

Modélisation d'un système PV et sa commande associée sous Simulink

Gisement solaire

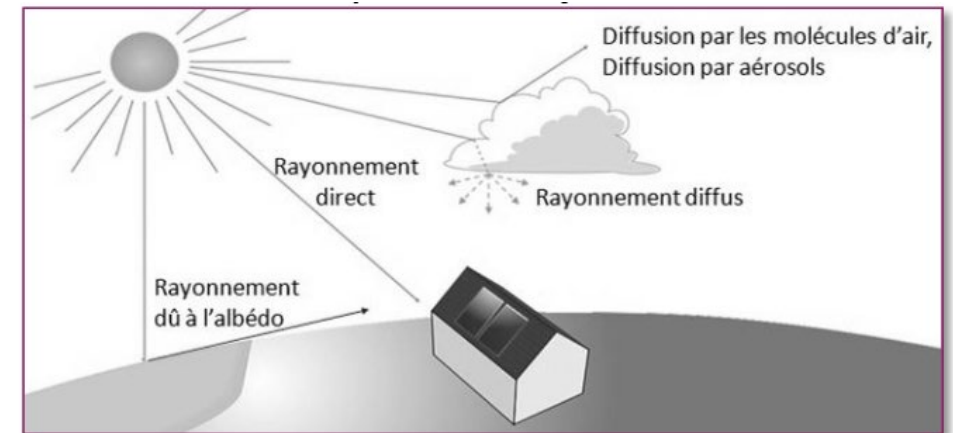
Quelques définitions :

Rayonnement solaire : ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil.

Eclairement solaire : flux énergétique issu du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface exprimé en watts par mètre carré (W/m^2).

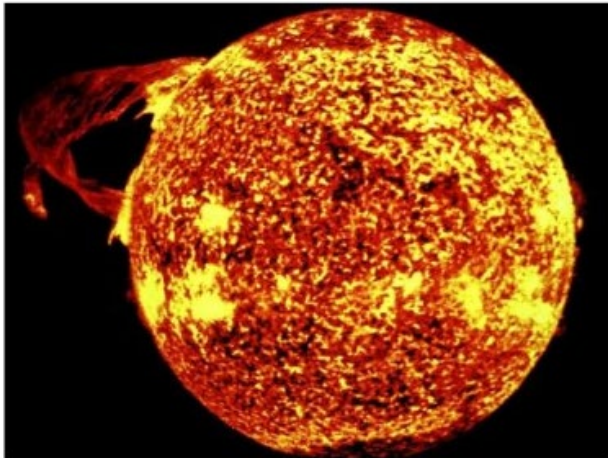
Irradiation solaire : quantité d'énergie solaire horaire issue du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface, exprimée en watt-heures par mètre carré (Wh/m^2). Elle se décompose en 3 parties :

- Rayonnement direct qui a fait un trajet dans l'atmosphère sans déviation géométrique.
- Rayonnement diffus qui résulte des diffractions du rayonnement direct par les nuages et les particules atmosphériques
- Rayonnement réfléchi dû à l'albédo qui résulte de la réflexion du rayonnement par les surfaces proches



Source : www.solarpraxis.de

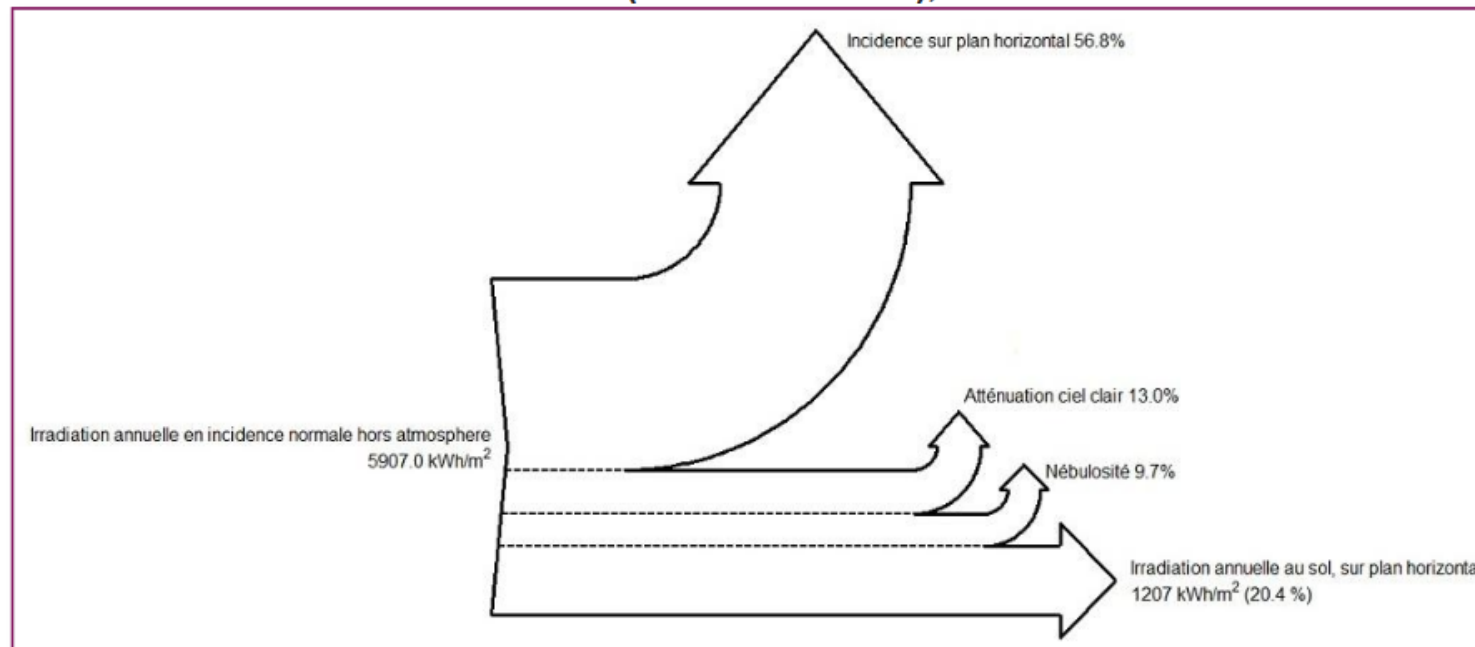
Gisement solaire



En 30 min, La terre et son atmosphère perçoivent du soleil environ 100.000 TWh

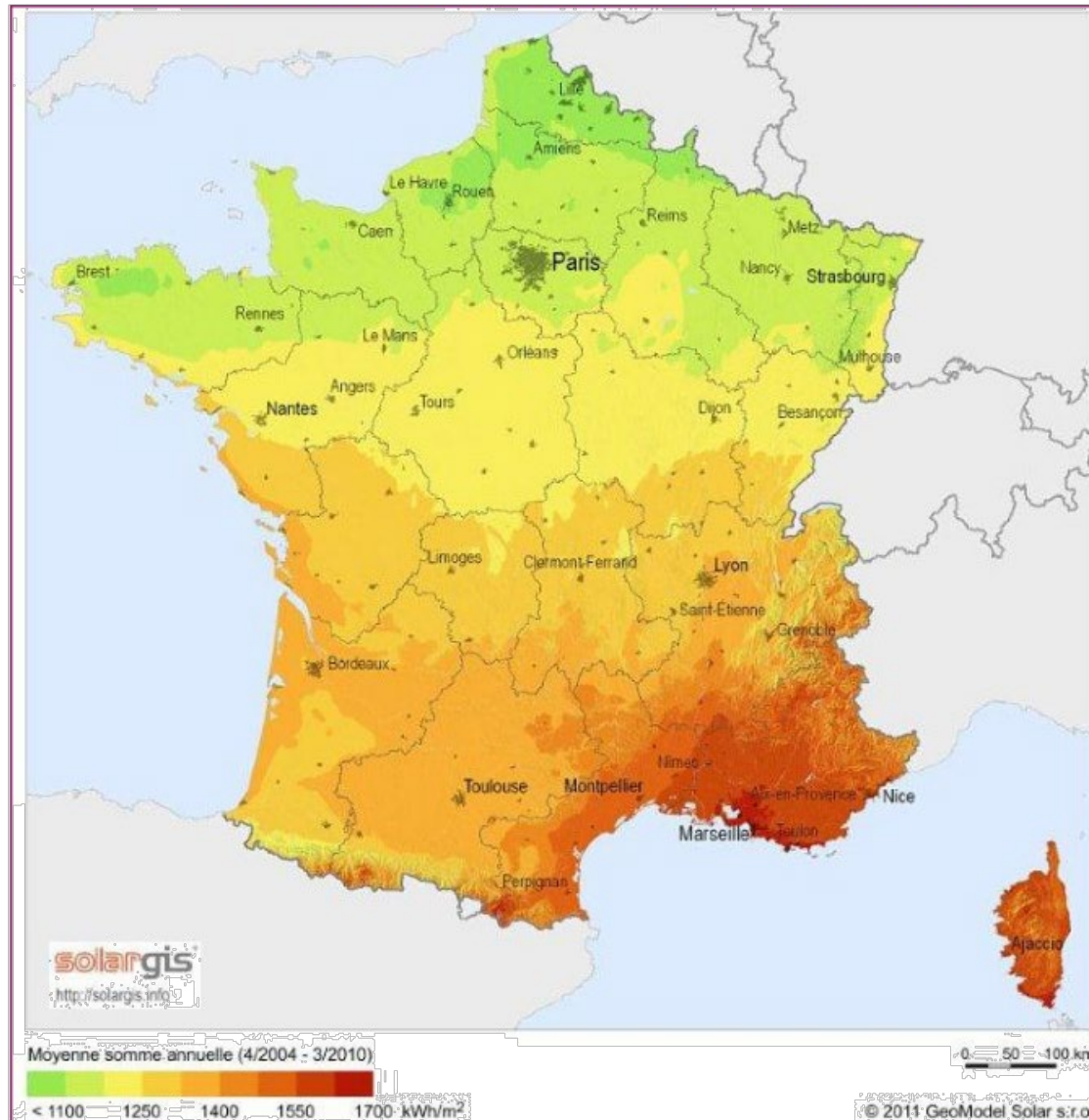
Mais :

Diagramme de pertes d'irradiation entre le haut de l'atmosphère et la surface terrestre, pour la ville de Paris (latitude : 48°48'N), en France



Gisement solaire

Carte de l'irradiation globale horizontale en France



Source : Solargis

Instruments de mesure de l'irradiation :



*Mesure de
l'irradiance par
flux thermique*

Pyranomètre ombré

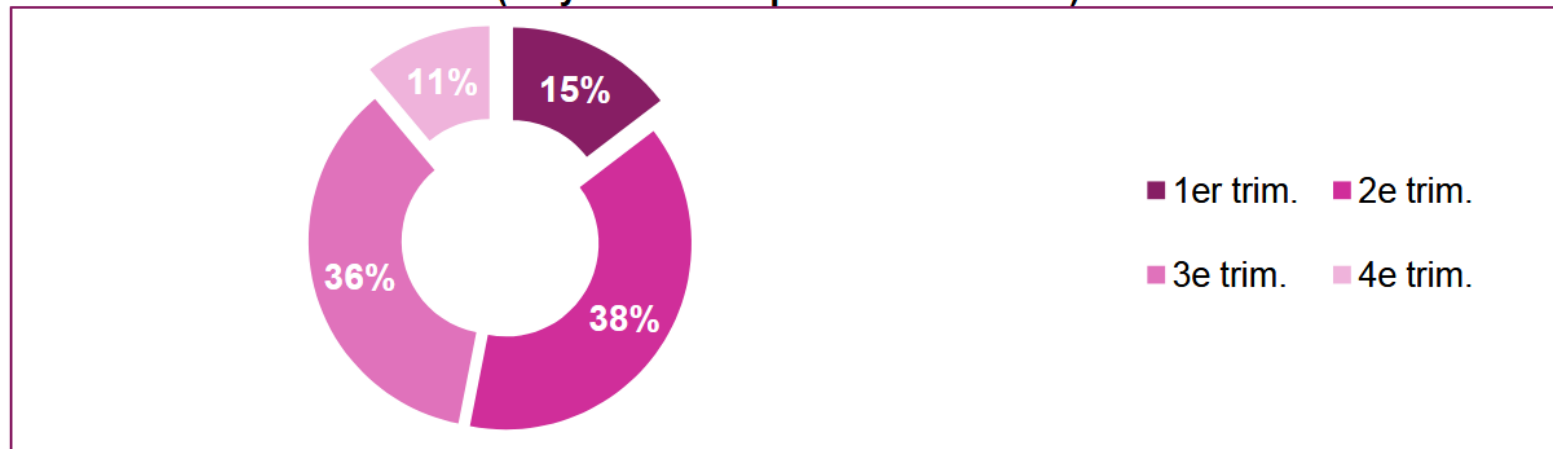


*Mesure de
l'irradiance
directe*

Pyrhéliomètre

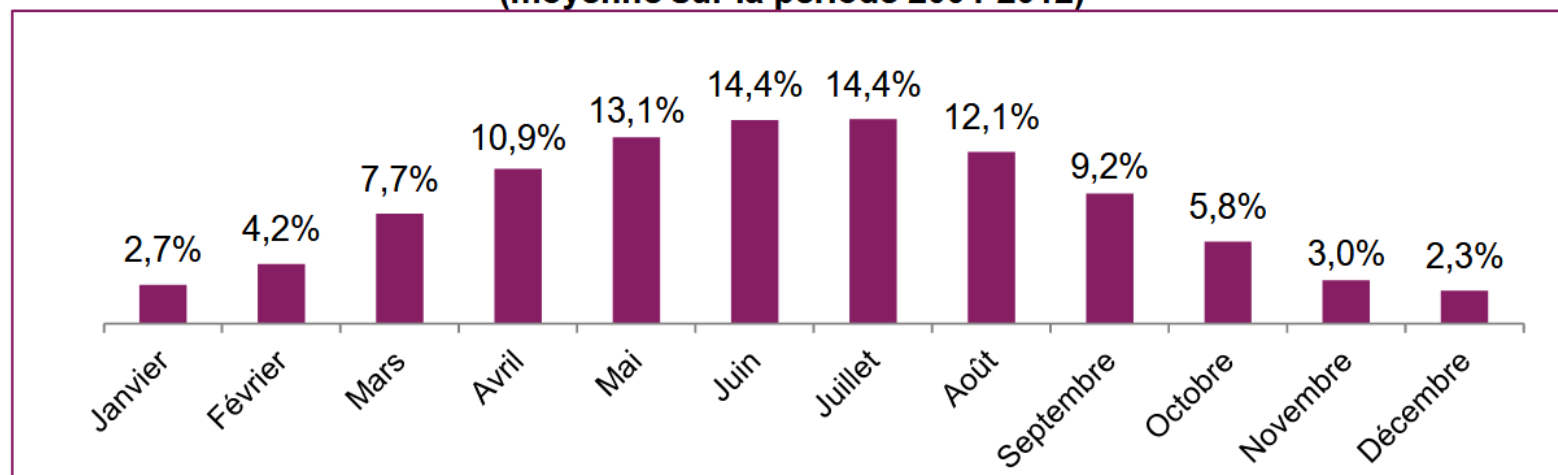
Gisement solaire

Répartition trimestrielle de l'irradiation annuelle globale horizontale en France
(moyenne sur la période 2004-2012)



