

La conversion d'énergie dans les systèmes photovoltaïque

**A. SCHELLMANNNS, Maîtres de conférences à
l'Université de Tours
Responsable de département à Polytech Tours
ambroise.schellmannns@univ-tours.fr**

Congrès ASPROM – 24-25 novembre 2010

Plan

- Contexte et enjeux
- Rappels sur la chaîne de conversion photovoltaïque
- Problématiques de la chaîne de conversion photovoltaïque
- Conclusion générale

LMP : Laboratoire de Microélectronique de Puissance

- Le LMP est composé en 2009 de 33 personnes :
 - 11 enseignants-chercheurs (2 Pr, 8 MCF)
 - 4 chercheurs post-doctoral
 - 2 Ingénieurs (recherche, études) , 1 Technicien
 - 16 doctorants
- Il dispose de deux sites :
 - *STMicroelectronics* Tours
 - *Polytech' Tours* (Département Electronique et Energie)



Axes de recherche du LMP



- **Microélectronique et Technologie**
- **Composants et systèmes de conversion d'énergie**
 - **Compatibilité Électromagnétique (CEM)**
 - **Composants de puissance à faibles pertes**
 - **Fiabilité des composants et des systèmes**
 - **Convertisseurs et topologies pour les ENR**
 - **Pile à combustible**
 - **Modules PV**
 - **Eolien...**

Contexte et enjeux

Rappels sur la chaîne de conversion photovoltaïque

Problématiques de la chaîne de conversion photovoltaïque

Conclusion générale

Contexte et enjeux

❑ Objectifs « 20/20/20 » de l'Union Européenne pour 2020

- 20 % énergies renouvelables
- 20 % de réduction des émissions de CO₂
- 20 % d'augmentation de l'efficacité énergétique

❑ Systèmes photovoltaïques (PV) pour l'habitat

• Problématique :

- ✓ Énergie solaire = densité peu élevée ET production variable (jours, saisons)

➔ **Gestion de l'énergie au sein d'architectures complexes ?**

❑ Enjeux des activités PV pour le LMP

- Revoir les systèmes PV pour augmenter leur adaptabilité aux différentes applications
- Augmenter les performances des systèmes PV : **des modules aux systèmes complets**

Sites isolés



Sites raccordés



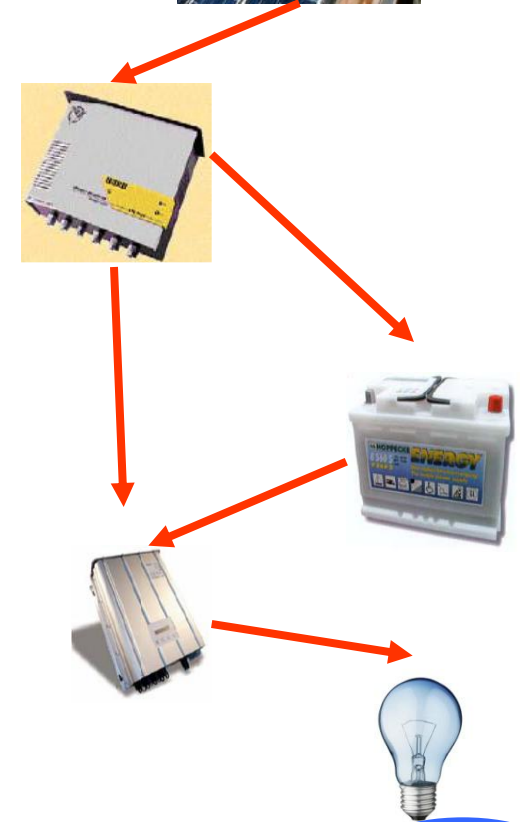
Exemple d'installation



Générateur
photovoltaïque
raccordé au réseau

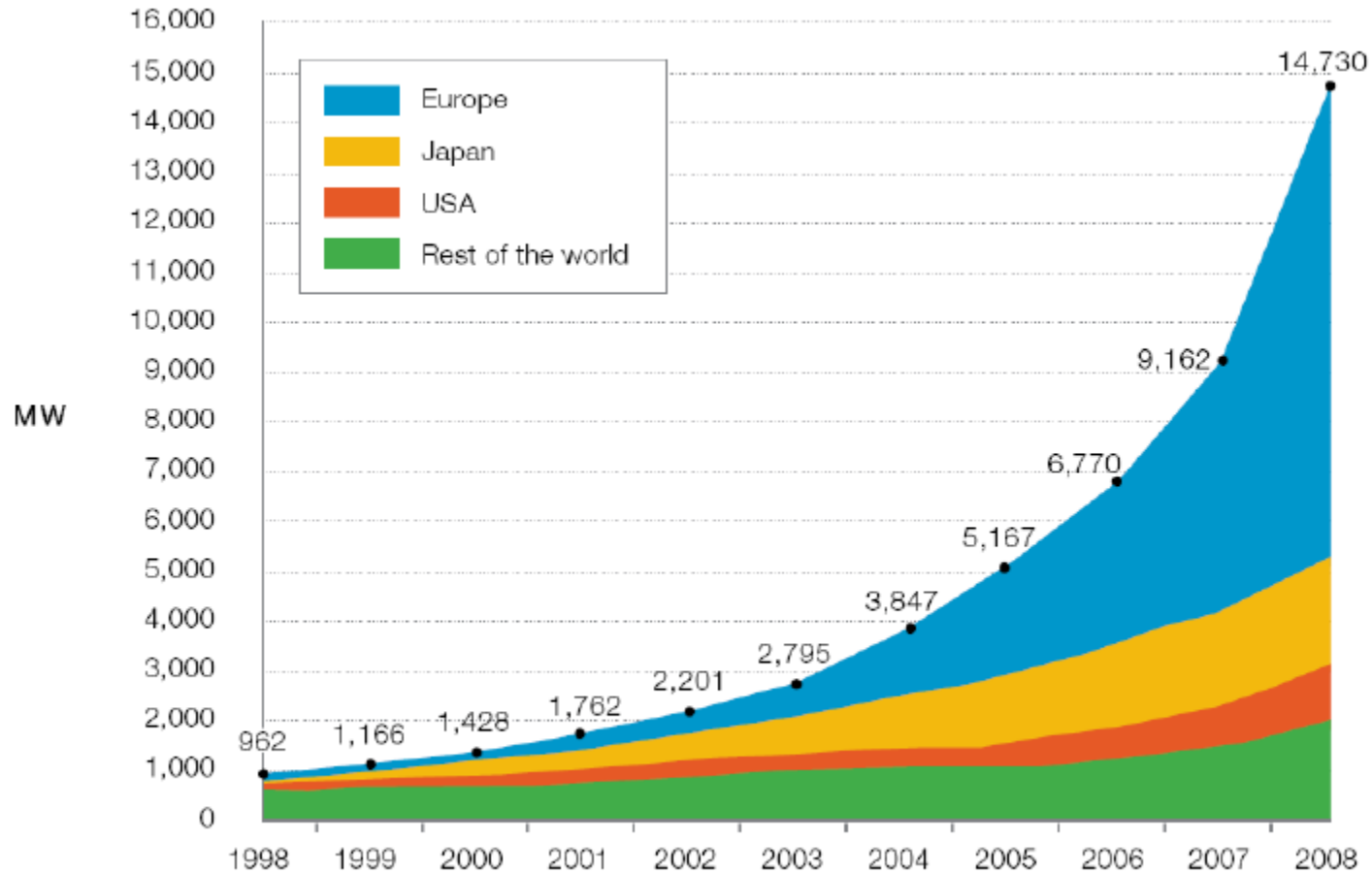


Générateur
photovoltaïque en site
isolé



Solution hybride:
Générateur
photovoltaïque avec
revente du surplus

Evolution de la puissance PV installée dans le monde



EPIA - European Photovoltaic Industry Association - *Global Market Outlook for photovoltaics until 2013 - Belgique, 2008*

☐ Contexte et enjeux

☐ Rappels sur la chaîne de conversion photovoltaïque

☐ Problématiques de la chaîne de conversion

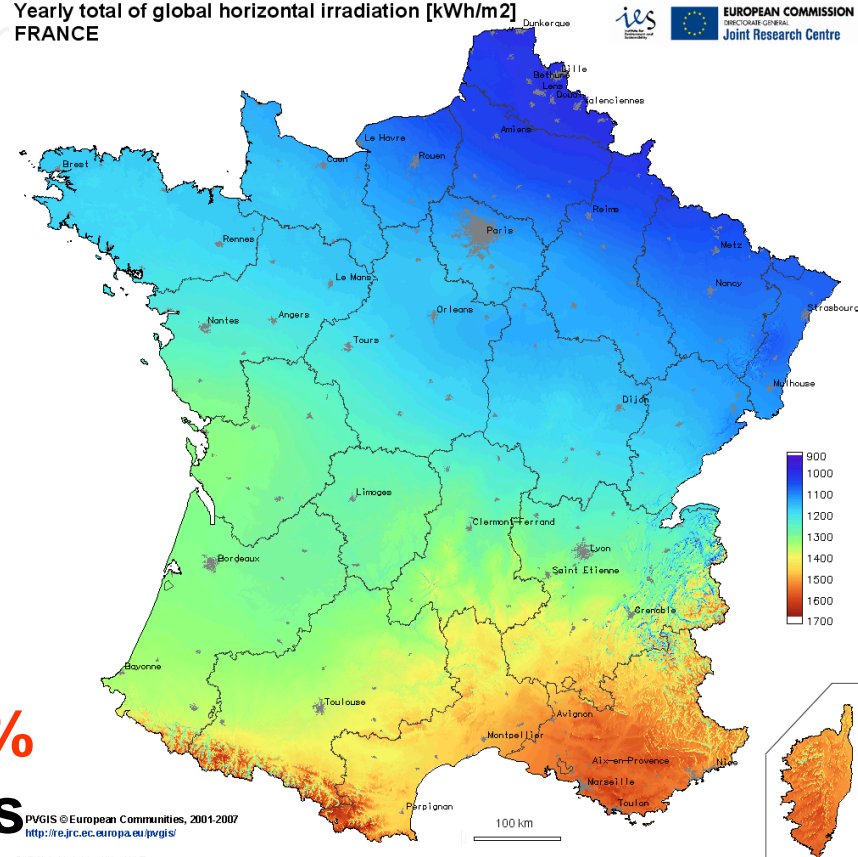
Energie reçue

Paris = 1100 kWh/m²

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

Une surface de capteurs
photovoltaïques de
3m² avec un rendement de 100%
suffirait largement à couvrir ces
besoins...

