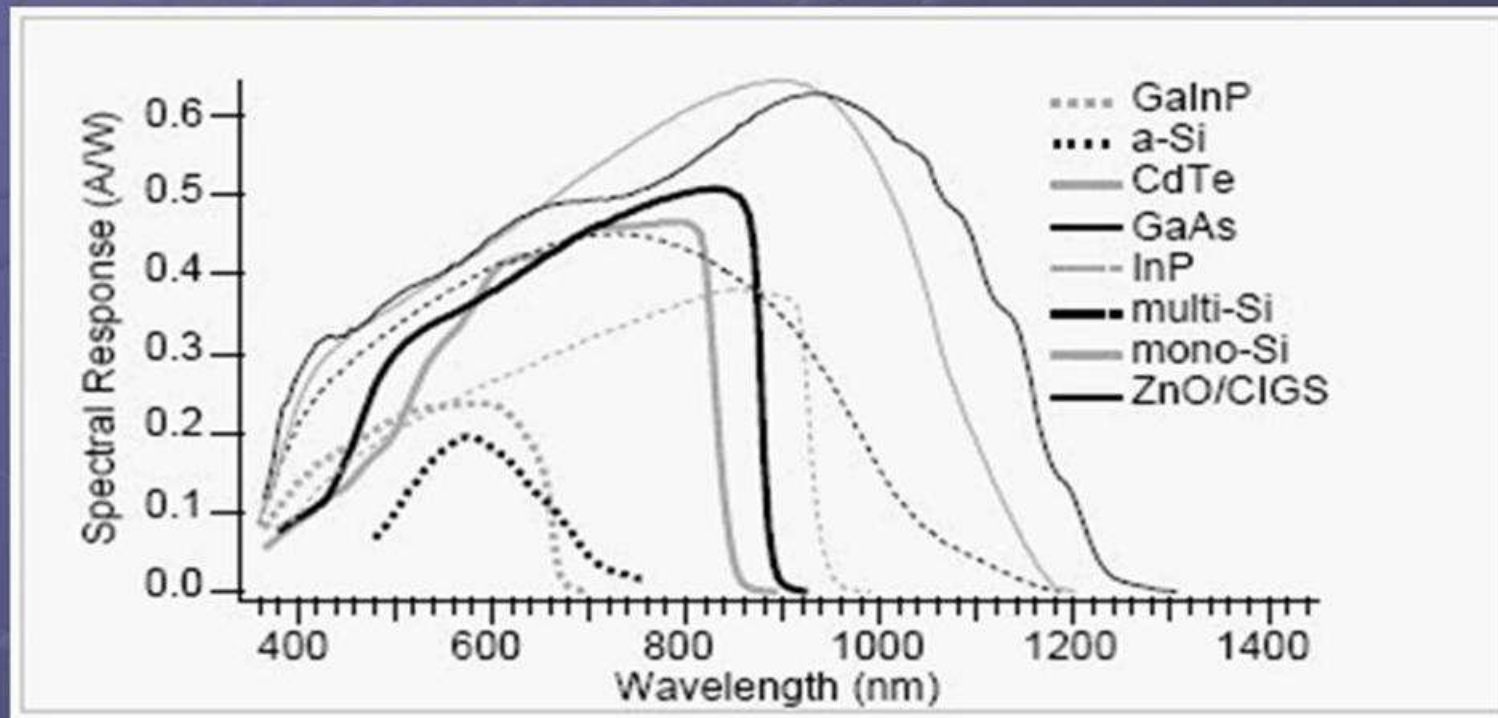
La réponse spectrale des différentes régions d'une cellule solaire

Cellules Photovoltaïques

Techniques de Caractérisation

Réponse spectrale

Réponse spectrale des cellules (spectre unitaire)



Modèles et effets des paramètres

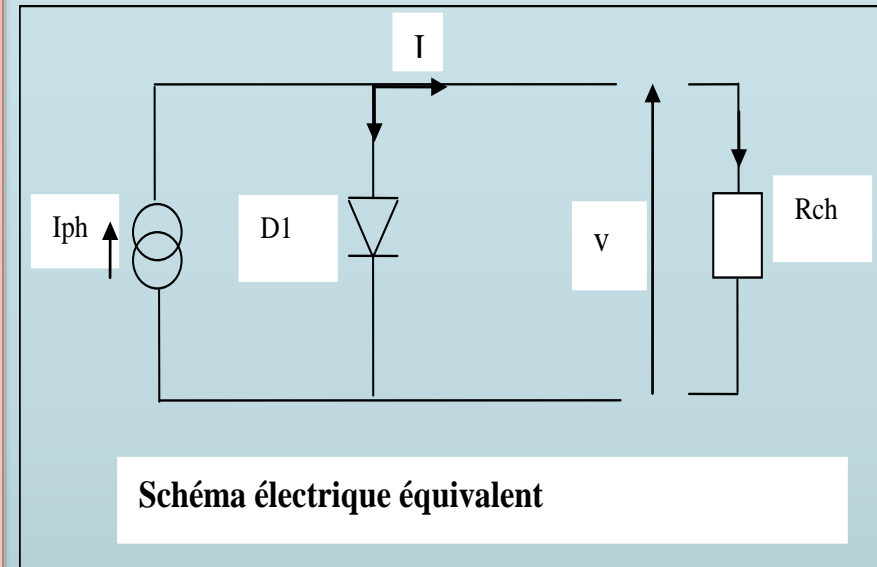
Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

Différents modèles

I. Le modèle idéal

- ▶ C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule photovoltaïque.
- ▶ Il ne tient compte que du phénomène de diffusion.
- ▶ Le circuit équivalent de ce modèle est représenté sur le schéma ci-contre

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp\left(\frac{qV}{kt}\right) - 1 \right)$$



Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

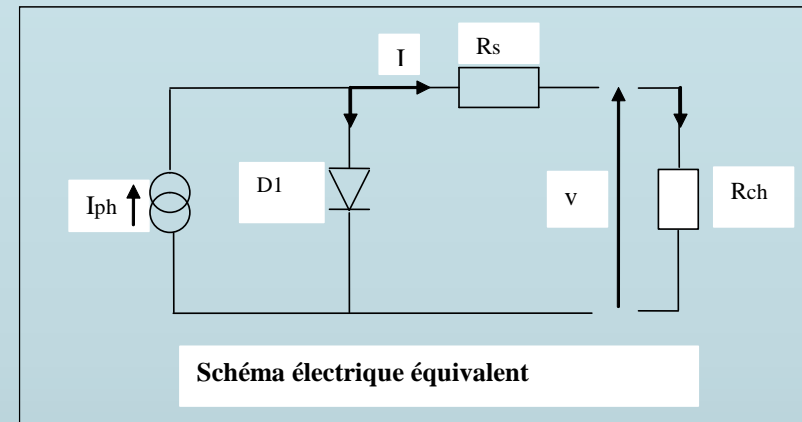
Différents modèles

2. Modèle tenant compte des pertes ohmiques

Le deuxième modèle, qui permet une bonne représentation du comportement électrique de la cellule, est celui qui tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues au contacts avant et arrière.