Source : Centre Observation, Impacts, Energie - O.I.E – MINES ParisTech & ACOFI

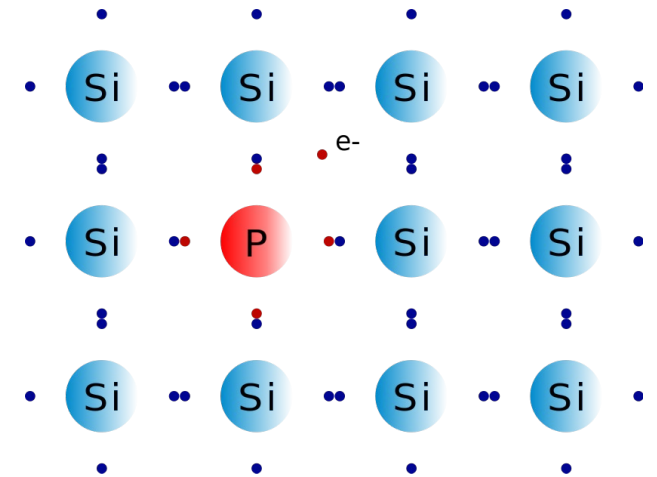
Répartition mensuelle de l'irradiation annuelle globale horizontale en France
(moyenne sur la période 2004-2012)



Source : Centre Observation, Impacts, Energie - O.I.E – MINES ParisTech & ACOFI

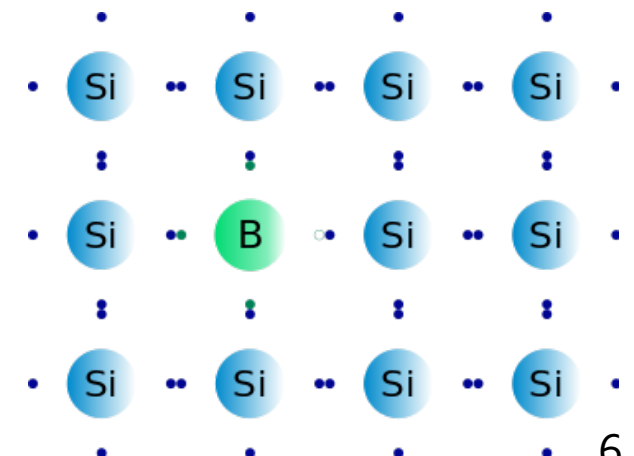
Constitution d'une cellule photovoltaïque

Dopage de type N du silicium au Phosphore :

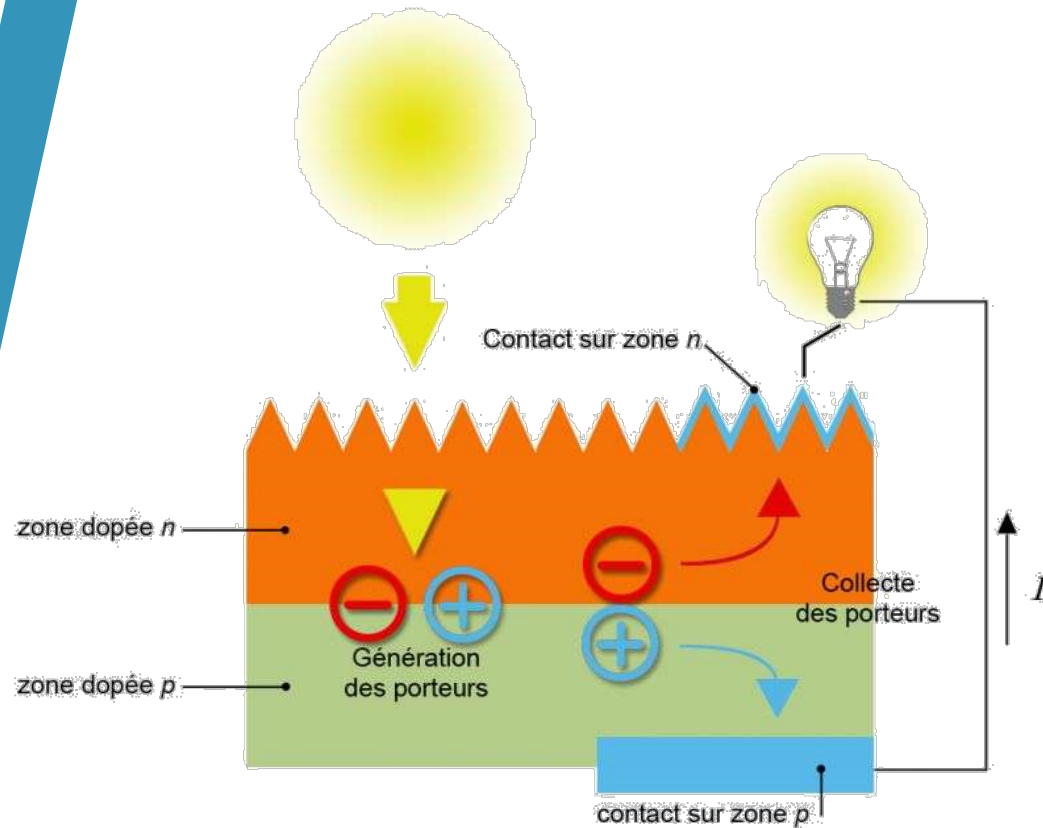


forte densité d'électrons

Dopage de type P du silicium au Bore :

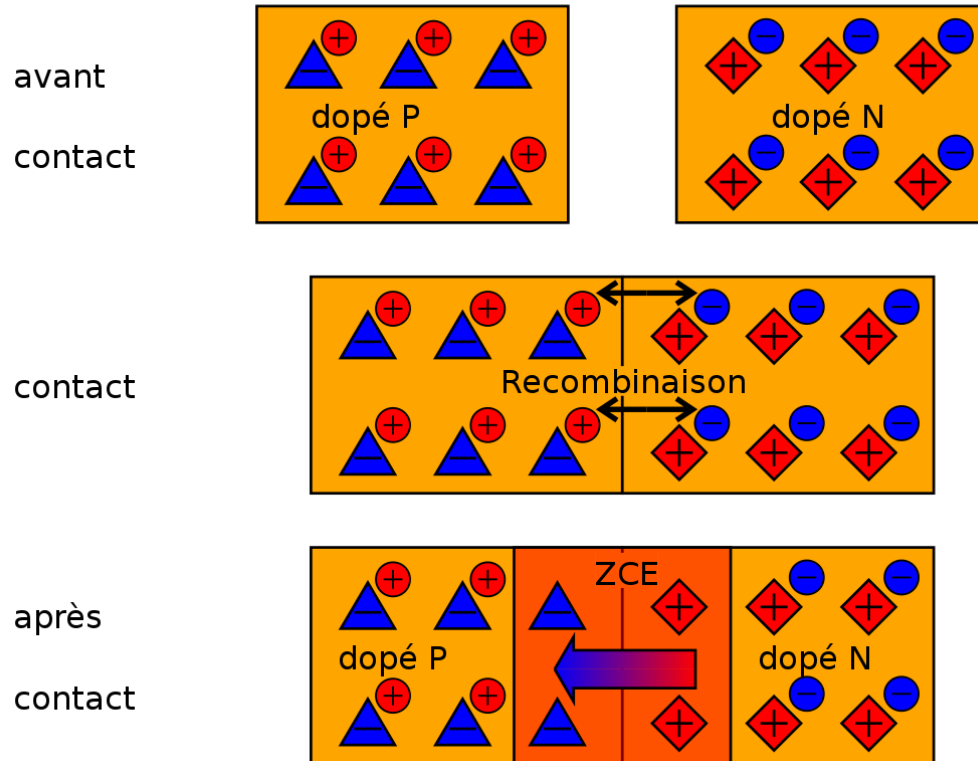


Fort déficit d'électrons



La base: une jonction PN

Constitution d'une cellule photovoltaïque

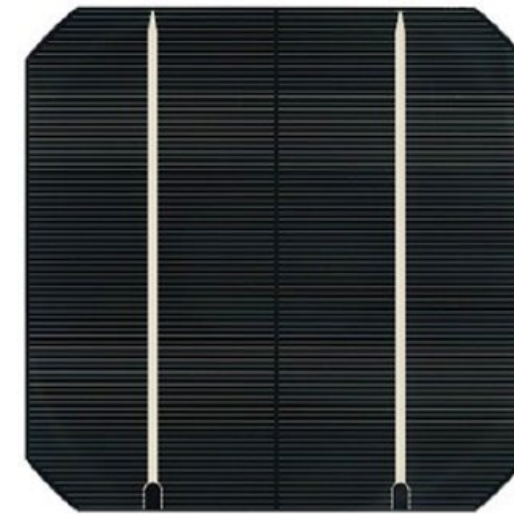
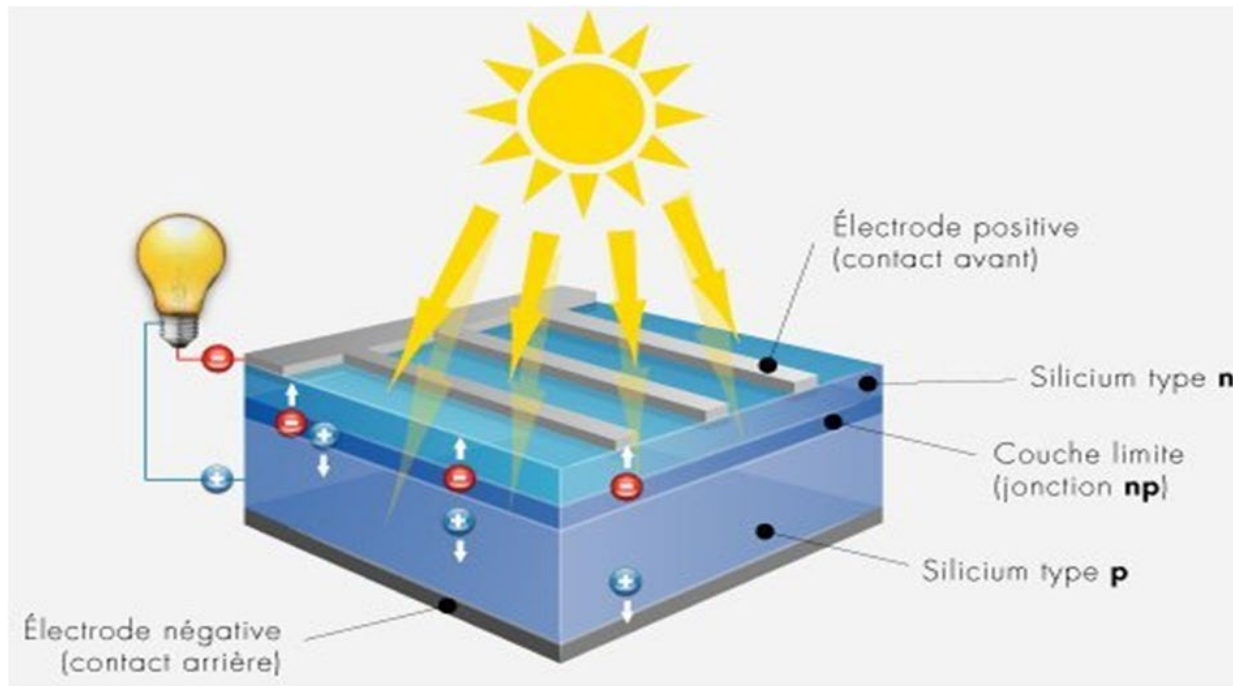


Les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction

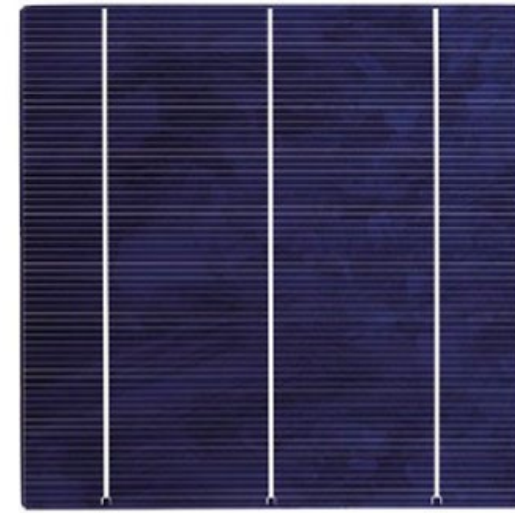


La zone de transition est créée (jonction PN)

