

11. L'énergie solaire

11.4 – *Les collecteurs photovoltaïques*

11.4.1 *Principes et fonctionnement*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Carlos Alberto Brandt Rodriguez

Ricardo Izquierdo, Ing., Ph.D.

Oumara Savagado

Valery J. Bouchard

Question



ENR2020

- Qu'est-ce que l'effet photoélectrique ?
 - A. Lorsque le rayonnement frappe une plaque d'un matériau conducteur, un électron est éjecté
 - B. Lorsque le phonon frappe une plaque d'un matériau métallique, un électron est éjecté
 - C. Lorsque la lumière frappe une plaque d'un matériau conducteur, un photon est éjecté
 - D. Lorsqu'un photon frappe une plaque d'un matériau semi-conducteur, un électron change de couche pour créer une différence de tension
 - E. Lorsqu'un photon frappe une plaque d'un matériau métallique, un phonon est éjecté

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Principes et fonctionnement
- Caractéristiques
- Cellules-Modules-Panneaux (collecteurs)
- Cycle de vie et retour sur investissement
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

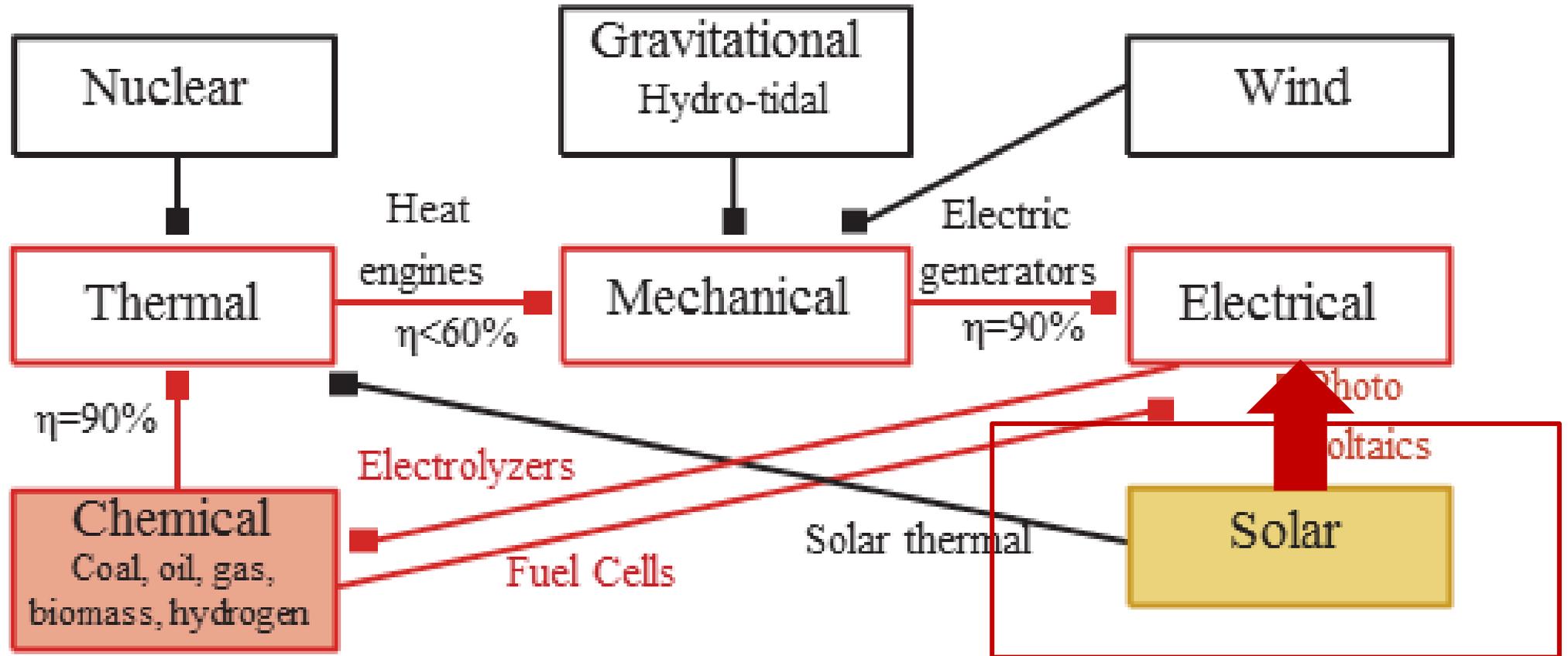
Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Principes et fonctionnement
- Caractéristiques
- Cellules-Modules-Panneaux (collecteurs)
- Cycle de vie et retour sur investissement
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Ce cours a déjà montré que le soleil est de loin, la plus grande source d'énergie à notre disposition.
- La croissance démographique et le développement des sociétés sont des enjeux qui augmentent sans cesse la consommation énergétique mondiale.
- Dans ce contexte, les collecteurs solaires photovoltaïques (PV) utilisent une source d'énergie renouvelable, inépuisable et gratuite.
- Leur impact environnemental est de loin préférable à celui d'autres moyens de production.

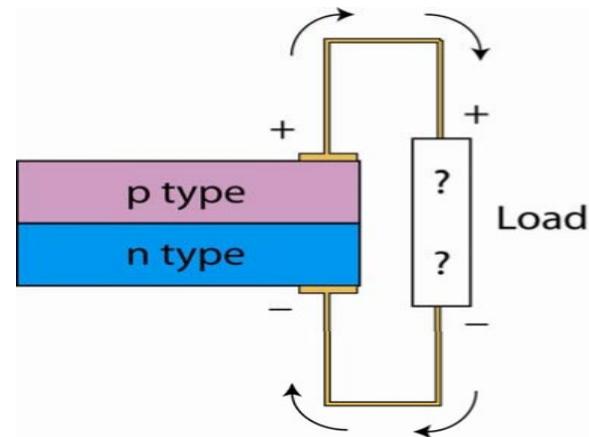
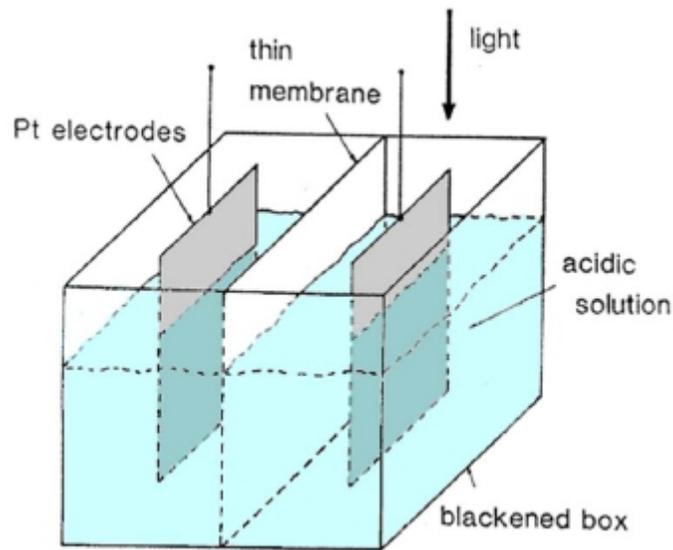
Introduction et objectifs



Énergie et liens entre énergies

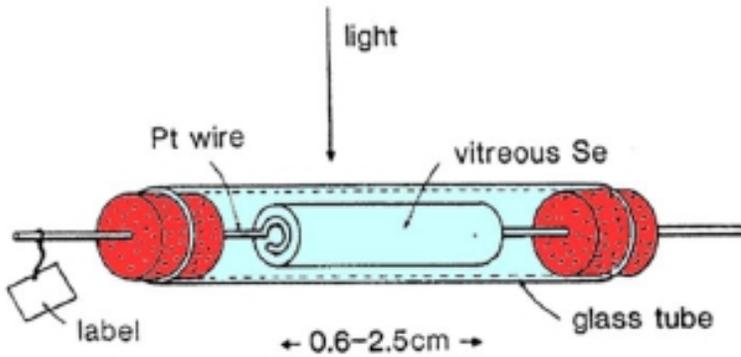
Introduction et objectifs

- Le terme « **photovoltaïque** » vient du grec Φῶς (phos) signifiant «**lumière**» et «**voltaïque**», signifiant **électrique**, du le nom du physicien italien Volta, d'après qui l'unité de potentiel électrique, le volt, est nommée.
- Premier dispositif de silicium pratique démontré en [1954](#), Bell Labs.



