



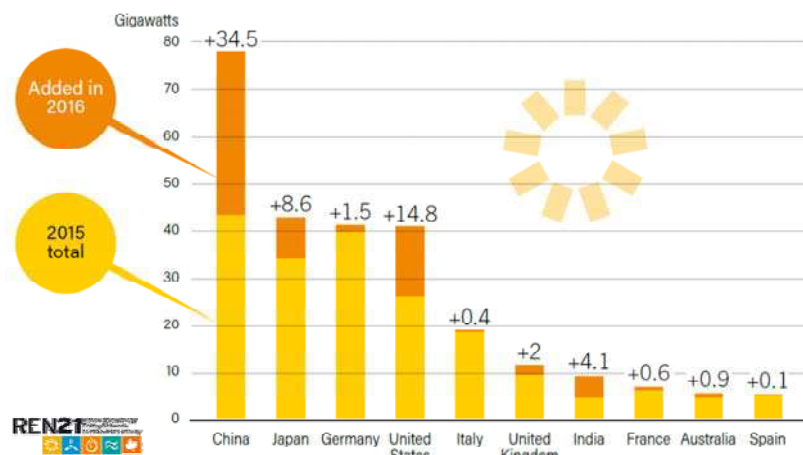
## 1. Introduction

### 1. Introduction

- 1.1. Panorama historique
- 1.2. Le solaire photovoltaïque dans le monde
- 1.3. Le solaire photovoltaïque en France
- 1.4. Un peu de vocabulaire

## 1.2. Le solaire photovoltaïque dans le monde (2016)

Capacité mondiale : 303 GW

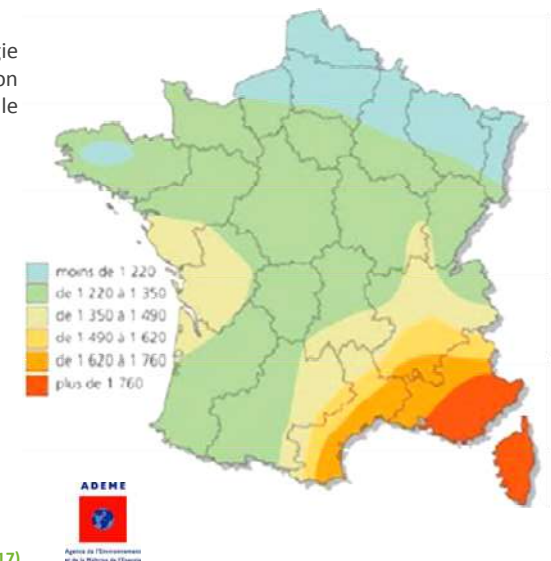


Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.3. Le solaire photovoltaïque en France

### Le gisement solaire

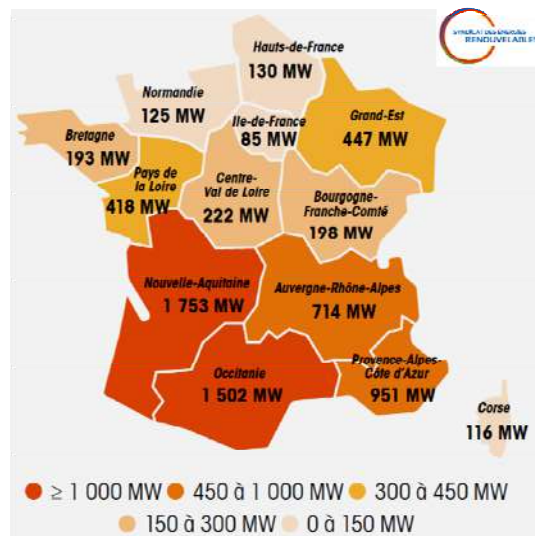
Valeur en kWh/m<sup>2</sup> par an de l'énergie solaire reçue sur un plan d'inclinaison égale à la latitude et orienté vers le sud)



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

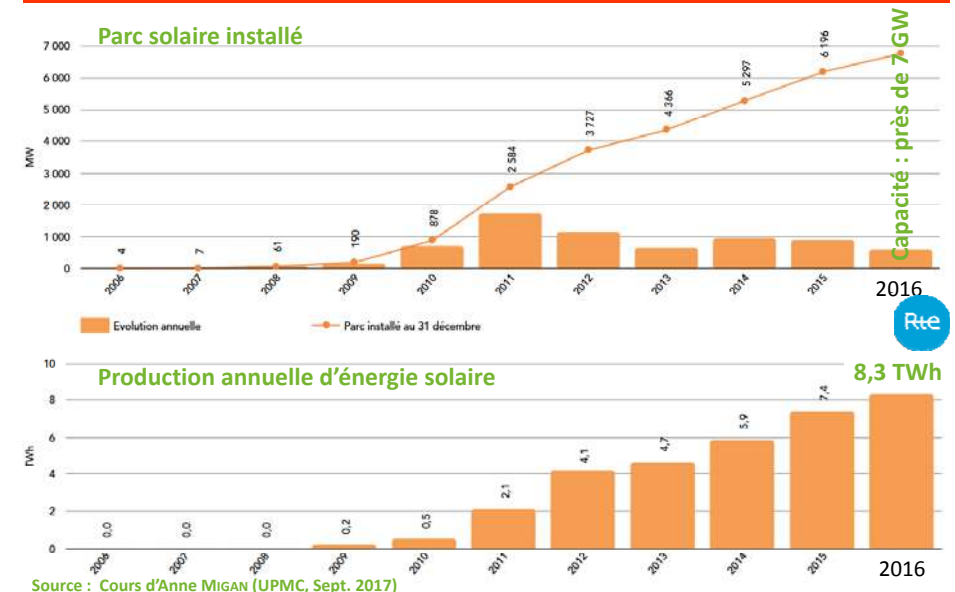
### 1.3. Le solaire photovoltaïque en France

Puissance solaire raccordée  
par région au 31 mars 2017



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.3. Le solaire photovoltaïque en France



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.3. Le solaire photovoltaïque en France

#### Exemple 1

Centrale solaire des Mées (PACA – 10 km de Dax)



Mise en service en 2011

Plus grande centrale  
française

Produit en moyenne **50 GWh** par an, permettant d'alimenter en électricité 83 000 habitants de la région

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.3. Le solaire photovoltaïque en France

#### Exemple 2

Centrale solaire de Martillac (Gironde – 20 km de Bordeaux)



Mise en service en **2008**.