Yearly total of global horizontal irradiation [kWh/m²]
FRANCE



Le Watt crête (Wc)

C'est l'unité de référence qui permet de comparer les performances des cellules ou des modules

C'est la puissance maximale délivrée dans les conditions suivantes :

- Ensoleillement = 1000 W/m^2**
- Température ambiante = 25°C**
- Epaisseur de l'atmosphère = 1,5**

Exemple : module de puissance 120 Wc et de surface 1 m^2

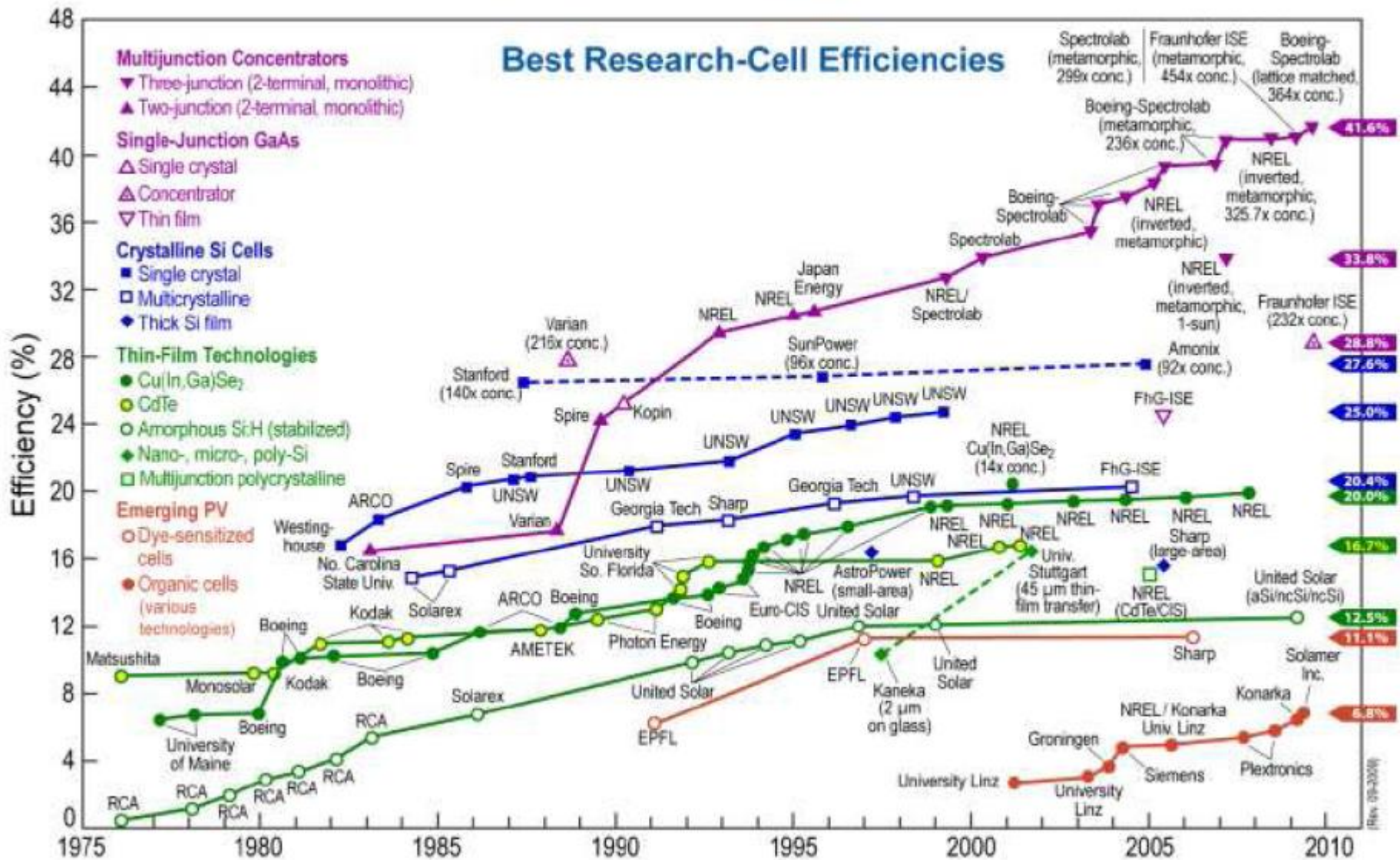
Pour une puissance de rayonnement solaire incident de 1000 W/m^2

Ce module fournit une puissance de 120 W

Son rendement est de 12%

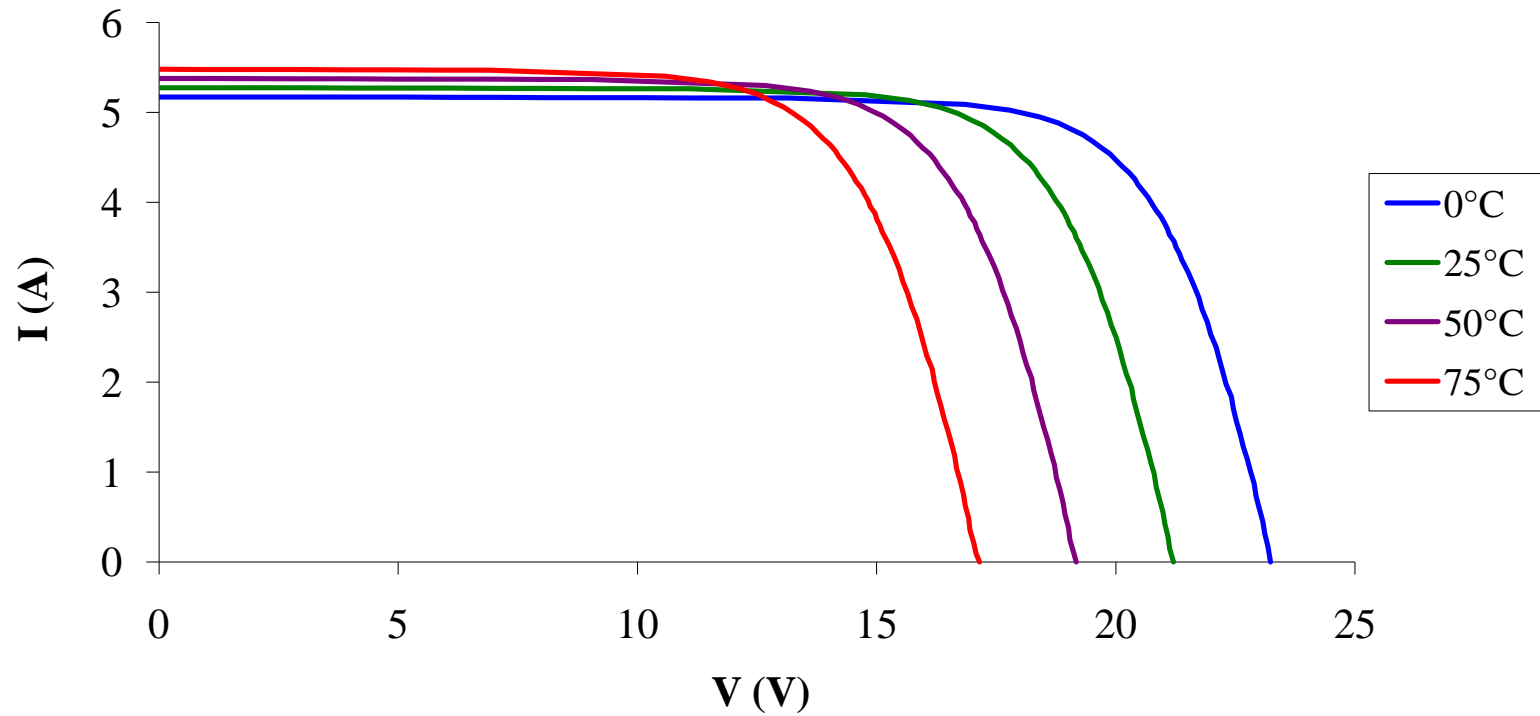
Attention aux conditions d'extrapolation...

Evolution du rendement des différentes technologies entre 1975 et 2008



Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy - 2008 solar technologies market Report- U.S.A., 2008

Caractéristiques I(V) en fonction de la température



Ca ne va pas dans le bon sens...

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNÉS

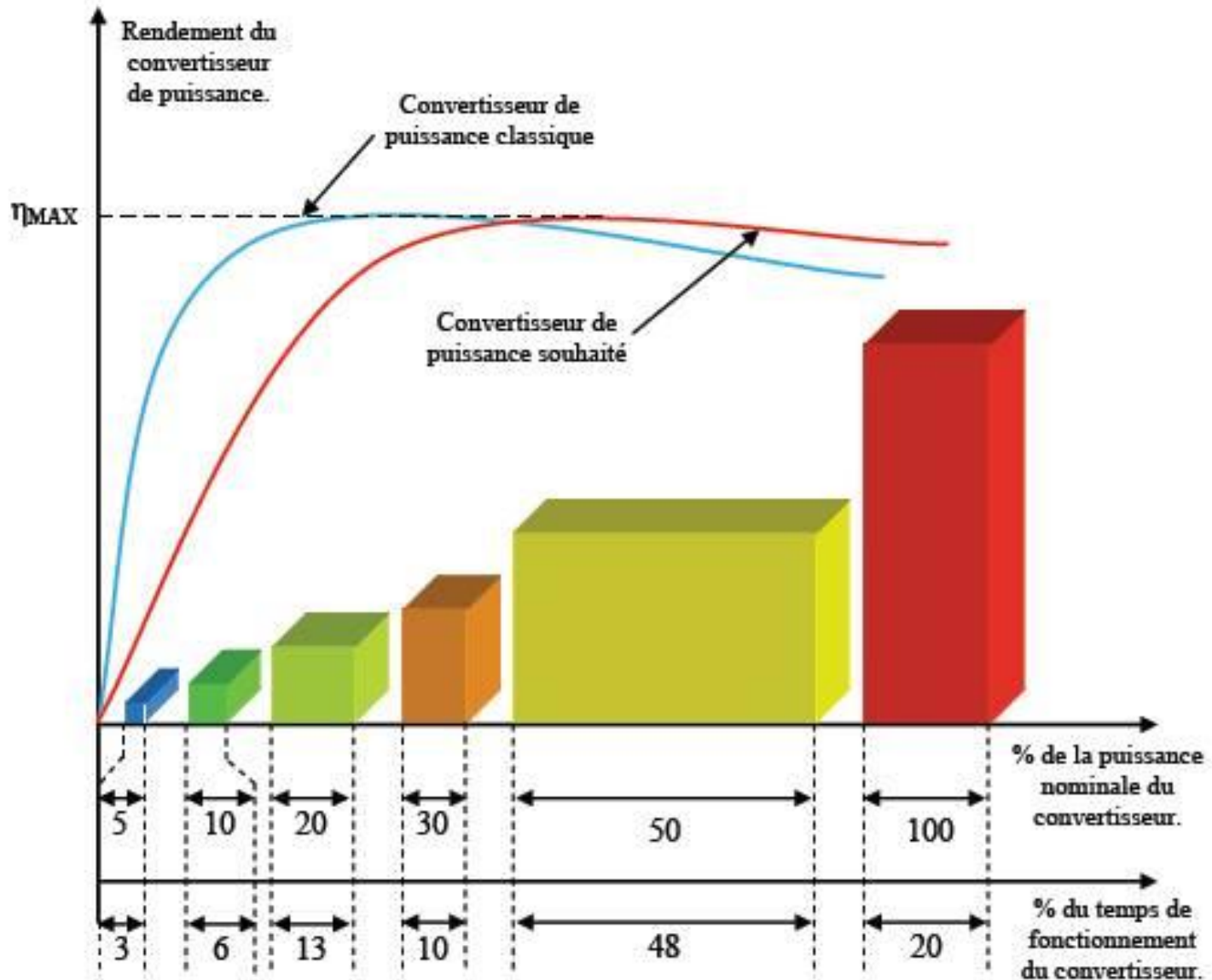
INCLINAISON \ ORIENTATION	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	0,93	0,90	0,78	0,55

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Phébus

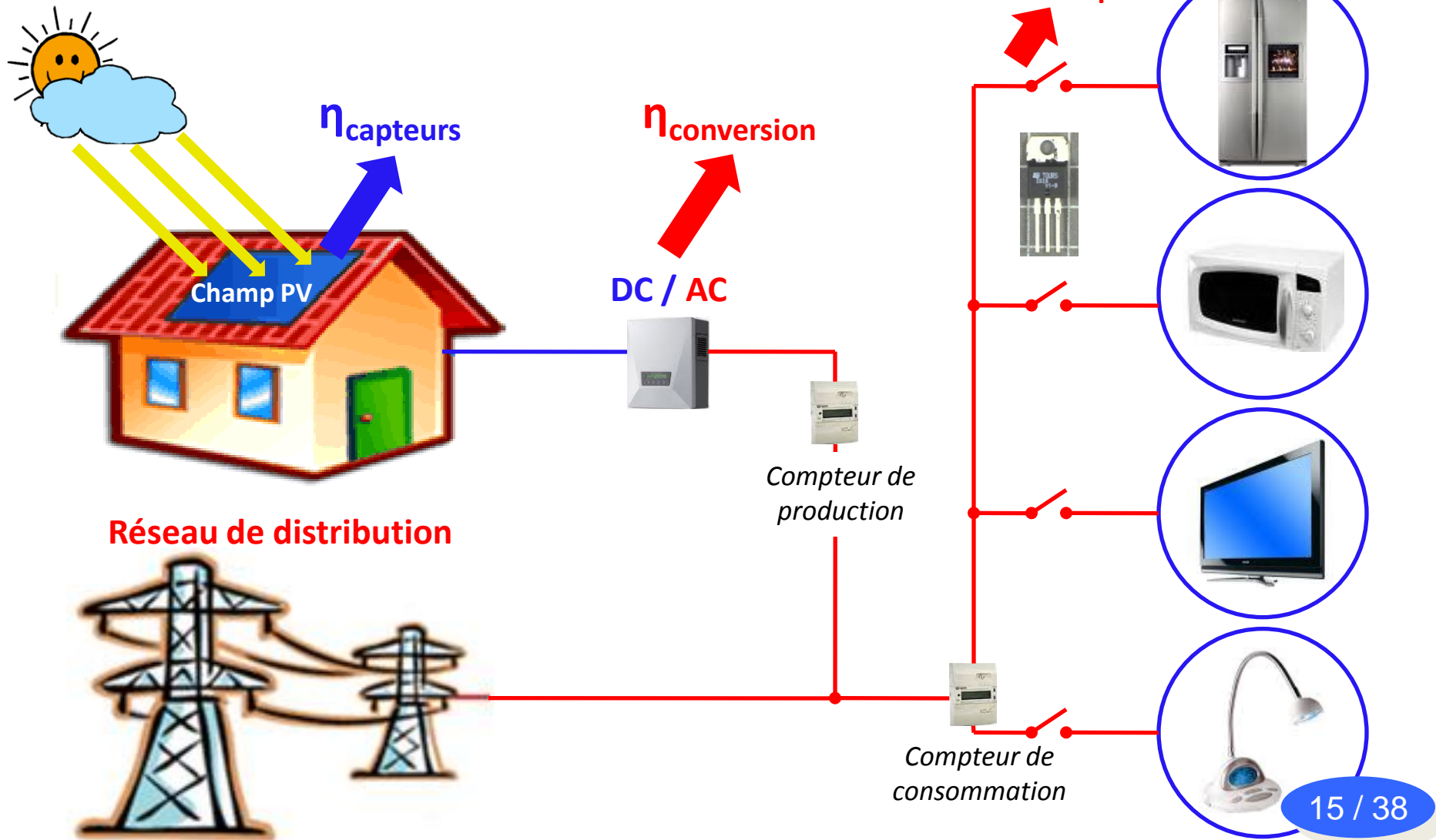
NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production.

