

Energie solaire et électricité

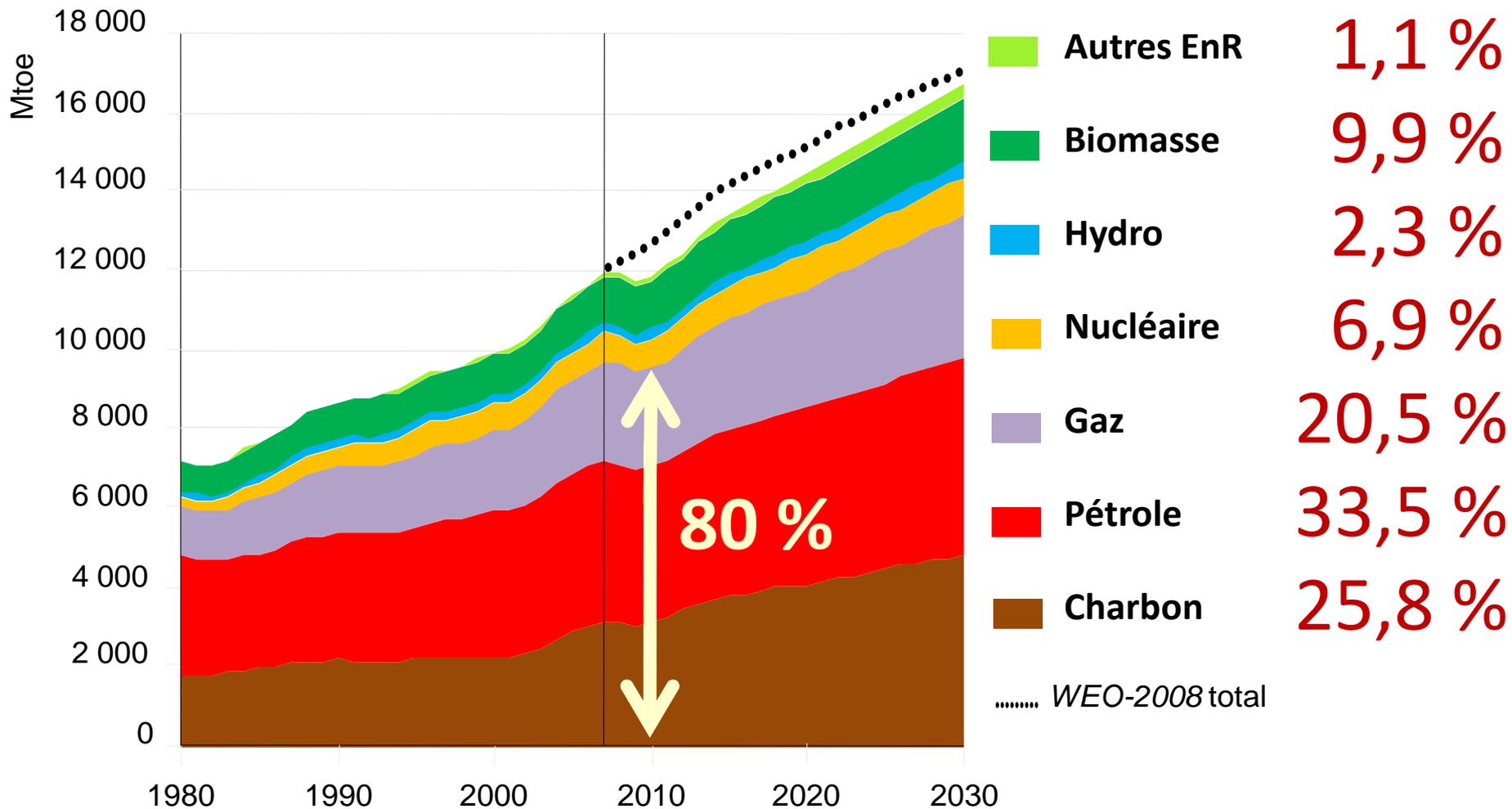
Quelques notions essentielles

- La puissance s'exprime en Watt (elle est potentielle)
 - 1 kW = 1000 W (une bouilloire électrique = 2 kW)
 - 1 MW = 1000 kW (Chauffage de 100 maisons)
 - 1 GW = 1000 MW (une centrale)
- La puissance crête est la puissance maximale que peut délivrer un appareil (panneau solaire bien orienté à 13h l'été)
- L'énergie s'exprime en Wh, kWh, MWh GWh et représente la production d'une puissance donnée pendant un temps donné

