

Formation Energies Renouvelables



Syllabus de formation Installateurs Systèmes Photovoltaïques Volume 3

Introduction à la technologie

Volume 3. Objectifs

- Acquérir les bases de la technologie
- Fabrication des cellules
- Fabrication des modules
- Facteurs d'influence

Volume 3. Introduction à la technologie du photovoltaïque

- Généralités
- Les cellules photovoltaïques
- Les modules photovoltaïques
- Les installations photovoltaïques connectées au réseau

Contexte

Les types d'énergies

- Les énergies fossiles
- L'énergie nucléaire
- Les énergies renouvelables

La dépendance énergétique

- U.E. 54% (source 2014) - R.W. 100%

L'effet de serre

- U.E. +/- 9T CO₂/hab.an
- R.W. +/- 15T CO₂/hab.an
- +/- 83 300 kms/hab.an

Contexte

Part des EnR en Belgique (Source APERE – 2014) :

<u>Région</u>	<u>2005</u>	<u>2010</u>	<u>2014</u>	<u>Obj. 2020</u>
Wallonie	4,0%	8,6%	10,8%	13,0%
Bruxelles	0,8%	1,7%	2,3%	3,8%
Flandre	1,9%	4,5%	5,7%	10,5%
Belgique	2,3%	5,5%	8,0%	13,0%

Contexte – U.R.E.

L'U.R.E. (Utilisation Rationnelle de l'Énergie)

→ Consommation d'un ménage / 4 pers.
en Wallonie –

Client à simple comptage: ~ 3.500 kWh/an (source CREG)

Client à double comptage : ~ 4800 kWh (hors chauffage et ECS)

→ Préalable au photovoltaïque : ECONOMIES

Exemple :

Appareil 5W fonctionnant 24/24 et 365 j/ans

= 43,8 kWh/an soit 1% de la consommation

→ Gestes au quotidien :

Ampoules éco., électro. récents, veilleuses,

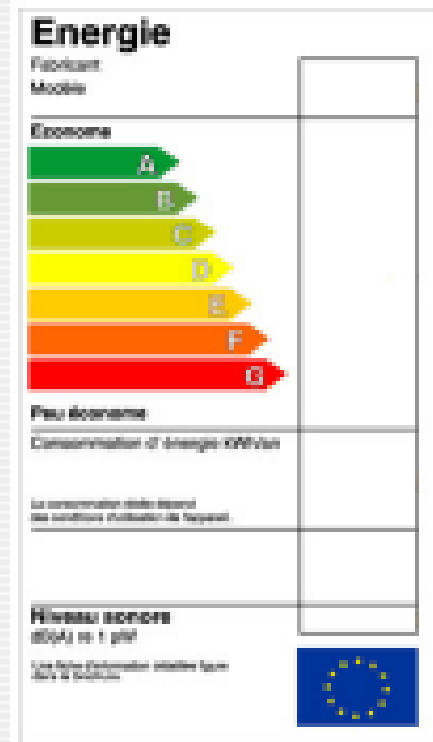
https://www.creg.be/fr/consommateurs/prix-et-tarifs/creg-scan-questions-frequeemment-posees#h2_7

Contexte – U.R.E.

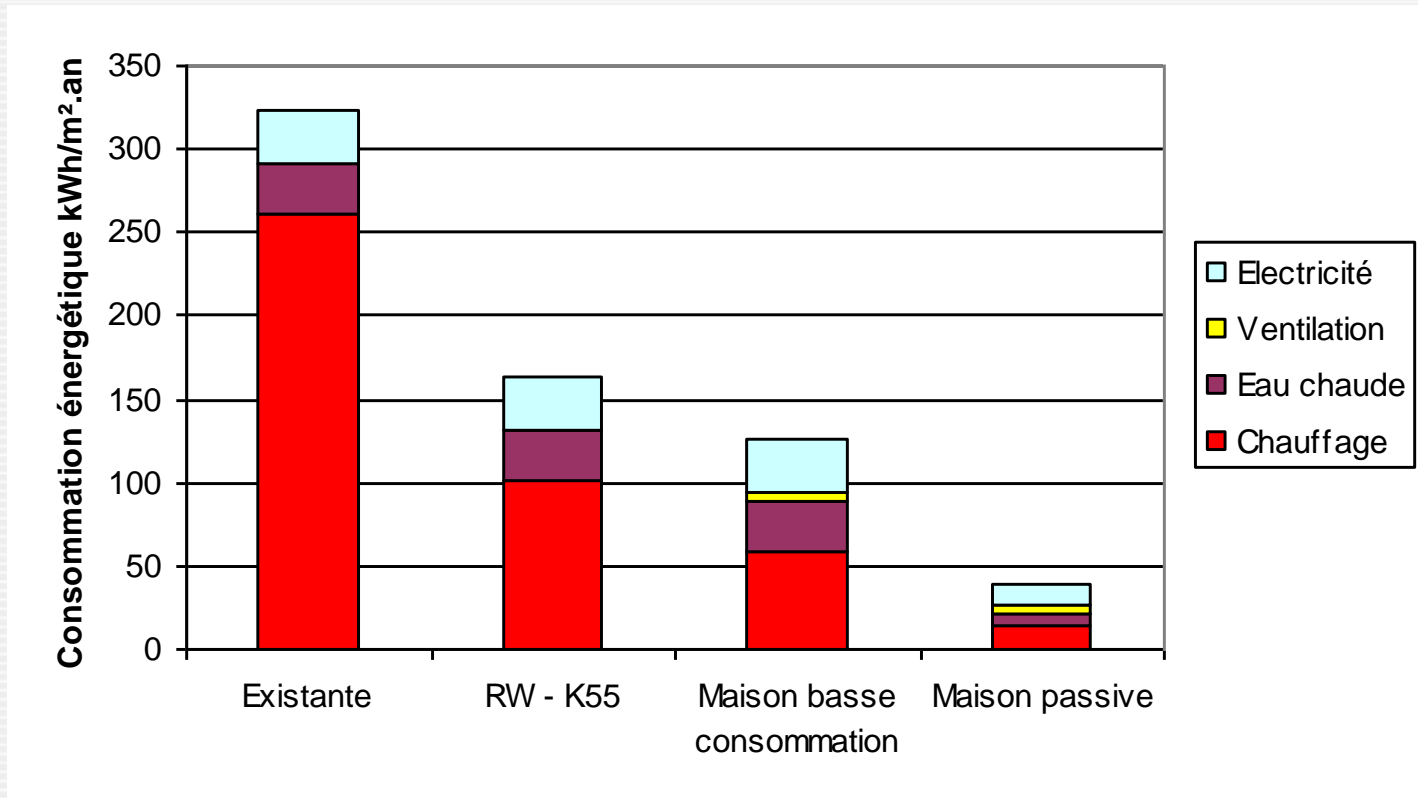
L'U.R.E. (Utilisation Rationnelle de l'Énergie)

→ Etiquetage des appareils électro.

- faciliter le choix du client ;
- fct de l'efficacité énergétique ;

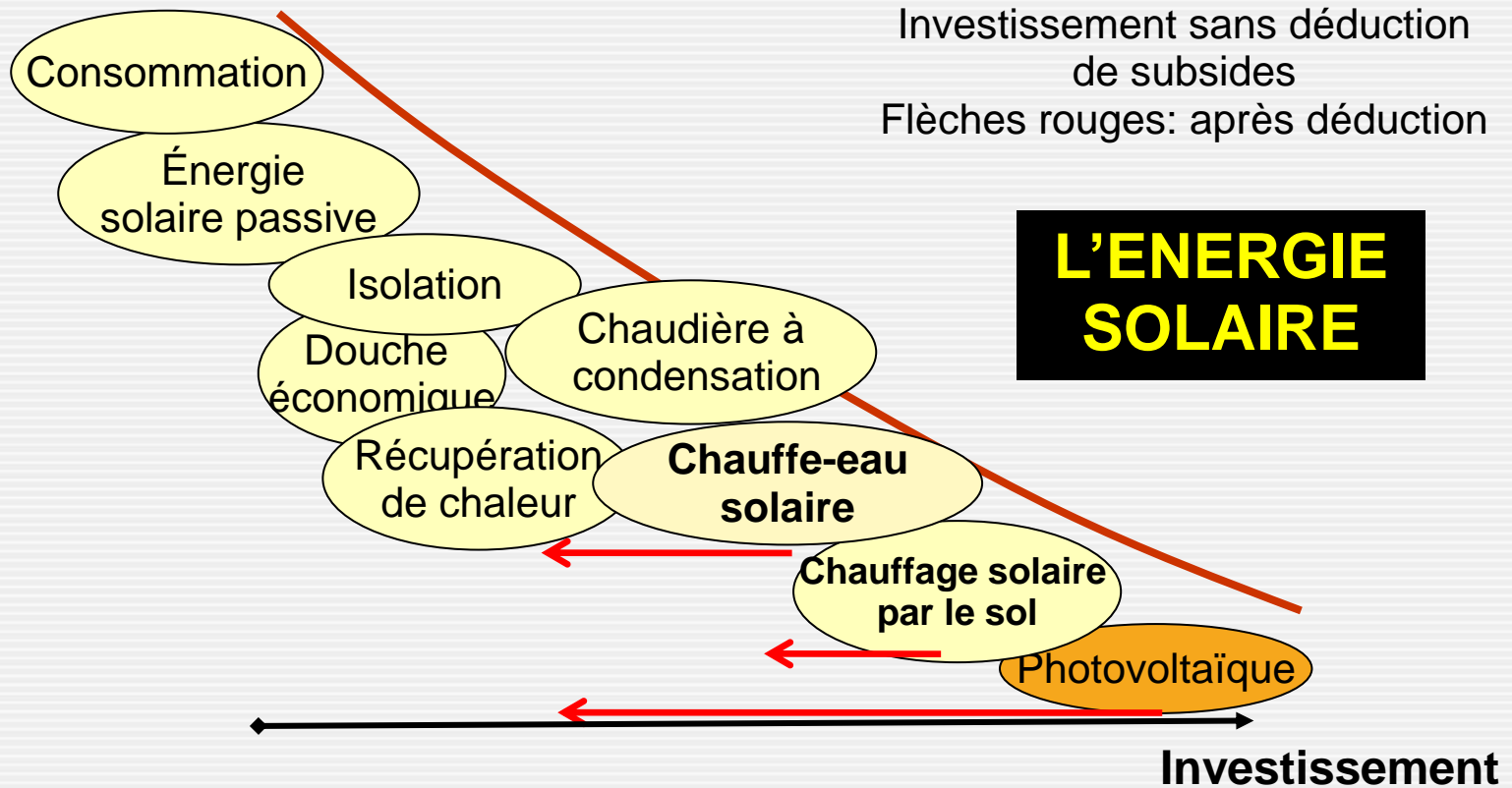


Contexte - Isolation

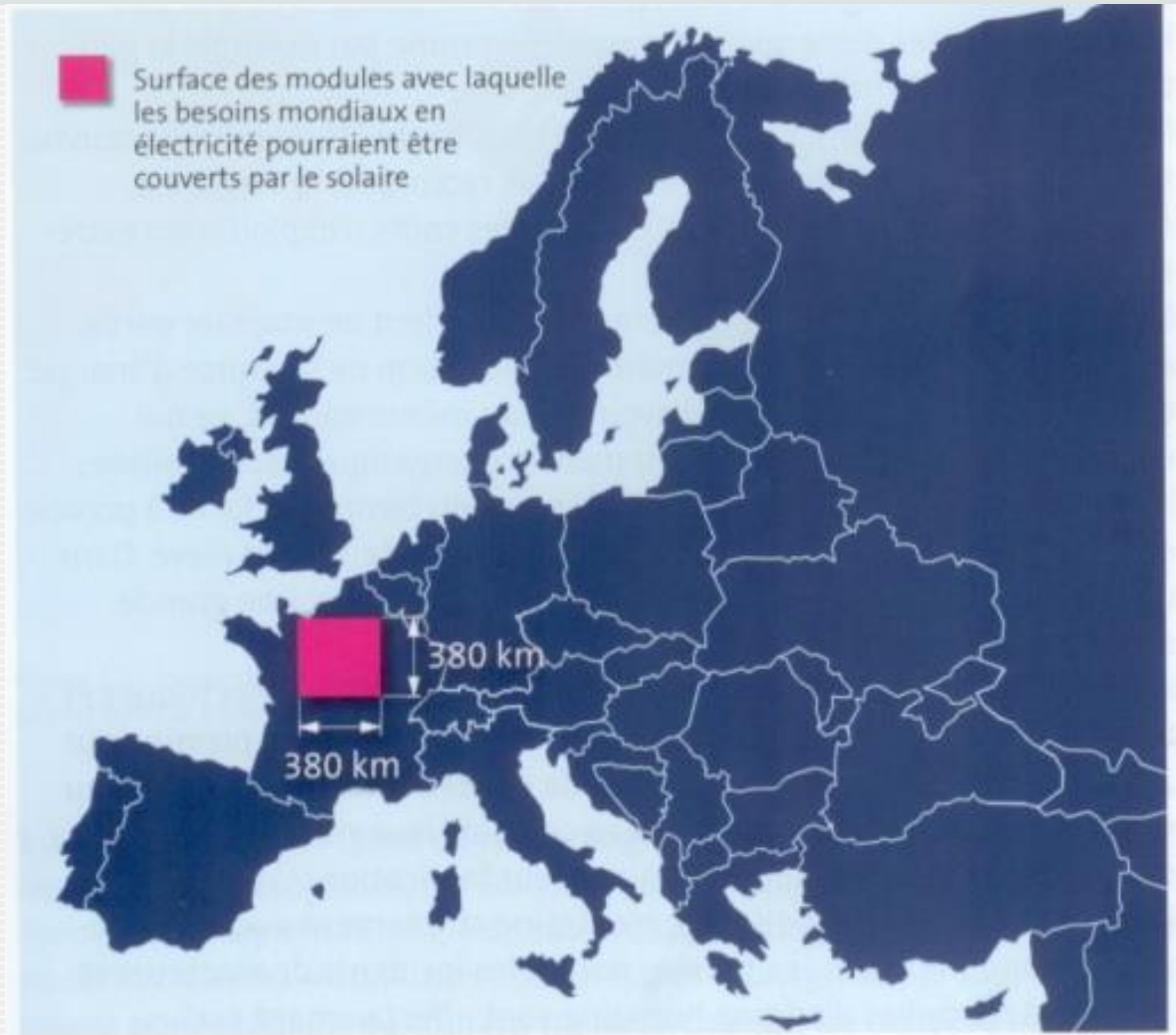


Contexte - Isolation

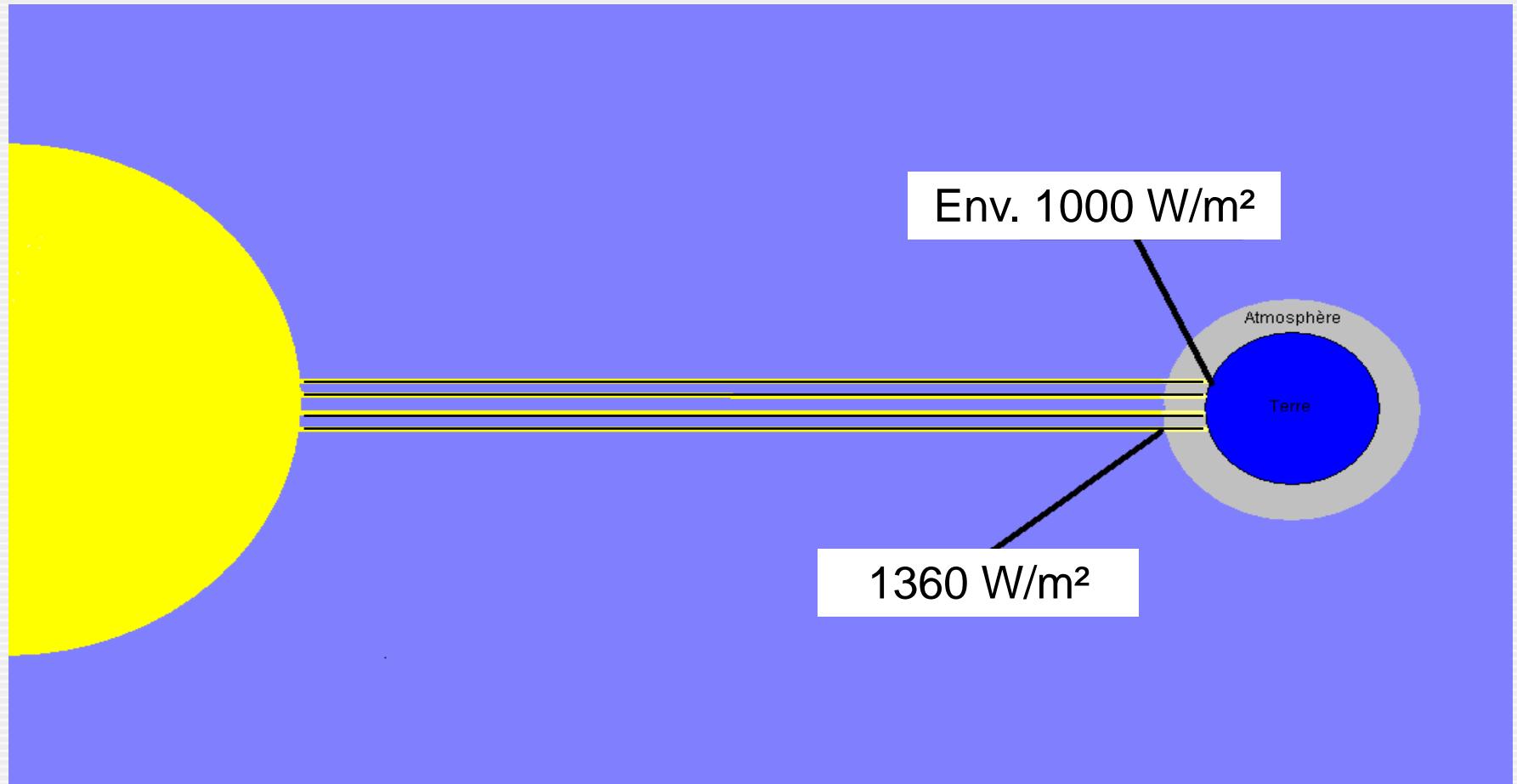
Apports



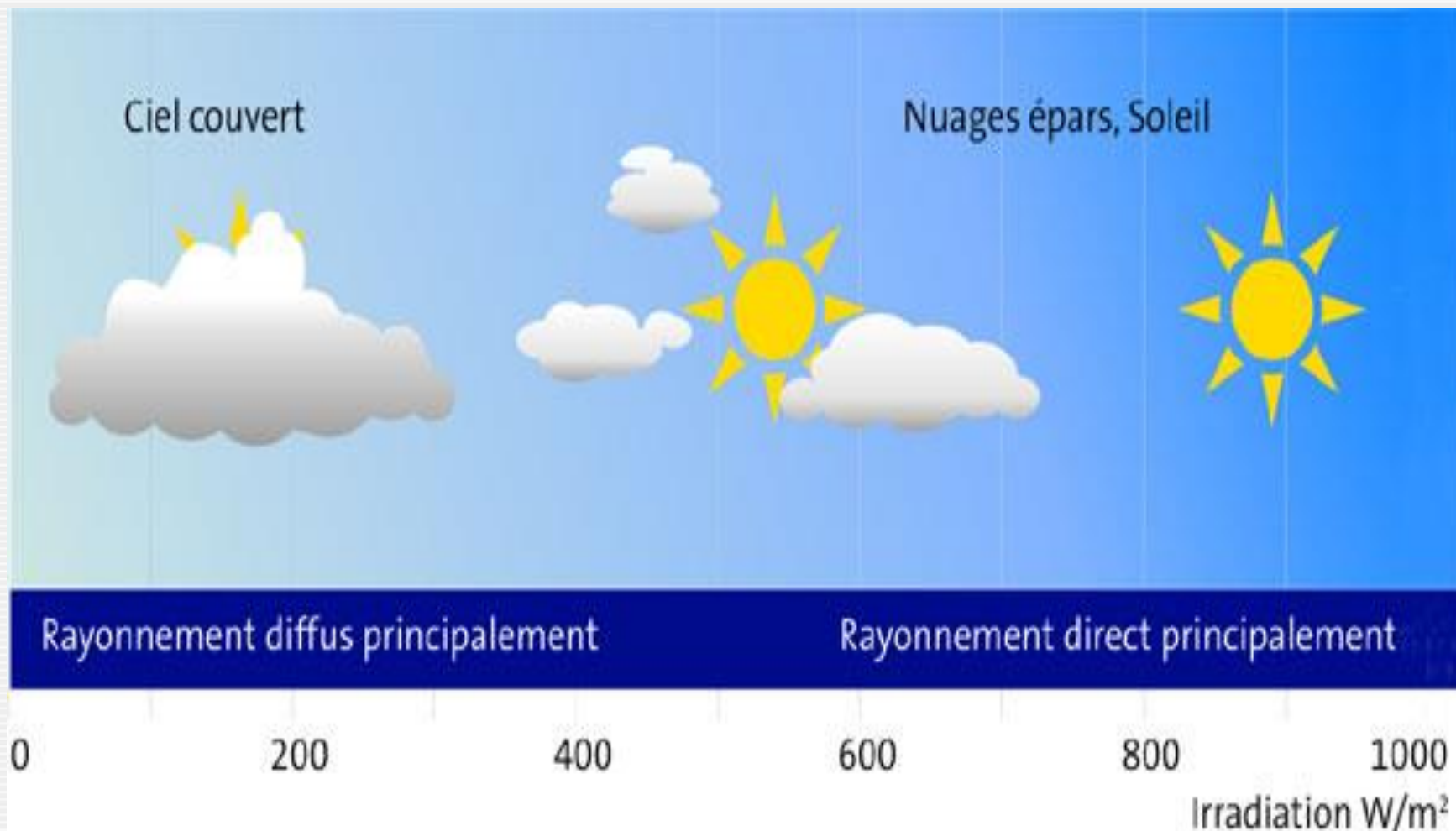
1.1. Puissance d'ensoleillement : comparaison