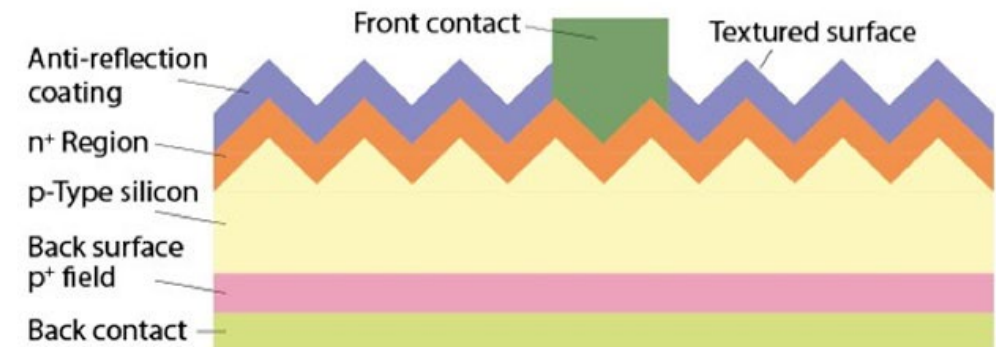
Constitution d'une cellule photovoltaïque



Monocrystalline
silicon solar cell

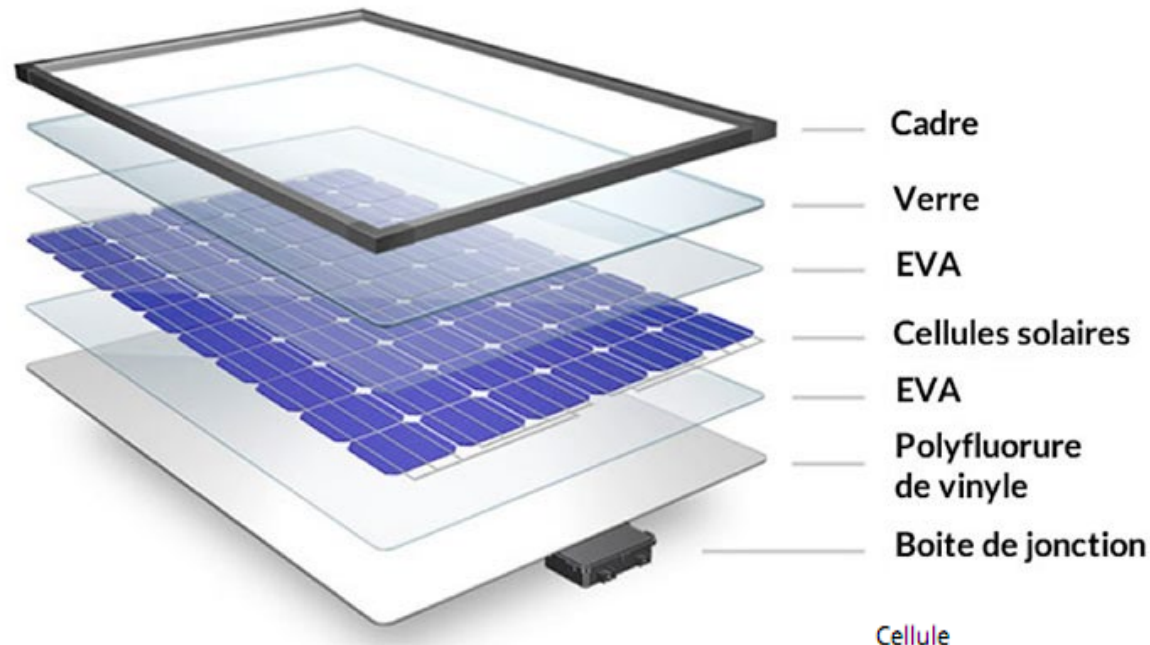


Polycrystalline
silicon solar cell

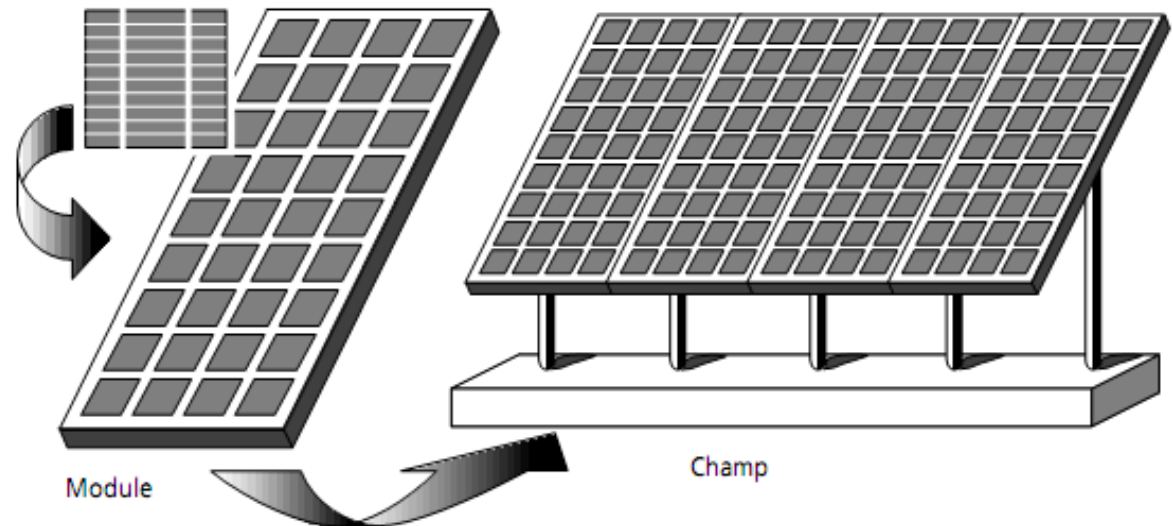


Surface texturée pour réduire la réflexion

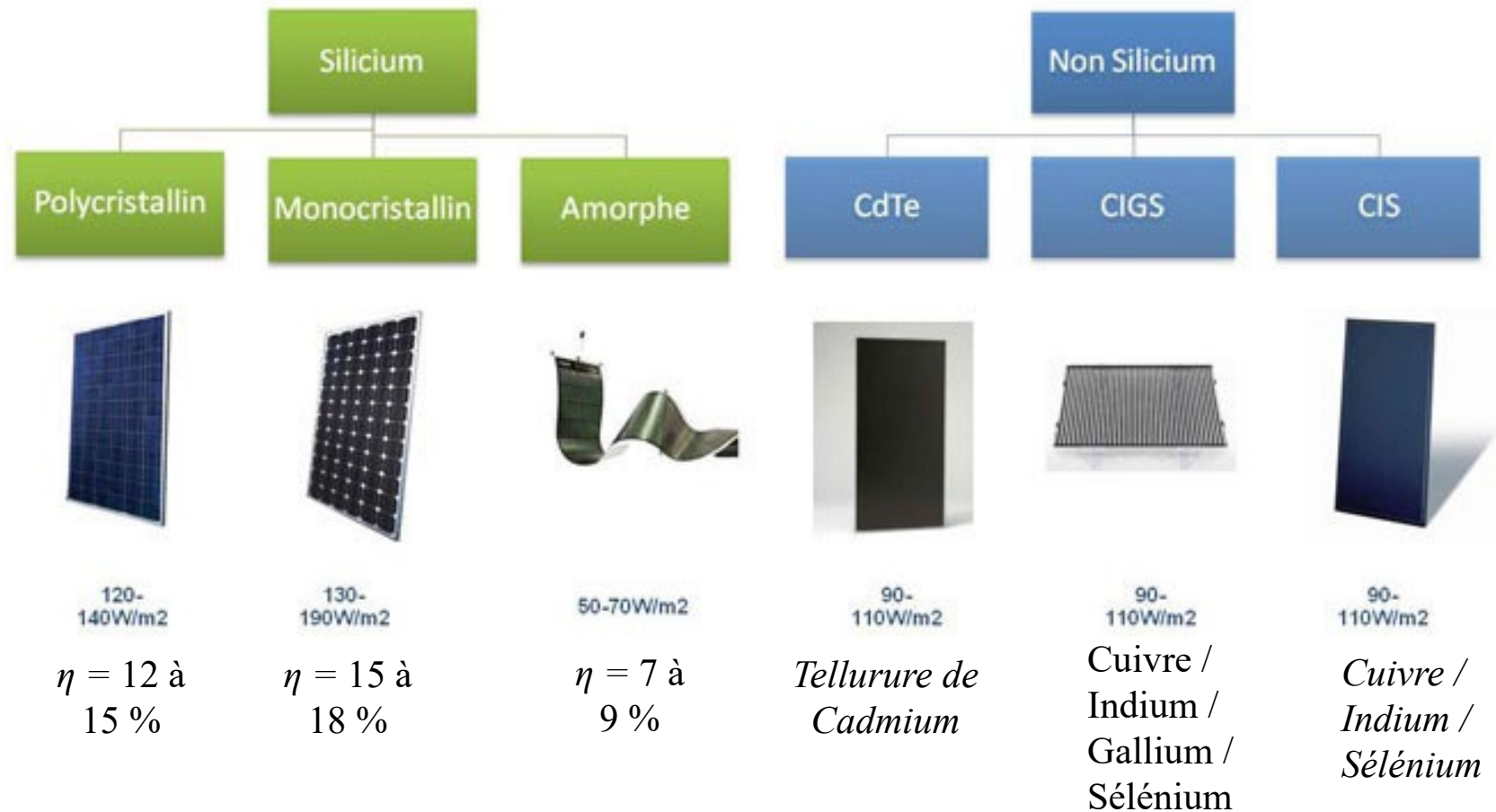
Constitution de modules photovoltaïques



Cellule



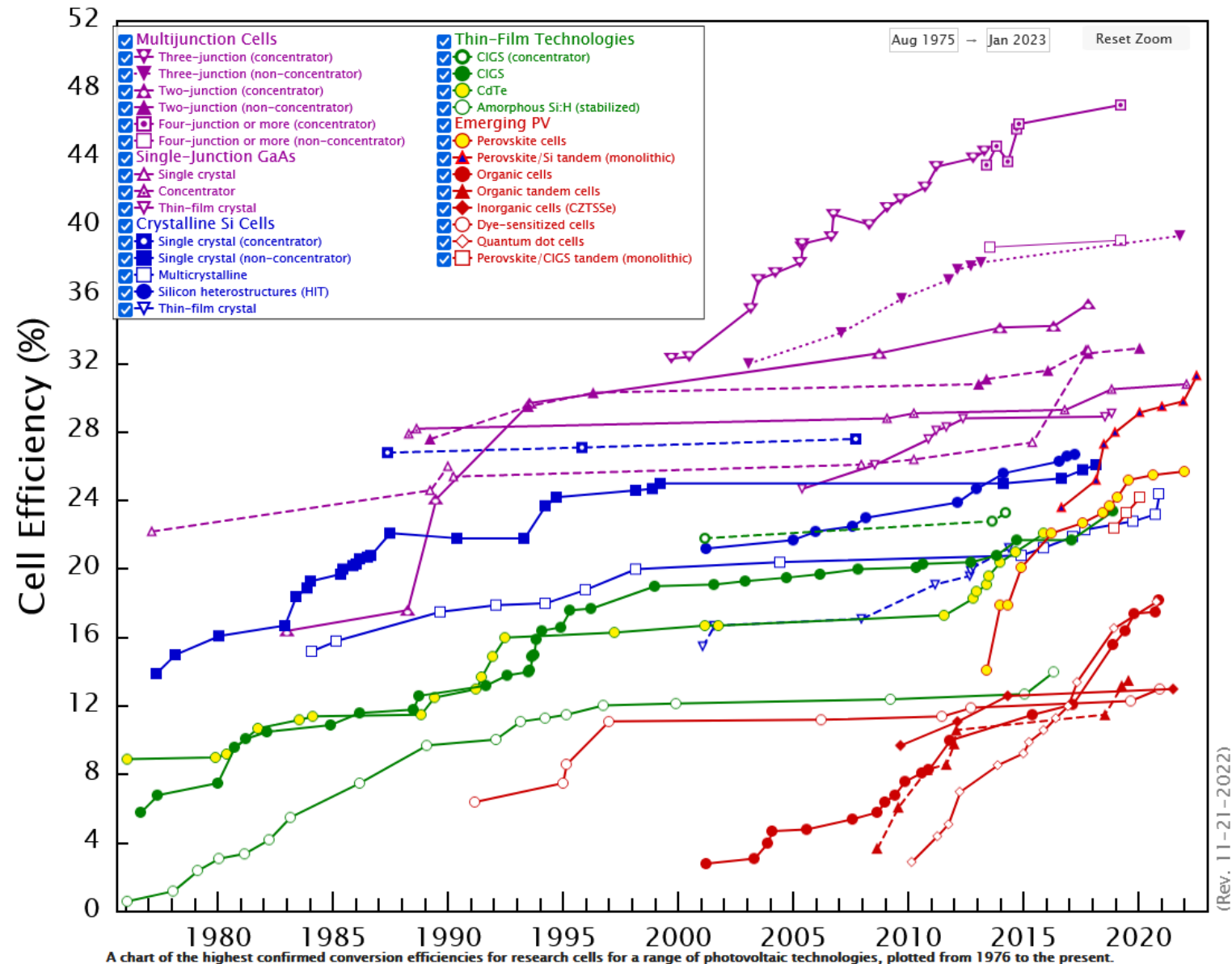
Technologies des cellules photovoltaïques