Première centrale française  
dotée de **suiveurs**

Produit en moyenne **50 MWh** par an, soit la consommation d'une trentaine de foyers, l'électricité étant revendue à EDF.

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.4. Solaire photovoltaïque : avantages & inconvénients

### Avantages

Une énergie alternative  
des plus prometteuse

Plus prévisible que  
l'énergie éolienne

Pas d'effet de serre

Pas contaminatrice

Renouvelable

### Inconvénients

Produits chimiques

Occupation de terrains

Puissance très basse  
(120 W·m<sup>-2</sup>)

Instabilité de la  
distribution électrique

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.4. Un peu de vocabulaire

**Irradiance** (*irradiance*)

ou **éclairement** (*insolation*) :  $E$  (unité : W·m<sup>-2</sup>)

C'est la **puissance** qui arrive sur une surface.

**Irradiation** (*irradiation*)

ou **ensoleillement** (*solar exposure*) :  $W$  (unité SI : J·m<sup>-2</sup>,  
unité usuelle : Wh·m<sup>-2</sup>)

C'est l'**énergie** qui arrive sur une surface.

**Conditions de test standard** (*Standard Test Conditions, STC*)

✓ Température : 25°C

✓ Éclairement : 1000 W/m<sup>2</sup>

✓ AM 1,5

## 2. Matériaux semi-conducteurs

### 2. Matériaux semi-conducteurs

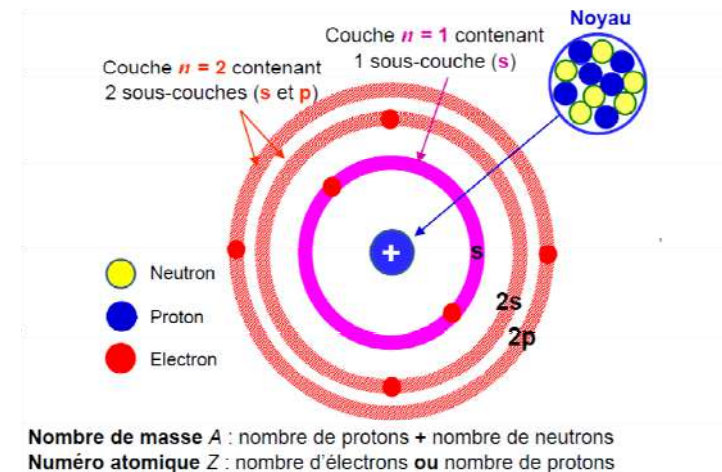
#### 2.1. Cohésion cristalline

#### 2.2. Semi-conducteurs

#### 2.3. Jonction PN

### 2.1. Cohésion cristalline

#### a. Structure atomique



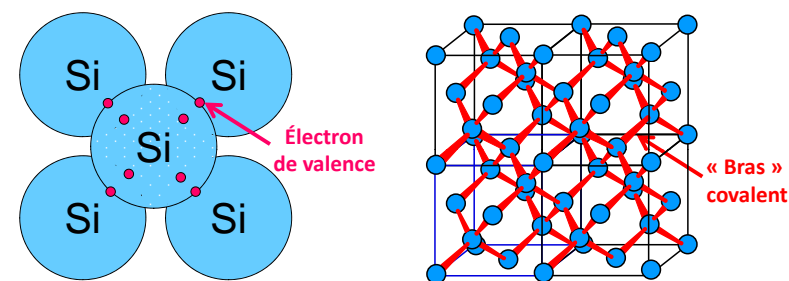


## 2.1.b. Tableau périodique des éléments

I	II	Éléments de transition										III	IV	V	VI	VII	VIII		
1 H 1.008																	2 He 4.0026		
3 Li 6.94	4 Be 9.0122																		
11 Na 22.990	12 Mg 24.305																		
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.63	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798		
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc [97.91]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29		
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	71 Lu 174.97	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po [209]	85 At [222]	86 Rn [222]		
87 Fr [223]	88 Ra [226]	103 Lr [262]	104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [266]	107 Bh [264]	108 Hs [277]	109 Mt [276]	110 Ds [281]	111 Rg [281]	112 Cn [285]	113 Uut [284]	114 Fl [289]	115 Uup [289]	116 Lv [293]	117 Uus [294]	118 Uuo [294]		
Métaux alcalins		Métaux alcalino-terreux										Métaux							
												Non-métaux							
												Chalcogènes							
												Halogènes							
												Gaz rares							
												Lanthanides							
												Actinides							

13

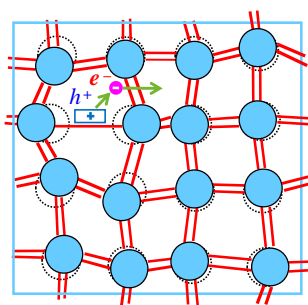
## 2.1.c. Liaison covalente (cas du silicium – 4 électrons de valence)