1.1. Puissance d'ensoleillement: disponibilités



1.1. Puissance d'ensoleillement: irradiation



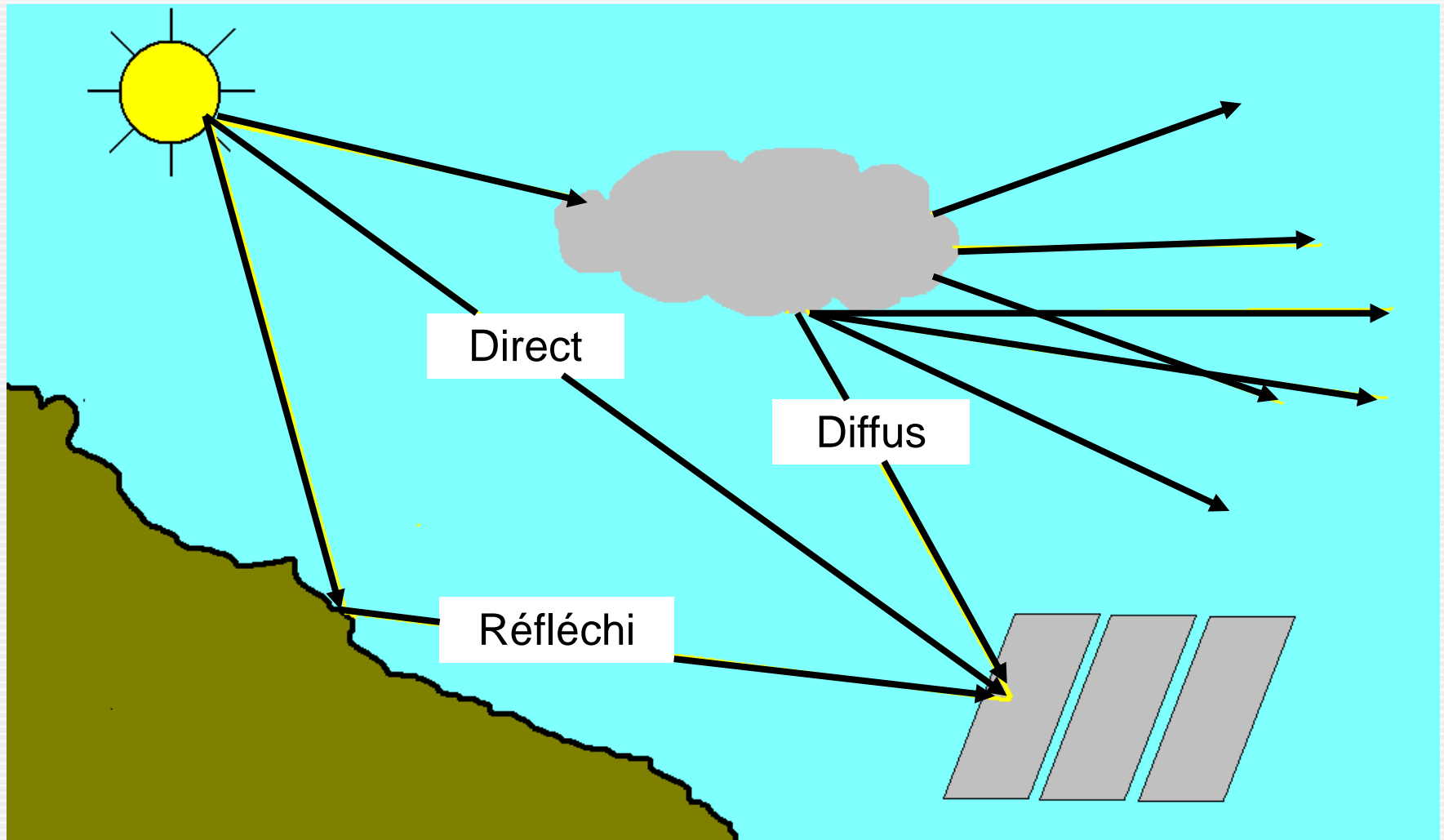
1.1. Puissance d'ensoleillement : équivalent mazout



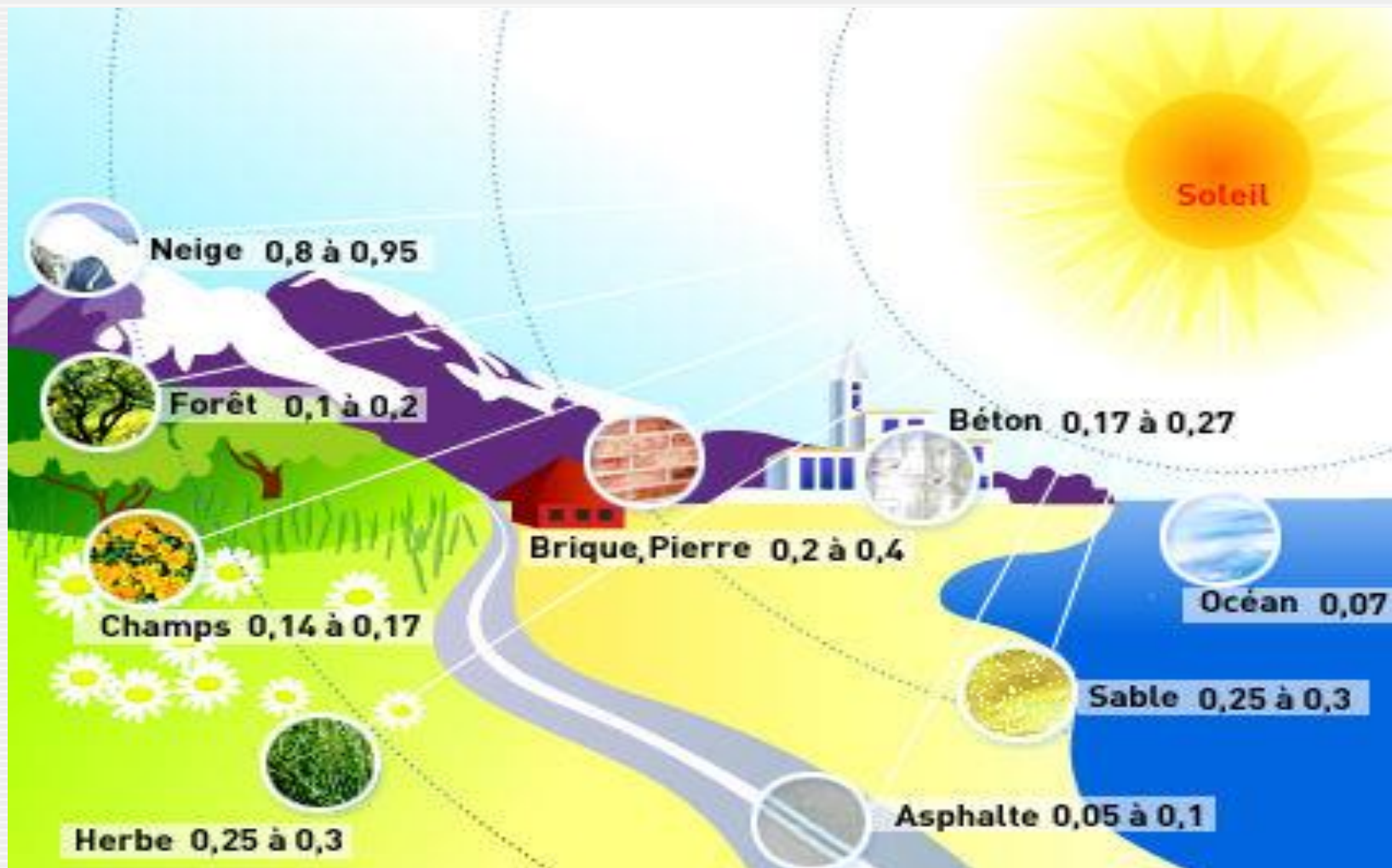
1.1. Le Watt crête et l'Energie produite



1.2. Le rayonnement solaire



1.2. Le rayonnement solaire réfléchi: Albédo



1.3. Historique du photovoltaïque

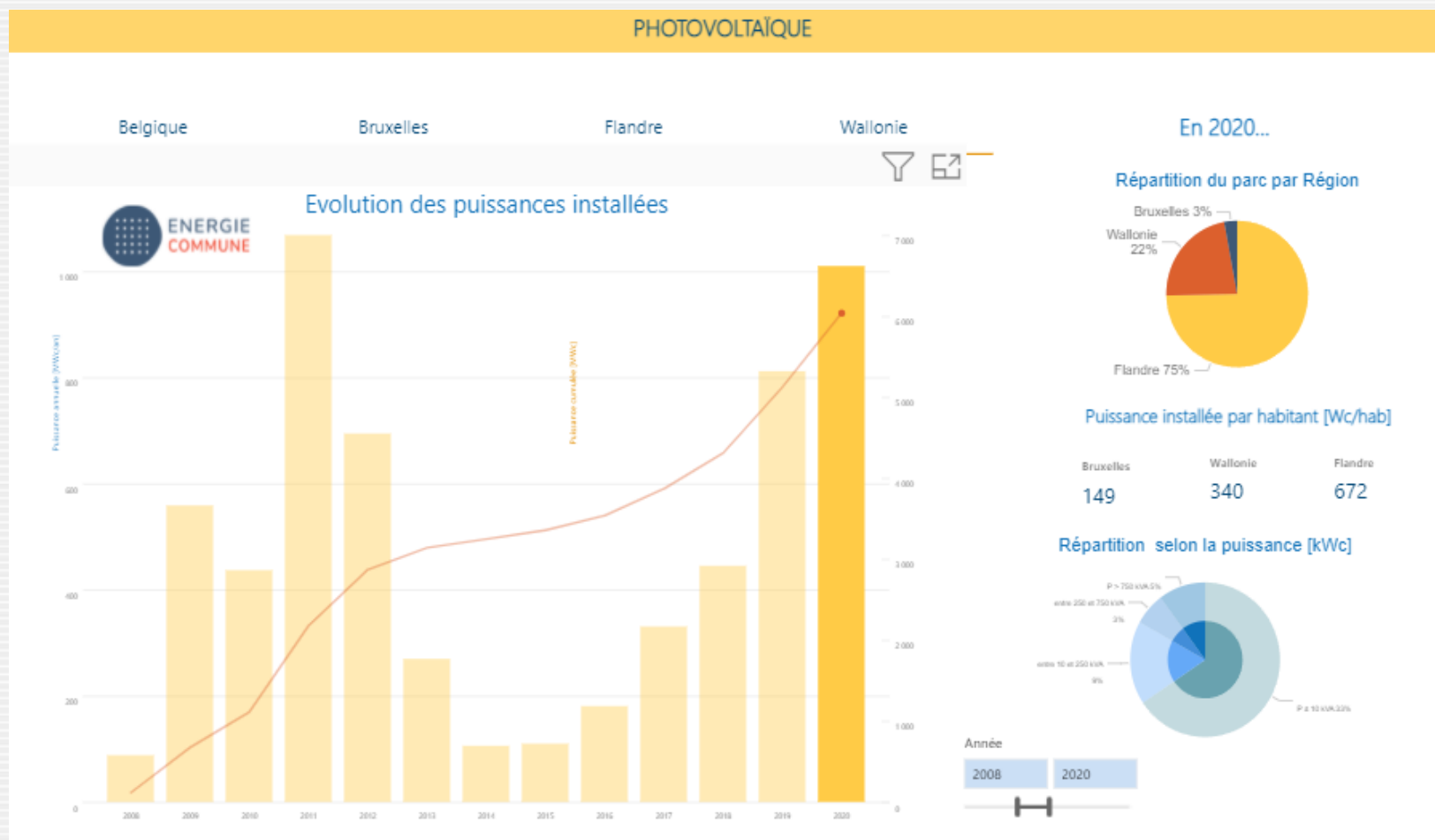
- 1839 -> Becquerel
- 1954 -> Cellules hauts rendements pour le spatial



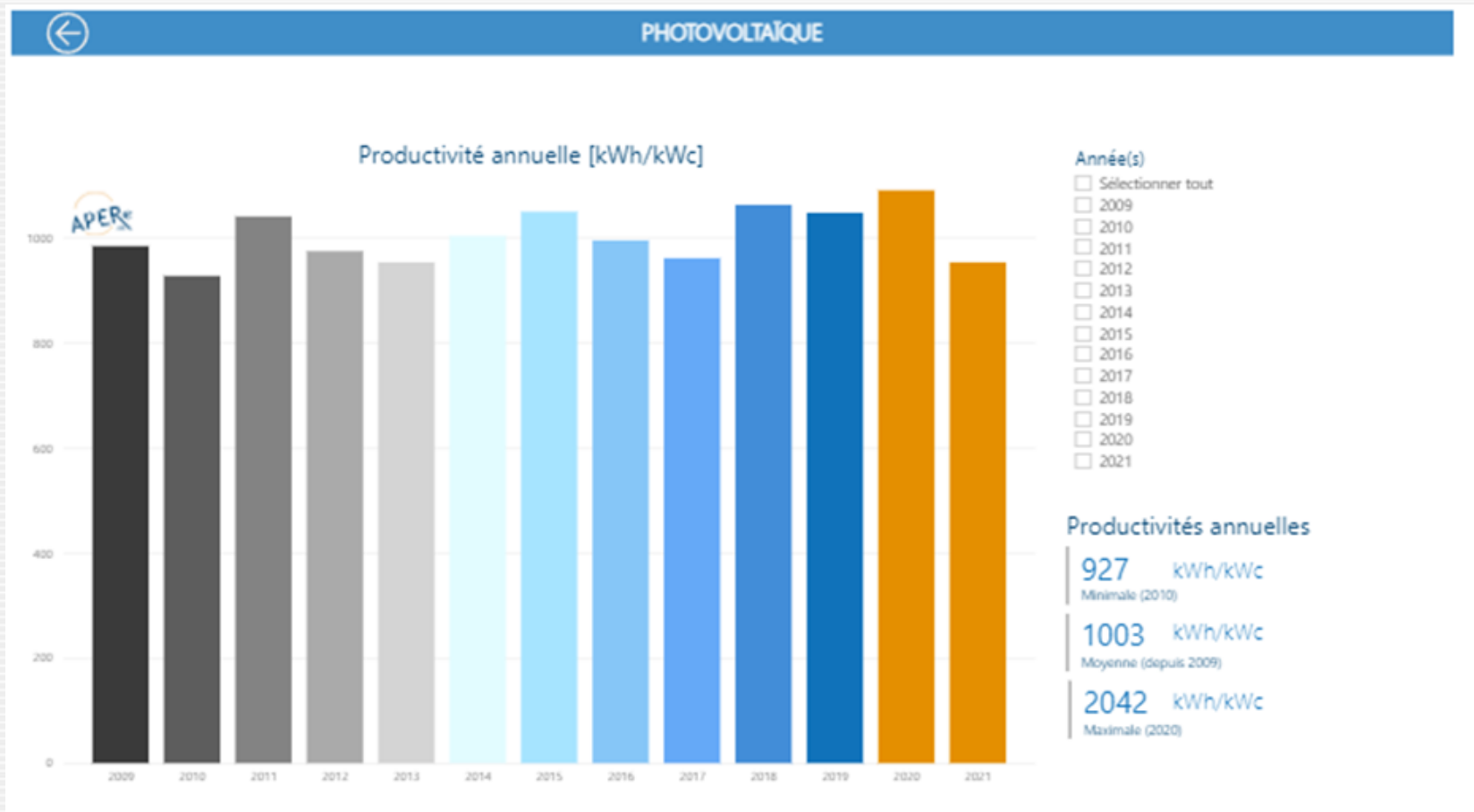
1.3. Historique du photovoltaïque

- 1839 -> Becquerel
- 1954 -> Cellules hauts rendements pour le spatial
- 1958 -> Cellules à 9% de rendement
- 1973 -> Première maison solaire dans le Delaware
- 1983 -> Premier véhicule solaire en Australie (4000 kms)

1.4.1. Gisement: installations en Belgique



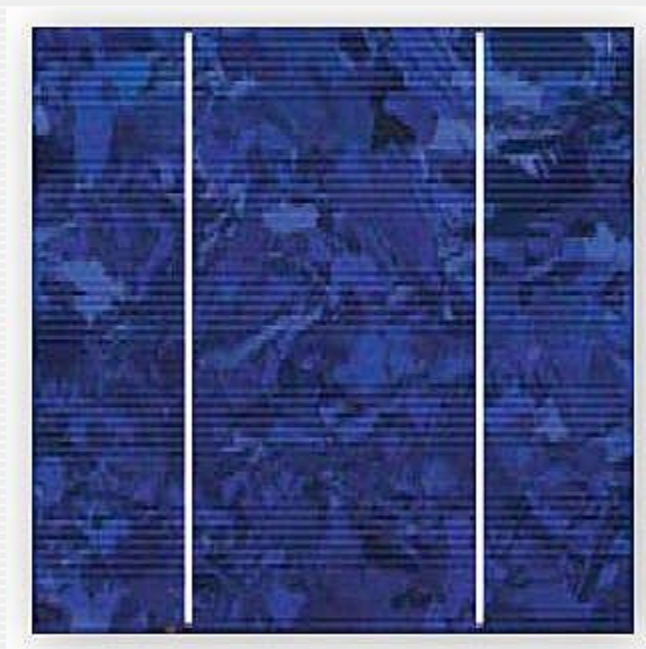
1.4.1. Gisement: installations en Belgique



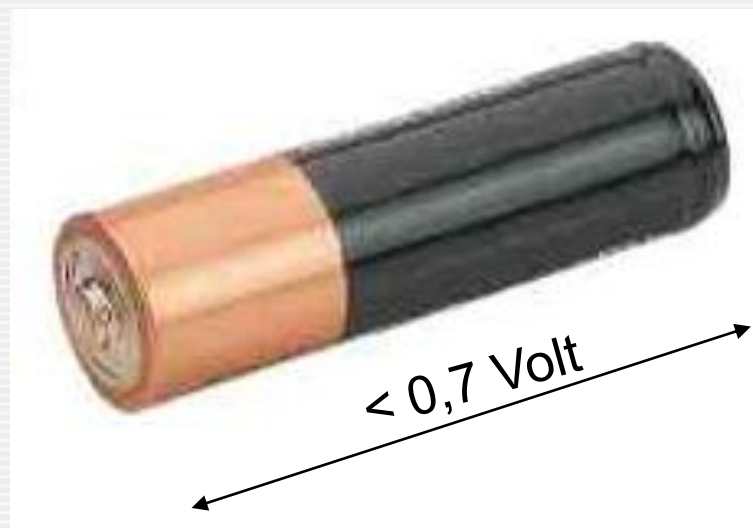
1.4.1. Gisement: installations en Belgique



2. Les cellules photovoltaïques

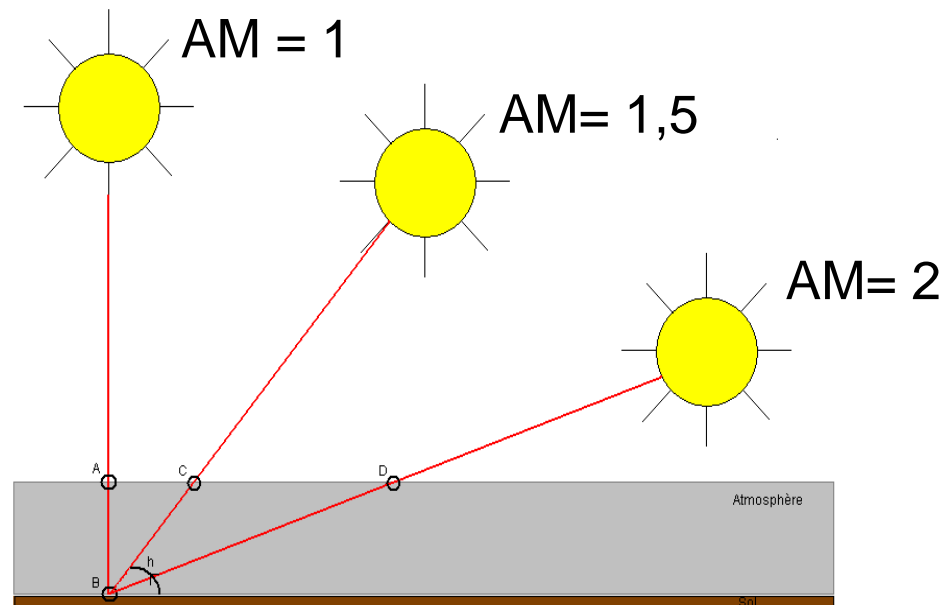


Si cristallin



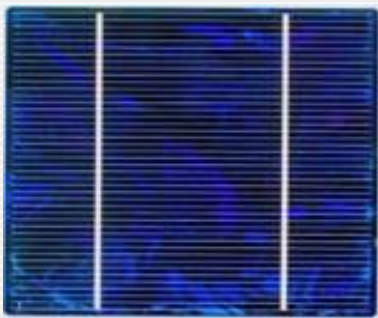
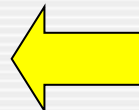
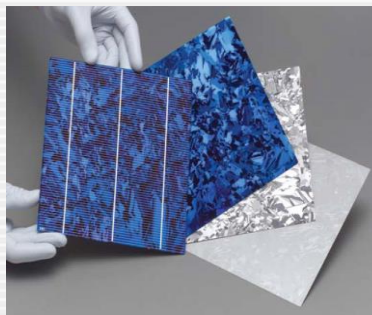
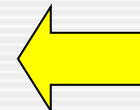
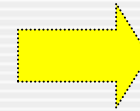
2.1. Wc et conditions standard de tests (STC)