MONDE/ ENERGIE PRIMAIRE

Scénario de référence)

2010



*D'ici 2030 augmentation de 40 %, le charbon augmentant le plus en valeur absolue
En 2010: +6% de gaz à effet de serre par rapport à 2009*

Le contexte

- **Des obligations européennes (3 fois 20 % en 2020: énergies renouvelables, efficacité, gaz à effet de serre)**
- **Une lutte de lobbies (Europe et France)**
- **Des postures politiques « électoraliste »**
- **La réalité:**
 - **De l'impact climatique des gaz à effet de serre**
 - **De l'épuisement des combustibles fossiles**
 - **Du renchérissement de l'énergie**

Berkeley Earth Project (BEP) a livré en septembre 2011 des conclusions très attendues

Decadal land-surface average temperature

Temperature anomaly (°C)



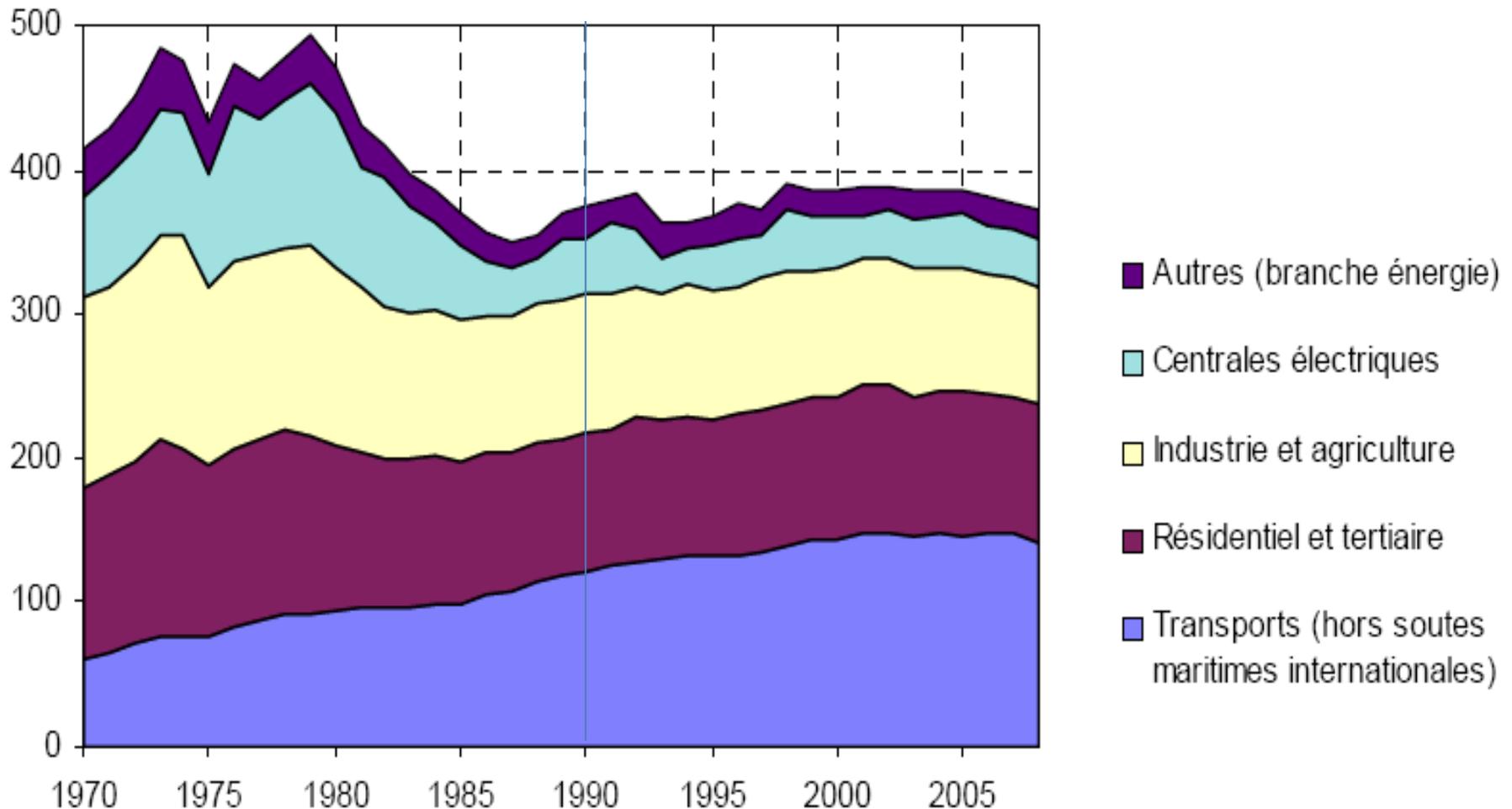
"Notre plus grande surprise est que les nouveaux résultats sont extrêmement proches des données publiées précédemment par d'autres équipes aux Etats-Unis et en Grande Bretagne (...) Cela confirme que ces études avaient été conduites soigneusement et que les a priori pointés par les climatosceptiques n'avaient pas sérieusement influé sur les résultats",