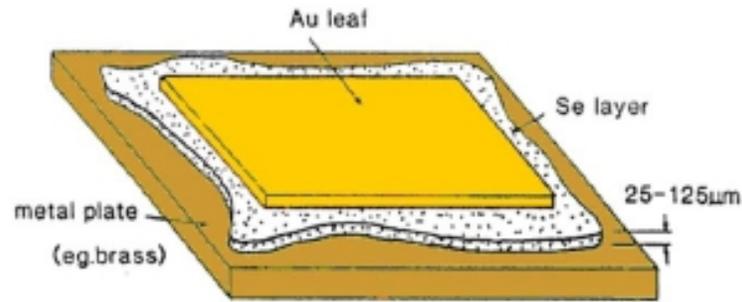
Introduction et objectifs

1877: Photoelectric effect in solid system



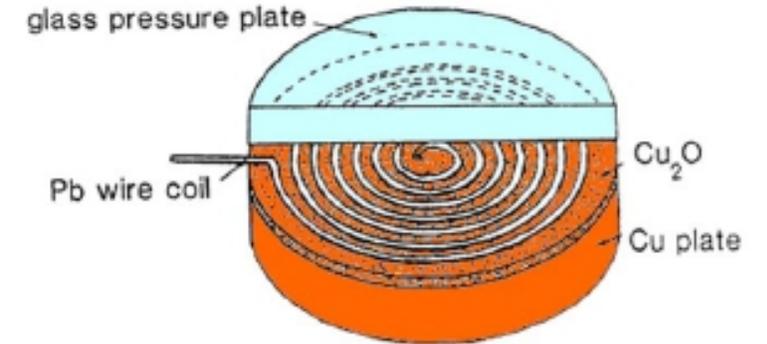
W.G. Adams and R.E. Day, "The Action of Light on Selenium," *Proceedings of the Royal Society A*25, 113 (1877)

1883: Photovoltaic effect in sub-mm-thick films



C.E. Fritts, "On a new form of selenium photocell", *Proc. of the American Association for the Advancement of Science* 33, 97 (1883)

1927: Evolution of solid-state PV devices



L.O. Grondahl, "The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell", *Review of Modern Physics* 5, 141 (1933).

Réf: <http://pvcdrom.pveducation.org/MANUFACT/FIRST.HTM>

Introduction et objectifs

- Objectifs:
 - Nommer les propriétés et comprendre le fonctionnement d'une cellule solaire;
 - Comprendre le fonctionnement des collecteurs solaires PV et leurs caractéristiques;
 - Être en mesure de calculer le rendement (η) avec les données solaires V_{oc} et I_{MPP} ;
 - Estimer la distribution de capacité et de production d'énergie solaire PV;
 - Pouvoir réaliser un calcul de dimensionnement simple.

Plan de la présentation

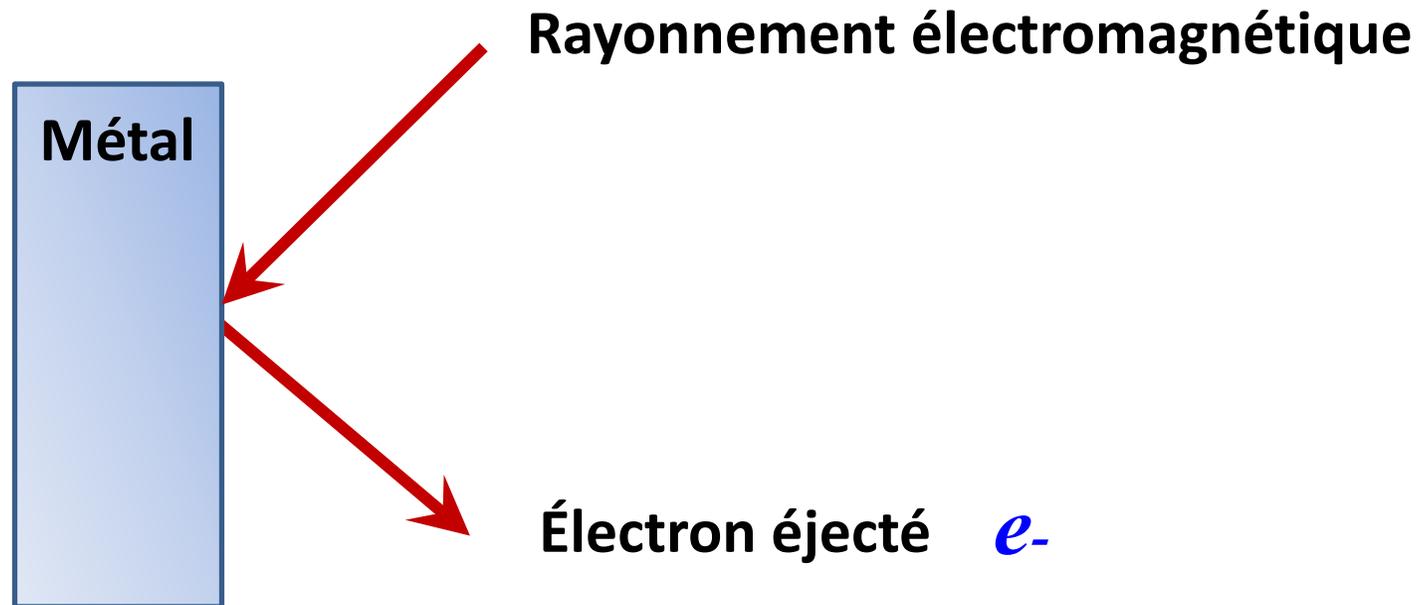
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Principes et fonctionnement***
- Caractéristiques
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

Principes et fonctionnement

- Un collecteur solaire utilise l'énergie rayonnante du soleil (photons) pour la transformer en courant continu par l'effet photovoltaïque.
- Quelle est la différence entre l'effet photoélectrique et l'effet photovoltaïque?

