



Energie Solaire Photovoltaïque Perspectives et défis



Lieu et date de la présentation

**Université Tahri Mohamed
Béchar**

Faculté des Sciences Exactes

14-15 Décembre 2021

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Director of Advanced Electronics Laboratory

Head of Clean room

Department of Electronics

Faculty of Technology

University of Batna 2

Rue Chahid Boukhrouf Mohamed El Hadi

05000 Batna ,Algeria

e-mail:

a.benhaya@univ-batna2.dz

benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

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

**1st National Conference
on Photovoltaic Materials
and Devices 21**

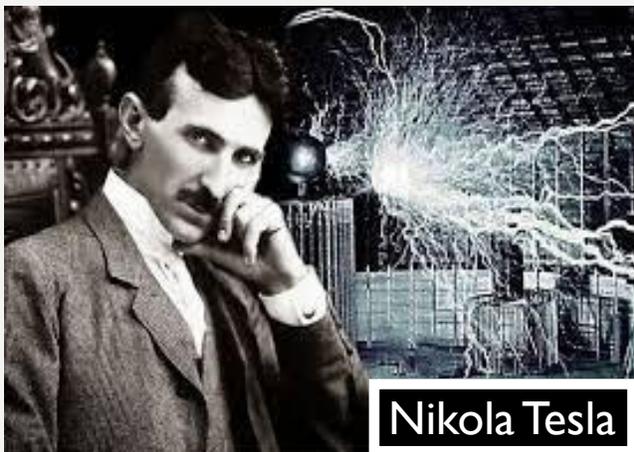


Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis



وَجَعَلَ الْقَمَرَ فِيهِنَّ نُورًا وَجَعَلَ الشَّمْسَ سِرَاجًا ﴿١٦﴾ نوح



Nikola Tesla

Si Vous voulez trouver les secrets de l'univers, pensez en termes d'énergie, de fréquence, d'information et de vibration

PLAN DE L'EXPOSÉ

- **Aspects généraux**
- **Architecture de base des cellules**
- **Architectures améliorées**
- **Matériaux photovoltaïques et propriétés requises**
- **Paramètres électriques des cellules photovoltaïques**
- **Défis de la conversion photovoltaïque**
- **Progrès**
- **Evolution et perspectives**
- **Conclusion**

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

1. ASPECTS GÉNÉRAUX

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Types d'énergie en termes de durabilité.

Energies non renouvelables

Il y a 1^èrement

Une baisse permanente
des réserves

Et 2^èment

La pollution

Energies renouvelables

Elles sont:

- Durables;
- Sans pollution;
- Abondantes.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis



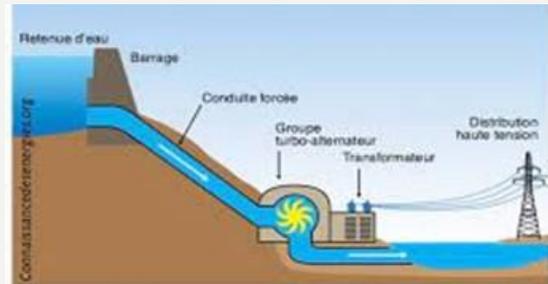
Energies non renouvelables

- Charbon**
- Pétrole**
- Gaz naturel**
- Uranium**



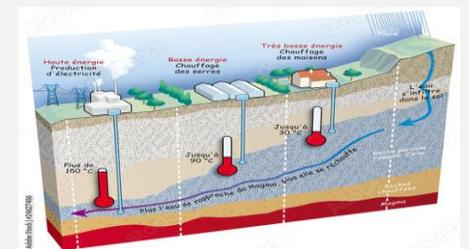
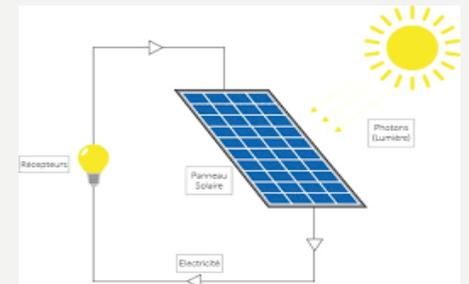
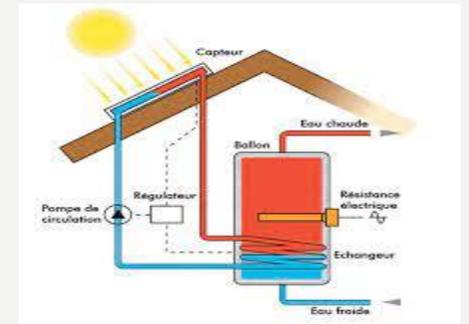
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis



Energies renouvelables

- ☐ **Solaire (thermique et photovoltaïque)**
- ☐ **Eolienne (énergie cinétique du vent)**
- ☐ **Energie Hydraulique (énergie cinétique de l'eau)**
- ☐ **Biomasse (Bois, biogaz, biocarburant)**
- ☐ **Géothermie (chaleur émise par la Terre)**



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

C'est quoi l'énergie solaire photovoltaïque?

L'énergie **solaire photovoltaïque** provient de la **conversion de la lumière du soleil** en **électricité** au sein de **matériaux semi-conducteurs** comme le silicium, matière première **des panneaux solaires photovoltaïques**.

Quelle est la signification du mot photovoltaïque ?

- Le terme photovoltaïque est composé des mots:
 - **Photo = lumière,**
 - **Volt = unité de tension électrique.**

C'est le terme utilisé pour désigner **l'électricité** produite à partir de **l'énergie solaire**.

Autrement dit:

Photovoltaïque signifie que **l'énergie solaire, la lumière (photons)**, est transformée en **tension électrique**.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

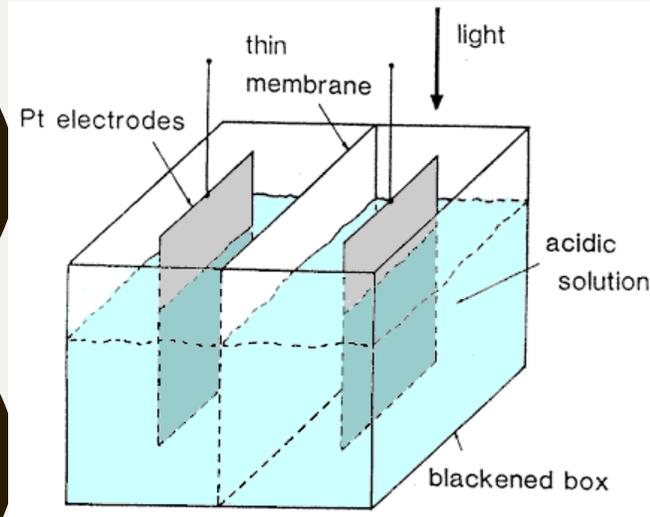
Historique du photovoltaïque

- ❑ 1839 Becquerel découvrit l'effet photovoltaïque;
- ❑ Fritts (1883) et Grondahl (1930-32), proposèrent les premiers dispositifs photovoltaïques;
- ❑ En 1954, Chapin, Fuller et Pearson, mirent au point une première cellule photovoltaïque (jonction pn à base de silicium cristallin) avec un rendement de conversion de l'ordre de 6 %.
- ❑ Les premières applications ont vu le jour dans les années 1960 avec l'utilisation des panneaux solaires pour les satellites spatiaux.

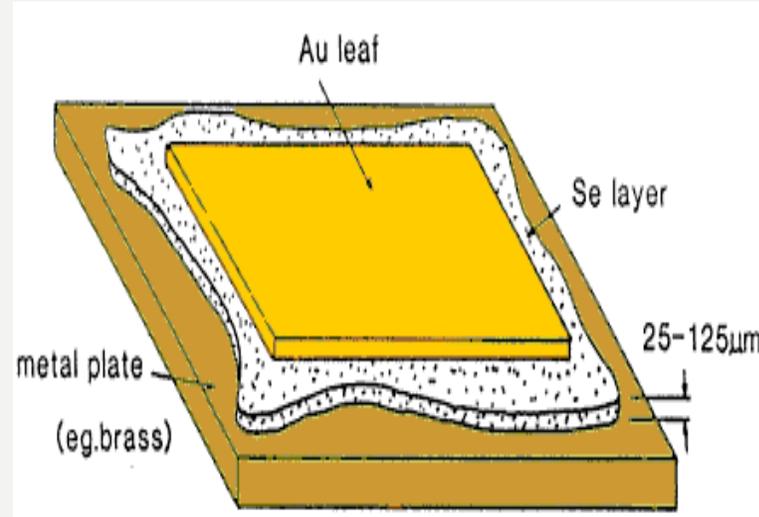
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

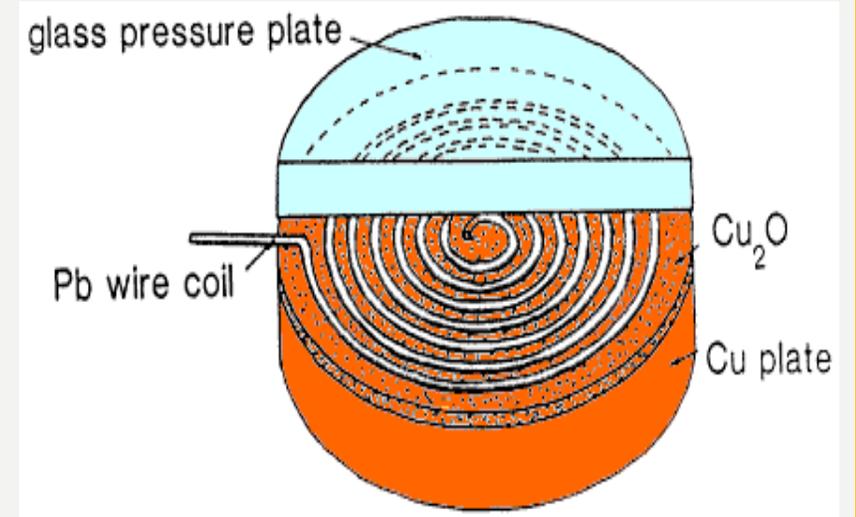
Tout au début



Becquerel 1839



Fritts 1883



Grondahl 1930-32

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Aperçu sur les différentes périodes du marché solaire photovoltaïque mondial

1^{ère} période 1954-1973: Naissance de la **1^{ère} cellule solaire** aux **Bell Labs** avec un **rendement de 6%**;

2^{ème} période 1973-1980: **1^{ère} crise pétrolière mondiale** et naissance du ” **Sunshine Plan**” au Japon et **déblocage de crédits importants** aux **USA** et d'autres pays développés au profit de la **R&D** dans le domaine **l'énergie solaire**;

3^{ème} période 1980-1992: Vu la **chute** vertigineuse des **prix du pétrole**, le **faible rendement** des cellules solaires et leur **prix de revient élevé**, l'USA et autre pays ont **réduit le financement** de la recherche sur l'énergie solaire;

4^{ème} période 1992-2000: Suite à la Conférence des Nations Unies sur **l'Environnement et le Développement (UNCED)**, les gouvernements du monde entier ont annoncé des politiques de soutien dans le développement de **technologies d'énergie propre**;

5^{ème} période 2000 – présent : L'industrie solaire est entrée dans une **nouvelle ère** avec un développement vigoureux et une **croissance rapide** de sa capacité de production.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Motivation pour les énergies renouvelables

☐ Pollution

Concentration de **CO₂** en **2021** dans l'atmosphère (**421,36 ppm**)

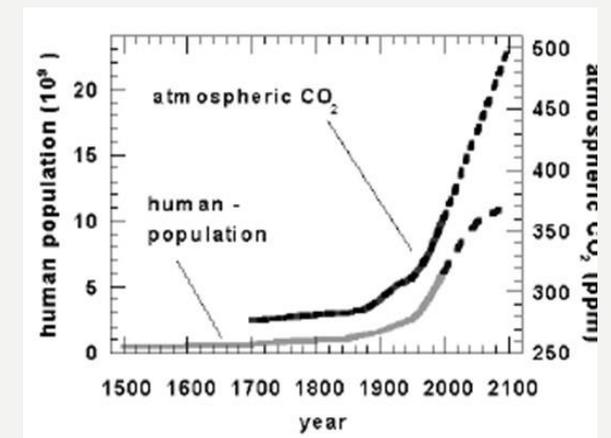
- Chine avec 9,8 milliards de tonnes de **CO₂**;
- États-Unis avec 4,9 milliards de tonnes de **CO₂**;
- Inde avec 2,4 milliards de tonnes de **CO₂**,

☐ Montée de la température

- **0.3-0.6°C** depuis la fin du **19^{ème}** siècle

☐ Montée de la mer

10-25 cm



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Origine de l'énergie solaire

Réaction thermonucléaire

Pendant chaque seconde:

$6 \cdot 10^{11}$ kg d'Hydrogène sont convertis en **Helium**

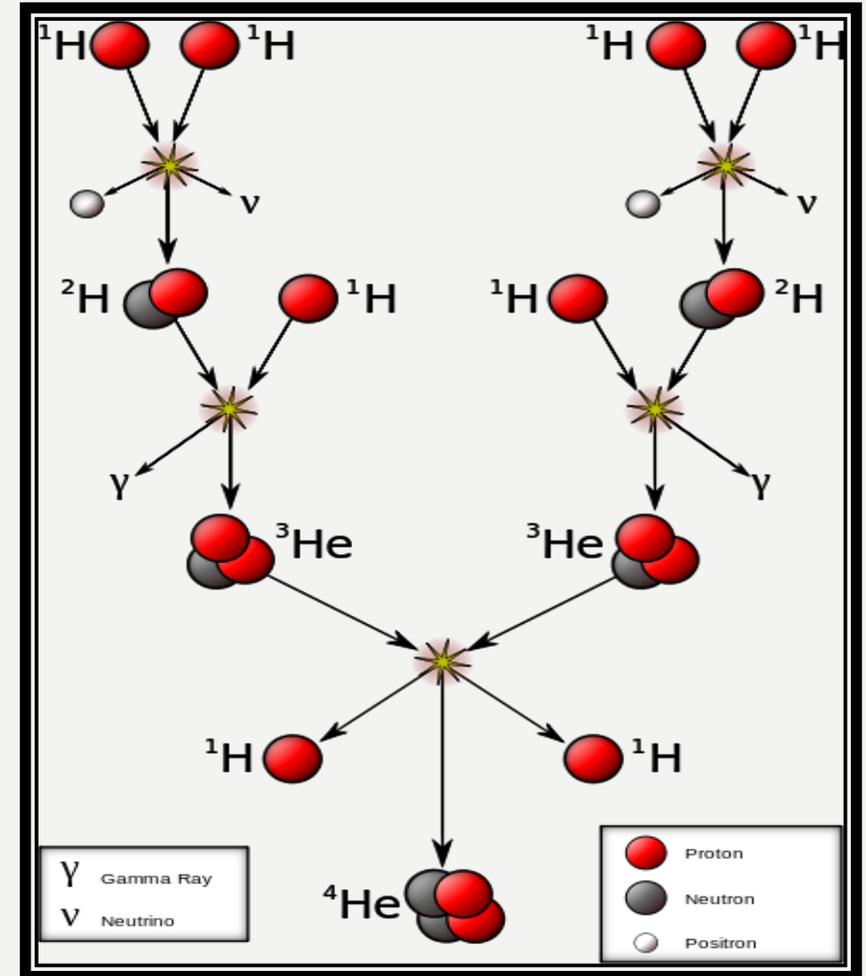


Avec une perte de masse de:

$$\Delta m = 4 \cdot 10^3 \text{ kg /s}$$

Donc une énergie:

$$E = \Delta m c^2 \approx 4 \cdot 10^{20} \text{ J}$$



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Avantages de l'énergie solaire

- Gratuite,
- Propre,
- Abondante
- Inépuisable à l'échelle du temps humain.