- Irradiation: 1000 W/m²
- Air Mass (AM): 1,5



- T° cellules: 25°C

2.1. La fabrication des cellules Si cristallin

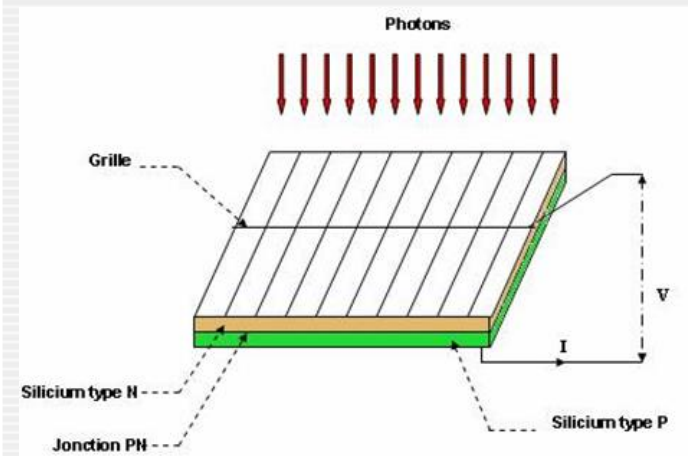
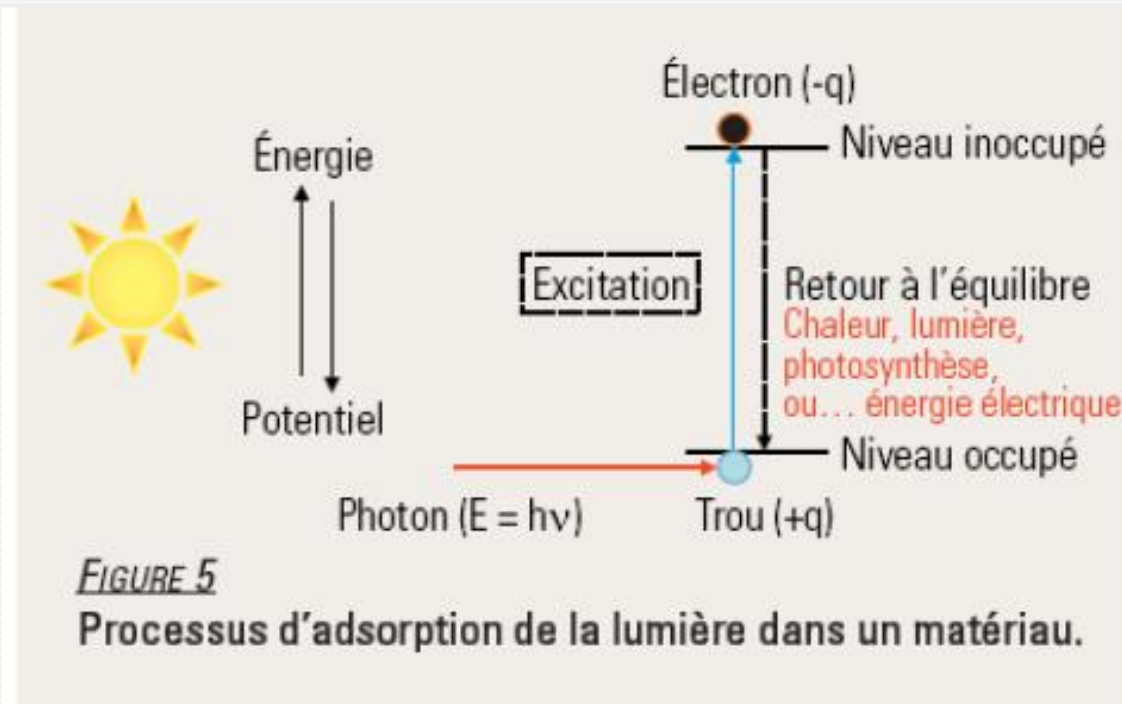


2.1. Test plus compatible avec les conditions réelles (NOCT)

- NOCT = Nominale Operating Cell Temperature
- Irradiation : 800 W/m²
- Air Mass (AM): 1,5
- T° cellules: 40°C
- Vitesse du vent de 1m/s

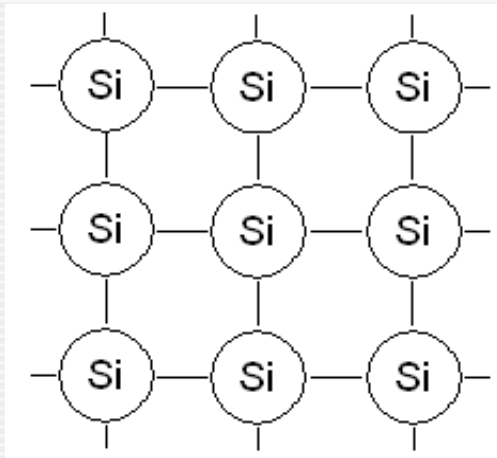
2.2.1. Fonctionnement – conversion d'énergie

Lumière se compose de photons contenant une énergie correspondante aux longueurs d'onde du spectre solaire

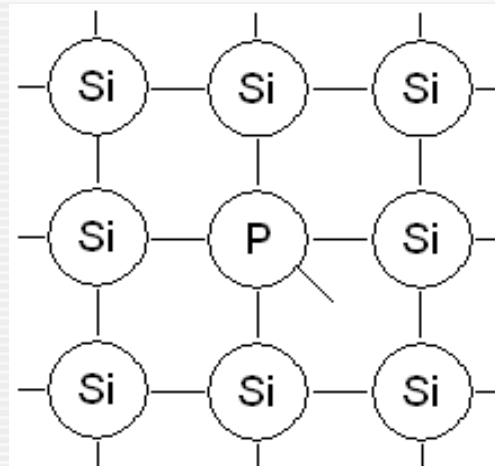


2.2.2. La jonction PN

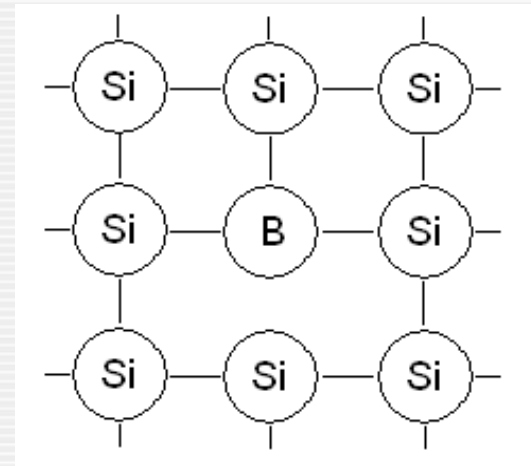
○ Le dopage



Silicium pur
4 électrons

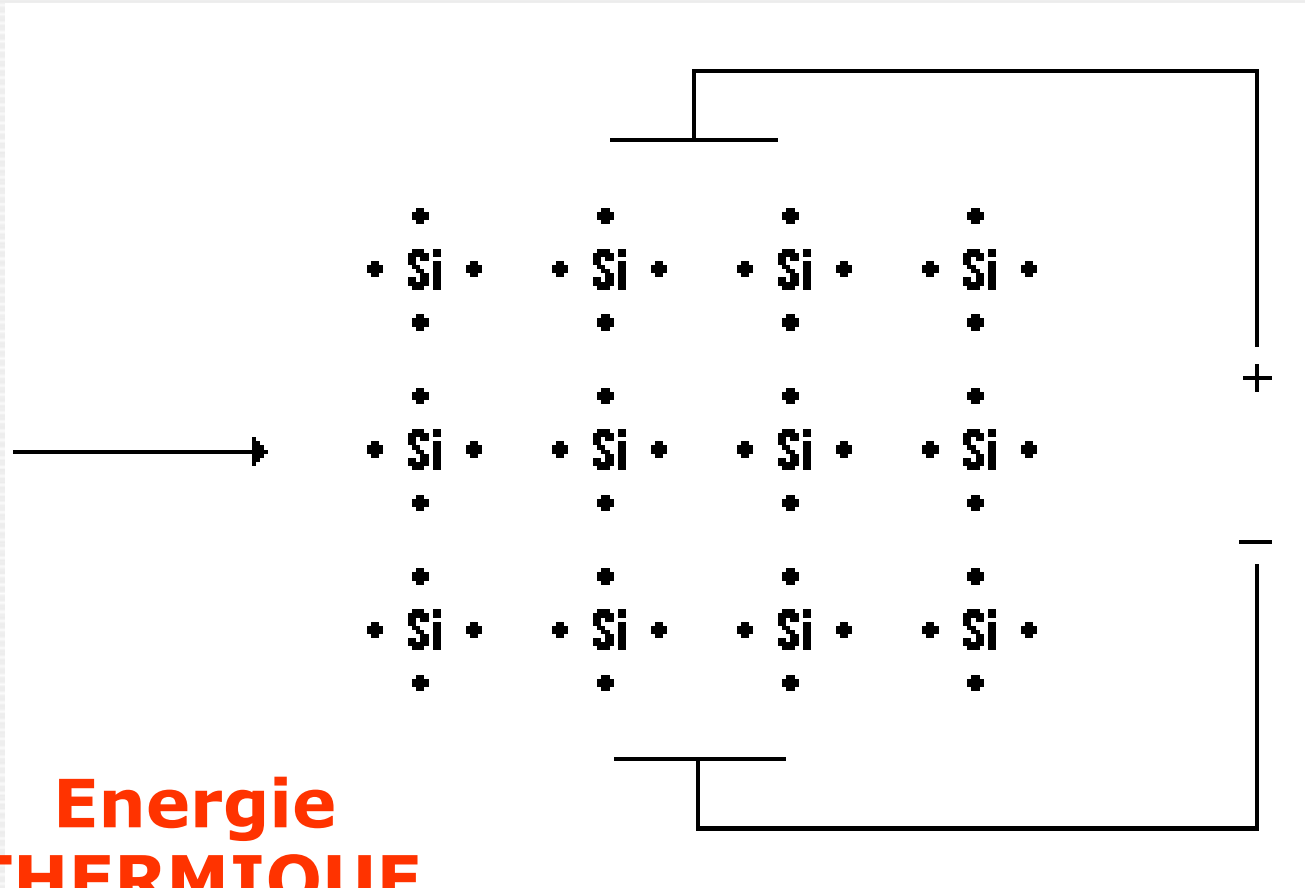


Dopage
Phosphore
5 électrons



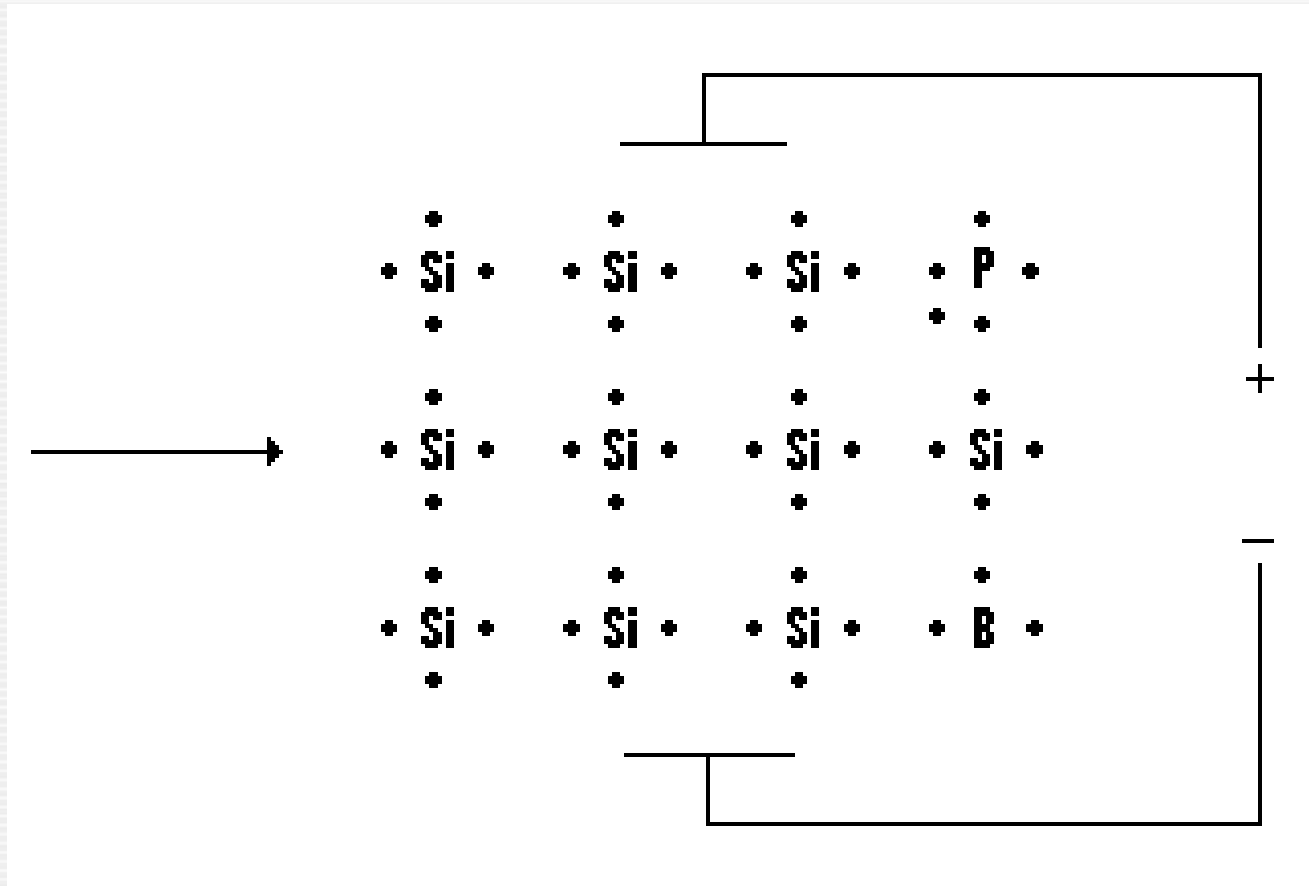
Dopage
Bore
3 électrons

2.2.2. Atome de silicium pur



**Energie
THERMIQUE**

2.2.2. Atome de silicium dopé



2.3. Les types de cellules

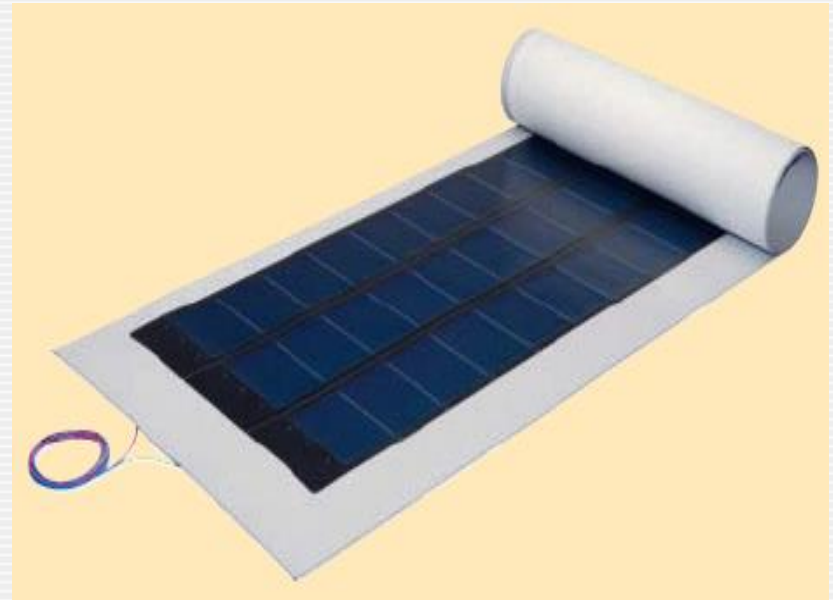
- Les couches minces
- Les silicium cristallins

2.3.1.a. Les Couches minces – silicium amorphe

- Pulvérisation sur un matériau support
- + sensible au rayonnement diffus
- - sensible à l'ombrage

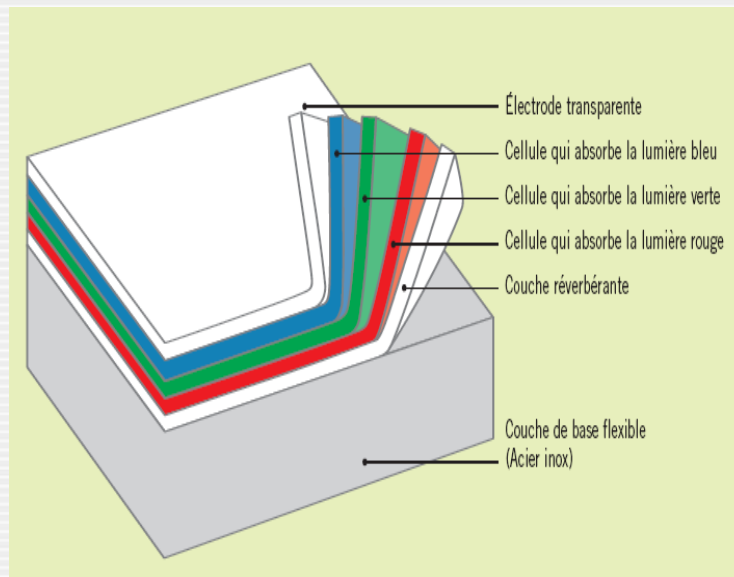
Rendement :
6 à 7%

- Le CIS
- Le CdTe (15,8% en labo)
- Le CIGS



2.3.1.b. Les Couches minces – amorphe multijonction

- Plusieurs couches de Si-amorphe de propriétés différentes
- → Captation d'un plus large spectre



Rendement :
7 à 9%

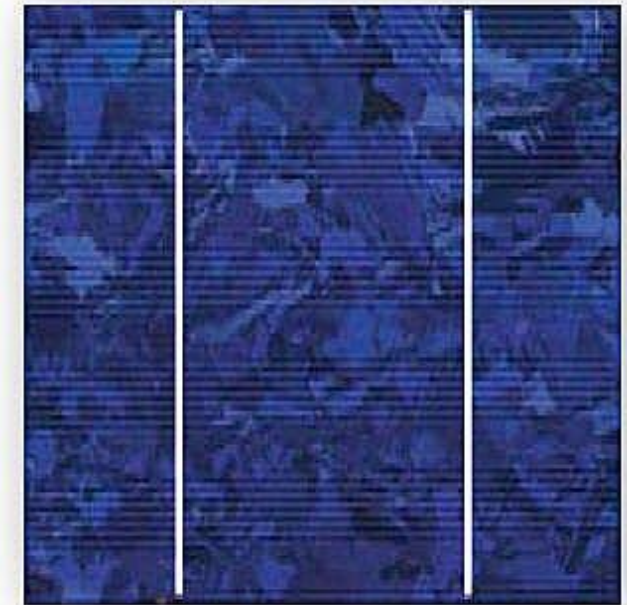
2.3.2. Les cellules en silicium monocristallin.