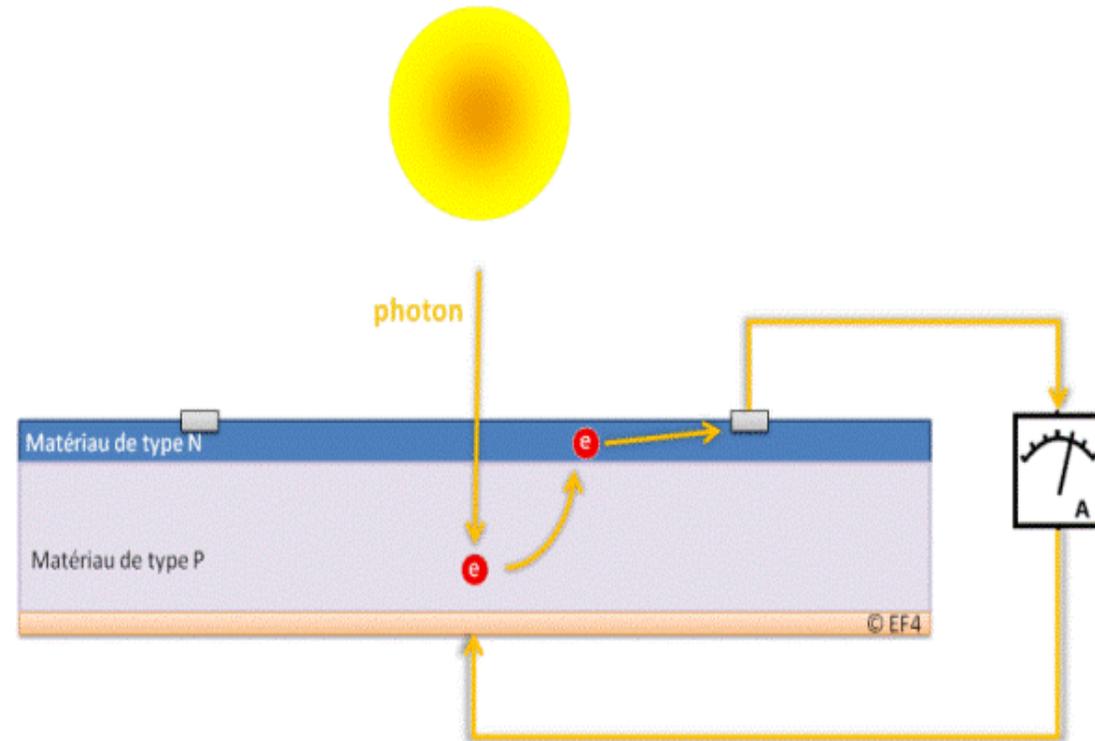
Principes et fonctionnement

- Effet photoélectrique:
 - Lorsque le rayonnement frappe **une plaque** d'un matériau **conducteur**, un électron est **éjecté**.



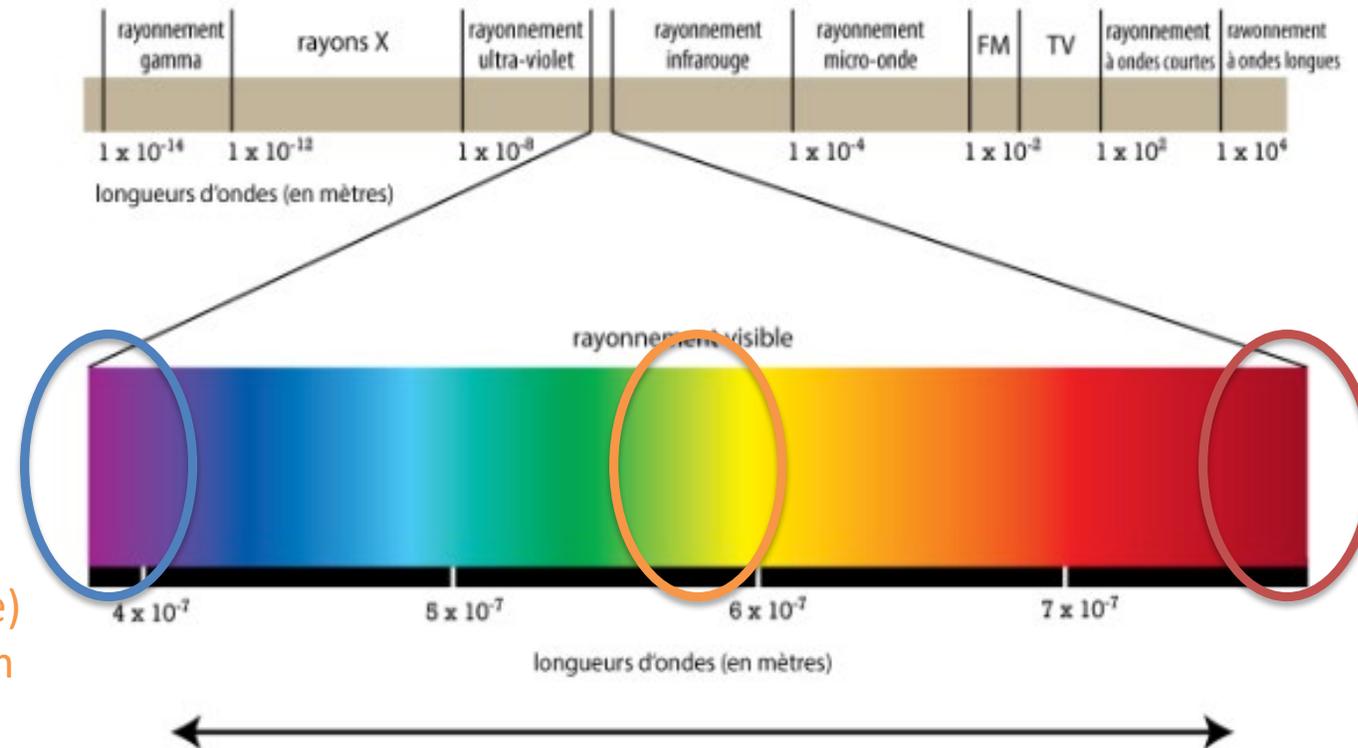
Principes et fonctionnement

- Effet photovoltaïque :
 - Prend place à la limite de **deux plaques semi-conductrices**. Les électrons ne sont pas éjectés lorsque les photons frappent, mais **libérés** pour s'accumuler le long de la frontière pour créer une tension (V).
- En connectant les deux plaques avec un fil conducteur, un **courant** se crée.



Principes et fonctionnement: photons

- Le rayonnement du soleil comporte un large spectre, mais seul un rayonnement dont la longueur d'onde est suffisamment courte produira les effets photoélectriques ou photovoltaïques.



Principes et fonctionnement: photons

- Chaque photon (faisceau lumineux) a une énergie distincte qui se détermine par sa fréquence

– Cette fréquence est donnée par la loi de Planck:

$$E = h \nu \quad (1)$$

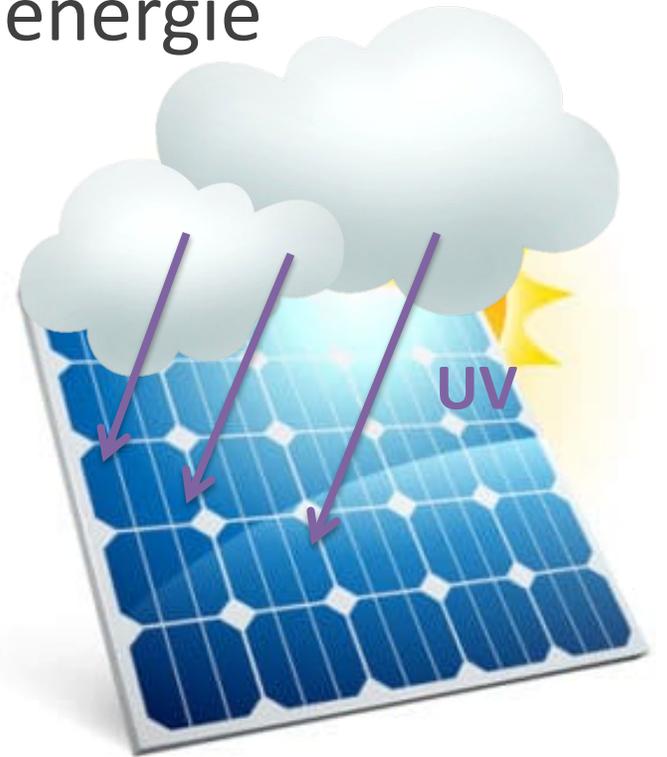
$$\nu = c/\lambda \quad (2)$$

$$E = hc/\lambda \quad (2) \rightarrow (1)$$

- h : constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34}$ Js ou Kgm^2/s
- ν : fréquence
- c : vitesse de propagation des ondes électromagnétiques (vide) = $299\,792\,458\text{m/s}$
- λ : longueur d'onde, m