Atouts

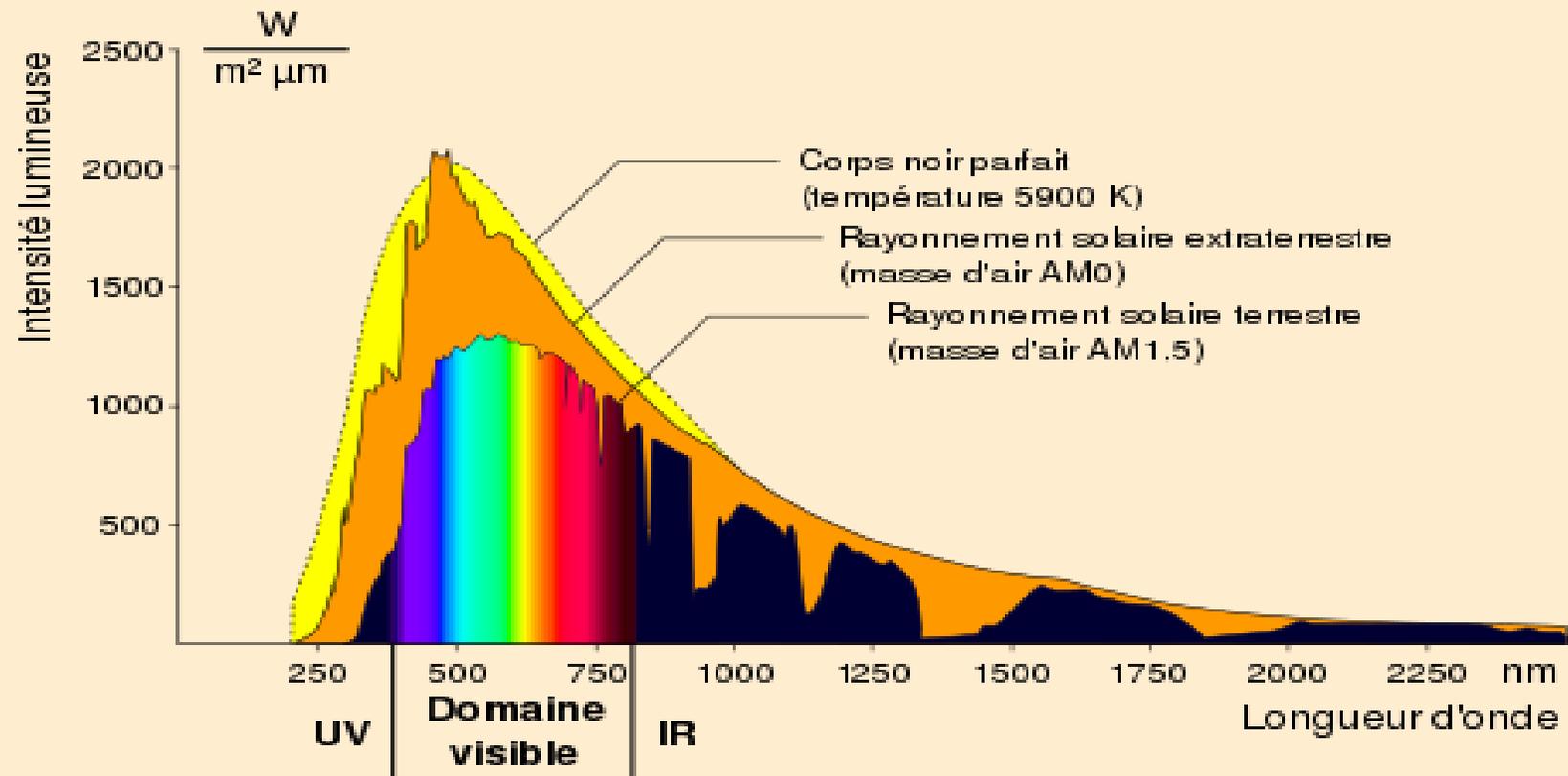
- A **chaque heure**, environ **14 TW** de rayonnement solaire atteignent la surface de la terre (l'équivalent de la **consommation énergétique mondiale en une année**).
- L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a calculé qu'une **surface de 147 000 km²** serait suffisante pour couvrir **la totalité des besoins énergétiques de la planète**.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

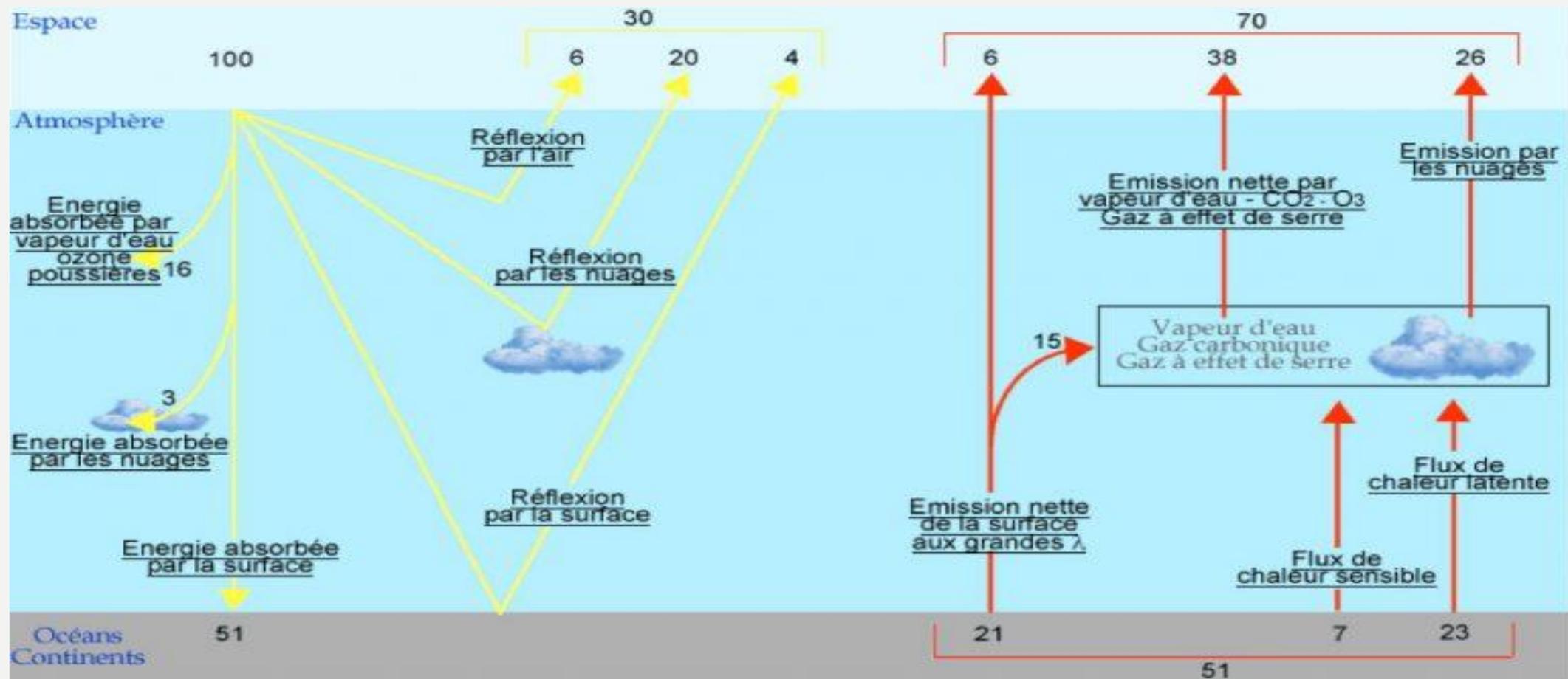
Le spectre solaire



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Modes et bilan d'interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère et avec la surface de la terre



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Notion d'air mass

Pour comparer et unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, on a institué la notion d'air mass:

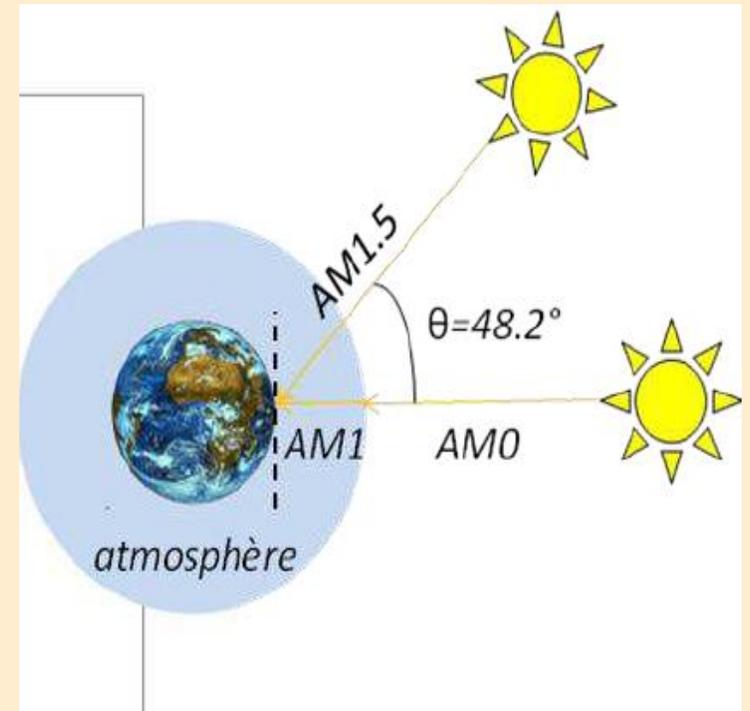
$$AM = \frac{e^{-\frac{z}{7.8}}}{\cos(\theta)}$$

AM₀ → hors atmosphère ($z \rightarrow \infty$): 1353 W/m²

AM1 → Soleil au zénith ($\theta=0$): 925 W/m²

AM1.5 → $\theta \approx \pi/4$ (48,2 °): 844 W/m²

AM2 → $\theta=\pi/3$: 691 W/m²



Energie Solaire Photovoltaïque

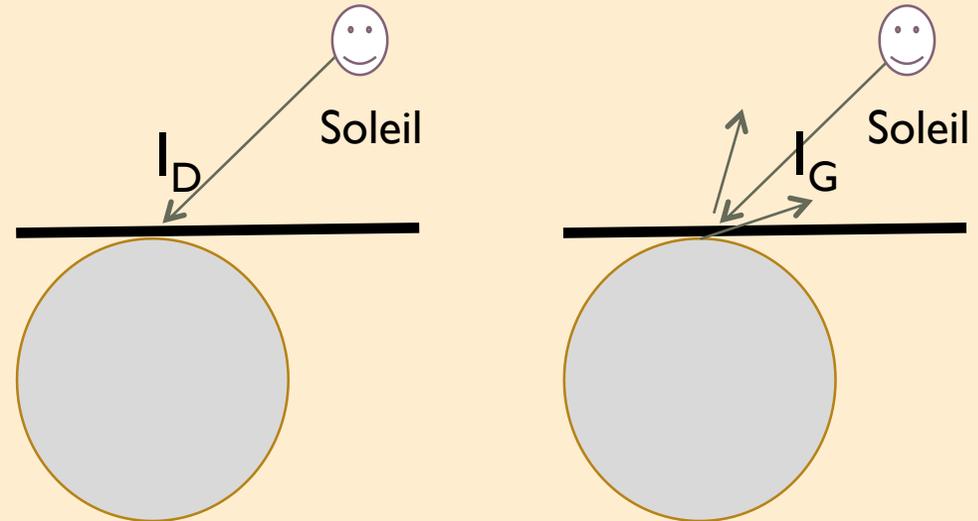
Perspectives et défis

Rayonnement direct et rayonnement global

Il faut faire la différence entre l'**air mass global** qui tient compte à la fois des radiations directes et diffuses et l'**air mass direct** qui ne tient compte que des radiations directes.

AM1.5 D → **844 W/m²**

AM 1.5 G → **970 W/m²**
≈ 1000 W/m²



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Données pour quelques pays

Important de le savoir

La **quantité totale** d'énergie solaire reçue au **niveau du sol** pendant **une semaine** > l'énergie produite **par** les **réserves mondiales** de **charbon**, de **pétrole**, de **gaz** et d'**uranium**.

Les ensoleillements moyens sur l'année sont:

- **Nord Australie et au Botswana** $\approx 7 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- **Algérie** $\approx 5.6 \text{ (Hauts plateaux) à } 6.5 \text{ (Sud) kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- **Espagne** $\approx 3 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$
- **Sud Suède** $< 1 \text{ kWh/m}^2 \text{ /jour}$

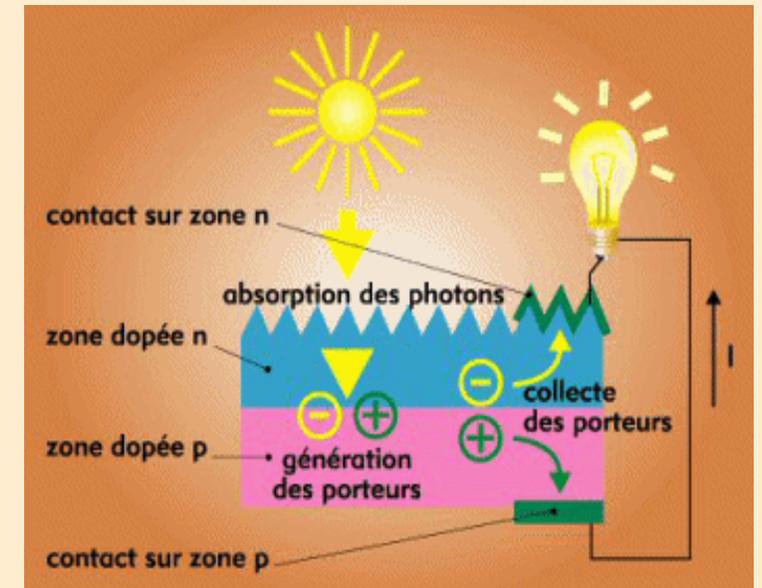
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Conversion photovoltaïque

Les 4 étapes de la conversion photovoltaïque

- **Absorption de photons** par un matériau semi-conducteur;
- **Formation des paires** électron-trou;
- **Dissociation des paires** électron-trous via la jonction (inorganique) ou via les interfaces (organique);
- **Circulation des porteurs** dans la charge;



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Effet du rayonnement solaire sur l'environnement

Le réchauffement induit par l'absorption du rayonnement au sol ou dans l'atmosphère conduit à:

- ❑ **Evaporation de l'eau** puis **re-condensation**, ce qui crée les nuages et **la pluie**;
- ❑ Création des **anticyclones** et des **dépressions** par **mouvements de l'air** liés aux différences de température d'un lieu à l'autre;
- ❑ **Emission de l'énergie absorbée** par le sol dans **l'espace** sous forme de rayonnement infrarouge.

