



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)

- **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



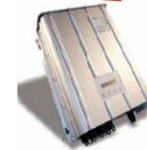
Exemple d'installation



Générateur
photovoltaïque
raccordé au réseau

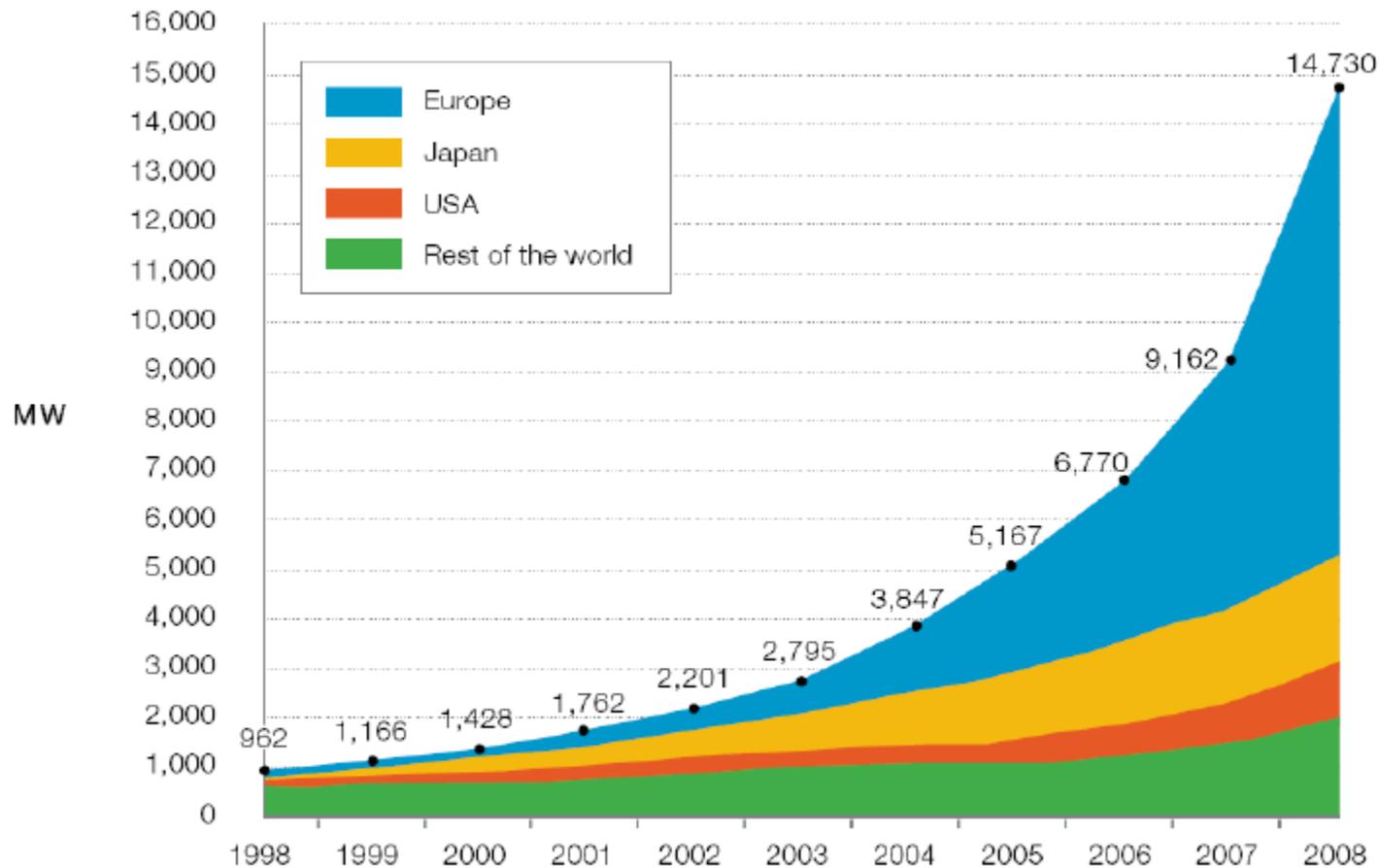


Générateur
photovoltaïque en site
isolé



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

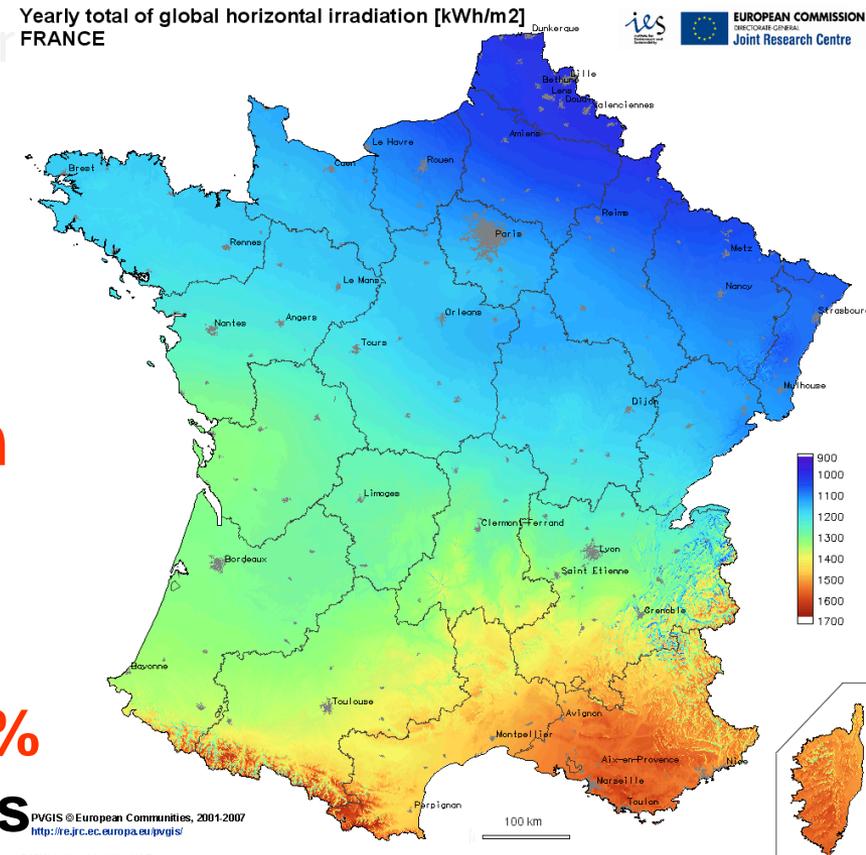
☐ Problématiques de la chaîne de conversion

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...



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

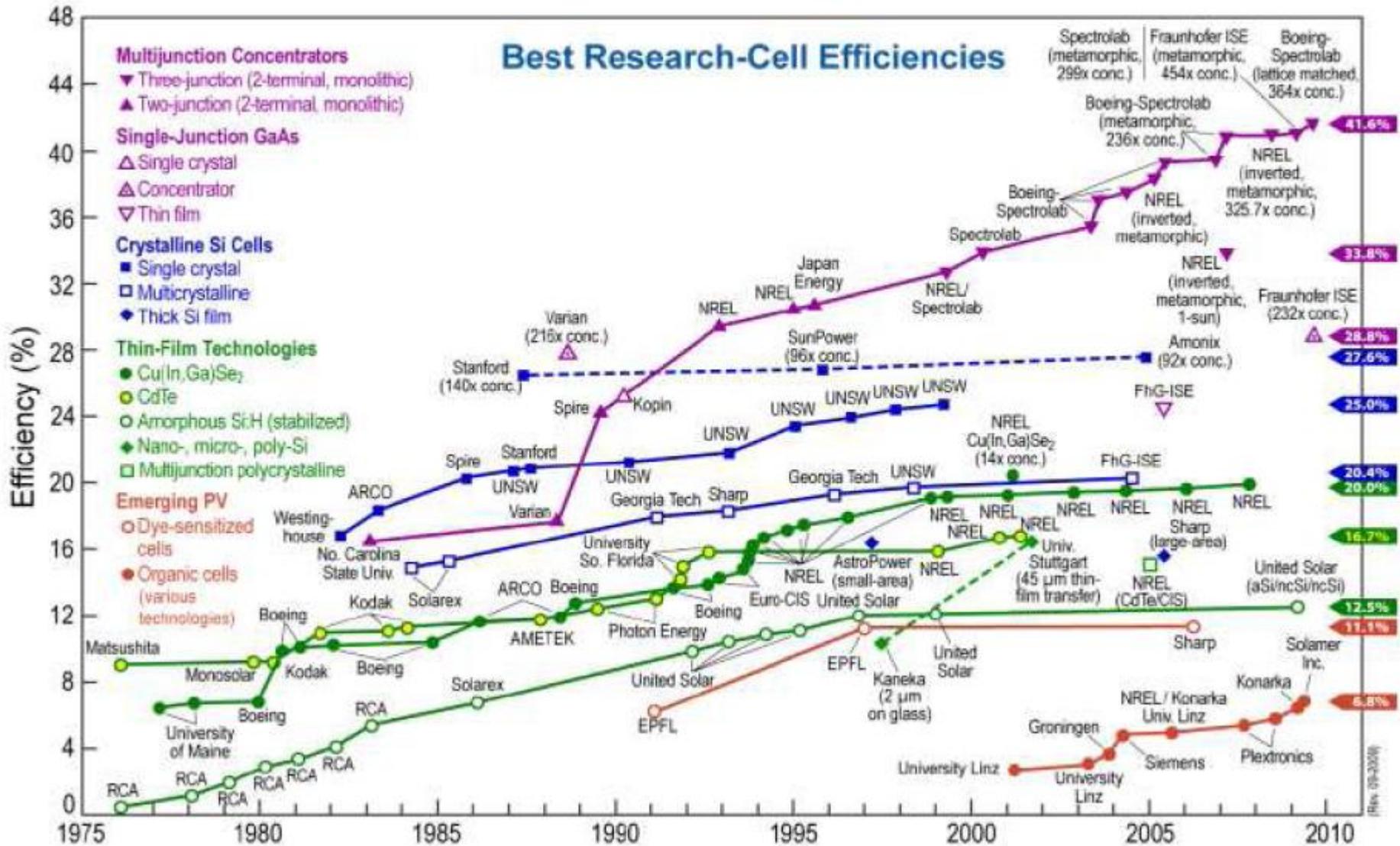
Pour une puissance de rayonnement solaire incident de 1000 W/m^2