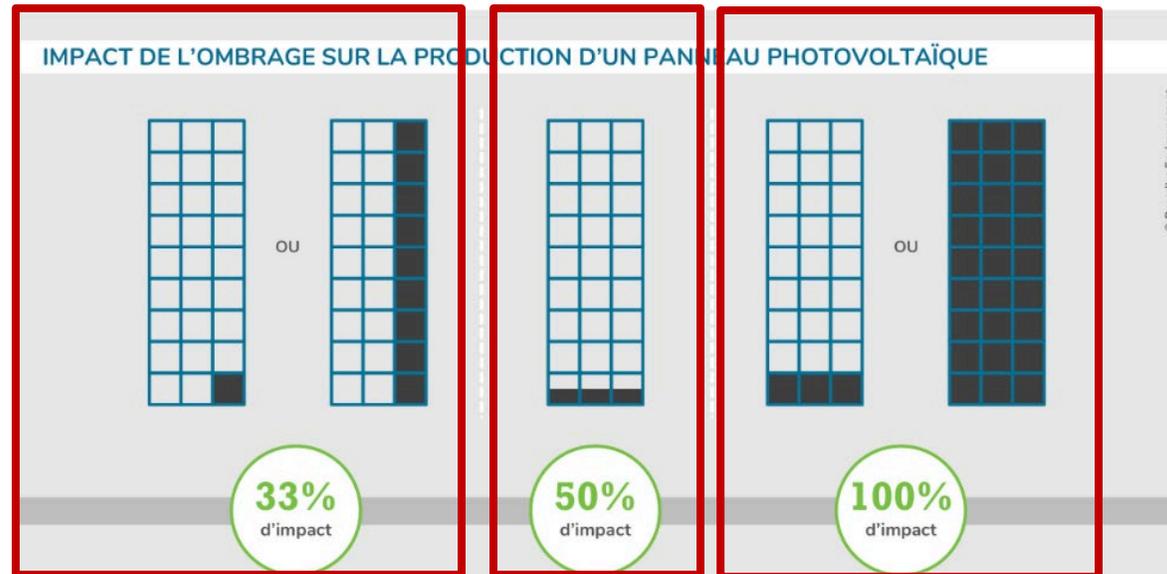
Principes et fonctionnement: photons

- Peu importe la luminosité ou l'intensité du rayonnement, il suffit de disposer d'une cellule solaire ayant la longueur d'onde appropriée au rayonnement pour convertir l'énergie rayonnante en électricité.
- Certains spectres lumineux tels que les UV pénètrent dans les nuages, **ce qui signifie que les cellules solaires fonctionnent par temps nuageux.**



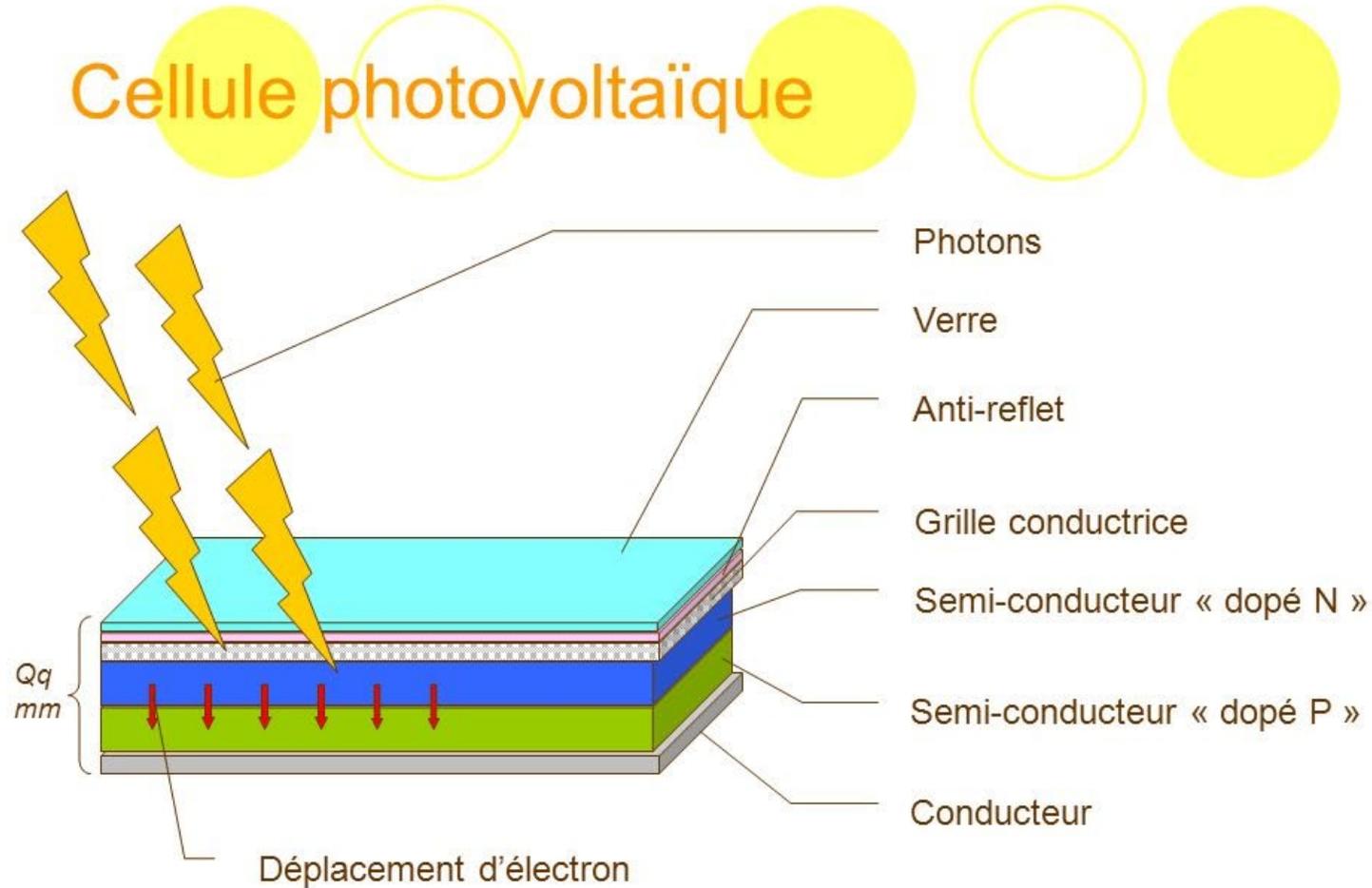
Principes et fonctionnement: Ombrage

- S'il y a **ombrage** sur une cellule, le panneau ou le module cesse la production d'électricité.



