

MT5

Modélisation des systèmes physiques

Modélisation des systèmes physiques

Chapitre 1 Le panneau photovoltaïque

PLAN

Introduction

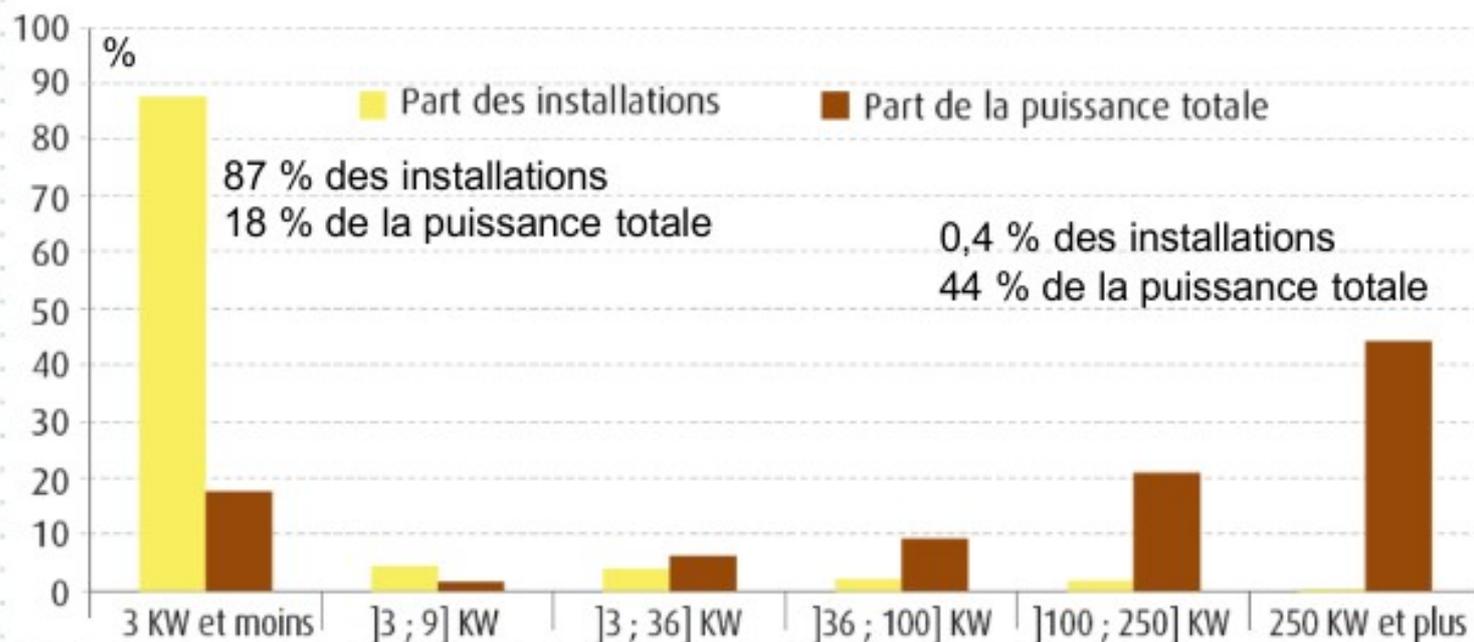
- I. L'énergie solaire
- II. Le photovoltaïque
- III. Systèmes photovoltaïques
- IV. Exemples

Introduction

- Le photovoltaïque en France
- Energie solaire photovoltaïque
- Historique

Le photovoltaïque en France

Répartition des installations en nombre et puissance installée par tranche de puissance en 2012 en France (métropole et DOM)

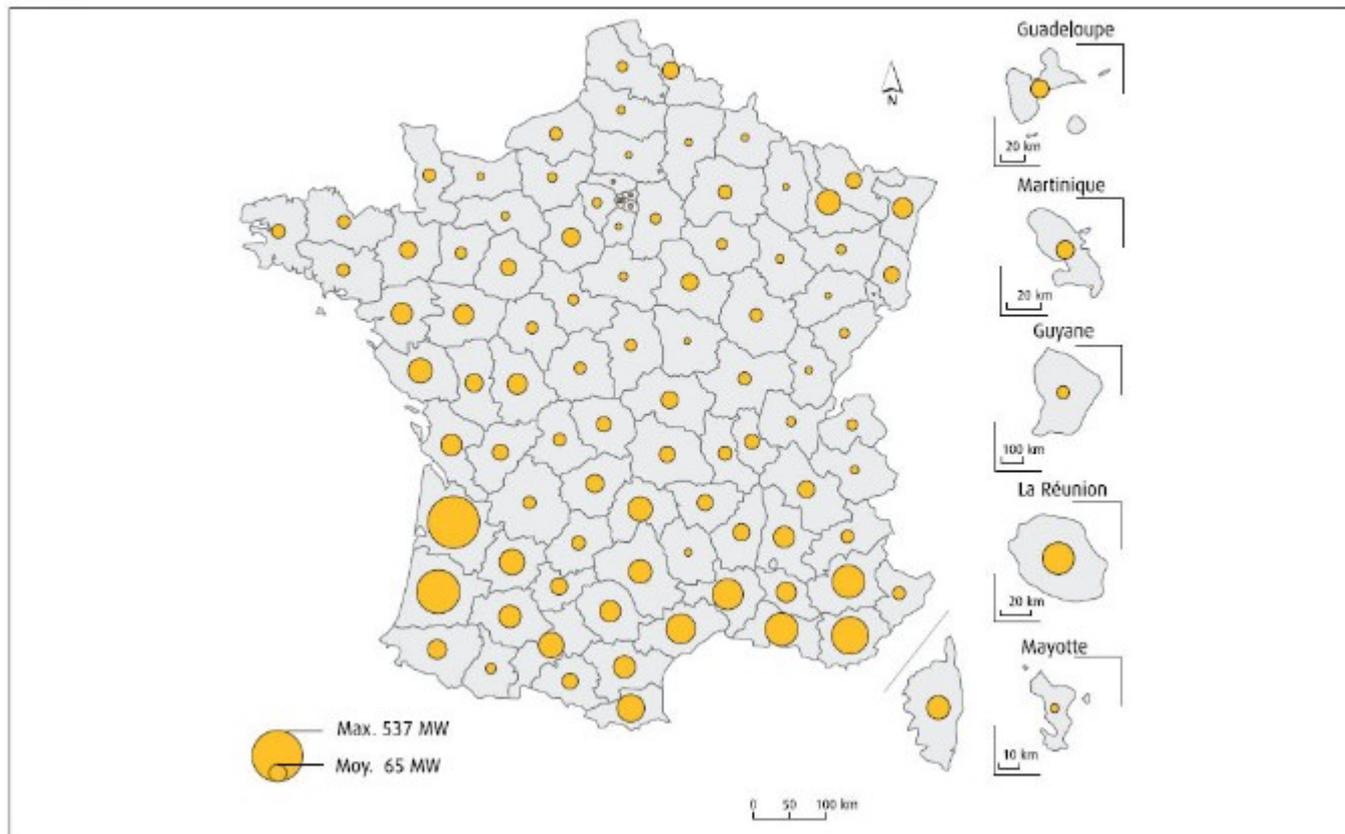


source : SOeS, d'après obligations d'achats, EDF, EDF-SEI, et ELD

Le photovoltaïque en France

Puissance photovoltaïque totale raccordée par département au 30 septembre 2015

En MW



Champ : métropole et DOM.

Source : SOeS d'après ERDF, RTE, EDF-SEI, CRE et les principales ELD

Le photovoltaïque en France

Objectif de l'UE : le « 3 fois 20 »

- ✓ réduire de 20% la consommation d'énergie à 2020 et augmenter à hauteur de 20% la part des énergies renouvelables (éolienne, PV, hydraulique...) dans le mix énergétique européen

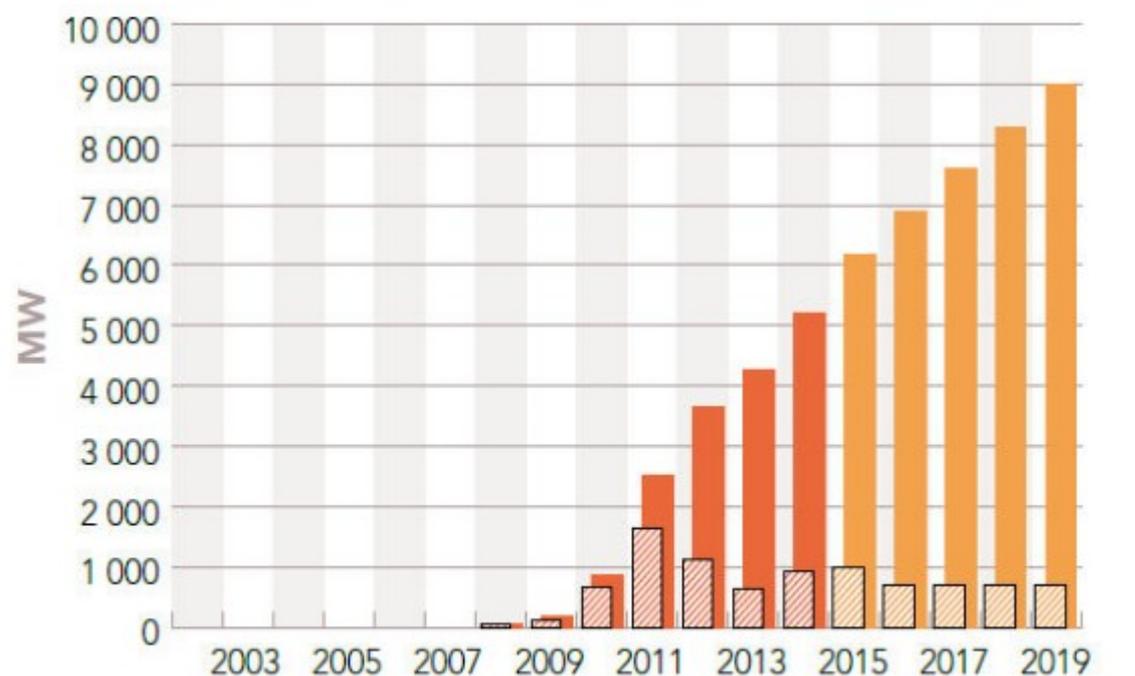
Objectif des Etats Généraux du Solaire Photovoltaïque

- ✓ possibilité d'avoir 20 GW en 2024
- ✓ 5,4 GW étaient prévus par le Grenelle de l'environnement de 2009 (atteint fin septembre 2014)
- ✓ il faut un « pacte de confiance » avec les pouvoirs publics

Le photovoltaïque en France

Hypothèses d'évolution du parc solaire photovoltaïque

(source : RTE / Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France)



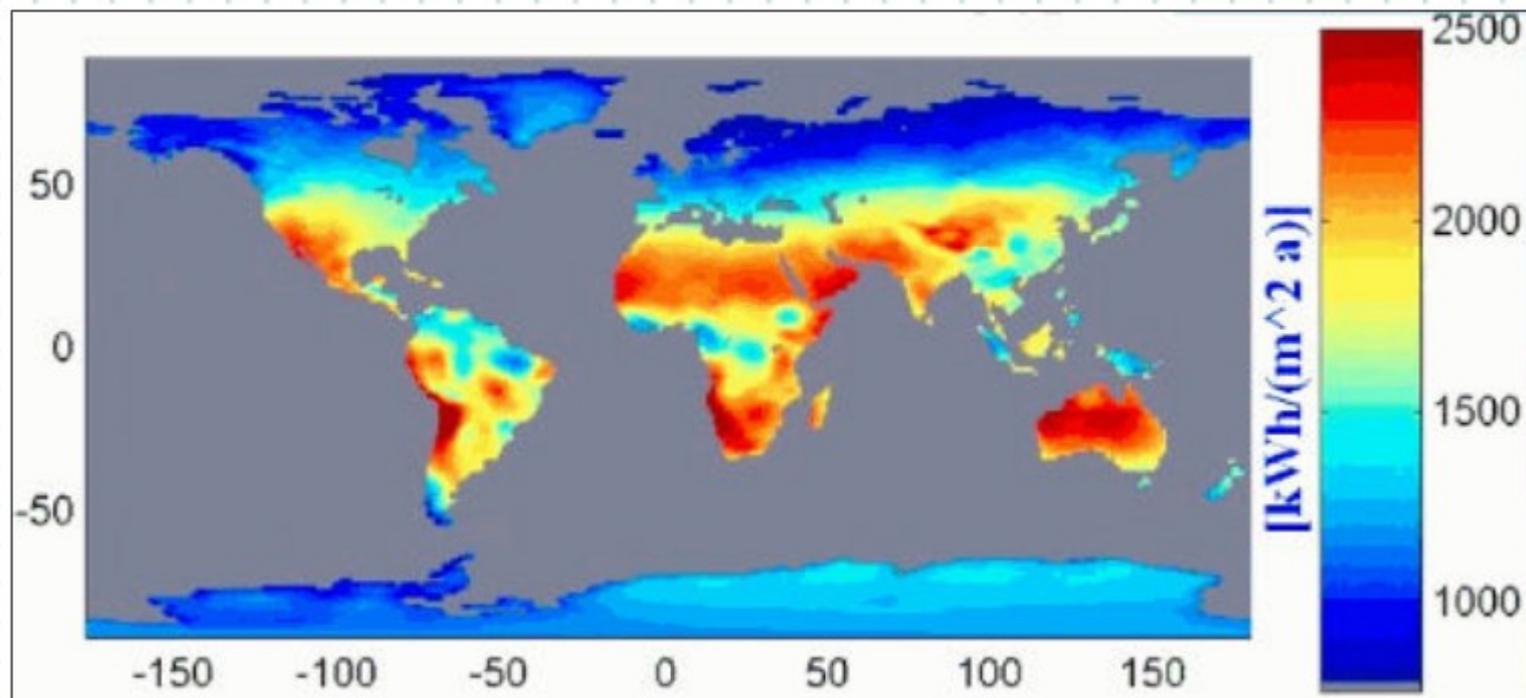
/// Puissance installée dans l'année (historique) ■ Puissance cumulée en fin d'année (historique)
... Puissance installée dans l'année (prévision) ■ Puissance cumulée en fin d'année (prévision)

Bilan prévisionnel :
installation de 700 MW
par an tous les ans
(à partir de 2015)
jusqu'en 2020.

Energie solaire photovoltaïque

- Classée dans les «Energies Renouvelables»
 - Source illimitée (ou qui se renouvelle),
 - Non polluant,
 - Exploitation à dégâts écologiques « minimaux »
- Le solaire est une source d'énergie :
 - Abondante,
 - La mieux répartie sur terre

Rayonnement au sol en kWh/m² par an



(source : Gregor Czisch, ISET)

Energie solaire photovoltaïque

- Notions essentielles :
 - Eclairement ou irradiance :
 - puissance reçue par unité de surface en W/m^2
 - Irradiation ou rayonnement :
 - énergie reçue par unité de surface en Wh/m^2
 - Puissance et énergie :
 - $1J = 1W \cdot 1s$
 - $1kWh = 1000W \cdot 3600s = 3,6MJ$

Energie solaire photovoltaïque

- Quelques chiffres :

L'énergie libérée par le soleil pendant 1h, et captée au sol (1 exa kWh / an),
suffirait à pourvoir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an
(chiffres en 2000 : 10 Gtep ou $1,16 \cdot 10^{14}$ kWh)

$$1 \text{ exa} = 10^{18}$$

$$1 \text{ tep (tonne équivalent pétrole)} = 11\,628 \text{ kWh}$$

Energie solaire photovoltaïque

- Exploitation de cette énergie :
 - Utilisation passive (éclairage et chauffage)
 - Solaire thermique (production d'eau chaude)
 - **Solaire photovoltaïque** : conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique +
- Comment convertir cette énergie :
 - Semi-conducteurs capable de convertir la lumière en énergie électrique
(filière à taux de croissance élevé, chute des coûts de production, ...)