Rendement européen



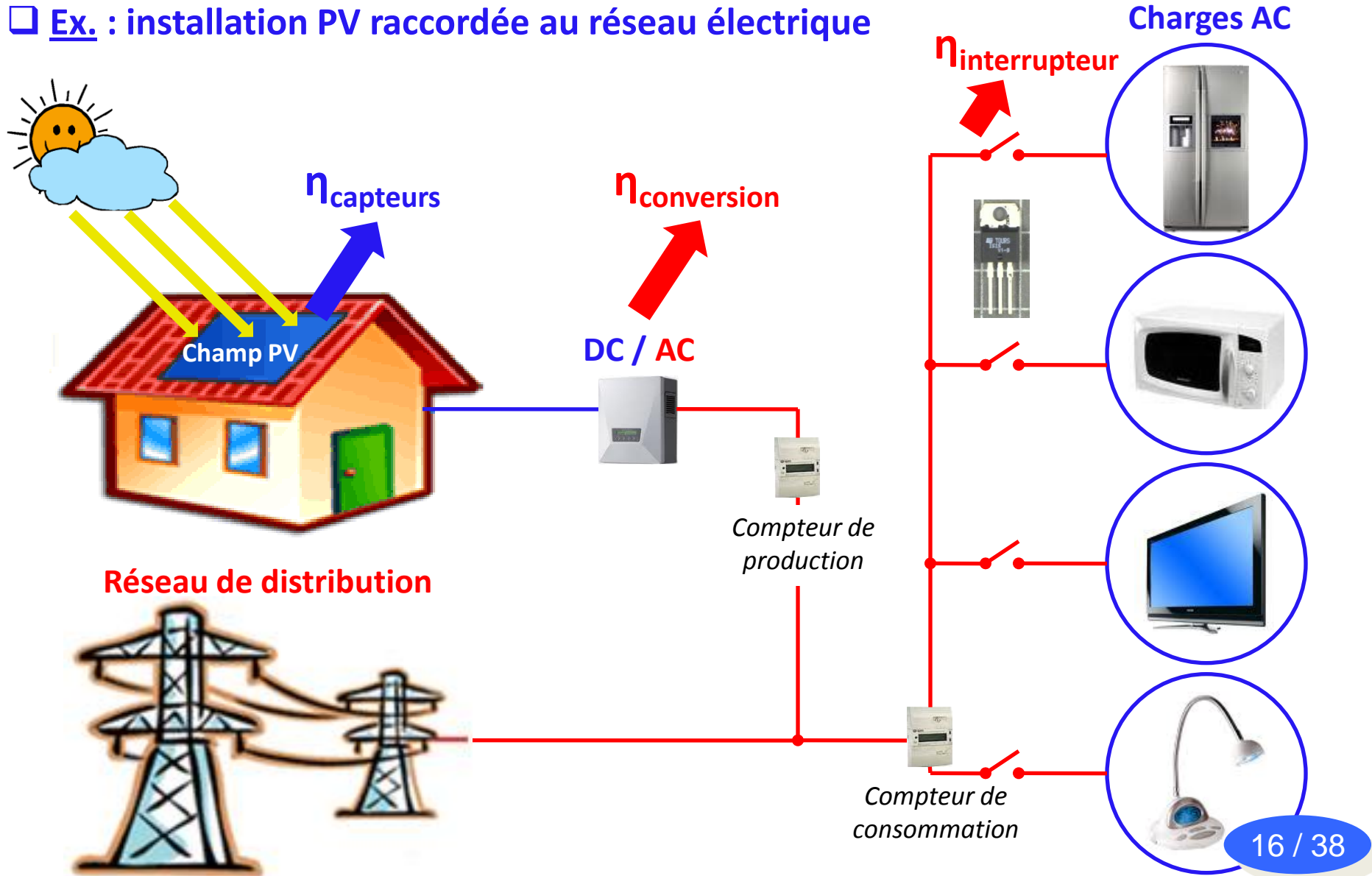
Rappels sur la chaîne de conversion PV

□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique

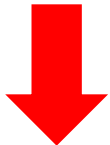
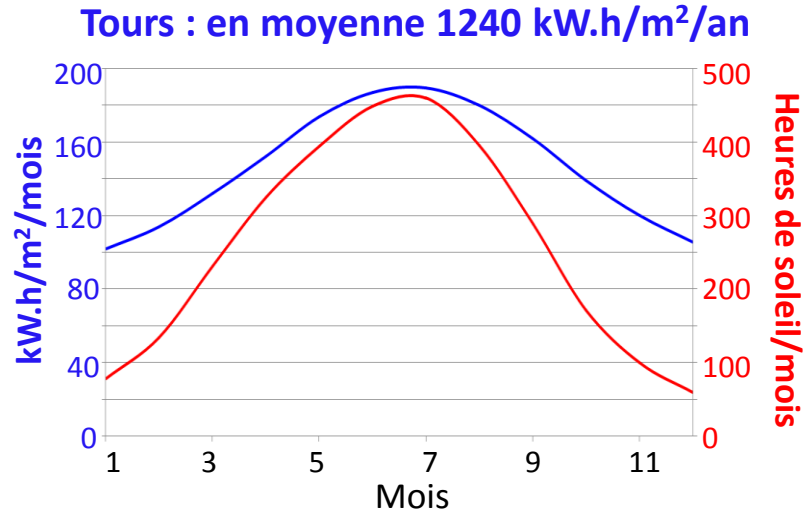
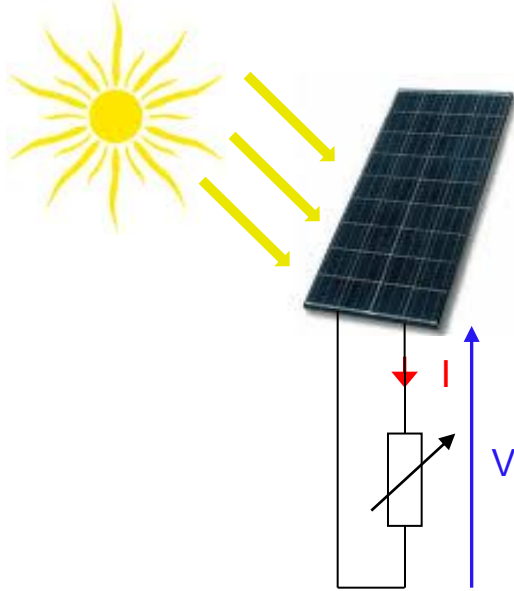


Problématiques de la chaîne de conversion PV

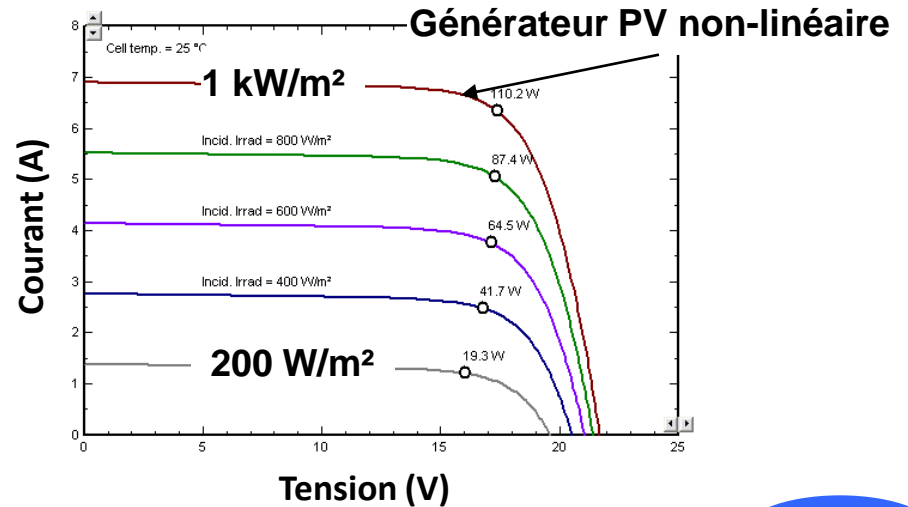
□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique



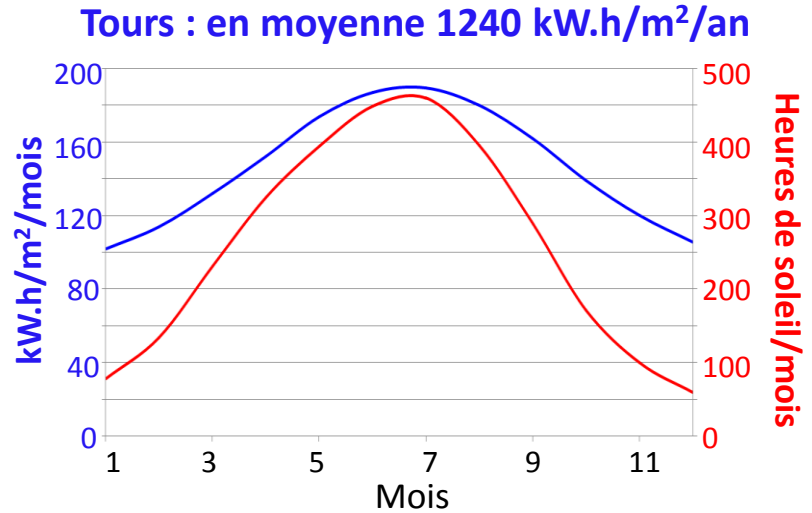
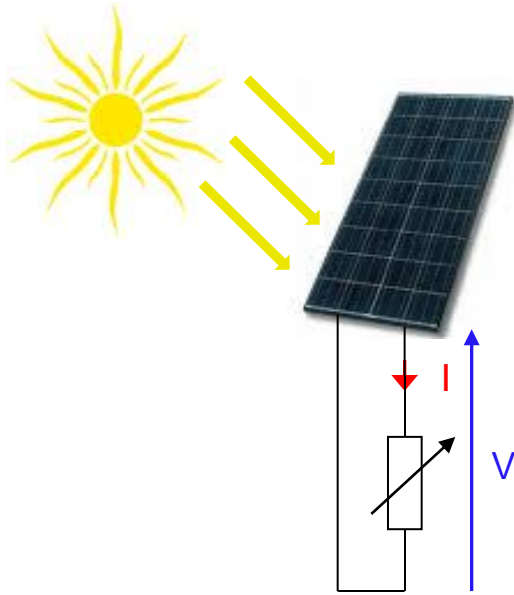
Intermittence du gisement solaire + ombrages (1/2)