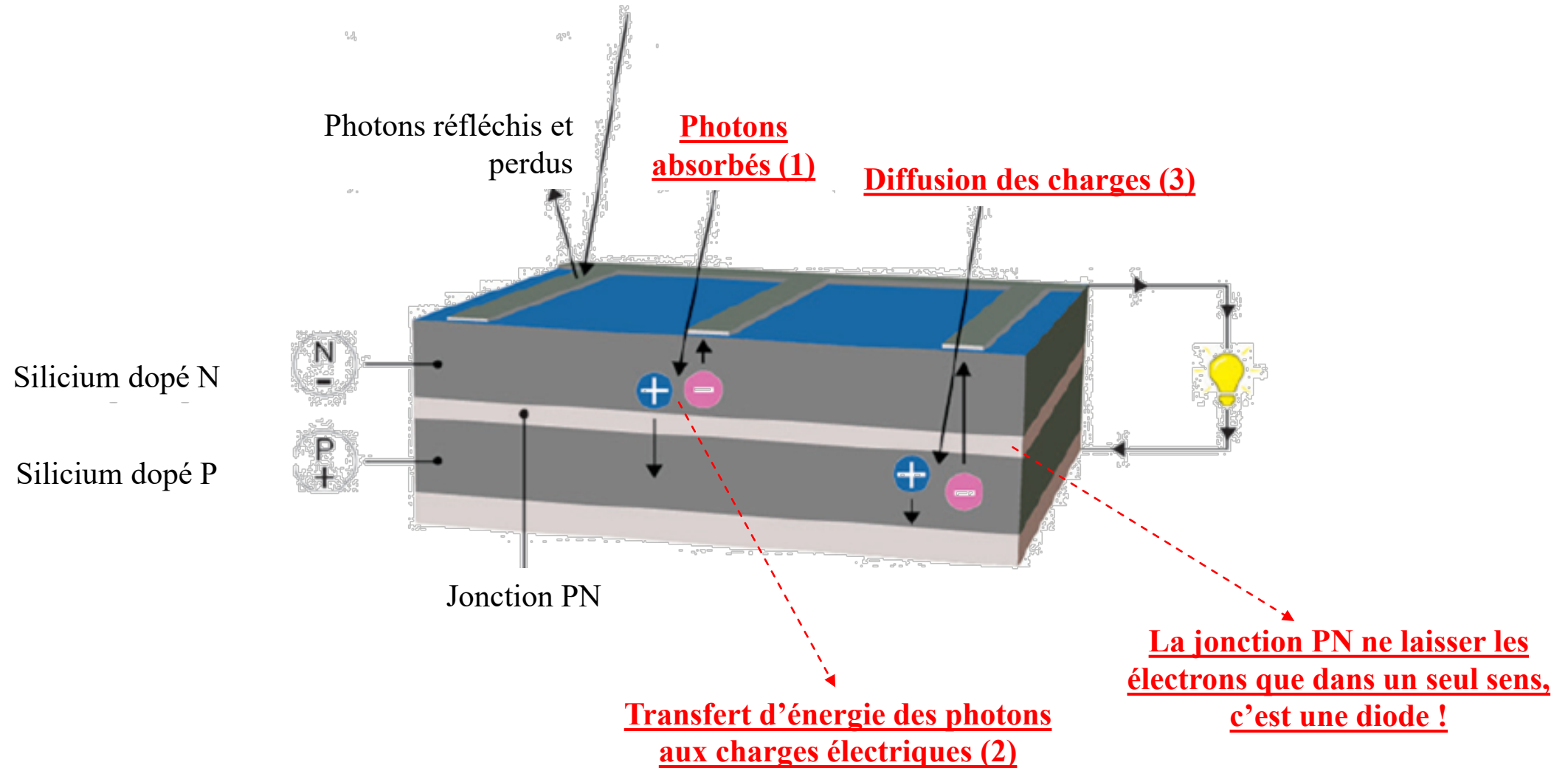
-Dépendance du rendement avec l'augmentation de la température

- Prix supérieur
- Faible sensibilité aux élévations de températures
- Meilleure production en lumière diffuse

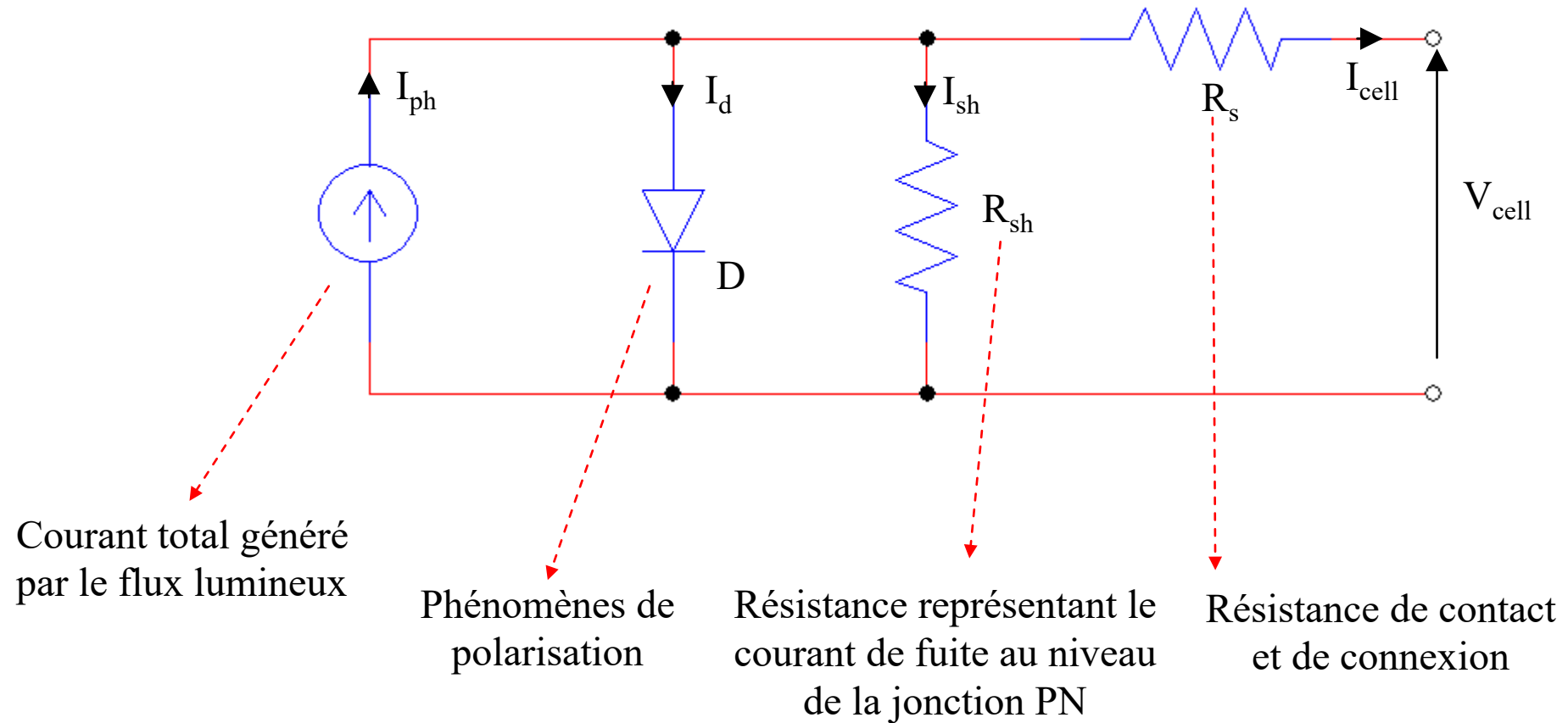
Technologies des cellules photovoltaïques



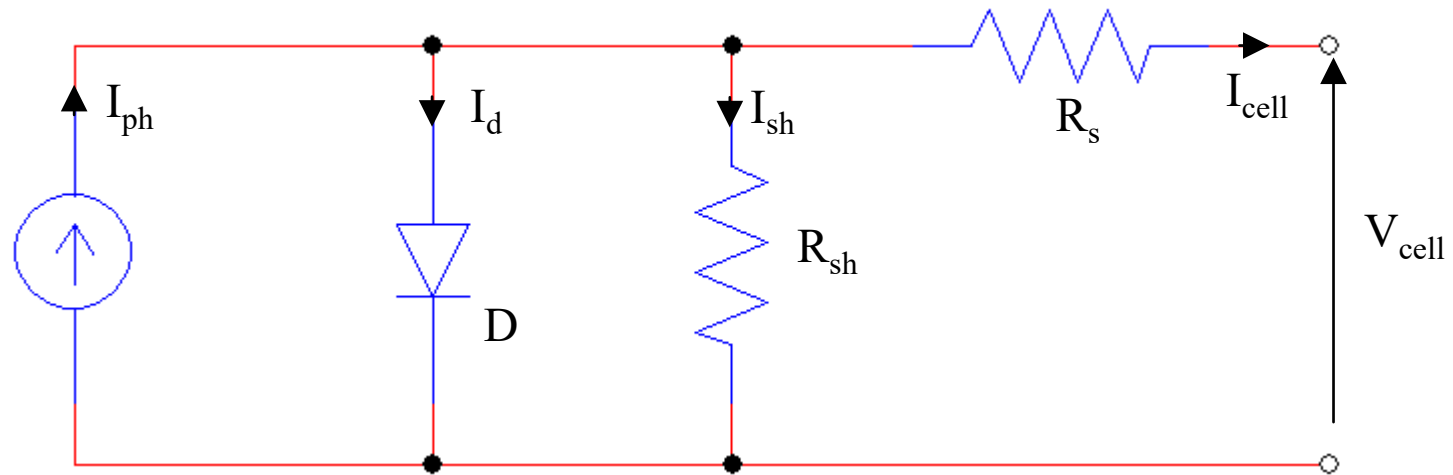
Principe de fonctionnement



Modèle d'une cellule photovoltaïque



Modèle d'une cellule photovoltaïque



$$I_d = I_{\text{sat}} \left[\exp \left(\frac{V_{\text{cell}} + I_{\text{cell}} \cdot R_s}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] \quad \text{avec} \quad V_t = \frac{k \cdot T_f}{q}$$

$$I_{\text{sat}} = I_{\text{rs}} \left[\frac{T_f}{T_{\text{ref}}} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_f} \right) \right] \quad \text{avec} \quad I_{\text{rs}} = \frac{I_{\text{cc}}}{\exp \left(\frac{V_{\text{cell}_0}}{A \cdot V_t} \right) - 1}$$

Courant de saturation !

$$I_{\text{ph}} = \frac{G}{G_r} [I_{\text{cc}} + k_t (T_f - T_{\text{ref}})]$$

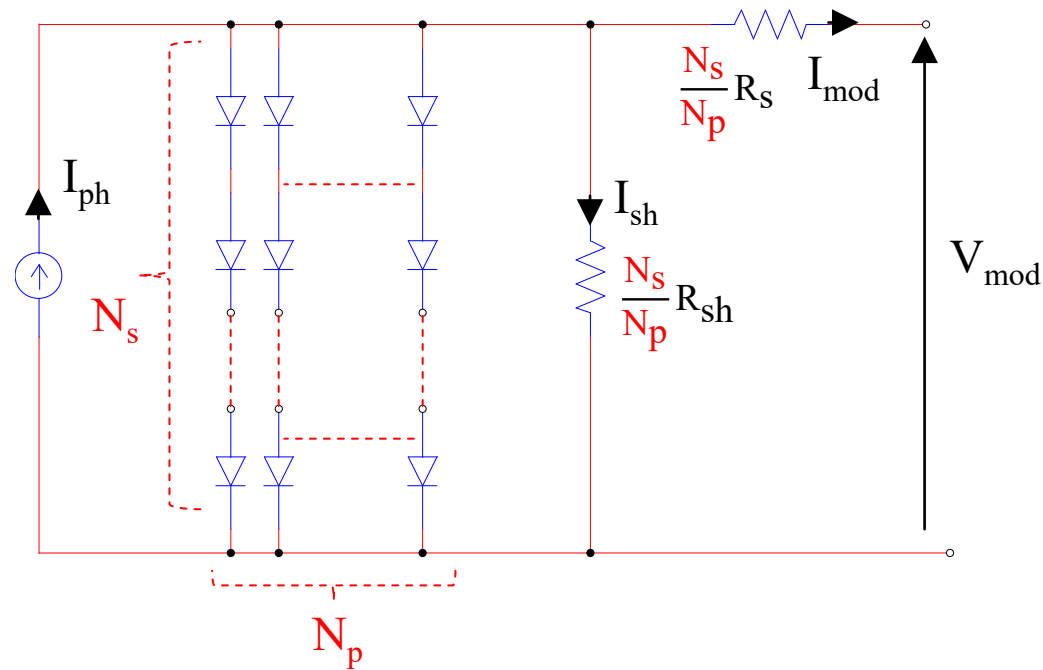
Dans ces équations, on a :

- A : facteur d'idéalité de la jonction (A=2 pour une diode idéale)
- k : constante de Boltzmann ($1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$),
- E_g : énergie nécessaire pour changer de bande 1.12 eV (silicium)
- G : irradiance en W/m^2
- G_r : irradiance de référence (1000 W/m^2)
- k_t : coefficient de température en $\text{A/}^\circ\text{K}$
- I_{cc} : courant de court-circuit à 25°C et à 1000 W/m^2
- I_{sat} : courant de saturation de la diode
- q : charge de l'électron ($-1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
- T_f : température de la cellule en $^\circ\text{K}$
- T_{ref} : température de référence ($298.15 \text{ }^\circ\text{K}$)
- V_{cell_0} : tension à vide de la cellule
- V_t : potentiel thermodynamique,