Bref historique

- Effet photovoltaïque découvert en 1839 par A. Becquerel
- Phénomène exploité tardivement (au début de l'ère spatiale, années 50)
- Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances (1^{er} satellite équipé en 1958)
- Crise des années 70 : gouvernements et industriels investissent dans le PV (terrestre en particulier)

I. L'énergie solaire

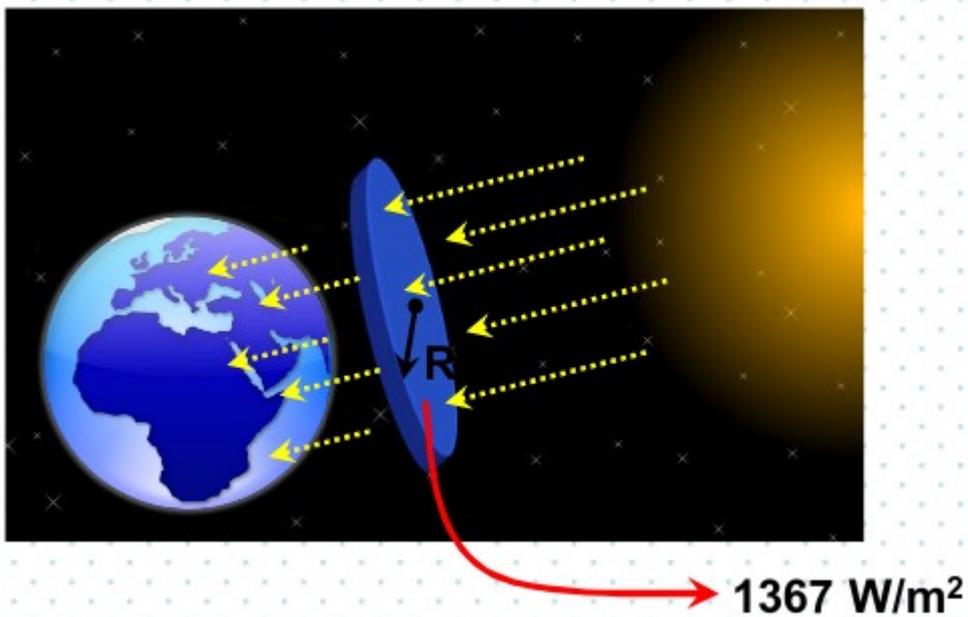
- Le rayonnement solaire
- Le rayonnement sur terre

I-1. Le rayonnement solaire

- Energie solaire = quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre
 - lumière, chaleur mais aussi biomasse, vents, courants océaniques, etc ...
 - Énergie produite par fusion thermonucléaire +
- L'atmosphère capte 1367 W/m^2 dont une partie n'arrive pas au sol (absorption et diffusion)
- L'irradiance au niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2

I-1. Le rayonnement solaire

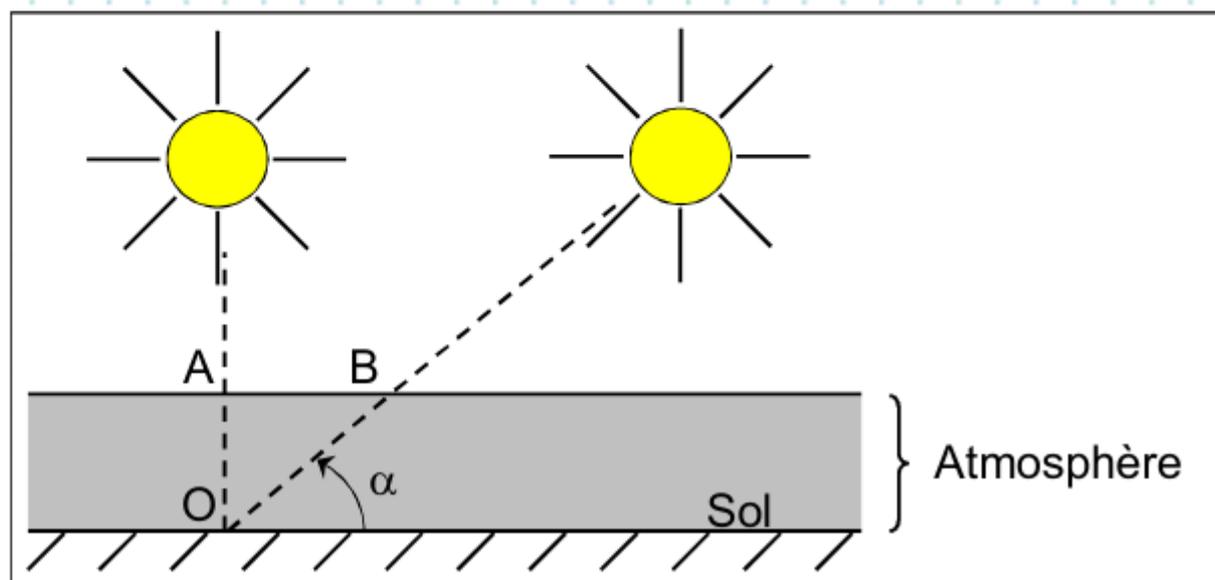
- Constante solaire :
 - **1367 W/m²** (puissance moyenne perçue par le bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance Terre-Soleil de 150 Millions de km)
- Irradiance au niveau du sol :
 - **0 à 1000 W/m²** avec une moyenne de **190 W/m²** sur l'année



I-1. Le rayonnement solaire

- Masse d'air (*Air Mass*) :
 - Rapport entre l'épaisseur traversée par le rayonnement direct et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

$$OB = \frac{OA}{\sin \alpha}$$
$$\text{Air Mass} \frac{OB}{OA} = \frac{1}{\sin \alpha}$$



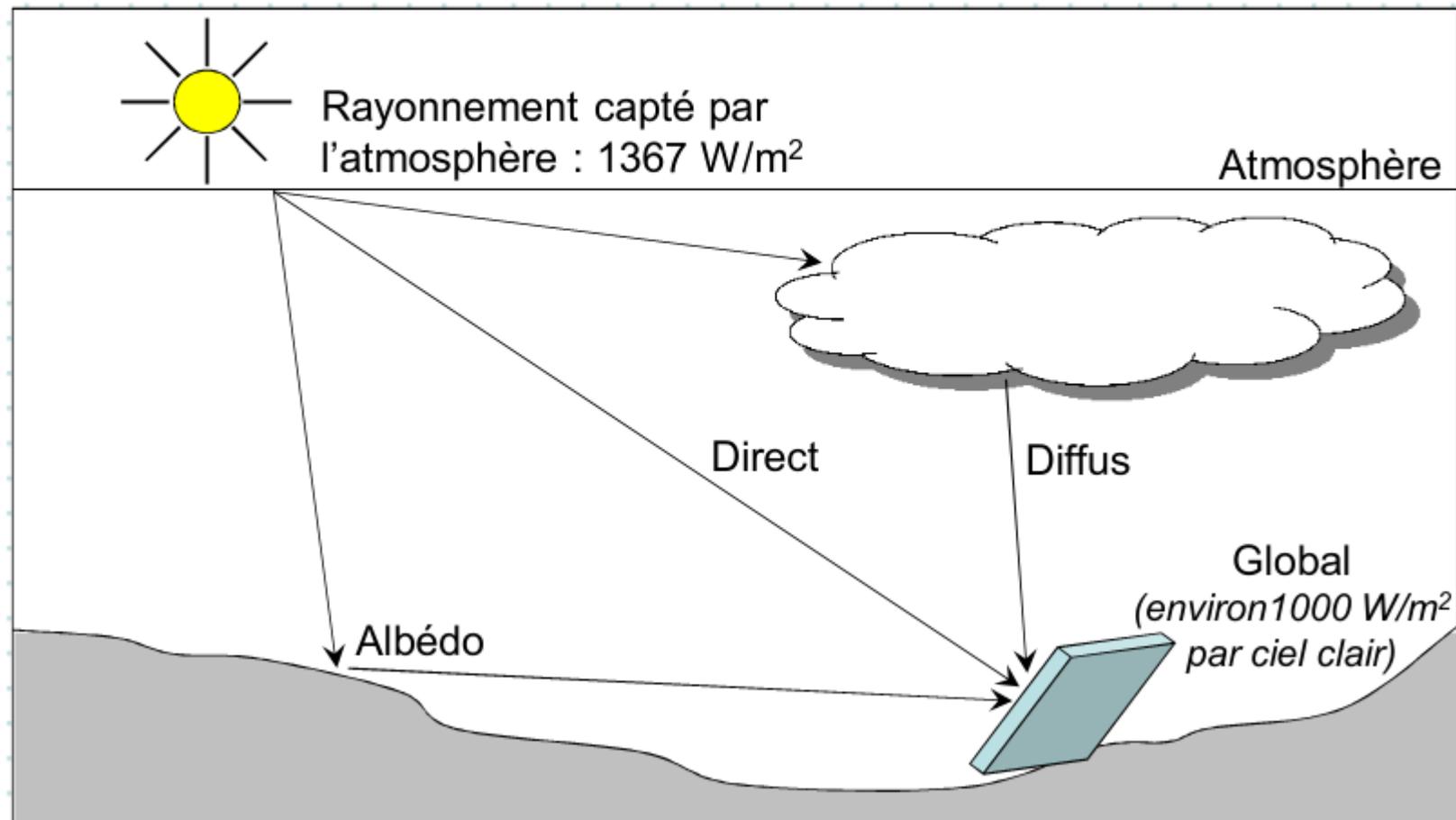
I-1. Le rayonnement solaire

- Quelques points :
 - Soleil au zénith : AM1
 - Soleil à 30° : AM2
 - Soleil à $41,8^\circ$: AM1,5
 - Rayonnement solaire extra-terrestre : AM0
- Qualification standard des modules PV :
 - Spectre AM1,5 sous un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C
(S.T.C. : Standard Test Conditions)

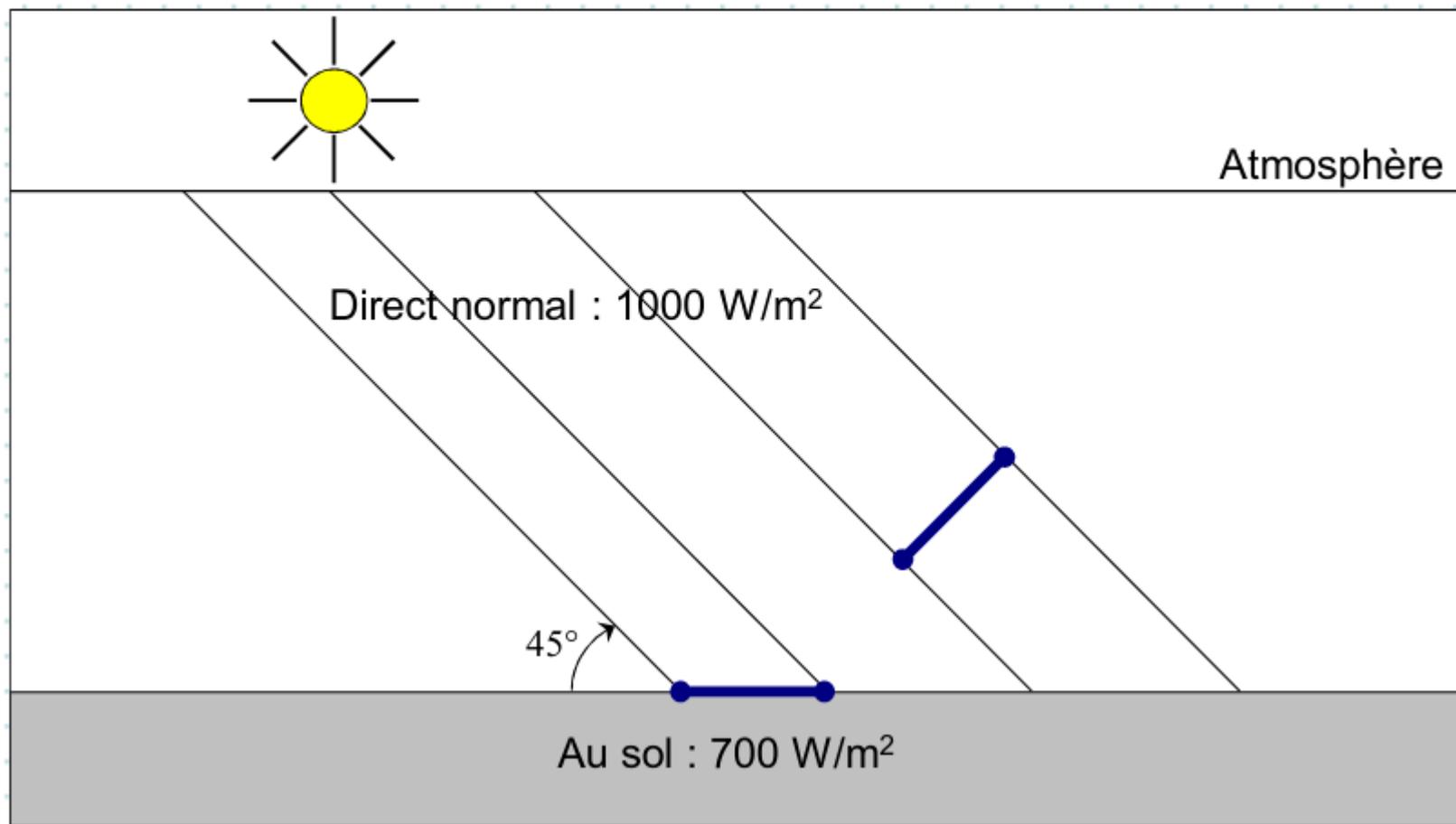
I-1. Le rayonnement solaire

- Rayonnement global :
 - Rayonnement direct
 - Reçu directement par le soleil, sans diffusion
 - Rayonnement diffus
 - Lumière diffusée dans l'atmosphère : dépend des conditions météo (air, nuages, poussières, ...)
 - L'albédo
 - Partie réfléchi sur le sol : dépend de l'environnement (neige, asphalte, ...)

Composantes du rayonnement solaire



Effet cosinus



I-1. Le rayonnement solaire

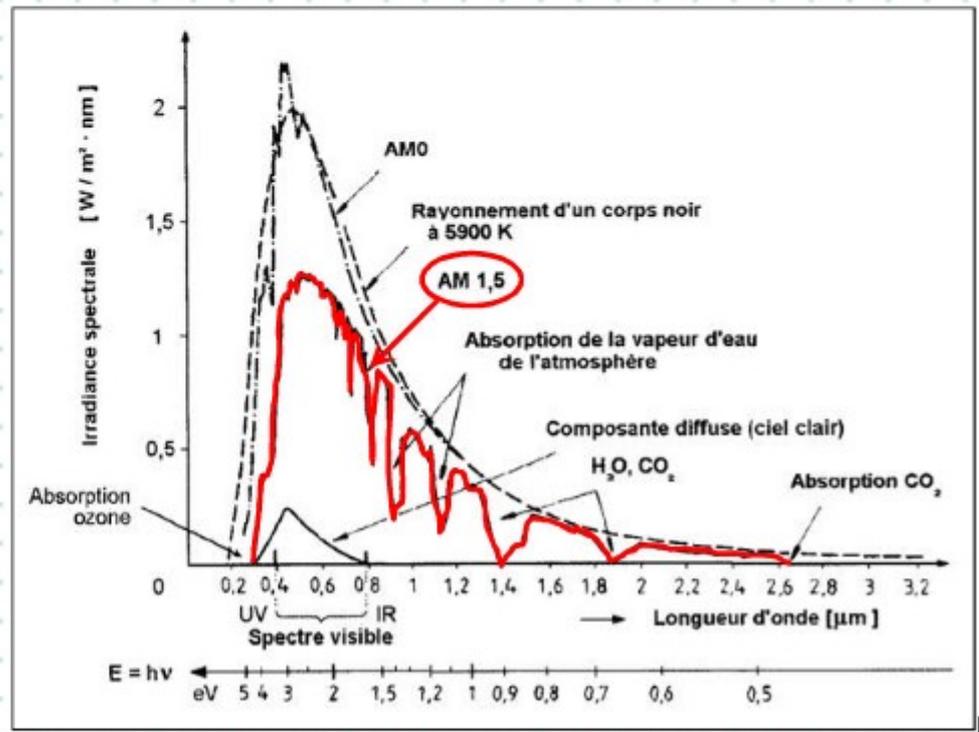
- L'orientation des panneaux dépendra grandement de l'environnement :
 - Sur un site à ciel couvert, le rayonnement diffus peut être plus important que le rayonnement direct : une installation horizontale s'avère parfois plus judicieuse !

I-1. Le rayonnement solaire

- Énergie portée par les photons : $E = \frac{hC}{\lambda}$
avec : h la constante de Planck
 C la vitesse de la lumière
 λ la longueur d'onde
- Distribution de l'énergie d'une courbe **AM0** :
 - ultraviolet UV $0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$ 6,4 %
 - visible $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ 48,0 %
 - infrarouge IR $0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45,6 %

I-1. Le rayonnement solaire

- Spectre **AM1,5** :
 - Atténuation due à l'atmosphère (41,8° d'élévation)
 - Référence pour la mesure des cellules photovoltaïques



(source : *Energie Solaire Photovoltaïque*
- Anne Labouret, Michel Viloz)

I-2. Le rayonnement sur terre

- Concevoir un système photovoltaïque nécessite de connaître le rayonnement solaire sur le site considéré :
 - énergie solaire élevée → moins de panneaux
 - étude de la part d'énergie diffusée :
 - 50 % en régions tempérées
 - 30 à 45 % en régions ensoleillées et montagne
 - 15 à 20 % dans les pays du sud
 - autres paramètres : température, saison, humidité, albédo, heure de la journée...
- Recourt à des statistiques issues de mesures

I-2. Le rayonnement sur terre

- Grandeurs utiles :
 - Rayonnement cumulé
 - Dimensionnement d'un système PV est souvent basé sur des moyennes mensuelles issues de l'intégration du rayonnement solaire global sur une journée (Wh/m^2 et par jour)
 - Rayonnement instantané
 - Certains cas particuliers nécessitent de connaître le profil instantané du rayonnement : obstacles par exemple

I-2. Le rayonnement sur terre

Logiciel de simulation (liste non exhaustive)

CalSol (INES, FR) : permet d'apprécier le potentiel en énergie solaire pour une soixantaine de villes en France suivant l'inclinaison et l'orientation et d'effectuer une pré étude énergétique, économique et environnementale pour des installations solaires photovoltaïques et thermiques.

Archelios (FR) : logiciel de Cythélia sur le calcul de l'irradiation solaire et la simulation de systèmes solaires photovoltaïques.

PV*SOL (DE) : logiciel de la société Valentin, programme de simulation d'installations photovoltaïques.

PV-SYST (CH) : logiciel de l'université de Genève, programme de simulation de systèmes photovoltaïques.