« I » proportionnel à l'éclairement

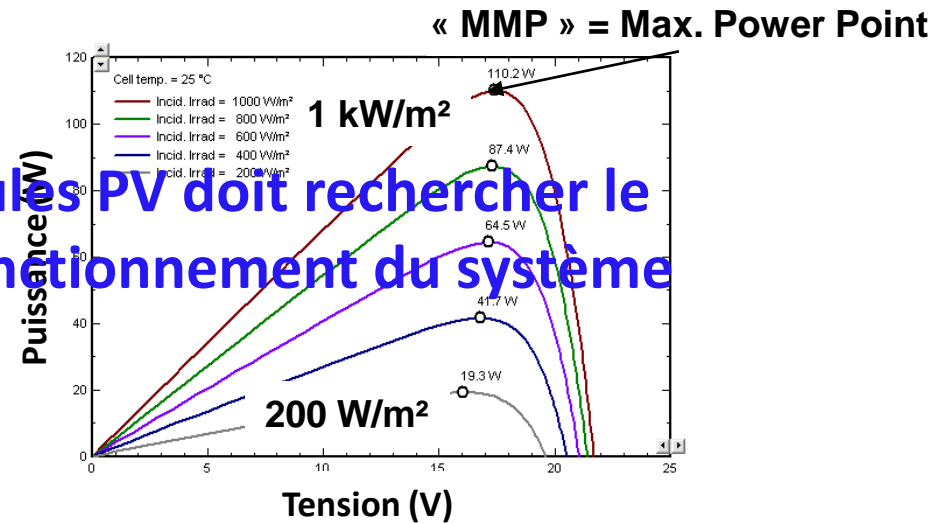


Intermittence du gisement solaire + ombrages (2/2)



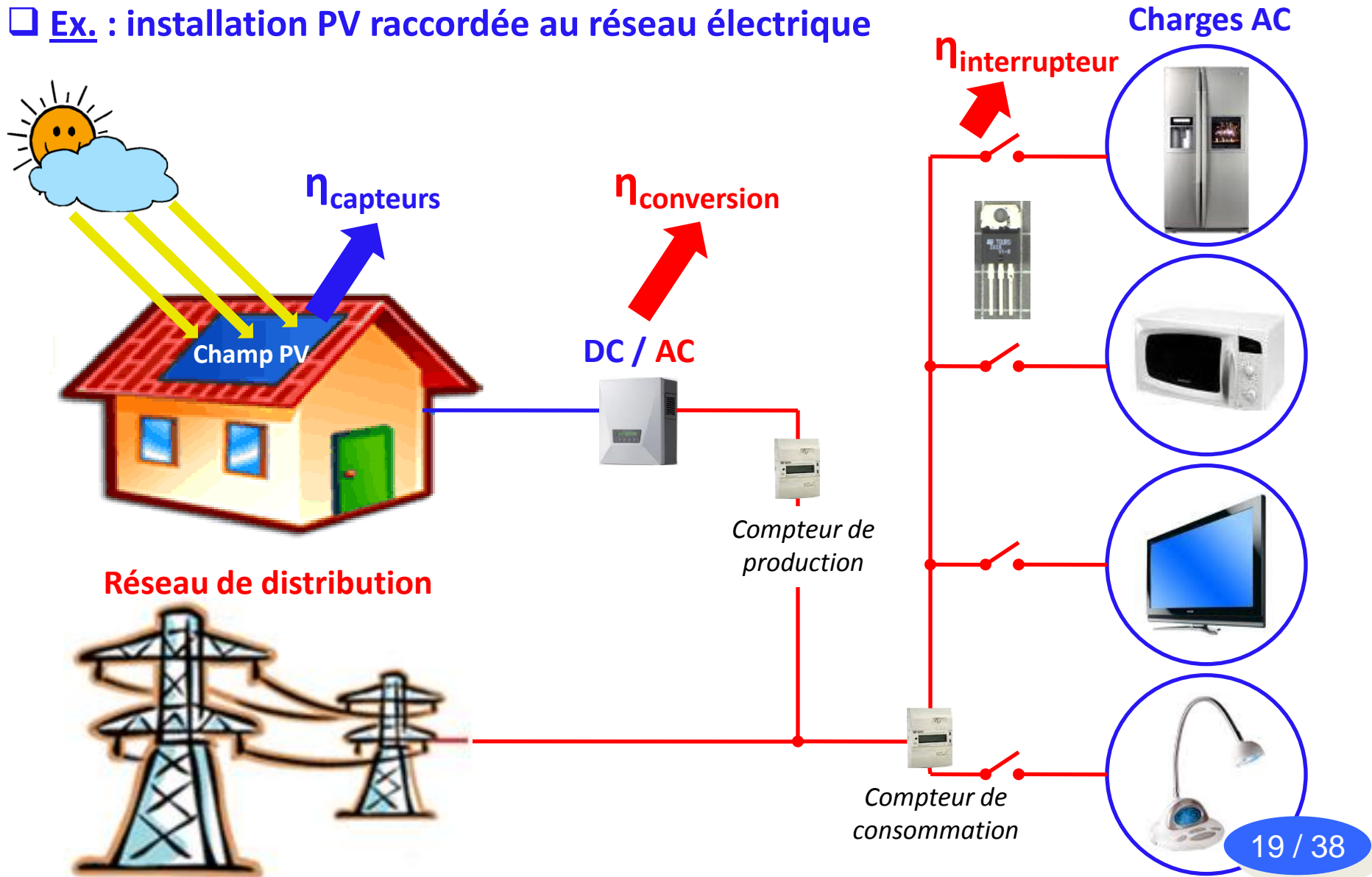
$P = V \times I$ dépend de l'impédance de la charge

La charge des modules PV doit rechercher le meilleur point de fonctionnement du système

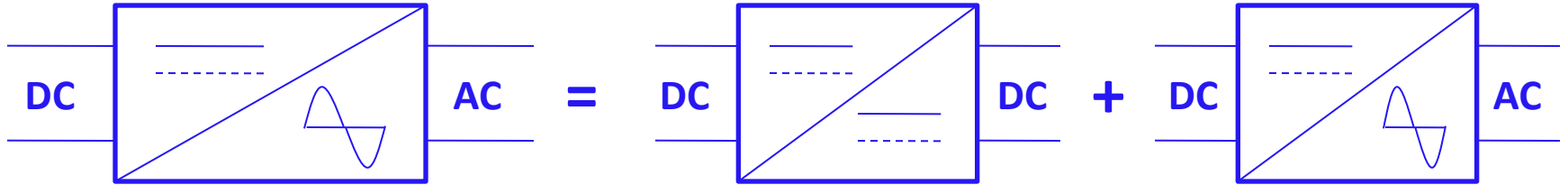


Problématiques de la chaîne de conversion PV

□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique

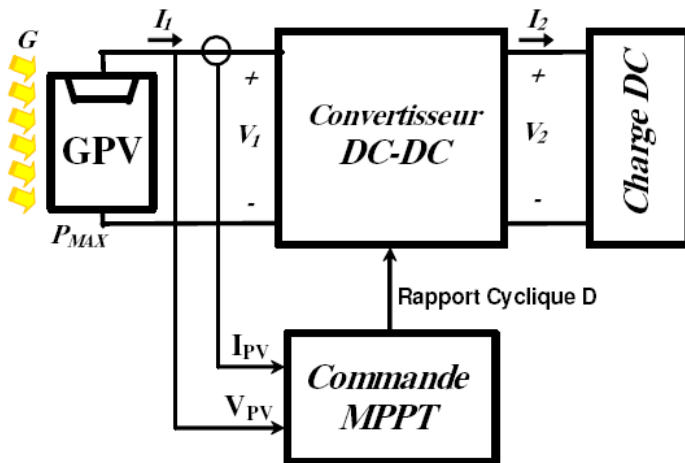


Conversion DC-AC (1/5)

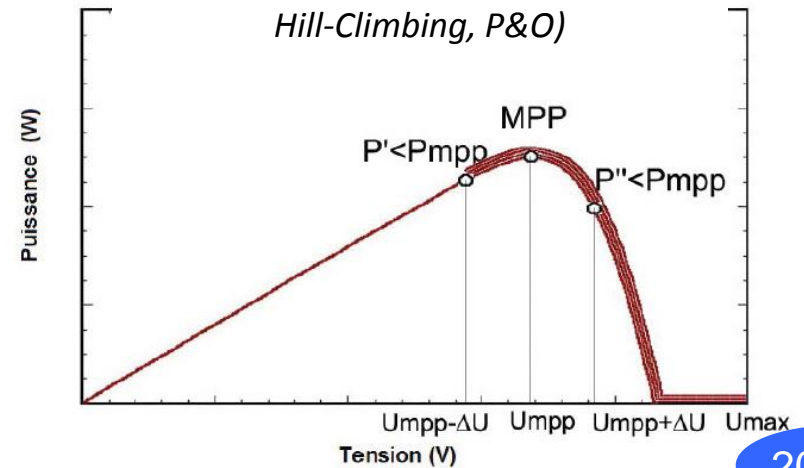


Étage d'adaptation :

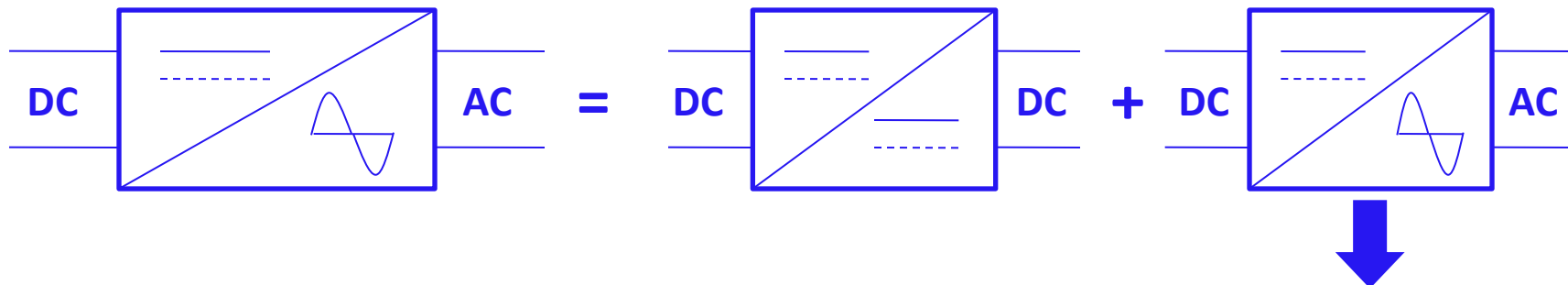
- Élévation / abaissement de la tension
- Suivi « MPP »



Exemple d'algorithme MPPT (méthodes Hill-Climbing, P&O)



Conversion DC-AC (2/5)

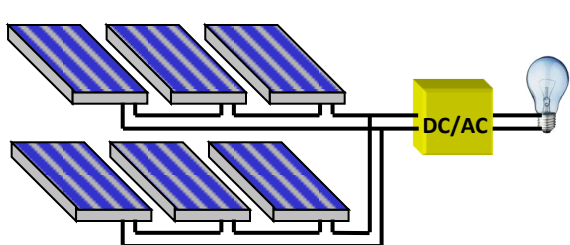


Onduleur :

- Conversion DC/AC
- Mise en forme courant AC
- Surveillance réseau
- Norme VDE 0126

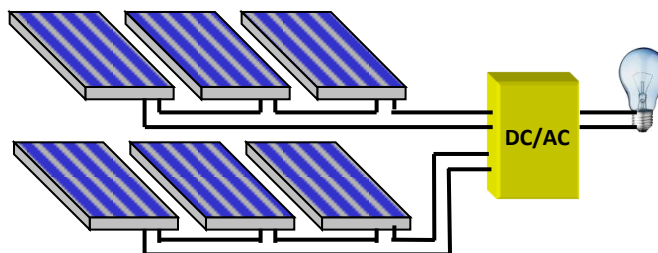
Projet labellisé par le pôle de compétitivité S2E2

☐ Différentes topologies



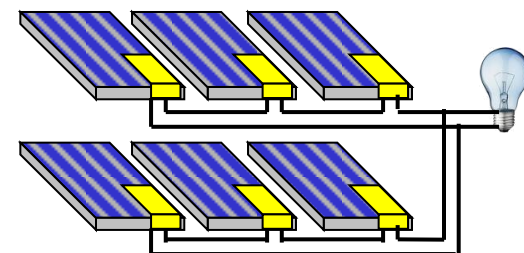
Onduleur
Central

3 kVA – 5 kVA



Onduleur multi-rangée
(multi-string)