Conclusion

Les énergies renouvelables **hydraulique**, **éolienne** et **biomasse** résultent de ces interactions du rayonnement avec l'atmosphère par:

- **Élévation des masses d'eau** (énergie hydraulique);
- **Mouvement des masses d'air** (énergie éolienne);
- **Conversion directe** du rayonnement en **énergie chimique** en transformant le **CO₂ atmosphérique** en matériau organique (Biomasse).

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Différentes générations des cellules solaires

1^{ère} génération (massif)

Matériaux: Cellules cristallines à base de Si-Mono et Si-Poly;

Avantages

- Rendement important $\approx 20\%$;
- Durée de vie de l'ordre de 35 ans

Inconvénients:

- Coût élevé;
- Rendement plus **faible** sous **éclairage réduit**.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Différentes générations des cellules solaires

2^{ème} génération (Couches minces)

Matériaux: Si-amorphe, matériaux organiques

Avantages

- Plus fines et moins coûteuses;
- Moins polluantes à la fabrication et fonctionnent avec un éclairage faible;
- Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température;
- Possibilité de créer des panneaux souples qui sont plus faciles à installer.

Inconvénients:

- Diminution croissante de la performance de la cellule;
- Rendement faible.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Différentes générations des cellules solaires

3^{ème} génération (plus souples, ultrafines)

Matériaux: Matériaux organiques, matériaux composés 'multi-jonctions)

Avantages

- Forte absorption optique;
 - Des substrats variés;
 - Des techniques de dépose assez simples.
 - Rendement record (40 à 50%)
- ⇒ Cellules organiques
- ⇒ Cellules multi-jonctions

Inconvénients:

- Rendement et longévité faibles ⇒ Cellules organiques;
- Coût de fabrication élevé (nécessitent l'utilisation de métaux rares) ⇒ Cellules multi-jonctions

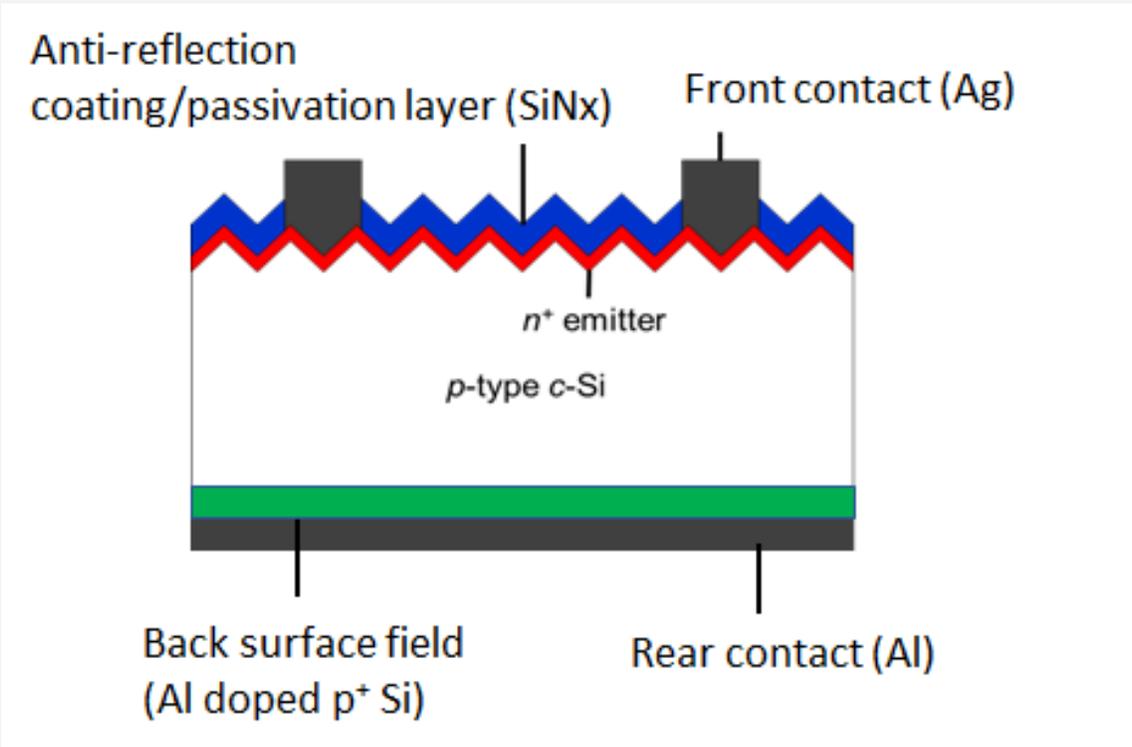
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

2. ARCHITECTURES DE BASE DES CELLULES

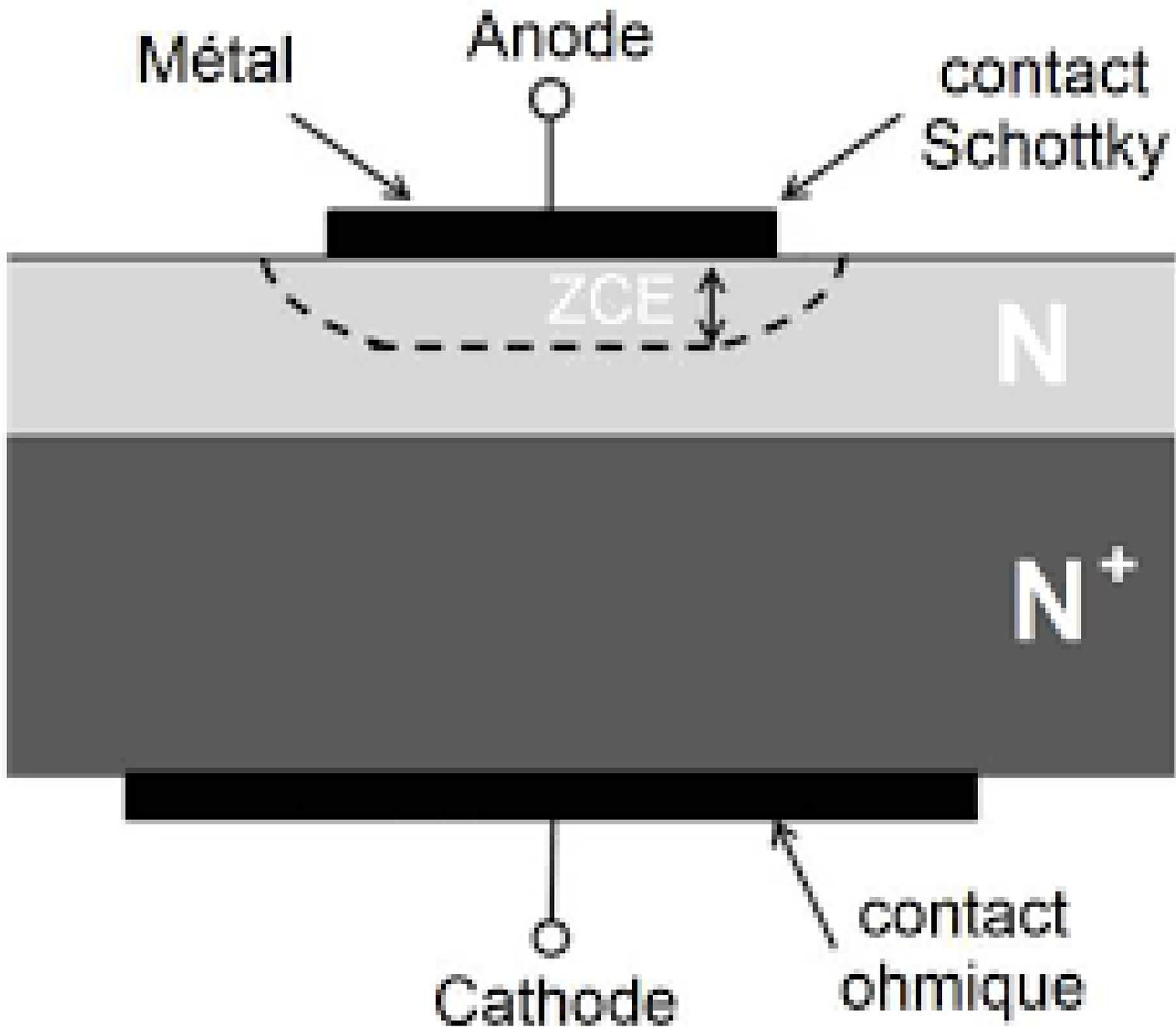
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis



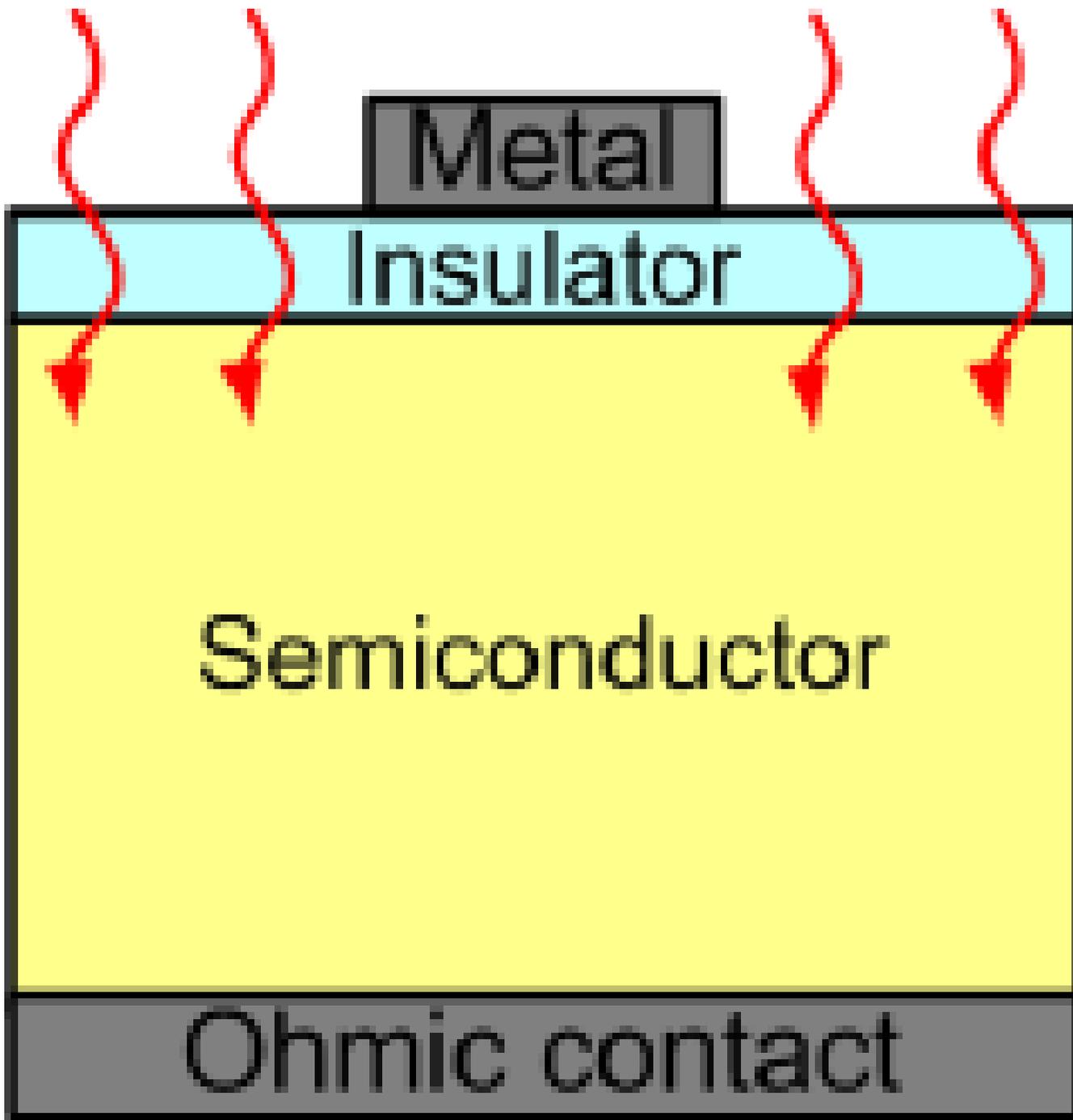
1^{ÈRE} ARCHITECTURE

La 1^{ère} architecture du capteur utilisé pour convertir le rayonnement solaire en électricité est la jonction pn



2^{ÈME} ARCHITECTURE

La 2^{ème} architecture du capteur utilisé pour convertir le rayonnement solaire en électricité est la structure Schottky



3^{ÈME} ARCHITECTURE

La 3^{ème} architecture du capteur utilisé pour convertir le rayonnement solaire en électricité est la structure MIS

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

3.ARCHITECTURES AMÉLIORÉES

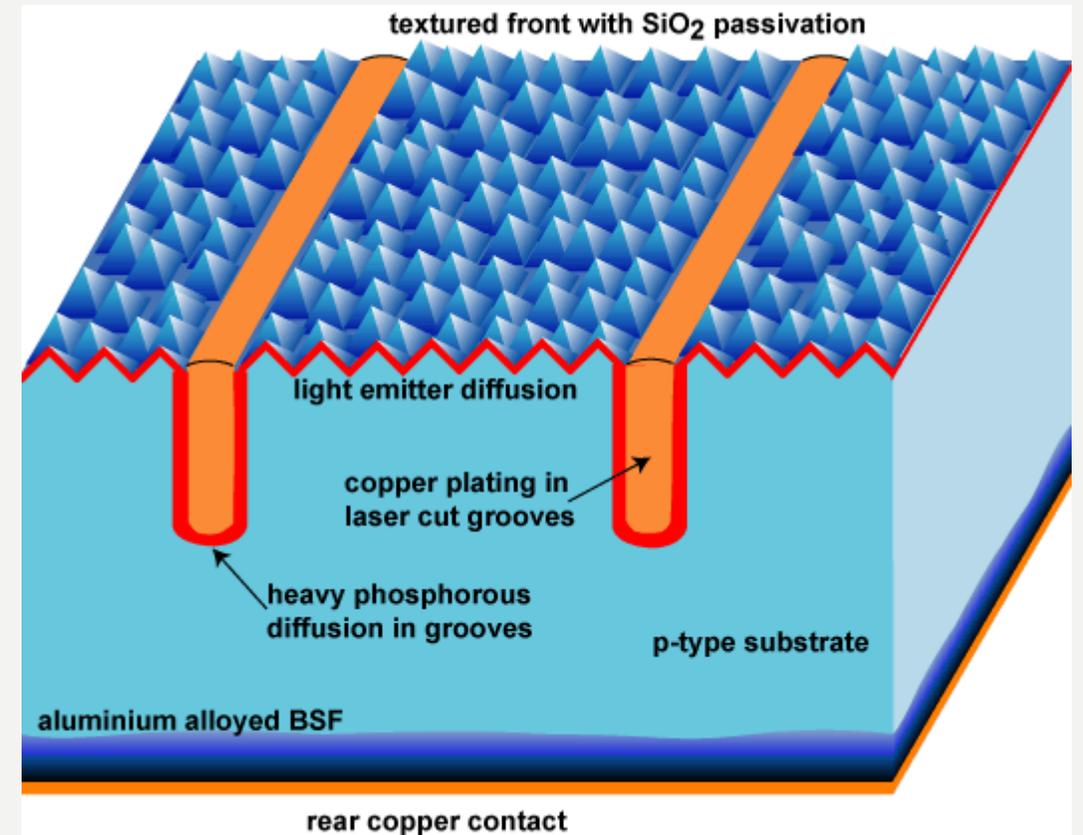
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Buried Contact Solar Cell