Information complète sur le site internet de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) <http://www.ines-solaire.org/>

I-2. Le rayonnement sur terre

- Influence de la latitude

(source : Wikipedia / article sur la latitude, consulté en janvier 2011)

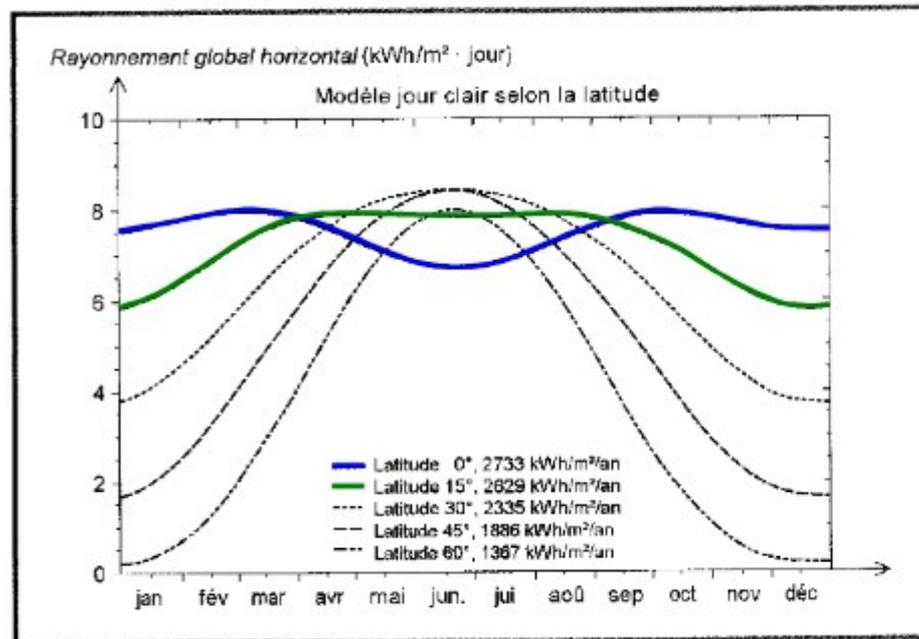
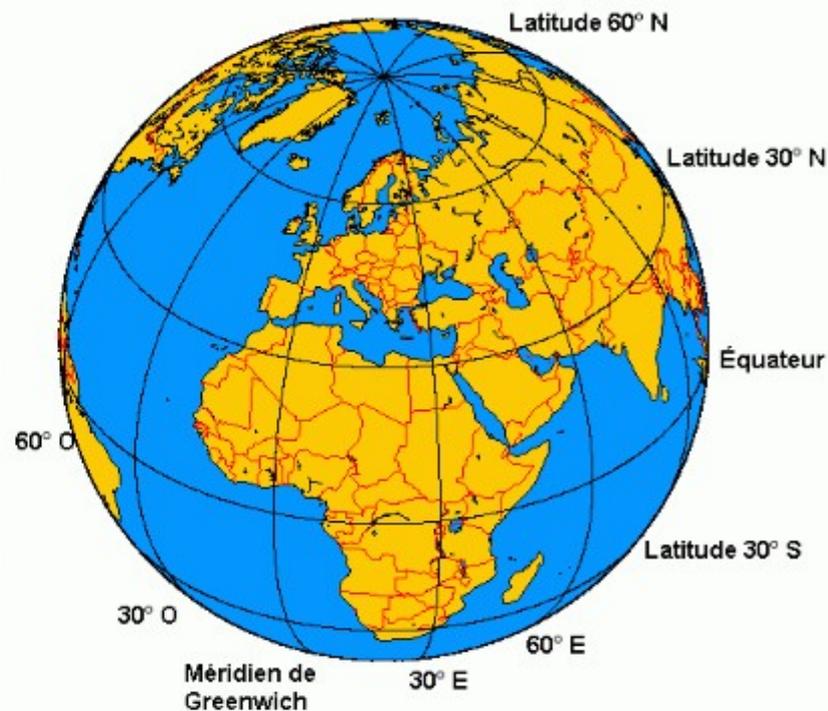


Figure 2.8 - Rayonnement global journalier « idéal »
(modèle d'un jour clair sans nuages)
en fonction de la saison et de la latitude du lieu



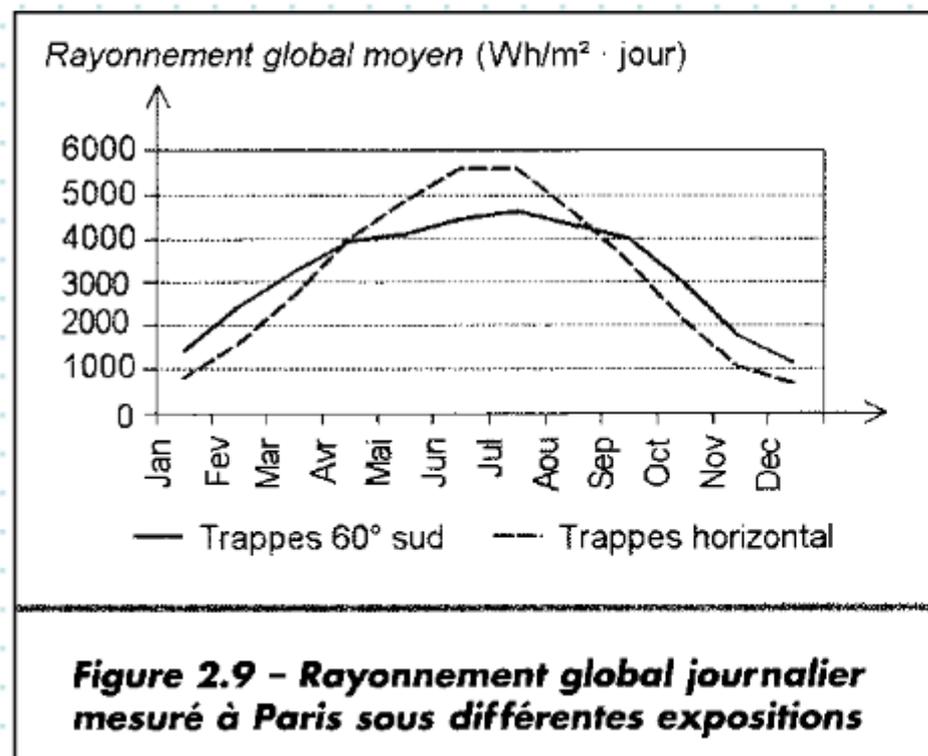
(source : Energie Solaire Photovoltaïque
- Anne Labouret, Michel Viloz)

I-2. Le rayonnement sur terre

- L'ensoleillement chute au-delà de 45°N
 - exemple : entre l'Écosse (55°N) et l'Espagne (40°N) le rayonnement journalier est multiplié par 2 en moyenne et par 4 en décembre !
- Influence des saisons :
 - exemple : à faibles latitudes (entre 15°S et 15°N) le dimensionnement se fait sur une valeur constante de rayonnement
 - à forte latitude le dimensionnement se fait en fonction de l'ensoleillement le plus faible (si utilisation annuelle)

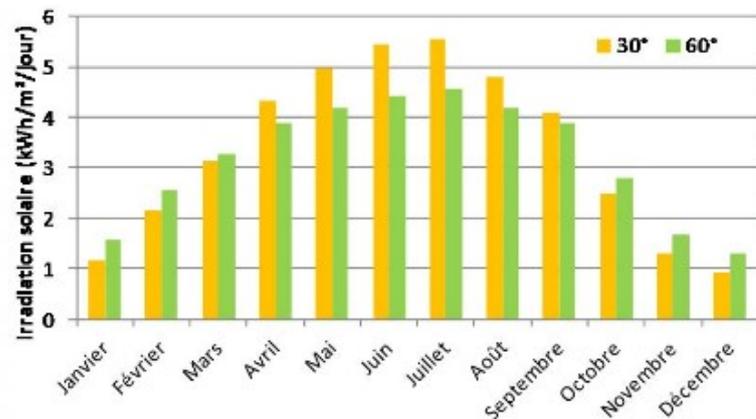
I-2. Le rayonnement sur terre

- Influence de l'exposition

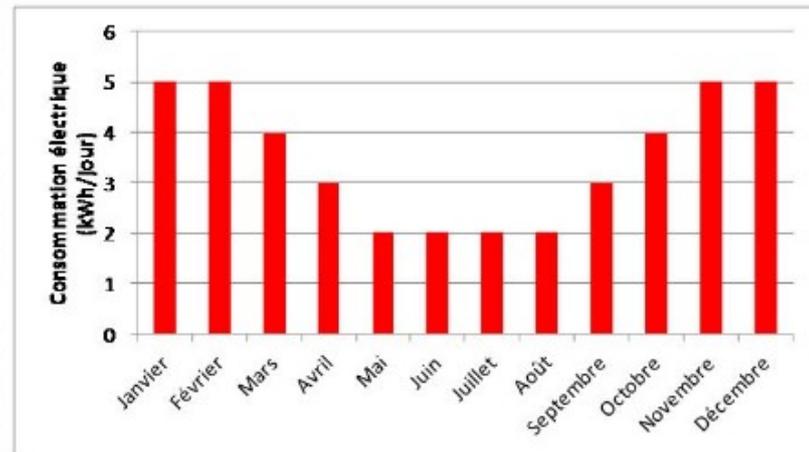


(source : *Energie Solaire Photovoltaïque*
- Anne Labouret, Michel Villos)

Profil standard de l'irradiation solaire journalière en climat tempéré (Nancy) pour 2 inclinaisons différentes

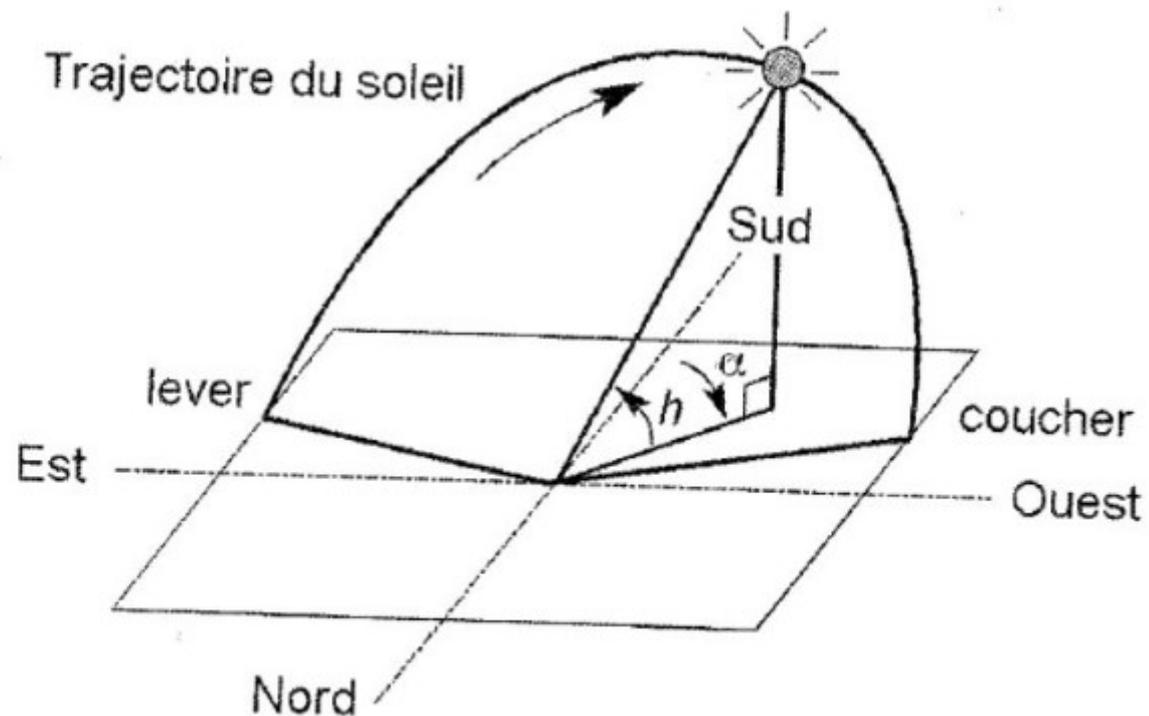


Profil standard de la consommation d'un bâtiment en climat tempéré



- ✓ Zones à climat tempérés, comme en Europe : besoins en élec. plus importants en hiver qu'en été alors que le gisement solaire suit une courbe opposée.
- ✓ Favoriser une inclinaison qui maximise l'irradiation solaire reçue en hiver.
- ✓ Inclinaison optimale = latitude du lieu + 10 ° (en 1^{ère} approximation, orientation plein Sud)
- ✓ France : latitude de +41° (sud de la Corse) à +51° (nord de la France)
Inclinaison optimale : entre 50° et 60°.
- ✓ MAIS inclinaison différente parfois retenue en fonction d'autres critères (albédo, nébulosité spécifique du site...).
- ✓ Pour Nancy l'inclinaison optimale est proche de 60°.

I-2. Le rayonnement sur terre



(source : *Energie Solaire Photovoltaïque*
- Anne Labouret, Michel Villoz)

I-2. Le rayonnement sur terre

- Paramètres les plus importants :
 - latitude, saisons et exposition
 - d'autres facteurs peuvent intervenir (montagne, bord de mer, pollution...)
- +
- Altitude, albédo et autres facteurs
 - Altitude : rayonnement plus élevé
 - Albédo : neige (0,82) – asphalte (0,1) – herbe (0,2) – béton (0,3) – envir. urbain (0,18)
 - Nébulosité : baisse avec l'altitude

II. Le photovoltaïque

- Conversion de la lumière en électricité
- Technologies des cellules solaires
- Propriétés des cellules solaires

II-1. Conversion de la lumière en électricité

- Mis en évidence en 1839 par A. Becquerel :
 - variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière
- Un système photovoltaïque est un *convertisseur d'énergie* +
(≠ d'une pile = stockage de l'énergie)

II-1. Conversion de la lumière en électricité

- 3 phénomènes sont mis en jeu :
 - Absorption de la lumière dans la matière
 - Transfert d'énergie photons \rightarrow charges électriques
 - Collecte des charges
- Nécessité d'un matériau avec les propriétés optiques et électriques adéquates

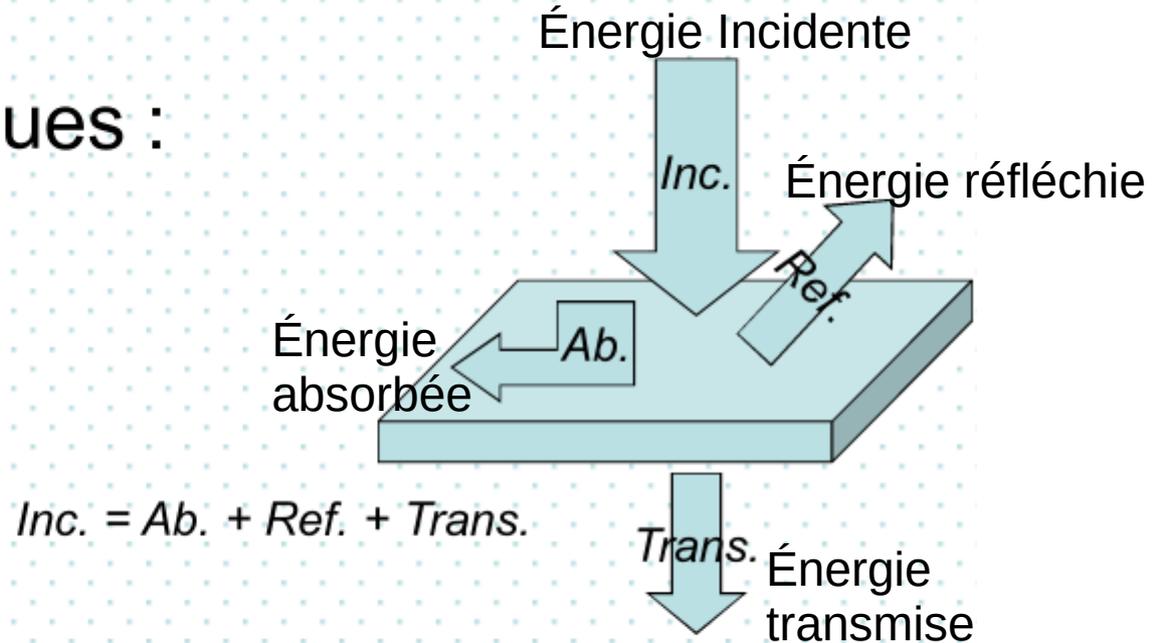
II-1. Conversion de la lumière en électricité

- 3 évènements optiques :

- Réflexion
- Transmission
- Absorption

- Part absorbée :

- souvent convertie en chaleur (rayonnement infrarouge)
- dans un matériau PV, une partie sera convertie en énergie électrique



II-1. Conversion de la lumière en électricité

- L'énergie restante à la profondeur d dans un matériau suit la loi :

$$E(d) = E_{inc} e^{-\alpha \cdot d}$$

- L'énergie absorbée dans l'épaisseur d est donc égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc} e^{-\alpha \cdot d} = E_{inc} (1 - e^{-\alpha \cdot d})$$

- Le coefficient d'absorption α dépend :
 - du matériau
 - de la longueur d'onde de l'énergie incidente