Ce module fournit une puissance de 120 W

Son rendement est de 12%

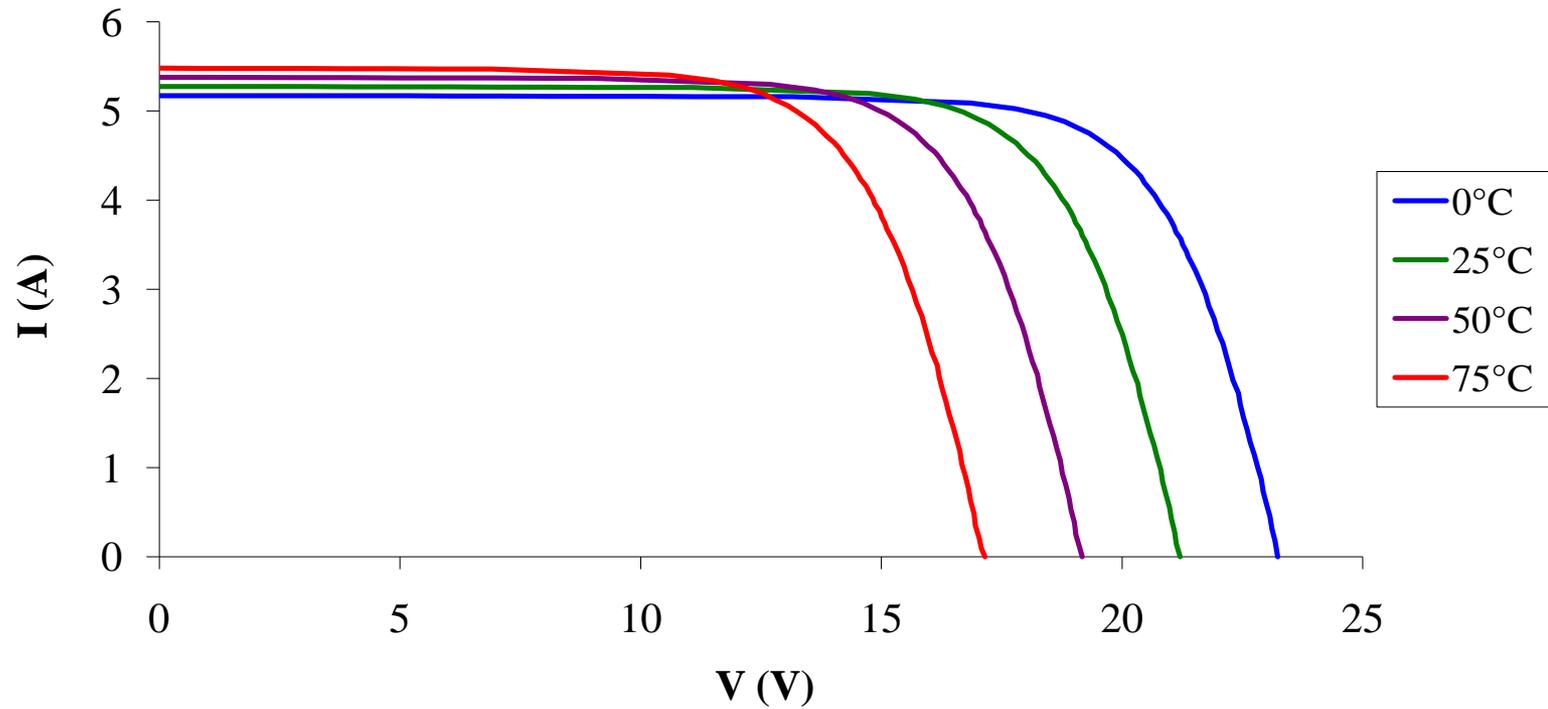
Attention aux conditions d'extrapolation...

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...

Problème d'inclinaison

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNÉS

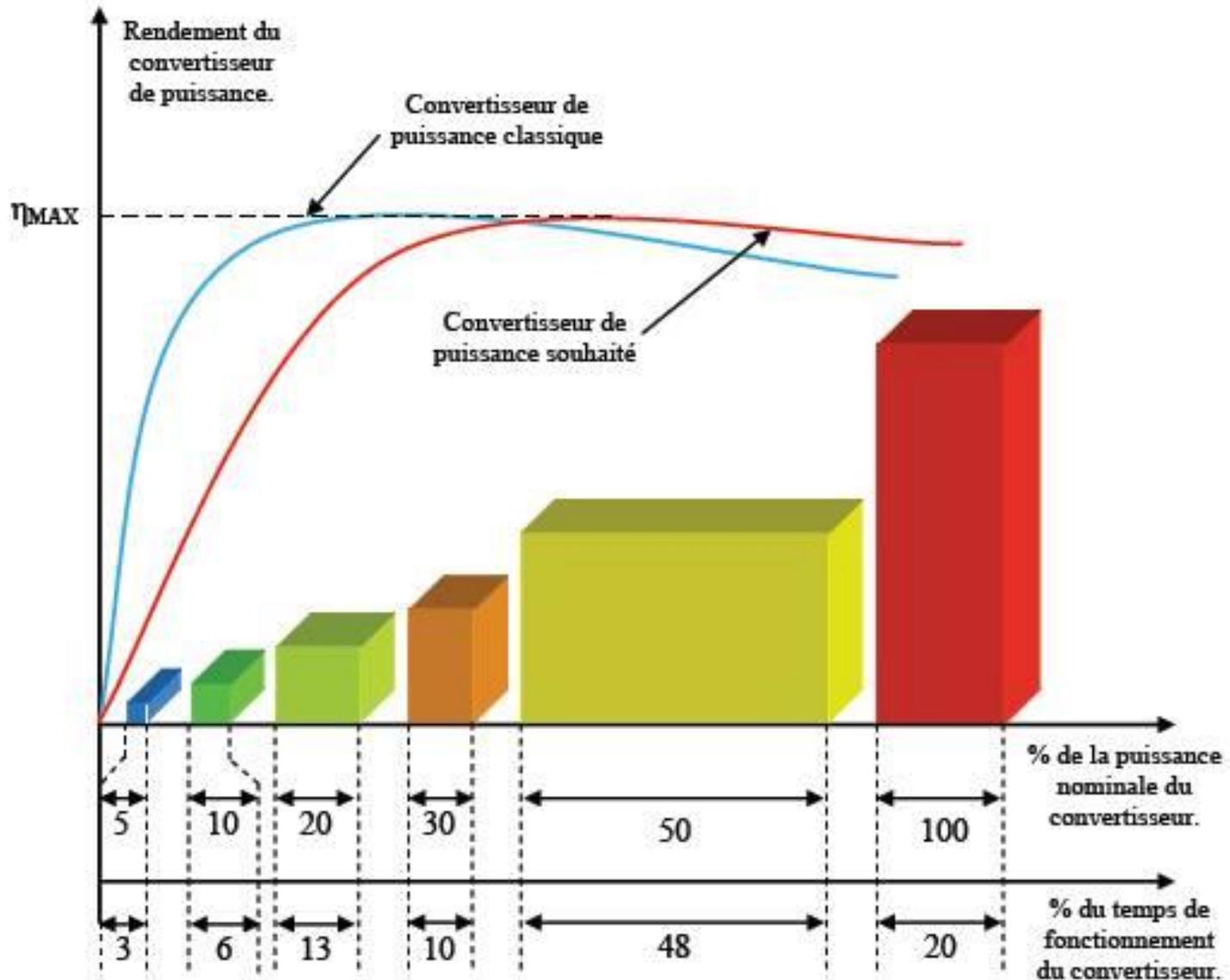
INCLINAISON \ ORIENTATION	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	0,93	0,90	0,78	0,55

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

source Phébus

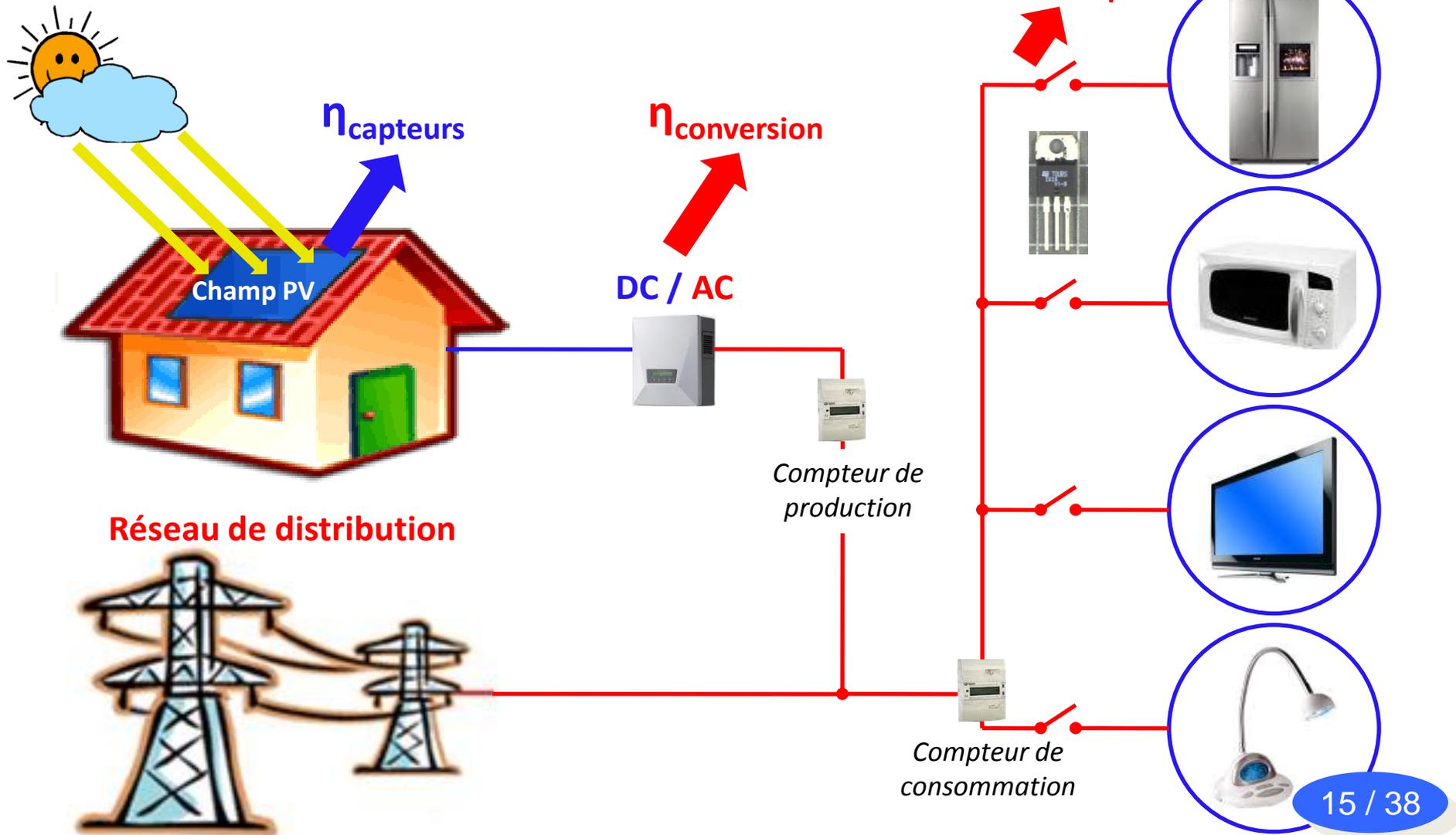
NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production.