Avantages

- Grand rapport hauteur/largeur du métal
- Pertes d'ombrage qui vont jusqu'à 10 à 15 %
descendent à 2 à 3% ⇒ Réflexion ↓ et I_{CC} ↑

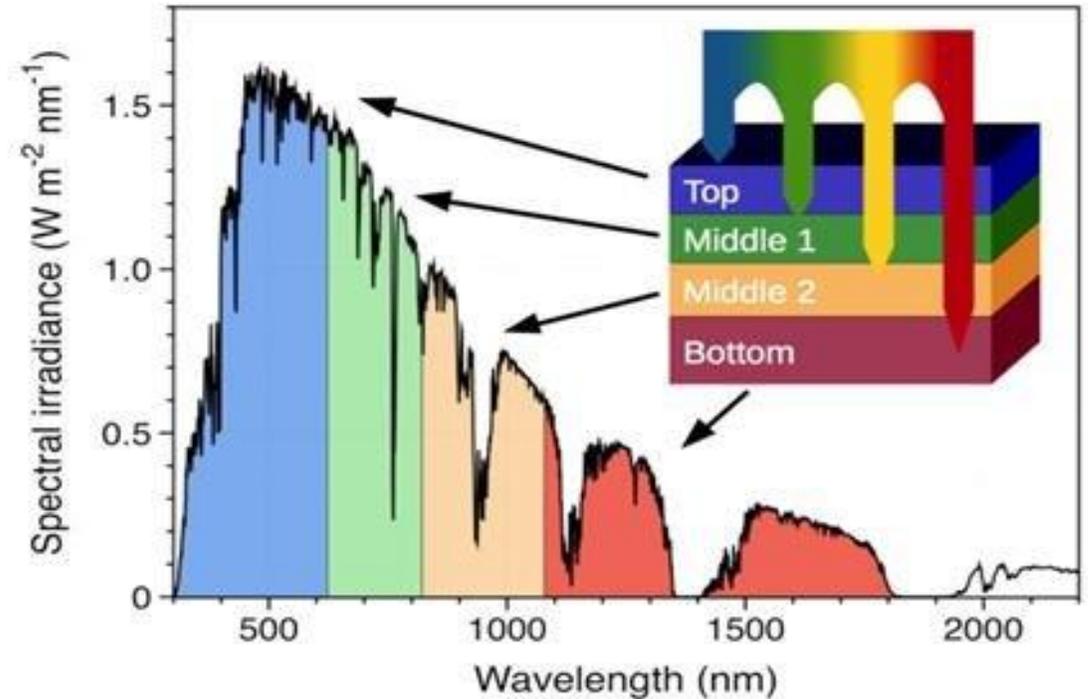


Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Mlti-junction Solar Cell (Triple Junction)

L'avantage des cellules solaires tandem est qu'elles **exploitent mieux** la lumière du soleil grâce à une **association** adéquate de **plusieurs cellule en série**

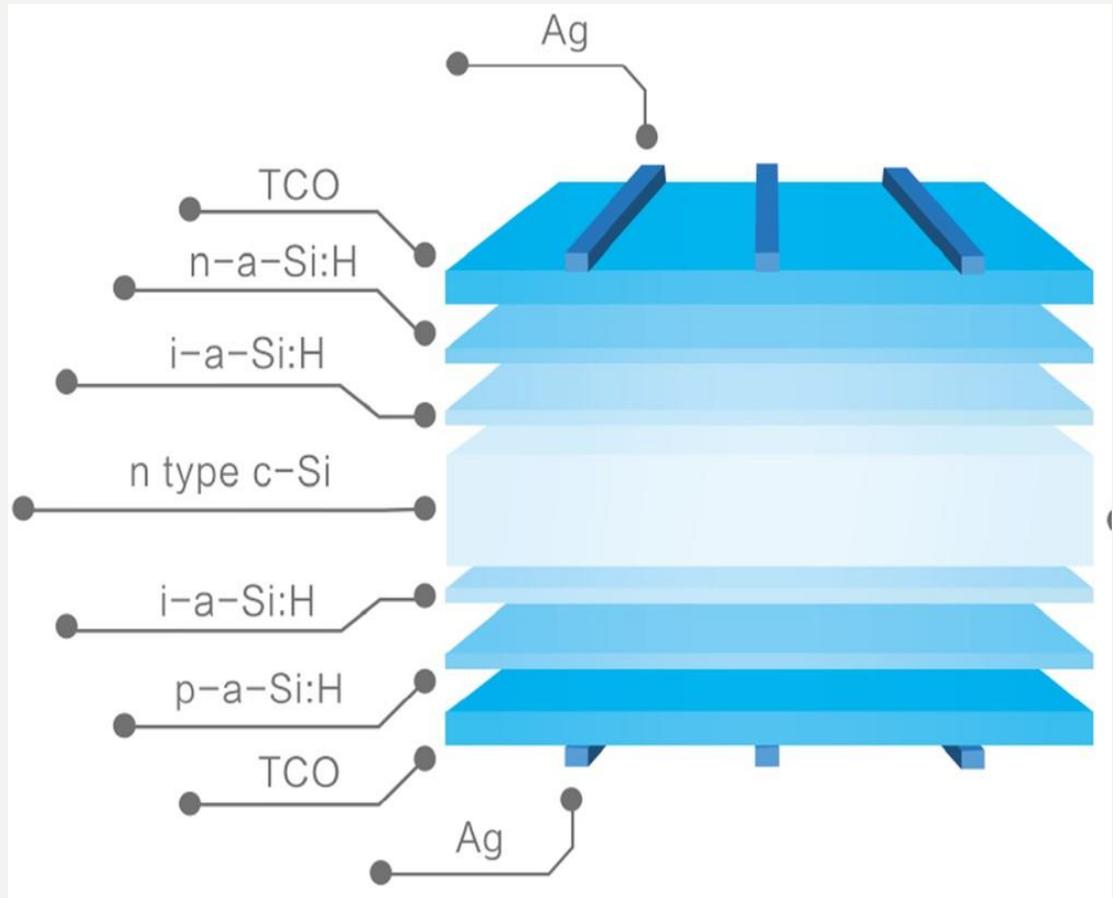


Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

HJT Solar Cell (heterojunction technology solar cell)

1. Rendement plus **élevé** (24.4%)
2. Meilleure **bifacialité** HJT (conçu pour être bifaciale)
3. Potentiel de production à **faible coût**, car nombre d'étapes de processus beaucoup plus faible qu'une cellule solaire traditionnelle.
4. **Coefficient** de température **inférieur**, performances par faible luminosité (performances améliorées à haute température)



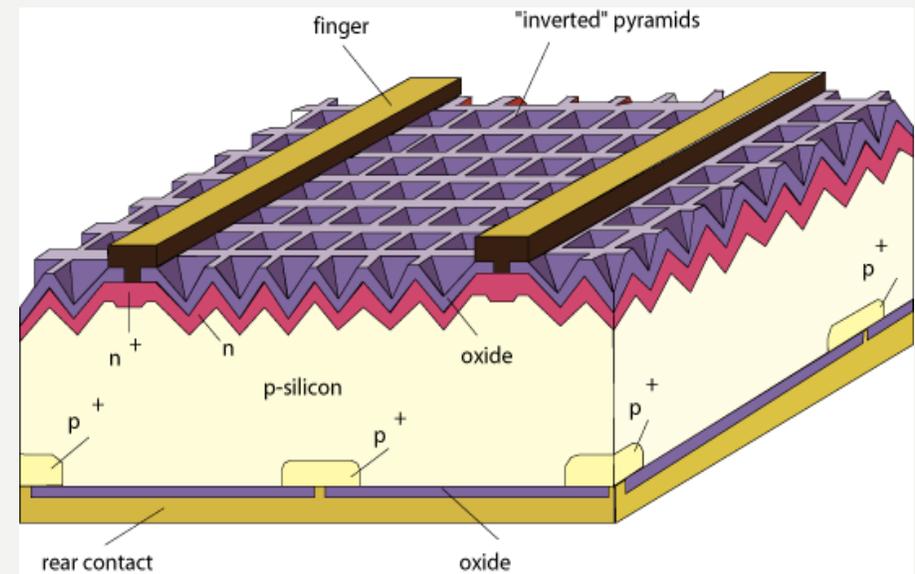
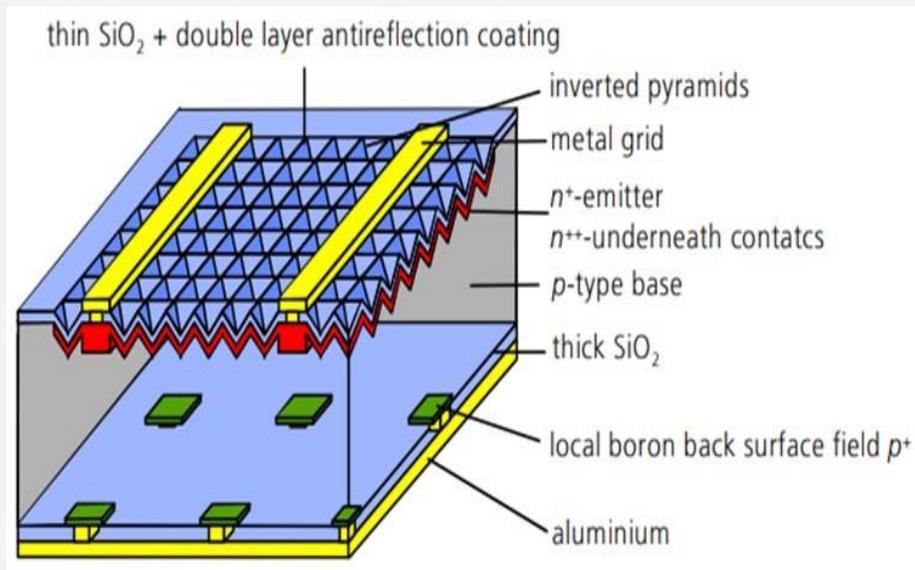
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

PERL Solar Cell (Passivated Emitter Rear Locally-diffused)

L'émetteur passivé réduit considérablement le nombre de porteurs se recombinant à la surface.

L'arrière est diffusé localement uniquement au niveau des contacts métalliques pour minimiser la recombinaison à l'arrière tout en conservant un bon contact électrique.



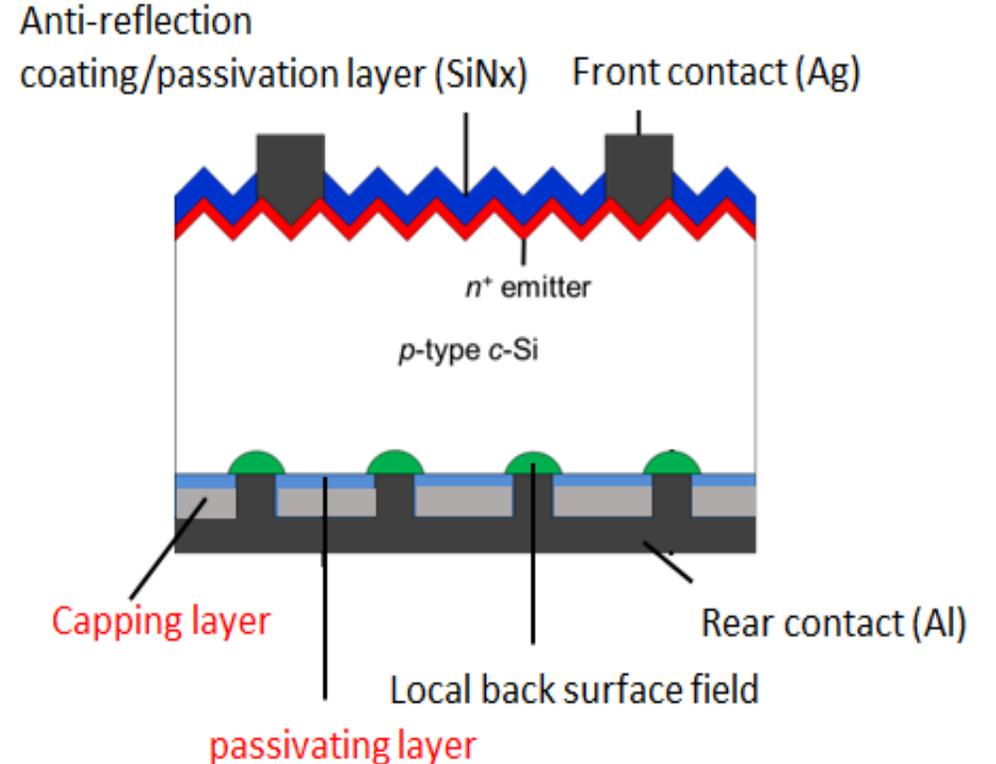
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

PERC Solar cell (Passivated rear emitter contact solar cell)

Amélioration du rendement grâce à:

1. **Passivation latérale arrière** qui **empêche les porteurs minoritaires de se recombiner** à la surface arrière.
2. **La couche diélectrique arrière supplémentaire réfléchit les photons de longue longueur d'onde** de la surface arrière vers le dispositif pour une **meilleure absorption de la lumière** et une **génération de courant**.