- Rendement de l'ordre de 21 à 22% (220 - 220 W/m²)
- + sensible au rayonnement direct
- Forme reconnaissable et typique au mono-



2.3.3. Les cellules en silicium polycristallin.

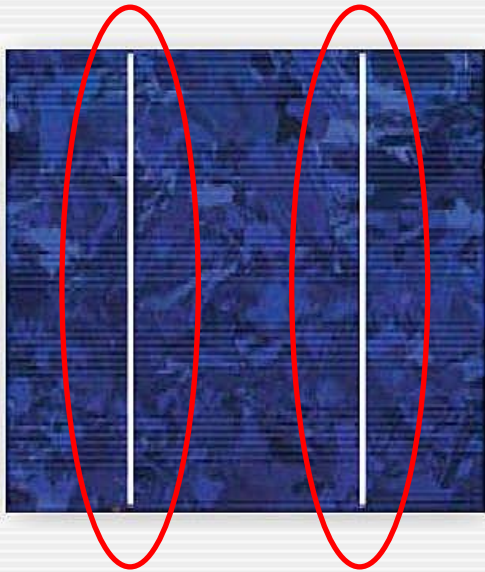
- Rendement d'environ 19% (190 W/m²)
- + sensible au rayonnement direct & à la température
- De en moins en moins présentes



2.3.4. Les cellules n-PERT & p-PERC

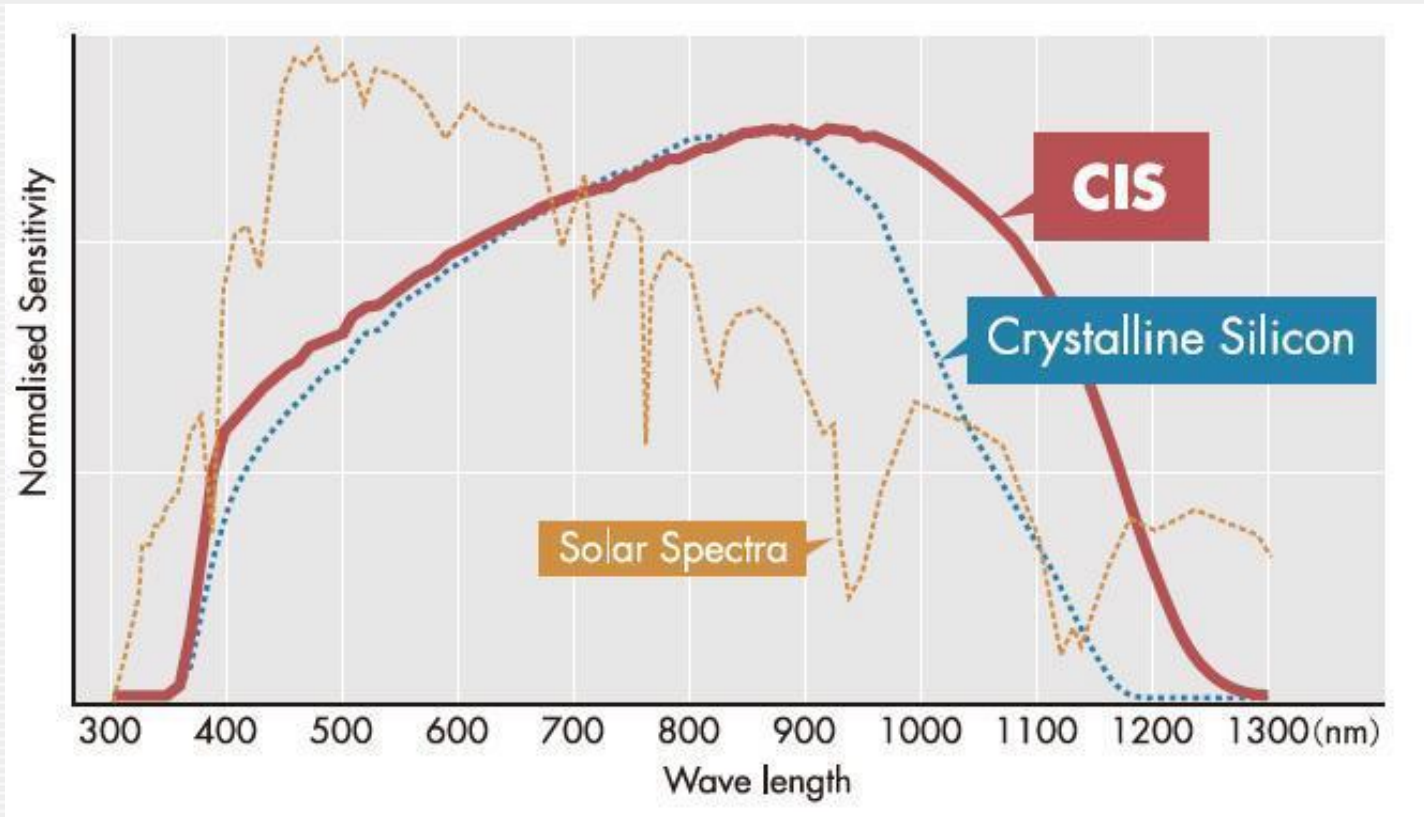
- Technologie mono-cristalline
- Amélioration du façonnage de la cellule lors de la fabrication
- Augmentation de quelques dixièmes de % de rendement

2.3.5. Les collecteurs.



- Nombre de busbar en augmentation
(2, 5 ... 9 et 12 collecteurs)
- Facilité la migration des électrons → augmentation du rendement

2.3.6. Le rendement de la cellule : explication



2.3.6. Le rendement de la cellule : définition

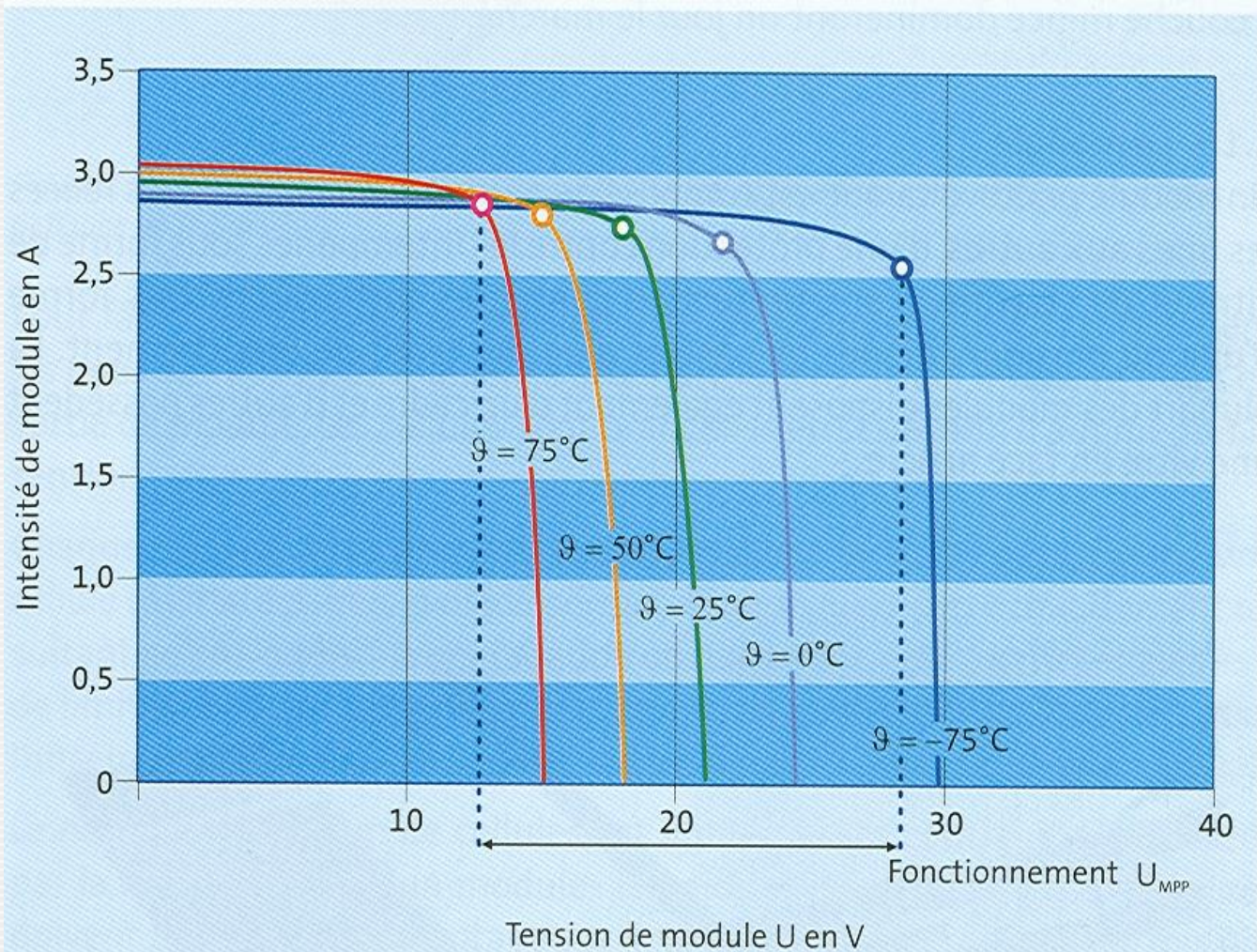
$$\eta = \frac{P \text{ restituée}}{P \text{ reçue}}$$

Type	η % (janv 2021)
a Si	6 à 10
Si Poly	17 à 19
Si Mono	21 à 22

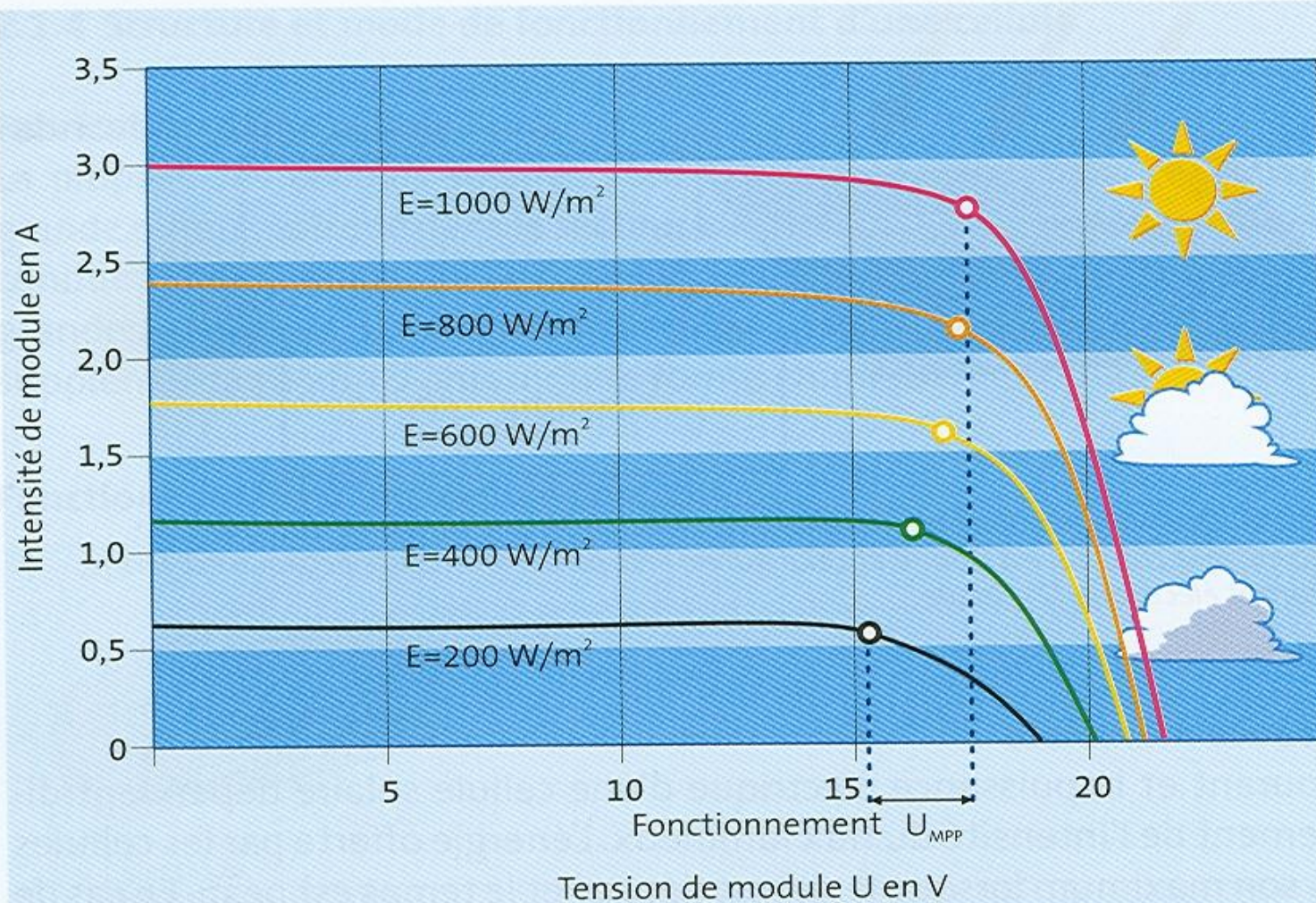


- Différence rendement cellule / rendement module
- → Qualité du verre, conversion en chaleur, ...

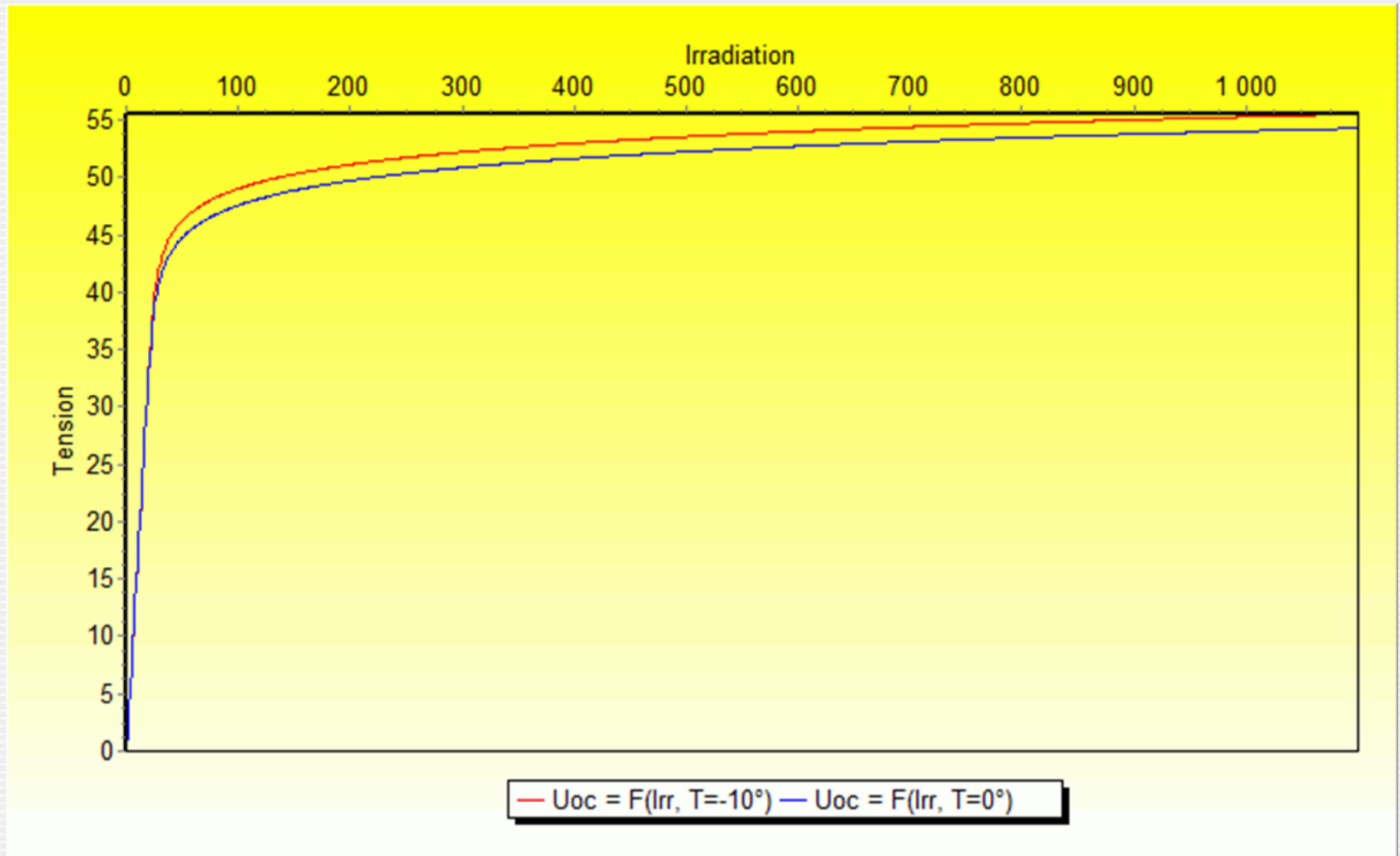
2.3.7.a. Le rendement : influence de la température



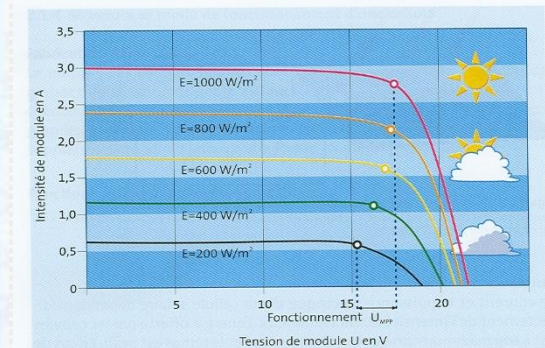
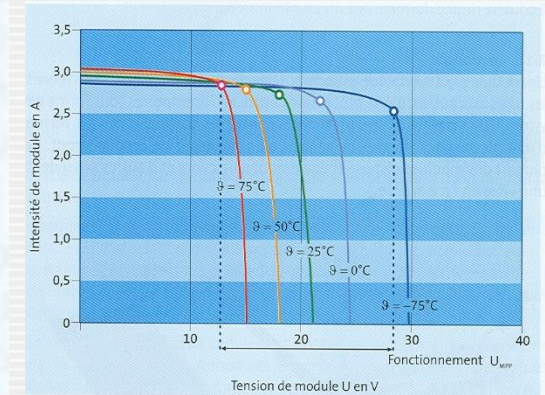
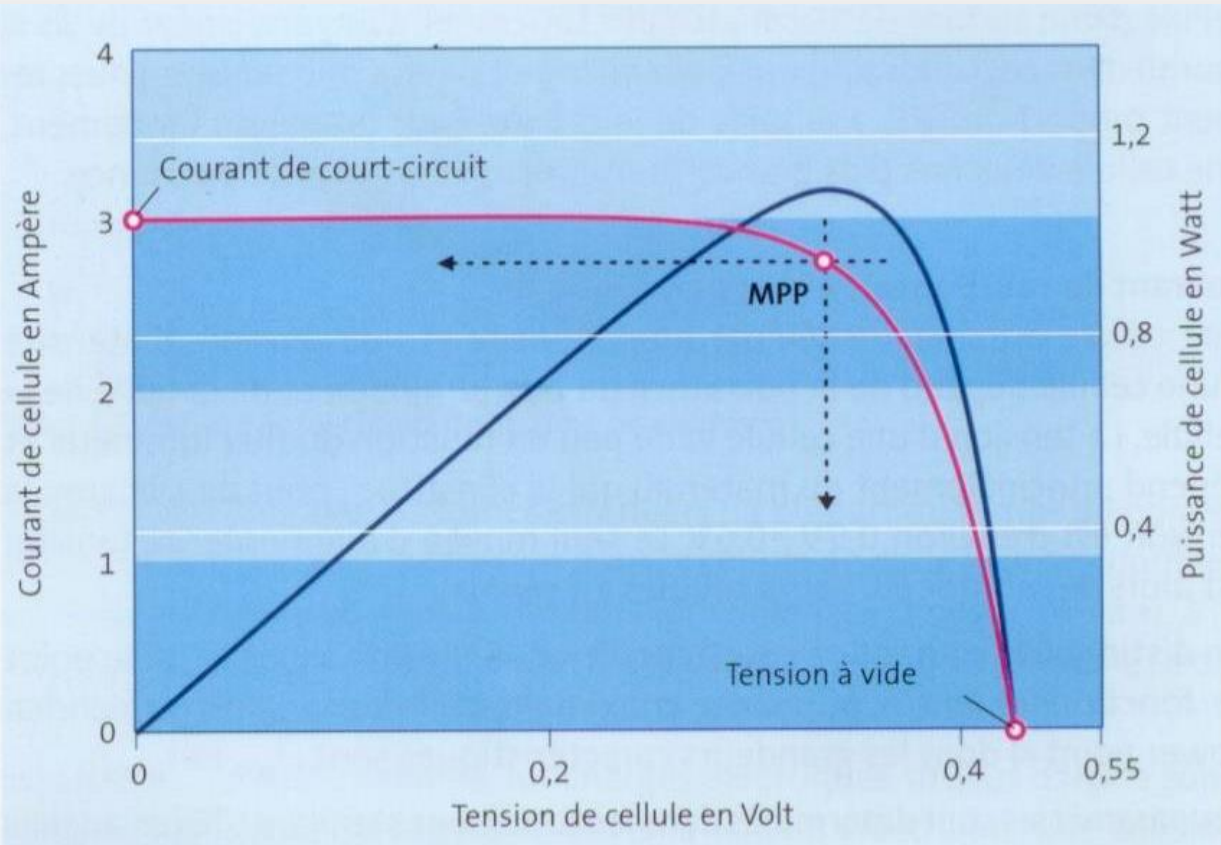
2.3.7.b. Le rendement : influence de l'irradiation