14

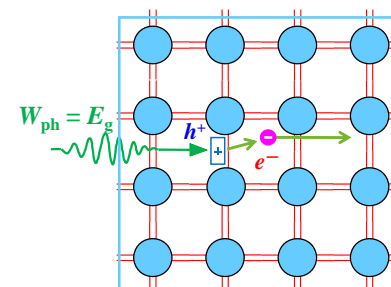
## 2.2. Semi-conducteurs

### a. Semi-conducteur intrinsèque (1)



15

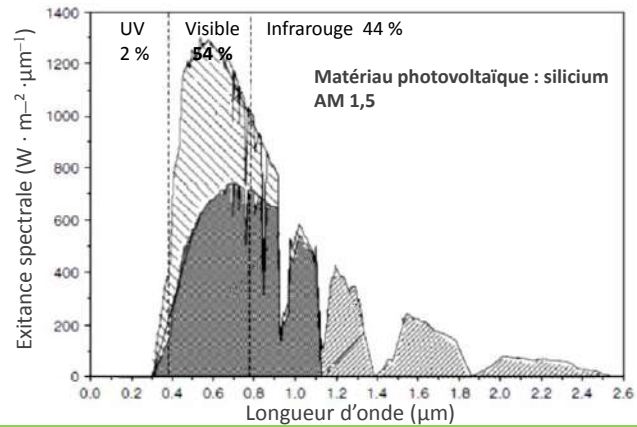
### 2.2.a. Semi-conducteur intrinsèque (2)



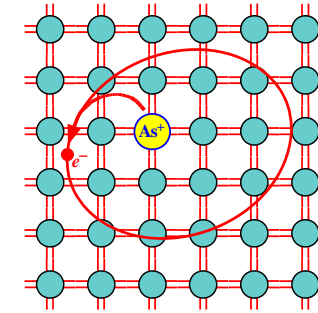
16

## 2.2.a. Semi-conducteur intrinsèque (3)

Matériau	Si	GaAs	CdTe	InP
Gap $E_g$ (eV)	1,12	1,42	1,5	1,35
Longueur d'onde de coupure $\lambda_g$ ( $\mu\text{m}$ )	1,11	0,87	0,83	0,92

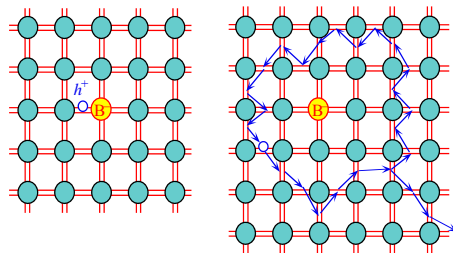


## 2.2.b. Semi-conducteur dopé : dopage N



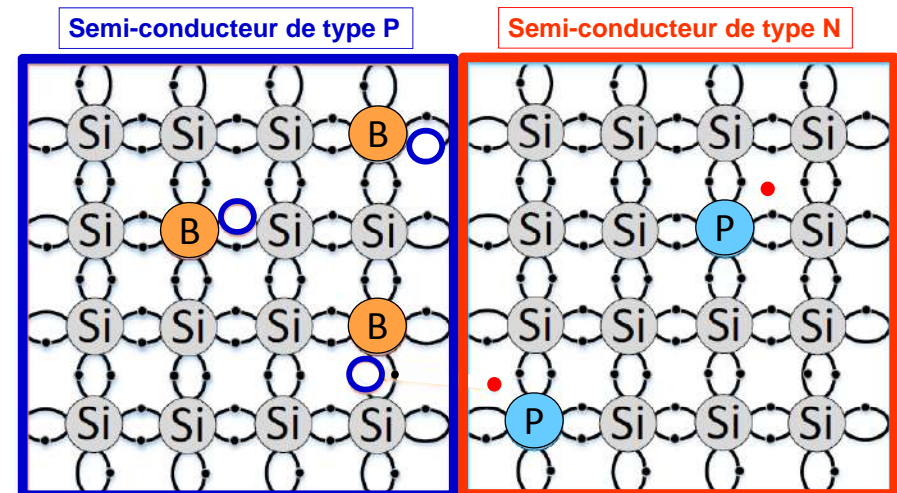
Source : © Mc Graw-Hill (2002)

## 2.2.b. Semi-conducteur dopé : dopage P

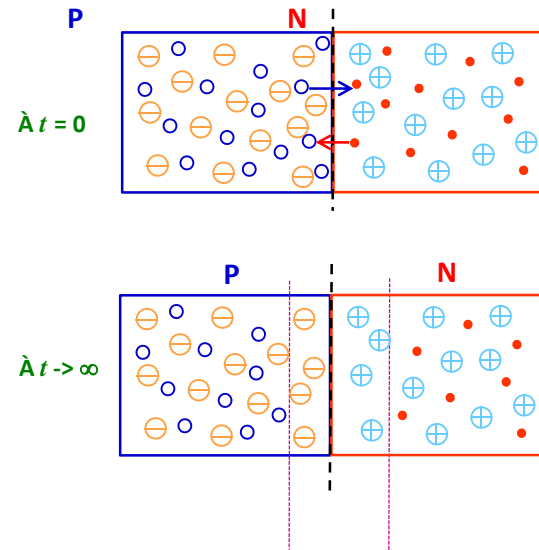


Source : © Mc Graw-Hill (2002)