Modèle d'un module photovoltaïque

N_s cellules en série

N_p cellules en //



$$I_d = N_p \cdot I_{sat} \left[\exp \left(\frac{\frac{V_{mod}}{N_s} + I_{mod} \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] \quad \text{avec} \quad V_t = \frac{k \cdot T_f}{q}$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} [I_{cc} + k_t (T_f - T_{ref})]$$

$$I_{sat} = I_{rs} \left[\frac{T_f}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_f} \right) \right] \quad \text{avec} \quad I_{rs} = \frac{\frac{I_{cc}}{N_p}}{\exp \left(\frac{V_{cell_0}}{A \cdot V_t} \right) - 1}$$

$$V_{cell_0} = V_{mod_0} / N_s$$

Module PV à simuler avec Simulink

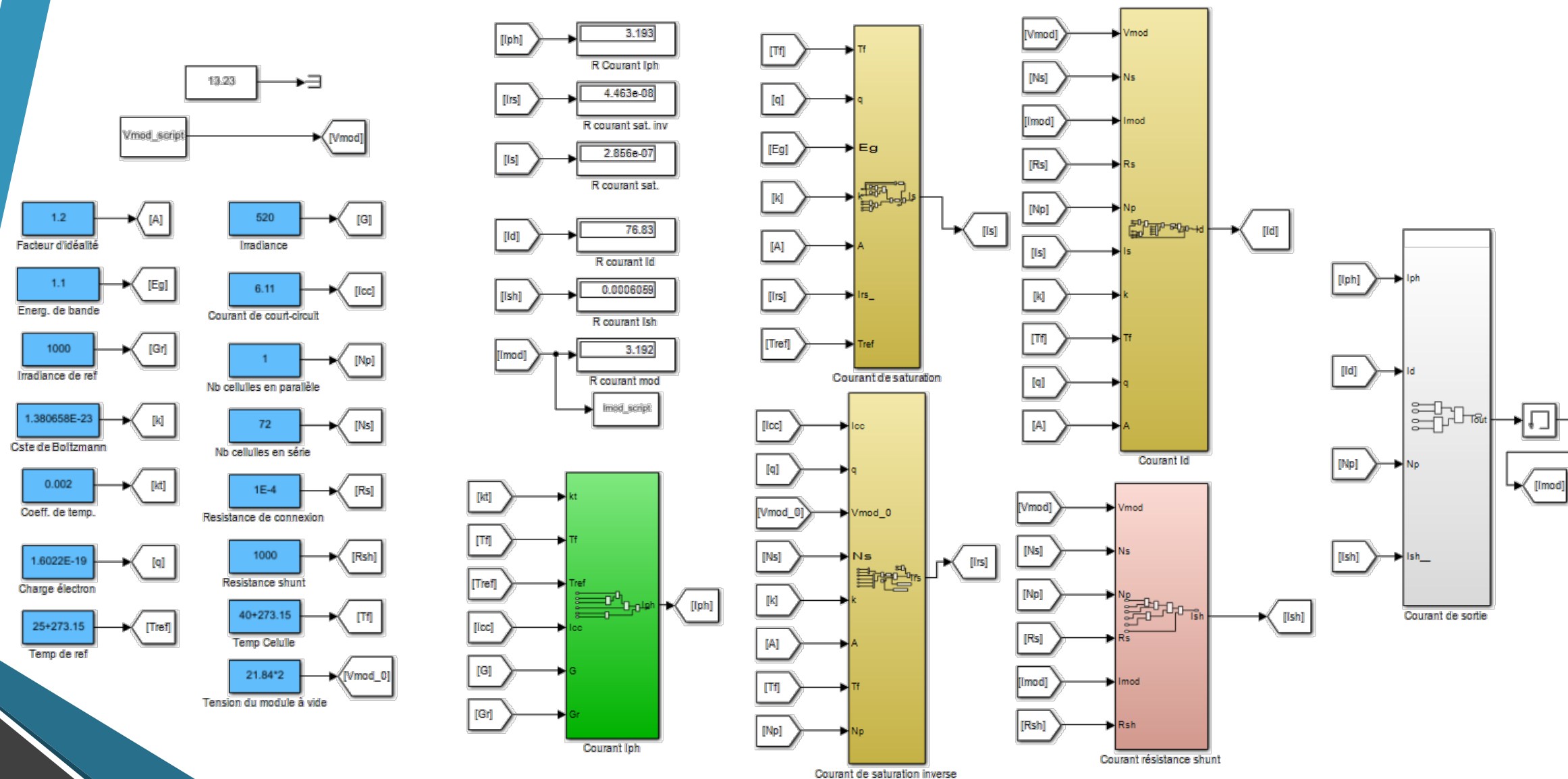
N_s cellules en série : 36

N_s cellules en // : 1



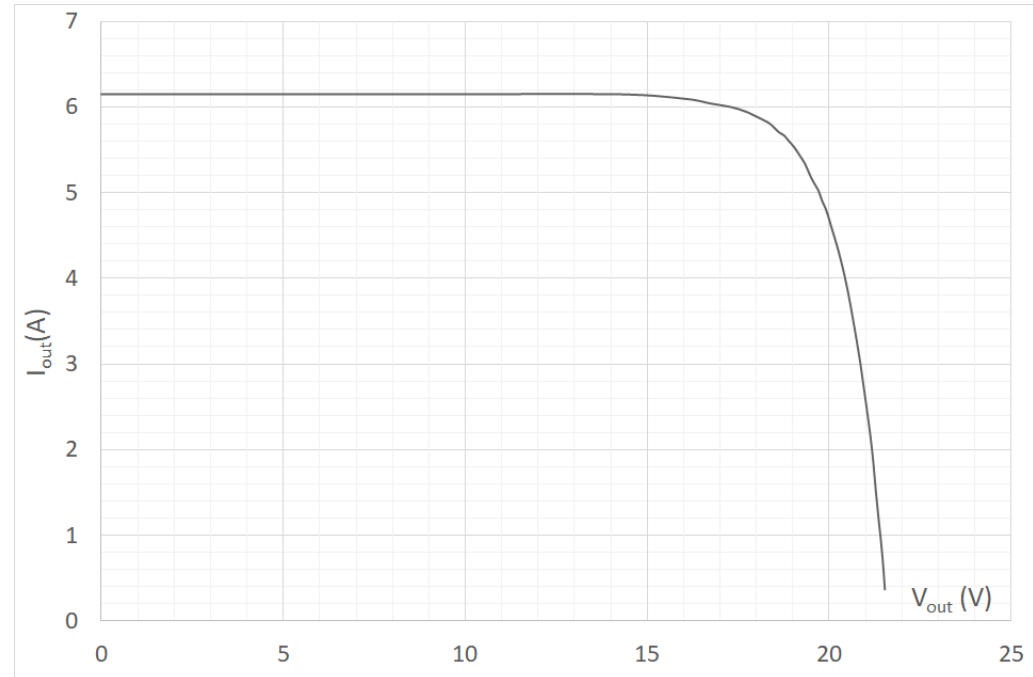
TECHNICAL DATA												
Module Type	DS10	DS20	DS40	DS50	DS60	DS75	DS80	DS100	DS120	DS125	DS130	DS150
Peak Power Watts (Pmax)	10	20	40	50	60	75	80	100	120	125	130	150
Maximum Power Voltage (Vmp)	17.85	17.15	17.84	17.89	18.04	17.99	18.09	17.99	17.79	17.90	17.99	17.85
Maximum Power Current (Imp)	0.62	1.18	2.25	2.80	3.33	4.17	4.43	5.57	6.75	6.99	7.24	8.41
Open-circuit Voltage (Voc)	21.65	21.44	21.95	21.77	21.66	22.12	22.24	21.84	21.58	21.65	21.80	22.58
Short-circuit Current (Isc) (A)	0.69	1.27	2.44	3.04	3.67	4.49	4.76	6.11	7.36	7.60	7.79	8.70
Module Efficiency STC (%)	9.24	12.25	13.07	13.55	14.21	14.74	15.72	13.67	14.20	14.20	15.39	15.19
Operating Temperature (°C)	-40°C +85°C											
Maximum system Voltage	1000V DC (IEC)											
Maximum Series Fuse Rating	15A											
Temperature Characteristics (TC) and Permission Operating Conditions												
Specification	Data											
Tc of Open Circuit Voltage (B)	-0.35 ± 0.01% / °C											
Tc of Short Circuit Current (a)	0.50 ± 0.02% / °C											
Tc Power (Y)	-0.04 ± 0.02% / °C											
Maximum System Voltage	1000 V (TUV)											
NOCT	45°C ± 2°C											
Temperature Range	-40°C to 85°C											
Mechinal Data												
Specification	Data											
Cell Arrangement	36Cells (9x4)											
Dimensions : Length (mm)	305	460	460	555	635	765	765	1100		1155		1485
Dimensions : Width (mm)	335	355	666	665	665	665	665	665		665		665
Dimensions : Height (mm)	18	18	34	34	34	34	34	34		34		34
Weight	1.4Kg	2.8Kg	3.8Kg	4.6Kg	5.3Kg	6.8Kg	6.8Kg	8.0Kg		10.00Kg		10.6Kg
Mounting Hole to Hole Distance (mm)	NA		280	220	300	500			600			
Front Cover	3.2mm ARC Glass											
Frame Material	Anodized Aluminum Alloy											
Junction Box	IP 65 OR IP 67											
Product Warranty	5 Years											

Modèle avec Simulink



Exploitation du modèle Simulink

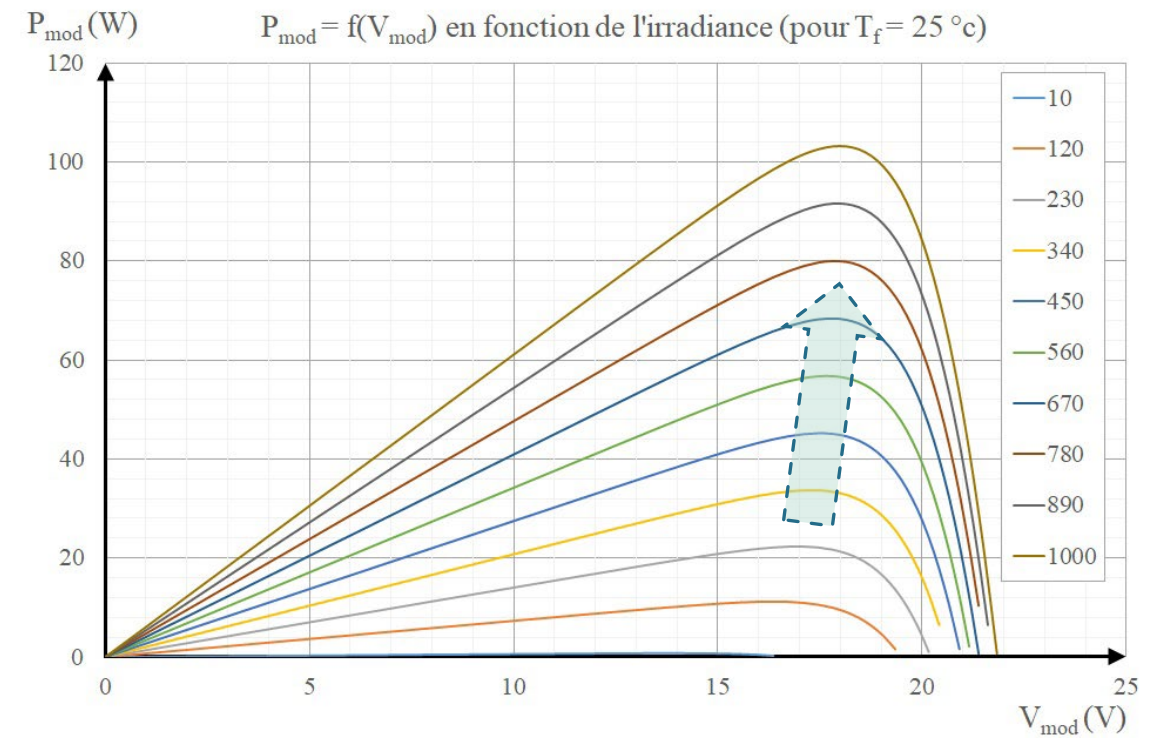
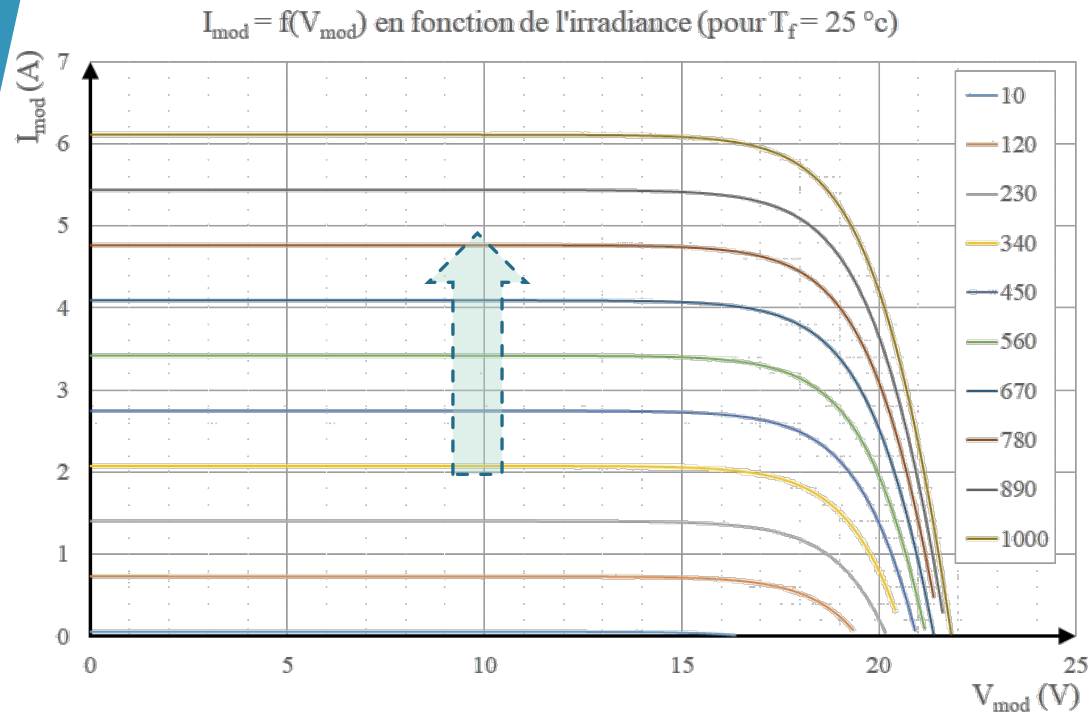
✎ Tracer la caractéristique $I_{\text{mod}}=f(V_{\text{mod}})$ pour différentes irradiances et températures