Rendement européen



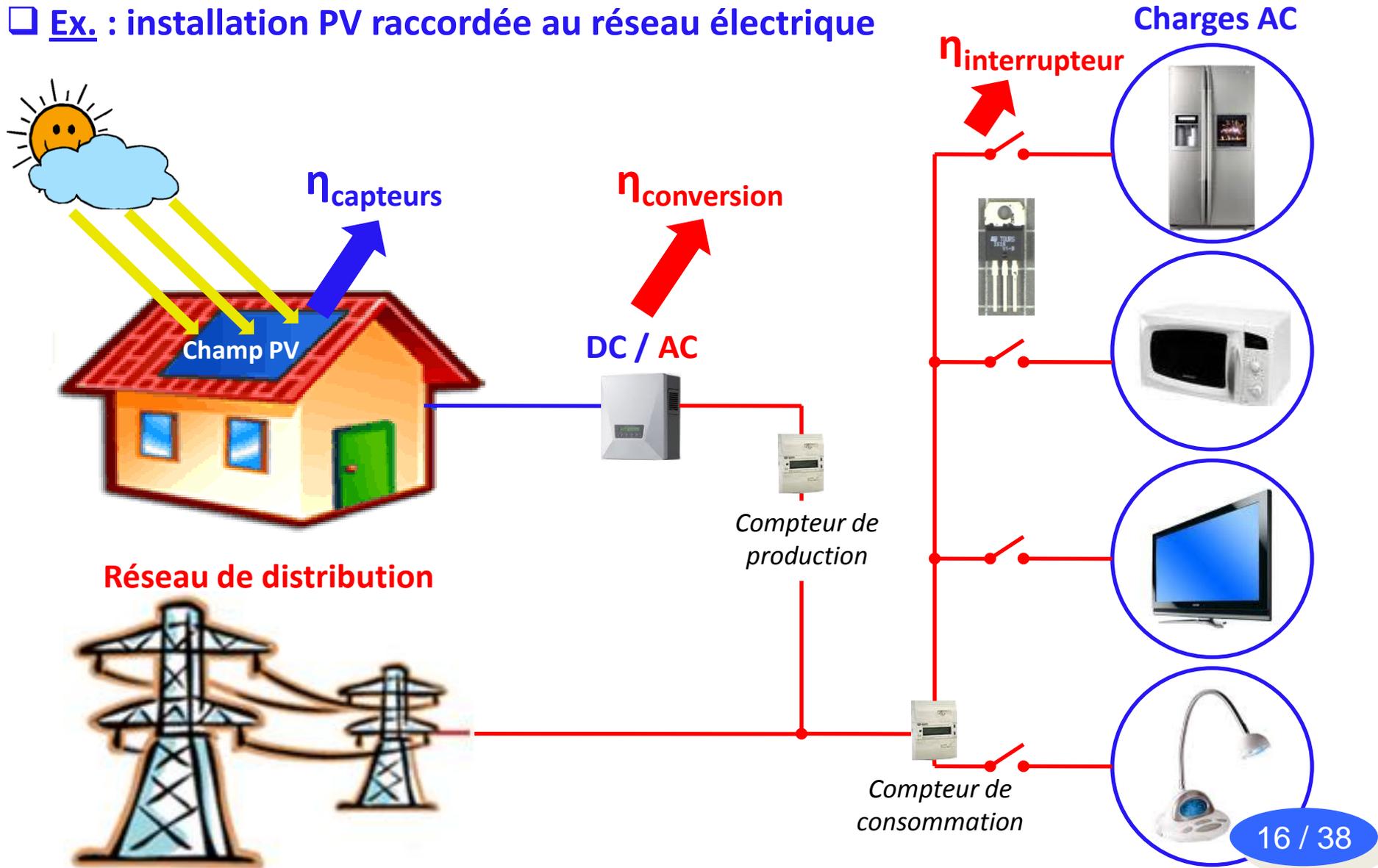
Rappels sur la chaîne de conversion PV

□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique

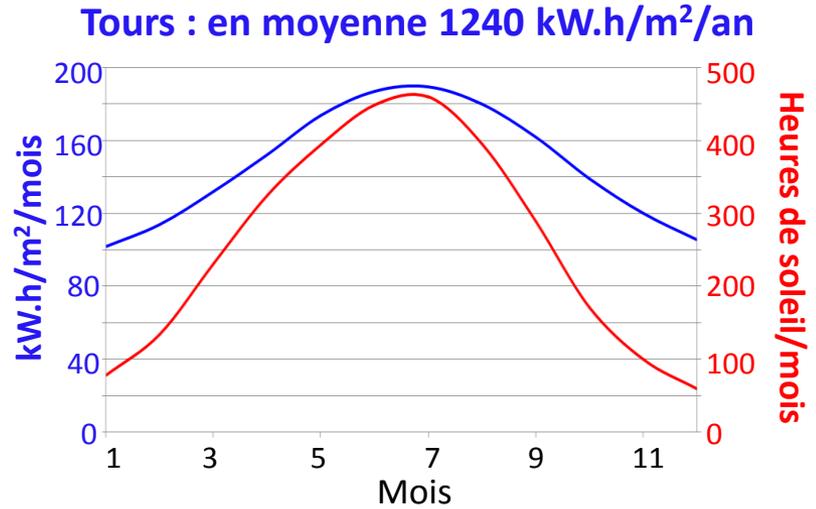
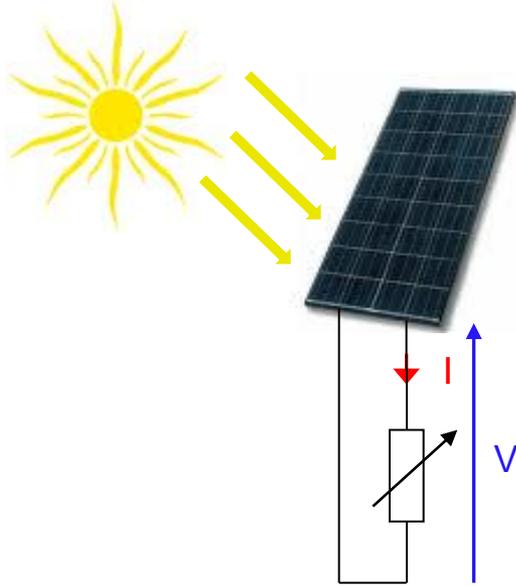


Problématiques de la chaîne de conversion PV

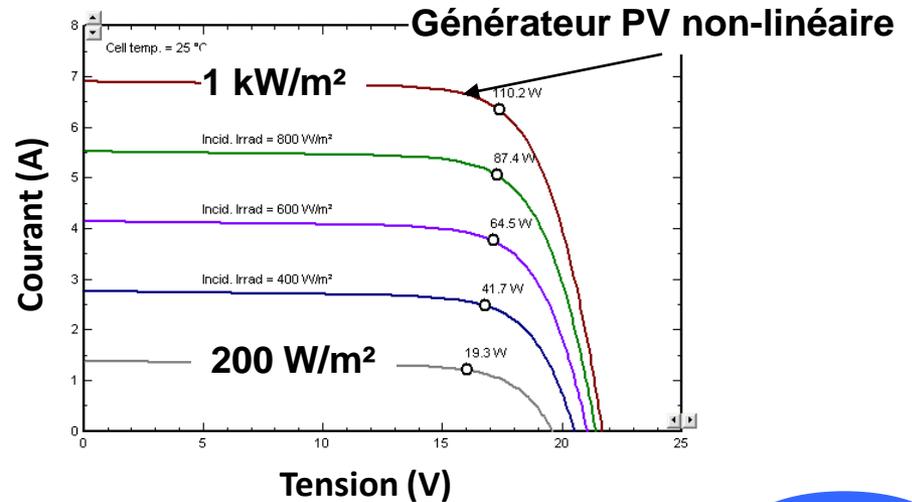
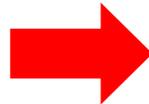
□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique



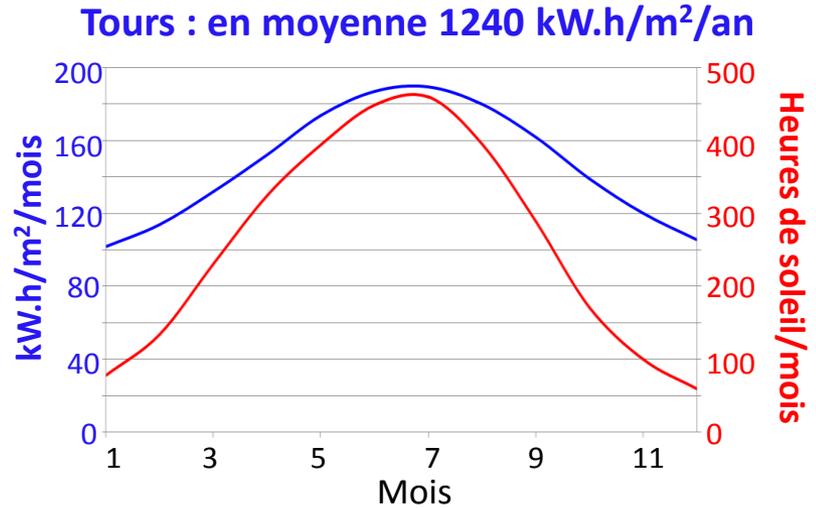
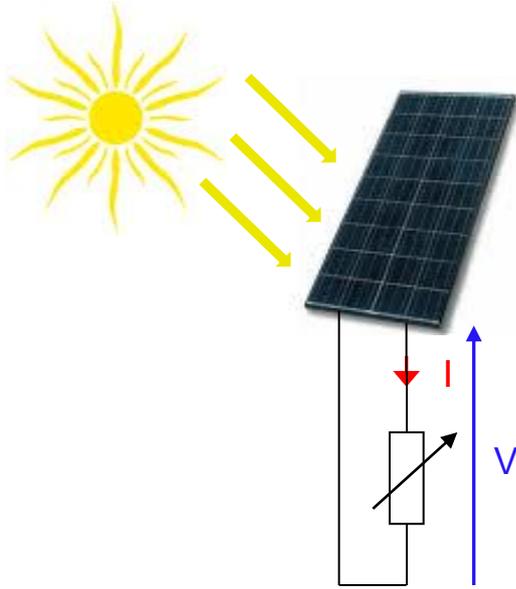
Intermittence du gisement solaire + ombrages (1/2)



« I » proportionnel à l'éclairement

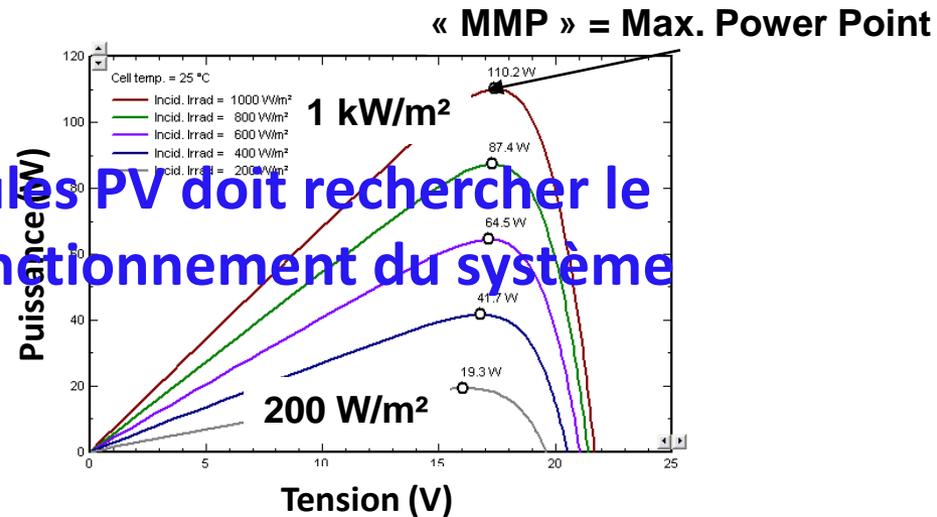


Intermittence du gisement solaire + ombrages (2/2)