## 2.3. Jonction PN a. À l'équilibre

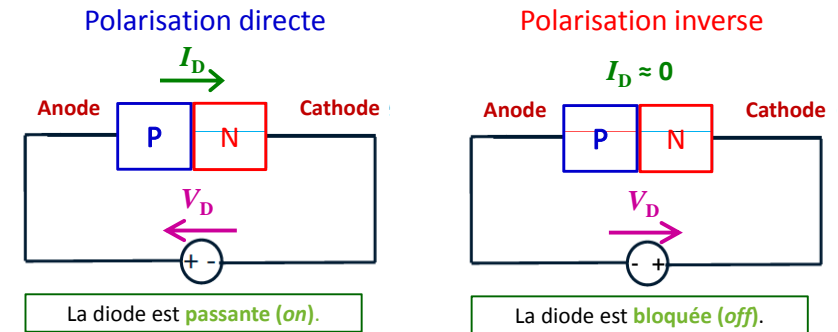


### 2.3.a. Jonction PN à l'équilibre



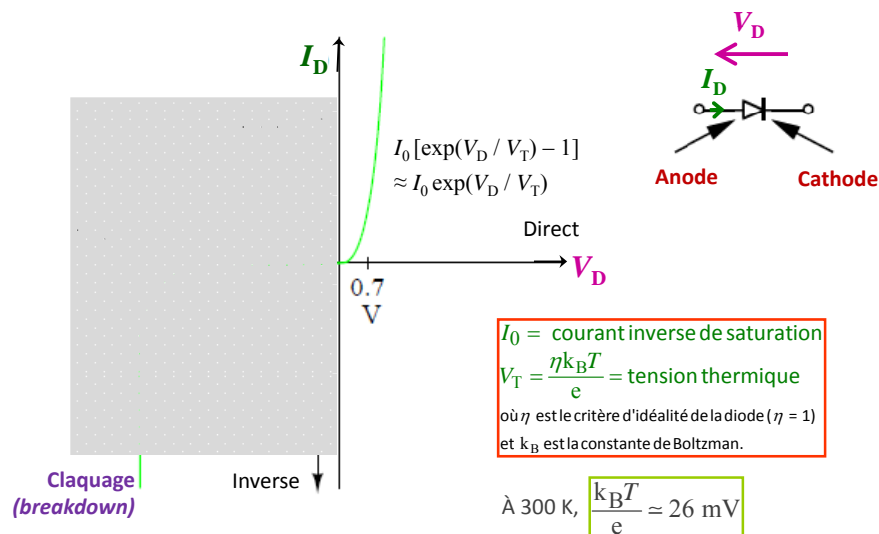
21

### 2.3.b. Jonction PN sous polarisation électrique (1)



22

### 2.3.b. Jonction PN sous polarisation électrique (2)



23

## 3. Cellules photovoltaïques

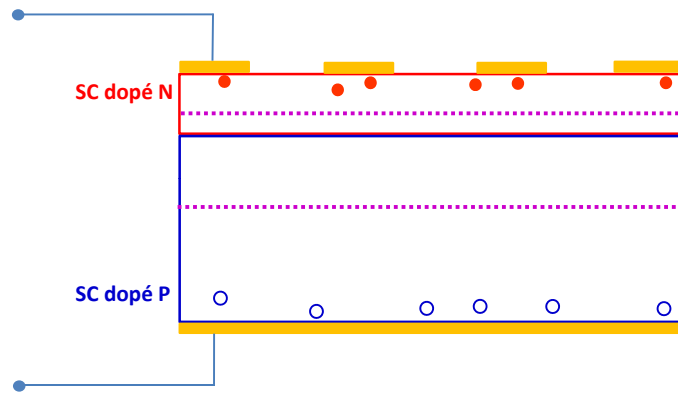
### 3. Cellules photovoltaïques

- 3.1. Effet photovoltaïque (PV)
- 3.2. Des cellules aux modules, des modules aux panneaux