II-1. Conversion de la lumière en électricité

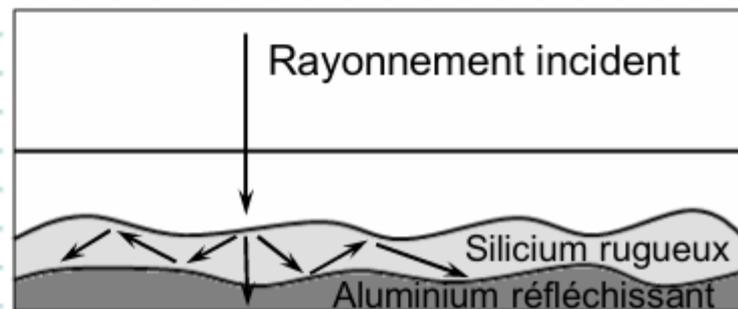
- Quelques exemples :
 - Silicium cristallin :
 - sur une tranche d'épaisseur $20\ \mu\text{m}$, la totalité de l'énergie incidente est absorbée
 - Silicium amorphe :
 - une couche de $2\ \mu\text{m}$ suffit pour capter la totalité du rayonnement

Données pour $\lambda=0,59\ \mu\text{m}$:

Matériau	$\alpha\ (\text{cm}^{-1})$
Silicium cristallin	$4,5 \cdot 10^3$
Silicium amorphe	$2,4 \cdot 10^4$
Arséniure de gallium	$5,4 \cdot 10^4$

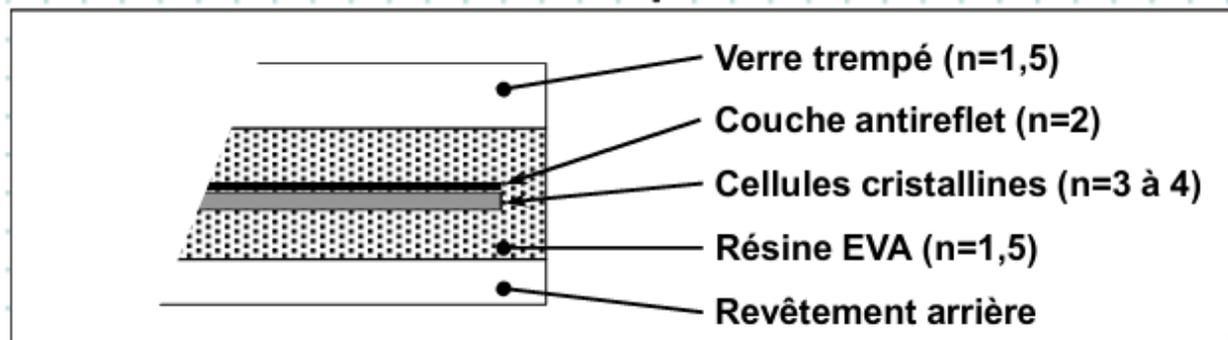
II-1. Conversion de la lumière en électricité

- Des techniques supplémentaires permettent d'améliorer le processus du silicium amorphe :
 - Utilisation d'une couche d'aluminium réfléchissant à l'arrière des couches actives (réduire les pertes par transmission)
 - Augmenter la diffusion en augmentant la rugosité des couches actives



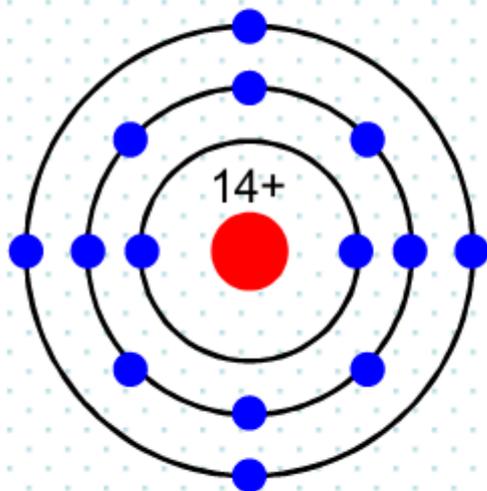
II-1. Conversion de la lumière en électricité

- Taux de réflexion :
$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$
 - Silicium brut ($n_2=3,75$ pour $\lambda=0,6\mu\text{m}$) en contact avec l'air ($n_1=1$) : $R=33\%$!! ("n" est appelé indice de réfraction)
- EVA (éthylène-vinyle-acétate), verre protecteur et antireflet : exemple du silicium cristallin



II-1. Conversion de la lumière en électricité

Rappel sur la nature de la matière



Structure simplifiée de l'atome de Silicium

Noyau central avec 14 électrons gravitationnels répartis en couches concentriques :

1^{ère} : couche interne (2 e⁻)

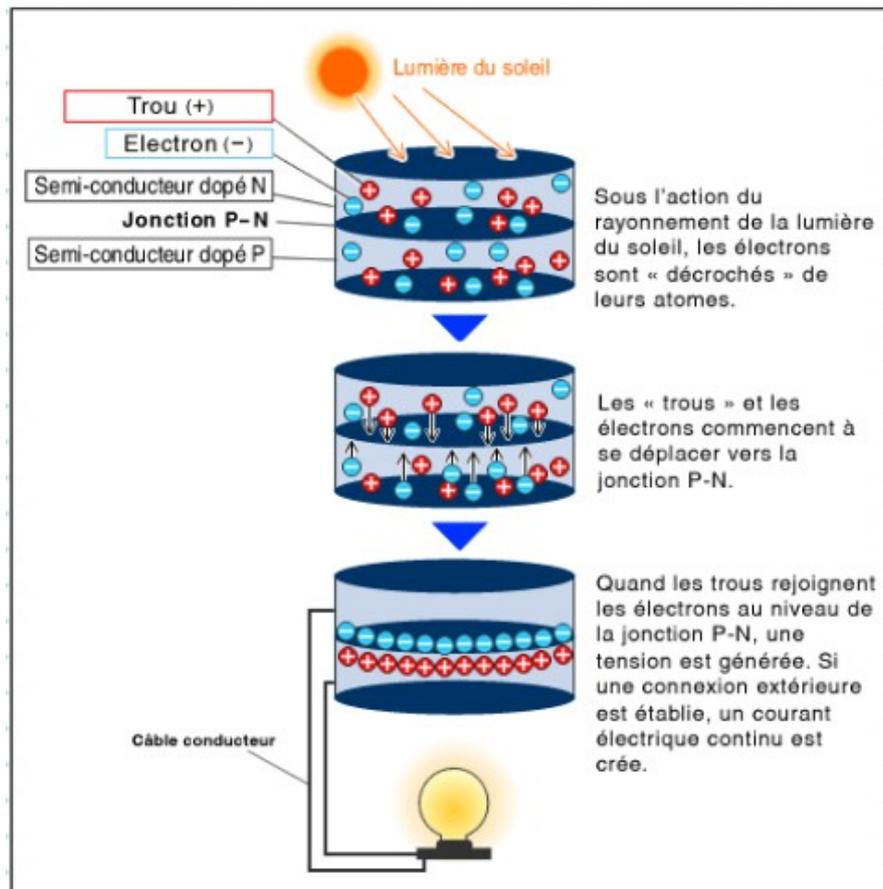
2^{ème} : couche intermédiaire compacte et stable (8 e⁻)

3^{ème} : couche périphérique (4 e⁻)

Les électrons sont fortement liés au noyau, aucune charge mobile capable d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible (semi-conducteur).

Afin de permettre aux 4 derniers électrons d'être peu retenus par le noyau (électrons « libres »), on dope le matériau.

II-1. Conversion de la lumière en électricité

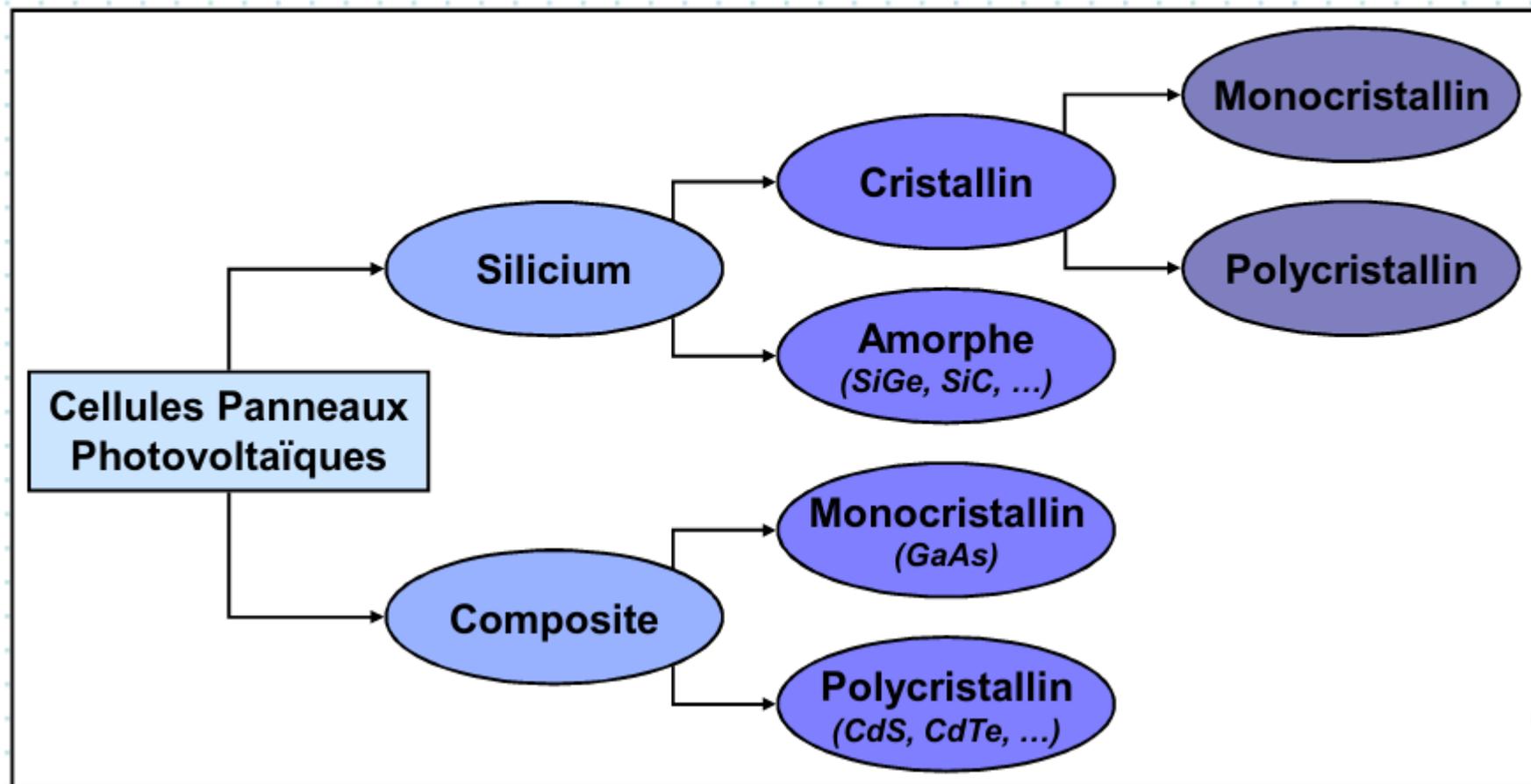


Collecte des charges par jonction P-N

Excès d'électrons : dopés au phosphore (type N)

Excès de trous (déficits d'électrons) : dopés au bore (type P)

II-2. Technologies des cellules solaires



II-2. Technologies des cellules solaires

- Grand nombre de technologies :
 - La majorité est développée en laboratoire
 - Technologies industrialisées :
 - Silicium mono et polycristallin (90% du marché en 2008)
 - Silicium en couche mince amorphe
 - Le dopage (ajout d'impuretés) du Silicium améliore sa « photosensibilité »
(Découverte en 1954 dans les laboratoires Bell)
 - découpe de « wafers », traitement de surface, dopage, couche anti-reflet, etc ...

II-2. Technologies des cellules solaires

- Retour énergétique d'un module :
 - ✓ ratio entre l'énergie totale consommée au cours de sa fabrication, de son transport, de son installation, de son recyclage et l'énergie produite annuellement
 - ✓ entre 2,6 et 4,6 années
 - ✓ un module générera 5 à 15 fois plus d'énergie que celle nécessaire à sa fabrication pour une durée de vie estimée à 20 ans

*(source : Installations solaires photovoltaïques.
Dimensionnement, Installation et mise en œuvre,
Maintenance – Sylvain Brigand)*

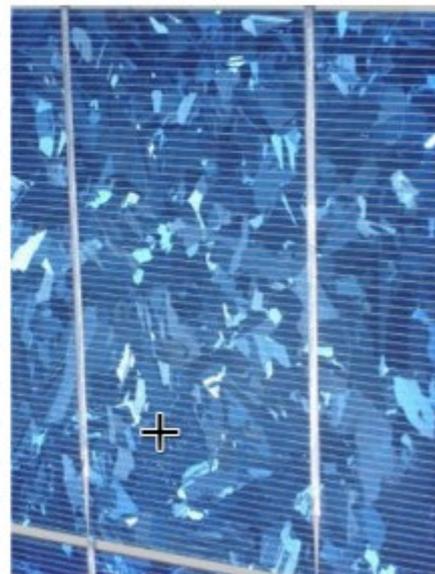
II-2. Technologies des cellules solaires

- Cellules monocristallines en silicium
 - élaborées à partir d'un même bloc de cristal : long et coûteux (exigeant en énergie !)
 - apparence : couleur « bleu uniforme »
 - durée de vie : environ 40 ans
 - rendement : 12 à 18% (meilleur que les cellules polycristallines)



II-2. Technologies des cellules solaires

- Cellules polycristallines en silicium
 - à partir d'un bloc sous forme de cristaux multiples (visibles à l'œil nu)
 - coût de production plus faible que les cellules monocristallines
 - peu de déchets et moins d'énergie (2 à 3 fois moins)
 - durée de vie : environ 30 ans
 - rendement : 11 à 15%
 - meilleur rapport performances/prix



II-2. Technologies des cellules solaires

- Cellules amorphes en silicium
 - coût de production le plus faible
 - « feuilles » souples de cellules
 - grandes surfaces à faible coût
 - rendement : 6 à 8%
- Autres cellules amorphes :
 - CIS (cuivre-indium-sélénium) ou CdTe (tellure de cadmium)
 - meilleures à faible lumière et en temp.
 - rendement : 12%



II-2. Technologies des cellules solaires

- Cellules cristallines ou amorphes ?
 - Cristallines :
 - rendement plus élevé
 - moyennes et fortes puissances
 - fragilités du silicium (placé entre 2 plaques de verre)
 - Amorphes :
 - moins chères
 - faibles puissances (nécessite le double en surface pour l'équivalent des cristallines)
 - infrastructure d'installation moins lourde



II-2. Technologies des cellules solaires

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	+++	+++	Très performant	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	++	+++	Adapté à la production à grande échelle	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	+	+	Peut fonctionner sous la lumière fluorescente	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite monocristallin (GaAs)	+++	+++	Lourd, fissure facilement	Aérospatiale
Composite polycristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.)	+	+	Nécessite peu de matériau mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Source : Sharp Electronics France

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Définition et chiffres clés

- ✓ **Définition du W_c**

W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) : puissance électrique (maximale) délivrée par une cellule, un panneau, un champ,... en conditions normalisées (AM1,5)

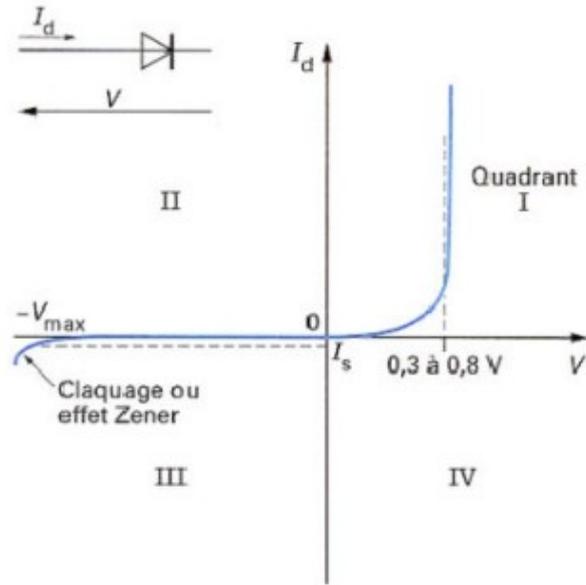
- ✓ **Énergie délivrée**

En fonction de l'emplacement géographique (en France métropolitaine), 1 W_c délivre de 1 à 3 Wh par jour.