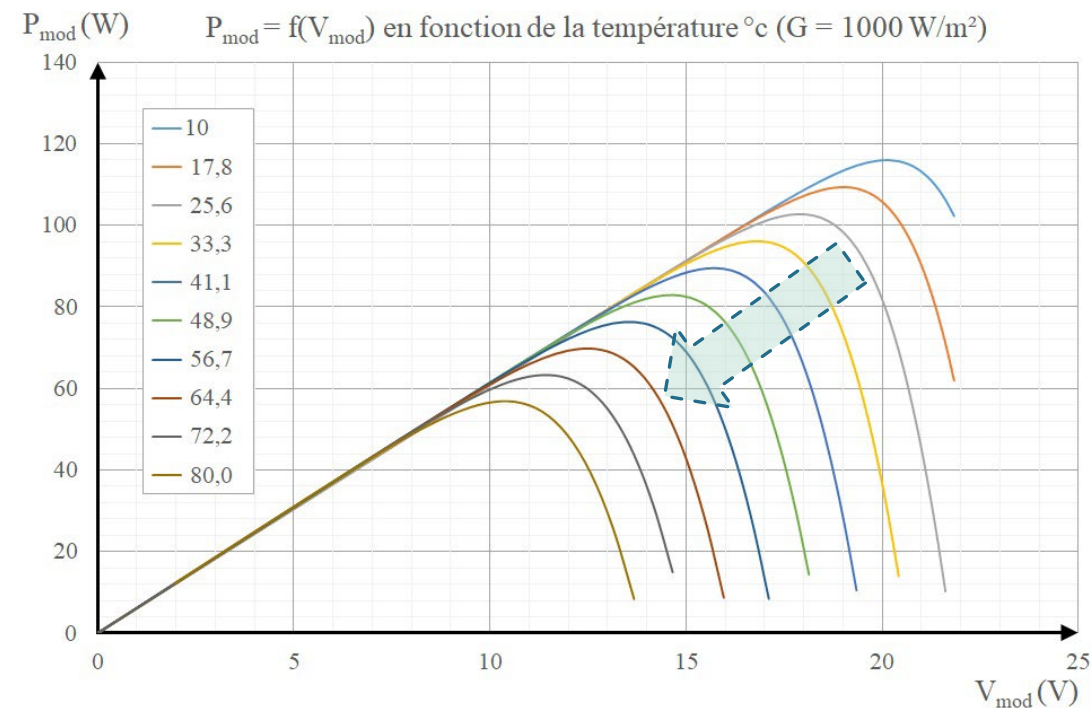
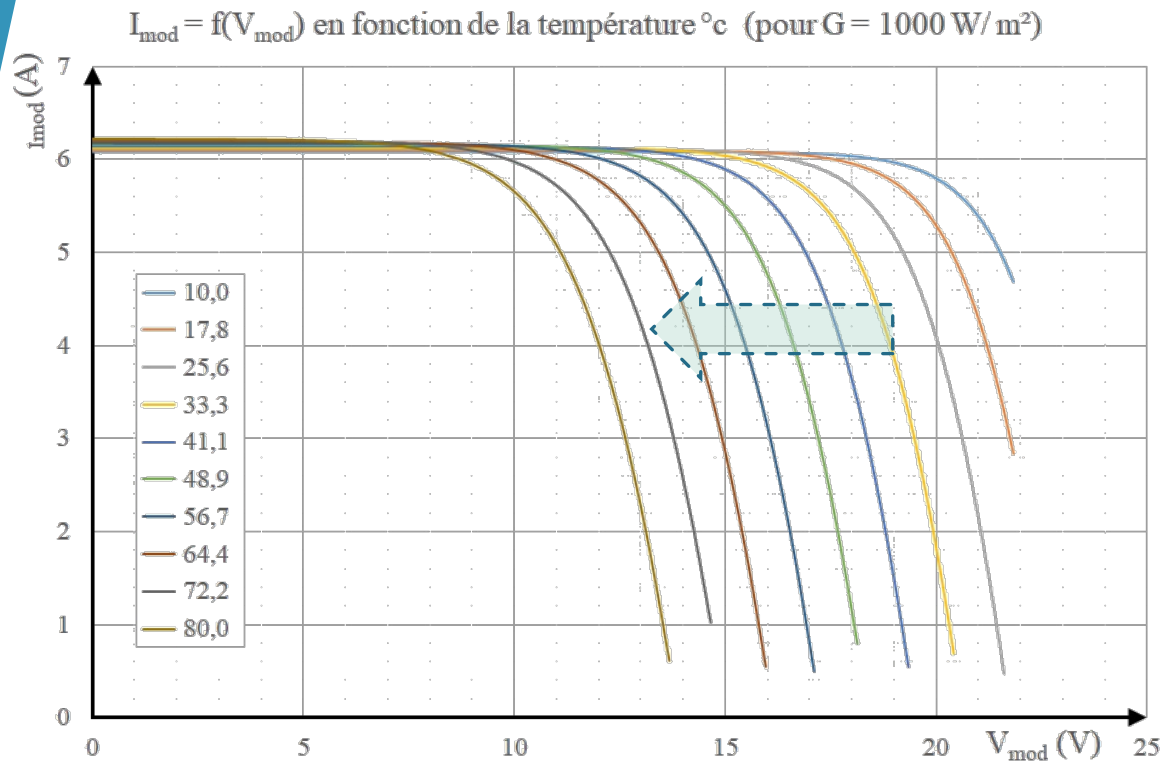
✎ Tracer la caractéristique de puissance $P=f(V_{\text{mod}})$ pour différentes irradiances et températures

✎ Si vous voulez aller plus loin, modifier votre schéma ou programme pour prendre en compte une ou plusieurs cellules cachées ou mal éclairées.

Exemples de résultats à obtenir



Exemples de résultats à obtenir



Comparaisons avec l'expérimentation

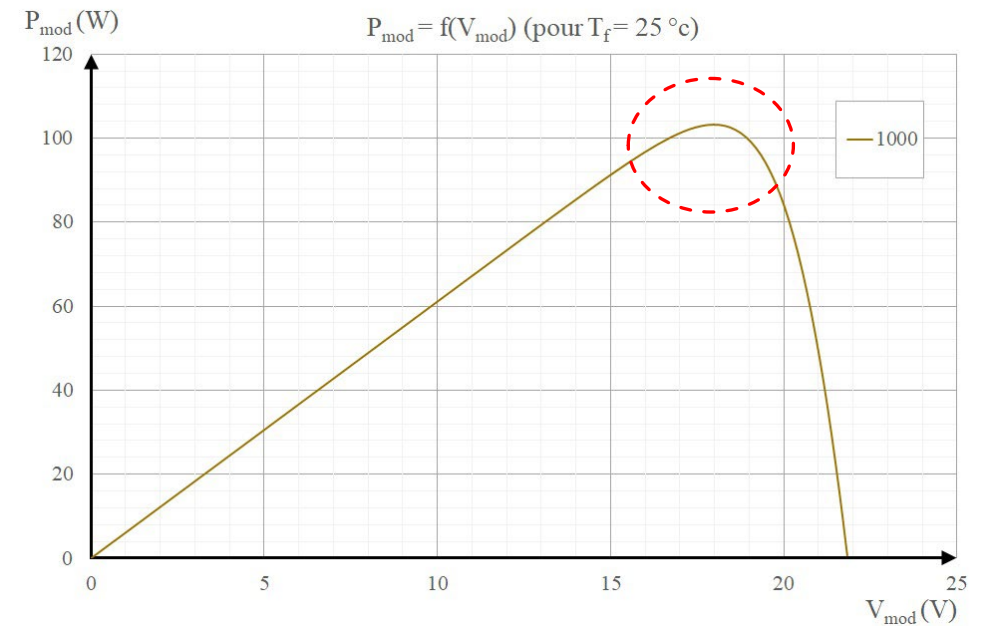
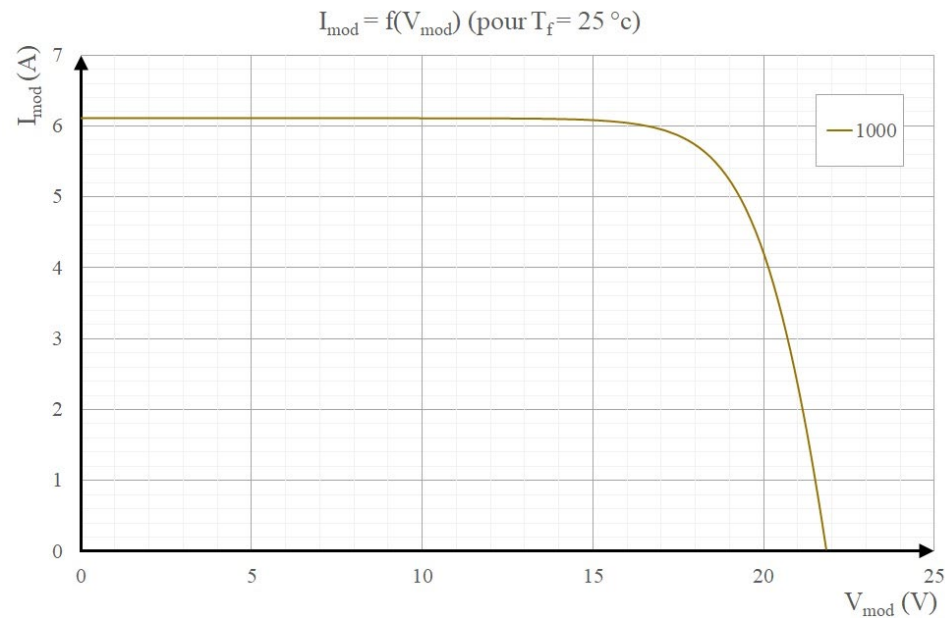
2 modules sont mis en série, sous une irradiance de 520 W/m^2 et une température de 40°C .



Vout	Iout
1,48966	3,18309
3,64251	3,18262
12,297	3,16313
26,5703	3,1424
28,5725	3,14196
29,5842	3,0538
30,4668	2,98326
31,1772	2,93913
31,5647	2,92146
32,4686	2,72779
33,3296	2,5869
34,1044	2,44602
34,5347	2,26126
35,1586	1,93574
35,847	1,53107
36,3416	1,12643
36,7932	0,69543
37,0941	0,326016
37,3737	0,123693

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

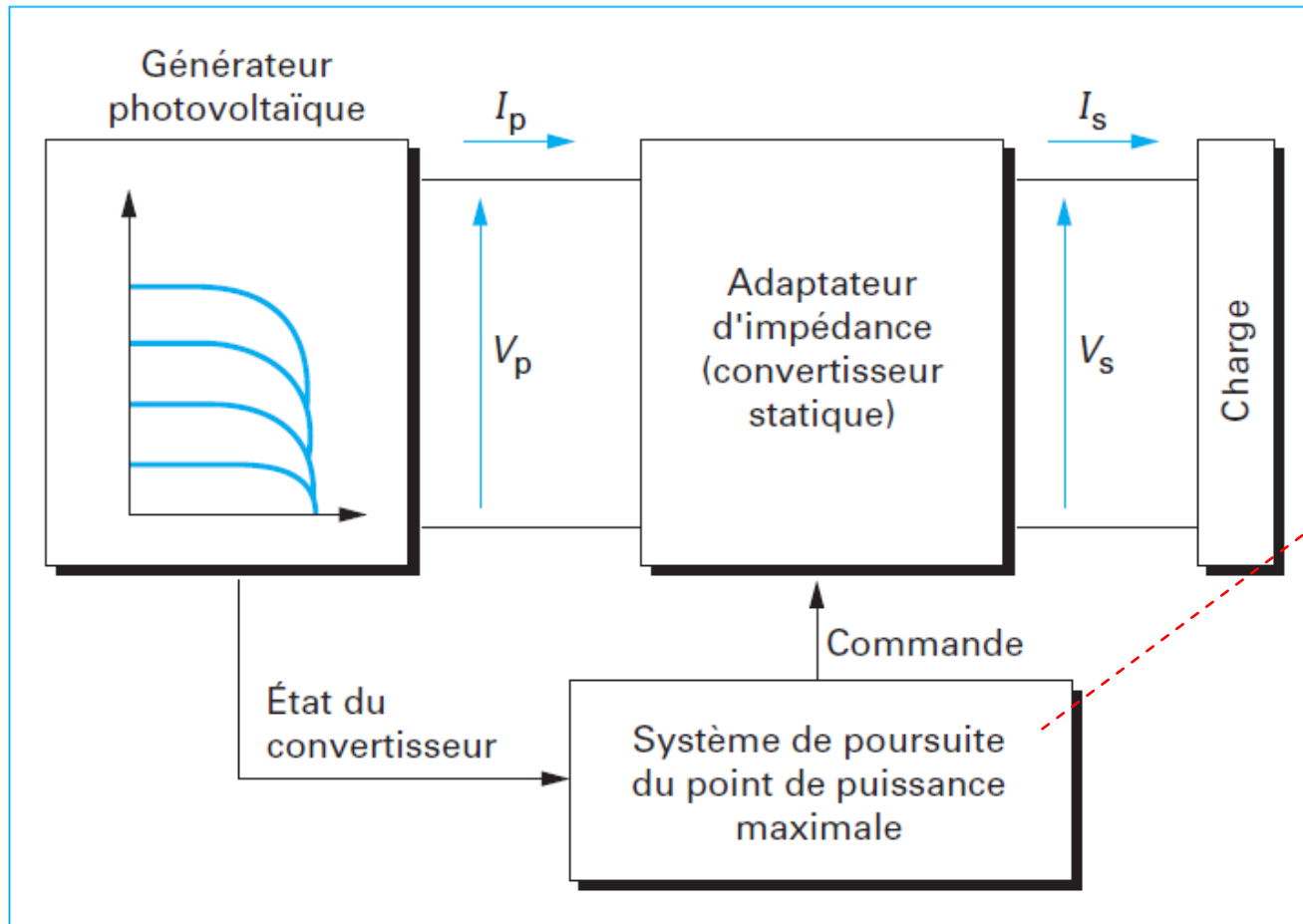
L'idée : faire délivrer un maximum de puissance par le panneau PV