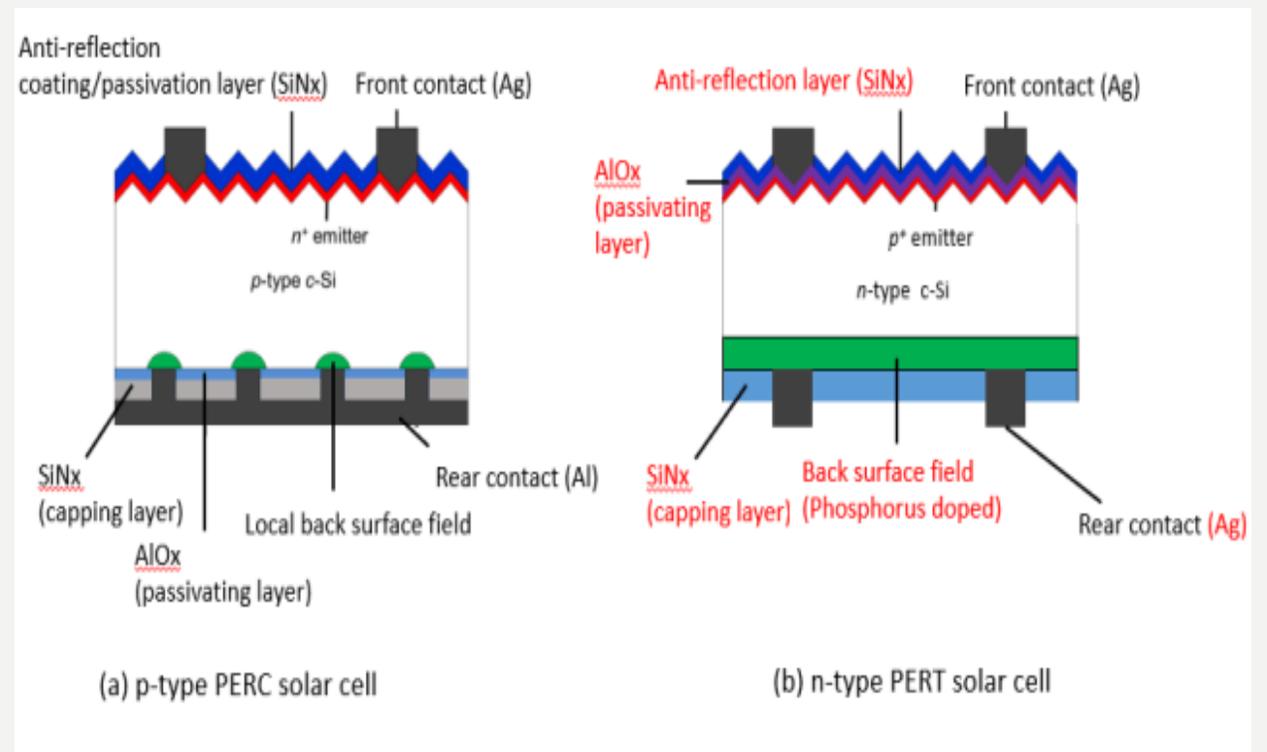


Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

PERT solar cell (Passivated Emitter Rear Totally diffused)

1. La cellule **PERT** est une **amélioration** de la cellule **PERC**;
2. La **cellule PERC** a un **BSF localisé** alors que le **BSF de la cellule PERT s'étend sur toute la surface arrière** du Si;
3. Le BSF aide à **améliorer le rendement** des cellules solaires en **formant une jonction** avec la plaquette de base Si de type p pour **repousser les porteurs minoritaires** et les **empêche de se recombiner** à la surface arrière de la plaquette de Si

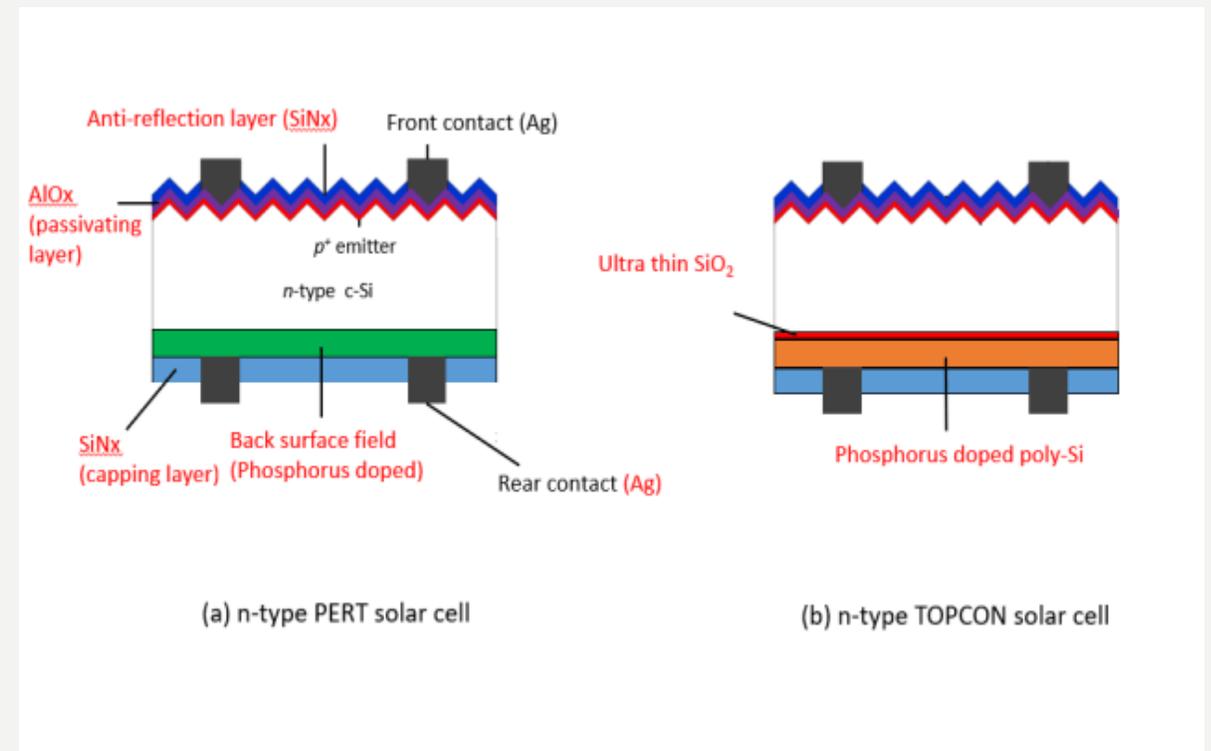


Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

TOPCON solar cell (Tunnel Oxide Passivated Contact)

1. TOPCON peut être mis à niveau à partir de la gamme PERC ou PERT actuelle, seules une **couche de SiO_2** ultra mince supplémentaire et une **couche de poly-Si dopé** sont nécessaires;
2. La couche **SiO_2 ultrafine** agit comme une **couche de passivation** de surface entre la **surface arrière de Si** et le « **contact** » **arrière** - la couche de poly-Si;
3. De plus, le **SiO_2** doit également être **suffisamment mince** pour que le courant puisse le **traverser par effet Tunnel**;
4. La couche de **poly-Si** est **fortement dopée** pour produire une couche à haute conductivité qui **agit ensuite comme un contact** pour la collecte de courant.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

4. MATÉRIAUX PHOTOVOLTAÏQUES ET PROPRIÉTÉS REQUISES

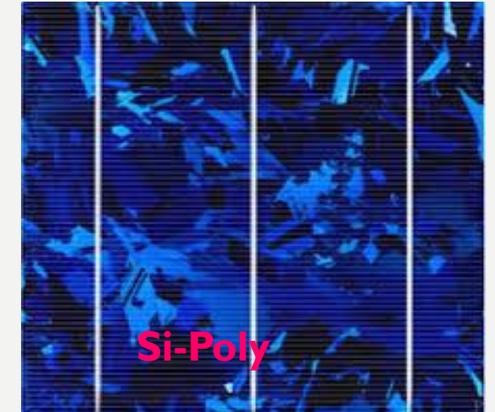
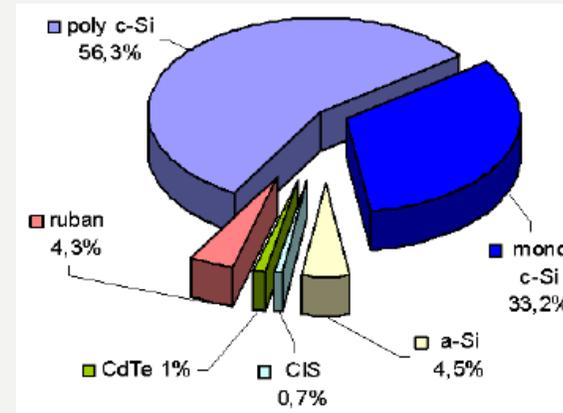
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Le matériau le plus utilisé est le **silicium**.

Pourquoi ?

- **Abondant** (deuxième élément dans la croûte terrestre)
- **Non toxique**
- Technologie **maitrisée**
- **Qualité** de son **oxyde**
- **NB:** Le **prix** du matériau intervient pour environ **50%** dans le prix du module.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de CdTe

Rendement

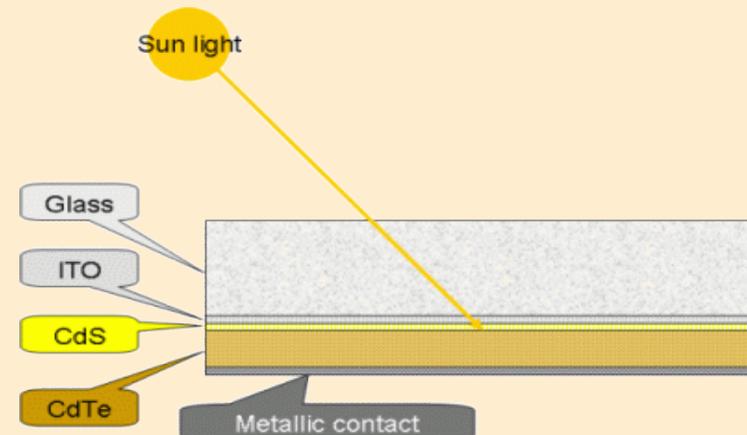
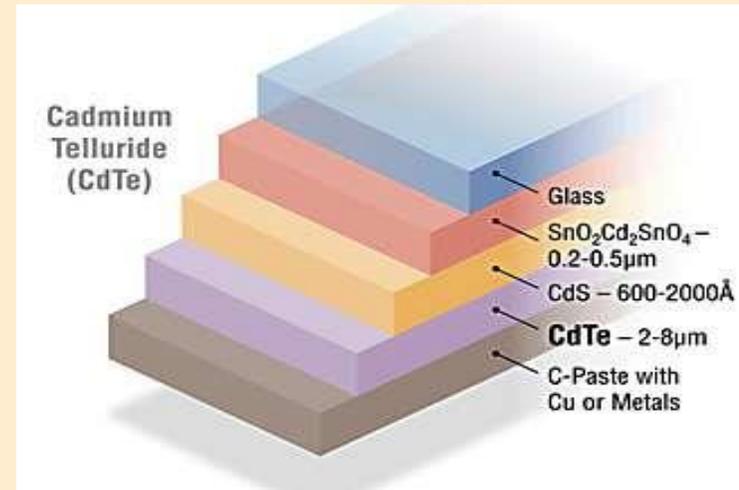
Meilleur rendement en laboratoire \approx 18%

Avantages

Prix très réduit (un panneau peut être produit en 2 h30 avec des pertes de matière première estimées à seulement 2 %.)

Problèmes

- Le **tellure** est un **élément rare**;
- Présence du **Cd nocif** à l'environnement;



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de CIGS

(Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium)

Avantage principal

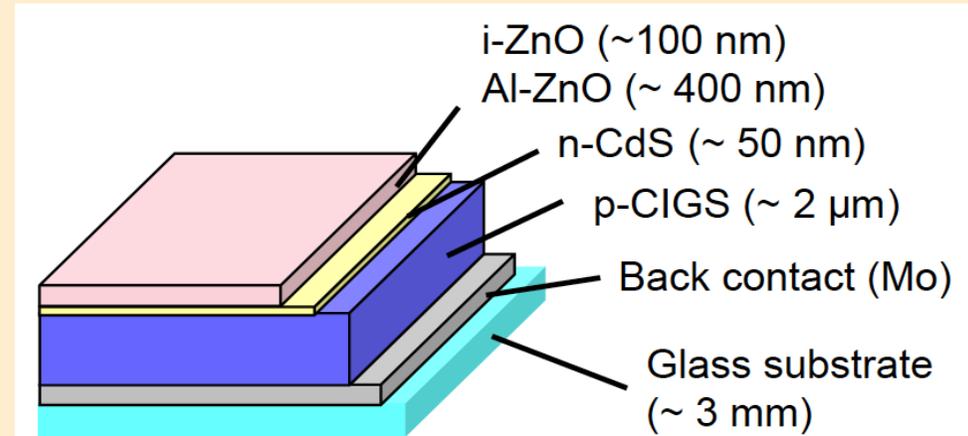
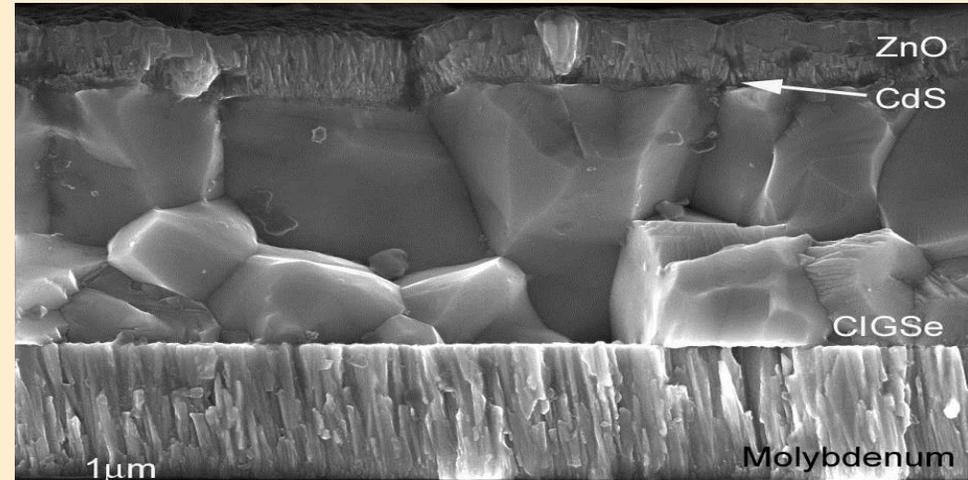
Les cellules CIGS sont ainsi celles qui ont le plus **important coefficient d'absorption** parmi les couches minces inorganiques : plus de **99% des photons incidents sont absorbés** par un micron de matériau.