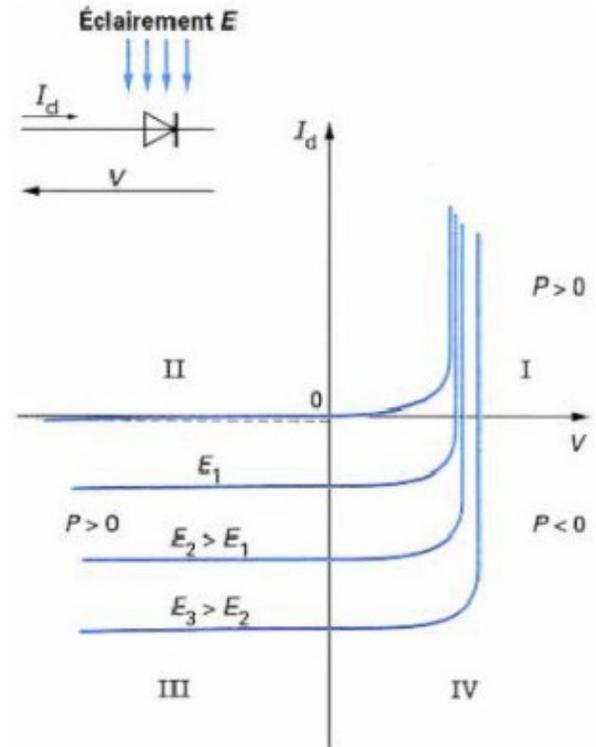
3 Wh par jour, c'est environ 1 kWh/an

Ordre de grandeur à retenir : **1 W_c** fournit environ **1 kWh/an**

II-3. Propriétés des cellules solaires



DIODE

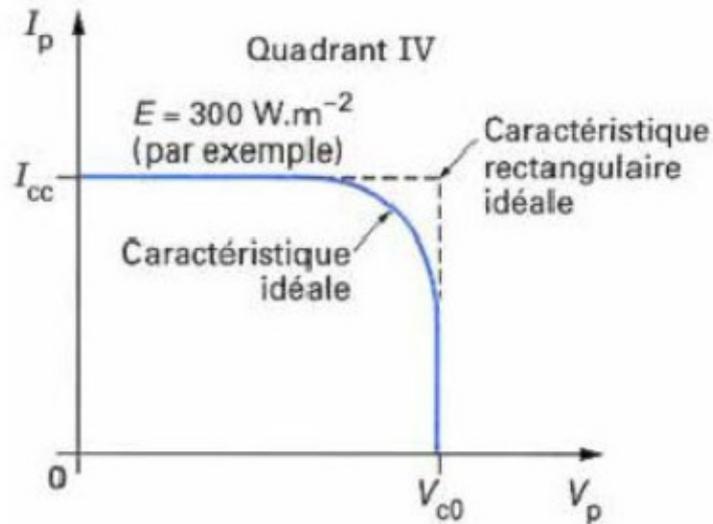


CELLULE PV

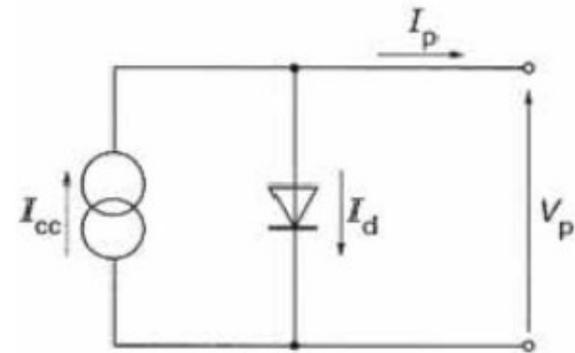
(source : *Convertisseurs photovoltaïques* – L. Protin, S. Astier
– *Techniques de l'ingénieur* – août 1997)

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Cellule PV idéale



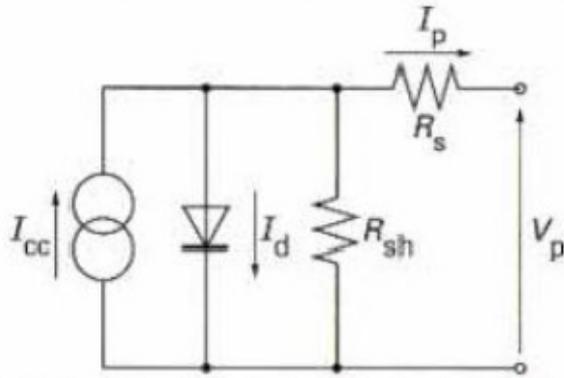
V_p tension de photopile
 I_p courant de photopile



I_{cc} : courant de court-circuit
dû à l'éclairement

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Schéma équivalent « réaliste »



$$I_p = I_{cc} - I_d - \frac{V}{R_{sh}}$$

R_s : résistance qui représente les diverses résistances de contacts et de connexions

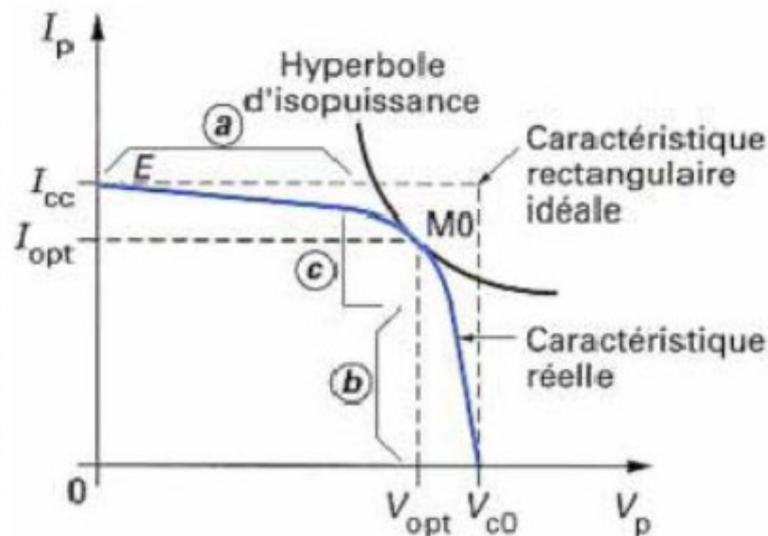
$$R_s = 0.5 \text{ à } 2 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

R_{sh} : résistance qui caractérise les divers courants de fuite / sh pour shunt

$$R_{sh} = 2 \cdot 10^3 \text{ à } 2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Caractéristique réelle



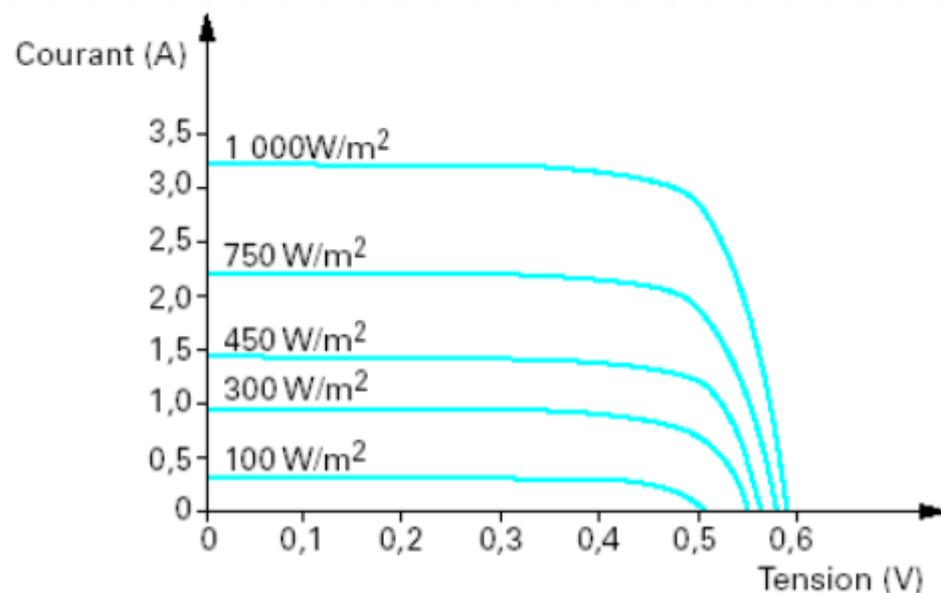
Zone a : générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'éclairement

Zone b : générateur de tension V_{C0}

Zone c : l'impédance interne du générateur varie rapidement

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Caractéristiques mesurées
 - Cellule solaire de 10 cm de côté (Silicium polycristallin) à température constante 25°C en fonction de l'éclairement



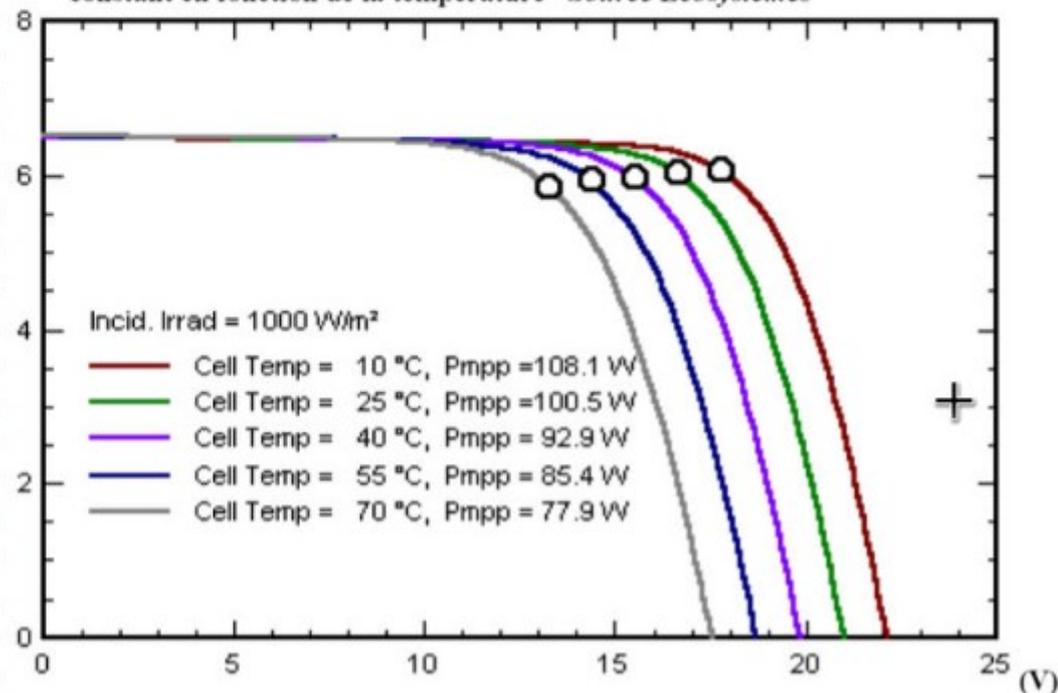
II-3. Propriétés des cellules solaires

- Effet de la température

- I_{cc} = constante

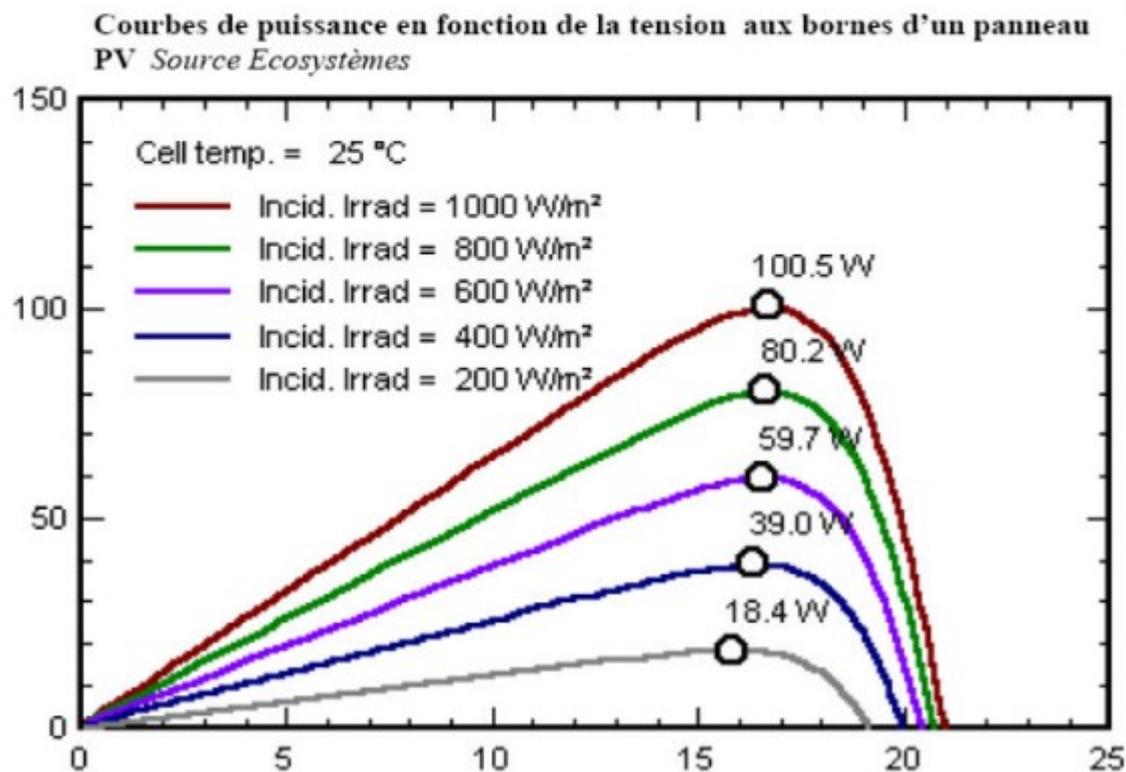
- V_{c0} chute

Caractéristiques courant – tension $I=f(V)$ d'un panneau PV à éclairement constant en fonction de la température – *Source Ecosystèmes*



II-3. Propriétés des cellules solaires

- Caractéristique $P = f(V)$



II-3. Propriétés des cellules solaires

- Caractéristiques et datasheet

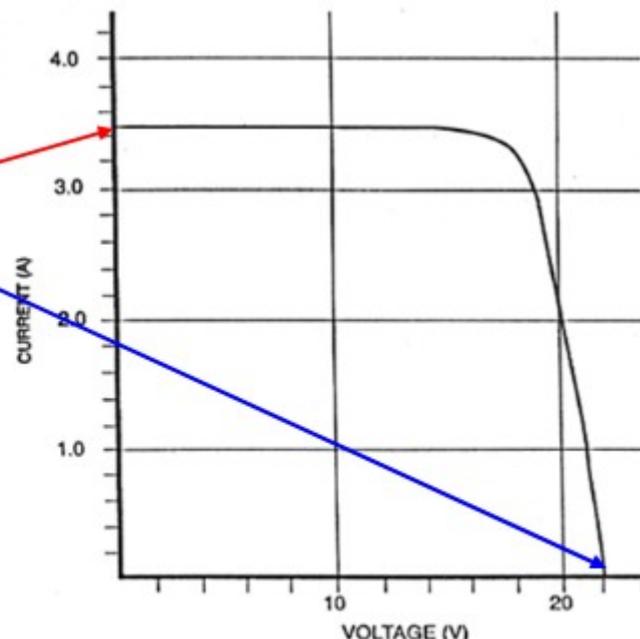
source : BP solar

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Coefficient of Voltage $-0.086 \text{ V}/^\circ\text{C}$
Coefficient of Current $+0.0016 \text{ A}/^\circ\text{C}$

Module Catalogue Number	BP555/1	BP555/2
Typical Peak Power (Pmax)	55.00Wp	55.00Wp
Voltage @ maximum power (V mp)	18.00V	18.00V
Current @ maximum power (I mp)	3.05A	3.05A
Short-circuit current (I sc)	3.26A	3.26A
Open-circuit Voltage (V oc)	22.00V	22.00V
Minimum installed power (P min)	50.00Wp	50.00Wp

Dimensions	Length 825 mm	Width 530 mm
	Depth 43.5 mm	Weight 5.00 kg



II-3. Propriétés des cellules solaires

- Caractéristiques et datasheet

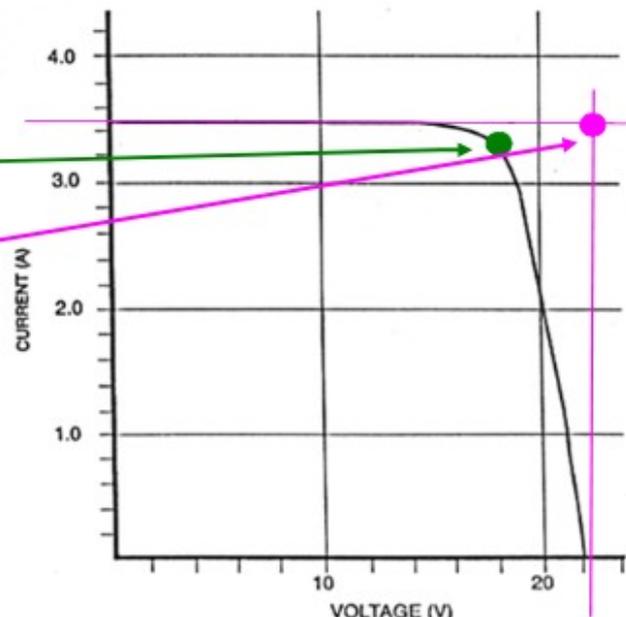
source : BP solar

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Module Catalogue Number	BP555/1	BP555/2
Typical Peak Power (Pmax)	55.00Wp	55.00Wp
Voltage @ maximum power (V mp)	18.00V	18.00V
Current @ maximum power (I mp)	3.05A	3.05A
Short-circuit current (I sc)	3.26A	3.26A
Open-circuit Voltage (V oc)	22.00V	22.00V
Minimum installed power (P min)	50.00Wp	50.00Wp

Dimensions	Length 825 mm	Width 530 mm
	Depth 43.5 mm	Weight 5.00 kg

Coefficient of Voltage -0.086 V/°C
Coefficient of Current +0.0016 A/°C



Facteur de remplissage (*FF* : *Fill Factor*) = $V_{mp} \times I_{mp} / V_{oc} \times I_{sc}$