Ces pertes sont représentées par une résistance série « R_s » dans le circuit équivalent représenté ci-contre.

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp\left(\frac{q(v + R_s.I)}{nkt}\right) - 1 \right)$$



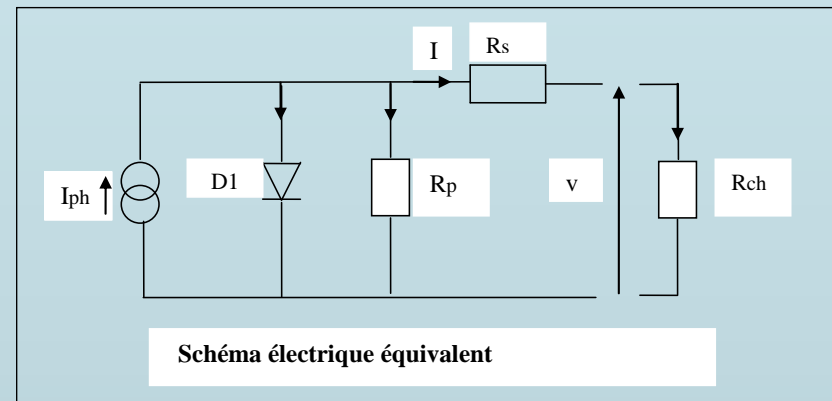
Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

Différents modèles

3. Modèle tenant compte des pertes ohmiques et du courant de fuite

On a représenté les effets du courant de fuite dans la cellule par une résistance parallèle « R_p ». Donc on devait soustraire au photocourant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension appliquée:

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left(\exp\left(\frac{q(v + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{(v + R_s I)}{R_p}$$



Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

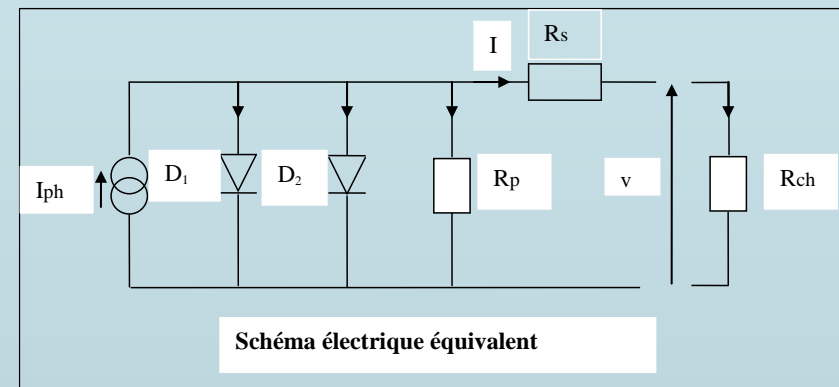
Différents modèles

4. modèle à deux diodes

Ce modèle, représenté par le circuit électrique équivalent ci-contre, est le modèle le plus proche du comportement réel de la cellule solaire.

Le modèle à deux diodes est régi par l'équation analytique suivante :

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left(\exp\left(\frac{q(v + R_s I)}{kt}\right) - 1 \right) - I_{02} \times \left(\exp\left(\frac{q(v + R_s I)}{nkt}\right) - 1 \right) - \frac{(v + R_s I)}{R_p}$$



Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

Effets des résistances Série et parallèle

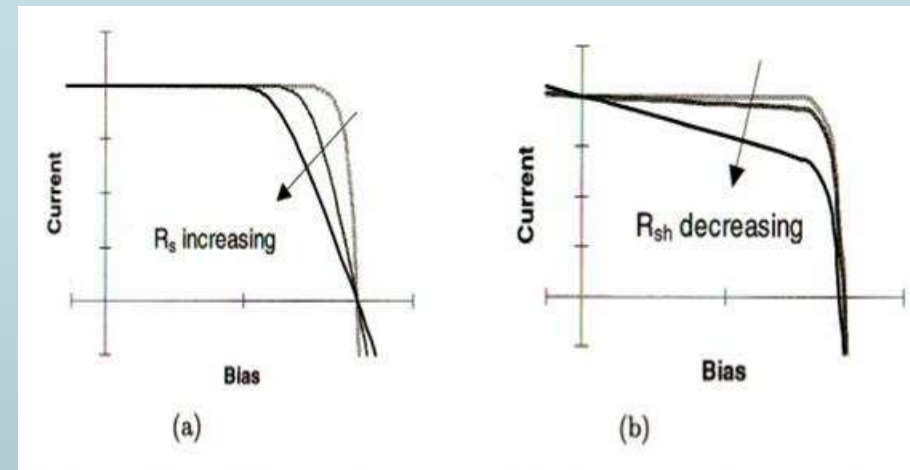
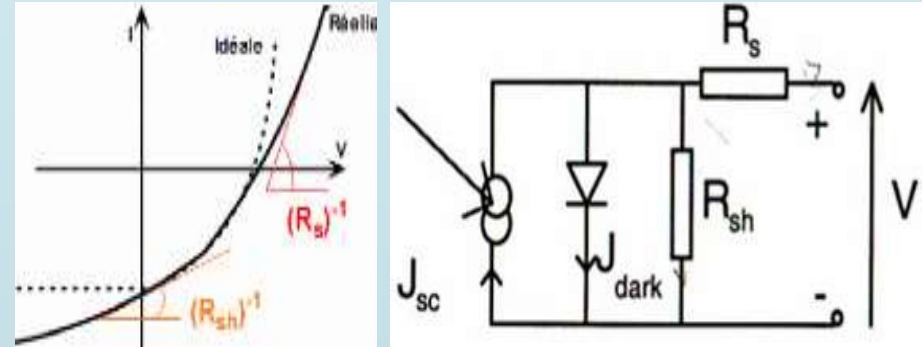
Détermination de R_s et R_{sh}

- R_s est l'inverse de la valeur de la pente de la caractéristique $I(V)$ au voisinage de V_{oc} .