Ici le module comporte trois séries verticales branchées en parallèles

Principes et fonctionnement: cellule PV



Question

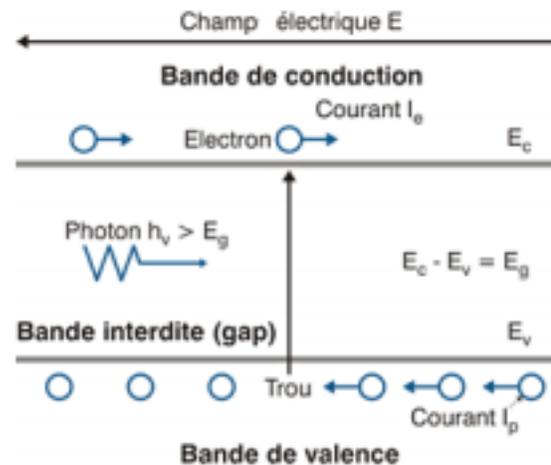


ENR2020

- Un matériau semi-conducteur se compose de plusieurs bandes. Quelles sont-elles?
 - A. Une bande de conduction
 - B. Une bande de valence
 - C. Une bande interdite
 - D. Une bande d'électrons
 - E. Une bande de trous

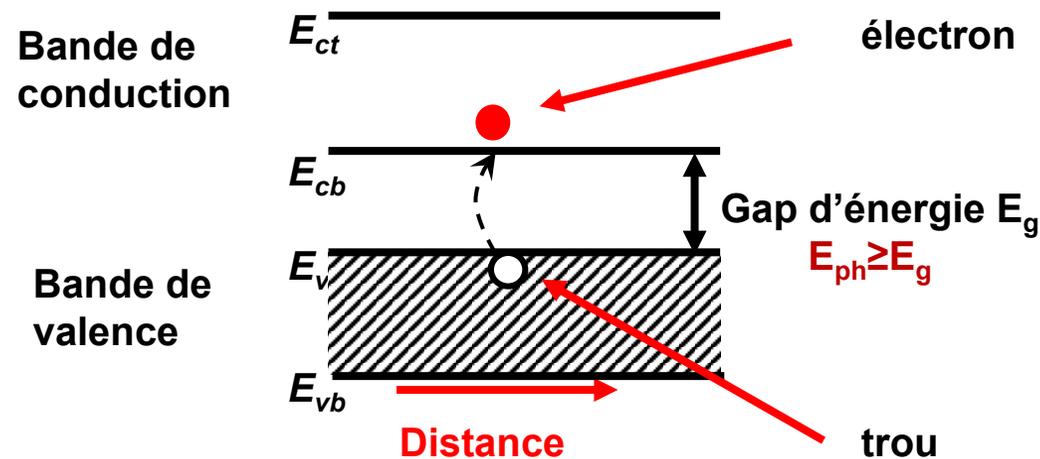
Principes et fonctionnement

- Matériaux semi conducteur:
 - Bande de conduction, où circulent les e- (charges négatives)
 - Bande de valence, où circulent les trous (charges positives)
 - Bande interdite, largeur (énergie) E_g est définie par la différence entre la bas de la bande de conduction E_c et le haut de la bande de valence E_v .



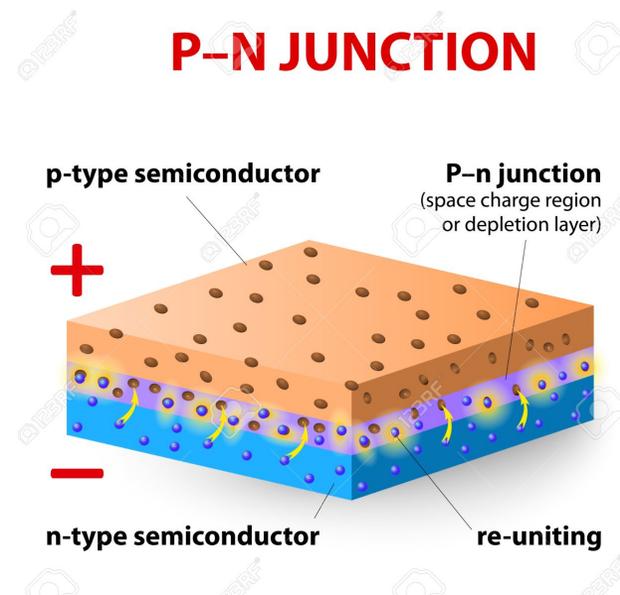
Principes et fonctionnement

- Le seuil d'énergie d'un photon (E_{ph}) pour qu'un e- se libère doit être \geq que l'énergie requise pour traverser la bande interdite (E_g). Lorsque l'e- se déplace vers la bande conduction par excitation photonique, la bande de valence se retrouve avec un «trou» donc chargée positivement.



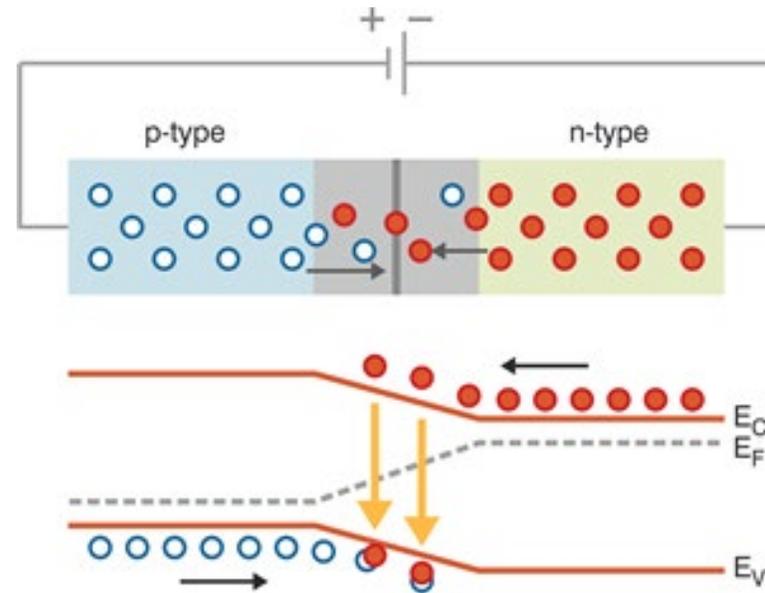
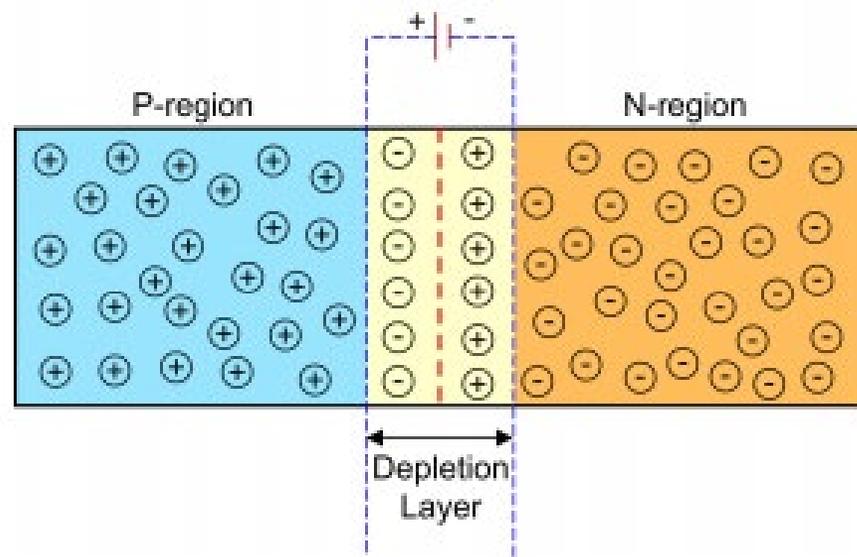
Principes et fonctionnement

- Une fois la paire électron-trou créée, il faut extraire chaque type de porteurs de part et d'autre de la cellule.
- Pour les séparer, on impose un champ électrique interne créé par une **jonction pn**, constituée de deux matériaux SC respectivement dopés positivement (**type p**) et négativement (**type n**) .