Recherche du maximum de puissance fournie

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

L'idée : faire délivrer un maximum de puissance par le panneau PV

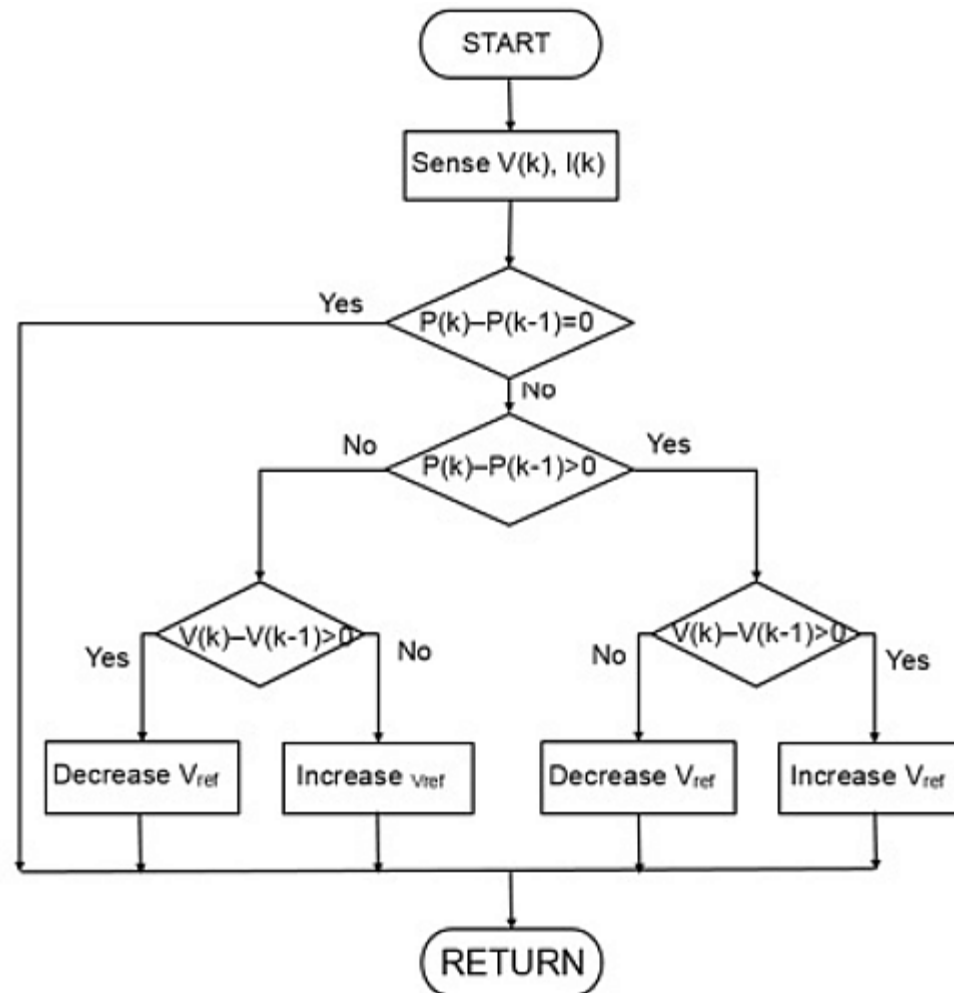


Méthodes :

- perturbation et observation
- incrémentation de la conductance différentielle
- logique floue
- réseaux de neurones
- « Open Voltage »
- « Constant Voltage »
- ...

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Perturbation et observation :



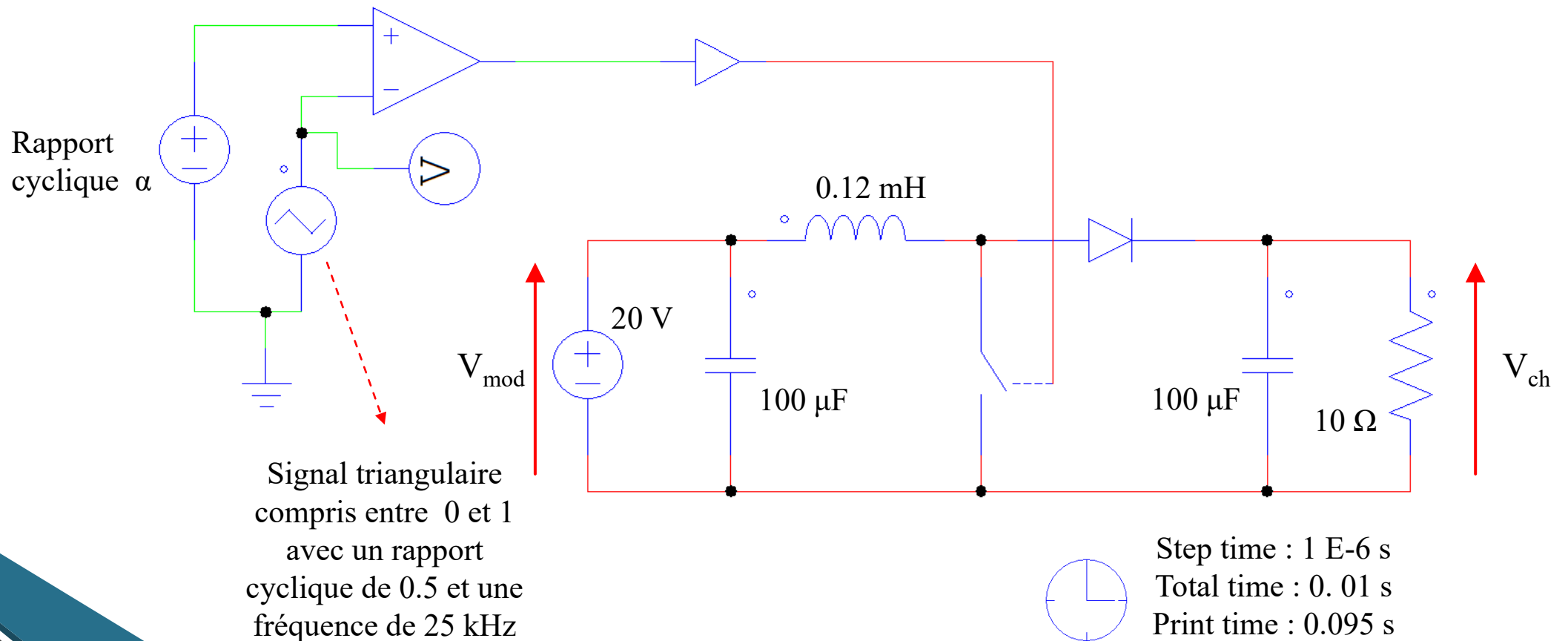
« perturber la tension de fonctionnement pour garantir une puissance maximale »

Facile à implémenter et exécuté rapidement sur cible

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

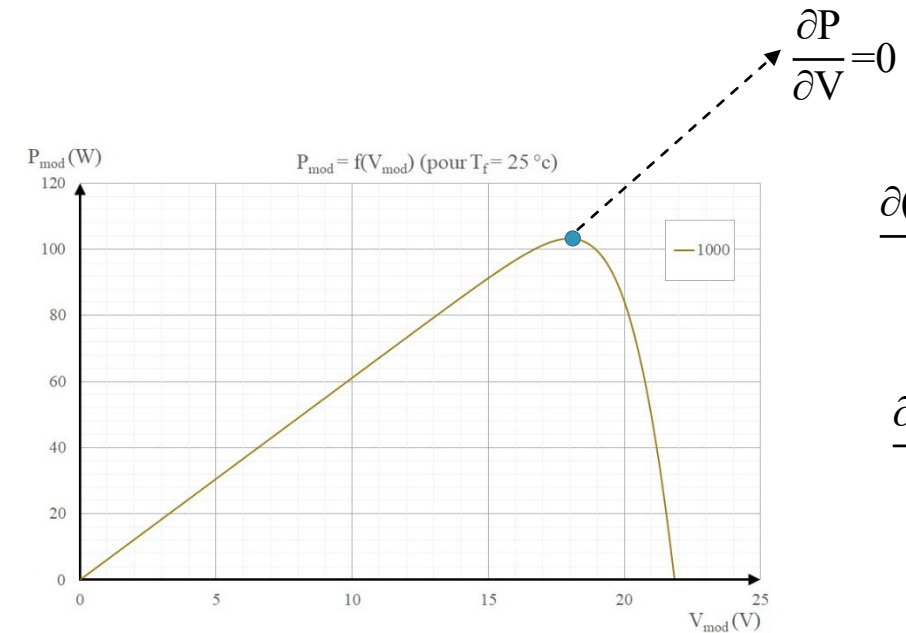
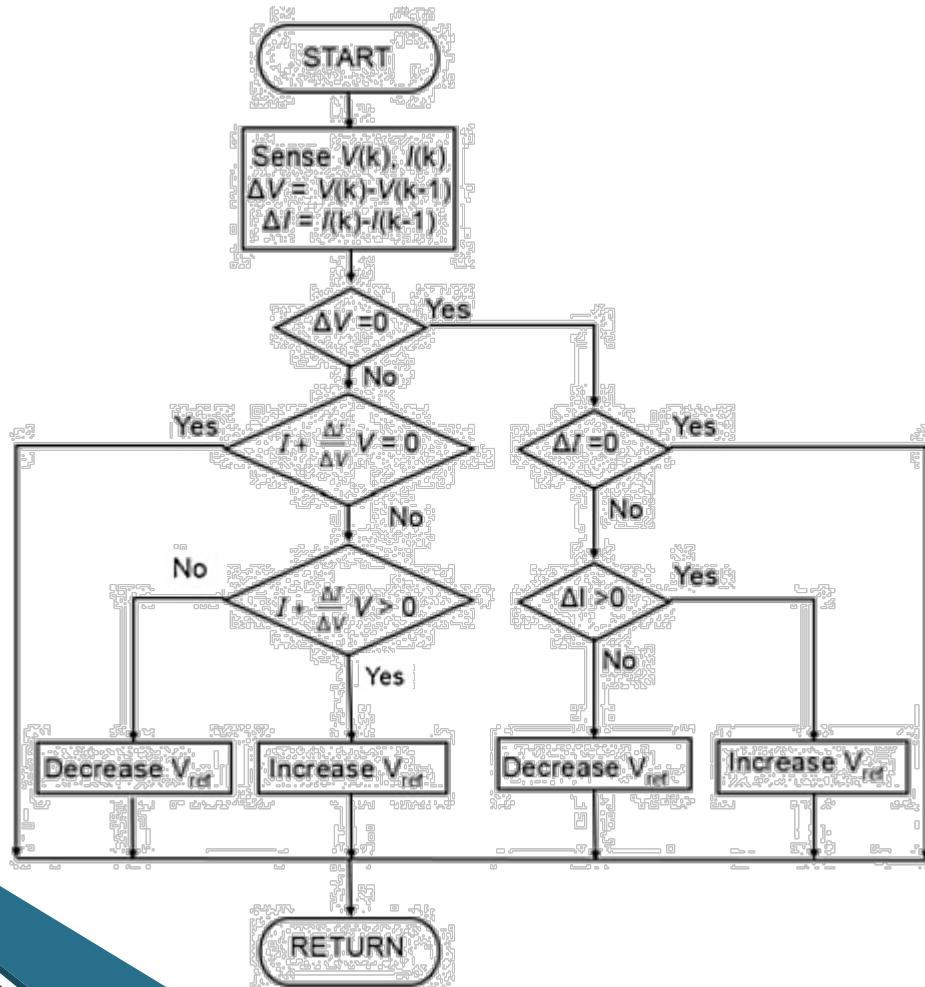
Convertisseur boost (version académique) :

✎ Expliquer le fonctionnement du montage
(Vous pouvez le simuler sous Psim !)



Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Incrémentation de la conductance différentielle :



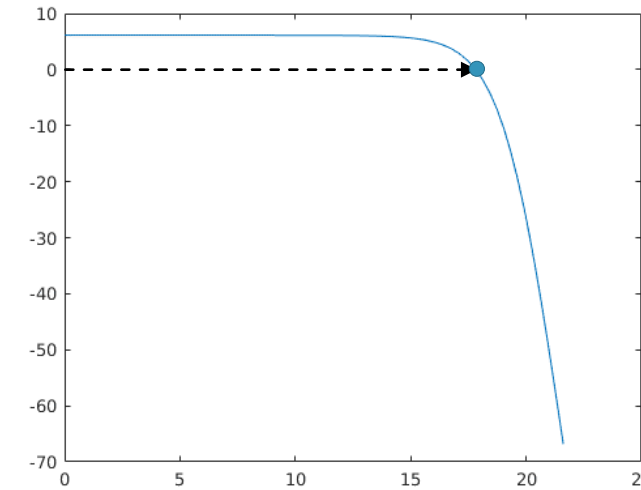
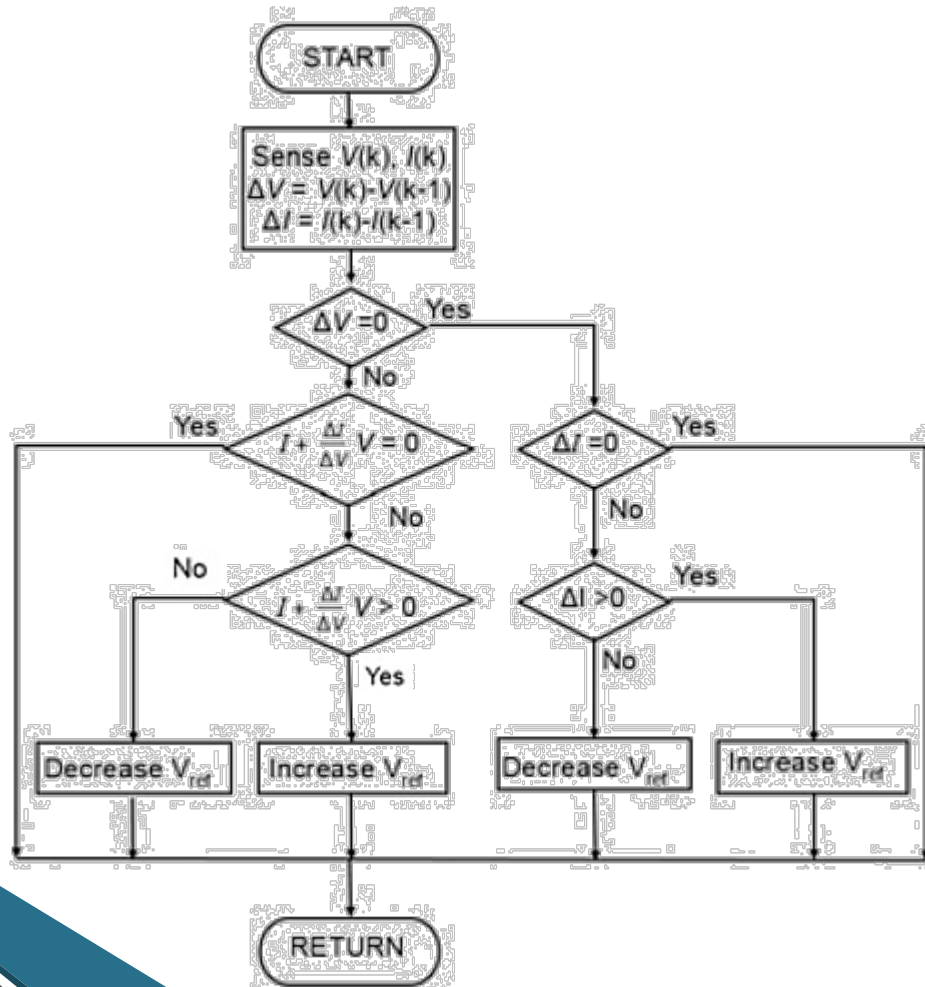
$$\frac{\partial(V.I)}{\partial V} = I \frac{\partial V}{\partial V} + V \frac{\partial I}{\partial V}$$

$$\frac{\partial(V.I)}{\partial V} \approx I + \frac{V \Delta I}{\Delta V}$$

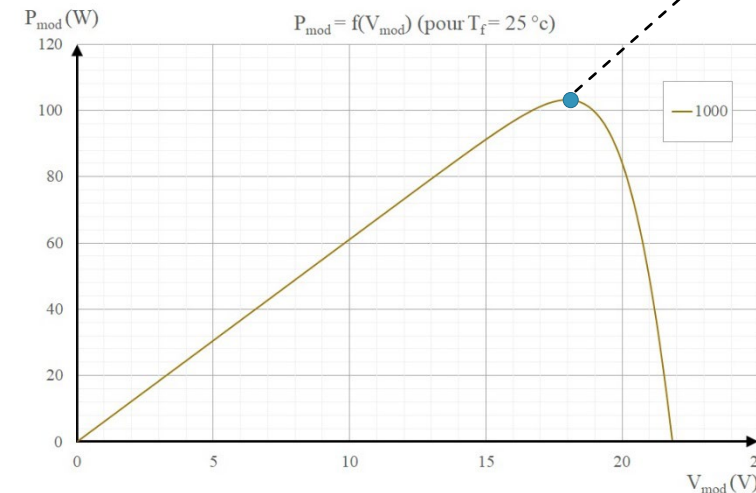
Tension constante une fois la puissance maximale atteinte

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Incrémentation de la conductance différentielle :



$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0$$



$$\frac{\partial(V.I)}{\partial V} = I \frac{\partial V}{\partial V} + V \frac{\partial I}{\partial V}$$

$$\frac{\partial(V.I)}{\partial V} \approx I + \frac{V \Delta I}{\Delta V}$$

Tension constante une fois la puissance maximale atteinte

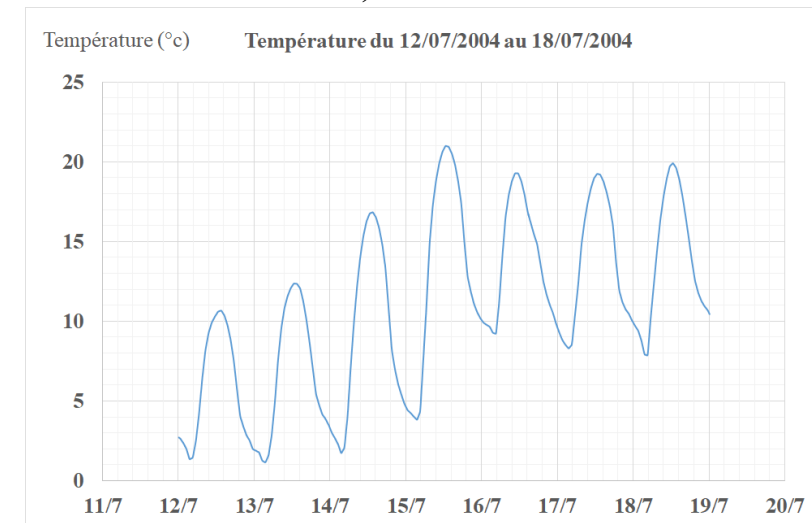
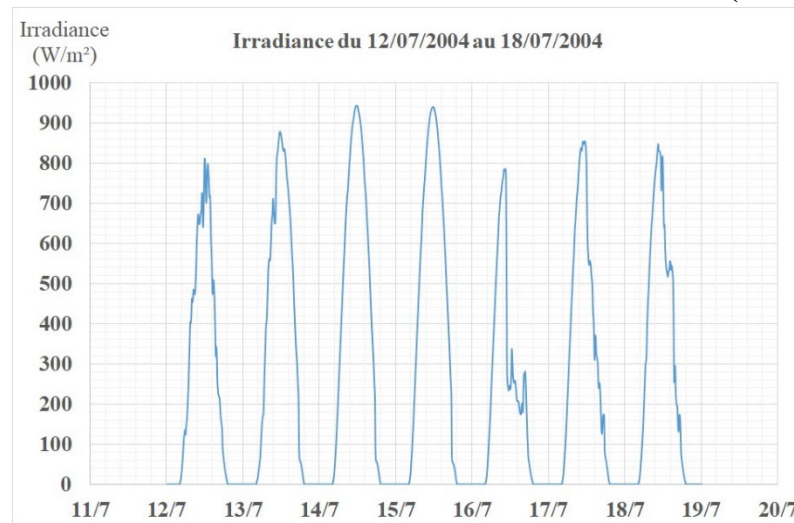
Simulation avec données réelles

Présentation de l'emplacement étudié :



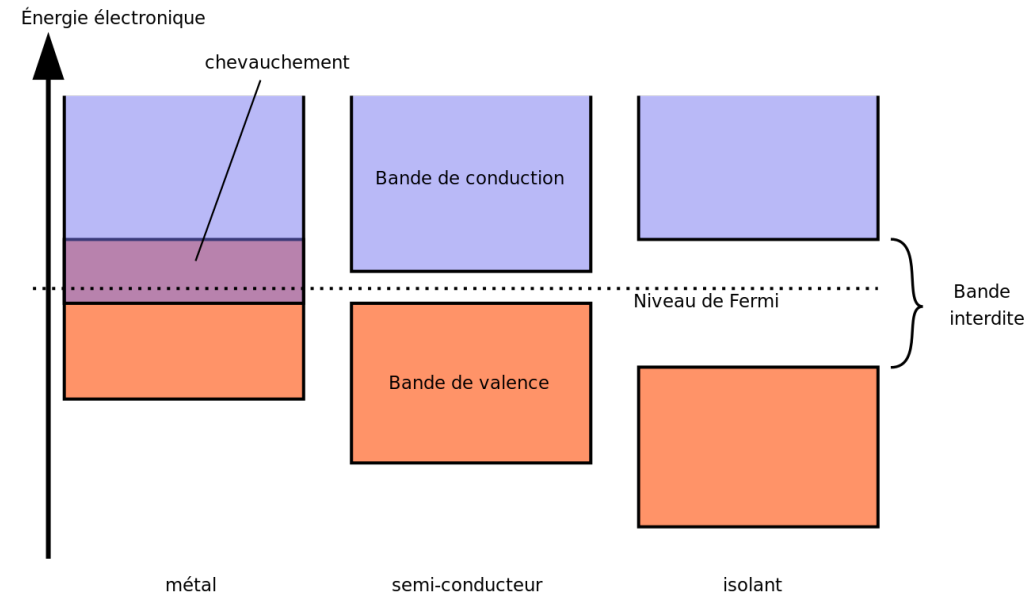
Aussois
659 habitants (2015)
Altitude 1489 m

Données du 12/07/2004 au 19/07/2004 :
(mesures toutes les 10 min)



Annexe 1 Notion de Bande d'énergie:

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>



Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la [théorie des bandes](#). Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement *bandes permises*, lesquelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées *bandes d'énergie interdites* ou *bandes interdites*.

Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier :

- la dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence » ;
- la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction ».

La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du [zéro absolu](#) dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide.

Dans les conducteurs (métaux), la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide.

Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment par son équivalent anglais plus court « *gap* ».

L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Dans un isolant, cette valeur est si grande (aux alentours de 6 [eV](#) pour le diamant par exemple) que les électrons ne peuvent pas passer de la bande de valence à la bande de conduction : les électrons ne circulent pas dans le solide.

Dans les semi-conducteurs, cette valeur est plus petite (1,12 eV pour le [silicium](#), 0,66 eV pour le [germanium](#), 2,26 eV pour le [phosphore de gallium](#)). Si l'on apporte cette énergie (ou plus) aux électrons, par exemple en chauffant le matériau, ou en lui appliquant un champ électromagnétique, ou encore dans certains cas en l'illuminant, les électrons sont alors capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction, et de circuler dans le matériau.

Annexe 2 Caractéristique d'une diode:

https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode#Caract%C3%A9ristique_r%C3%A9elle

Lorsque la diode est bloquée, I_D n'est pas complètement nul mais vaut quelques nA (courant de fuite).

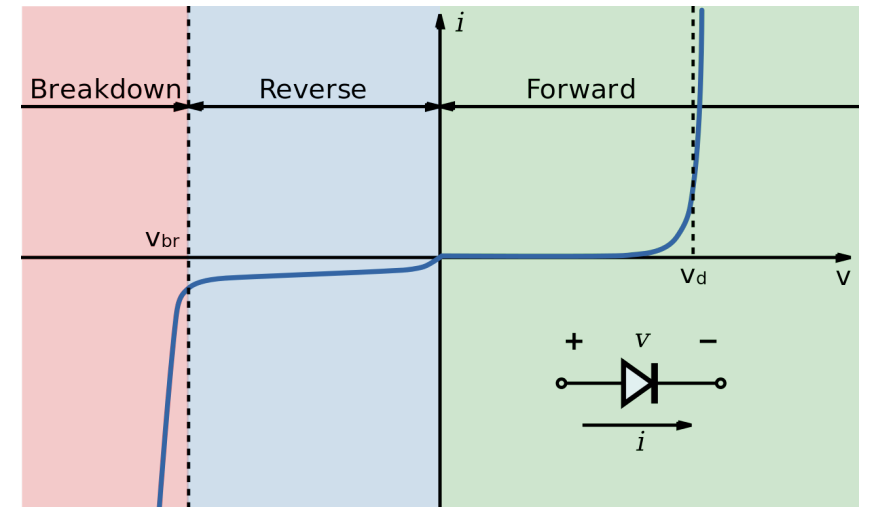
La tension V_{seuil} est une donnée fournie par les constructeurs et vaut typiquement :

- 0,3 V pour les diodes au germanium ;
- 0,7 V pour les diodes au silicium.

Le courant I qui traverse la diode s'obtient par l'équation de Shockley :

où :

- V_j est la tension aux bornes de la diode ;
- V_0 appelé *tension thermique* est égal à $\frac{k_B T}{-e}$ où k_B est la constante de Boltzmann, avec T la température absolue de la jonction et $-e$ la charge d'un électron. $V_0 = 26 \text{ mV}$ à $T = 20^\circ \text{C}$ (293 K) ;
- n est le facteur de qualité de la diode, généralement compris entre 1 et 2
- I_0 est la constante spécifique au type de diode considéré (I_0 est homogène à un courant). Cette constante est aussi appelée « courant de saturation » de la diode.



$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_j}{nV_0} \right) - 1 \right]$$

Références

- A. Kébé, « **Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal** », thèse de doctorat soutenue en 2013.
- X. H. Nguyen and M. P. Nguyen, « **Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink** », Environmental Systems Research, Springeropenjournal, 2015.
- A. Kalyanpur, M.-E. Mercadier, and P. Blanc, « **Gisement solaire en France : caractérisation de la ressource énergétique, profil de répartition et volatilité** », Environnement & Technique, 2013.