- R_{sh} est l'inverse de la valeur de la pente de la caractéristique $I(V)$ au voisinage de I_{sc} .

-Quand $R_s \uparrow$, La caractéristique $I(V)$ s'aplatit du côté de V_{co} .

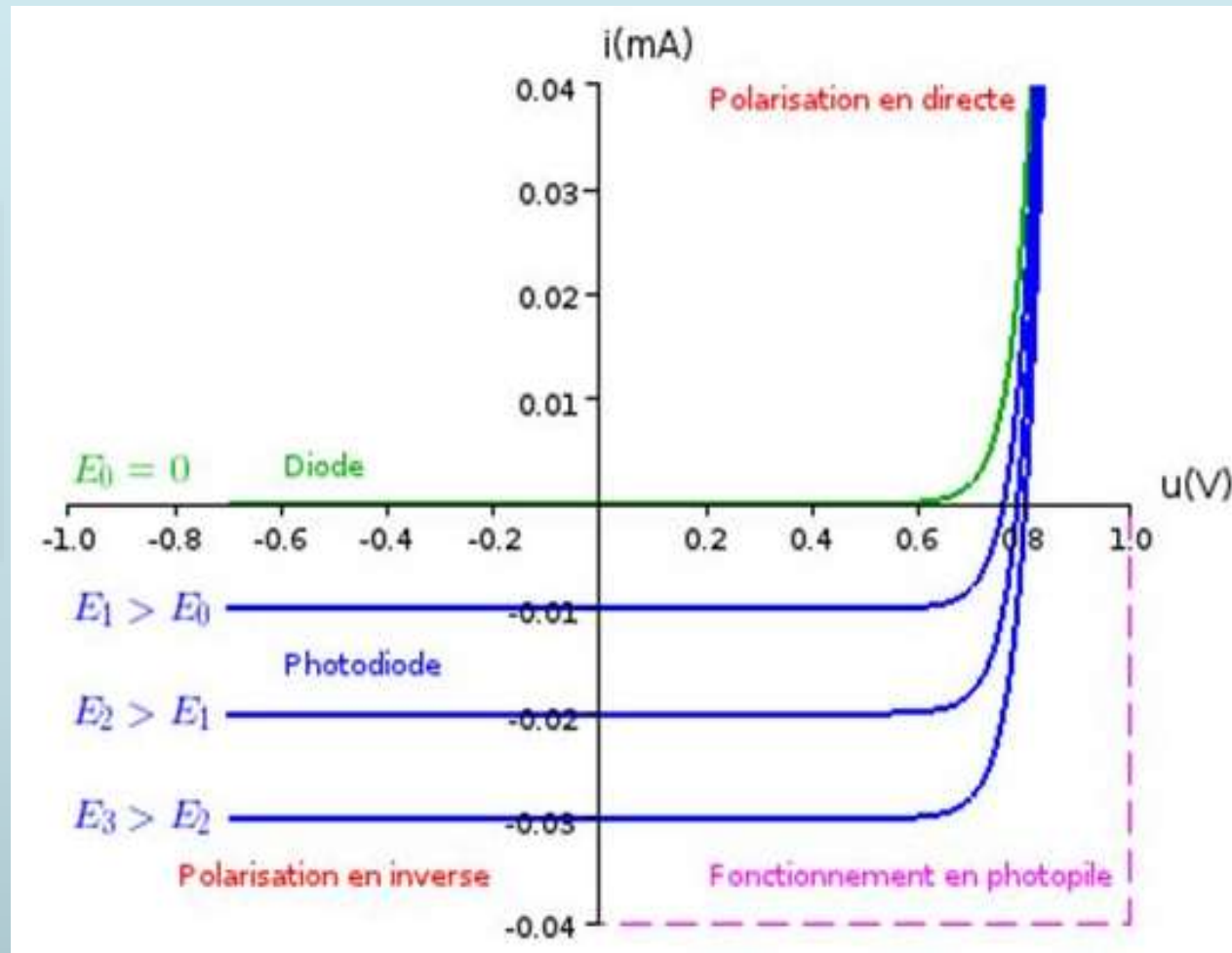
-Quand $R_{sh} \downarrow$, La caractéristique $I(V)$ s'aplatit du côté de I_{sc} .



Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

Effets de l'éclairement

Quand l'éclairement augmente, le courant de court circuit I_{sc} augmente, car le nombre de photons qui tombent sur la cellule augmente.

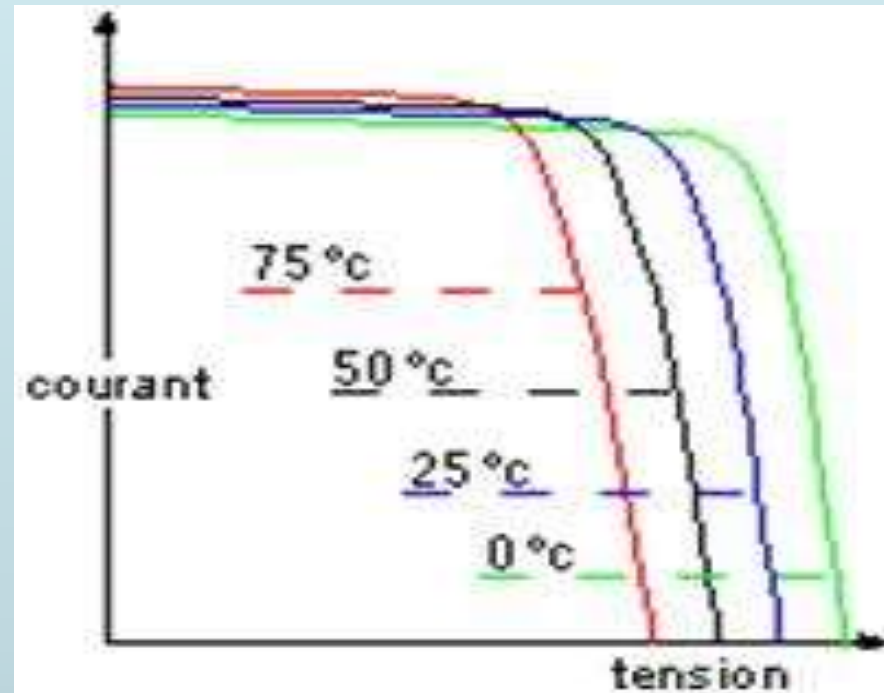


Cellule photovoltaïque à base d'une jonction pn

Effets de la température

Quand la température augmente, le courant de court circuit I_{sc} augmente alors que la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue .

Ce comportement s'explique par la diminution de la bande interdite du semi-conducteur lorsque la température augmente .



Cellule photovoltaïque

Sources de pertes

Les sources de pertes dans les cellules photovoltaïques sont:

- Absorption incomplète des photons
- Excès d'énergie
- Réflexion à la surface
- Recombinaisons électroniques
- Effets de piégeages
- Résistances séries
- Résistances parallèles

Cellule photovoltaïque à base de Silicium

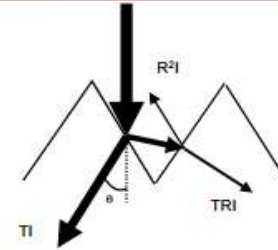
Quelques solutions aux pertes

I-Solution aux pertes par réflexion

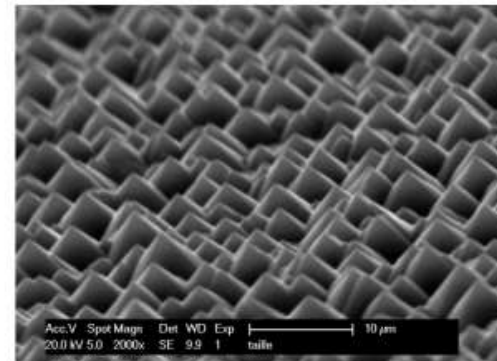
Pertes dans le silicium nu: 30 à 40 %;

Pour réduire les pertes par réflexion, on utilise une couche antireflet (ZnS , MgF_2 , Si_3N_4 , ...) et la texturation de la surface par l'une des méthodes suivantes:

- Texturation par voie humide
(KOH ou NaOH ou Acide),
- Texturation par gravure Plasma.



Texturation de surface: 10 à 20% de réflexion



Cellule photovoltaïque à base de Silicium

Quelques solutions aux pertes

2-Solution aux pertes par recombinaison à la surface

Ces pertes sont dues:

Concentration d'impuretés plus élevée

Liaisons pendantes (dangling bonds)

Solutions proposées:

Passivation des défauts de surface

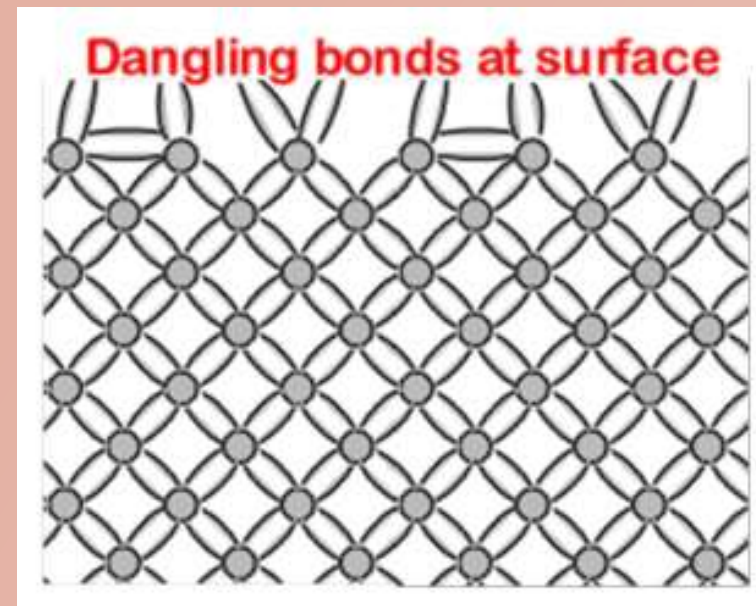
à l'aide d'une couche anti-reflet

(CAR) en utilisant SiN.

Remarque: La combinaison de

la texturisation et de la CAR

Fait passer les pertes de 41 % à 2.7%.



Cellule photovoltaïque à base de Silicium

Quelques solutions aux pertes

3-Solution aux pertes par recombinaison en volume

Ces pertes sont dues:

- Impuretés;
- Joints de grain pour le multicristallin;
- Recombinaison Auger.

Solutions proposées:

- Diffusion d'Hydrogène;
- Traitement haute température (effet getter);
- Création d'un « Back Surface Field » (BSF).

Cellule photovoltaïque à base de Silicium

Quelques solutions aux pertes

4-Solution aux pertes par recombinaison en face arrière

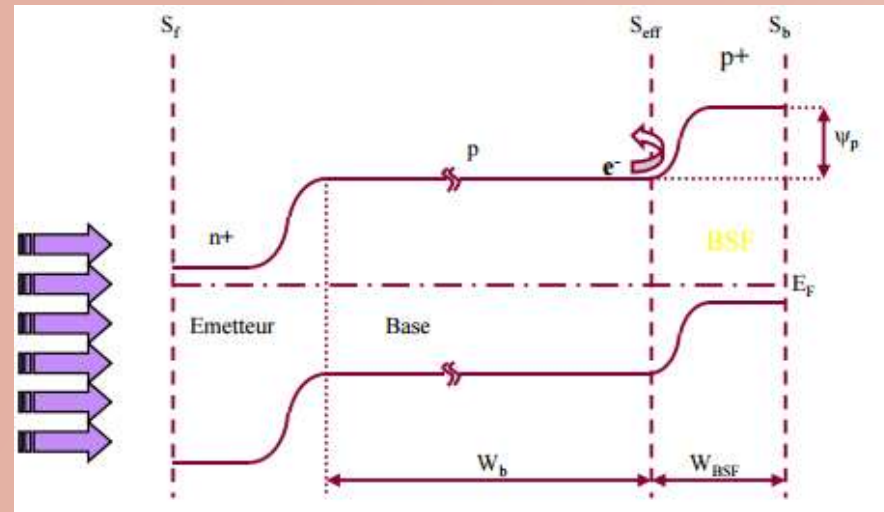
Solutions proposées:

Création d'un Back Surface Field (BSF) par:

- Technologie classique: recuit contacts Aluminium face arrière
- Technologie couches minces: dopage Bore (p^{++}) par diffusion thermique

Remarque: Les effets du BSF sont:

- Amélioration Réponse Spectrale
grandes λ
- Amélioration R_s



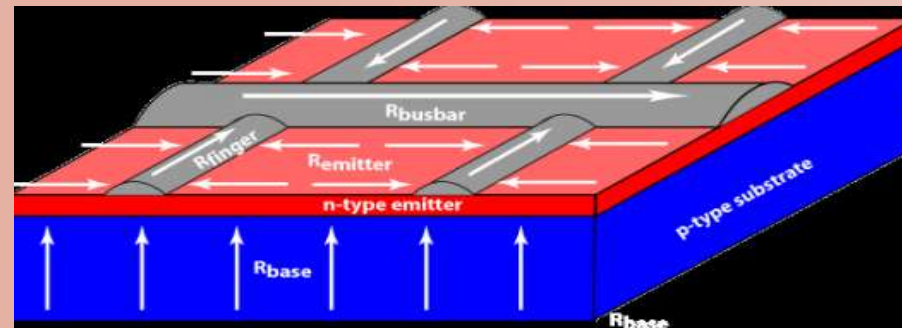
Cellule photovoltaïque à base de Silicium

Quelques solutions aux pertes

5-Solution aux pertes par résistance série

Ces pertes sont dues:

- Résistivité des matériaux;
- Résistivité des fils;
- Contact métal-semi-conducteur.




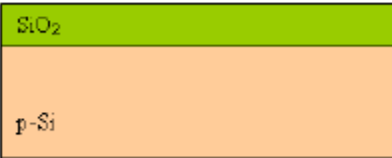
Solutions proposées:

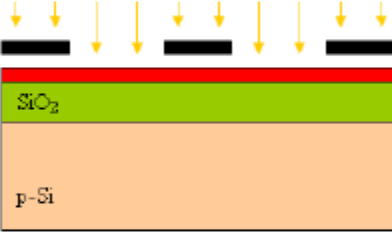
- Compromis entre une faible résistance série et une surface de contact la plus réduite possible (notion d'effet d'ombrage)

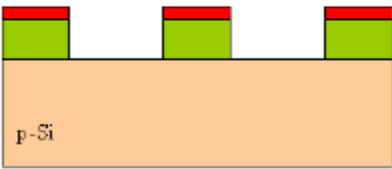
Etapes Technologiques de réalisation d'une Cellule interdigitée


Procédé 1 : Etapes technologiques de réalisation des cellules solaires interdigitées.

- 

1. Nettoyage de la plaque initiale : 20 secondes dans BE7 (HF dilué à 5%) → 15 minutes dans $H_2O_2+H_2SO_4$ (1 :1) → 20 secondes dans BE7.
- 

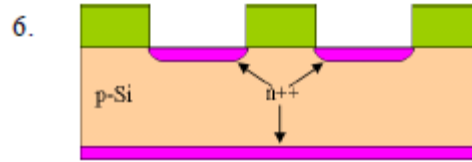
2. Formation d'une couche de SiO_2 épais ($0,6 \mu m$) par oxydation humide. Paramètres d'oxydation : 50 min à $1050^\circ C$ dans O_2 humide.
- 

3. Dépôt de résine positive sur l'oxyde et séchage (1 minute à $120^\circ C$) ; insolation de la résine via le premier masque (masque 1) qui sert à délimiter l'émetteur. Le temps d'insolation est de 35 secondes.
- 

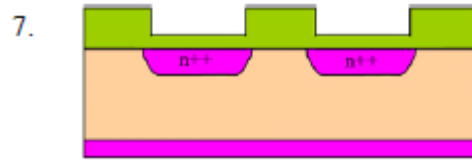
4. Développement de la résine insolée, durcissement de la résine (2 minutes à $120^\circ C$) ; ouverture de fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7 pendant 5-6 minutes (fin de gravure contrôlée par le mouillage de la surface).
- 

5. Gravure de la résine dans le remover. Le temps de gravure est de 10 minutes.

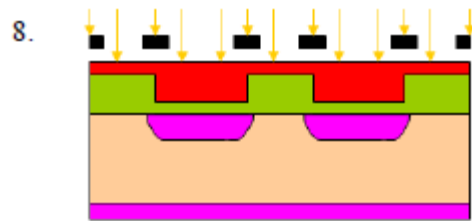
Etapas Technologiques de réalisation d'une Cellule interdigigée



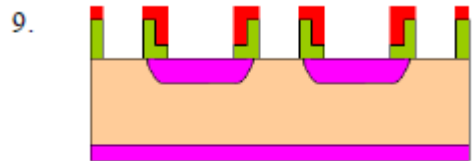
Création des zones n^{++} (peignes face arrière et émetteur flottant face avant) par diffusion de phosphore de POCl_3 à 950°C pendant 20 minutes.



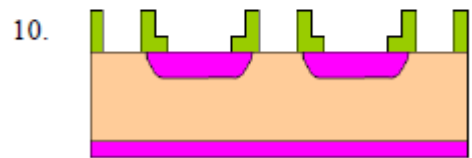
Redistribution à 1050°C pendant 60 minutes sous oxygène. Formation d'oxyde sec sur les zones n^{++} . Epaisseur de l'oxyde sec : $e_{\text{ox}} \sim 80\text{nm}$.



Dépôt de résine positive, séchage de la résine, alignement des motifs, insolation à travers le deuxième masque qui sert à délimiter les ouvertures de contact dans l'oxyde.