Source: Berkeley Earth Project

ENERGIE RENOUVELABLES ET GAZ A EFFET DE SERRE

France: ou en sommes nous?

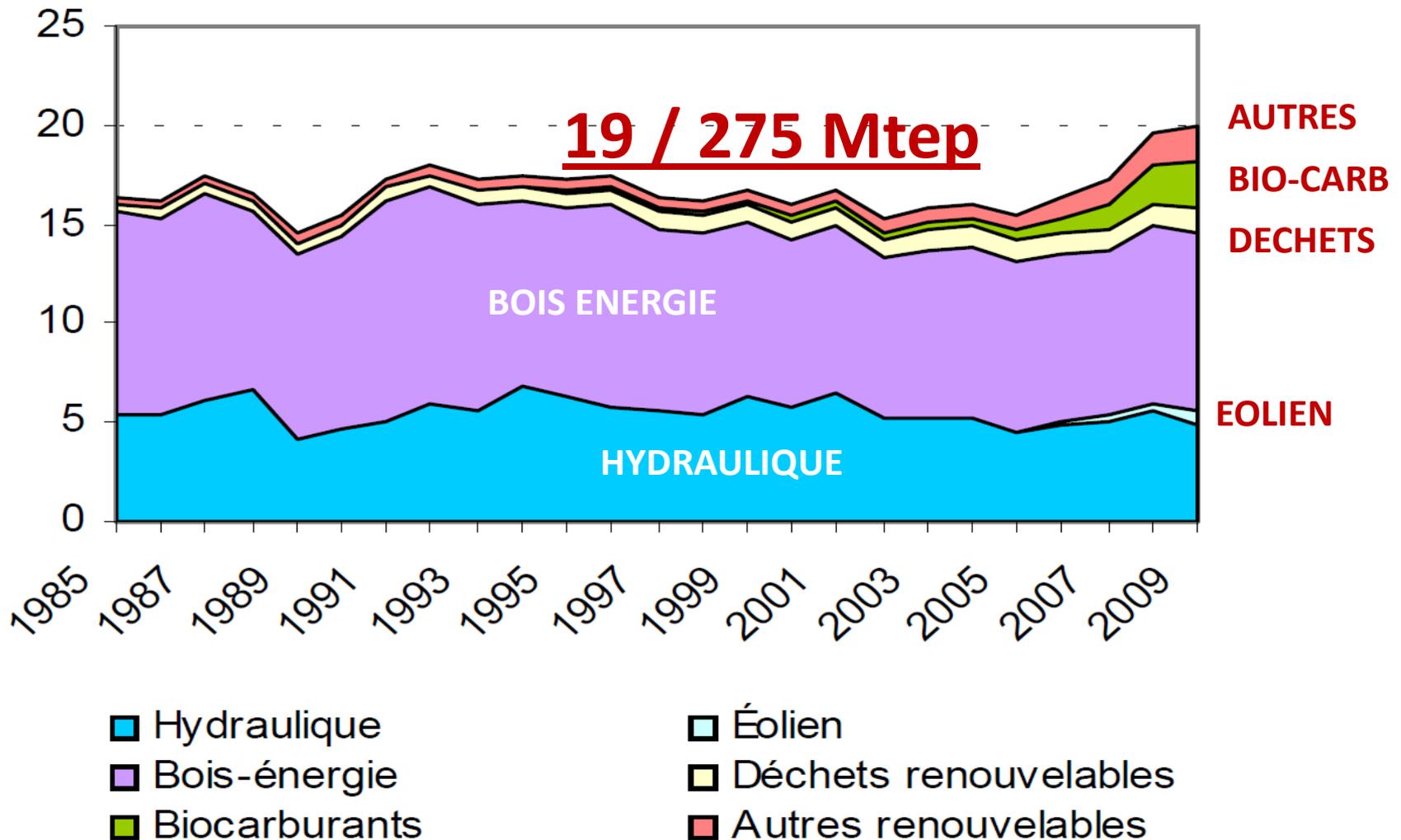
Emission de CO² du secteur énergétique (Mt CO²)