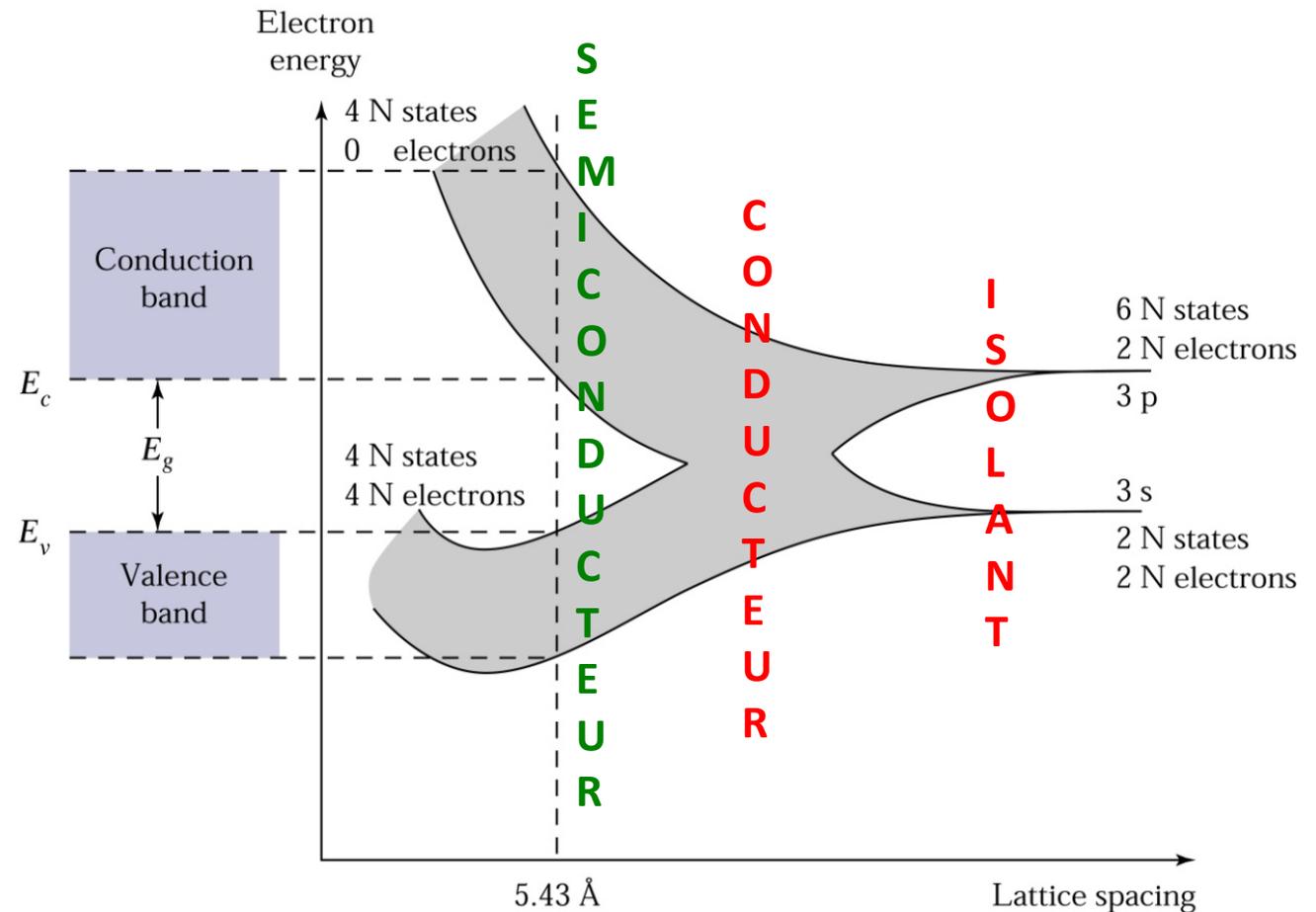
Principes et fonctionnement: Jonction pn

- Création de 3 zones (dopés N, dopés P et déplétion)
- Zone de déplétion : Les charges portées par ces atomes dopants sont responsables de la formation d'un champ électrique.



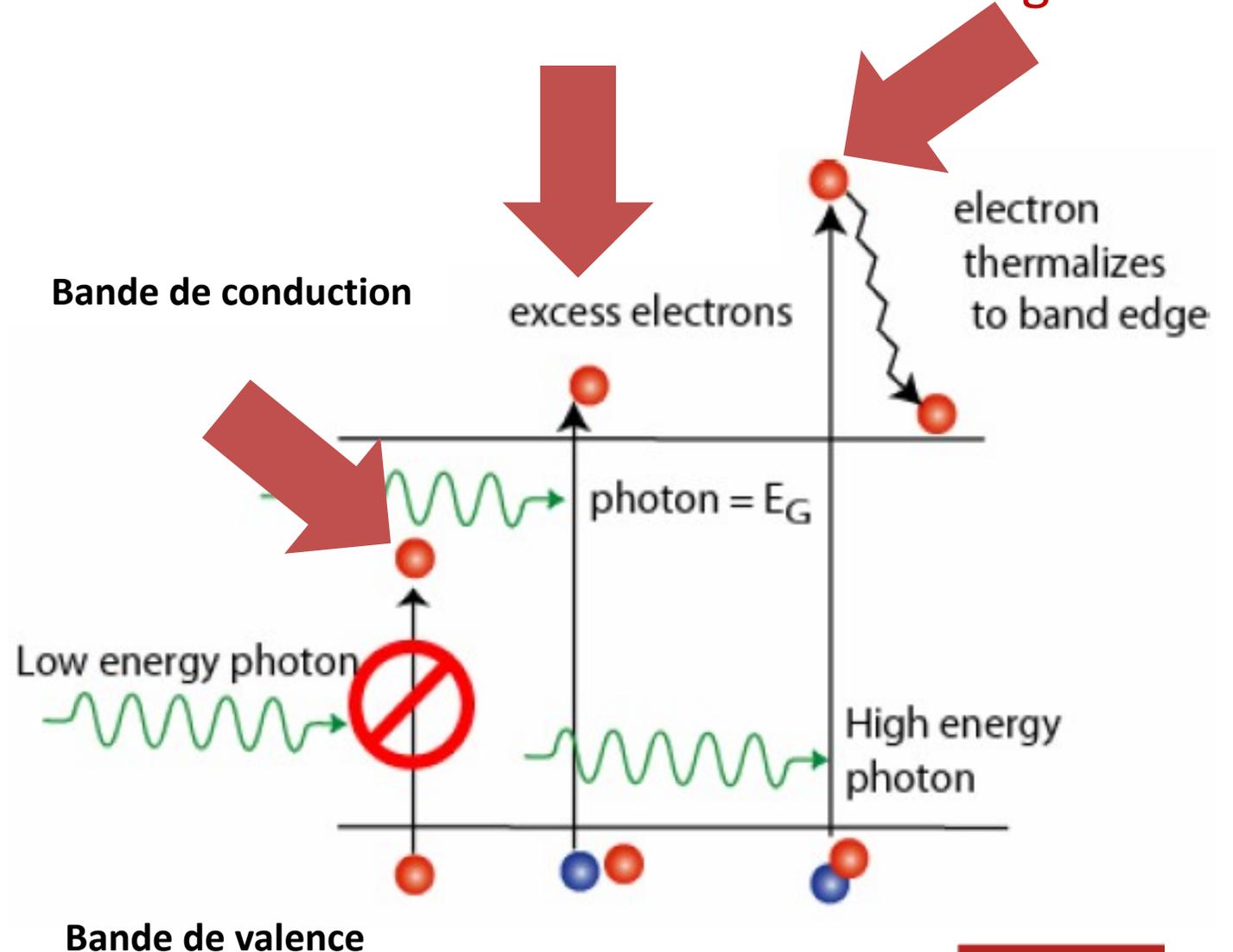
Principes et fonctionnement: Bande interdite (E_g)