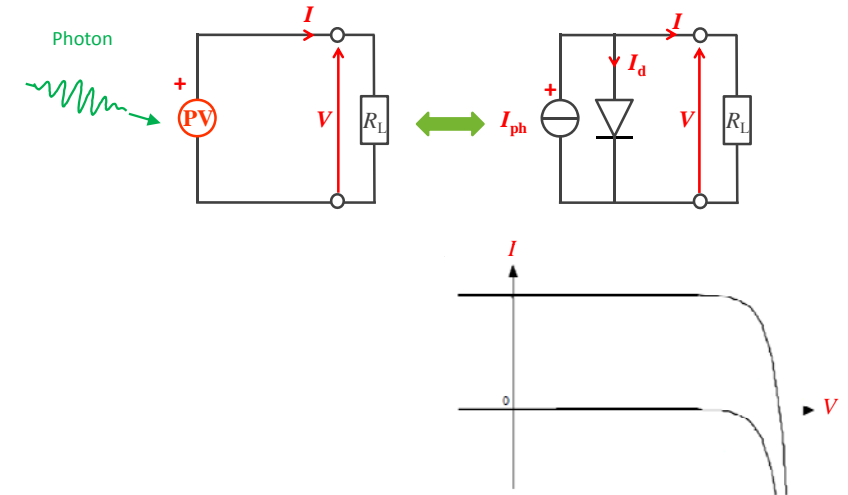
24

### 3.1. Effet photovoltaïque

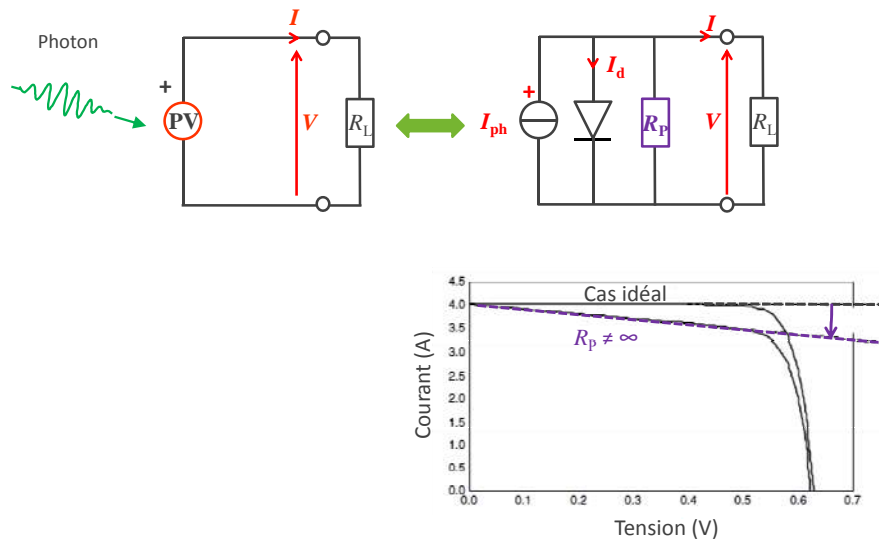
#### a. Principe



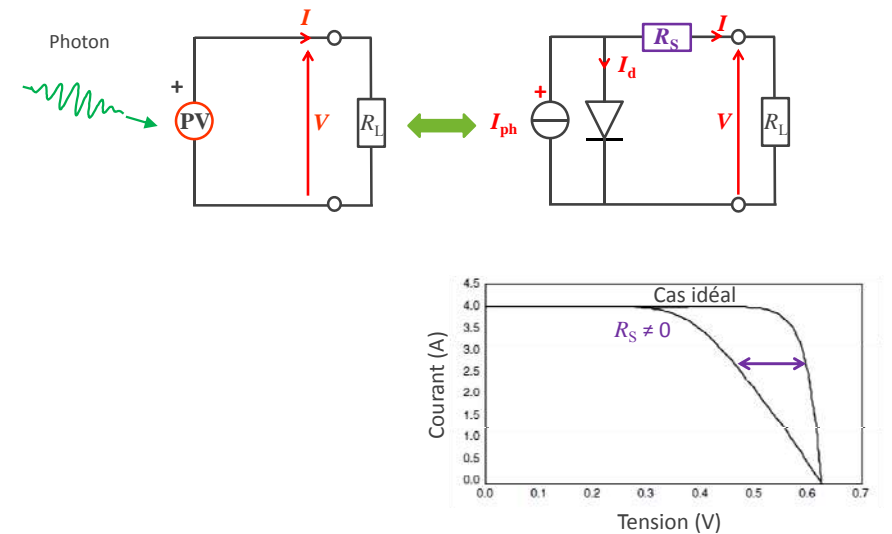
### 3.1.b. Modèle électrique de la cellule PV idéale



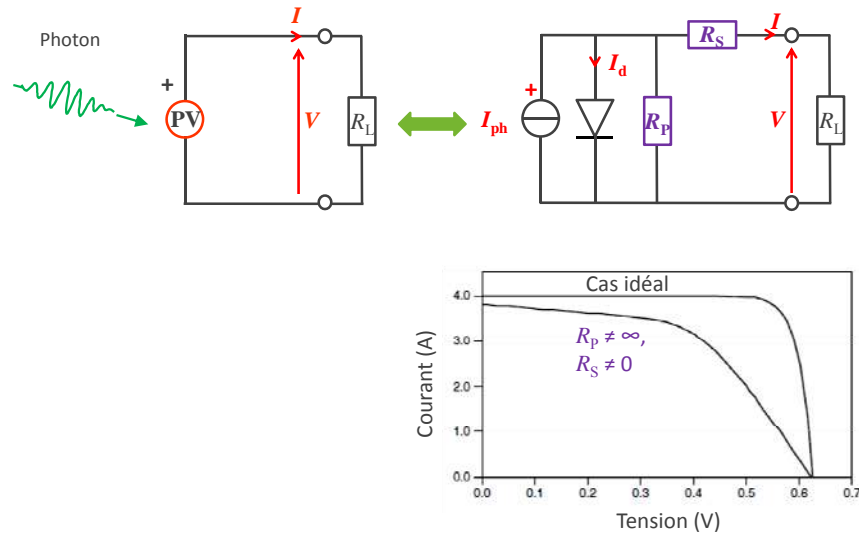
### 3.1.c. Modèle d'une cellule PV réelle (1) : résistance parallèle



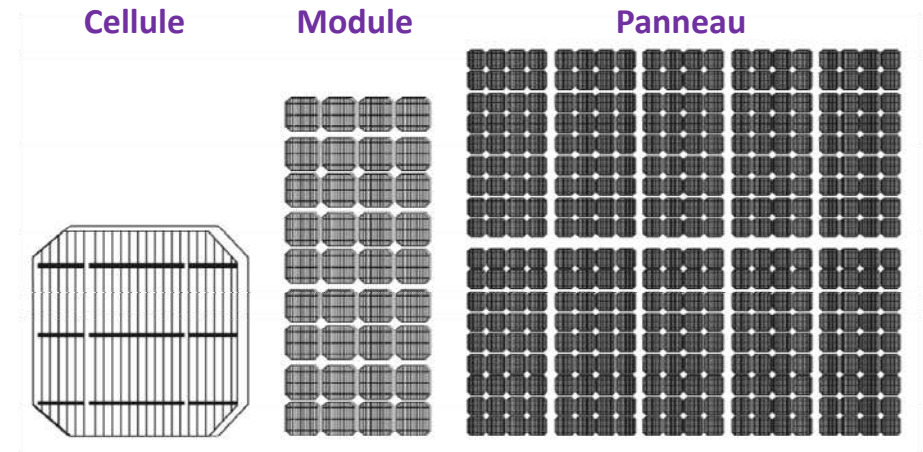
### 3.1.c. Modèle d'une cellule PV réelle (2) : résistance série



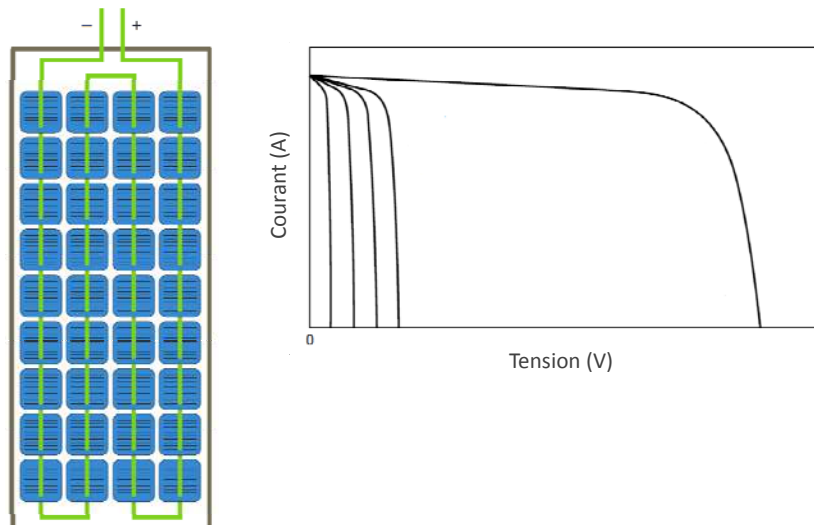
### 3.1.c. Modèle d'une cellule PV réelle (3) : $R_P + R_S$