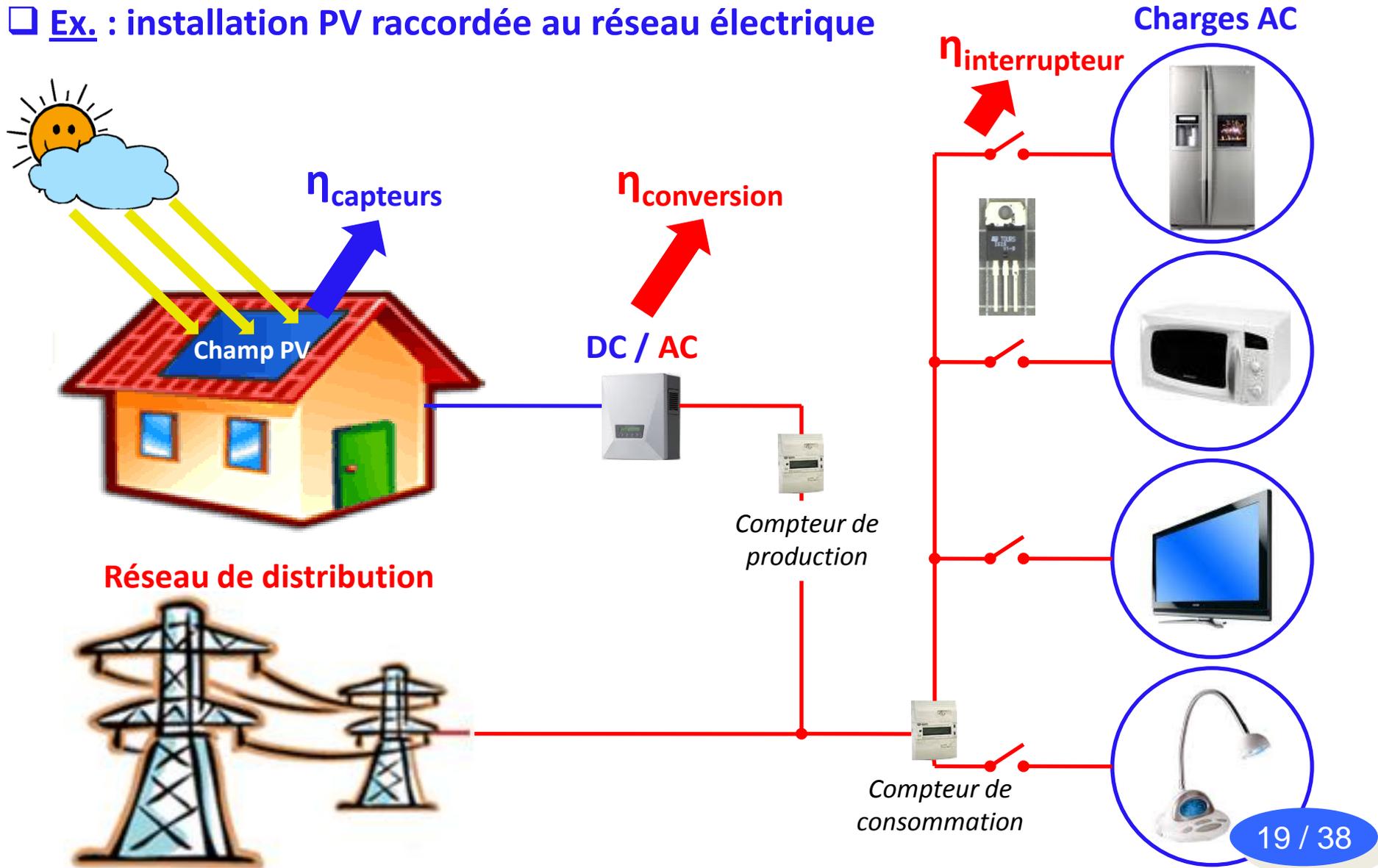
$P = V \times I$ dépend de l'impédance de la charge

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

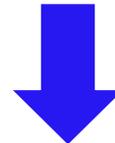
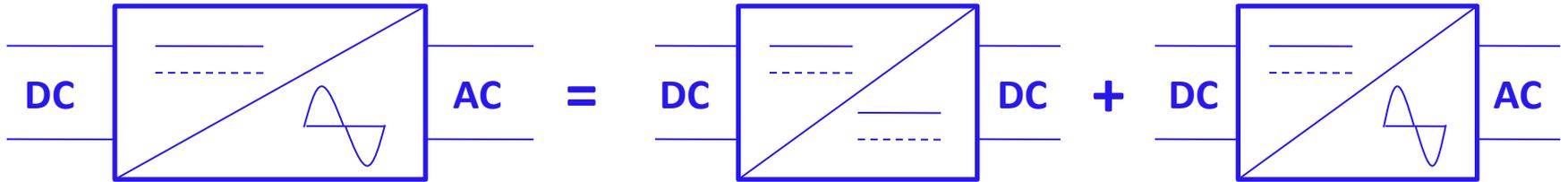


Problématiques de la chaîne de conversion PV

□ Ex. : installation PV raccordée au réseau électrique

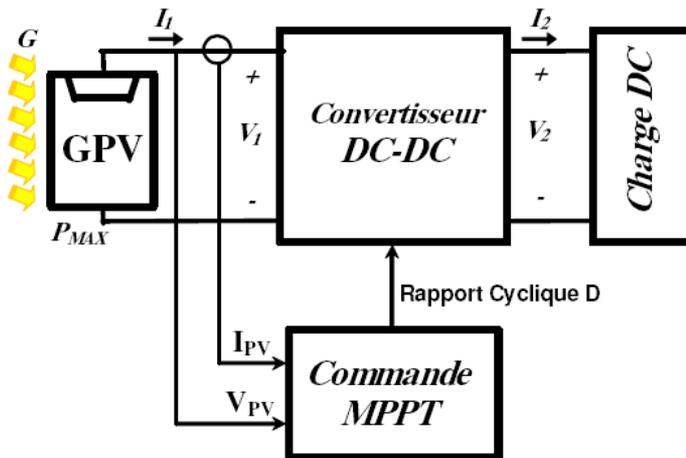


Conversion DC-AC (1/5)

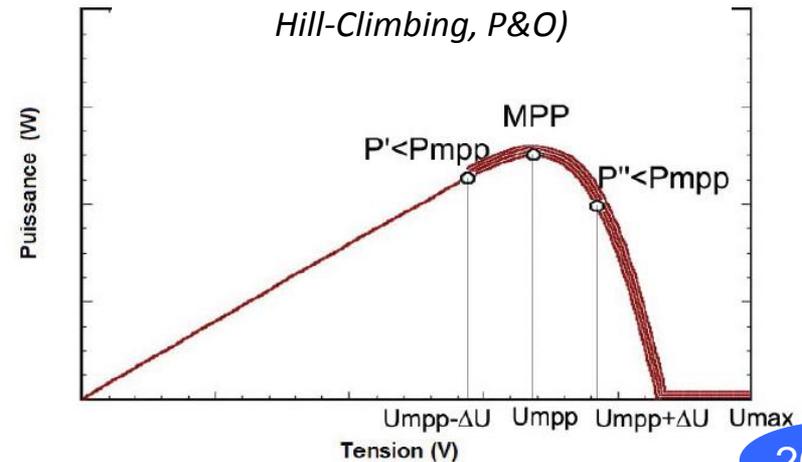


Étage d'adaptation :

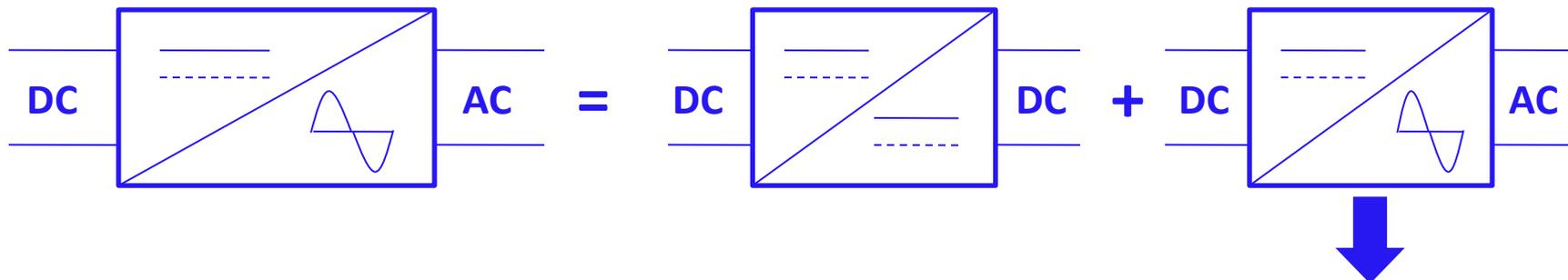
- Élévation / abaissement de la tension
- Suivi « MPP »



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



Conversion DC-AC (2/5)

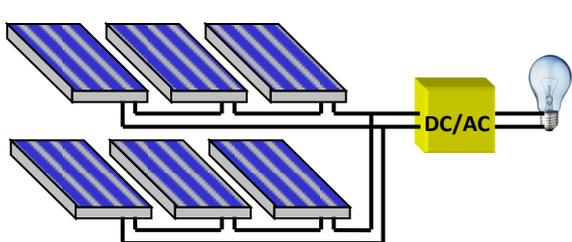


Onduleur :

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

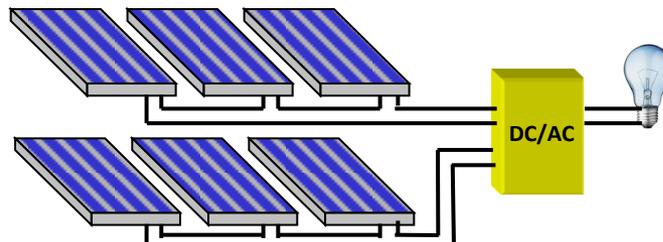
Projet labellisé par le pôle de compétitivité S2E2

☐ Différentes topologies



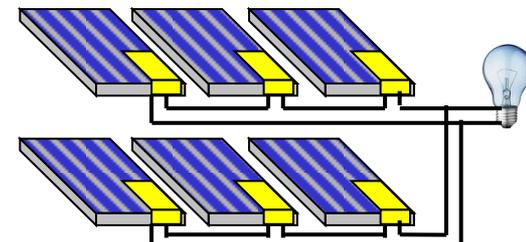
Onduleur
Central

3 kVA – 5 kVA



Onduleur multi-rangée
(multi-string)