- E_g (SC) = 0,5 à 3,0eV
 - Selon les différents SC
 - Séparant la bande valence à la bande de conduction
 - $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$
- Le spectre solaire culmine à 2,23eV



Principes et fonctionnement: Bande interdite (E_{g})

- Les photons à très courte λ et dont l'énergie $E_{ph} \geq 3$ eV envoient les électrons hors de la bande de conduction (phonons, perte par chaleur)



Principes et fonctionnement

- Il est possible de déterminer la longueur d'onde d'une onde électromagnétique qui correspond à E_g avec l'équation de Planck:
 - Exemple silicium:

$$E_g(\text{Silicium}) = 1,11 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_g = hc/\lambda$$

$$\lambda = hc/E_g$$

$$\lambda = 1,1185 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda = 1118 \text{ nm}$$

Principes et fonctionnement

- Exemple silicium (suite):
 - Toute radiation de longueur d'onde plus longue, telle que les micro-ondes et les ondes radio, manque d'énergie pour produire de l'électricité à partir d'une cellule solaire en silicium.
 - Tout photon ayant une énergie supérieure à 1,11 eV peut déloger un électron d'un atome de silicium et l'envoyer dans la bande de conduction.
 - Toutefois, il faut que l'excès d'énergie soit limité afin de restreindre l'énergie qui se transforme en chaleur APRÈS avoir traversé la bande interdite.

Principes et fonctionnement

- Quel serait la longueur d'onde de la bande interdite du germanium ($E_g = 0,66\text{eV}$), du phosphore de gallium ($E_g = 2,26\text{eV}$) ?

Unités et conversion

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} \quad 1\text{ nm} = 10^{-9}\text{m} \quad \text{AM} = 1/\cos(\theta)$$

- **Air Mass (AM) ou masse d'air**

- Représente la proportion de l'atmosphère que la lumière doit traverser avant d'atteindre la Terre, relative au chemin le plus direct.

- **Puissance électrique (kW)**

- La puissance d'un système énergétique dans lequel est transférée uniformément une énergie de 1 joule pendant 1 seconde.

- $1\text{W} = 1\text{ J/S}$

- **Énergie (kWh)**

- Correspond à l'énergie consommée par un appareil d'une puissance d'un kilowatt (1 000 watts) qui a fonctionné pendant une heure (1 kilowatt \times 1 heure). Le kilowattheure est une unité pratique de mesure d'énergie valant 3,6 mégajoules.

Unités et conversion

- **Énergie par unité de puissance (kWh/kWc)**
 - Correspond à la quantité d'énergie produite pour une durée donnée (habituellement un an) par unité de puissance crête installée.
- **Puissance crête (kWc ou en anglais kWp)**
 - Correspond à la puissance électrique délivrée par un système PV dans des conditions standards d'ensoleillement (1000 W/m^2), de température (25°C) et de standardisation du spectre de la lumière (AM 1,5).
 - La puissance crête correspond plus ou moins à la notion de puissance maximale.

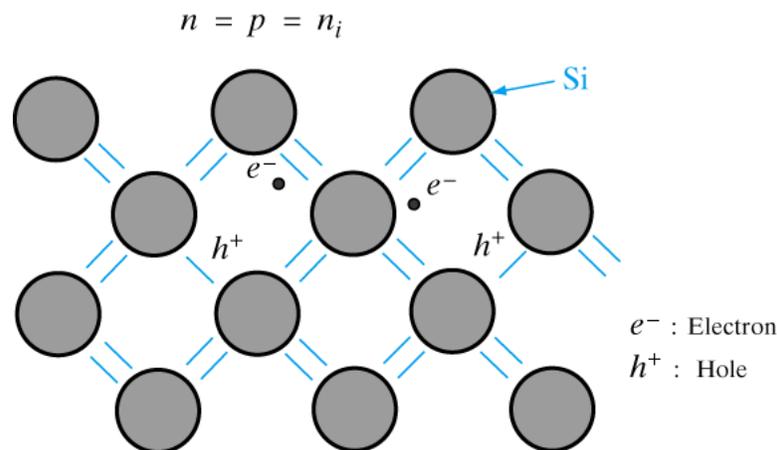
Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Principes et fonctionnement
- ***Caractéristiques***
- Différentes technologies
- Dimensionnement
- Applications
- Conclusion

Si vous visionner en asynchrone cette présentation, prenez une pause avant de continuer!

Caractéristiques

- Semi conducteur intrinsèque
 - Tous les porteurs p proviennent de la génération électrons-trous
 - La concentration d'e- est fortement dépendante de la température
 - $N(e^-) = p(\text{trou}) = n_i$
 - $n \cdot p = n_i^2$
 - Taux de génération de porteurs égale taux de recombinaison



Caractéristiques :Semi-conducteur intrinsèque

• Formules

- K_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ m²kg/s²K)
- N_c : effective density of states in conduction band (cm⁻³)*
- N_v : effective density of states in valence (cm⁻³)*
- n_i : intrinsic carrier concentration (cm⁻³)*
- E_f : énergie de fermi

*Données par une grille selon la T et le matériau

$$E_g = E_c - E_v$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{(E_c - E_F)}{K_B T}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{(E_F - E_v)}{K_B T}\right)$$

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2K_B T}\right)$$

$$E_i = E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \left(\frac{K_B T}{2}\right) \ln \frac{N_v}{N_c}$$

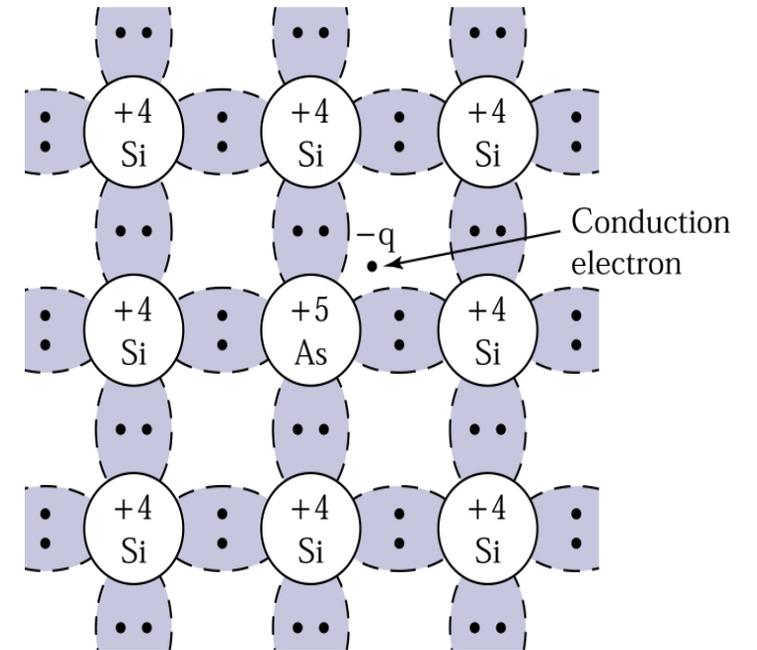
Caractéristiques: Semi-conducteur intrinsèque

- Niveau de Fermi (cm^{-3})
 - Traduit la répartition des e- dans un système en fonction de la température (K)
- Probabilité d'occupation d'un état par un électron (%)

$$f(E) = \frac{1}{\exp((E - E_F) / K_B T) + 1}$$

Caractéristiques

- Semi conducteur extrinsèque
 - Contient des atomes externes (impuretés)/ajout de donneurs/dopage
 - La concentration des e- ne dépend **pas** fortement de la température
 - Ex: L'arsenic (ou phosphore) remplace un atome de silicium dans le cristal. Figure ci-contre.
 - Un électron additionnel peut devenir "ionisé" pour devenir un électron de conduction.