1 kVA – 10 kVA

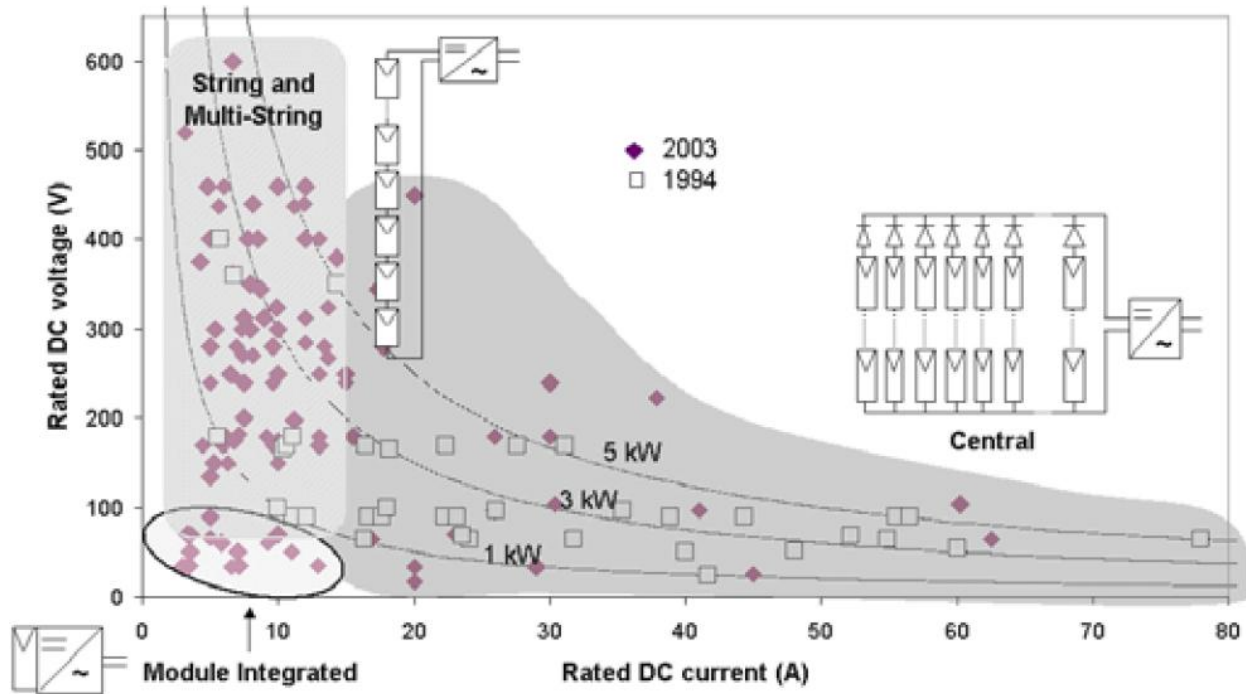


Onduleur
individuel
(integrated)

400 VA – 500 VA

Conversion DC-AC (3/5)

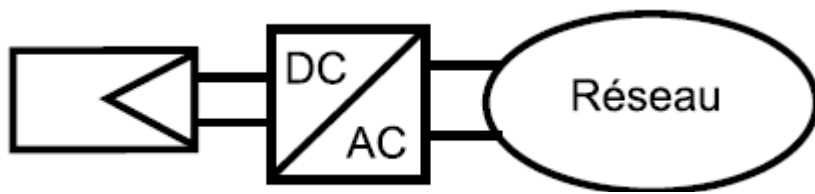
☐ Marché des onduleurs : tendances actuelles



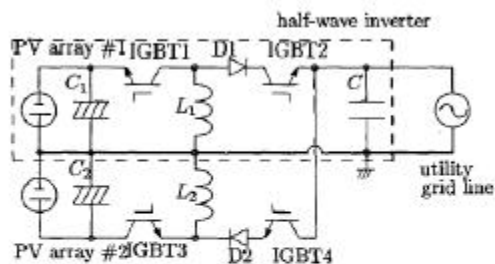
Source : *String and Module Integrated inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems. 2003*

Conversion DC-AC (3/5)

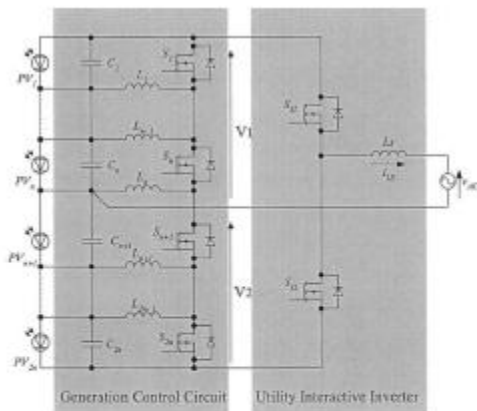
Conversion mono étage (avec ou sans isolation)



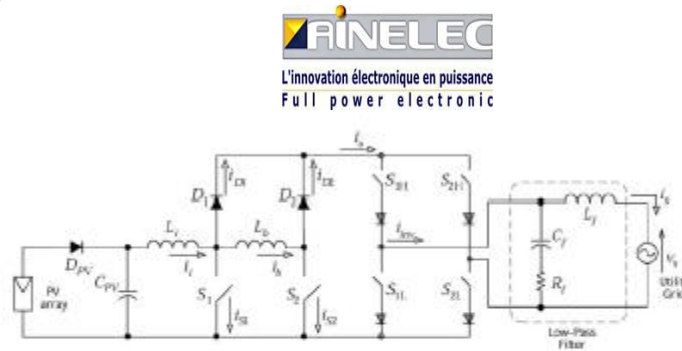
Projet labellisé par le pôle de compétitivité S2E2



buck-boost chopper circuit



GCC

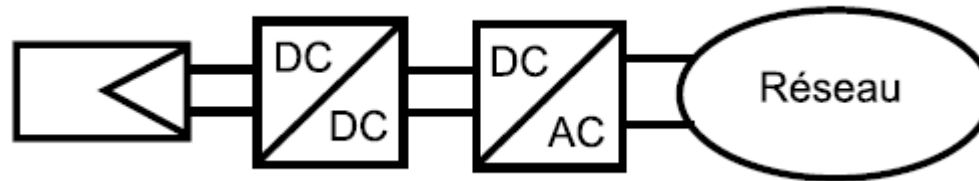


Boost Current multilevel Inverter

Trois exemples de structures utilisant des « hacheurs intégrés »

Conversion DC-AC (3/5)

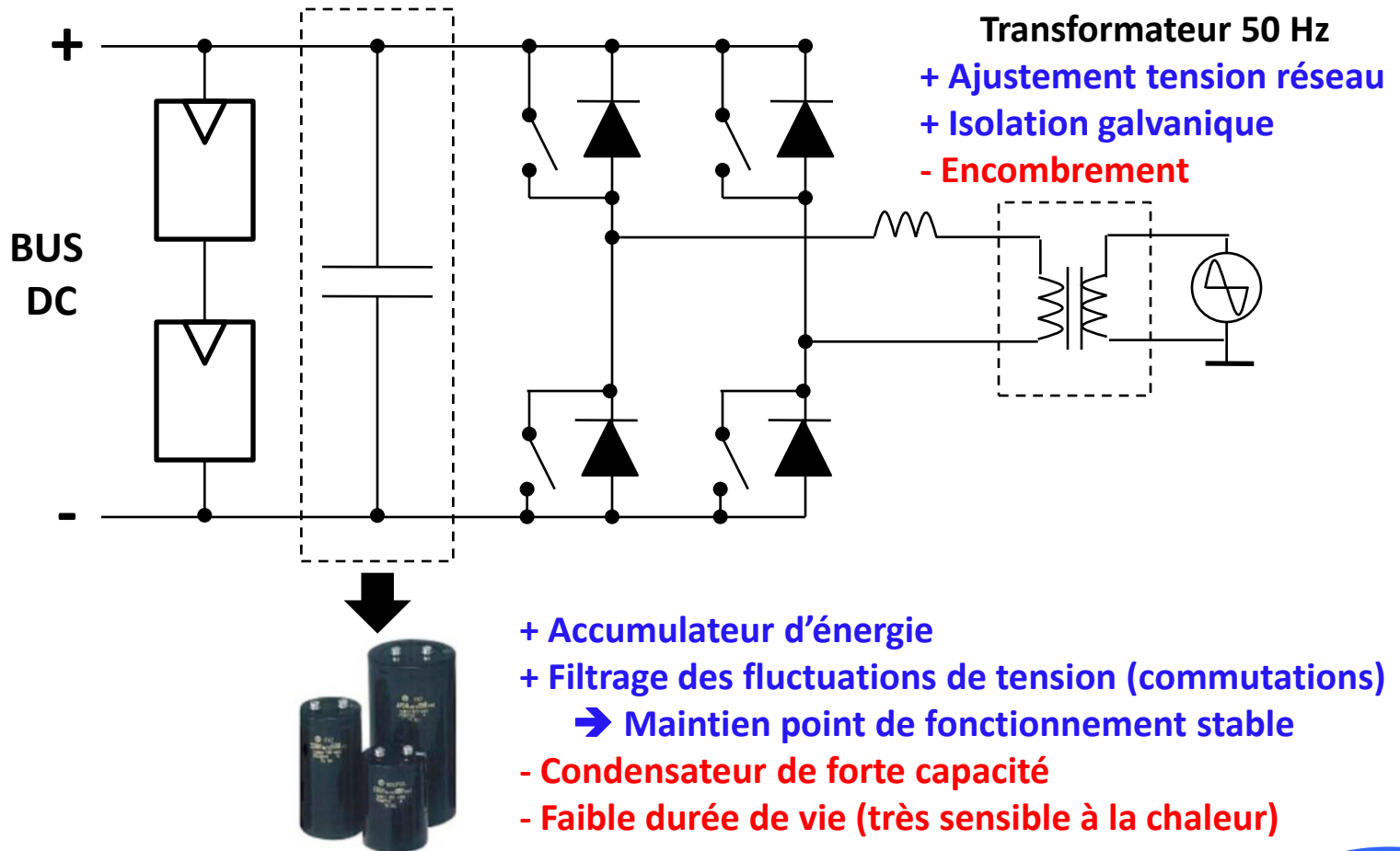
Conversion deux étages (avec ou sans isolation)



De nombreuses technologies...

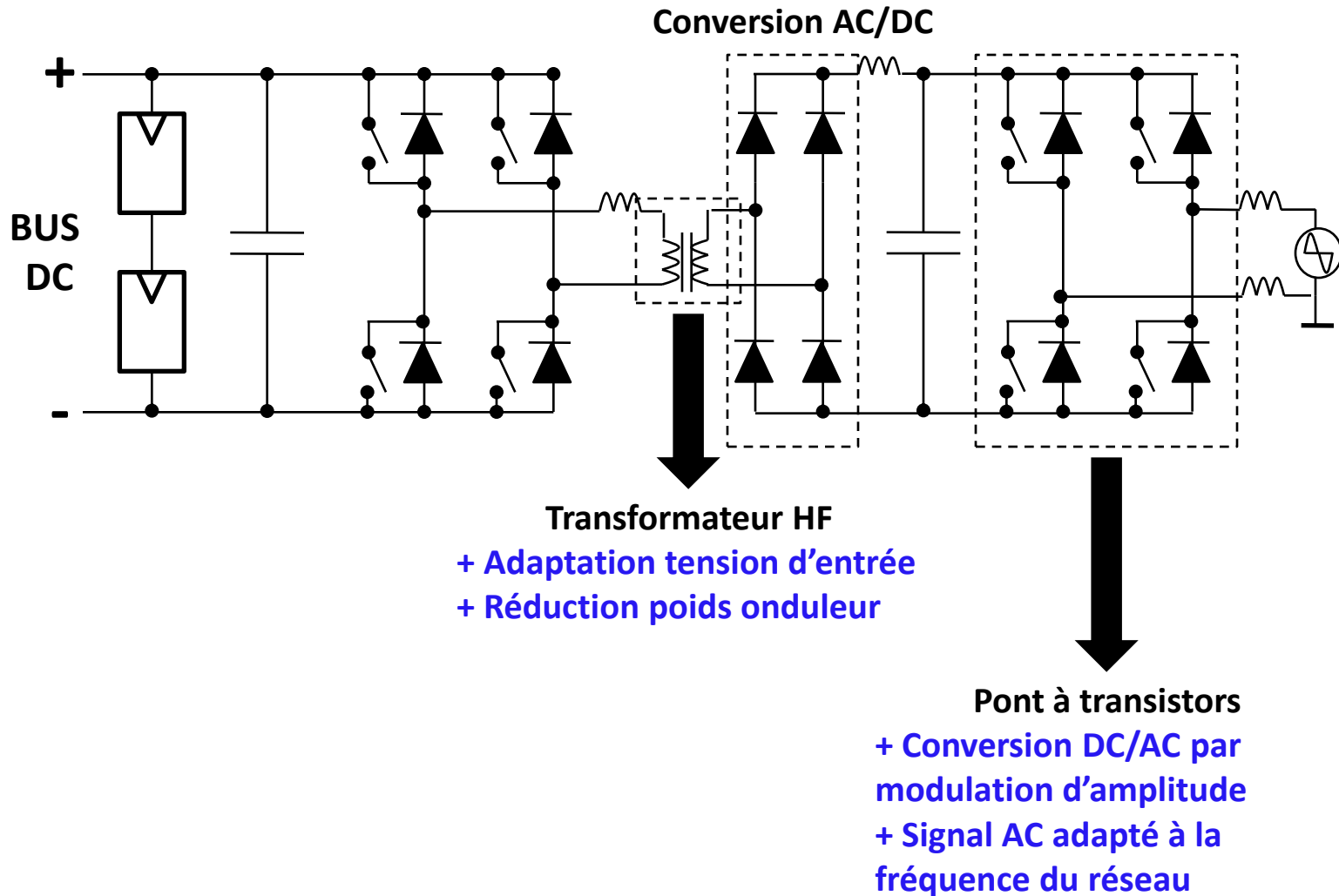
Conversion DC-AC (4/5)