2.3.7.b. La tension

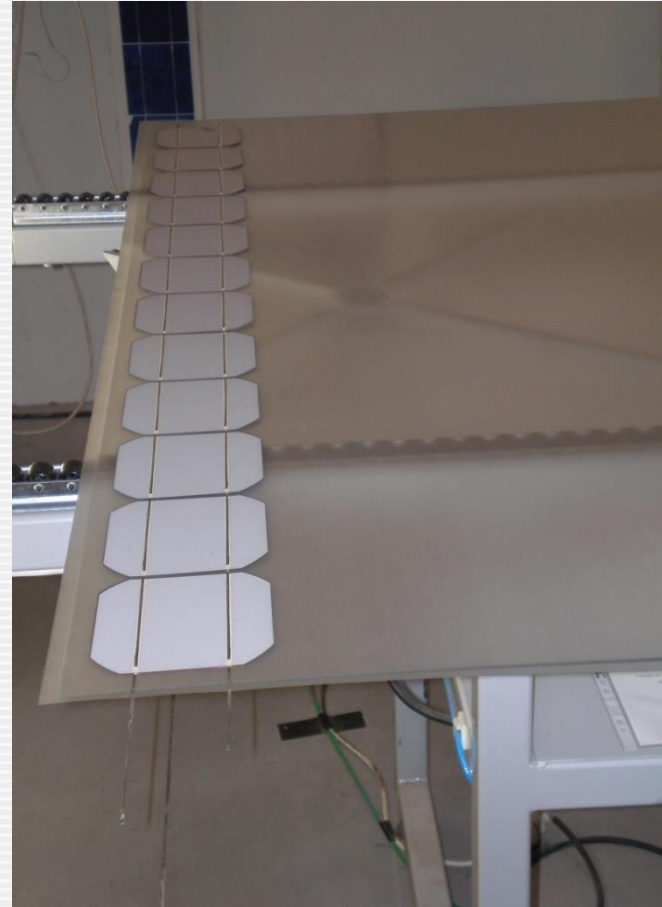


2.3.7.c. La puissance qui en résulte

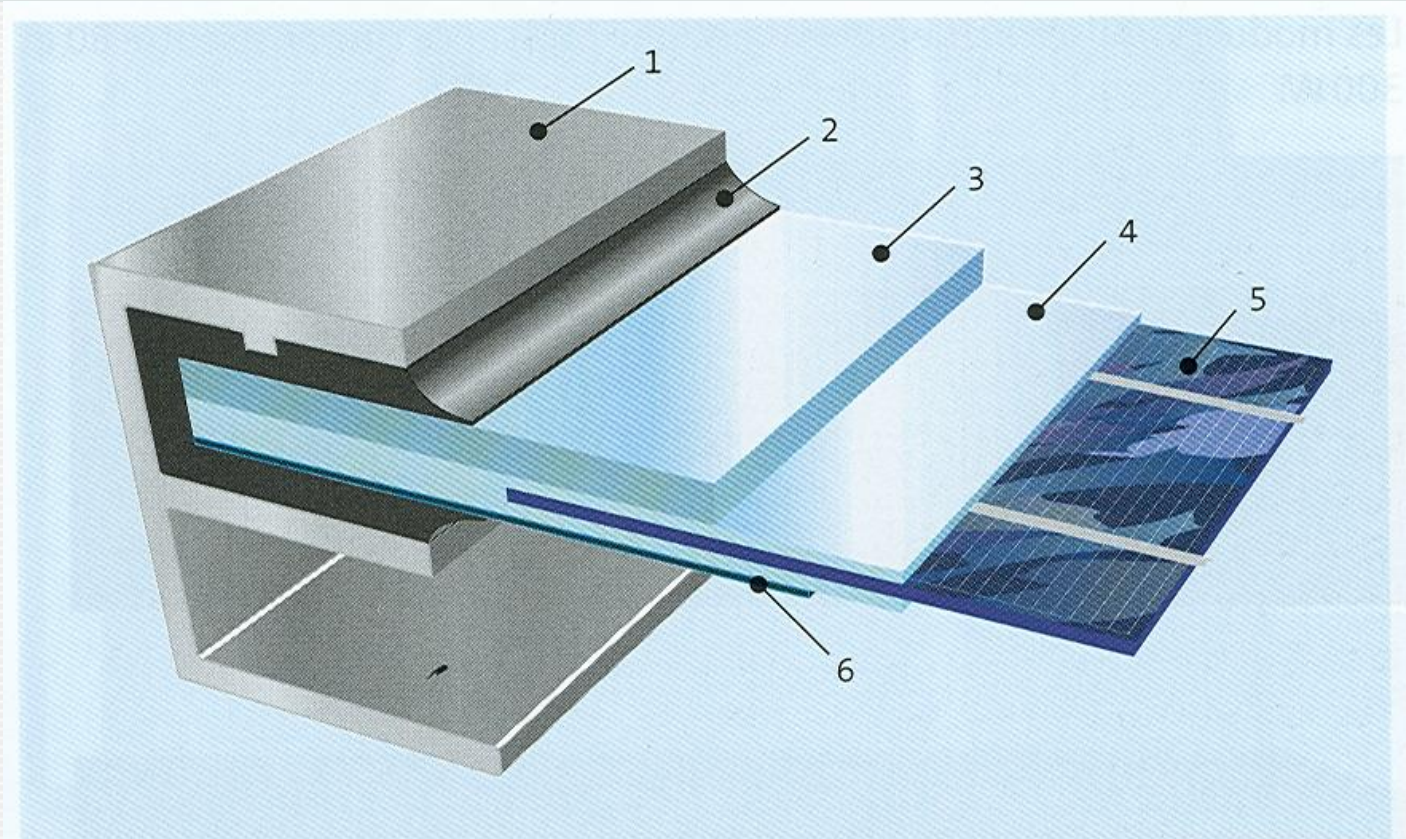


3.1. L'assemblage des cellules

- Constitution de stings de cellules
- Cellules connectées deux à deux



3.2. La fabrication d'un module

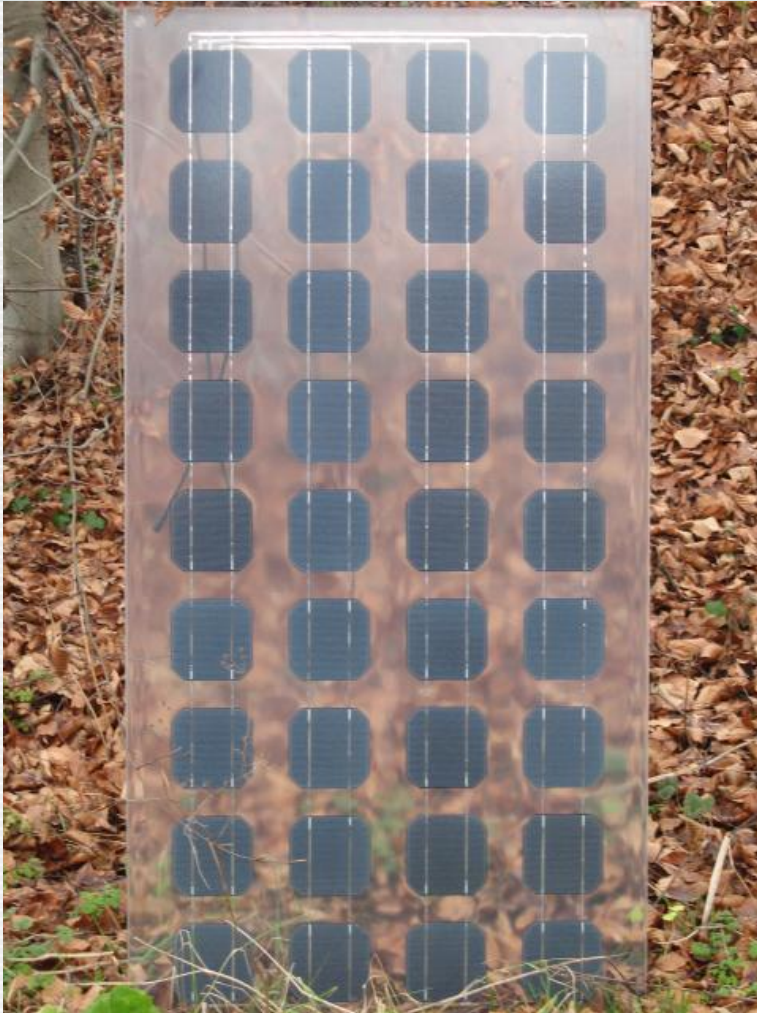


1) Cadre en aluminium, 2) joint, 3) verre, 4) insertion dans de l'EVA, 5) cellules, 6) feuille de Tedlar

3.3.1. Les modules verre-tedlar



3.3.2. Les modules verre-verre



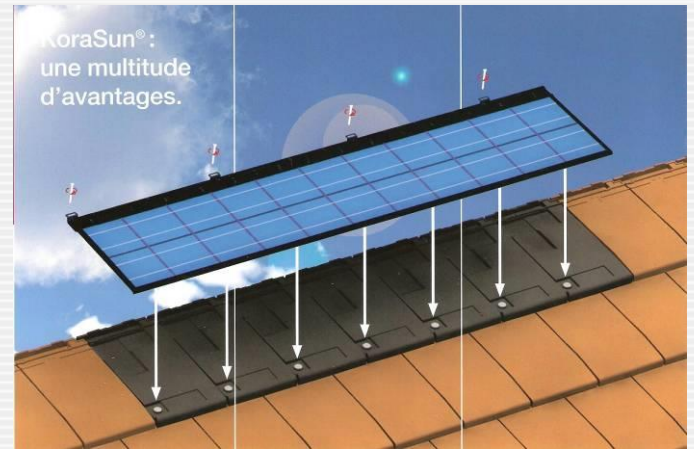
3.3.3. Les modules couches minces souples



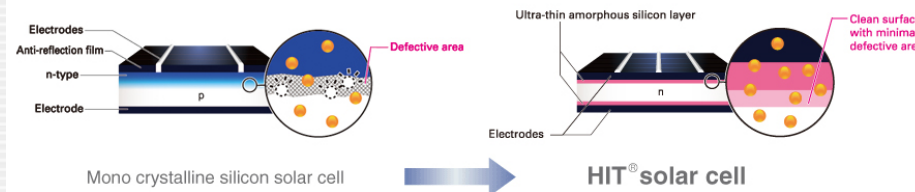
3.3.4. Les modules couches minces rigides



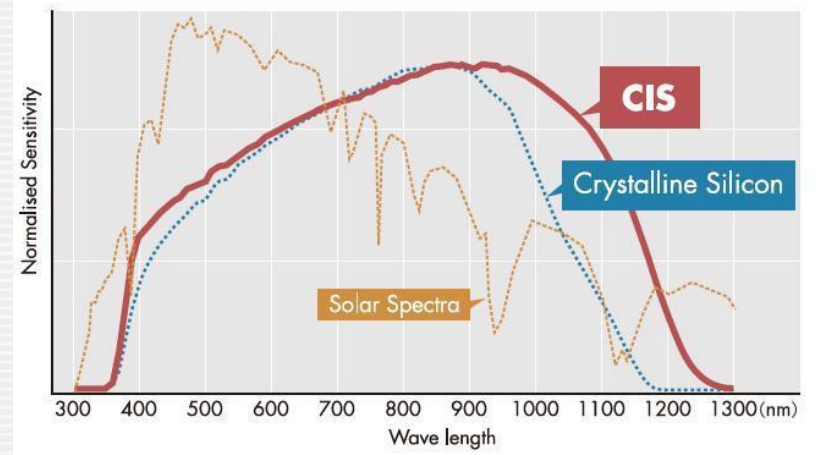
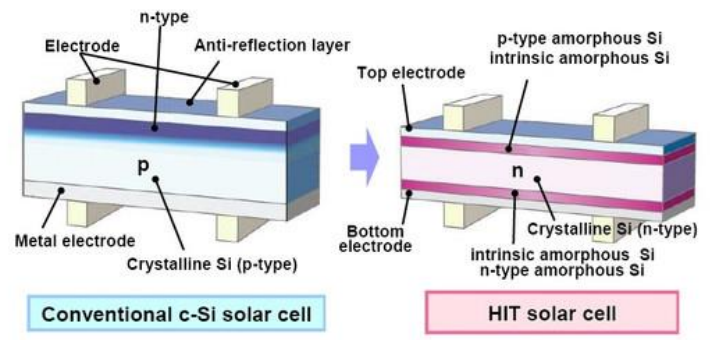
3.3.5. Les ardoises et tuiles solaires



3.3.6. Les tandem

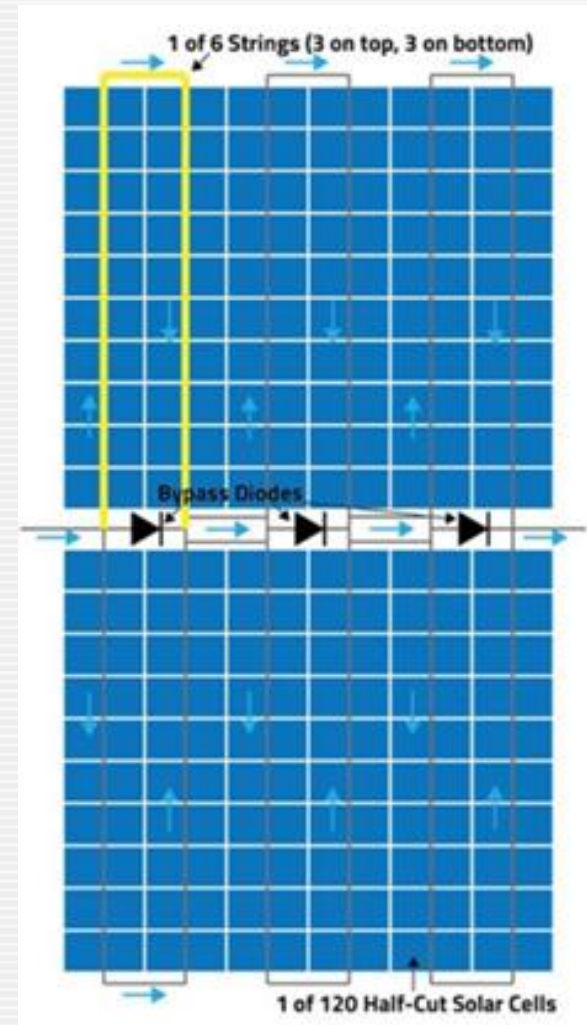


HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) Solar Cell is composed of thin single crystalline Si wafer sandwiched by ultra-thin a-Si layers



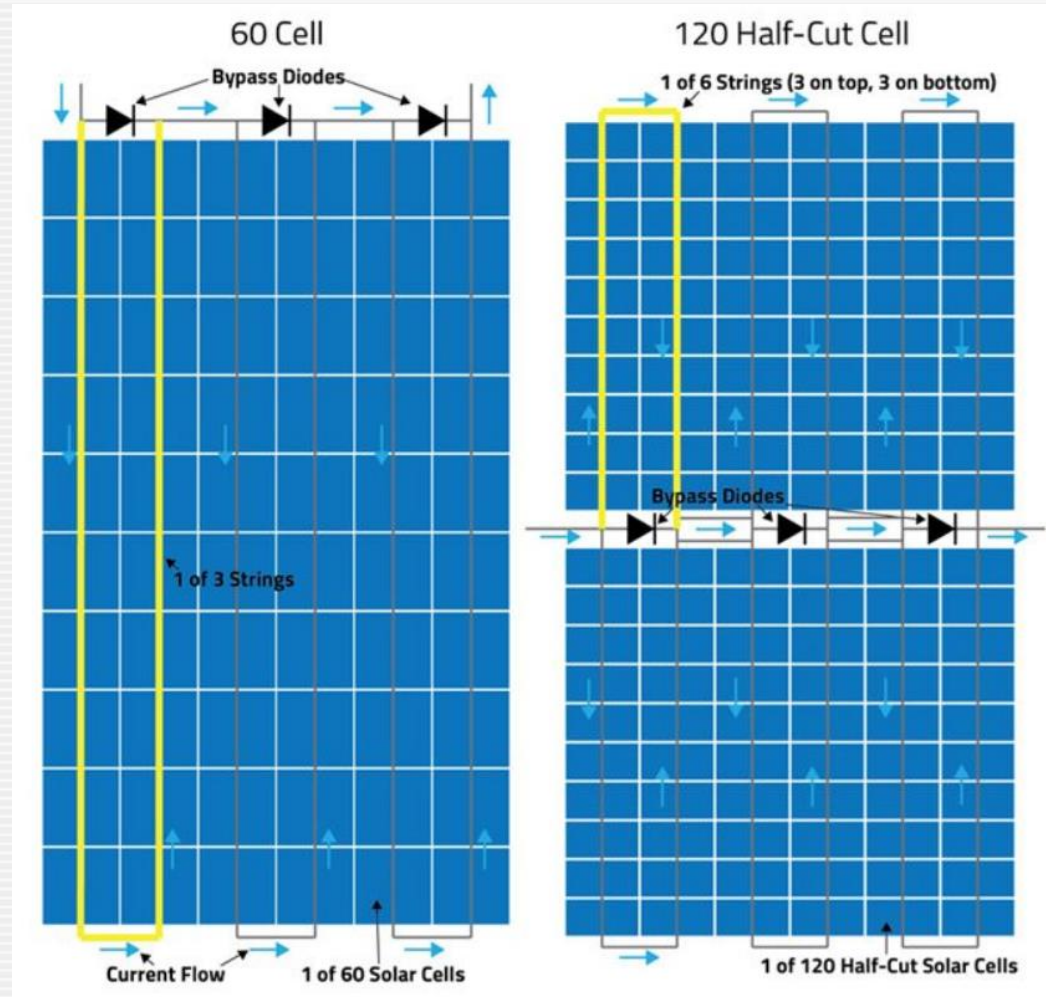
3.3.7. Les modules à demi-cellules et 1/3 de cellules

- Si cellules en série : $U \uparrow - I \rightarrow$
Si cellules en parallèle : $U \rightarrow - I \uparrow$
- Si 120 demi-cellules en série :
→ Tension : x2
→ Courant = $I/2$
- Couplage différent pour obtenir deux chaînes de 60 cellules en parallèle
→ U et I identique à un module classique de 60 cellules



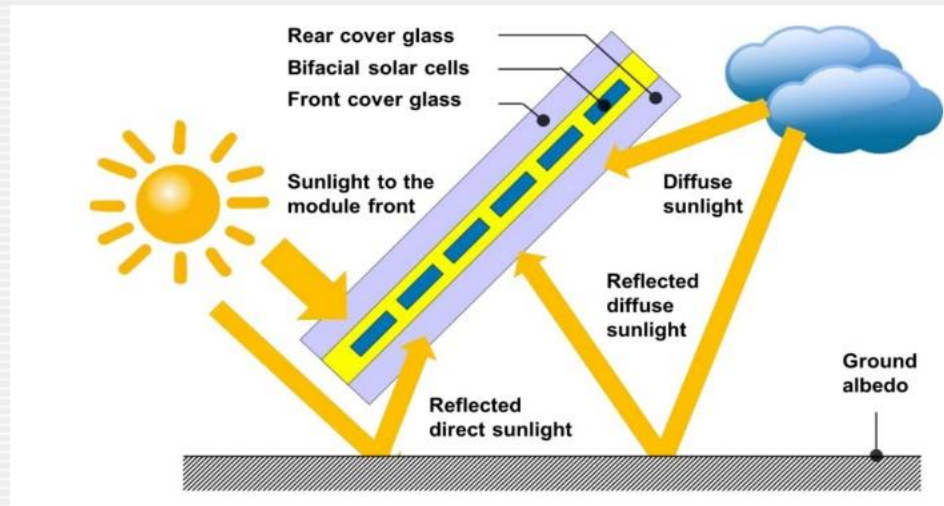
3.3.7. Les modules à demi-cellules

- Couplage des cellules différent
 - Tension identique
 - Courant = 1/2
- Pertes résistives réduites
- Meilleure gestion de l'ombrage



3.3.8. Les modules bifaciaux

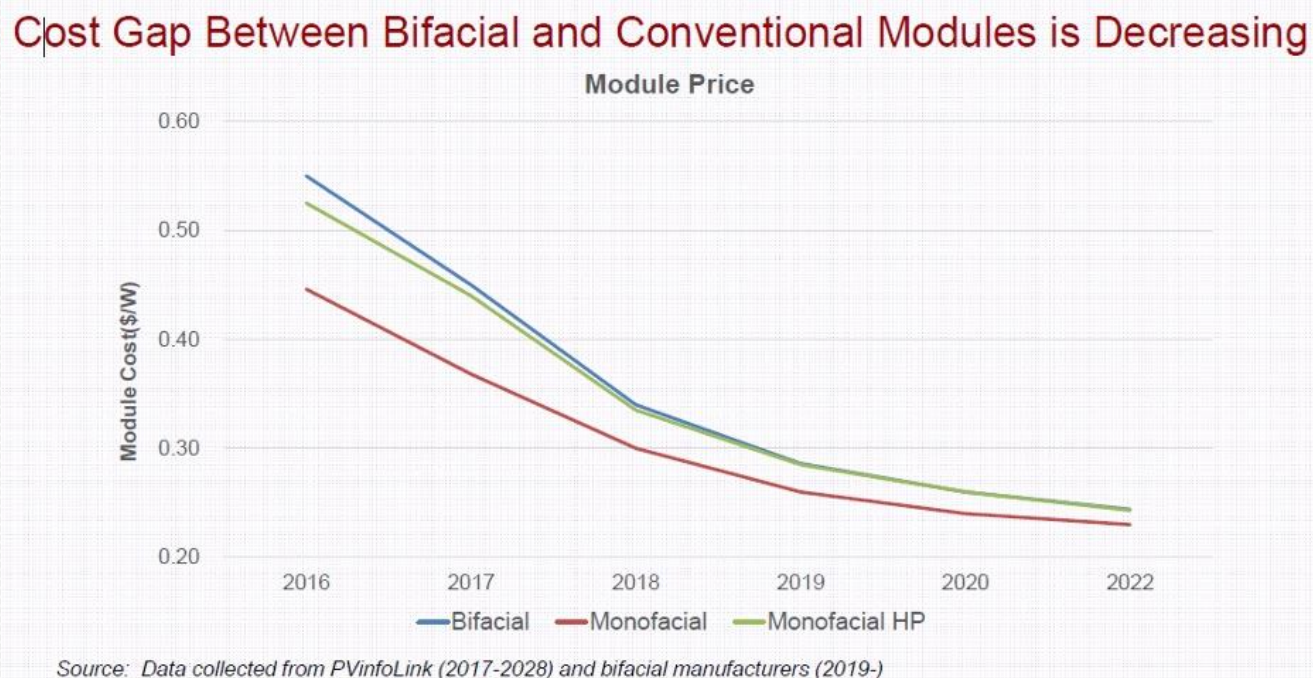
- Technologie datant des années '80
- Production sur les deux faces du module → technologie différente