Cet e- a été **donné** à la bande de conduction

Semi-conducteur extrinsèque

- Formules

$$n_i^2 = p \cdot n, \text{ mais } n \neq p$$

- Type n : $n \approx N_{\text{Donneur}}$

$$n \gg p$$
$$n_i^2 = n_n p_n$$
$$N_D = n = N_c \exp\left(-\frac{(E_c - E_F)}{K_B T}\right)$$
$$E_c - E_F = K_B T \ln\left(\frac{N_D}{N_c}\right)$$

Charge minoritaire (trous)

$$p_0 = n_i^2 / N_D$$

- Type p : $p \approx N_{\text{Accepteur}}$

$$p \gg n$$
$$n_i^2 = n_p p_p$$
$$N_A = p = N_v \exp\left(-\frac{(E_F - E_v)}{K_B T}\right)$$
$$E_F - E_v = K_B T \ln\left(\frac{N_A}{N_v}\right)$$

Charge minoritaire (e⁻)

$$n_0 = n_i^2 / N_A$$

Caractéristiques: Dopage

- Le dopage par impureté permet de modifier les propriétés de conductivité en changeant la quantité de porteurs de charges (électrons, trous), soit les charges négatives (couche n) ou les charges positives (type p) dans un SC.
- En effectuant deux dopages, de part et d'autre de la cellule, il en résulte un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs.
- Le champ électrique permet aux électrons de circuler uniquement dans une seule direction, on parle alors de diode photoélectrique.
- Augmentation de la tension (V).

Caractéristiques: Efficacité

- L'efficacité d'une cellule solaire est le rapport entre la quantité d'énergie électrique qu'elle produit et la quantité d'énergie solaire qui la frappe.
- Facteurs influenceurs:
 - L'énergie du photon doit être suffisamment grande pour déloger les électrons, sans dépasser la bande interdite
 - L'épaisseur du matériau semi-conducteur
 - La réflectivité de la cellule solaire

Caractéristiques

- Une cellule est caractérisée par sa courbe caractéristique $I(V)$ sous un rayonnement.
- À partir de cette courbe $I(V)$, on définit trois facteurs :
 - I_{SC} (le courant de court-circuit) = au courant produit à tension nulle $V=0$.
 - V_{OC} (la tension de circuit ouvert) = à la tension de la cellule à courant nul (dépend en particulier de la T , de l'éclairement, du dopage et des matériaux utilisés)

– Fill Factor:

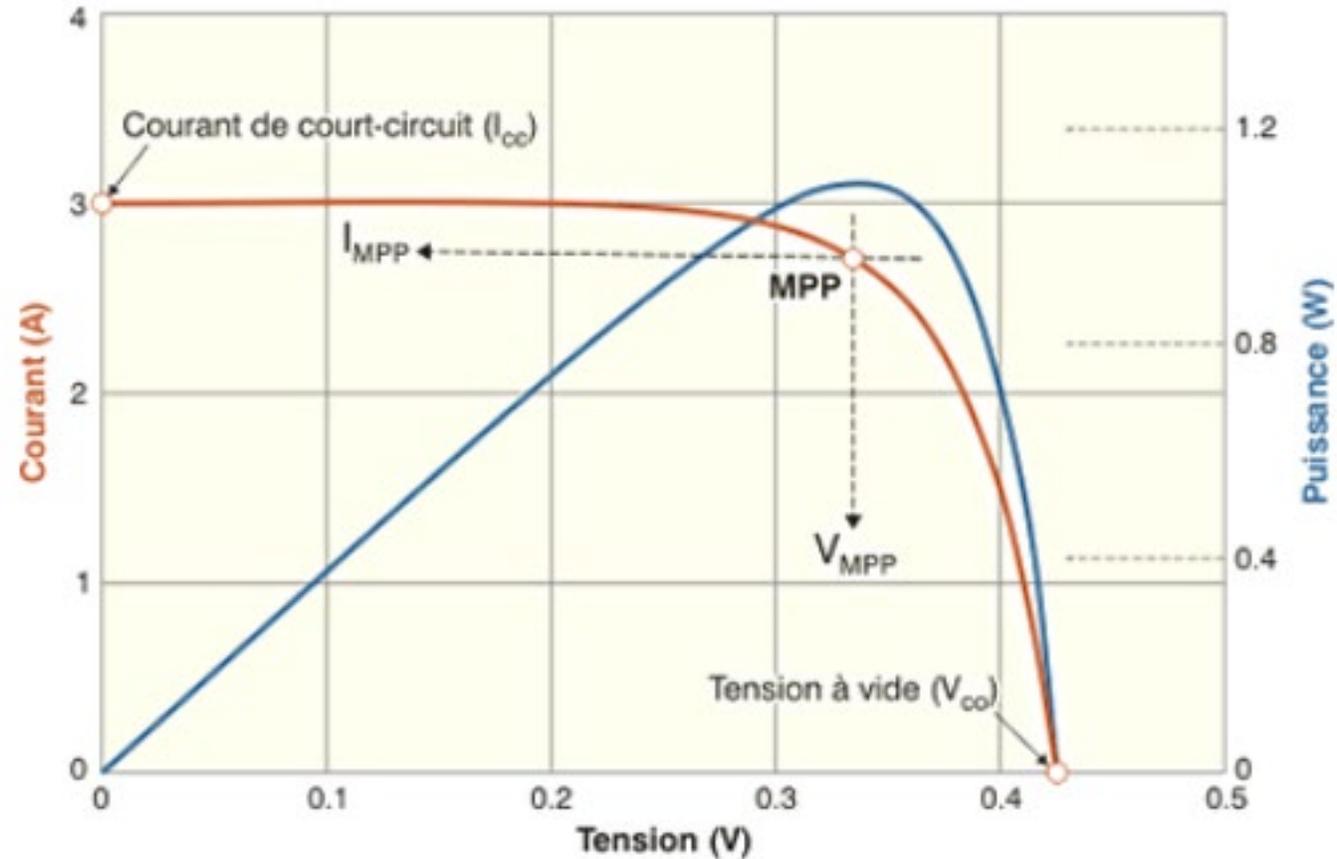
$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{OC} I_{SC}}$$



Question

- Qu'est-ce qui permet d'additionner la tension des panneaux PV?
 - A. Un branchement en parallèle
 - B. L'ajout de deux sources lumineuses
 - C. Un branchement en série
 - D. L'ajout de jonctions PN
 - E. L'augmentation du rayonnement incident

Caractéristiques: Courbe de puissance



$$MPP = I_{sc}(\text{max puissance}) \times V_{oc}(\text{max puissance})$$

Caractéristiques: Efficacité

- Définition

$$\text{Efficacité} \equiv \eta = \frac{\text{Puissance sortante}}{\text{Puissance entrante}} = \frac{V_{\text{mp}} \cdot J_{\text{mp}}}{\Phi}$$

- Fill factor

$$\text{Fill Factor} \equiv FF = \frac{V_{\text{mp}} \cdot J_{\text{mp}}}{V_{\text{oc}} \cdot J_{\text{sc}}}$$

- Finalement

$$\text{Efficacité} \equiv \eta = \frac{\text{Puissance sortante}}{\text{Puissance entrante}} = \frac{V_{\text{mp}} \cdot J_{\text{mp}}}{\Phi} = \frac{FF \cdot V_{\text{oc}} \cdot J_{\text{sc}}}{\Phi}$$



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