1 kVA – 10 kVA

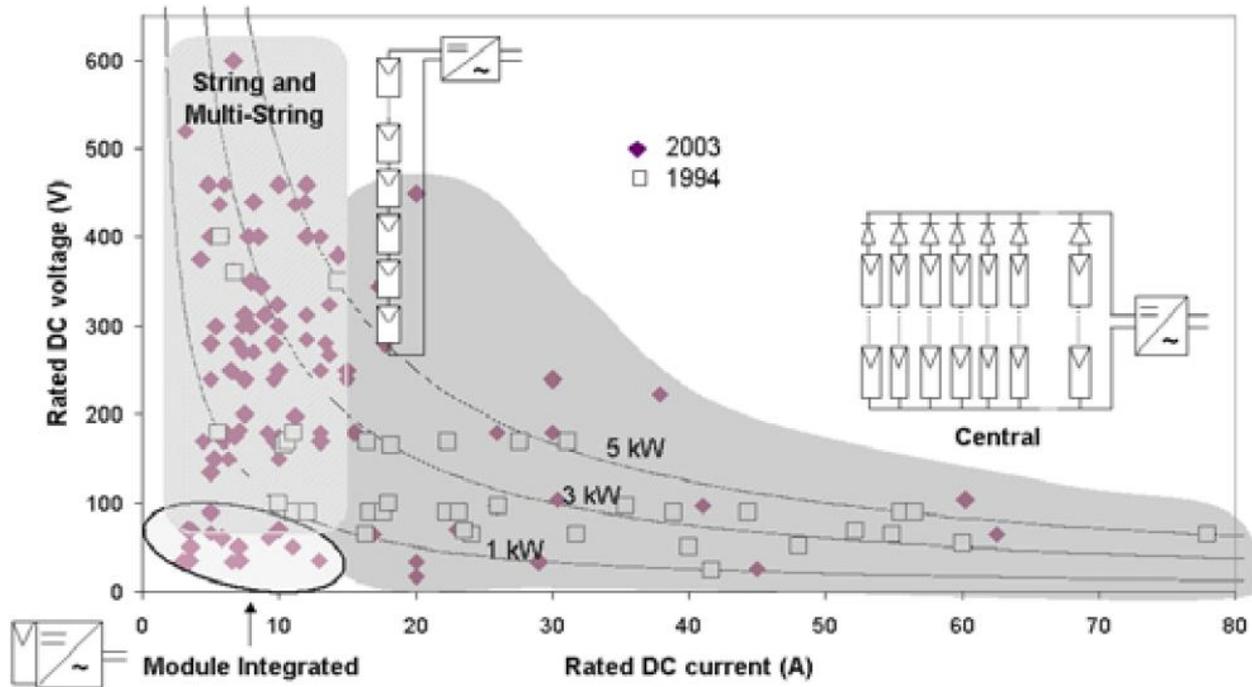


Onduleur
individuel
(integrated)

400 VA – 500 VA

Conversion DC-AC (3/5)

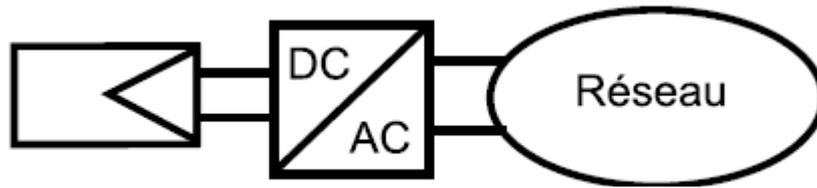
☐ Marché des onduleurs : tendances actuelles



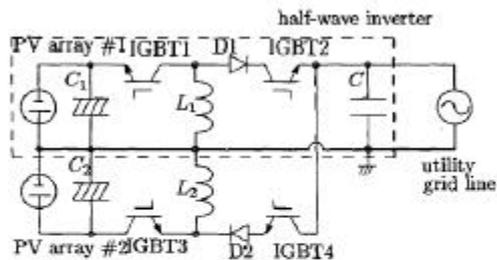
Source : *String and Module Integrated inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems. 2003*

Conversion DC-AC (3/5)

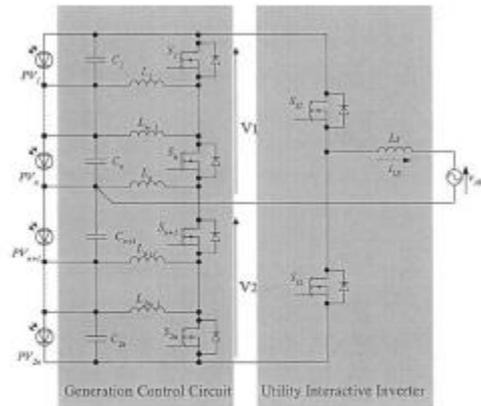
Conversion mono étage (avec ou sans isolation)



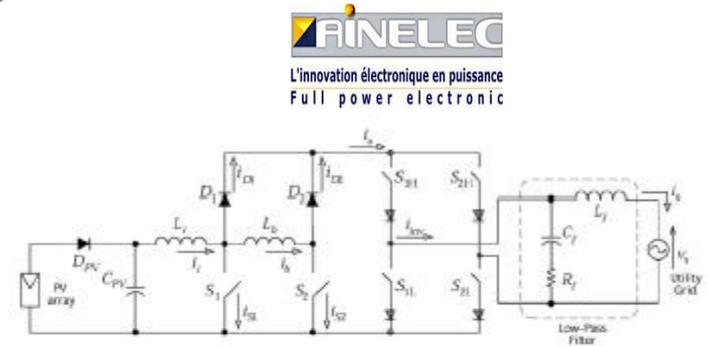
Projet labellisé par le pôle de compétitivité S2E2



buck-boost chopper circuit



GCC

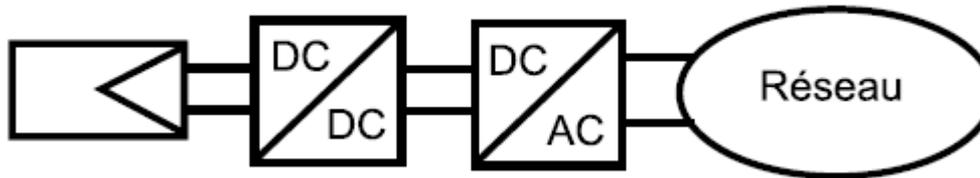


Boost Current multilevel Inverter

Trois exemples de structures utilisant des « hacheurs intégrés »

Conversion DC-AC (3/5)

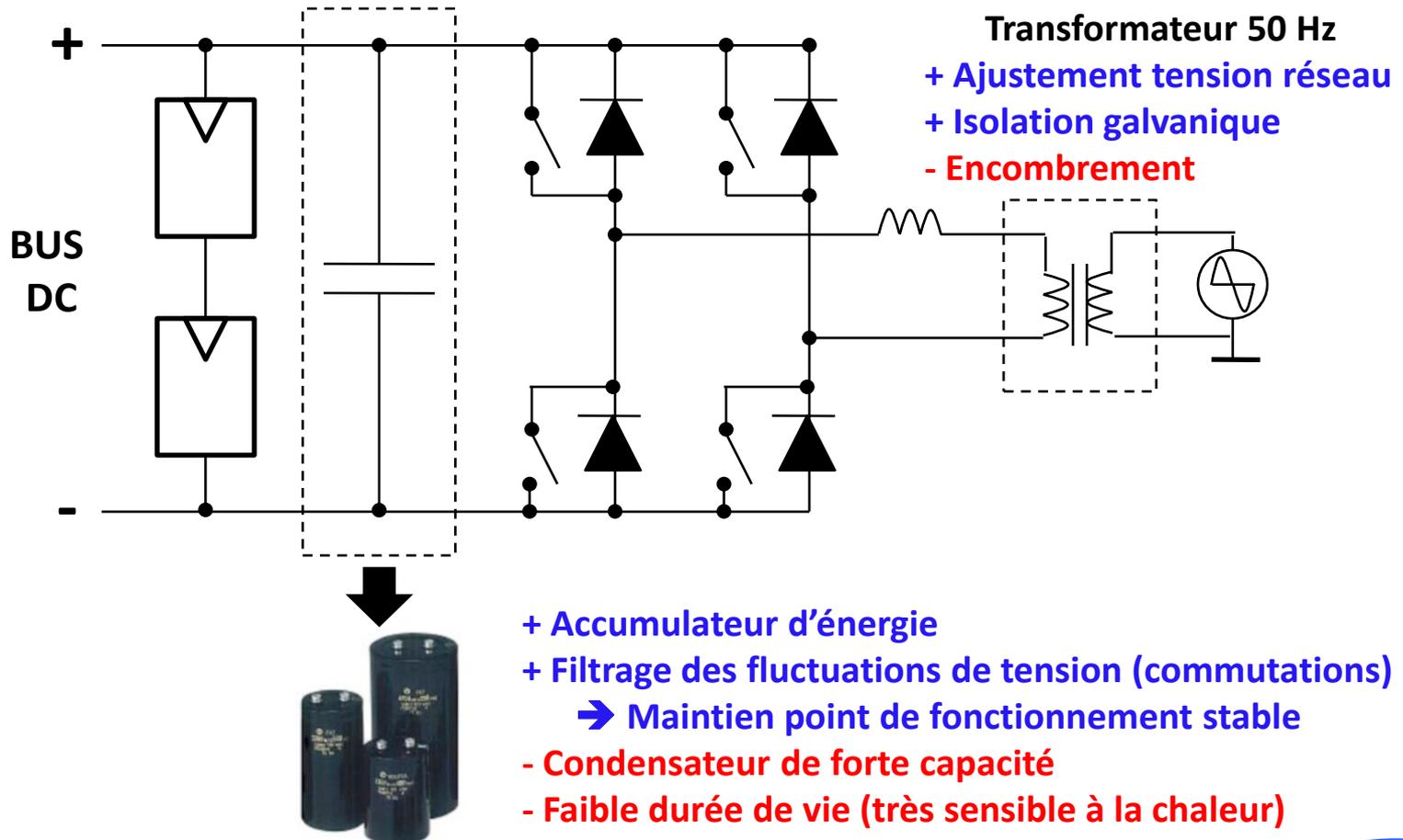
Conversion deux étages (avec ou sans isolation)



De nombreuses technologies...