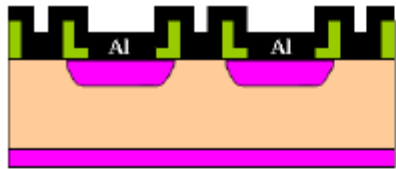
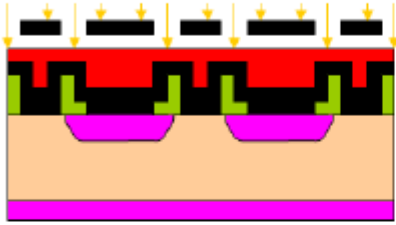

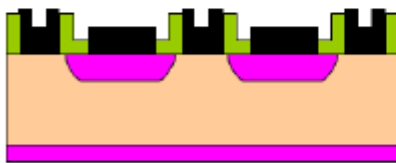
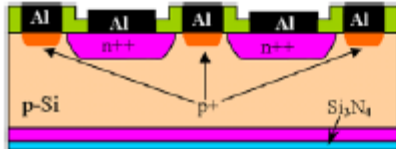


Développement de la résine insolée, durcissement de la résine; ouverture des fenêtres dans l'oxyde par gravure dans BE7 (temps de gravure : 5-6 minutes).



Enlèvement de la résine dans le remover. Le temps de gravure est de 10 minutes.

Etapes Technologiques de réalisation d'une Cellule interdigitée

11.  Dépôt d'aluminium pleine plaque par évaporation sous vide. L'épaisseur d'aluminium doit être de $1\ \mu\text{m}$ ou plus pour assurer une résistance série faible.
12.  Dépôt de la résine positive, séchage de la résine ; alignement des motifs, insolation de la résine via le masque 3 qui sert à délimiter les contacts.
13.  Développement de la résine insolée, durcissement de la résine.
14.  Gravure de l'aluminium (dans les zones non protégées par la résine) par une solution acide ; enlèvement de la résine dans le remover.
15.  Recuit (RTA) des contacts à 550°C pendant 30 secondes, formation d'une zone p+ ; dépôt d'une couche antireflet (Si_3N_4) par UV CVD.

Cellule, module, panneau et Générateurs photovoltaïques

Comparaison Cellule Photovoltaïque-Batterie

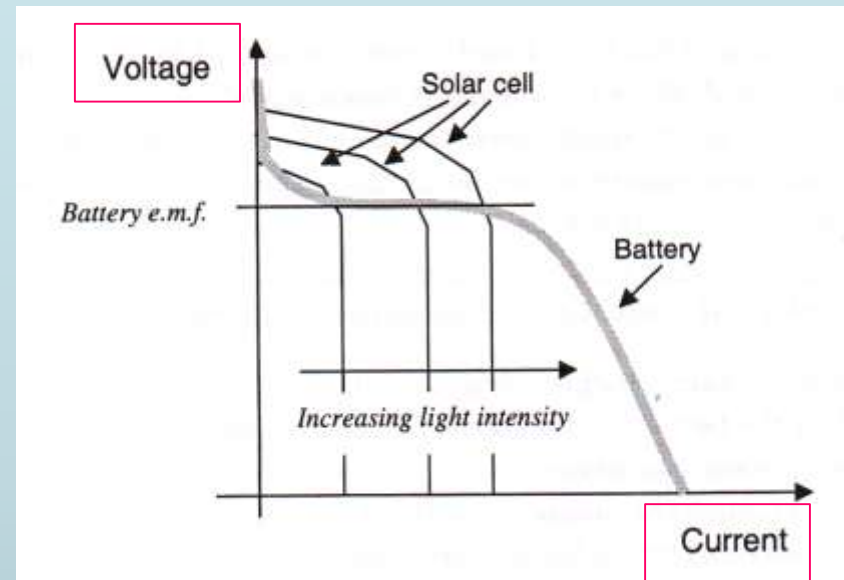
La batterie donne une tension constante sur une large gamme du courant

La cellule photovoltaïque donne un courant constant sur une large gamme de tension

Conclusion:

La batterie est considérée comme un générateur de tension

La cellule photovoltaïque est considérée comme un générateur de courant

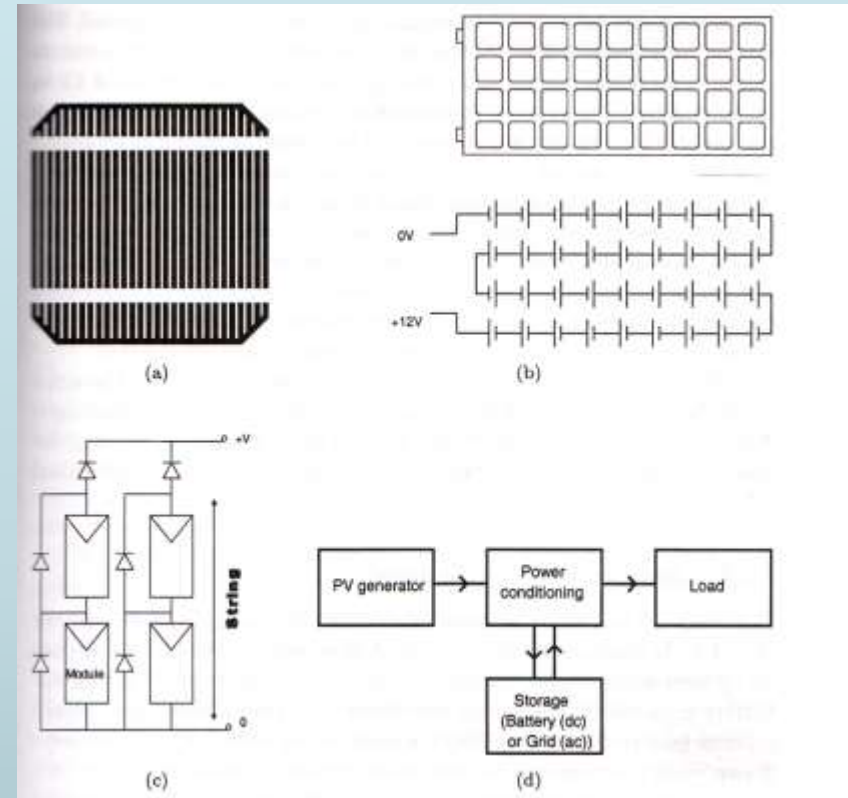


Cellule Module et Panneau Photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un dispositif d'une surface de 100 cm^2 qui génère une tension de 0.5 à 1 V et un courant de court circuit de quelques dizaines de milliampères.

Un module est l'association de cellules en série et en parallèle (28 à 36 cellules) pour générer une tension de l'ordre de 12V.