- Puissance augmentée de 10 à 20%
Si conditions optimales : augmentation jusqu'à 30 à 40%

3.3.8. Les modules bifaciaux

- Coût : quasi similaire aux modules mono-faciaux



3.3.8.a. Les modules bifaciaux

– coefficient de bifacialité

- Exprime l'efficacité de la face arrière par rapport à la face avant avec même irradiation
- Fonction de la technologie & type de parois
- Modules n-PERT : coefficient de 95% mais onéreux !!
Modules p-PERC : coefficient de 70 à 90%



3.3.8.b. Les modules bifaciaux – l'Albedo

- Nature du sol très importante
- Hauteur des modules importante



Grass

➤ Albedo 18%-28%



White paint

➤ Albedo 80-90%



Concrete

➤ Albedo 20-30%



Land

➤ Albedo 15-25%

○

3.3.8.c. Les modules bifaciaux

- Accroissement de la production dépend :
 - Choix du revêtement
 - Entretien du revêtement
 - Réduire les ombres portées sur la face arrière
 - Optimiser l'inclinaison des modules

○

3.4. Le rendement du module

$$\text{rendement } \eta = \frac{P_c}{S \times P_f}$$

$$P_c = W/m^2$$



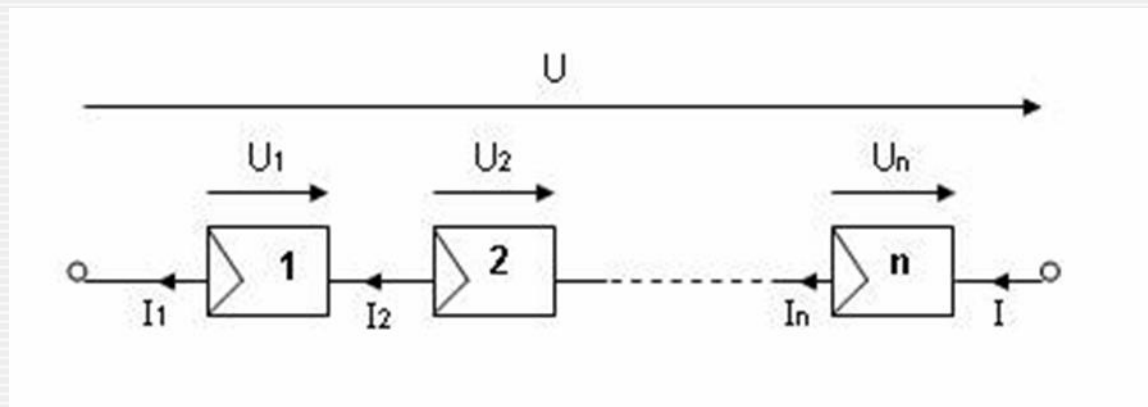
$$P_c = 200 W_c$$

$$P_f = \text{puissance disponible} = 1000 W/m^2$$

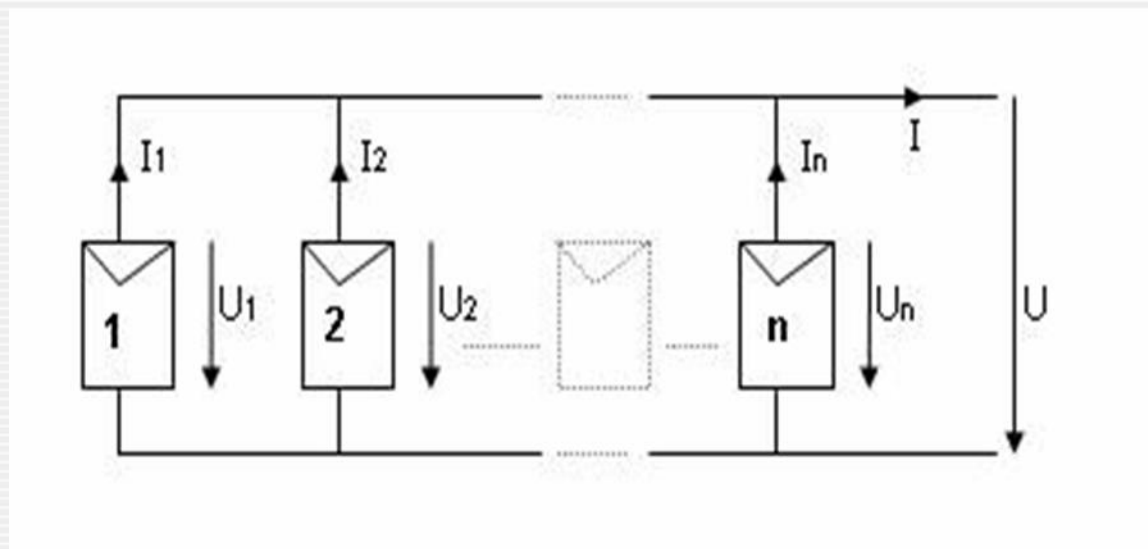
$$S = 1,695 \times 0,96 = 1,6 m^2$$

$$\eta = \text{rendement} = 0,125 \text{ ou } 12,5 \%$$

3.5. Montage série et parallèle

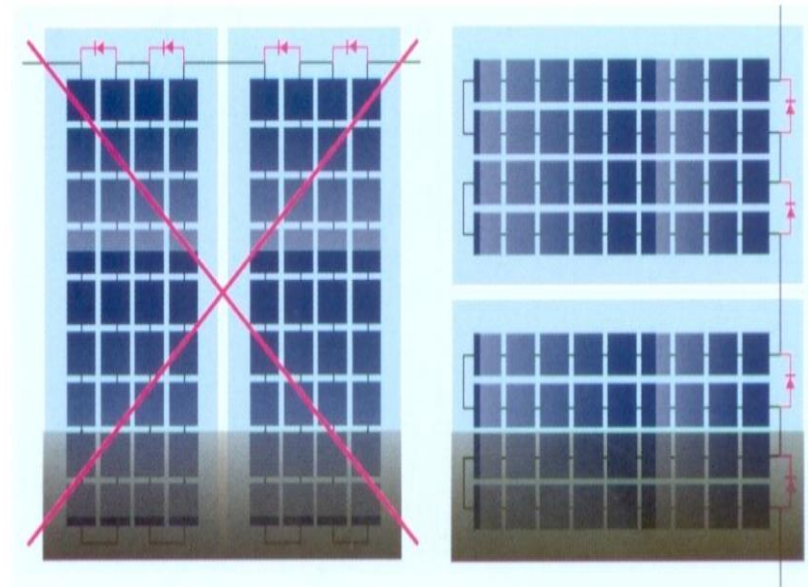
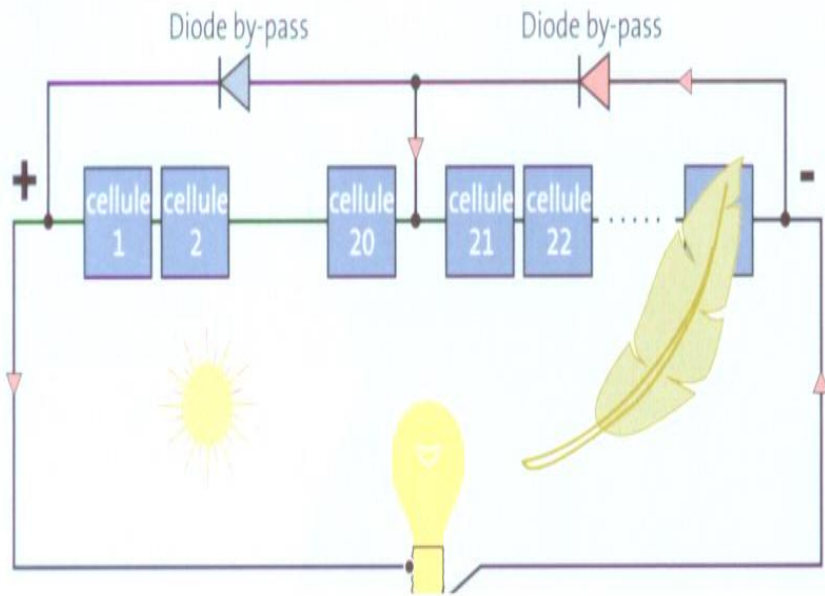


$$U_t = \Sigma U$$



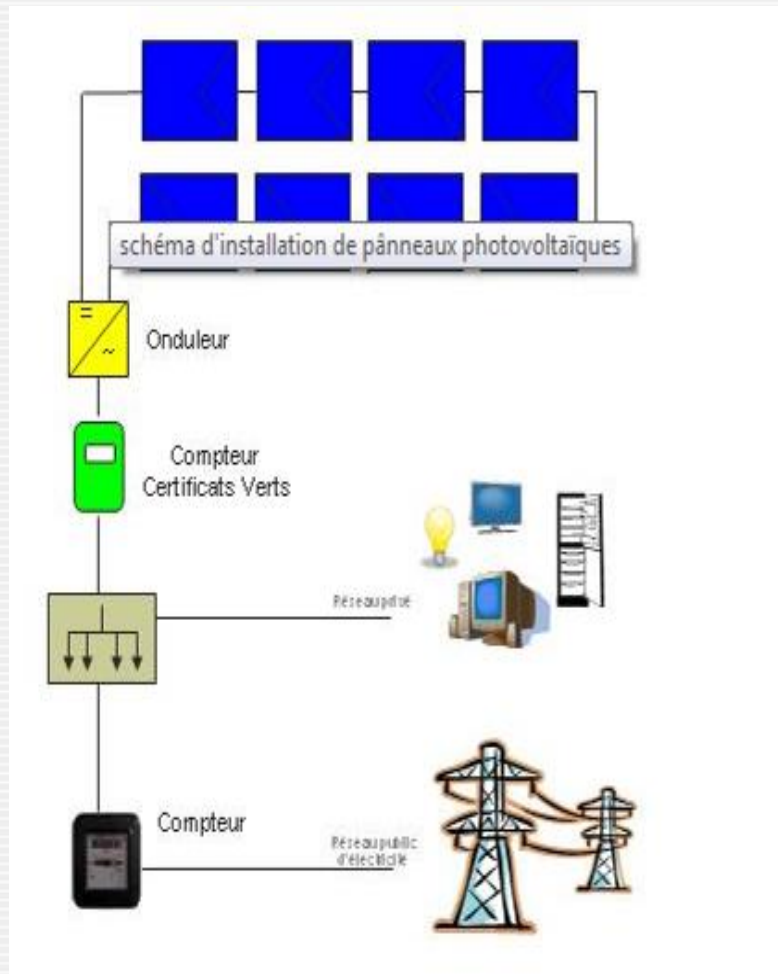
$$I_t = \Sigma I$$

3.6. Protection des modules – Les diodes by-pass

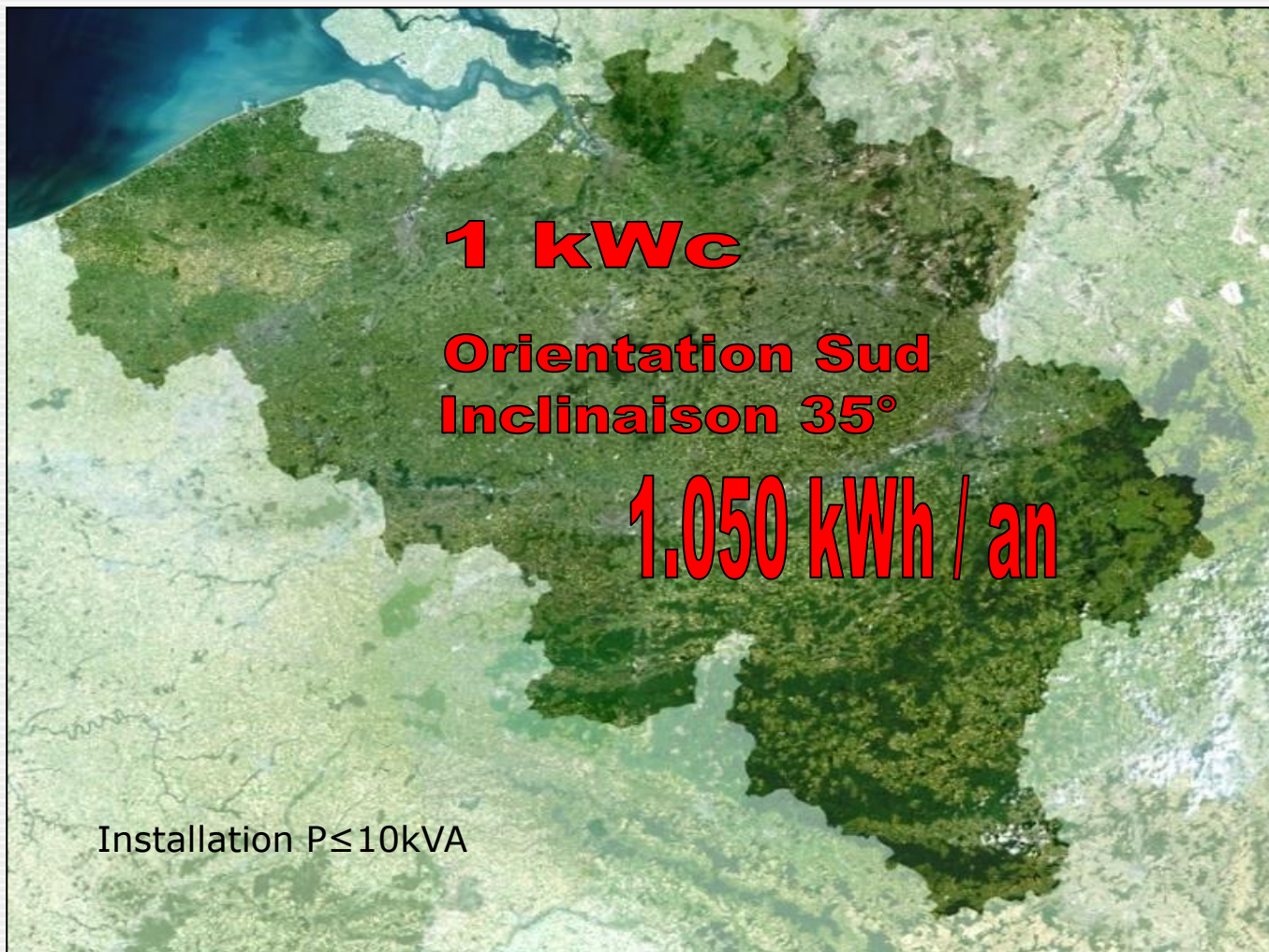


4. Les types d'installation :

4.1.1. Installations connectées aux réseaux



1.1. Le Watt crête et l'Energie produite



3500 kWh/an



3333 Wc

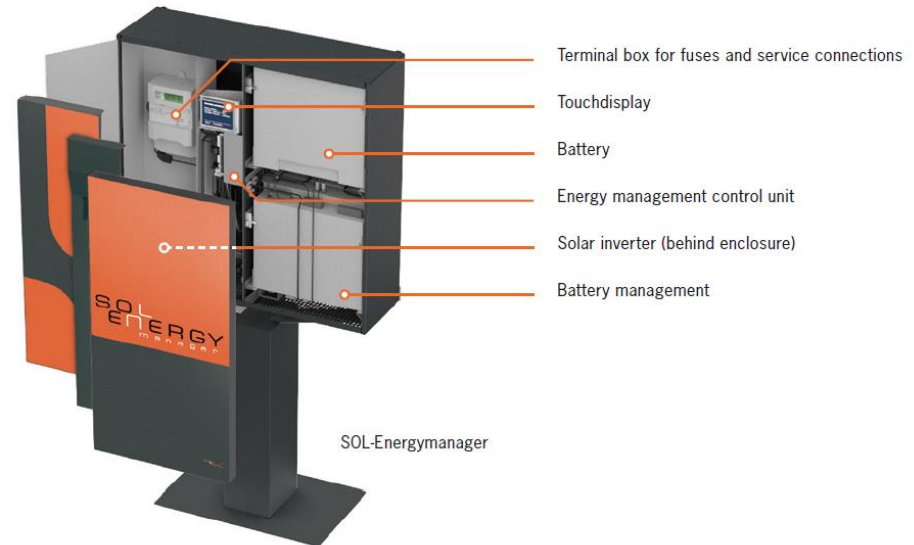
4.1.2. Choix de la taille de l'installation

- Le budget
- La surface de toiture
- L'ombrage
- Les inclinaisons et orientation de toitures
- La consommation

$$\text{nbre de module} = \frac{\text{Puissance de l'installation}}{\text{Puissance du module}}$$

Les types d'installation :

4.1.3. Installations hybrides (réseau & batteries)



Les types d'installation :

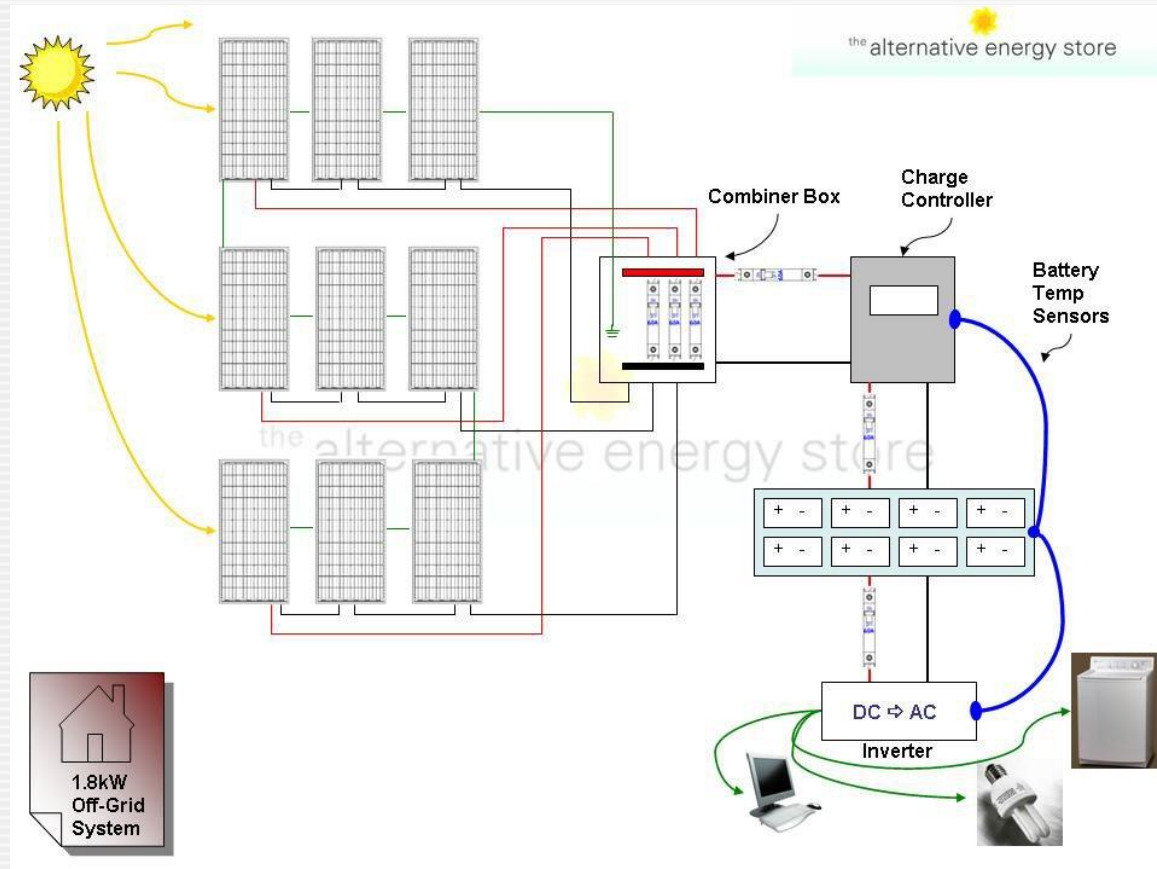
4.3. Installations autonomes (ilotage)