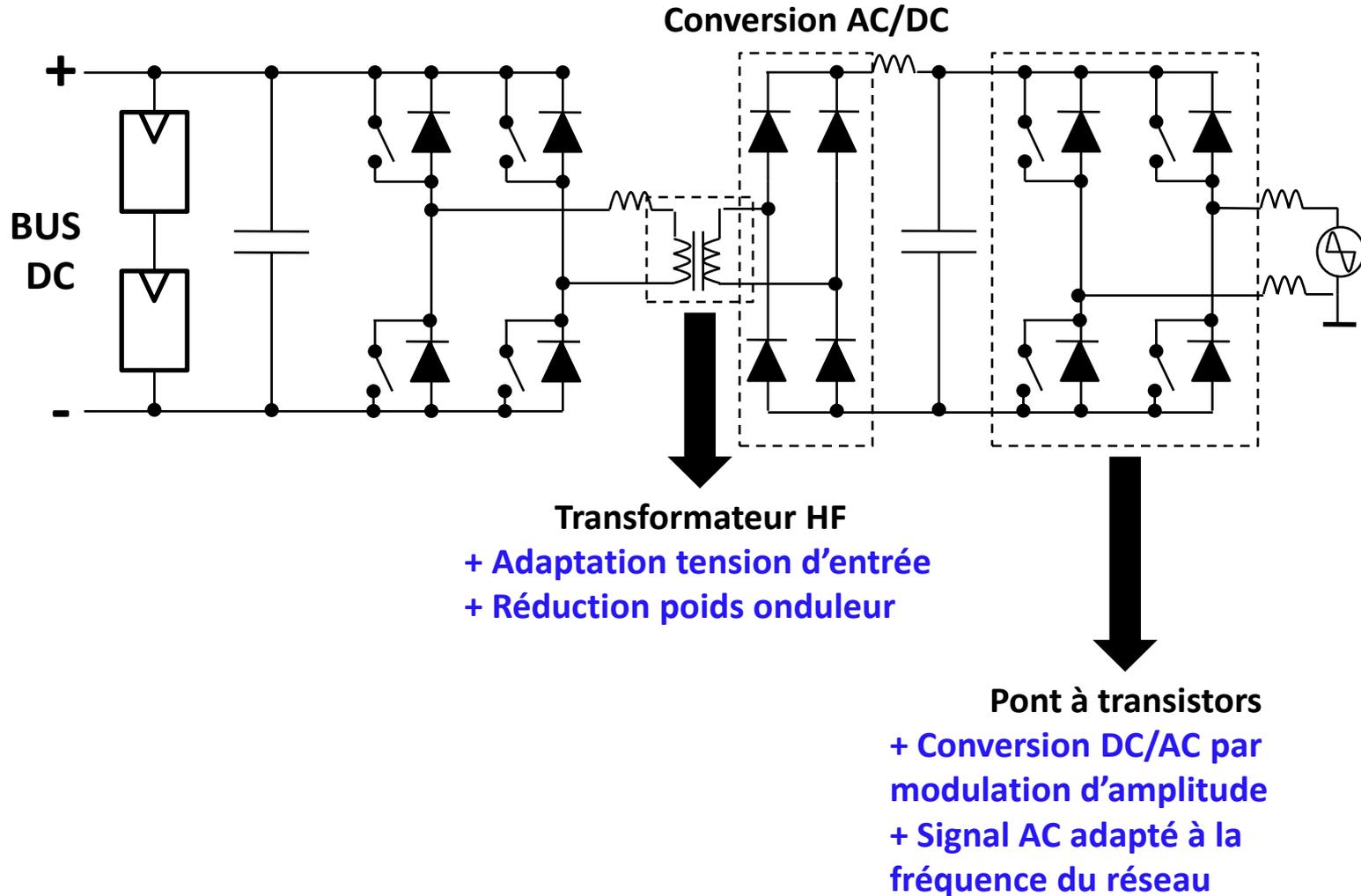
Conversion DC-AC (4/5)

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

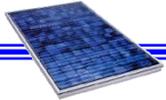


Conversion DC-AC (5/5)

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

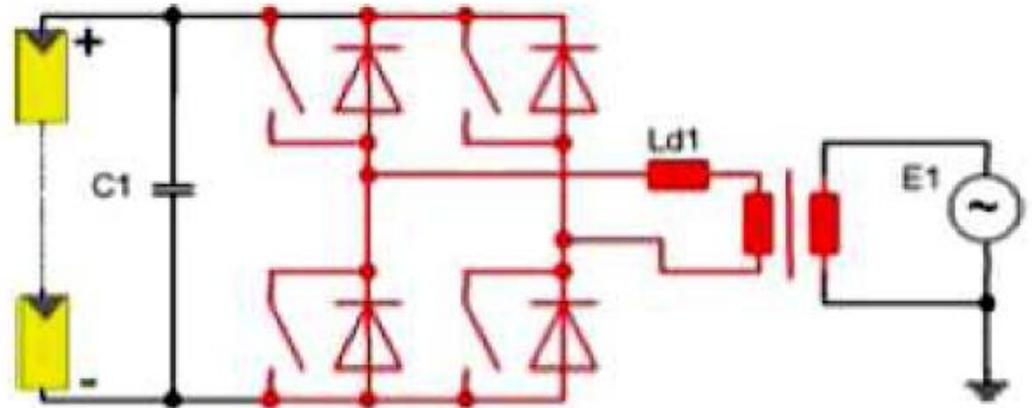


Les différentes architectures onduleurs



➤ Dépendances

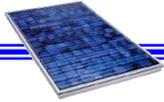
- des topologies (applications, gammes de puissance...)
- du pays d'accueil, des normes en vigueur (isolation, mise à la terre)
- du choix de l'industriel (rapport qualité/coût...)
- Les principaux onduleurs monophasés (toutes applications confondues)



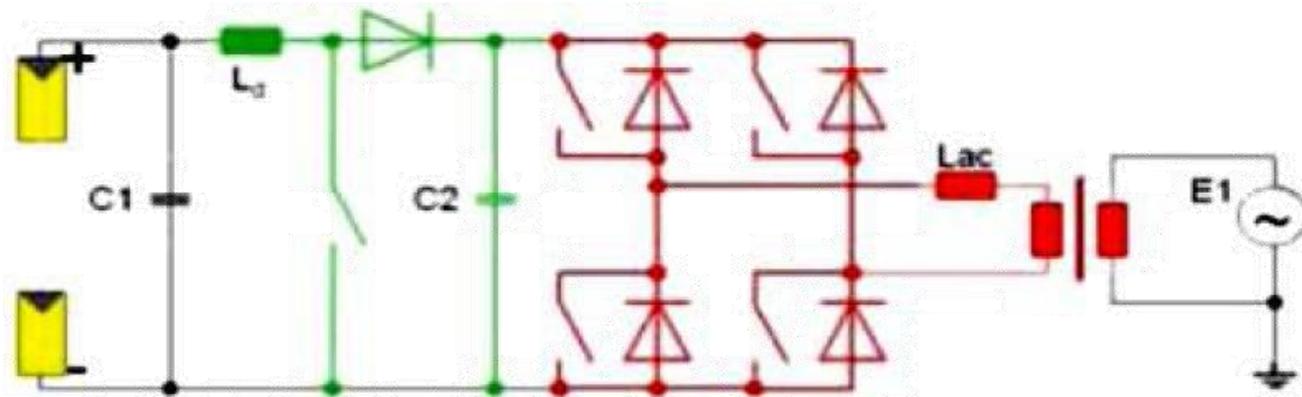
➤ Pont tout transistor

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

Les différentes architectures onduleurs

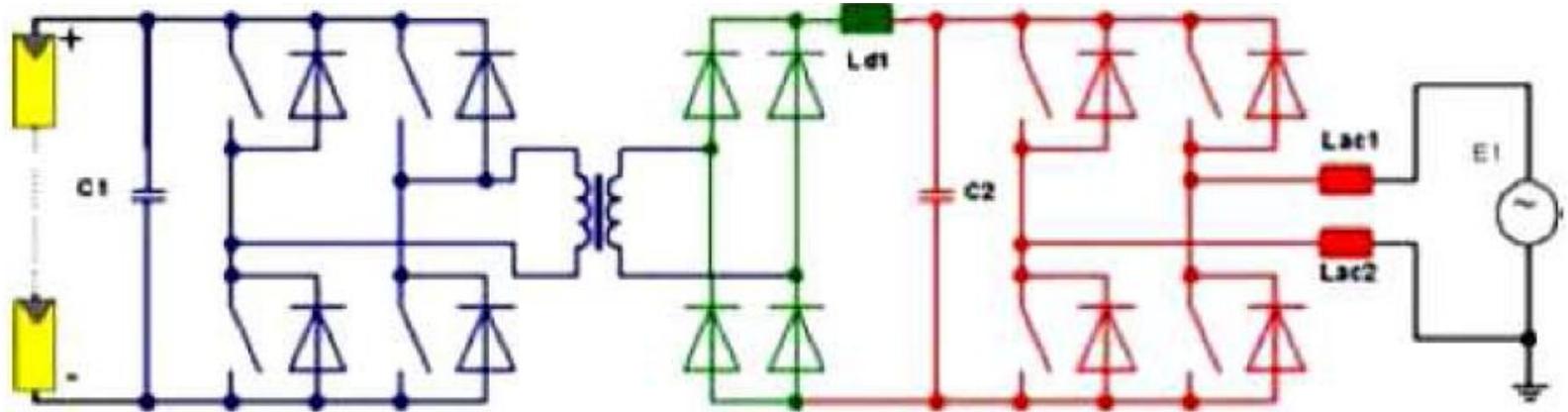
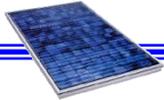


- Pont tout transistor + Boost (Pour l'intégré)
- +: gamme $V_e \uparrow$, Is sinus 50Hz, Mise à la terre (MALT)
- -: transformateur BF



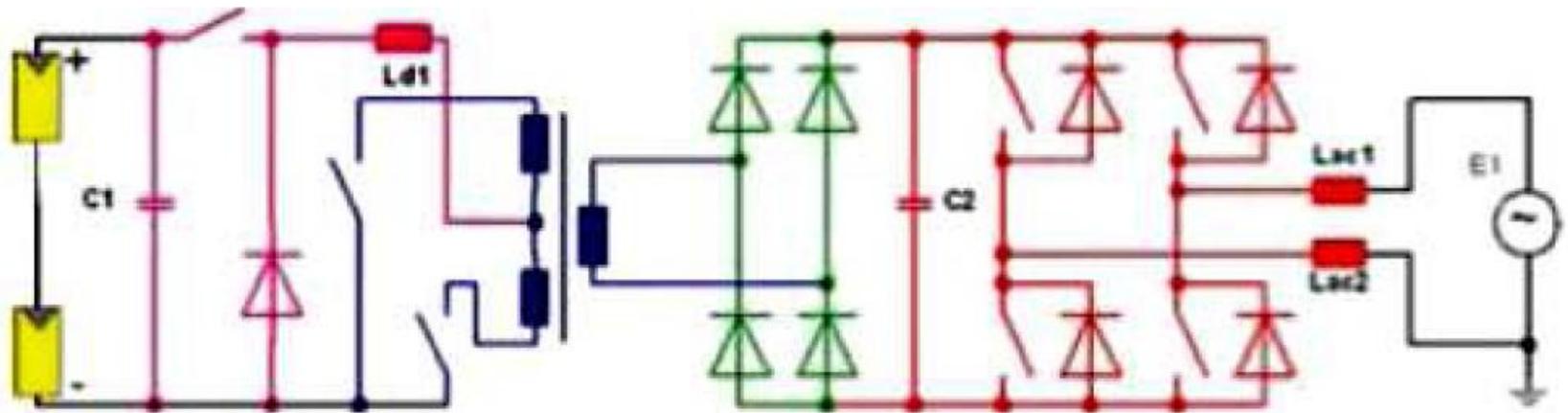
- Circuit 3 étages + transfo HF
- +: gamme $V_e \uparrow$, Is sinus 50Hz, Transfo. HF (volume \downarrow), MALT

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 $P_{\max} = 75 \times 0,8 = 60 \text{ W}$