Un panneau photovoltaïque est l'association de plusieurs modules pour générer une puissance importante



Générateur photovoltaïque



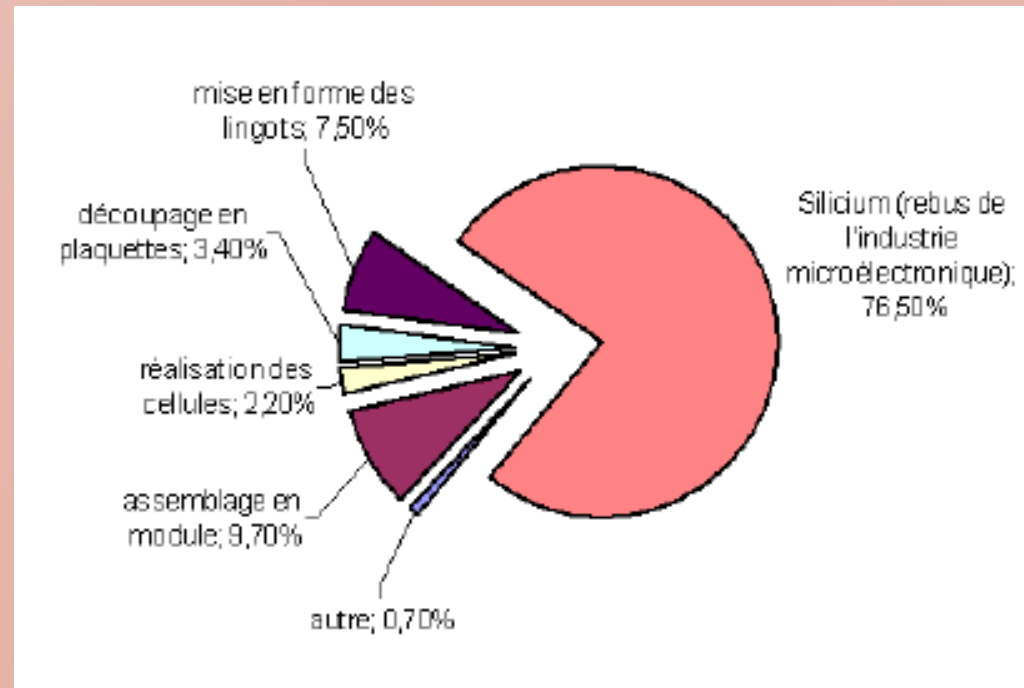
Un générateur photovoltaïque est l'association de plusieurs panneaux pour générer la puissance requise par une installation



Cellules Photovoltaïques

Aspect économique

Une idée sur la répartition du Prix du module photovoltaïque à base de Si-Polycristallin

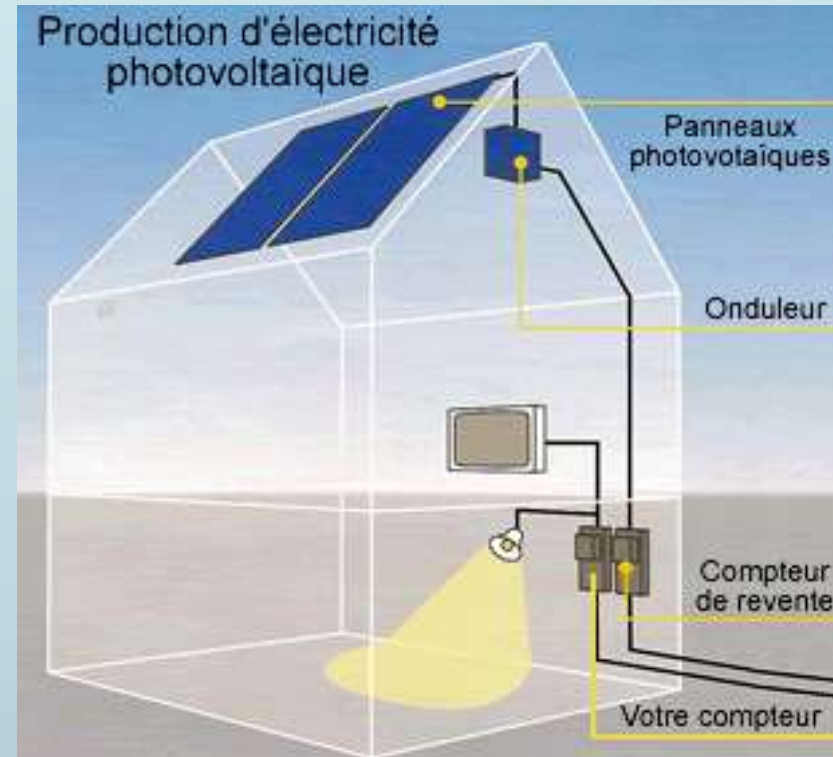


Quel est le prix pour l'électricité photovoltaïque?

le nombres de personnes habitant au sein du foyer concerné est important pour prévoir une quantité d'énergie suffisante.

Une personne correspond environ à 1 voire 1,50 m² de panneau solaire.

Le m² revient à peu près à 1000 euros en moyenne. (≈200 Wc)



Des résultats récents

Record mondial : une cellule photovoltaïque atteint 44,7% d'efficacité

Avec une nouvelle structure de cellule photovoltaïque à quatre jonctions, on a obtenu:

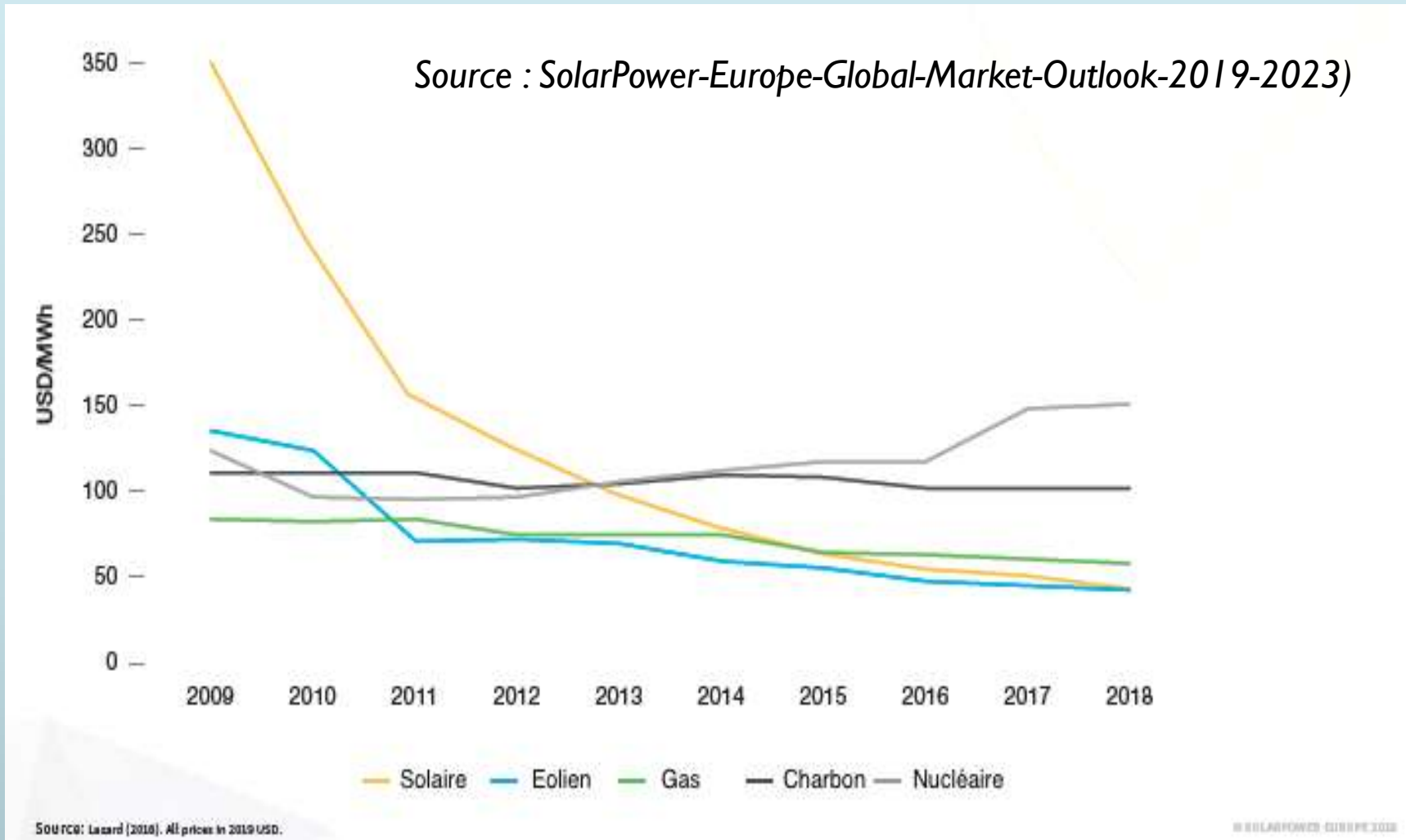
- ▶ En mai 2013, l'équipe germano-française du Fraunhofer ISE, de Soitec, du CEA-Leti et du Centre Helmholtz de Berlin avait déjà annoncé une cellule photovoltaïque avec un rendement de 43,6 %.
- ▶ Le 23 Septembre 2013, de nouveaux travaux intensifs de recherche et des étapes d'optimisation par la même équipe ont permis d'atteindre l'efficacité actuelle de 44,7%.

Evolution à l'échelle mondiale

Développement de l'énergie photovoltaïque

- Depuis 2002, l'énergie photovoltaïque augmente de $\approx 20\%$ par an;
- Production en 2006 était de 2,5 GW
- Depuis 2009, l'énergie photovoltaïque se développe de 7,7 GW/an
- En 2017, l'expansion de l'énergie photovoltaïque était de 70 GW/an;
- A la fin de 2017, la capacité d'installation était de 400 GW;
- L'industrie photovoltaïque à base de Si-Cristallin domine le marché;
- La part des couches minces est de l'ordre de 5%;
- En 2017, le prix du Wat photovoltaïque est de 0,35\$/W,

Evolution des prix des différentes énergies



Cellules Photovoltaïques

Feuille de route japonaise

Voici quelques objectifs que l'industrie japonaise s'est donnés :

Thème	Cible 2010	Cible 2020	Cible 2030
Coût de production	100 yen/watt	75 yen/watt	<50 yen/watt
Durée de vie	-	+30 ans	-
Consommation de matière première	-	-	1 g/watt
Coût du convertisseur	-	-	15 000 yen/kW
Coût de la batterie	-	10 yen/Wh	-
Efficacité cellule cristalline	20 %	25 %	25 %
Efficacité cellule couche mince	15 %	18 %	20 %
Efficacité cellule CIS	19 %	25 %	25 %
Efficacité cellule III-V	40 %	45 %	50 %
Efficacité cellule "Dye Sensitized"	10 %	15 %	18 %

Source Nedo (Japon), 134.62 yen = 1 €, août 2009

Perspectives pour le 21^{ème} siècle

L'énergie solaire devrait contribuer

- à plus de 10% de la demande mondiale d'énergie d'ici 2030

L'énergie solaire devrait fournir

- 20% de l'électricité mondiale d'ici 2040.

D'ici la fin du 21^{ème} siècle, l'énergie solaire représentera

- plus de 60% de l'alimentation électrique globale



شظرا لكم
على
اهتمامكم

**POUR PROTÉGER L'AVENIR DE NOTRE PLANÈTE
UTILISONS L'ÉNERGIE SOLAIRE**



Merci pour votre attention

Bibliographie

Livres

- ▶ **Jenny Nelson**, "The physics of Solar cells", Imperial college Pres, 2005
- ▶ **S.M. Sze**, "Physics of semiconductors devices", Chapter 14: solar cells, pp. 790-830, John Wiley & sons, 1981
- ▶ **Jef Poortmans and Vladimir Arkhipov**, "Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications", John Wiley & Sons, 2006

Thèses

- ▶ **Nichiporuk Oleksiy**, Thèse de doctorat, "simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter-digités, , N°2005 ISAL0028, INSA de Lyon, 03/05/2005
- ▶ **Benoit Brousse**, Thèse de doctorat, "Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques obtenus par dépôt physiques, N° 54-2004, UNIVERSITE DE LIMOGES, 15/12/2004

Cours

Anne Kaminski, Mathieu Monville, « Énergie Photovoltaïque »
INP Grenoble - INSA Lyon et Solarforce, septembre 2010