Pour ici, $FF = 0,77$

II-3. Propriétés des cellules solaires

source : SOLAREX

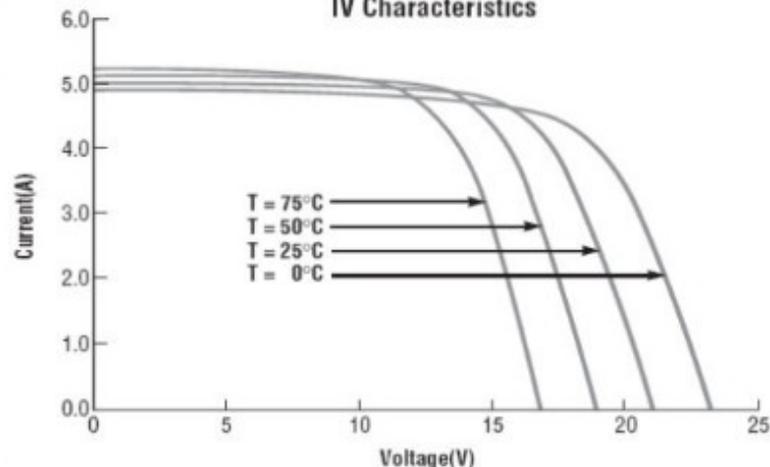
Typical Electrical Characteristics⁽¹⁾

	MSX-83	MSX-77
Maximum power (P_{max})	83W	77W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	17.1V	16.9V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.85A	4.56A
Guaranteed minimum P_{max}	80W	72W
Short-circuit current (I_{sc})	5.27A	5.0A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.2V	21.0V
Temperature coefficient of I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015) \%/^{\circ}C$	
Temperature coefficient of V_{oc}	$-(80 \pm 10) mV/^{\circ}C$	
Approximate effect of temperature on power	$-(0.5 \pm 0.05) \%/^{\circ}C$	
NOCT²	$47 \pm 2^{\circ}C$	

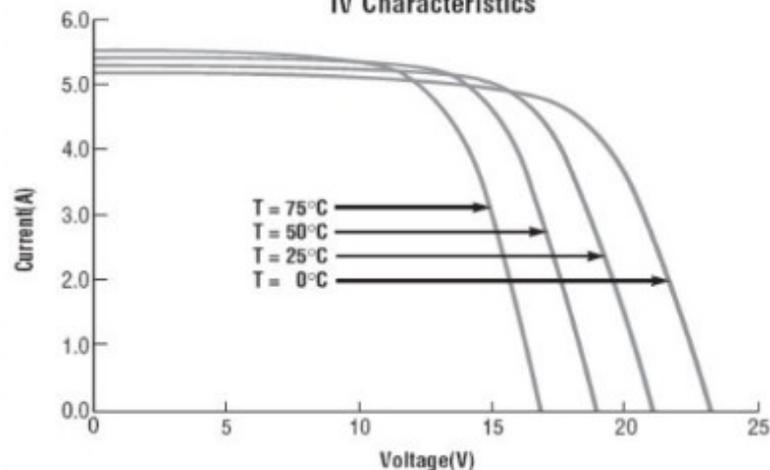
Notes

- These modules are tested, labeled and shipped in 12V configuration. These data represent the performance of typical 12V modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes and cabling. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036-85 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of $1 kW/m^2$ (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5;
 - cell temperature of $25^{\circ}C$ or as otherwise specified (on curves).
 Operating characteristics in sunlight may differ slightly. For characteristics of modules in 6V configuration, halve the 12V voltage characteristics and double the current characteristics. Power values are unchanged.
- Under most climatic conditions, the cells in a module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of $20^{\circ}C$, solar irradiation of $0.8 kW/m^2$, and wind speed of 1 m/s.
- These specifications do not include the effect of light-induced degradation, which can result in approximately a 3% reduction in power output after exposure to sunlight

MSX-77
IV Characteristics

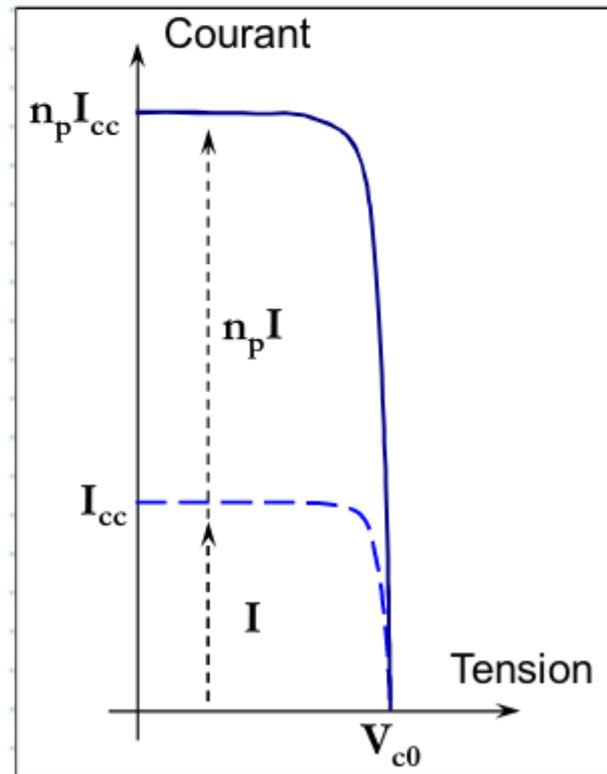
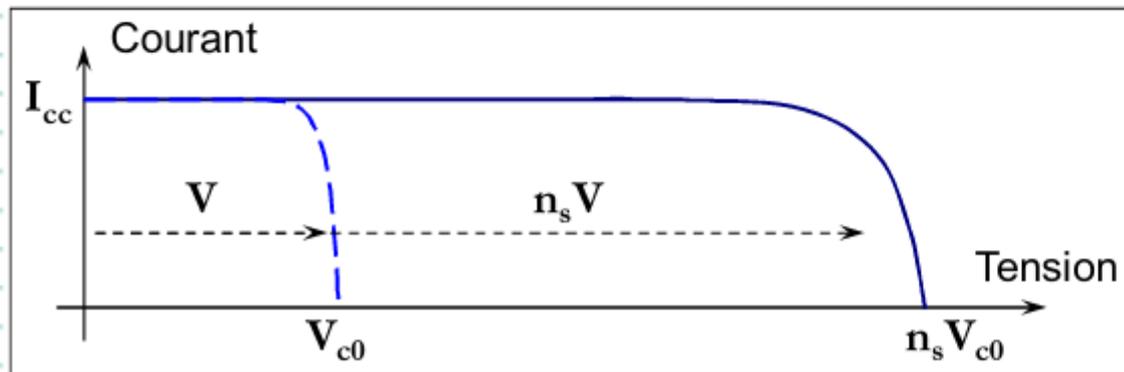


MSX-83
IV Characteristics



II-3. Propriétés des cellules solaires

- Assemblage des cellules
 - n_s cellules en série
 - n_p cellules en parallèle

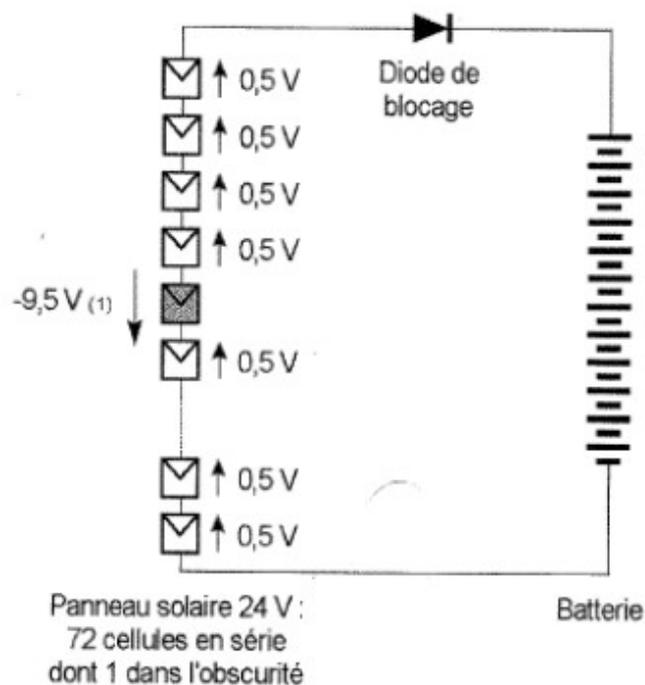


II-3. Propriétés des cellules solaires

- Phénomène du hot-spot

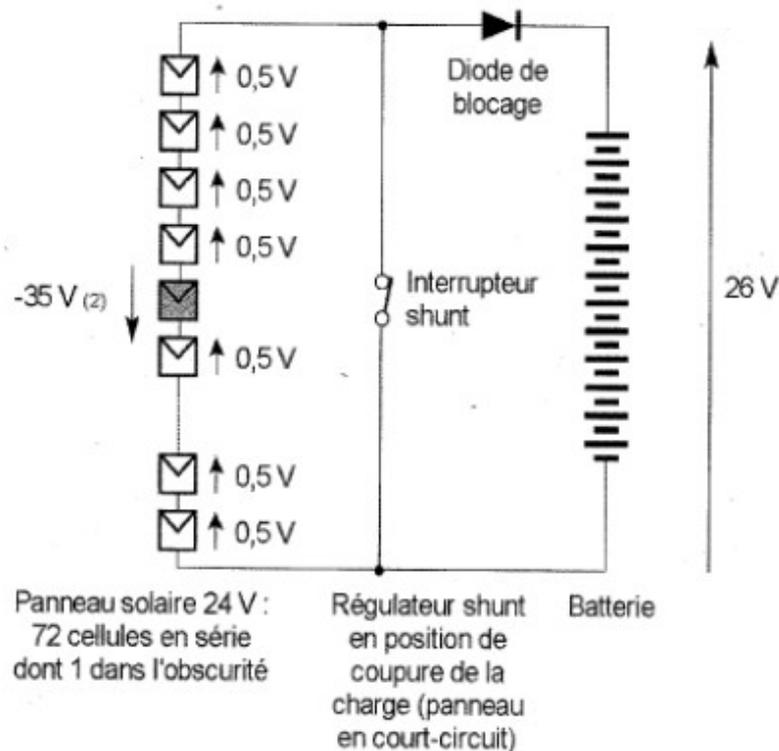
(source : *Energie Solaire Photovoltaïque*
- Anne Labouret, Michel Villoz)

a) En charge normale



(1) Grossièrement : $71 \times 0,5 - 26 = 9,5 \text{ V}$

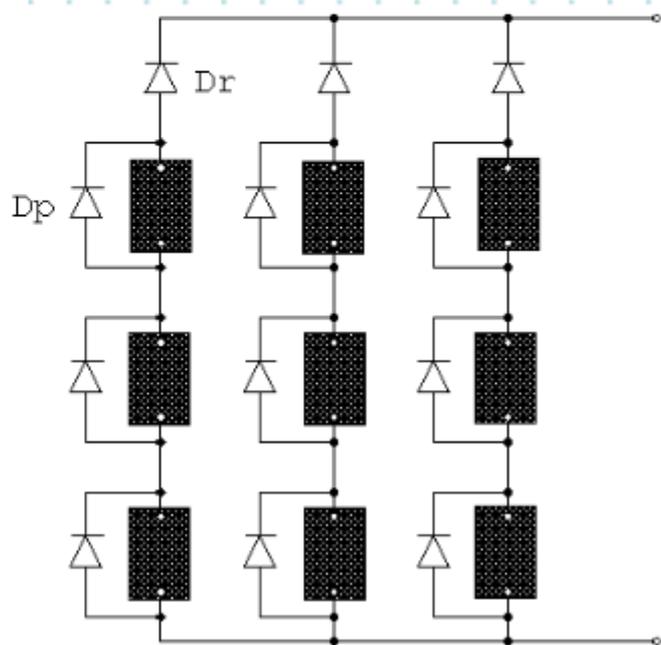
b) Lors de la mise en court-circuit du panneau par un régulateur shunt



(2) Grossièrement : $71 \times 0,5 = 35,5 \text{ V}$

II-3. Propriétés des cellules solaires

- Protection des cellules
 - en série : ajout d'une diode « by-pass » D_p en parallèle des groupements de cellules (30 à 40 max)
 - en parallèle : ajout d'une diode de non-retour D_r en série avec les branches en parallèle



III. Systèmes photovoltaïques

- Constituants d'un système photovoltaïque
- Système PV raccordé au réseau
- Système PV isolé
- MPPT
- Coût et rachat du PV

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

- De la cellule jusqu'au système PV

- L'élément de base est la cellule PV

- Un module (ou panneau) PV est formée à l'aide de plusieurs cellules : le plus souvent 18, 36 ou 72 cellules reliées en série

- Panneaux couramment disponibles aujourd'hui :

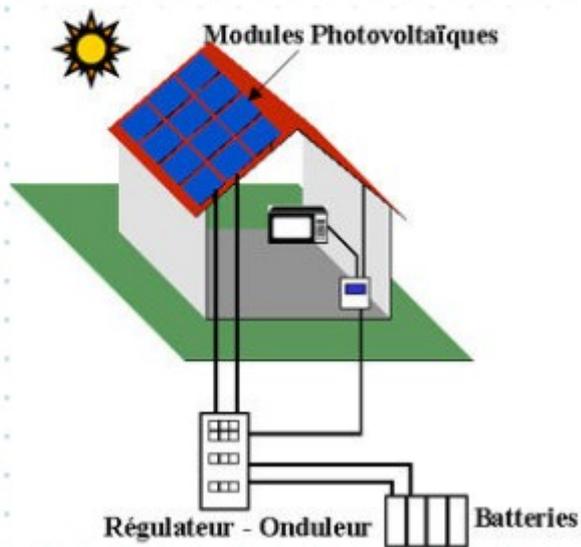
85 Wc en « 12 V » (36 cellules - 0,63 m²) ou 170 Wc en « 24 V » (72 cellules - 1,25 m²) soit 130 W/m² en conditions normalisées.

- Un système PV est formée à l'aide de plusieurs modules : série, parallèle ou série/parallèle

- Selon l'application, le système PV peut être appelé champ PV, générateur PV ou groupe PV

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

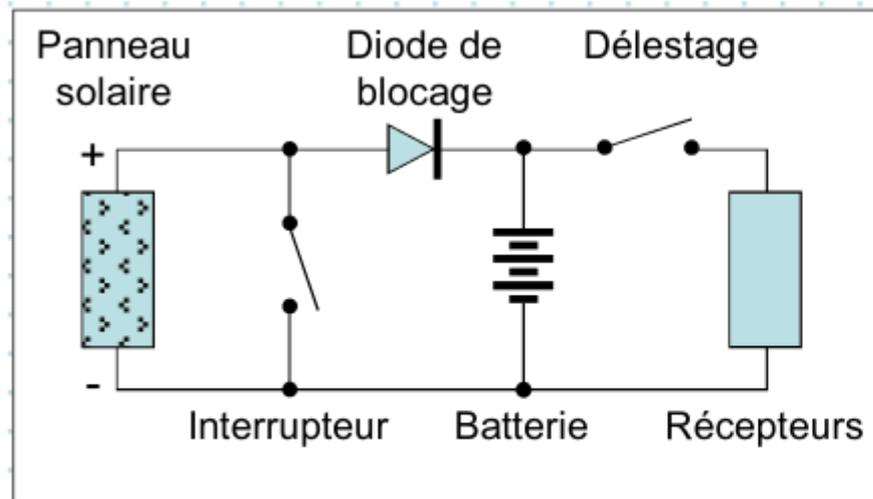
- Installation isolée du réseau



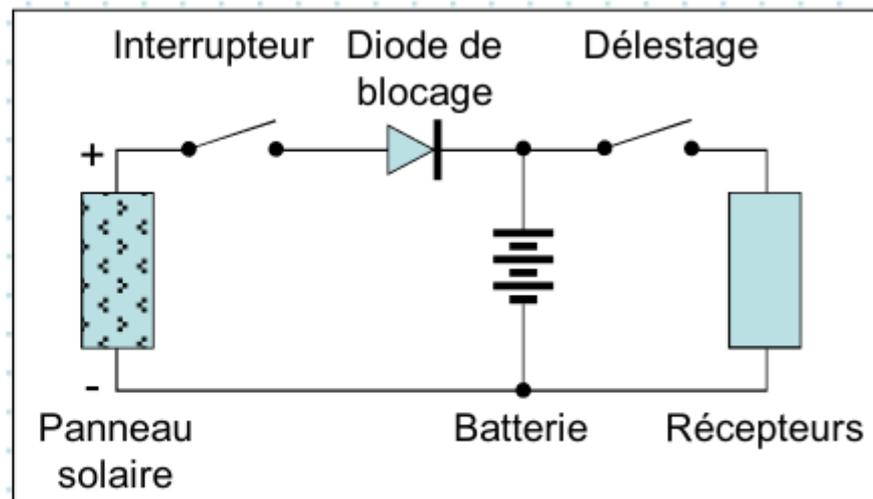
Source : <http://www.dd-energy.com/>

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

- Le « régulateur »
 - Coupe la charge de la batterie une fois celle-ci chargée



Régulateur shunt



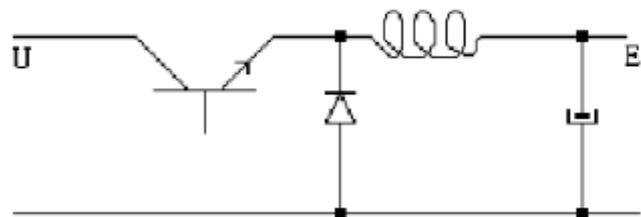
Régulateur série

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

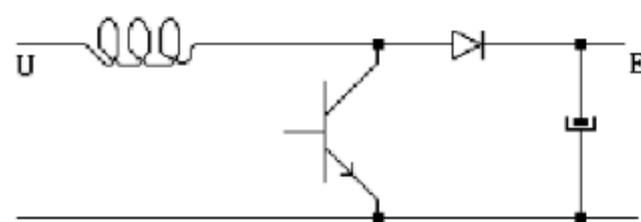
- Il existe des régulateurs plus performants :
 - régulateur MLI (PWM)
 - tension constante aux bornes de la batterie
 - régulateur MPPT
 - régulation de la tension (ou du courant) pour être au maximum de puissance