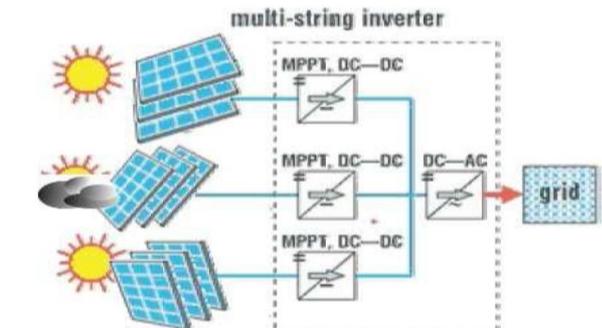


Schéma de raccordement des modules PV à un onduleur multi string

Caractéristiques du branchement

➤ Courant total généré

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

➤ Tension totale produite

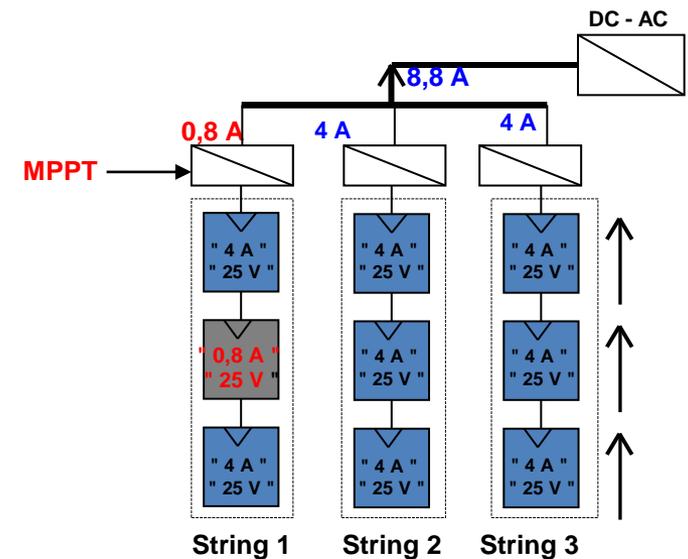
- ✓ $U_{\text{total}} = \text{Somme des tension des PV en série}$

➤ 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 $P_{max} = 25 \times 8,8 = 220 \text{ W}$

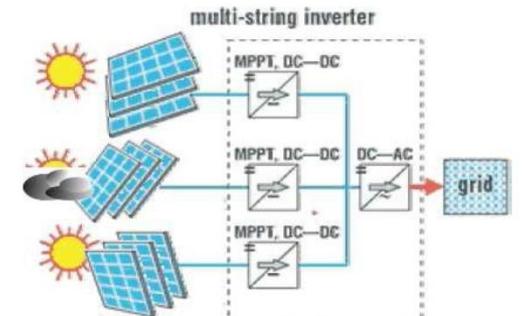


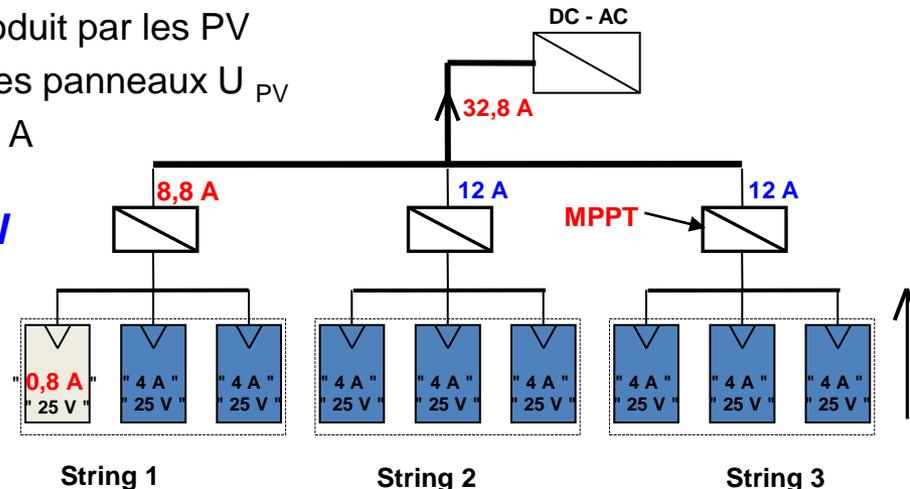
Schéma de raccordement des modules PV à un onduleur multi string

□ 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 $P_{\text{max}} = 25 \times 0,8 + 2 \times 100 = 220 \text{ W}$

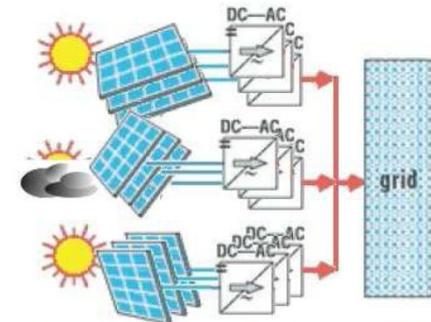


Schéma de raccordement des modules PV avec CEPIM intégré aux modules

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 $P = 20 + 2 \times 100 = 220 \text{ W}$



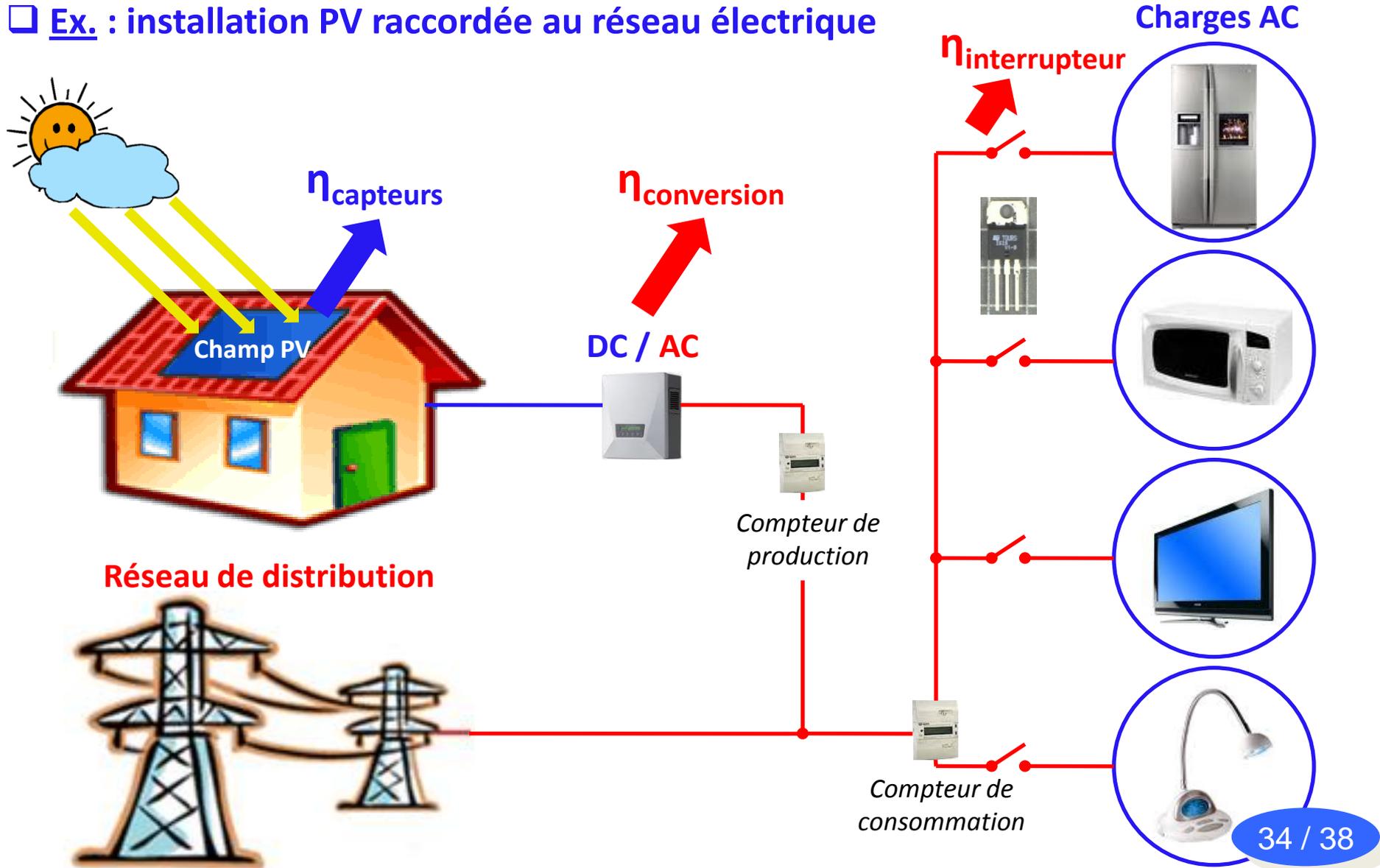
Puissance totale de 820 W

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)

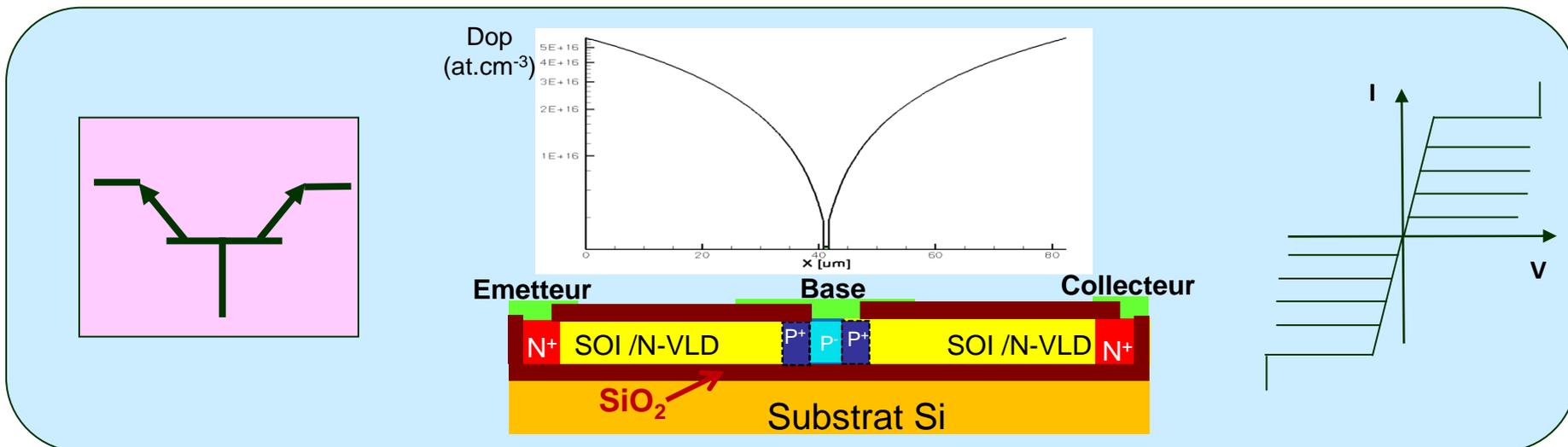
Optimisation $\eta_{\text{interrupteur}}$

• Contraintes sur l'interrupteur :