□ Architectures d'onduleurs : structure simple utilisant un pont de transistors

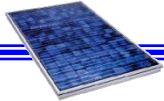


Conversion DC-AC (5/5)

□ Architectures d'onduleurs : circuit 3 étages avec transformateur HF

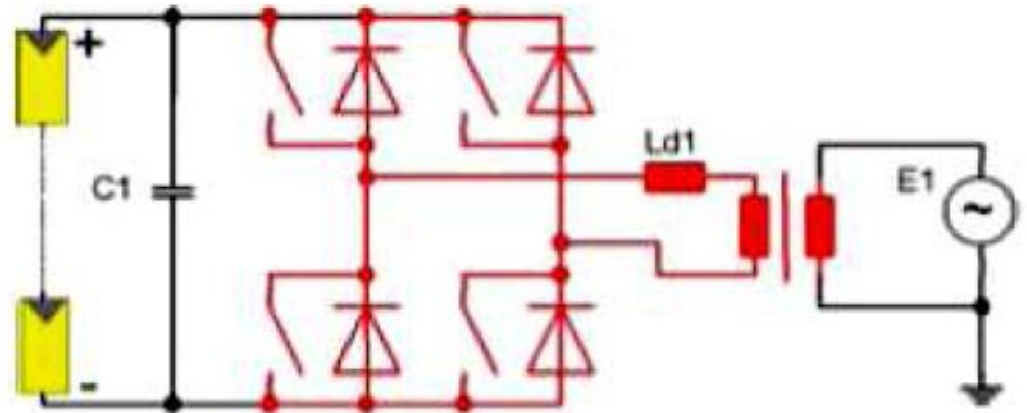


Les différentes architectures onduleurs



➤ Dépendances

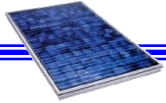
- des topologies (applications, gammes de puissance...)
- du pays d'accueil, des normes en vigueur (isolation, mise à la terre)
- du choix de l'industriel (rapport qualité/coût...)
- Les principaux onduleurs monophasés (toutes applications confondues)



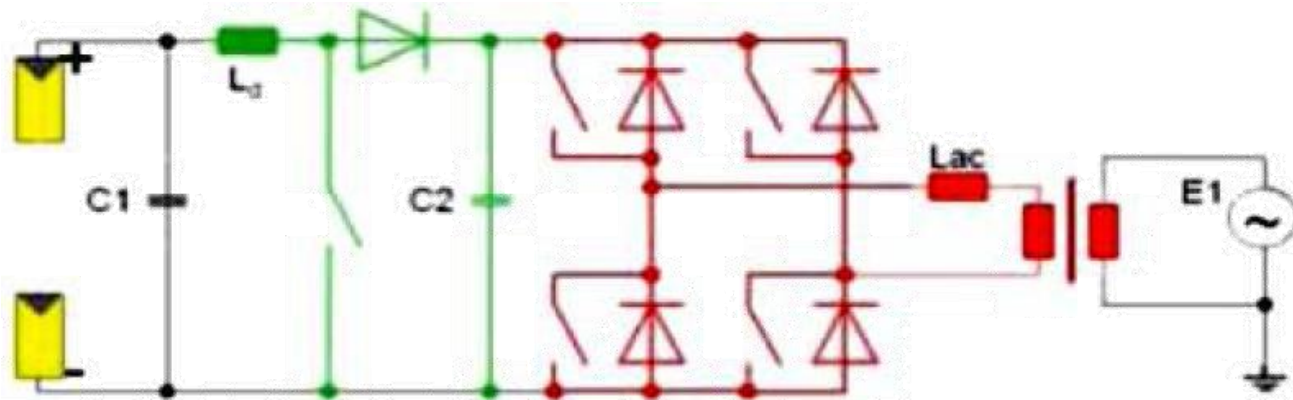
➤ Pont tout transistor

- +: simple, Is sinus 50Hz
- -: transformateur BF, condensateur de forte valeur (durée de vie limitée)

Les différentes architectures onduleurs

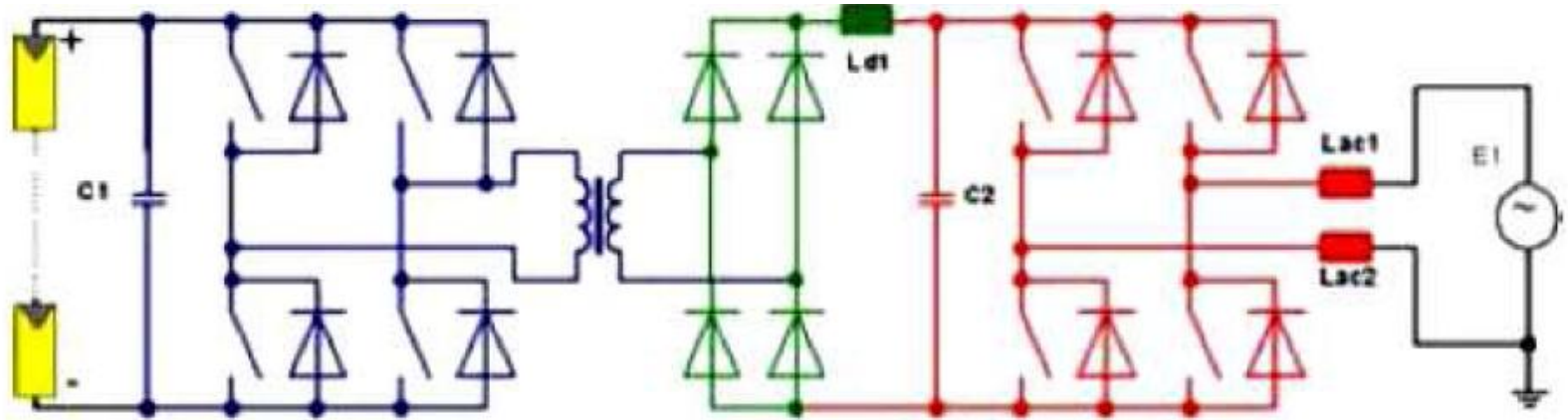
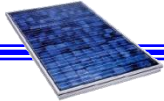


- Pont tout transistor + Boost (Pour l'intégré)
- +: gamme $V_e \uparrow$, Is sinus 50Hz, Mise à la terre (MALT)
- -: transformateur BF



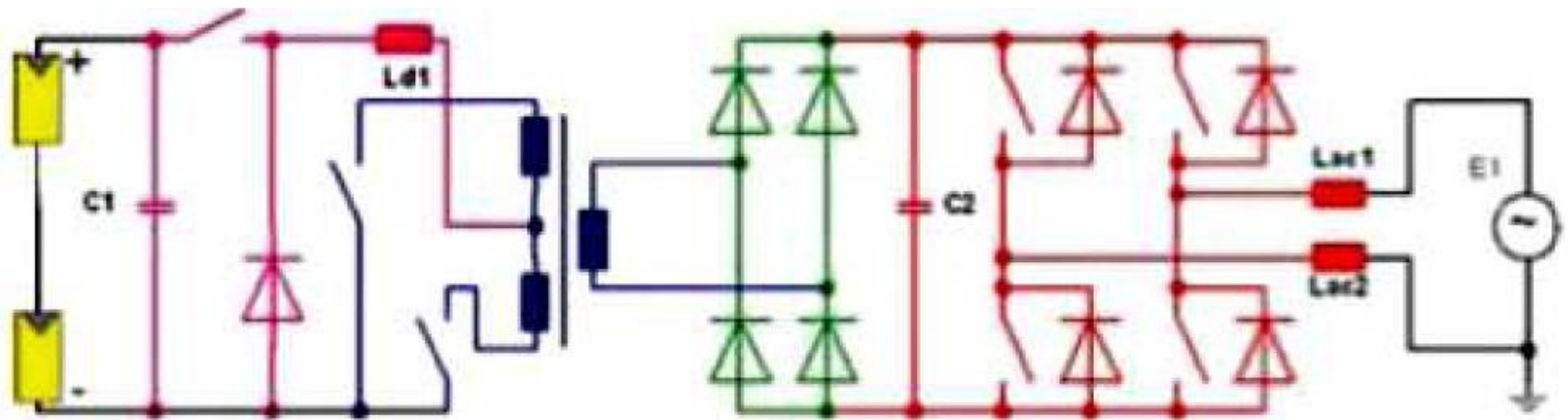
- Circuit 3 étages + transfo HF
- +: gamme $V_e \uparrow$, Is sinus 50Hz, Transfo. HF (volume \downarrow), MALT

Les différentes architectures onduleurs



➤ Circuit 4 étages + Push-Pull (ex: Soladin 120 $\eta=95,4\%$ 2001)

➤ +: adaptation V_e , gamme $V_e \uparrow$, MALT



Ombrage des panneaux photovoltaïques

Technologie multi string / connexion série

3 string de 3 panneaux en série

➤ 1 panneau totalement à l'ombre

- ✓ Courant string $I_{pVS} = 0,8 \text{ A}$
- ✓ Tension string $U_{pVS} = 3 \times 25 = 75 \text{ W}$
- ✓ Puissance string ombragé $P_{\max} = 75 \times 0,8 = 60 \text{ W}$

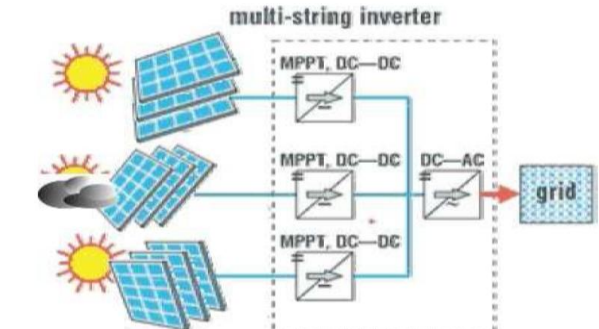


Schéma de raccordement des modules PV à un onduleur multi string

Caractéristiques du branchement

➤ Courant total généré

- ✓ $I_{\text{total}} = \text{Somme courant de chaque string}$

➤ Tension totale produite

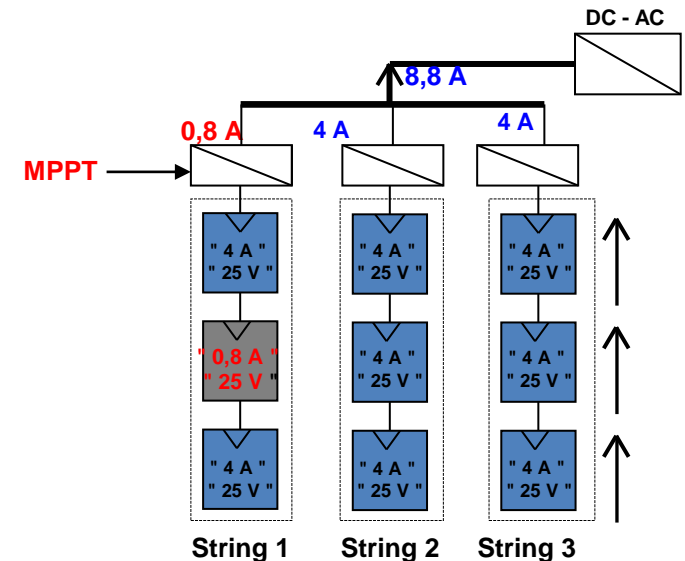
- ✓ $U_{\text{total}} = \text{Somme des tension des PV en série}$