Rendement

Meilleur rendement en laboratoire $\approx 20.8\%$;

Problèmes

- **Rareté** de l'Indium
- Présence du **Cd**, nocif à l'environnement.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de CZTS

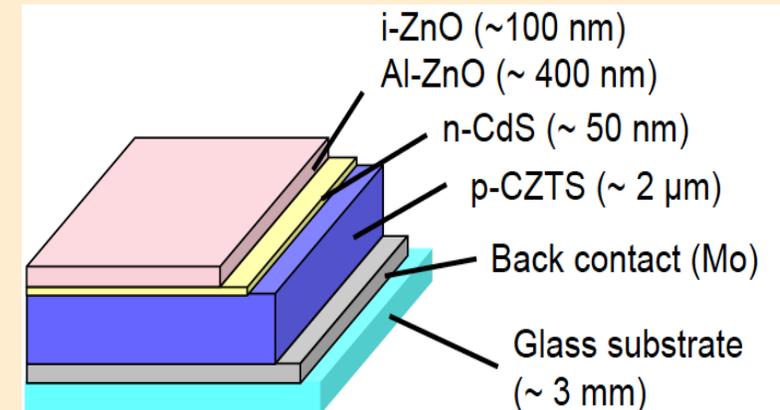
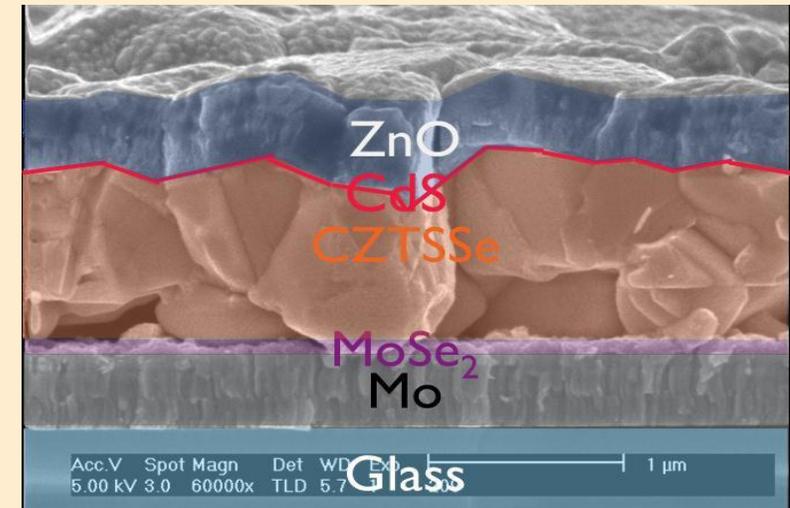
(Cuivre-Zinc-Tellure-Sélénium)

Rendement

Meilleur rendement en laboratoire $\approx 12,6\%$

Problèmes

- **Voc** faible par rapport aux cellules à base de CIGS et CdTe
- Présence du **Cd** nocif à l'environnement.
- Présence de **phases secondaires**.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de Pérovskite

($\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{M X}_3$ avec $\text{M}=\text{Pb}$ ou Sn et $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$ ou I)

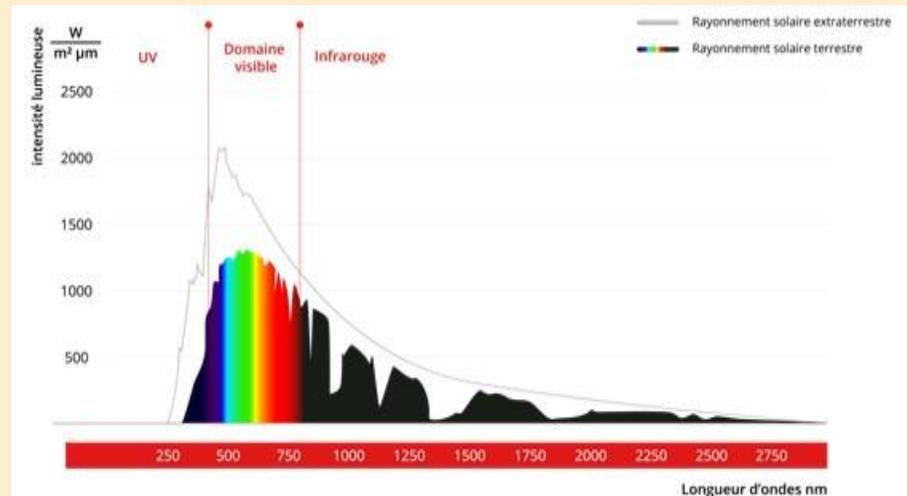
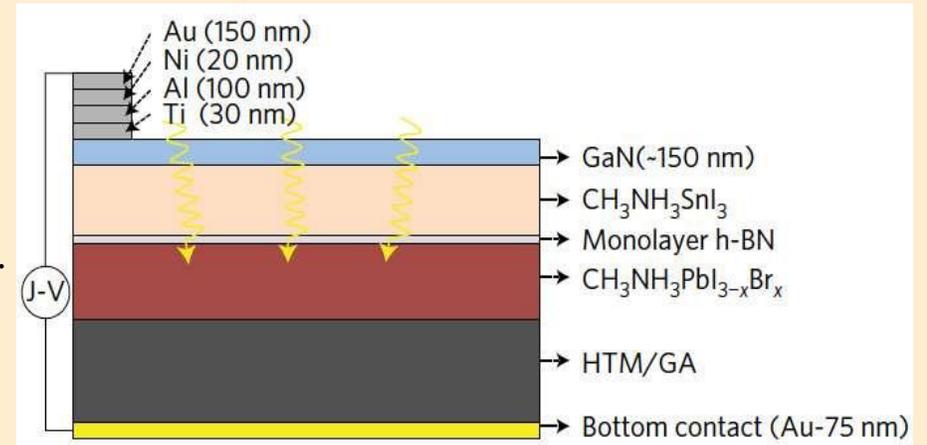
Exemple: $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{PbI}_3$ (iodure de plomb méthylammonium).

Avantages

- **Meilleur rendement** en laboratoire $\approx 19\%$
- **Gap** typiquement : **1.5-1.6 eV**
- Modes de synthèse faciles à bas coût
- Éléments chimiques **abondants**

Problèmes

- Remplacer **Pb** par **Sn**
- Améliorer la **stabilité**
- Trouver la **technologie de dépôt** la plus appropriée



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de matériaux organiques

I. Cellules à colorant

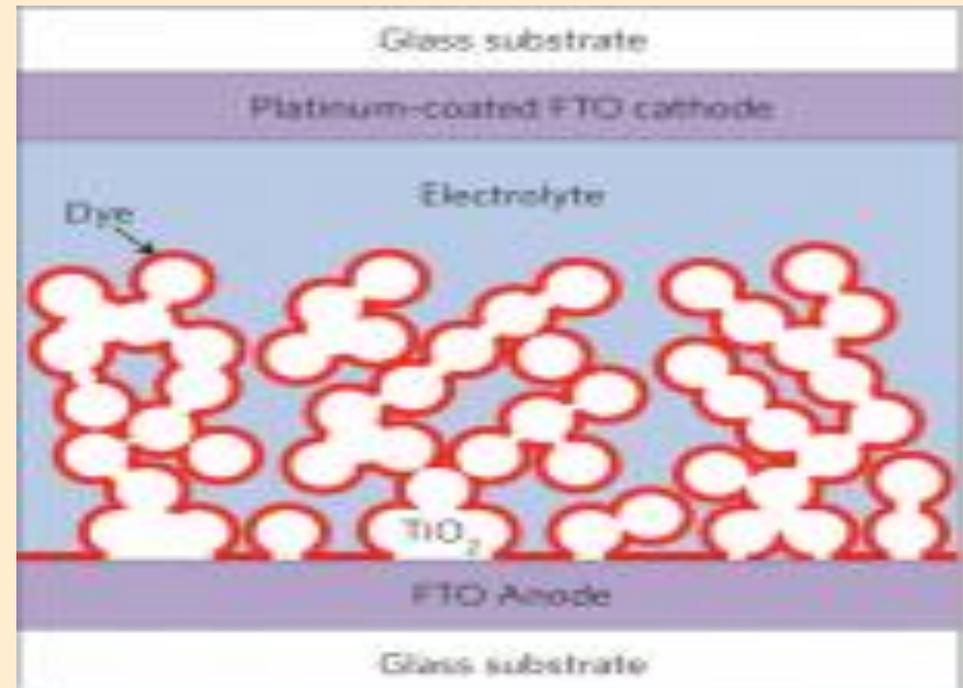
Elles sont constituées d'un sandwich d'oxyde de titane, de **pigment photosensible** (colorant : polypyridine de ruthénium) et d'un électrolyte à base d'iode (ex : I⁻/I₃⁻), liquide ou gélifié

Rendement

de 8 à 12 % (modules commerciaux 3 – 5%)

Problèmes

- Pas de **stabilité** à long terme;
- **Faible résistance** à la **température**;
- **Baisse** de performance (< 10 % au-delà de 20 000 h);



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Cellules à base de matériaux organiques

II. Cellules à polymères

Le matériau absorbeur (ou donneur d'électrons) peut être :

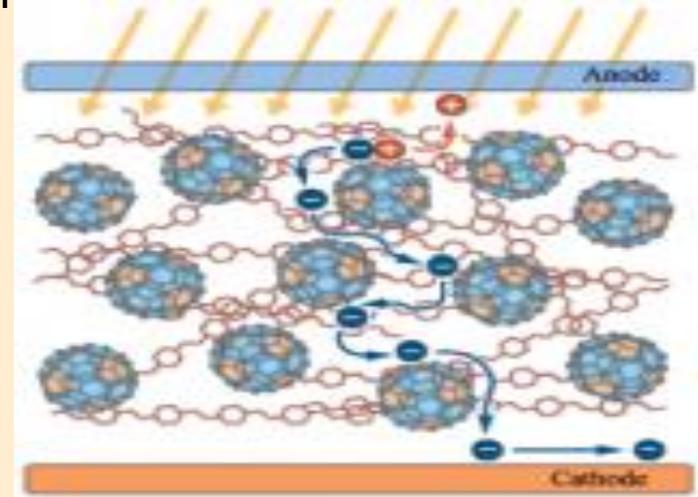
- soit de petites molécules organiques comme des phthalocyanines, des polyacenes, ou des squarenes combinées avec des perylene ou des fullerènes comme accepteur ;
- soit des molécules à longue chaîne (polymères de type P3HT, MDMO-PPV, PEDOT:PSS, PET, PC61BM, PCDTBT...) combinées avec des dérivés des fullerènes comme accepteurs (PC60BM, PC70BM).

Rendement: de 8 à 10 % (modules 3 – 5%)

Problèmes

- Pas de **stabilité** à long terme:

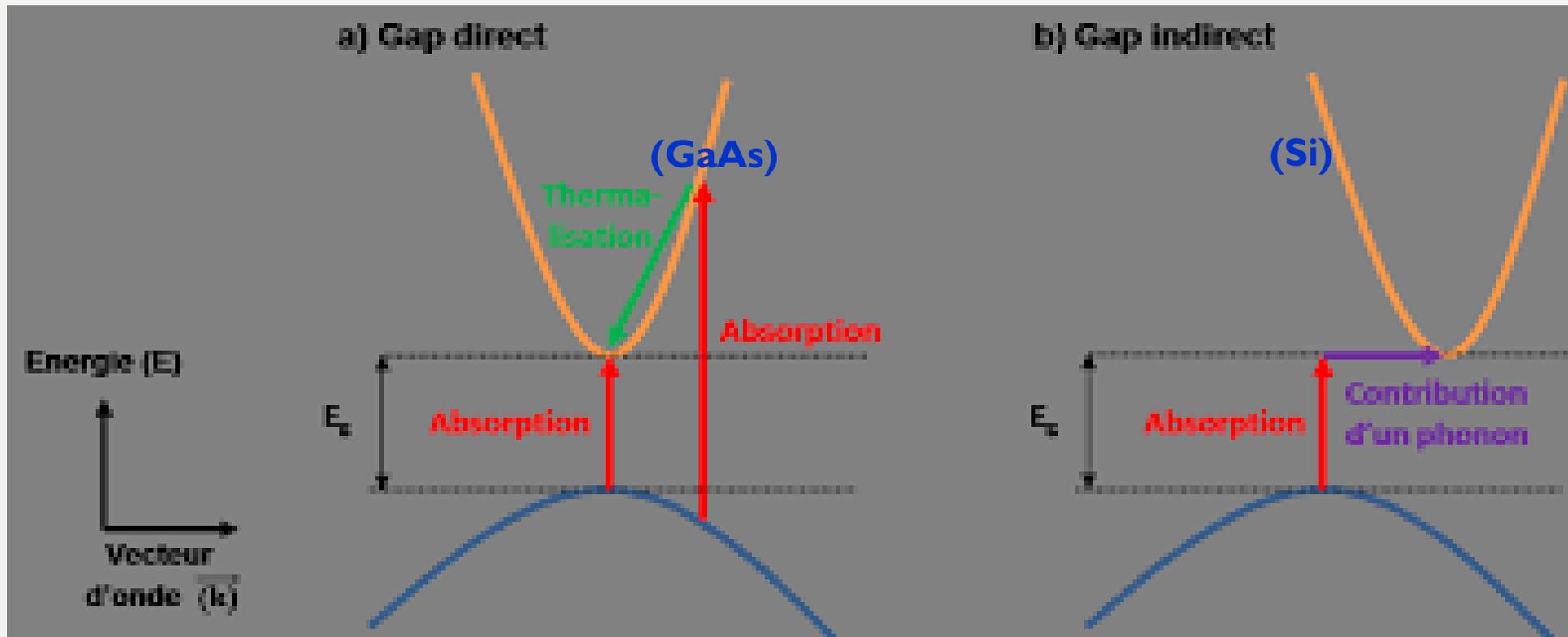
(la durée de vie ne dépasse pas les 10 ans,
voire les 2 ans)



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

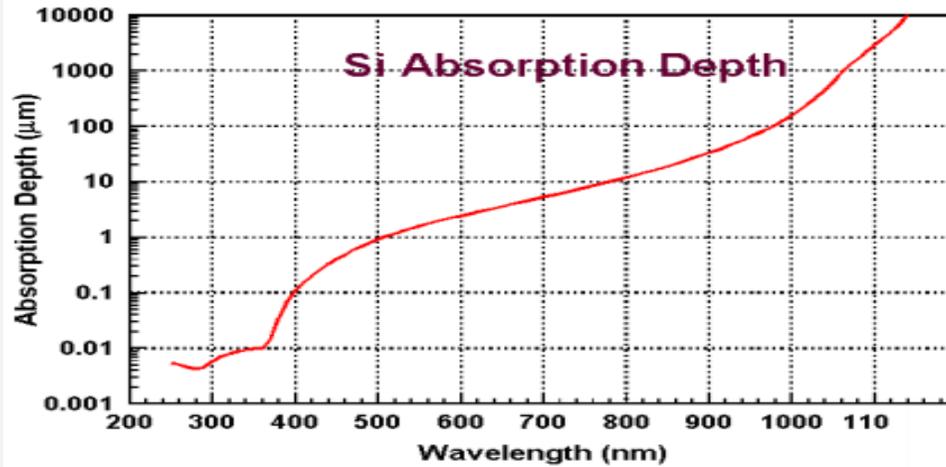
Effet du gap du matériau



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

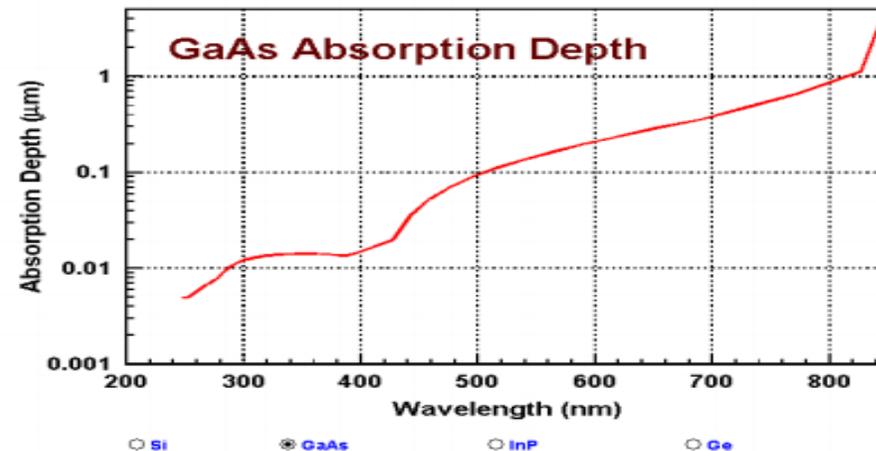
Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration



Il faudra beaucoup plus de silicium pour absorber la même quantité de rayonnement

Intensité de la lumière à la profondeur x :

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$



Energie Solaire Photovoltaïque

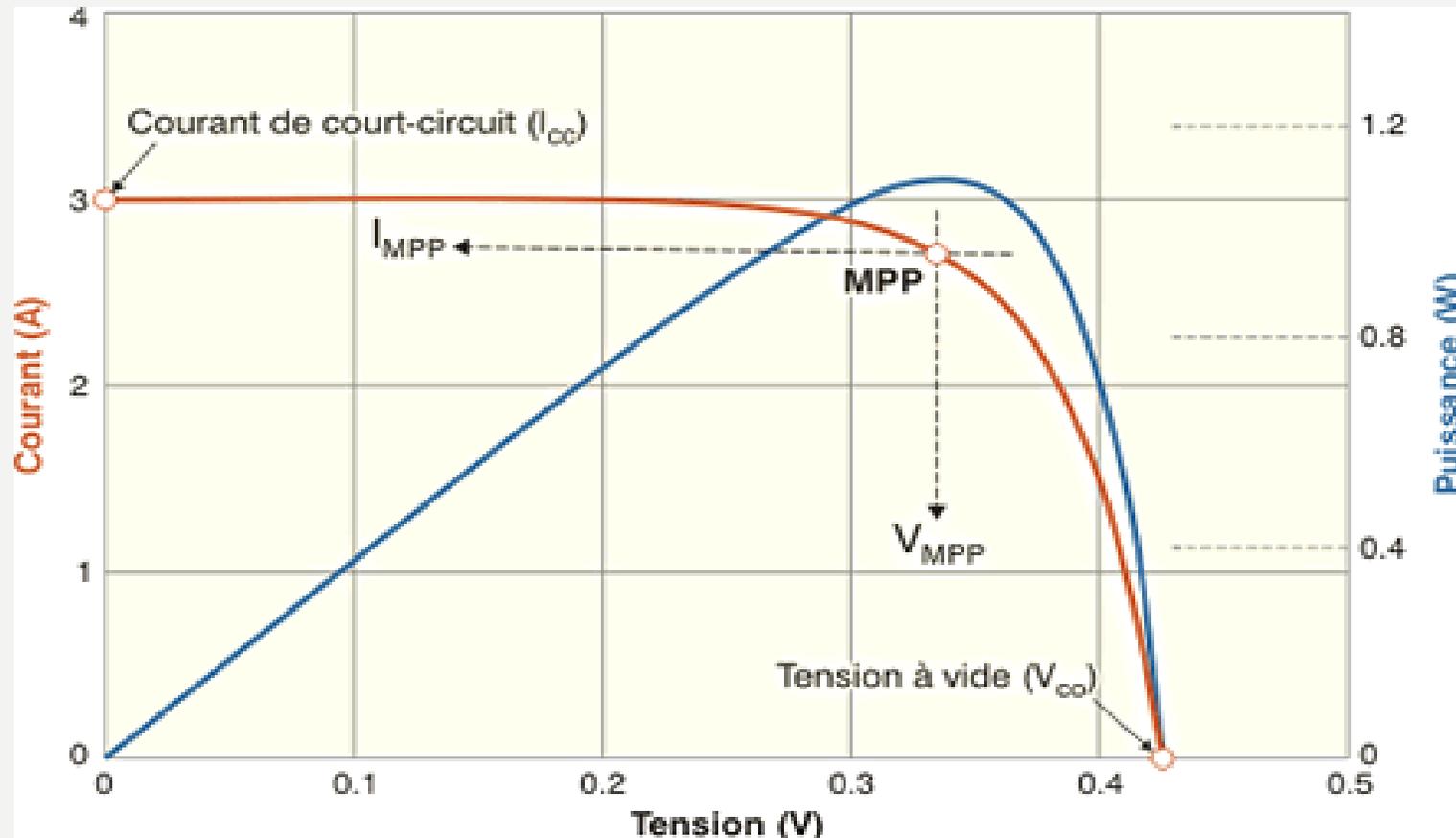
Perspectives et défis

5. PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ET TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

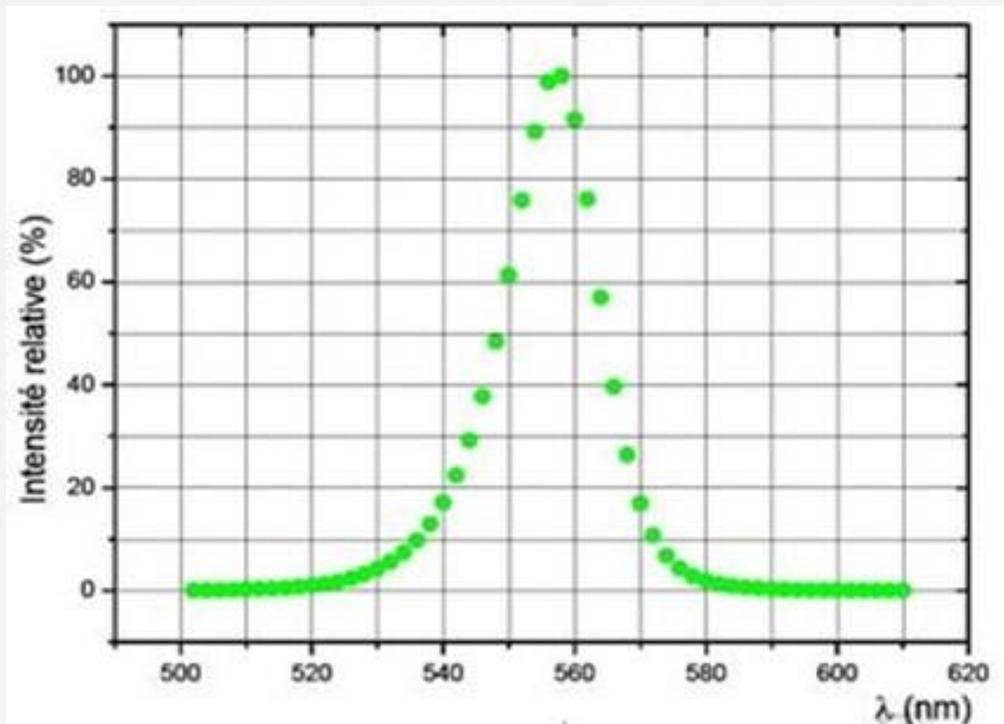
Caractéristique I(V) et Puissance



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Réponse spectrale



Réponse spectrale externe

C'est le rapport entre le nombre de paires d' e-t photogénérées collectées par les contacts ohmiques et le nombre de **photons incidents** pour une longueur d'onde donnée:

$$RS(\lambda) = J_p(\lambda) / (q F(\lambda))$$

Réponse spectrale interne

C'est le rapport entre le nombre de paires d' e-t photogénérées collectées par les contacts ohmiques et le nombre de **photons incidents absorbés** pour une longueur d'onde donnée:

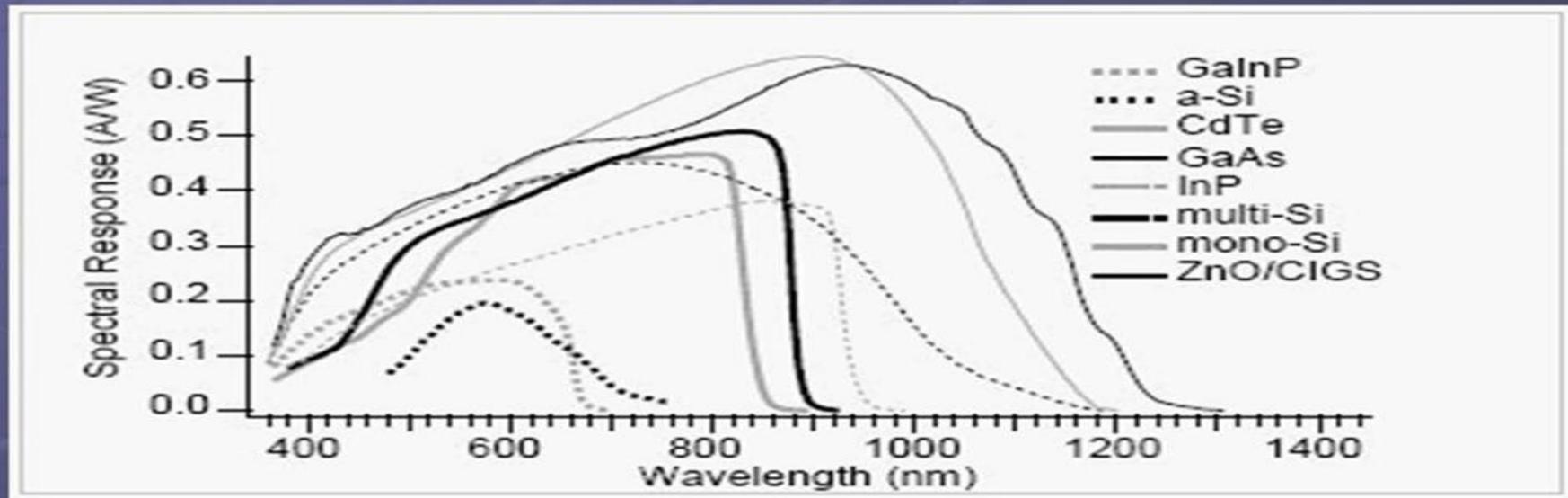
$$RS(\lambda) = J_p(\lambda) / (q F(\lambda) (1 - R(\lambda)))$$

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Réponse spectrale

Réponse spectrale des cellules (spectre unitaire)



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

6. DÉFIS DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Principaux problèmes:

- Problèmes liés au dispositif de conversion
- Problèmes dus à l'intermittence \Rightarrow Moyens de stockage
- Divers (matériaux, procédés technologiques, architecture, environnement, etc.)

La recherche s'oriente sur deux principaux axes:

- Augmenter le rendement;
 - Diminuer les coûts de production;
 - Mettre au point des moyens de stockage adéquats \Rightarrow moyens de stockage
- } \longrightarrow Dispositif de conversion

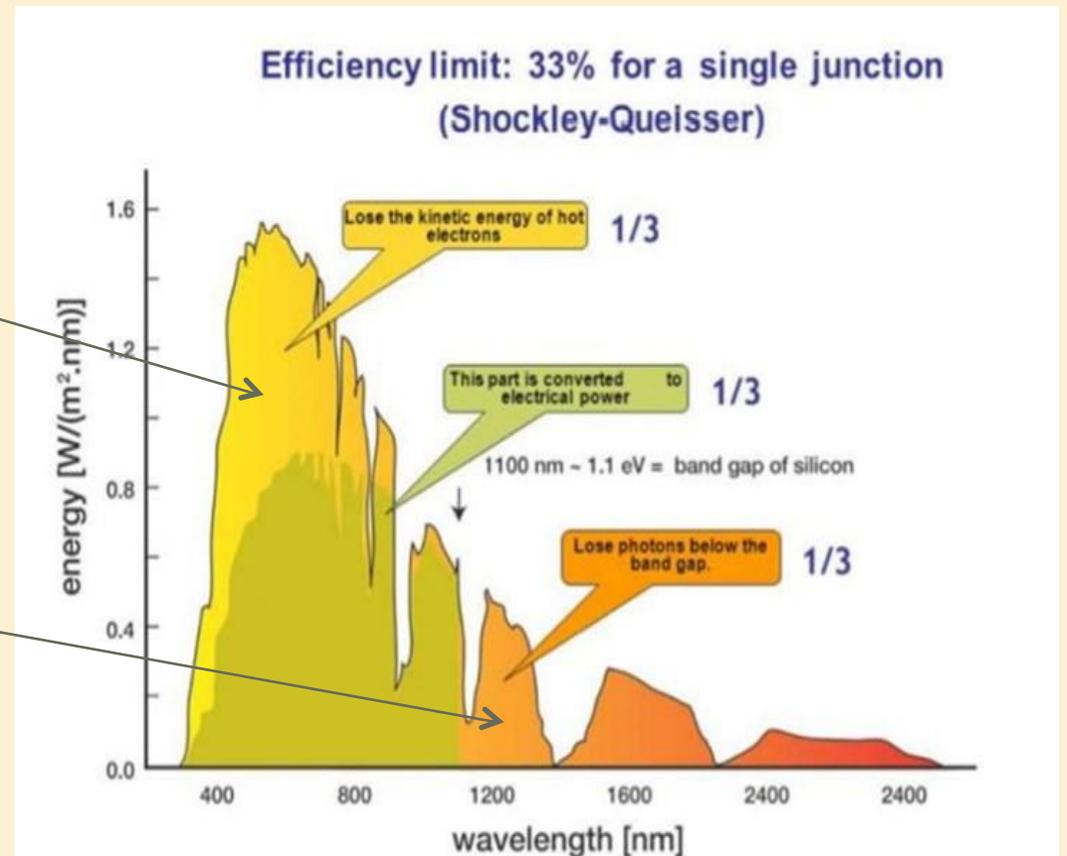
Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Problèmes liés au dispositif de conversion idéal

1) Pertes d'énergie sous forme thermique pour les photons dont $h\nu > E_g$,

2) Les photons dont $h\nu < E_g$ ne créent pas de paires electron-trou.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Problèmes liés au dispositif de conversion réel

- Pertes optiques soit par **réflexion** soit par **ombrage**;
- Pertes par **recombinaison** liées à la **présence de défauts** tels que: **impuretés, dislocations, joints de grains, interfaces** avec d'autres matériaux;
- **Pertes ohmiques** liées aux différents éléments en série tels que: résistances des contacts, résistance interne du semi-conducteur, résistance des électrodes.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Problèmes liés à divers facteurs

- **Respect de l'environnement**
- **Problèmes liés à la stabilité du capteur: Dégradation thermique et/ou lumineuse**
- **Problèmes d'ordre économique: Coût**
- **Problèmes liés aux moyens de stockage**

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

7. PROGRÈS

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

I-Solution aux pertes par réflexion

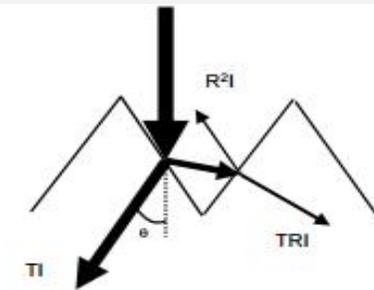
Pertes dans le silicium nu: 30 à 40 %;

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

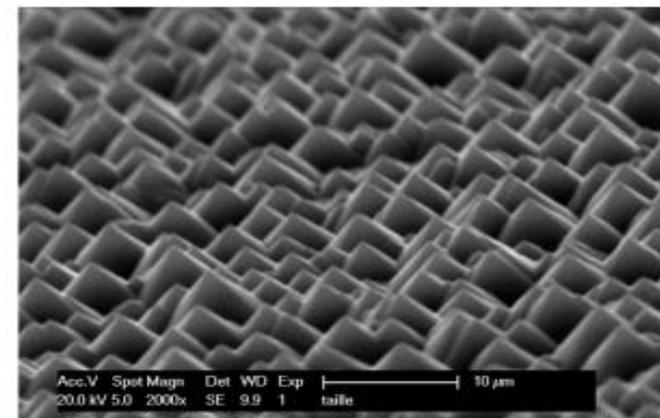
- Texturation par **voie humide**

(KOH ou NaOH ou Acide),

- Texturation par **gravure Plasma**



Texturation de surface: 10 à 20% de réflexion



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

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%.