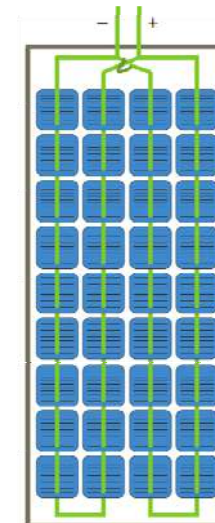
### 3.2. Des cellules aux modules, des modules aux panneaux



### 3.2.a. Des cellules aux modules (2) : montage série



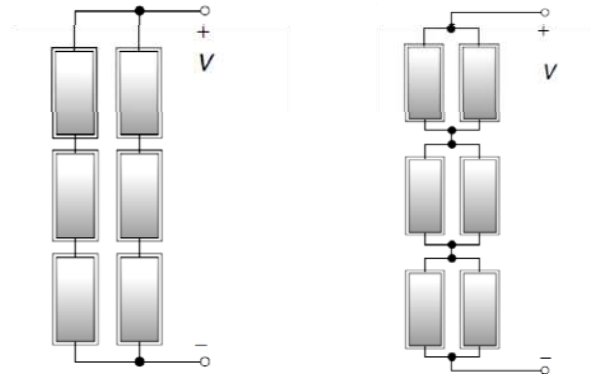
### 3.2.a. Des cellules aux modules (3) : montage série + parallèle



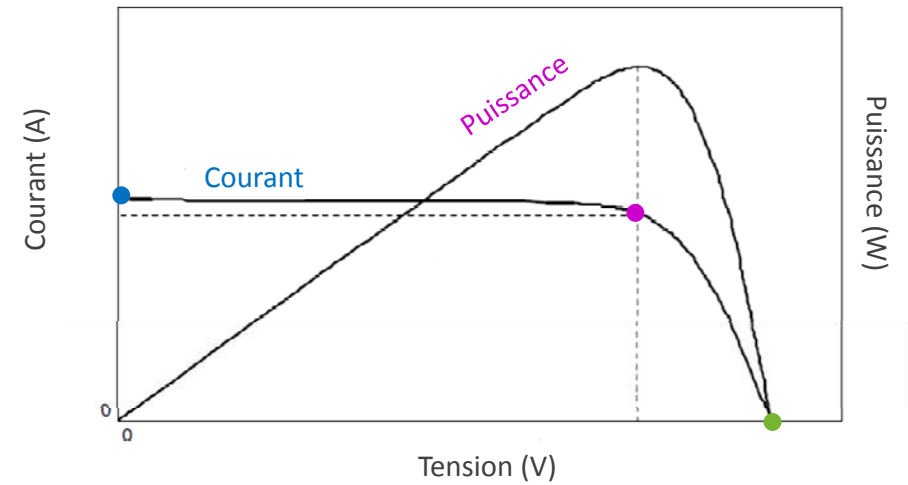


### 3.2.b. Des modules aux panneaux

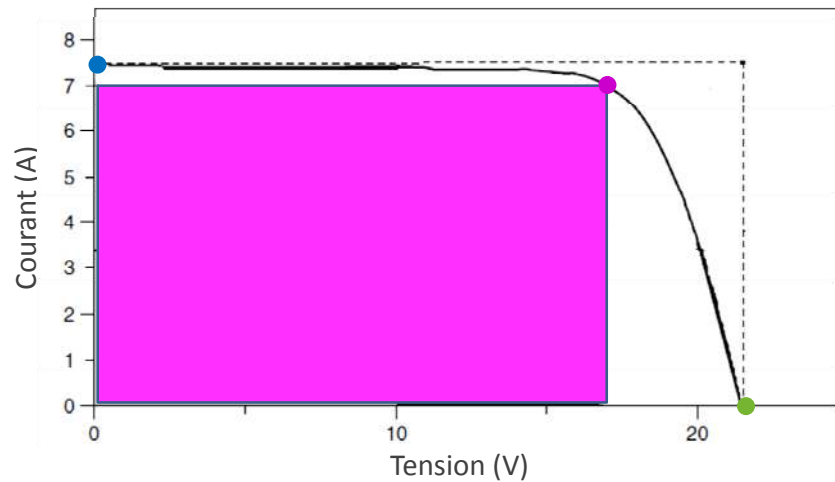
Quelle solution préférera-t-on mettre en œuvre ?



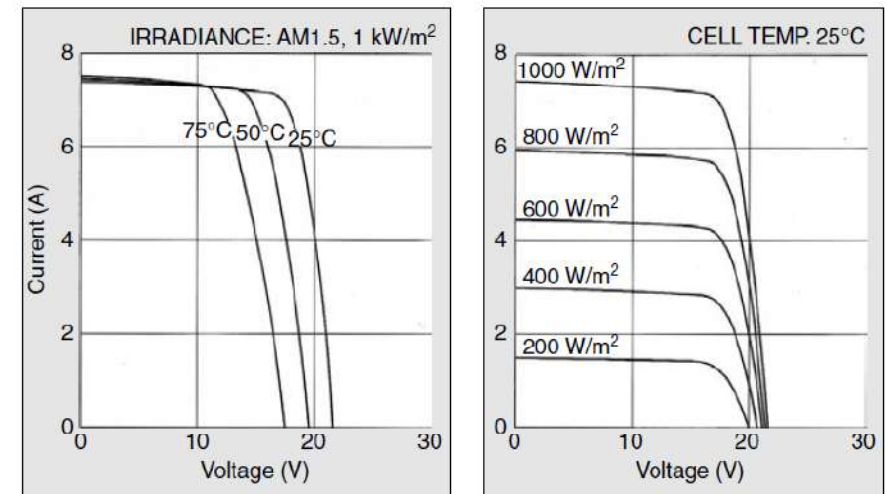
### 3.2.c. Caractéristique puissance-tension d'un module PV (1)