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

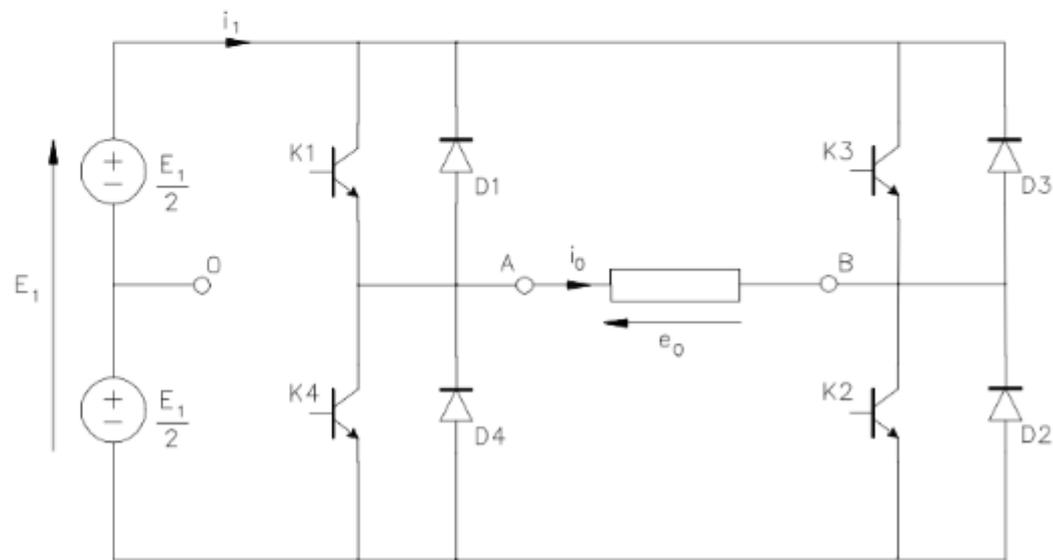
- Convertisseurs statiques :
 - DC/DC : hacheur élévateur ou abaisseur
 - DC/AC : onduleur central, (multi-)string ou modulaire



Hacheur abaisseur



Hacheur élévateur



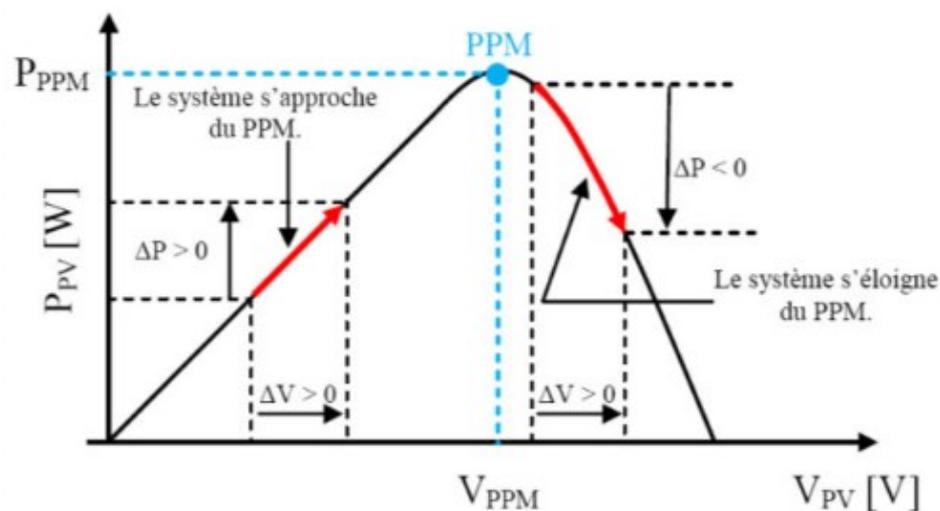
Onduleur

III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

- Les batteries pour le solaire :
 - Plomb-acide
 - Cadmium-nickel (rarement utilisées car chères et toxiques)
 - Nickel-métal-hydrure
- Optimisation de la durée de vie (surtout NiMH), protection contre l'oxydation, etc ...

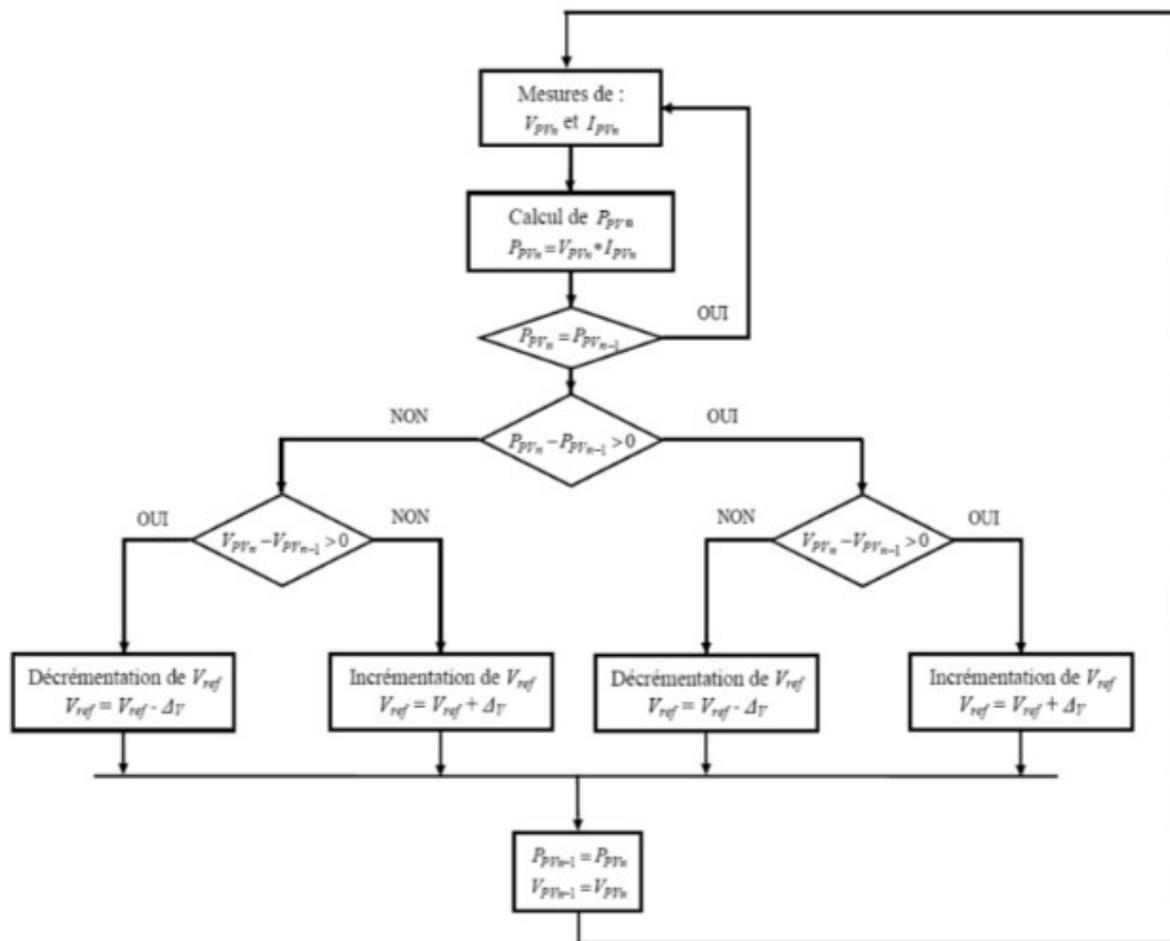
MPPT

- MPPT = Maximum Power Point Tracking
 - Exemple : Perturb & Observe (P&O)



Source : C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », décembre 2008, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III – Paul Sabatier.

MPPT : Exemple d'algorithme (Perturb & Observ)

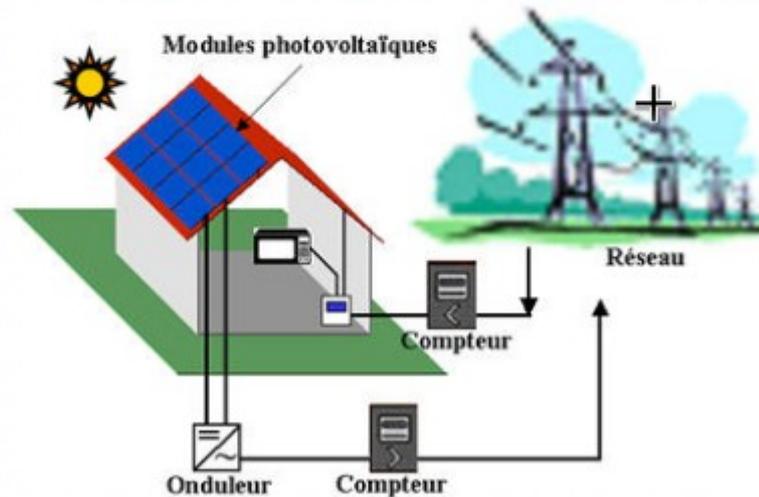


Source :

C. Cabal,
« Optimisation
énergétique de
l'étage d'adaptation
électronique dédié à
la conversion
photovoltaïque »,
décembre 2008,
Thèse de Doctorat
de l'Université de
Toulouse III – Paul
Sabatier.

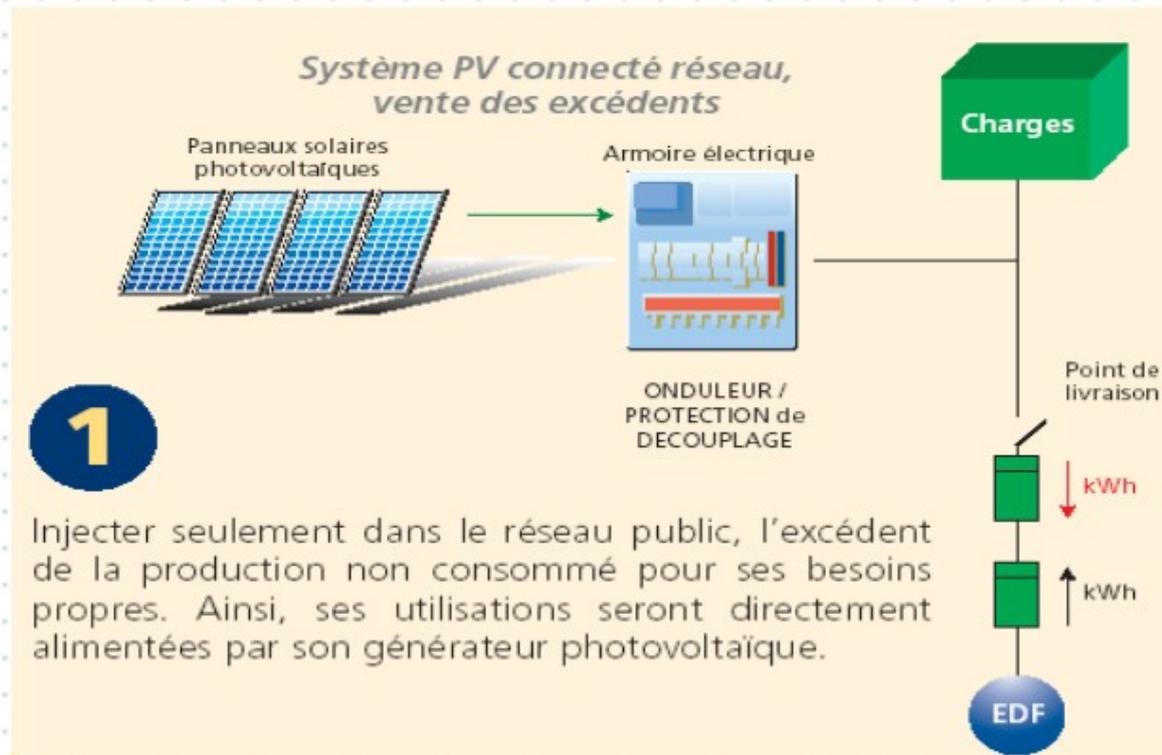
III-1. Constituants d'un système photovoltaïque

- Installation couplée du réseau



Source : <http://www.dd-energy.com/>

III-2. Système PV raccordé au réseau



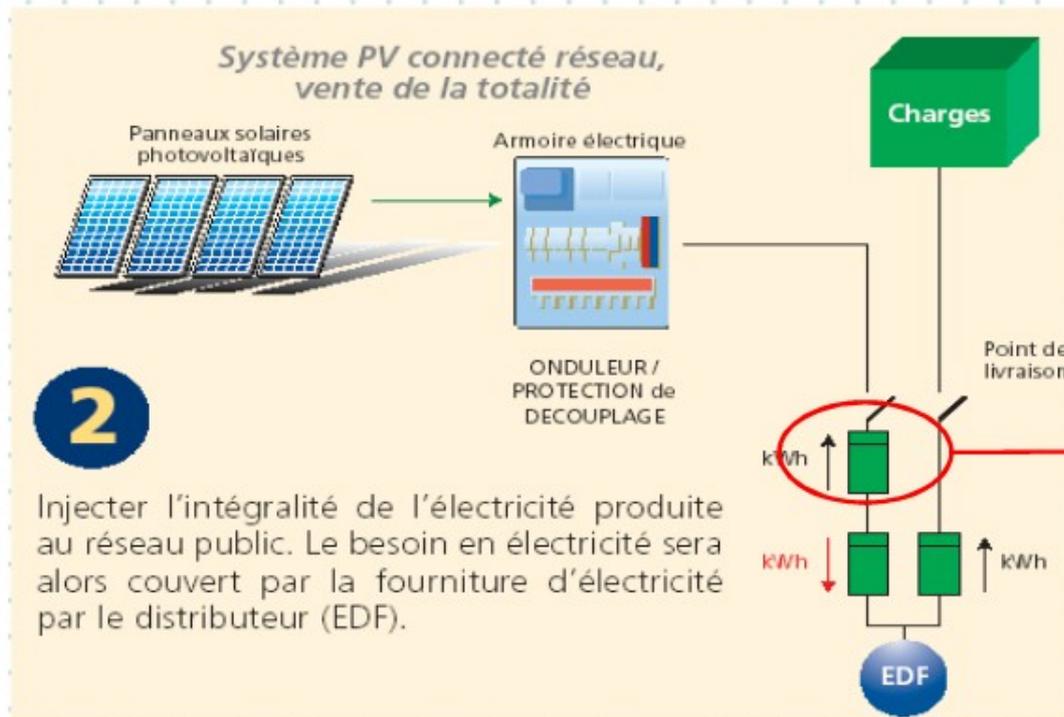
Source : Le photovoltaïque raccordé au réseau, EDF

Impose de réduire la consommation des charges électriques

- lampes basse conso, chauffage non électrique, récepteurs de classe énergétique A+

Intervention simple : un seul compteur est ajouté (coût entre 200 et 400 €)

III-2. Système PV raccordé au réseau



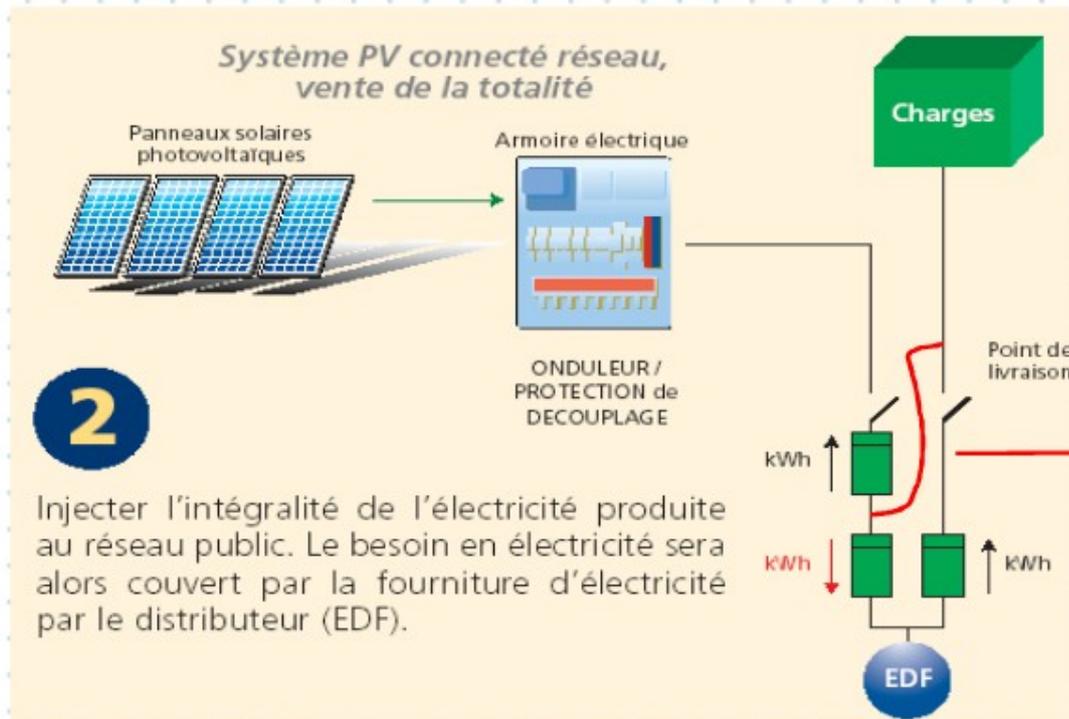
2

Injecter l'intégralité de l'électricité produite au réseau public. Le besoin en électricité sera alors couvert par la fourniture d'électricité par le distributeur (EDF).