Régulateur



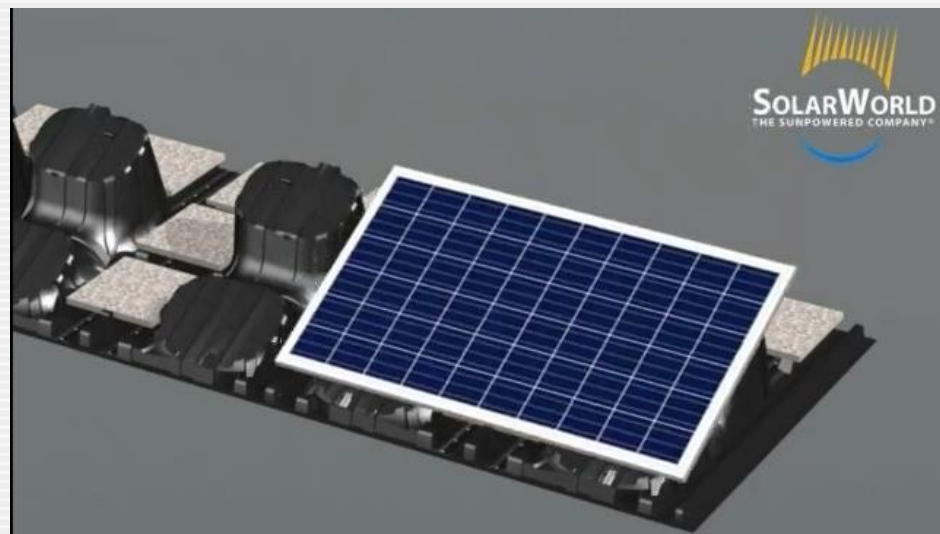
Batteries



4.3.2. Limites d'une installation en ilotage

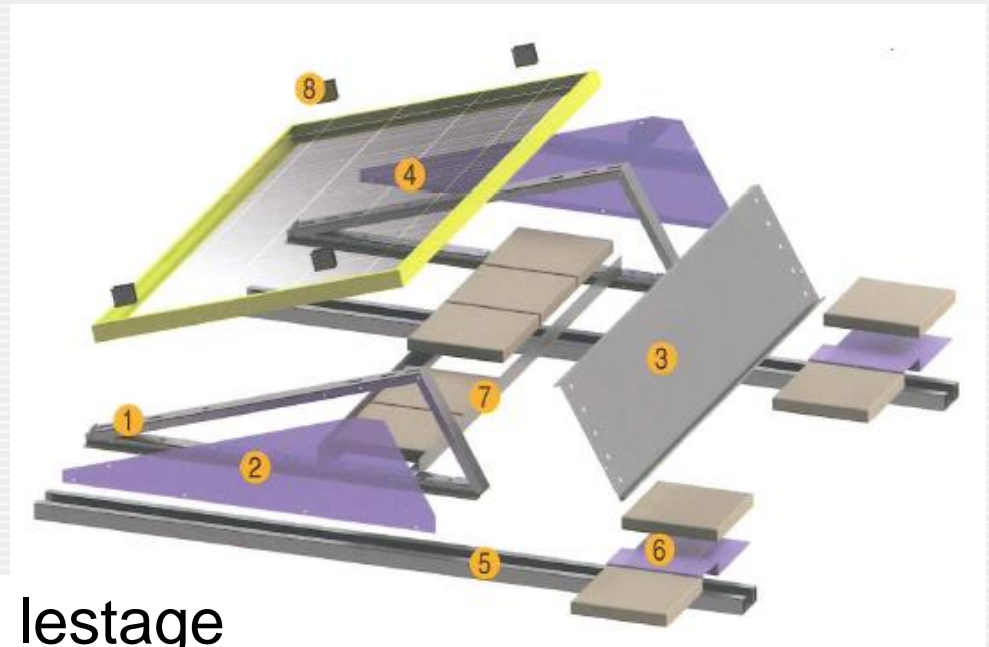
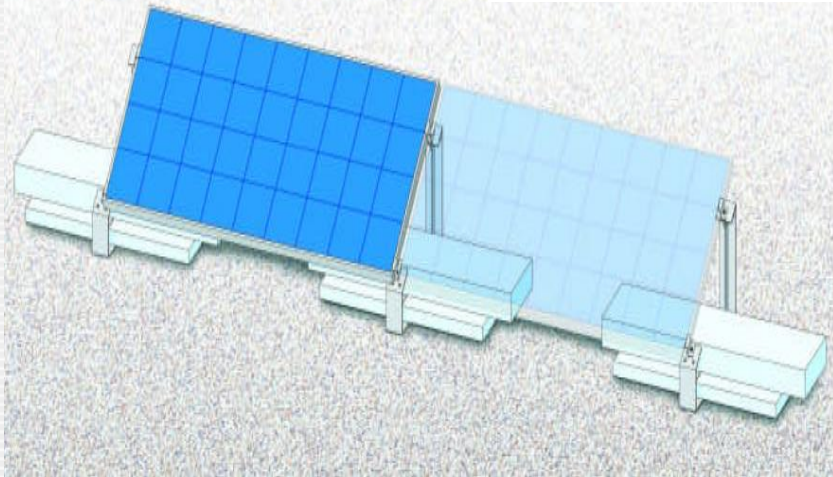
- Le local à batteries (fonction de la consommation et de l'autonomie souhaitée)
- La durée de vie des batteries
- Le prix des batteries
- Le surcoût lié au régulateur DC/DC et au convertisseur DC/AC

4.4.1. Pose sur toitures plates



4.4.1. Pose sur toitures plates

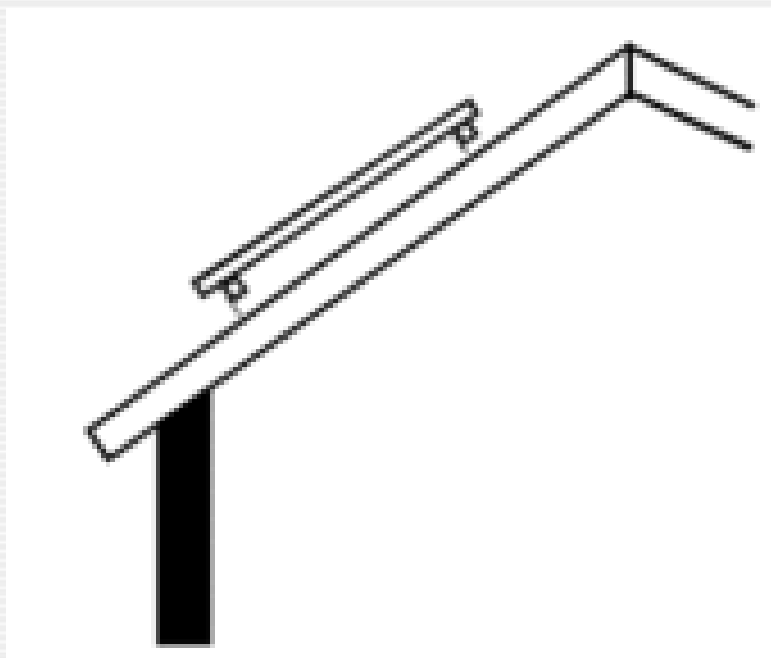
Lestage 80kg/m²



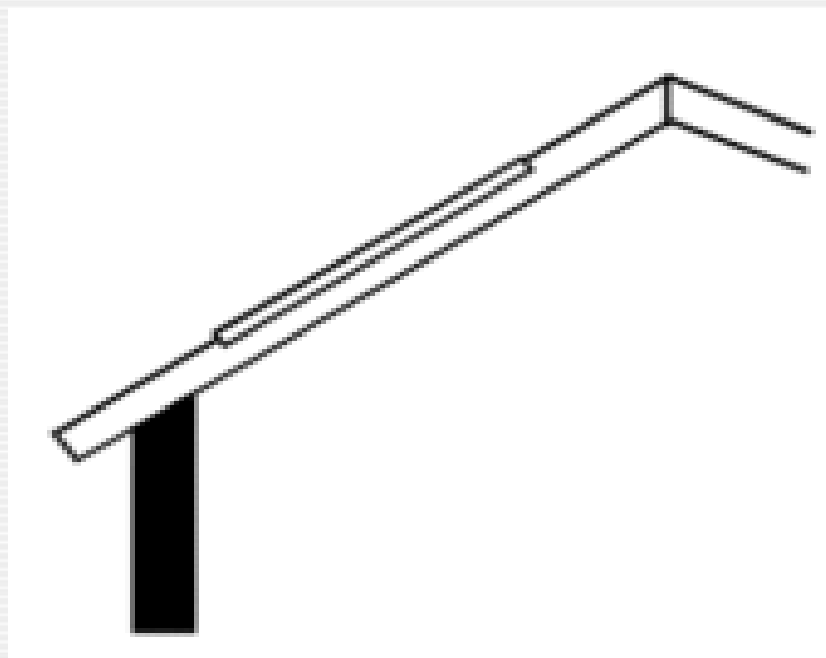
Faible lestage

4;4.2. Pose sur toitures inclinées

Superposition



Intégration



4;4;2. Pose en toitures inclinées

superposition



Intégration

4.4.3. Pose en brises soleil



4.4.4. Pose sur façades verticales ou bardage



4.4.5. Pose en verrières



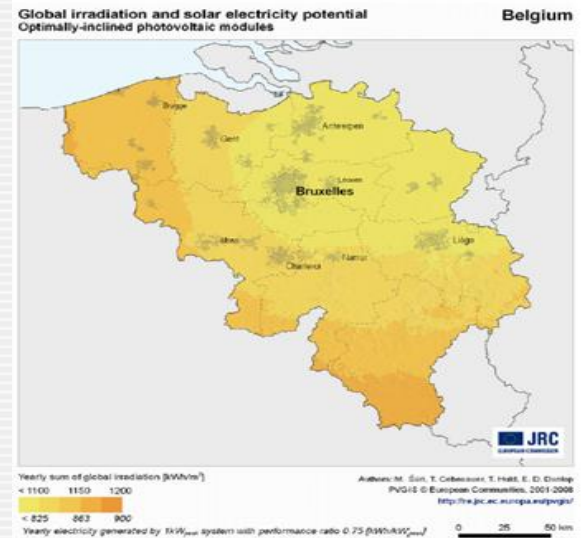
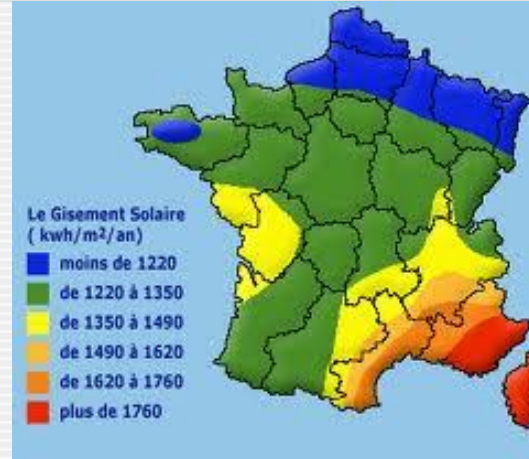
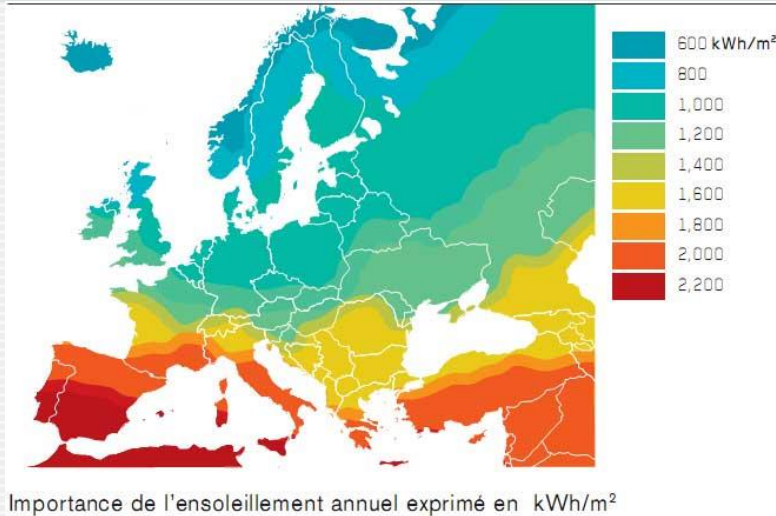
4.4.6. Pose sur sol



4.4.7. Suiveurs solaires



4.5. Le Watt crête et l'Energie produite



En Belgique : 1kWc → 1 050 kWh/an
dans les conditions optimales

→ Comment en arriver à cette relation ?

1kWc donne +/- 1 050kWh/an

> Pour 1 kWc ... il faut +/- 8 m² de modules PV

> 1 m² reçoit en Belgique ... 1000 kWh/an d'énergie

Donc :

1 kWc reçoit en Belgique : 8 x 1000 soit 8000 kWh/an

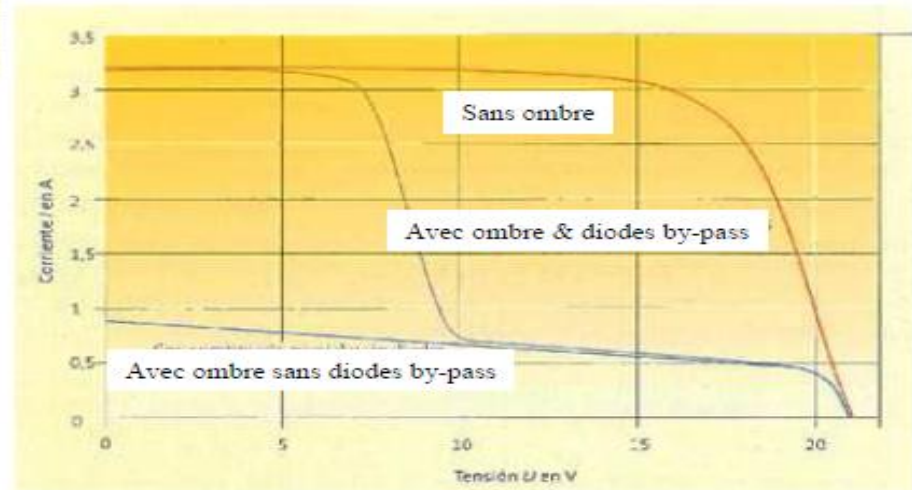
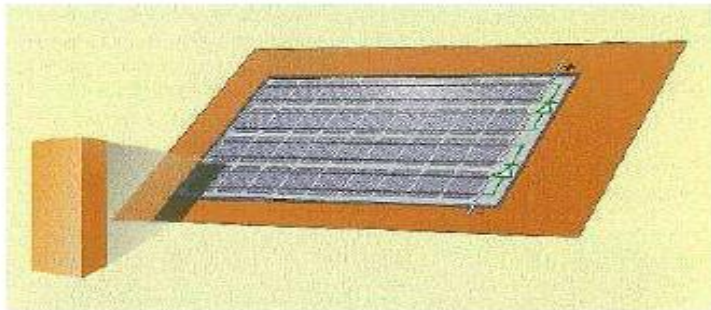
> Une installation PV restitue ... +/- 11 à 13% (rendement)

Donc :

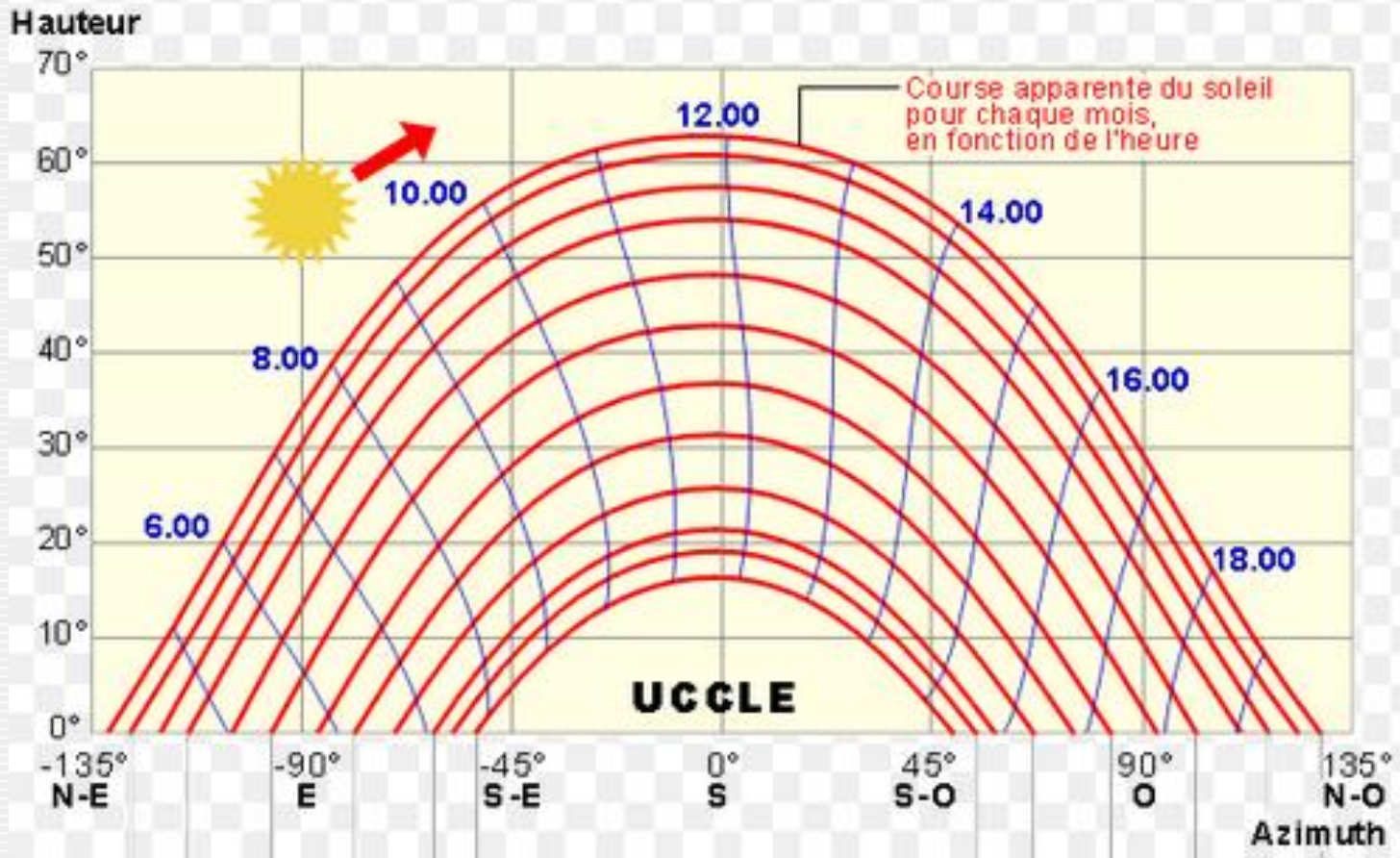
1 kWc produit environ 8000 x 0,131 soit +/- 1 050 kWh/an électrique