### 3.2.c. Caractéristique puissance-tension d'un module PV (2)

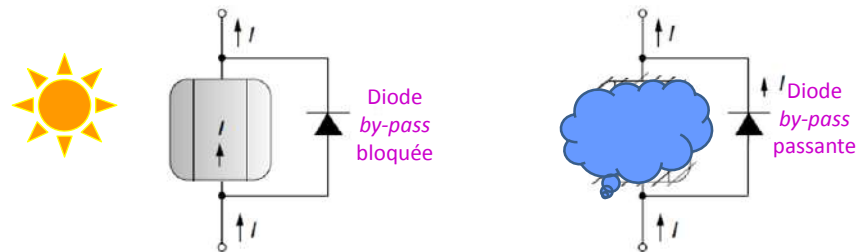


### 3.2.d. Influence de la température et de l'éclairement

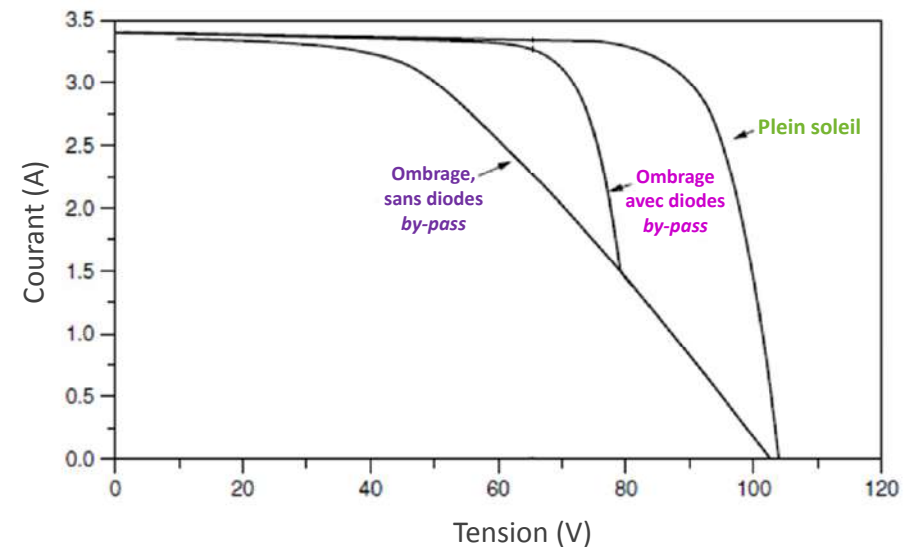


Source : Module PV Kyocera KC120-1 PV

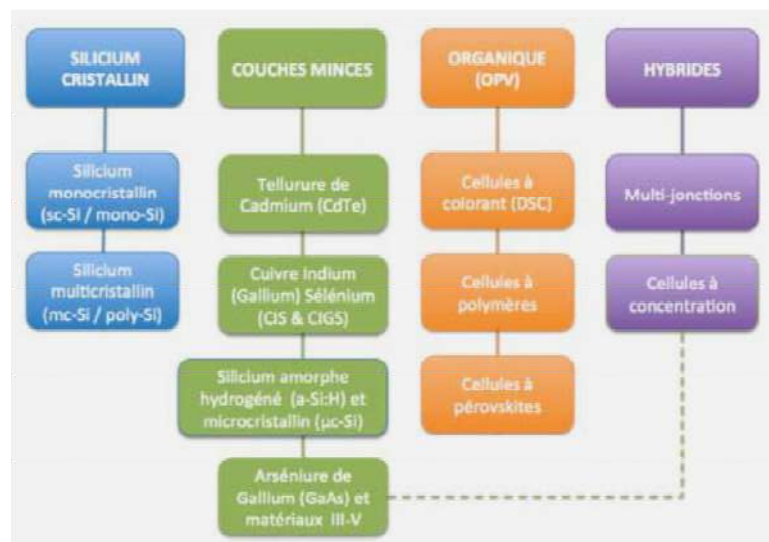
### 3.2.e. Influence de l'ombrage (1)



### 3.2.e. Influence de l'ombrage (2)



### 3.2.f. Aspects technologiques



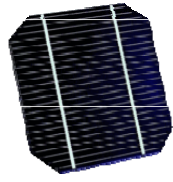
Source : [www.photovoltaique.info](http://www.photovoltaique.info)

### 3.2.f. Aspects technologiques

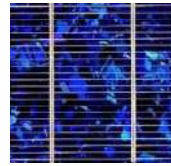
- Les cellules au silicium cristallin, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.
- Les cellules à base de couches minces qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semiconducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.
- Les cellules à base de photovoltaïque organique, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michael Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Source : [www.photovoltaique.info](http://www.photovoltaique.info)

### 3.2.f. Aspects technologiques



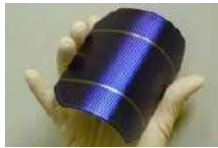
Silicium monocristallin  
**17 à 19 %**  
5 à 6 m<sup>2</sup> pour 1 kWc



Silicium polycristallin  
**14 à 17 %**  
6 à 7 m<sup>2</sup> pour 1 kWc



Silicium amorphe  
**5 à 9 %**  
11 à 20 m<sup>2</sup> pour 1 kWc



CIGS  
**8 à 10 %**  
8 à 10 m<sup>2</sup> pour 1 kWc



CdTe  
**8 à 11 %**  
9 à 12 m<sup>2</sup> pour 1 kWc



Organique  
**3 à 5 %**  
20 à 30 m<sup>2</sup> pour 1 kWc

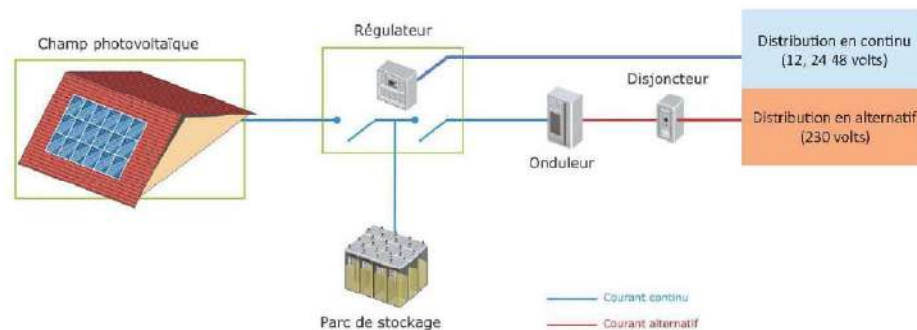
Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 4. Systèmes photovoltaïques