France: Production primaire d'énergies renouvelables (Mtep)

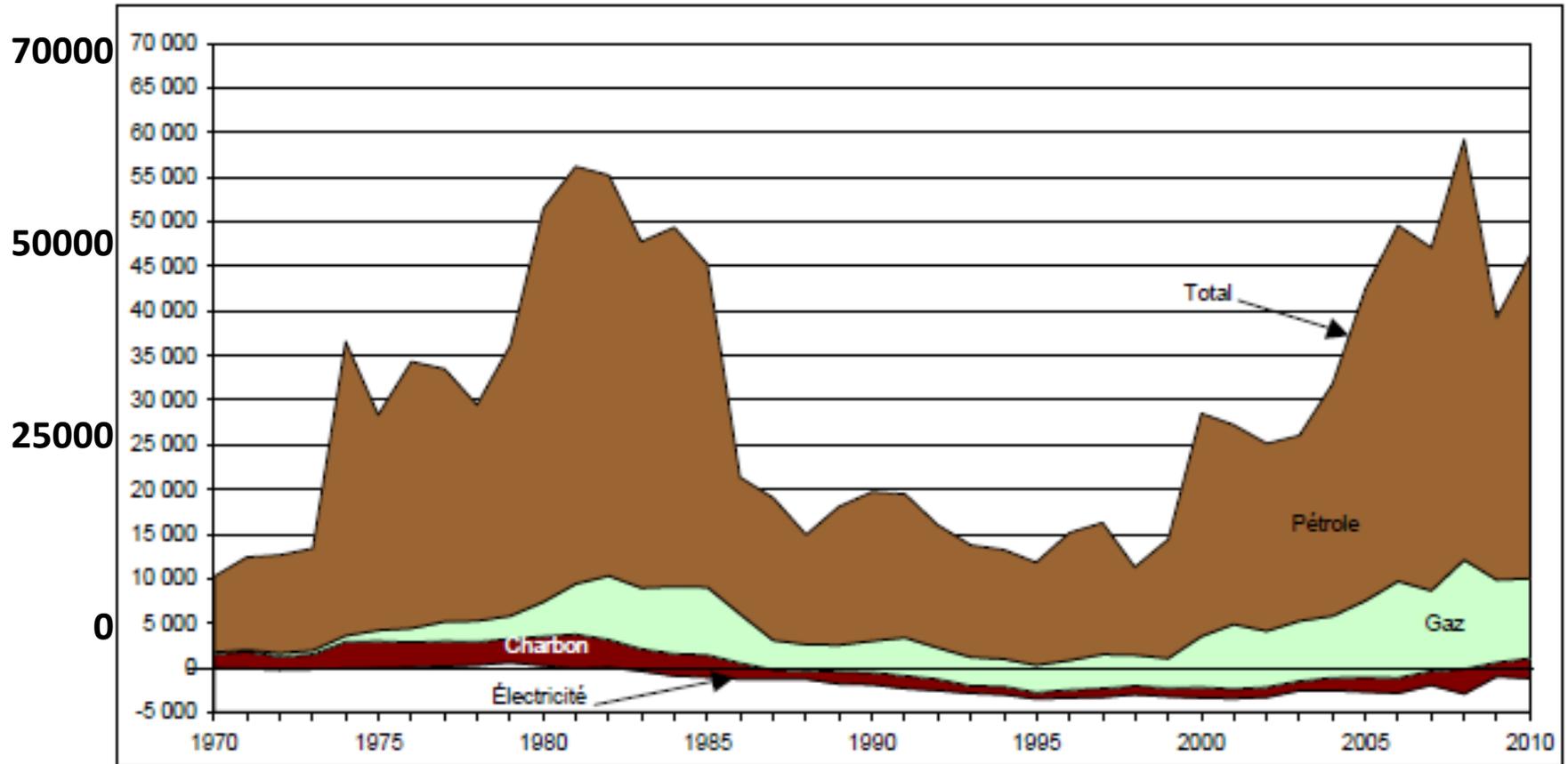
Il faut doubler d'ici 2020

En Mtep



FRANCE: FACTURE ENERGETIQUE PAR TYPE D'ENERGIE 2009 (M€ 2010)

M€



Source : SOeS d'après Douanes

TAUX D'INDEPENDANCE ENERGETIQUE : 50%

Quelles ENR

- **Distinguer:**

- **le secteur électrique**

- **Eolien/hydraulien**
- **Solaire**
- **Bois énergie**
- **Hydraulique**
- **Géothermie**

- **Le chauffage,**

- **Solaire**
- **Bois énergie**
- **Géothermie**

- **Les biocarburants et la biomasse**

Mais aussi:

- **Efficacité énergétique**
- **Stockage d'énergie**

**Et ne pas oublier que
« développement durable »**

=

- **Environnement**
- **Economie**
- **Social**

La feuille de route du Grenelle (Mtep)

Mtep	ENR 2009	ENR 2020	%
Bois habitat	9,6	17,1	+ 78 %
Bois industrie/tertiaire	2,8	9	+ 324 %
Solaire/PAC/Géothermie	0,8	3,2	+ 400 %
Hydroélectricité	5,3	5,8	+ 9,4 %
Biomasse	0,4	1,4	+ 350 %