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

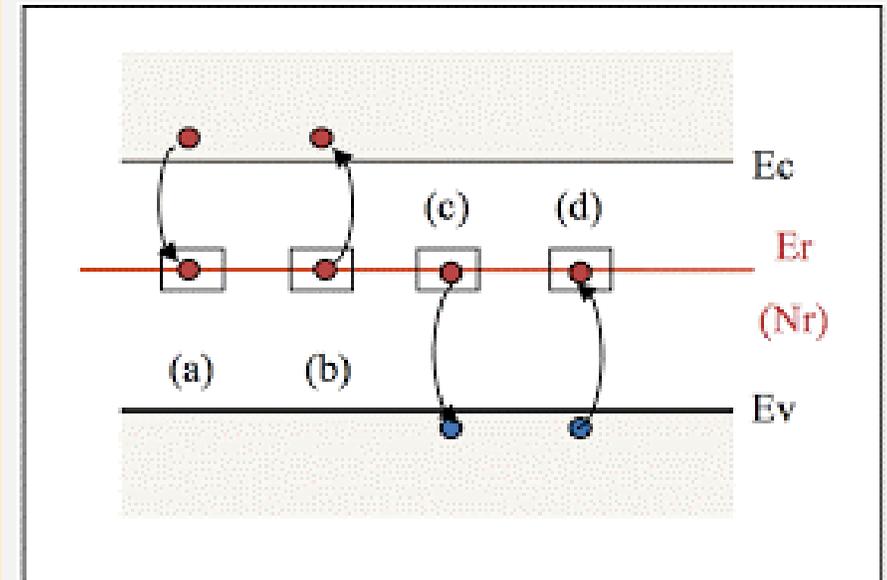
3-Solution aux pertes par **recombinaison en volume**

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)



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

4-Solution aux pertes par recombinaison en face arrière

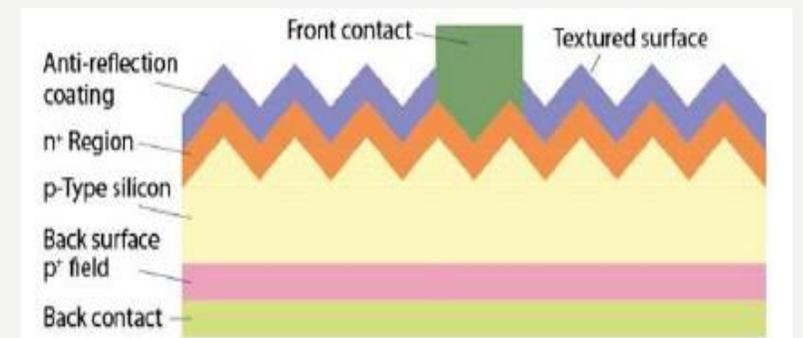
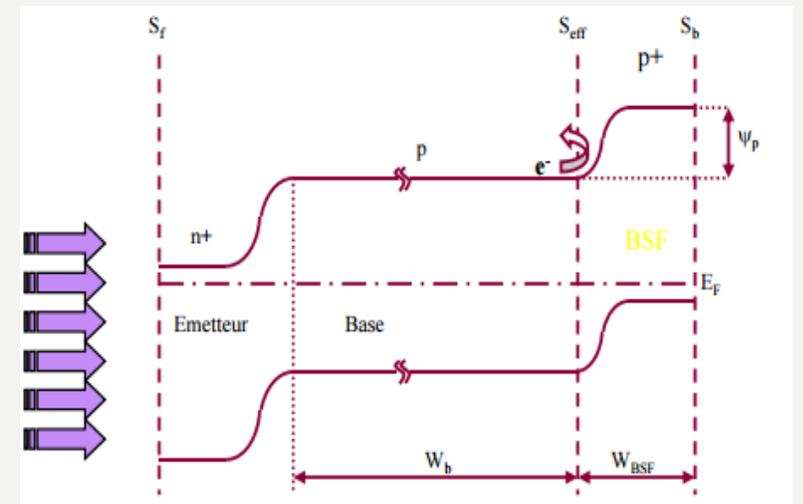
Solutions proposées:

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 **résistance série R_s**



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

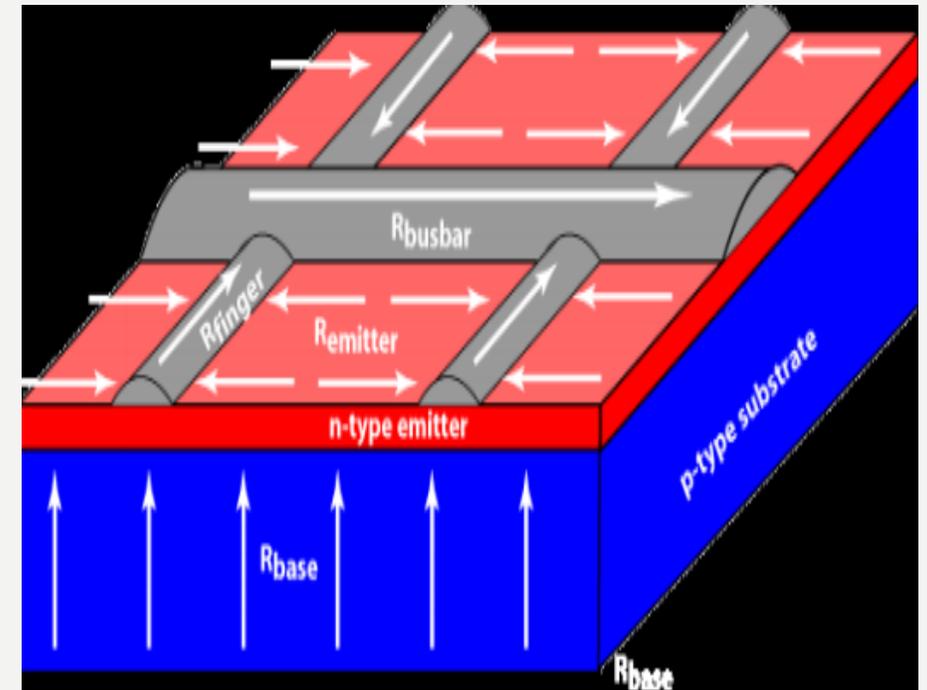
5-Solution aux pertes par résistance série

Ces pertes sont dues:

- Résistivité des **matériaux**;
- Résistivité des **films**;
- **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)



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Solutions pour préserver l'environnement

- **Substituer** les **matériaux toxiques** tels que Pb, Cd, As, etc;
- Opter pour des **procédés non polluants** (éviter les produits fluorés par exemple).

Solutions aux problèmes d'ordre économique

- Utiliser les **matériaux abondants** et pas chers (Si, Al, etc);
- **Procédés technologiques simples** et à étapes **réduites**;
- **Eviter** les **matériaux rares** (Ga, In, etc),

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Solutions liés aux problèmes de la dégradation

Les principaux mécanismes de dégradation sont:

- Dégradation induite par la **lumière (LID)**;
- Dégradation induite par la **lumière** et une **température élevée (LETID)**.

N.B.: Bien que **la physique** derrière les mécanismes **ne soit pas bien comprise**, il est **généralement admis** que **la présence d'hydrogène** joue un **rôle clé**.

Pseudo solution

Il semble que **l'utilisation de certaines architectures** tel que la cellule **HJT**, n'est pas très sensibles à ces types de dégradation.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Solutions aux problème de stockage

Ce problème est dû au **caractère intermittent** (jour/nuit) et à **l'aspect aléatoire** (ombrage par les nuages et autres) de l'énergie solaire photovoltaïque.

- **Batteries efficace**
- **Stockage d'Hydrogène**

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

8. EVOLUTION ET PERSPECTIVES

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Production d'électricité Photovoltaïque à l'échelle mondiale

Croissance importante depuis 1990

- 1996: $\approx 100 \text{ MWc}$
- 2001: $\approx 400 \text{ MWc}$
- 2010: $\approx 3 \text{ GWc}$
- 2020: $\approx 9\text{-}21 \text{ GWc}$

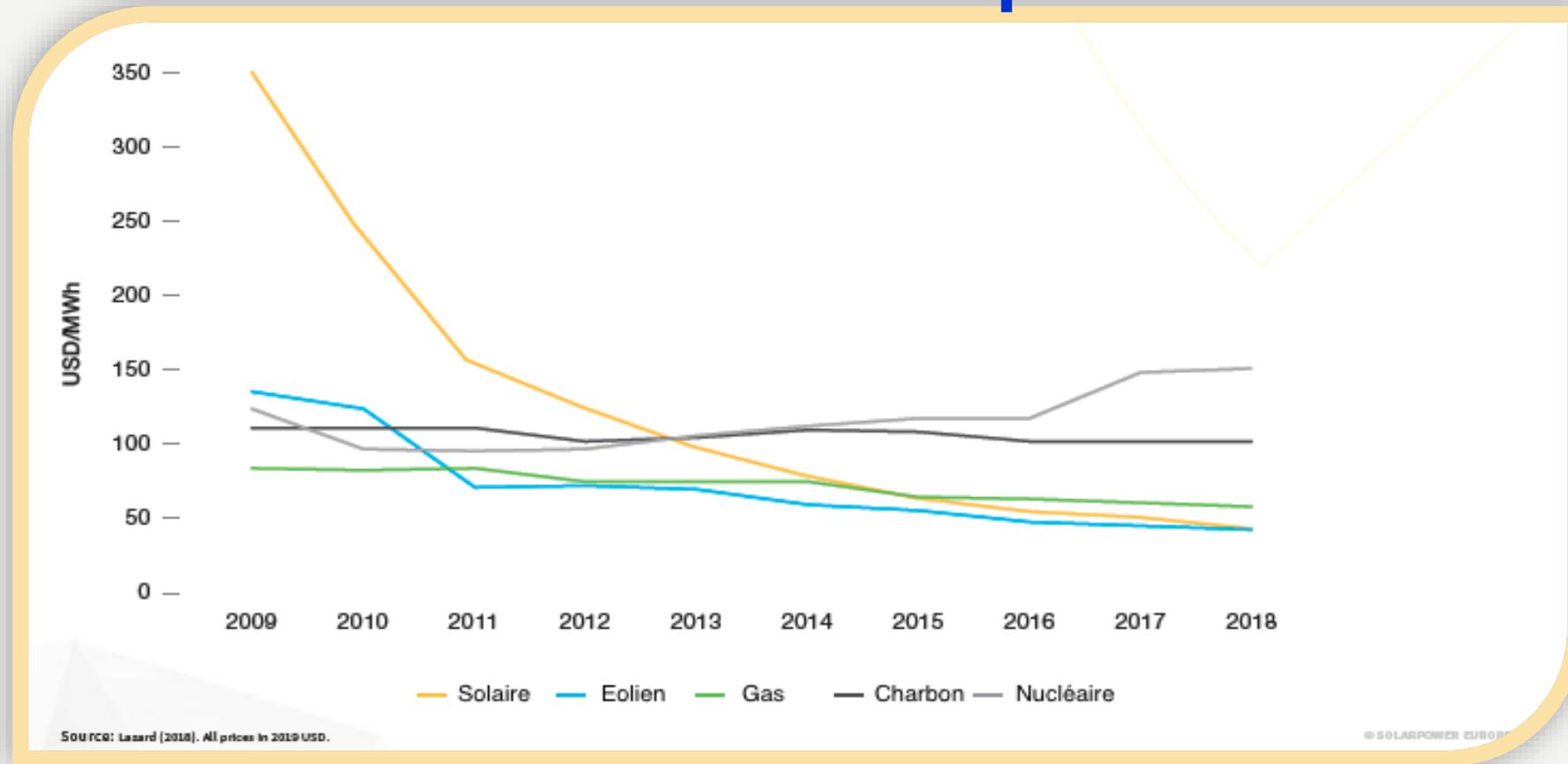
Remarque

La **puissance crête** représente la puissance délivrée par le panneau au **point de puissance maximum** (dans le diagramme Intensité/Tension) et pour une **irradiation solaire de 1000 W/m^2** (avec un spectre standard) avec une cellule à **25°C** .

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Evolution des prix



Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Record mondial pour le rendement

- 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%**.
- **Juin 2021**, les chercheurs de l'**Institut Fraunhofer** ont pu obtenir un rendement de conversion record de **68,9 %** avec une cellule photovoltaïque **à base de GaAs** sous lumière **laser** monochromatique de **858 μm** .

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Perspectives

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

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

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

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

9. CONCLUSION

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Conclusion

Tour d'horizon sur:

- **Notions de base** relatives à l'énergie solaire photovoltaïque;
- Différentes **architectures** du capteur qui est la cellule solaire;
- **Matériaux** photovoltaïques et **propriétés** requises;
- **Paramètres électriques** des cellules solaires ;
- Différents **problèmes** rencontrés et **solutions** proposés;
- **Evolutions** et perspectives;

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

Conclusion

Il est à souligner que:

- Le **décalage** entre les **réserves** d'énergie disponibles et la **consommation** énergétique contemporaine est évident.

Par conséquent:

- Il est devenu nécessaire de **changer de modèle** et d'adopter de **nouveaux modes de production** et de **consommation** viables à long terme;
- Il est important de continuer à œuvrer pour **diminuer davantage le coût** de conversion de l'énergie solaire en électricité afin qu'elle devienne **compétitive** (**Matériaux abondants**, **Procédés technologiques simples**, **Architectures adéquates**) ;
- Il est capitale d'œuvrer aussi pour résoudre **le problème de stockage**;
- Il est indispensable de mettre en place une **analyse crédible du cycle de vie** des produits en termes de **longévité** du matériel, de **toxicité** et d'utilisation de **métaux rares**.

Energie Solaire Photovoltaïque

Perspectives et défis

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

- <https://www.pveducation.org/>

Logiciels

PC1D, Silvaco (Atlas et Athena)