### 4. Systèmes photovoltaïques

- 4.1. Systèmes autonomes (*stand-alone systems*)
- 4.2. Systèmes au fil du Soleil
- 4.3. Systèmes connectés au réseau (*grid-connected systems*)
- 4.4. Systèmes hybrides

### 4.1. Systèmes autonomes



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)



Régulateur de charge avec MPPT  
(*maximum power point tracking*)

Les batteries sont des éléments sensibles qu'il convient de manier avec précaution afin d'éviter des problèmes de fonctionnement et de durabilité.

La tension des batteries est un paramètre prépondérant qu'il convient de contrôler aussi bien lors de la charge que pendant la décharge. Or, la tension fournie par le champ photovoltaïque est une grandeur fluctuante au gré des conditions climatiques.

Il devient nécessaire d'intégrer un élément d'électronique de puissance permettant de gérer convenablement la charge et la décharge.

Le régulateur MPPT permet d'exploiter toute la puissance électrique du champ photovoltaïque.

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## Onduleur



Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de convertir un signal continu en signal alternatif.

- Les onduleurs assistés par une source de tension alternative : conversion d'un signal continu en un signal alternatif compatible avec cette source de tension  
→ installations PV raccordées au réseau.
- Les onduleurs autonomes : fonctionnement sans la présence d'une source de tension alternative externe. Ils fournissent une tension alternative conforme à la demande de l'utilisateur.  
→ installations PV autonomes

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

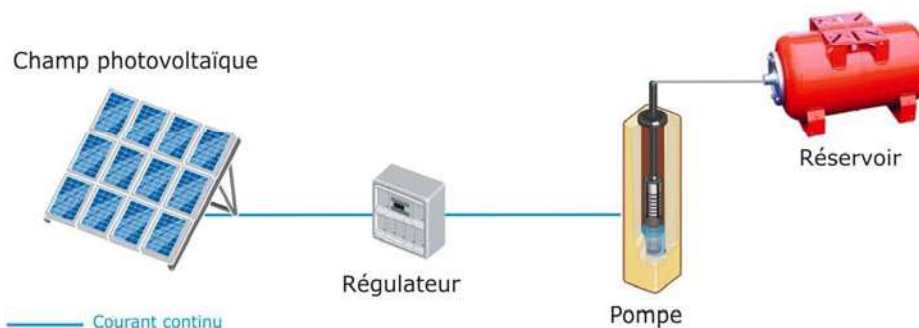
## 4.1. Systèmes autonomes

Électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

## 4.2. Systèmes au fil du Soleil



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

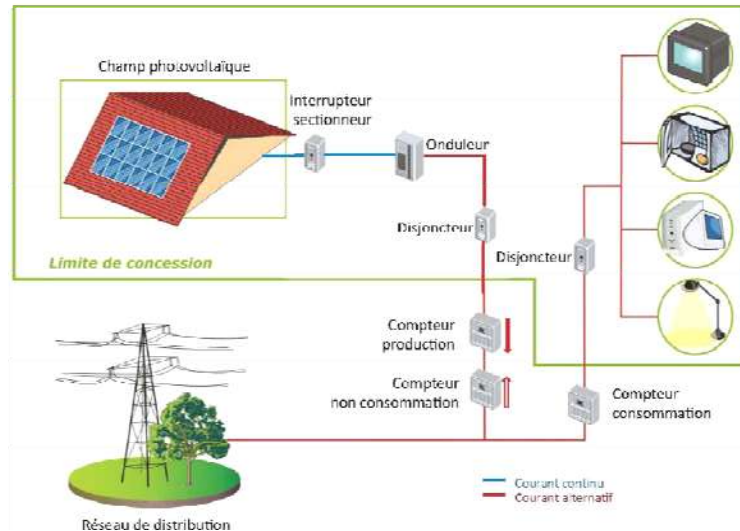
## 4.2. Systèmes au fil du Soleil



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)



### 4.3. Systèmes connectés au réseau



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 4.3. Systèmes connectés au réseau



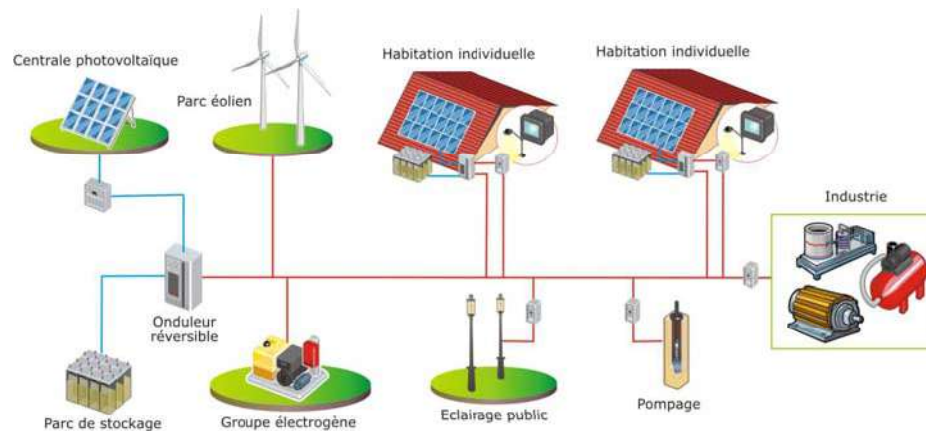
Photo NTD



Photo CLIPSOL

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 4.4. Systèmes hybrides



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)