Source : Le photovoltaïque raccordé au réseau, EDF

« mouchard »
compteur de
non-consommation

III-2. Système PV raccordé au réseau

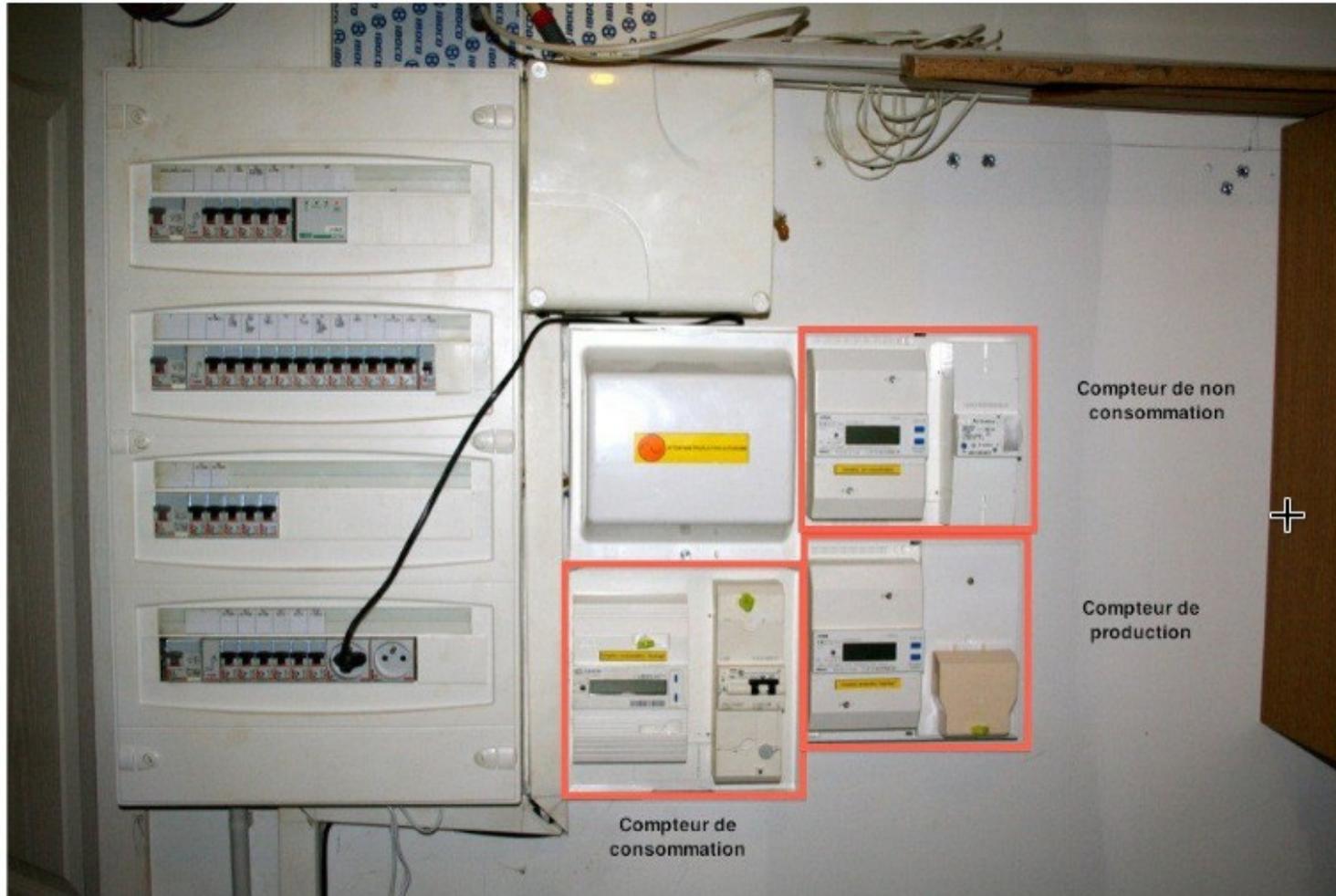


Source : Le photovoltaïque raccordé au réseau, EDF

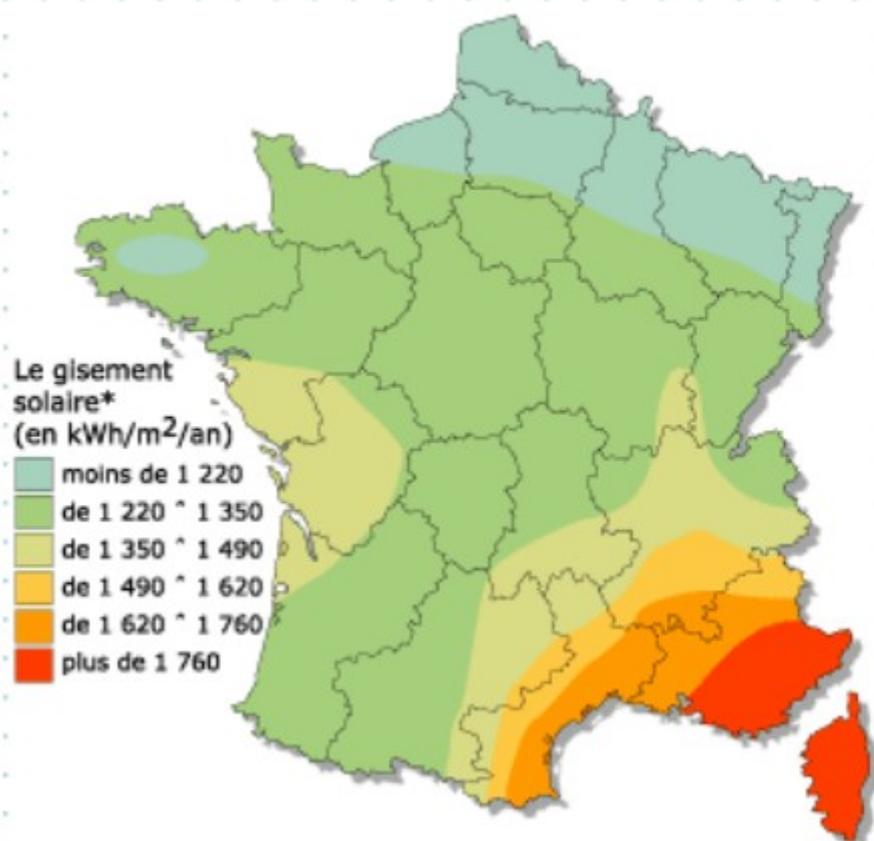
impossible car les compteurs sont scellés

Intervention plus coûteuse lors du raccordement au réseau : entre 500 et 800 €

III-2. Système PV raccordé au réseau



III-3. Carte d'ensoleillement de la France

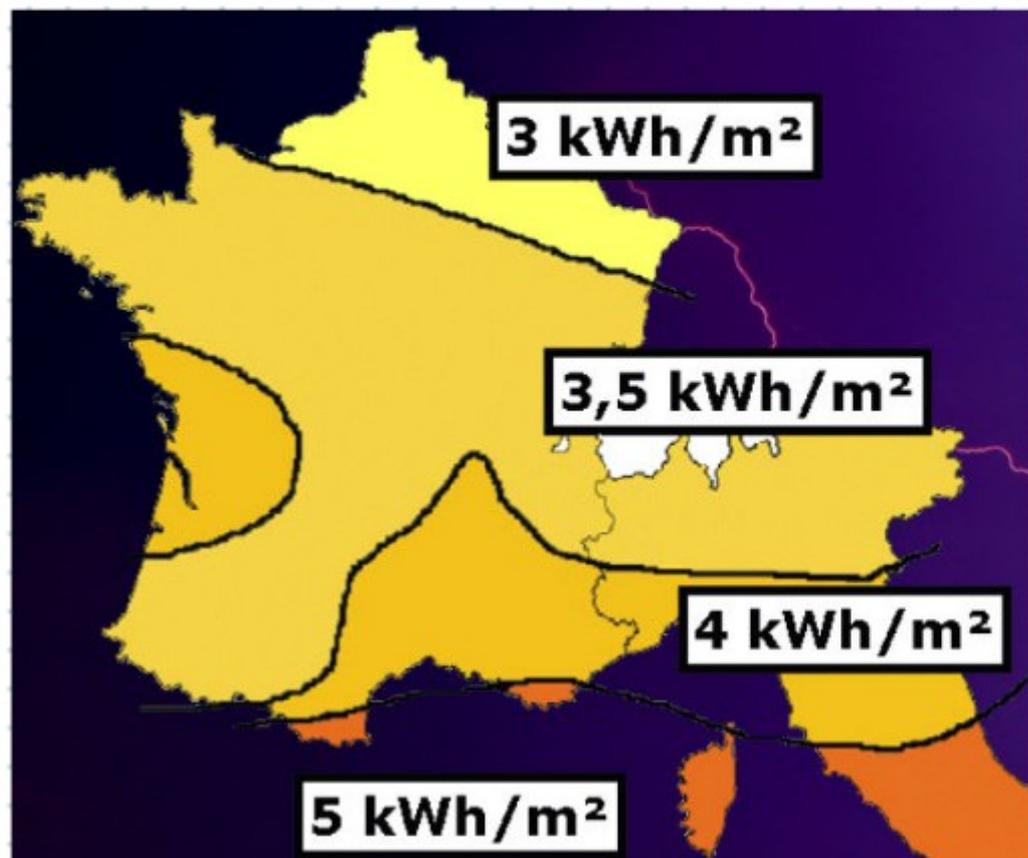


+

** Valeur de l'énergie du rayonnement solaire reçu sur un plan d'inclinaison égal à la latitude et orienté vers le sud.*

Source : ADEME

III-3. Carte d'ensoleillement de la France



*Energie journalière moyenne
reçue sur le territoire français.*

III-3. Carte d'ensoleillement de la France

Exemple de la ville de Lille :

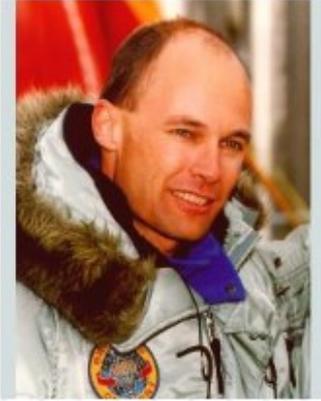
L'énergie reçue annuellement dans la région de Lille est de

$$3\text{kWh} * 365 = 1100 \text{ kWh/m}^2$$

La consommation moyenne d'électricité d'un ménage (hors chauffage) est de **3500 kWh/an**

Une surface de capteurs photovoltaïques de **35m²** avec un rendement de **10%** suffirait à couvrir ces besoins

Quelques exemples (Solar Impulse)

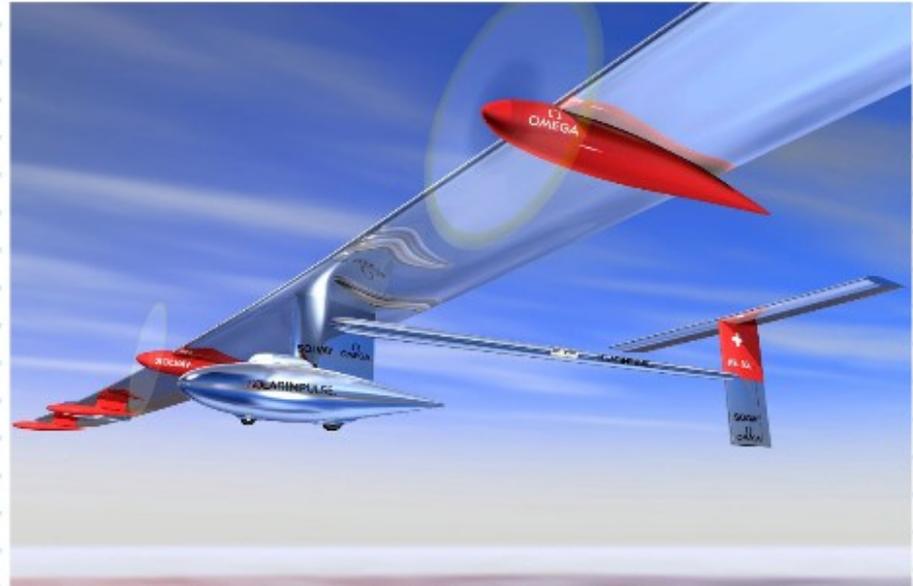


Bertrand Piccard

- Réaliser un avion capable de faire le tour du monde en utilisant uniquement l'énergie solaire
- Contribuer à montrer que la technologie participe à l'action vers un monde plus durable

- n Maximum altitude : 13'000 m
- n Speed : 60-70 km/h
- n Number of pilot : 1
- n Mass : 2 tons
- n First prototype flight: 2009
- n Mission of several days : 2011

Source: keynote Y. Perriard, EPFL,
EPE 2009, Aalborg

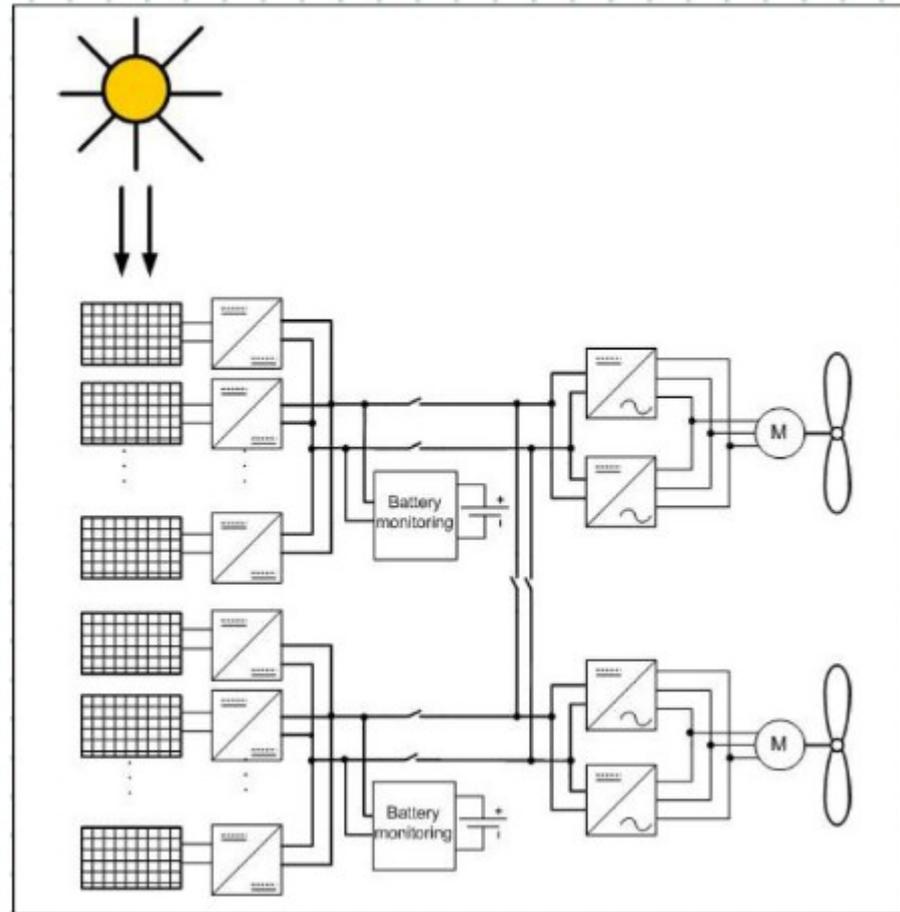


Quelques exemples (Solar Impulse)

La chaîne de conversion d'énergie:

1. Solar cells
2. Maximum Power Point Tracker
3. Batteries management
4. Motor power supply (converter)
5. Motor and propeller

4 Moteurs brushless 7,35kW



1

2

3

4

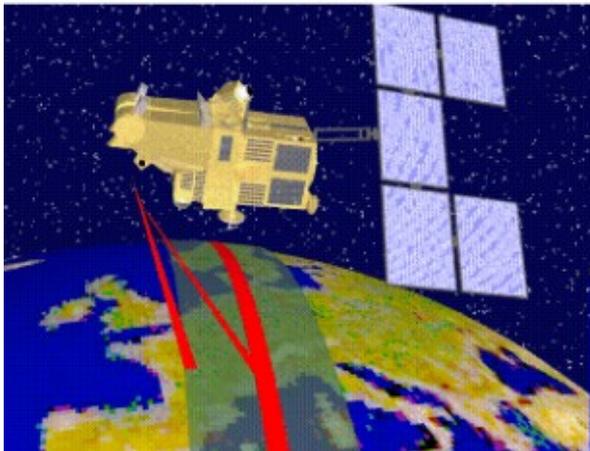
5

Quelques exemples (Alim. des satellites)



Puissance électrique requise entre 1 et 15 kW

En moyenne, 40m² de panneaux pour fournir 10kW



Ex. Spot 4, satellites d'observation de la terre, 5 panneaux PV, surface totale 25 m², 8640 cellules, consommation moyenne 1kW, 4 batterie Ni-cad, 45Kg chacune

Quelques exemples (Véhicules)



Véhicule 'Eclectic' du constructeur Venturi (Monaco)

Mode hybride + PV: 32km supplémentaires /jour en mode électrique

- 2.5 m² de cellules photovoltaïques permet de parcourir 7 km, à une vitesse maximale de 50km/h.
- éoliennes fixées sur le toit pendant le stationnement en une journée de bon vent permet de parcourir 15km .
- La recharge intégrale du véhicule (sur le secteur) prend 5 heures et permet de parcourir 50km.