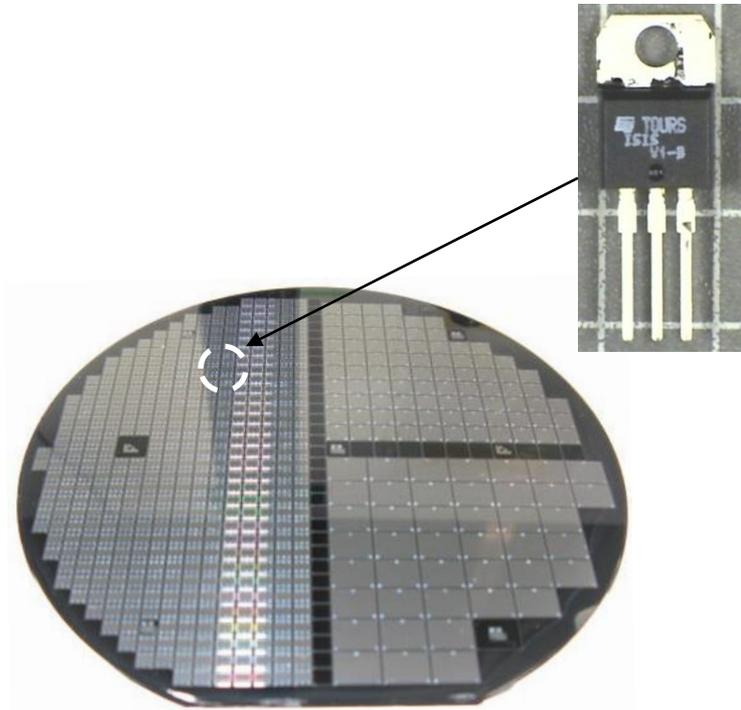
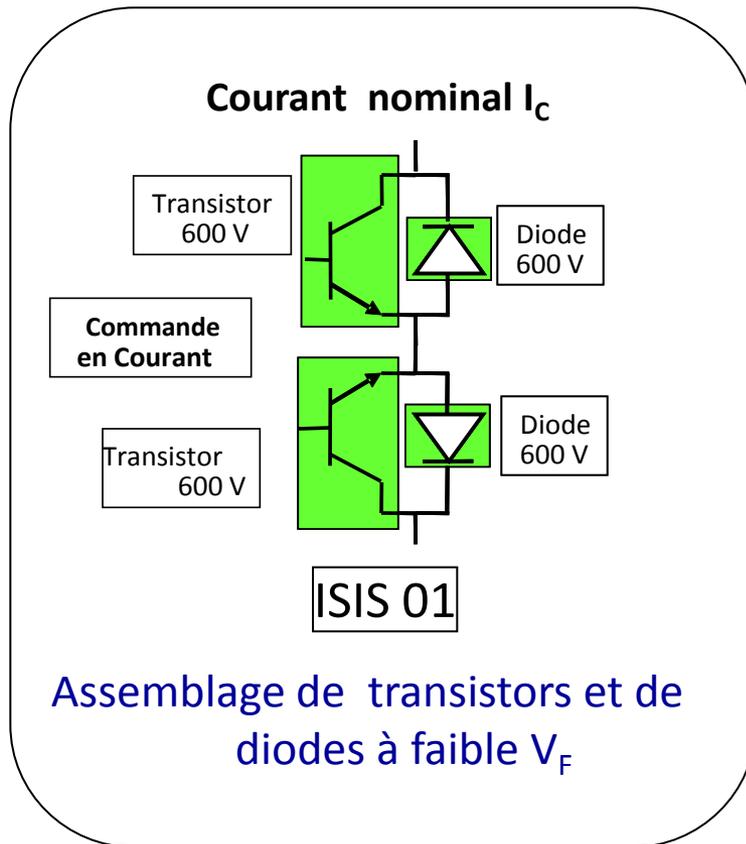
- ✓ Bidirectionnalité Tension / Courant
- ✓ Commandabilité (ouverture et fermeture)
- ✓ Tenue en tension $V_{BR} = 600 \text{ V}$
- ✓ Puissance dissipée max. = $3,5 \text{ W @ } 4,5 \text{ A} \rightarrow \text{Pertes} = 0,8 \text{ W/A}$



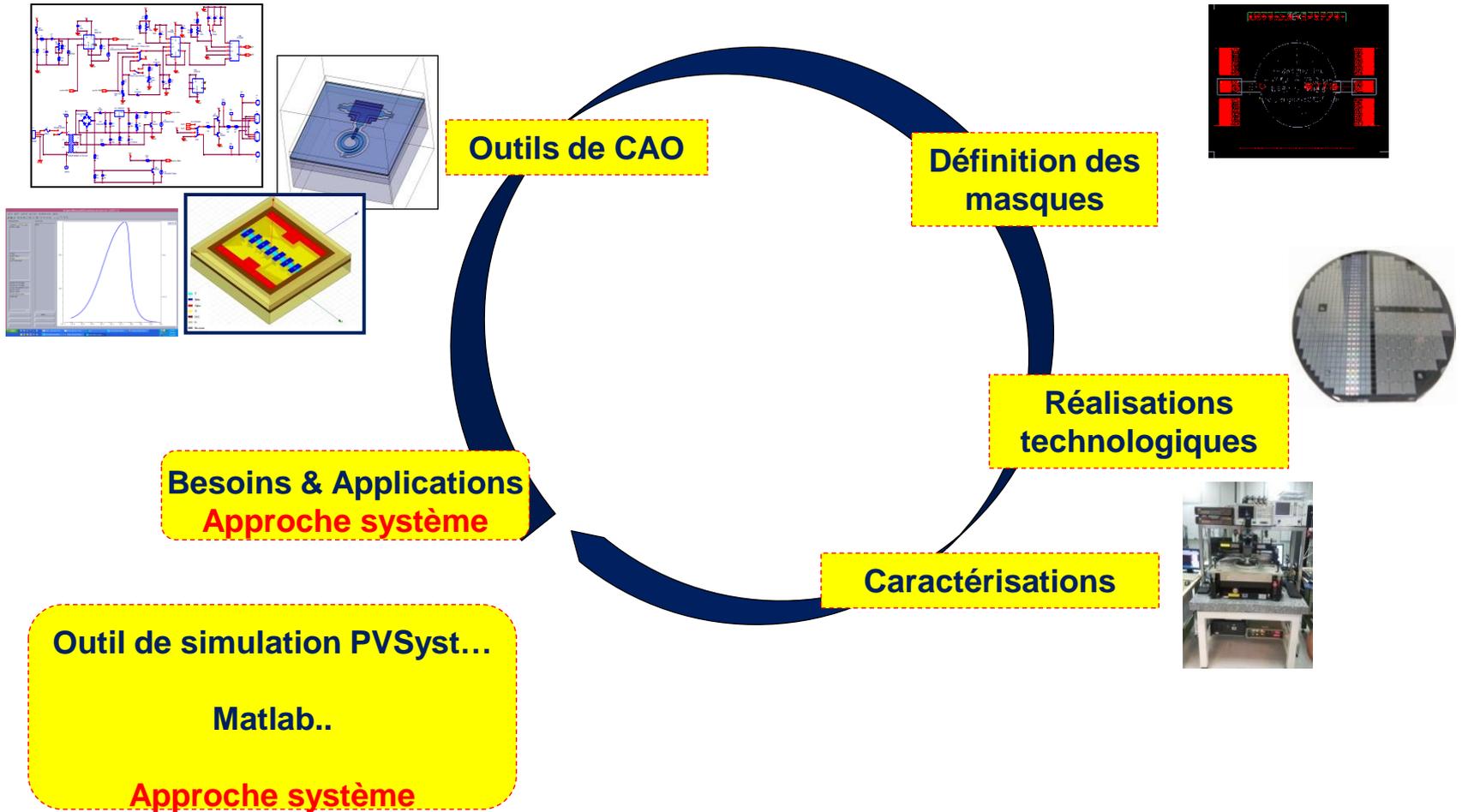
Nécessité de développer de nouvelles briques technologiques



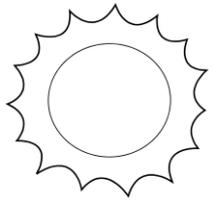
□ Approche discrète : exemple de réalisation



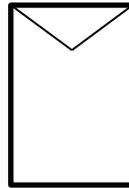
Conclusion générale



Modélisation de la production photovoltaïque

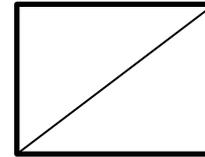


P_e



η_{PV}

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



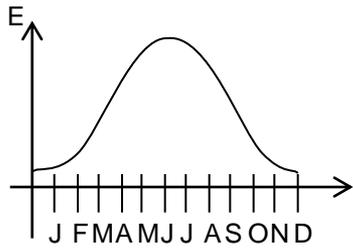
η_{conv}

Dépendant du Pt. De
fonctionnement



kWh /an

P_s



X

η_{PV}

X

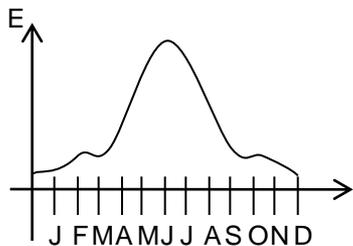
$\eta_{conv} = f(P_{PV})$

=

kWh₁ /an



Si ombrage
(important pour les
faibles élévations)



X

η_{PV}

X

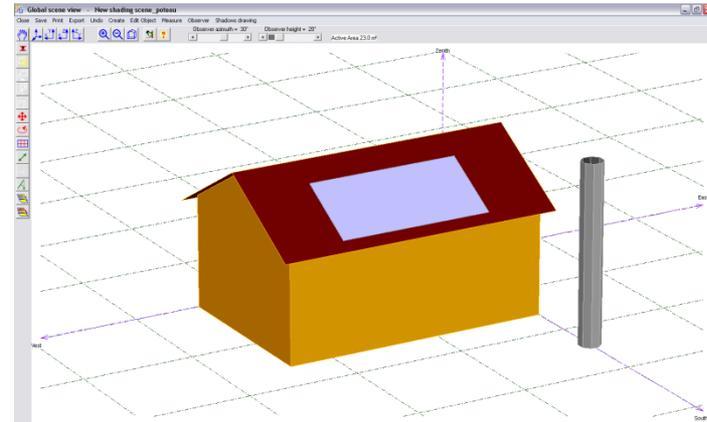
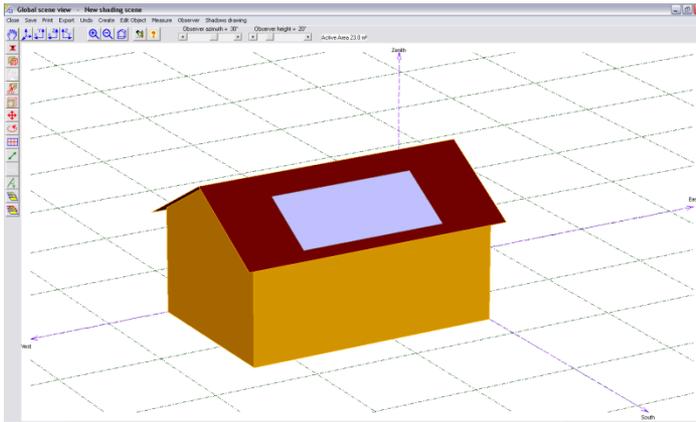
$\eta_{conv} = f(P_{PV})$

=

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...