4.6.1. Le choix de l'emplacement (l'ombre)

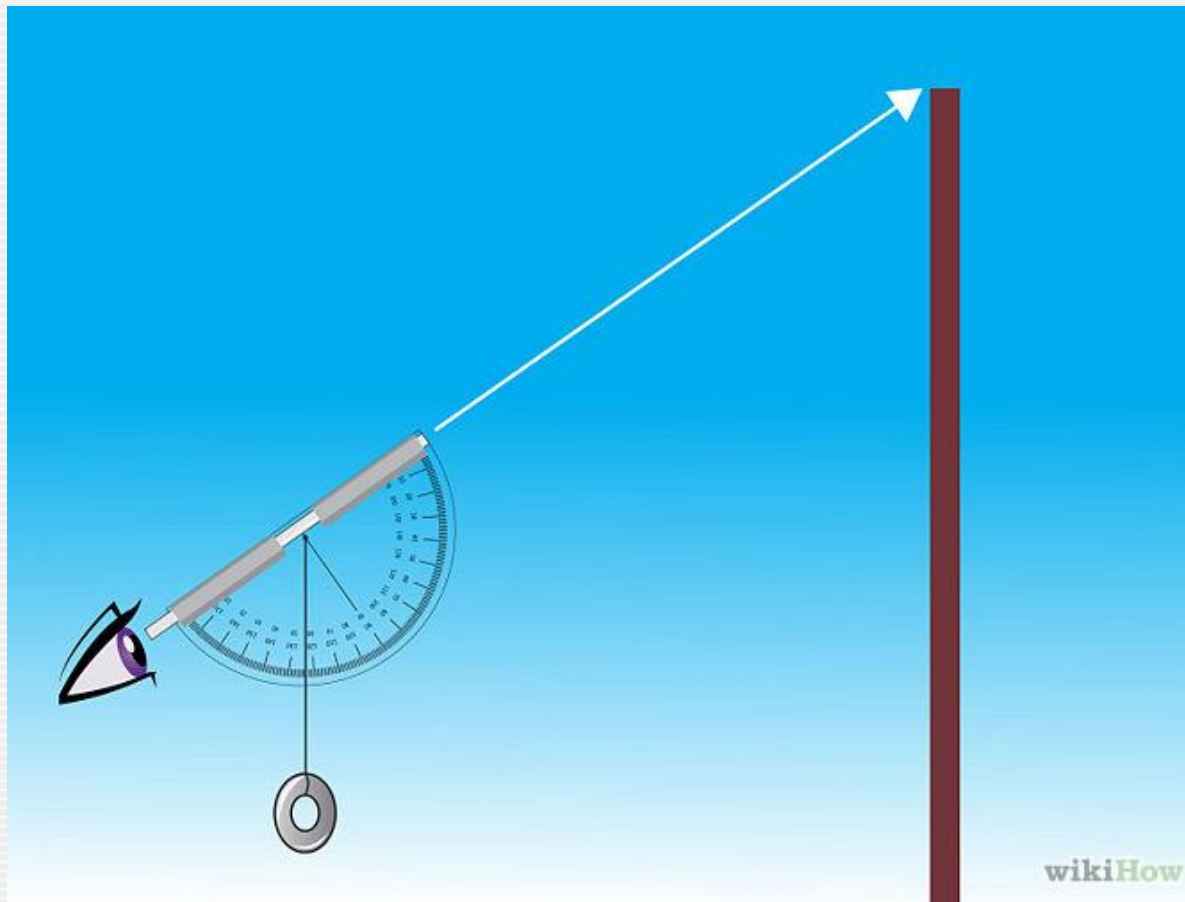
Influence de l'ombre sur un module PV



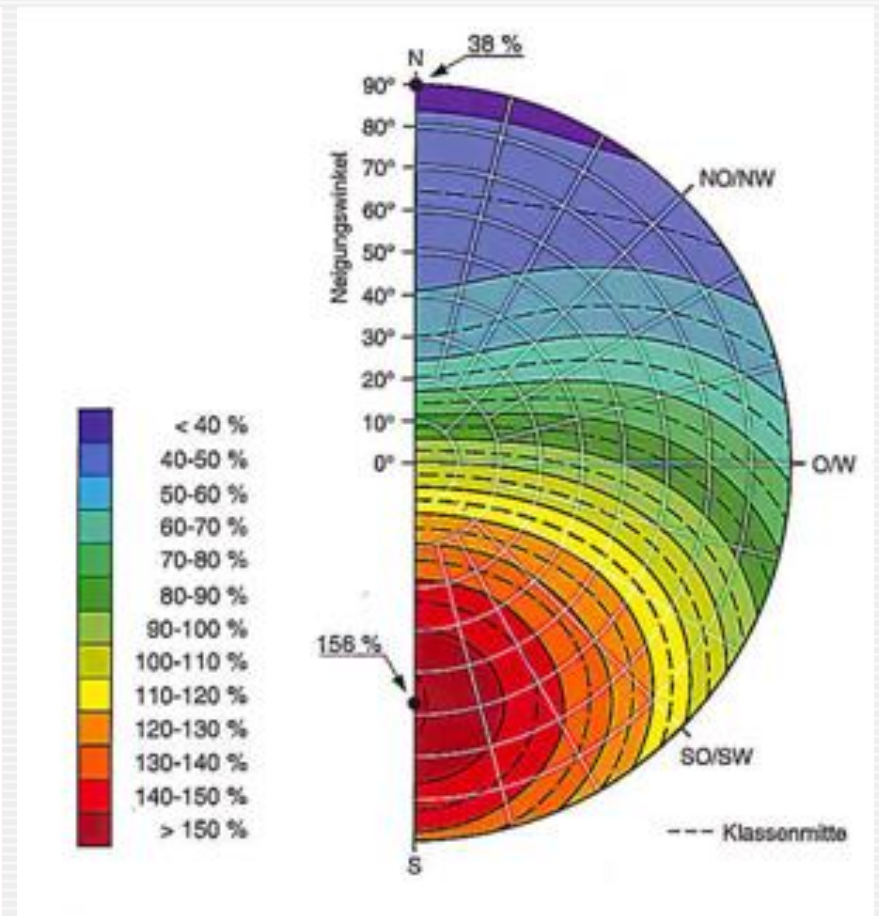
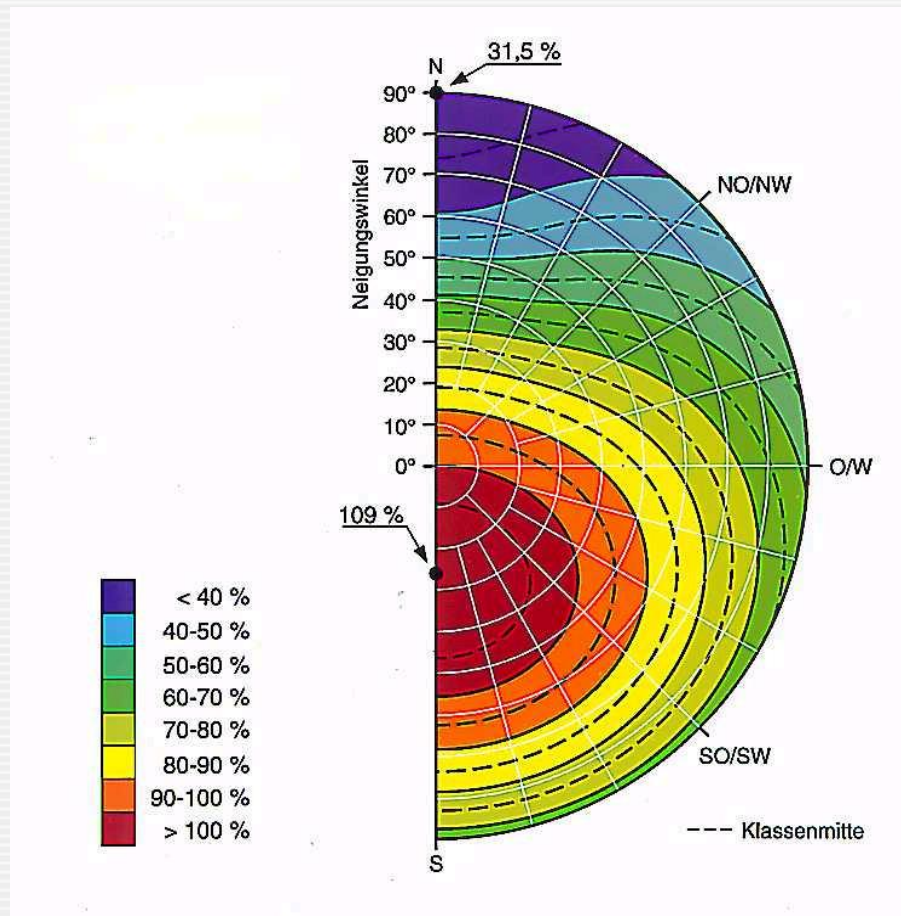
4.6.1. Relevé d'ombrage (1)



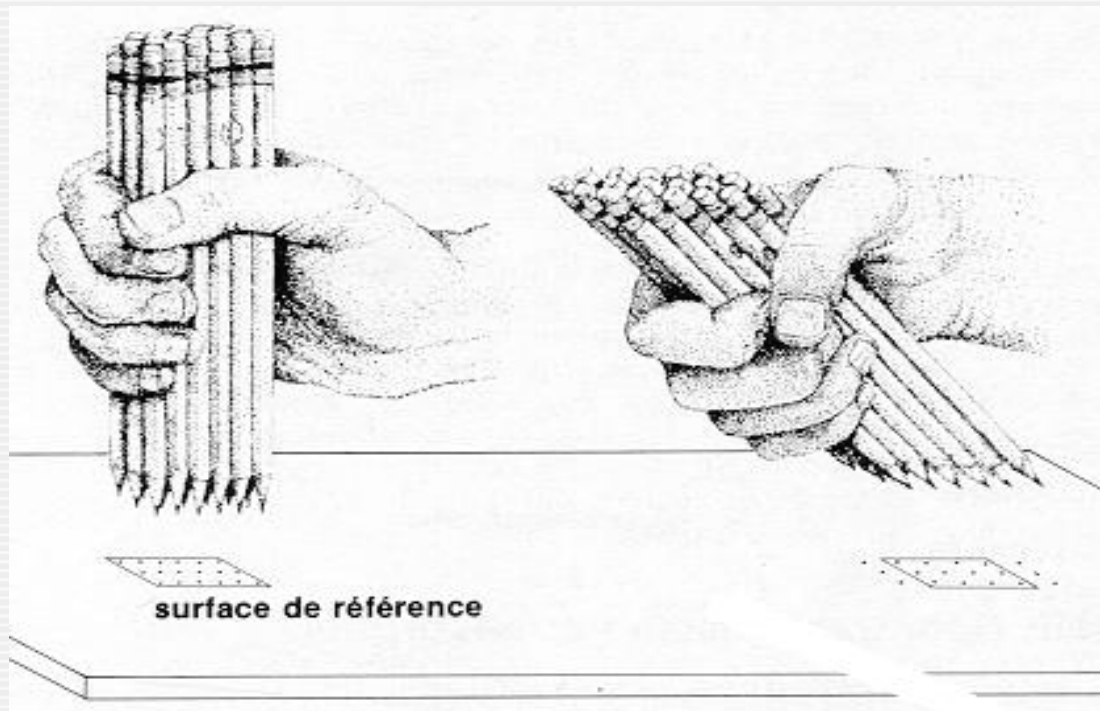
4.6.1. Relevé d'ombrage (2)



4.6.2. L'orientation



4.6.3. L'inclinaison



4.6.4. Le facteur de correction

Coefficient de Correction

© www.ef4.be

		inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	sud	88%	96%	99%	max 100%	98%	87%	68%
	sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

Exemple:

4kWc de modules orienté sud-est et incliné à 15° → CCr = 0,93

1 kWc → 1050 kWh x 0,93 = 976,5 kWh/an (en Belgique)

4 kWc → 976,5 kWh/an x 4 = 3906 kWh/an

4.6.4. Couplage orientation Est - Ouest



- Optimisation d'une surface plane
- Modules dos à dos ; inclinaison à 10°
- Réduction de la prise au vent
- Permet de placer 2x plus de puissance qu'une orientation plein sud

4.6.5. Présence de neige



η annuel \rightarrow 0,5 %

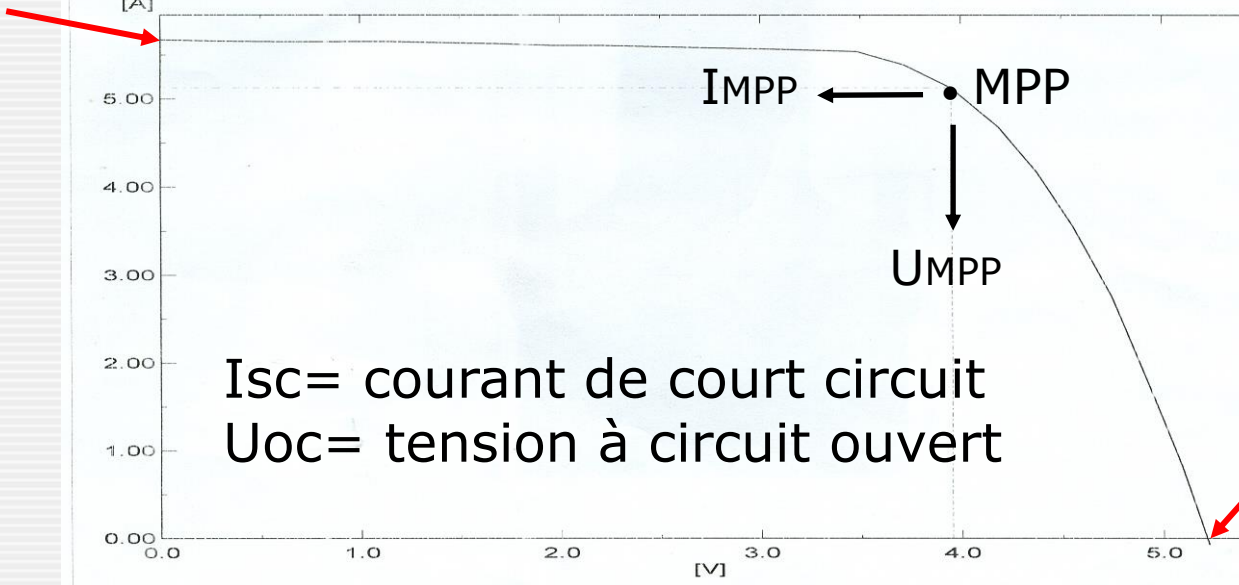
4.7. Le courant de court circuit et la tension à vide

Sun Simulator III - Production version V3.02
Measure

Fabrique/Commande : DROBen Production
Type module/Type cellule : DROB CP 125
Test no : 9
Nc de série : VGJ
Date : 060918
Type Cell, Ref : Mono
Numéro Id. C.R.:
Sensitivité : 122.0 mV
Temp.: 20.0 C
Resultat : 01 - Reject

Temp.Ref. = 25.0 C
Irrad. = 0.998 kW
Isc = 5.67 A
Voc = 5.22 V
Eff. = 2.31 %
FF = 68.50 %
MPP = 20.262 W
Vmpp = 3.95 V
Impp = 5.13 A
Rser. = 0.149 Ohm
Rsht = 39.307 Ohm

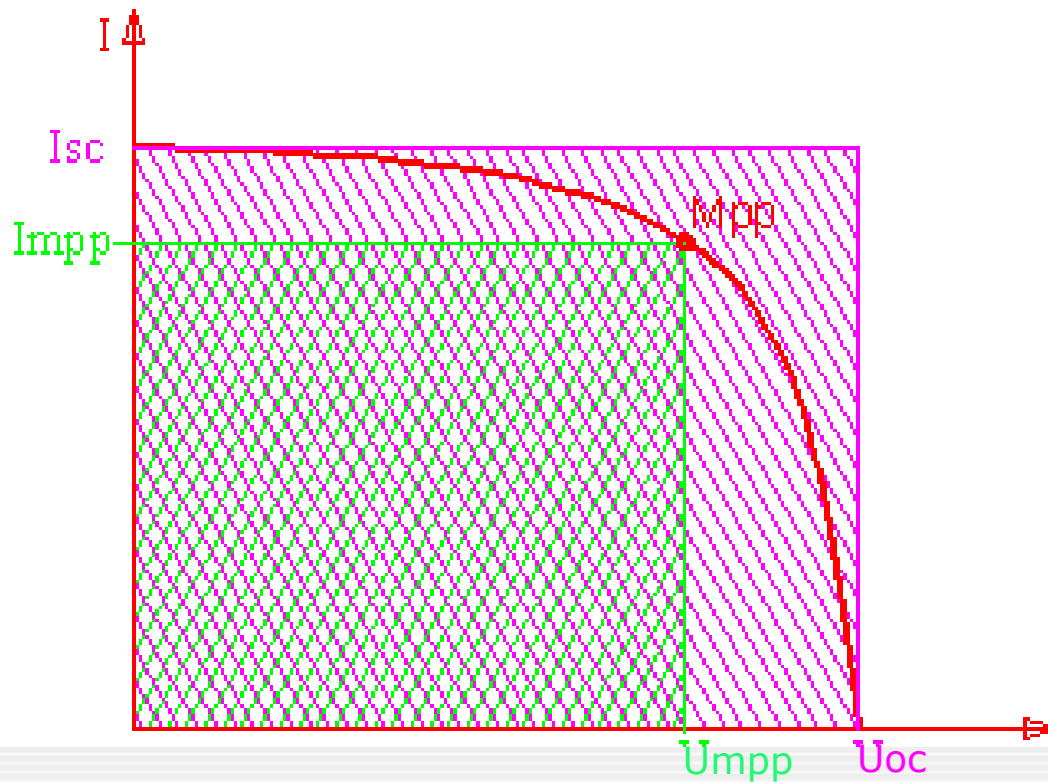
Isc



Uoc

MPP

4.7. Le Fill-Factor ou facteur de forme (efficience)



Fill Facteur

$$FF = \frac{U_{mpp} \times I_{mpp}}{U_{oc} \times I_{sc}}$$

4.8.1. Tensions et Températures

$$U_{t^{\circ}} = U_{25} + (\text{coeff temp } U_{oc} \times \text{diff } t^{\circ})$$

$U_{t^{\circ}}$ = tension à la température finale en V.

U_{25} = tension à la température du test STC en V.
(données dans les fiches techniques)

Le coefficient de température est négatif et s'exprime généralement en V/K, mV/K ou % de U_{oc}

4.8.1. Coefficient de température

Exprimé en $mV/^\circ$

OU

Exprimé en % de U_{oc}

→ ne pas oublier de convertir en $V/^\circ$

Caractéristiques thermiques:

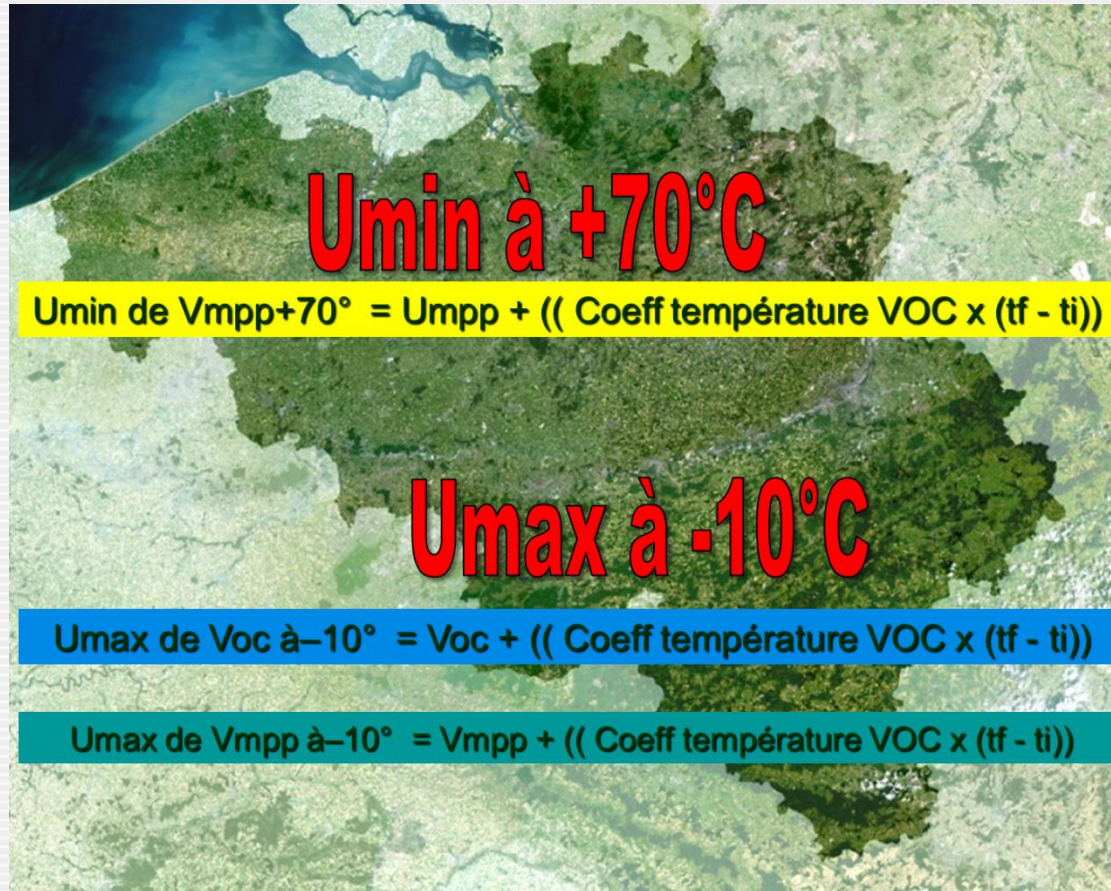
Coefficient de température du courant	α	+1,9 mA/°C
Coefficient de température du voltage	β	-121 mV/°C
Coefficient de température d'énergie	γ	-0,35 %/°C
NOCT		44 °C
Températures d'utilisation		de -40°C à +85°C



A convertir !

COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE		COMPOSANTS
STC	25°	Nombre de cellules 60
NOCT	45°	Technologie silicium polycristallin
TC Isc	+0,052%/K	Dimensions cellule 156 x 156 mm
TC Voc	- 0,335%/K	Boîte de Jonction IP 67, ventilée
TC Pmpp	- 0,440%/K	Connecteurs MC4
		Verre tempé+structuré
		Épaisseur du verre 3,2 mm

4.8.1. Coefficient de température



4.8.2. Mesures pratiques (exercice)

PERFORMANCES ÉLECTRIQUES SOUS CONDITIONS STANDARDS, 1000 W/m², AM=1.5

Puissance maximale	P _{max}	Wp	250	255	260	265	270
Tension en circuit ouvert	V _{oc}	V	37,90	37,92	37,95	37,98	38,01
Courant de court circuit	I _{sc}	A	8,75	8,84	8,91	8,98	9,05
Tension nominale	V _{mpp}	V	30,40	30,60	30,80	31,00	31,22
Courant nominal	I _{mp}	A	8,25	8,34	8,45	8,55	8,65
Efficienc	%		15,48	15,75	16,06	16,35	16,65

COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE

STC	25°
NOCT	45°
TC I _{sc}	+0,052%/K
TC v _{oc}	-0,335%/K
TC P _{mpp}	-0,140%/K

COMPOSANTS

Nombre de cellules	60
Technologie silicium polycristallin	
Dimensions cellule	156 x 156 mm
Boîte de Jonction	IP 67, ventilée
Connecteurs	MC4
Verre tempé+structuré	
Épaisseur du verre	3,2 mm

Coefficient de température : -0,335% V_{oc}

$$\rightarrow (-0,335 \times 37,90\text{V}) / 100 = -0,127 \text{ V/}^\circ$$

$$\rightarrow U_{oc +40} = 37,90\text{V} + (-0,127 * (+40-25)) = 35,99 \text{ V}$$

4.8.3. Corrélation avec l'onduleur

Données techniques

	SB 2500	SB 3000
Grandeurs d'entrée		
Puissance max. PV recommandée (P_{PV})	env. 3000 W _C	env. 3600 W _C
Puissance DC maximale ($P_{DC, max}$)	2700 W	3200 W
Tension DC maximale ($U_{DC, max}$)	600 V	600 V
Plage de tension PV, MPPT (U_{PV})	224 V - 600 V	268 V - 600 V
Courant maximal d'entrée ($I_{PV, max}$)	12 A	12 A

	8000 3ph	10 000 3ph
Côté entrée DC (générateur photovoltaïque)		
Tension de démarrage maximale		845 V
Tension d'entrée maximale		845 V
Tension d'entrée minimale		350 V
Tension d'entrée minimale pour puissance assignée		350 V
Tension MPP	350 V ..	700 V
Courant d'entrée maximum	27 A	32 A

4.8.3. Corrélation avec l'onduleur

Données techniques	Sunny Boy 3000TL	Sunny Boy 3600TL
Entrée (DC)		
Puissance DC max. (pour $\cos \varphi=1$)	3200 W	3880 W
Tension d'entrée max.	750 V	750 V
Plage de tension MPP / tension d'entrée assignée	175 V - 500 V / 400 V	175 V - 500 V / 400 V
Tension d'entrée min. / de démarrage	125 V / 150 V	125 V / 150 V
Courant d'entrée max. entrée A / entrée B	15 A / 15 A	15 A / 15 A
Courant d'entrée max. par string (entrée A / entrée B)	15 A / 15 A	15 A / 15 A
Nombre d'entrées MPP indépendantes / strings par entrée MPP	2 / A : 2 ; B : 2	2 / A : 2 ; B : 2