➤ Puissance du module P_{\max}

- ✓ $P = U \times I = 75 \text{ V} \times 8,8 \text{ A}$



Puissance totale de 660 W



Ombrage des panneaux photovoltaïques

Technologie multi string / Connexion parallèle

□ 3 string de 3 panneaux en parallèle

➤ 1 PV à l'ombre et autres PV éclairés

- ✓ Courant panneau à l'ombre $I_{PV_OMBRE} = 0,8 \text{ A}$
- ✓ Courant du string $I_{PVS} = 8,8 \text{ A}$
- ✓ Tension du string $U_{PVS} = 25 \text{ V}$
- ✓ Puissance du string à l'ombre $P_{max} = 25 \times 8,8 = 220 \text{ W}$

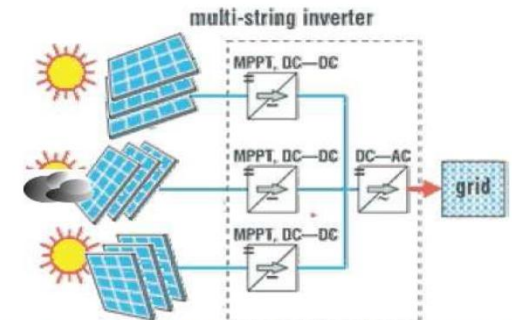


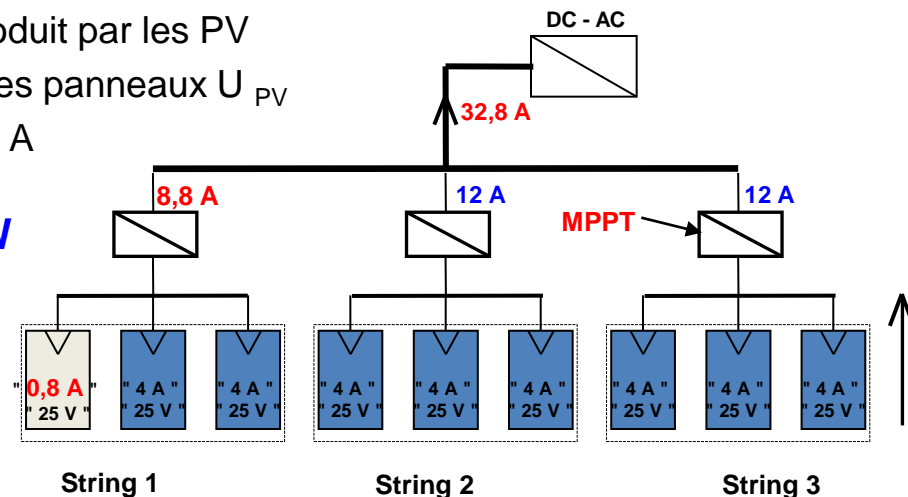
Schéma de raccordement des modules PV à un onduleur multi string

□ Caractéristiques du branchement

- ✓ Courant total = somme des courants produit par les PV
- ✓ Tension totale = Somme des tensions des panneaux U_{PV}
- ✓ Puissance totale $P = U \times I = 25 \text{ V} \times 32,8 \text{ A}$



Puissance totale de 820 W



Les panneaux doivent avoir la même tension

Ombrage des panneaux photovoltaïques

Technologie micro – inverter

□ Illustration sur 9 PV

➤ Conditions maximales d'ensoleillement

- ✓ Courant $I_{PV} = 4 \text{ A}$
- ✓ Tension $U_{PV} = 25 \text{ V}$
- ✓ Puissance $P_{\text{max}} = 100 \text{ W}$

➤ Effets d'ombrage

- ✓ Courant $I_{PV} = 0,8 \text{ A}$
- ✓ Tension $U_{PV} = 25 \text{ V}$
- ✓ Puissance $P_{\text{max}} = 20 \text{ W}$

□ Technologie μ – inverter

➤ PV connectés à un micro – onduleur

- ✓ Dispositif MPPT intégré au μ -inverter

➤ 1 PV à l'ombre et les autres éclairés

- ✓ Courant PV $I_{PV} = 0,8 \text{ A}$
- ✓ Tension $U_{PV} = 25 \text{ V}$
- ✓ Puissance du module $P_{\text{max}} = 25 \times 0,8 + 2 \times 100 = 220 \text{ W}$

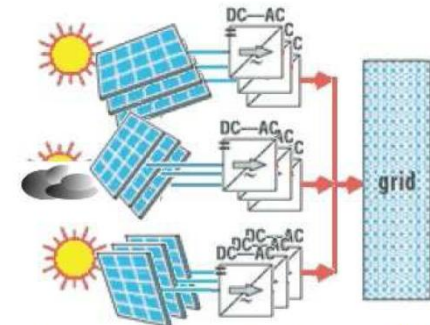


Schéma de raccordement des modules PV avec CEPIM intégré aux modules

Influence de l'ombrage sur l'efficacité énergétique des PV

1^{er} cas: Système à onduleur multi string

3 string de 3 PV en série

- 1 panneau à l'ombre
 - ✓ Puissance du string $P = 20 \times 3 = 60 \text{ W}$



Puissance totale de 660 W

3 string de 3 en parallèle PV

- 1 panneau à l'ombre
 - ✓ Puissance du string vaut $P = 20 + 2 \times 100 = 220 \text{ W}$



Puissance totale de 820 W

2^{ème} cas: Système à micro – inverter

- 1 panneau à l'ombre
 - ✓ Puissance du module vaut $P = 20 + 2 \times 100 = 220 \text{ W}$



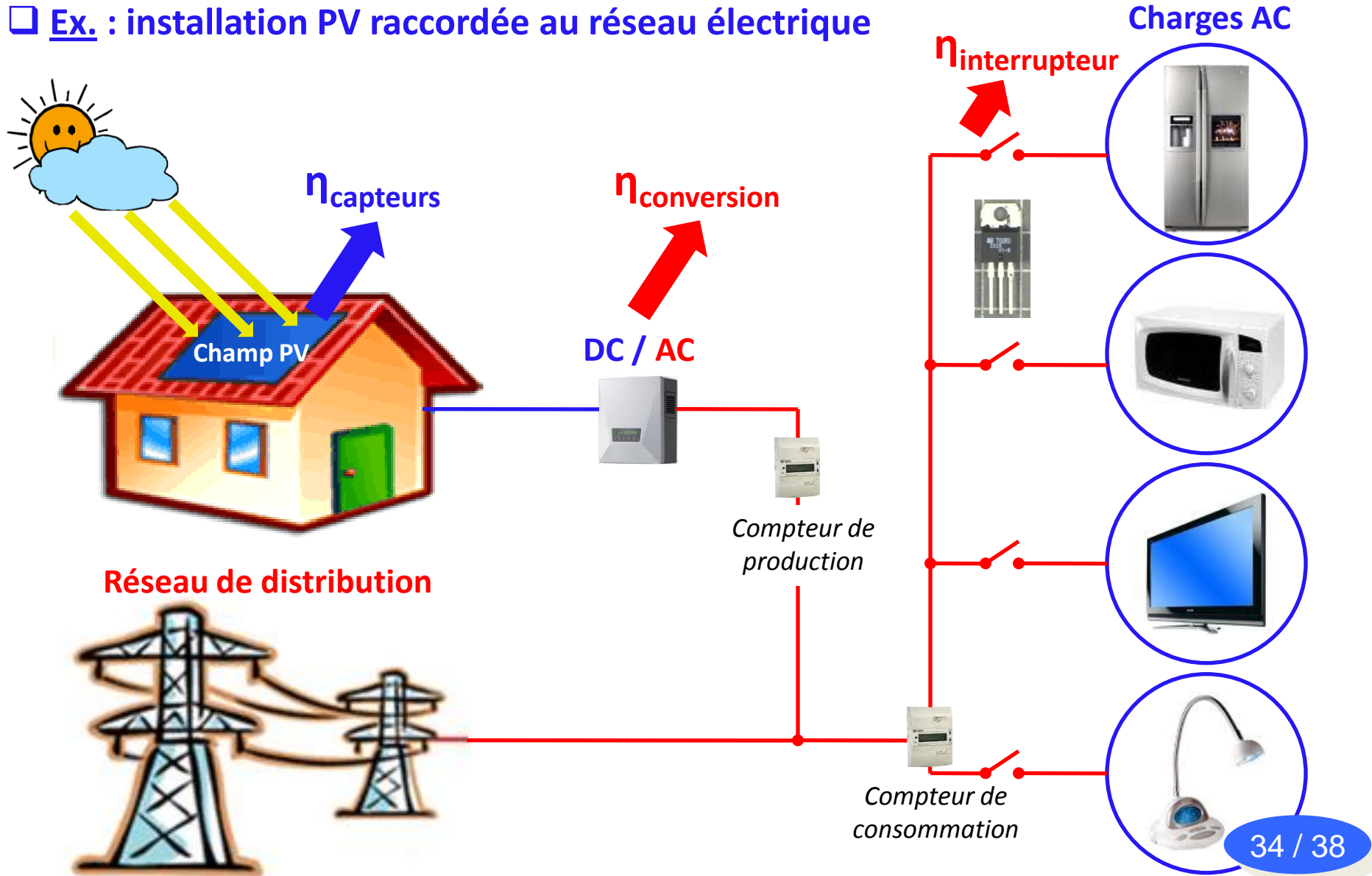
Puissance totale de 820 W

27 % de pertes

9 % de pertes

Problématiques de la chaîne de conversion PV

□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique



Nouvelles topologies d'interrupteurs AC (1/2)

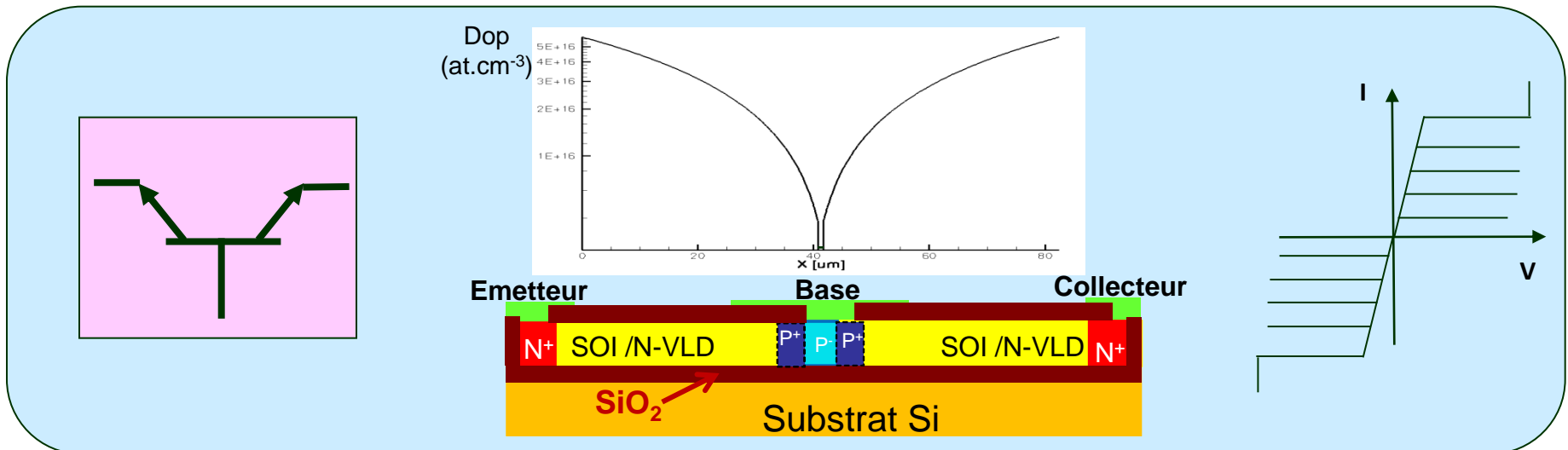
Optimisation $\eta_{\text{interrupteur}}$

• Contraintes sur l'interrupteur :

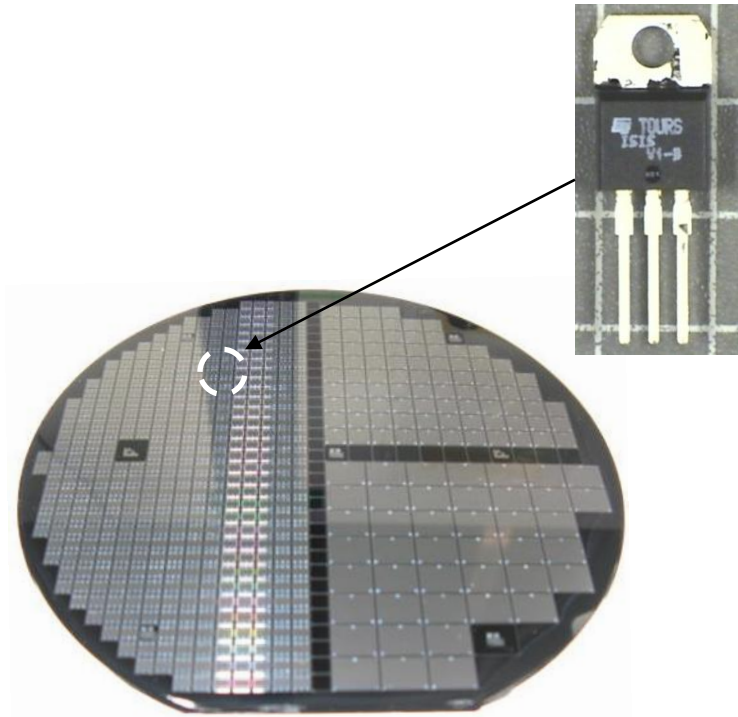
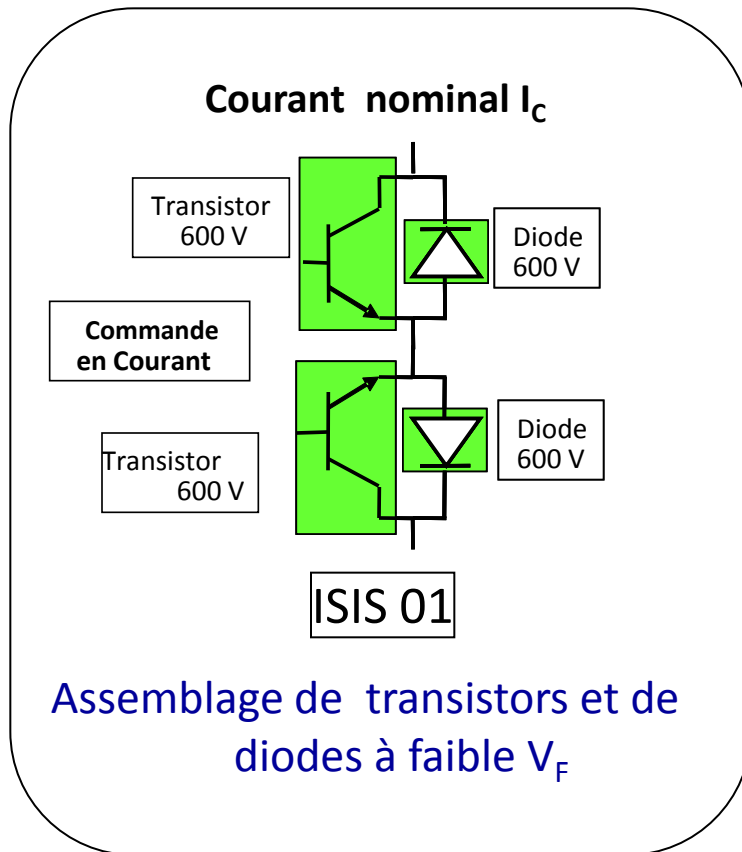
- ✓ Bidirectionnalité Tension / Courant
- ✓ Commandabilité (ouverture et fermeture)
- ✓ Tenue en tension $V_{BR} = 600 \text{ V}$
- ✓ Puissance dissipée max. = $3,5 \text{ W @ } 4,5 \text{ A} \rightarrow \text{Pertes} = 0,8 \text{ W/A}$



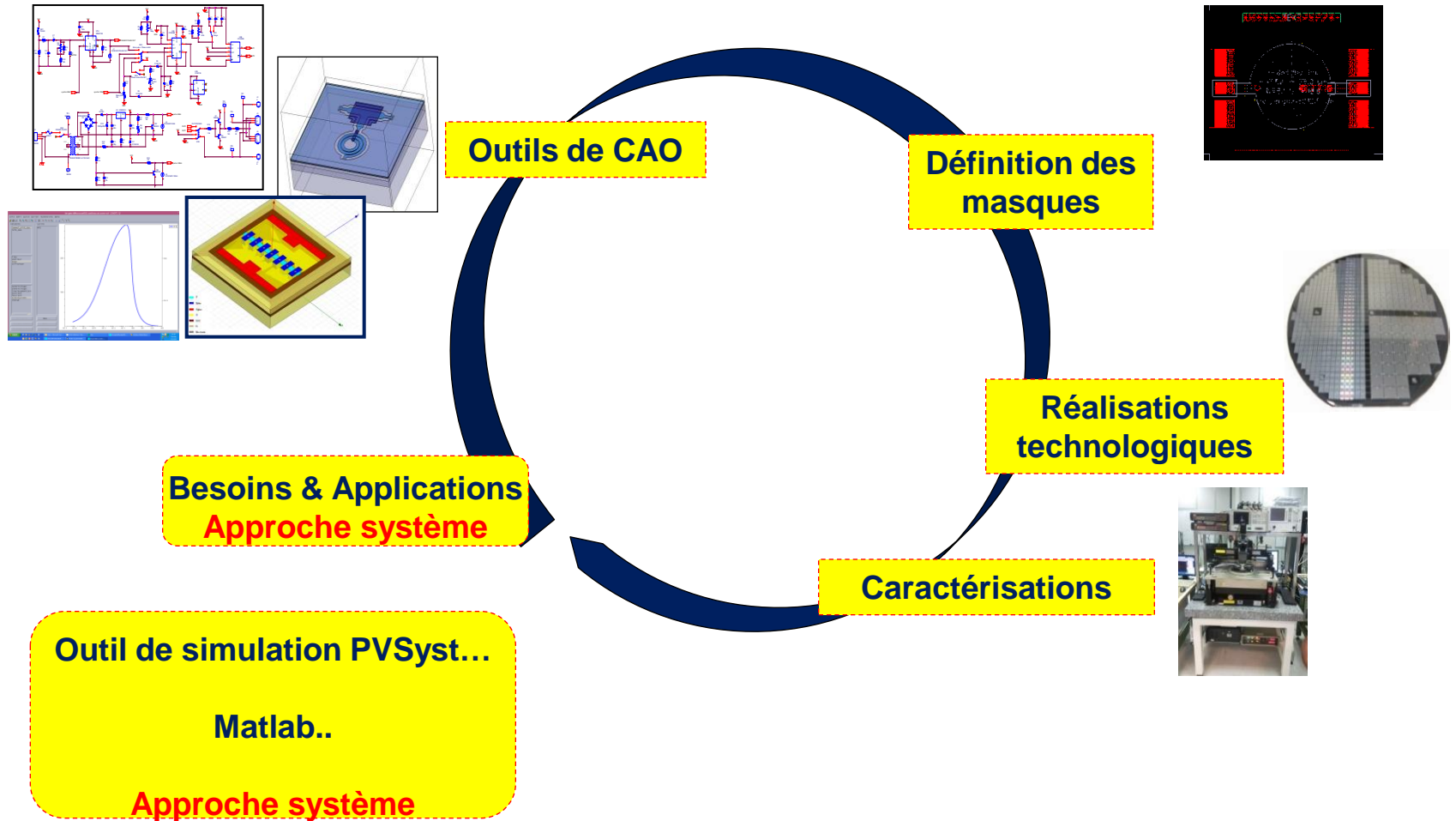
Nécessité de développer de nouvelles briques technologiques



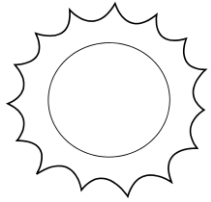
□ Approche discrète : exemple de réalisation



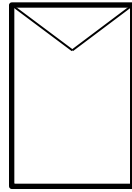
Conclusion générale



Modélisation de la production photovoltaïque

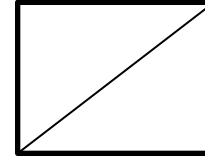


P_e



η_{PV}

Considééré fixe
(attention aux variations de
températures: $-0.4\% / ^\circ > 25^\circ C$)



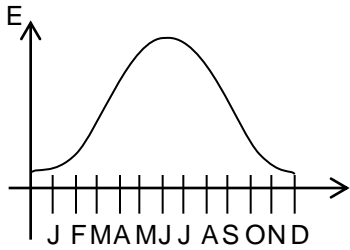
η_{conv}

Dépendant du Pt. De
fonctionnement



kWh /an

P_s



X

η_{PV}

X

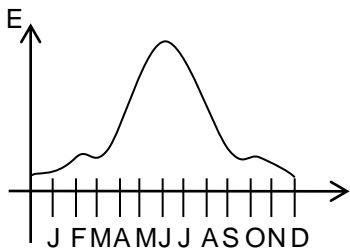
$\eta_{conv} = f(P_{PV})$

=

kWh₁ /an



Si ombrage
(important pour les
faibles élévations)



X

η_{PV}

X

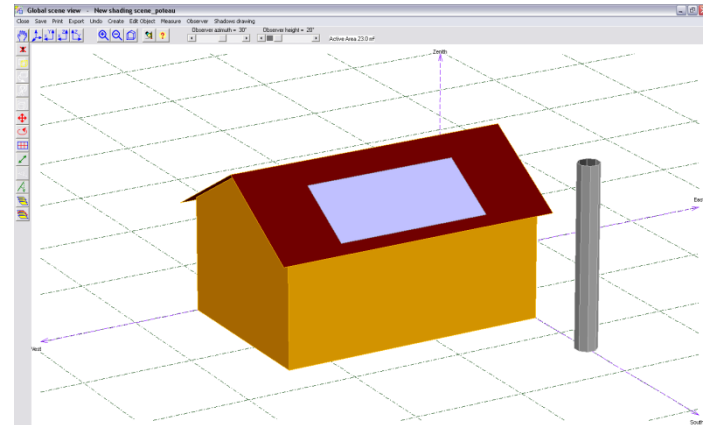
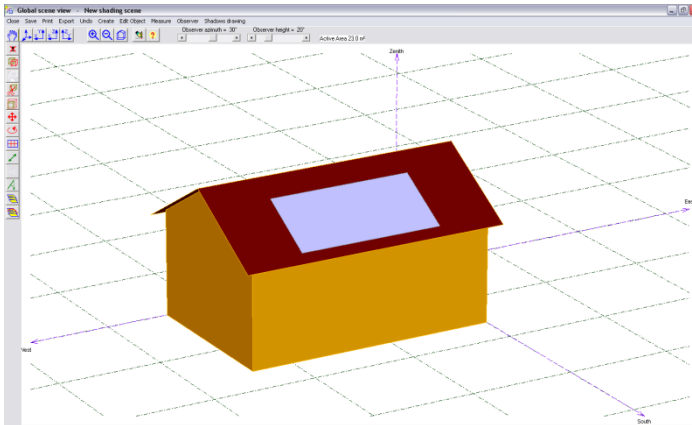
$\eta_{conv} = f(P_{PV})$

=

kWh₂ /an < kWh₁ /an

Perspectives :

- Conversion d'énergie (architecture...)
- Développement d'outils de simulation de production solaire



Attention de nombreuses approximations qui peuvent ne pas être négligeable...
Ombrage, température, vent...