Eolien	0,7	5	+ 700 %
Photovoltaïque	0,02	0,4	+ 2000 %
Biocarburants	2,5	4	+ 160 %
TOTAL ENR	22	46	+ 210 %

Total France énergie finale **160**
 Total France énergie primaire **275**

BIOMASSE: 68 %

LE SOLAIRE

Ou en sommes nous?

Le photovoltaïque en Europe (2010)

2010	Puissance installée (MW)	Evolution 2009/2010 %	Production GWh
Allemagne	13400	+ 74%	12000
Espagne	3800	+11%	6300
Italie	3500	+200%	1600
France	1050	+214%	600
Total Europe	29300	+80%	22500

PRODUCTION EUROPEENNE 2010 = 0,7% TOTAL = 1,8 CENTRALE NUCLÉAIRE

LE PLAN BORLOO (nov. 2008)

- **Objectifs 2020**

- **Puissance crête totale: 5000 MWc**
- **Coût d'investissement: 13 à 16 milliards €**
- **Production d'énergie: 5,3 TWh**
- **1 % de la production française 2020**

ou 0,4 centrale nucléaire

- **Situation fin 2010**

- **1025 MW**
- **Production 0,6 TWh (0,11% du total France)**
- **Technologie importée en quasi totalité)**

France 31/12/2010

LE PARC PHOTOVOLTAÏQUE

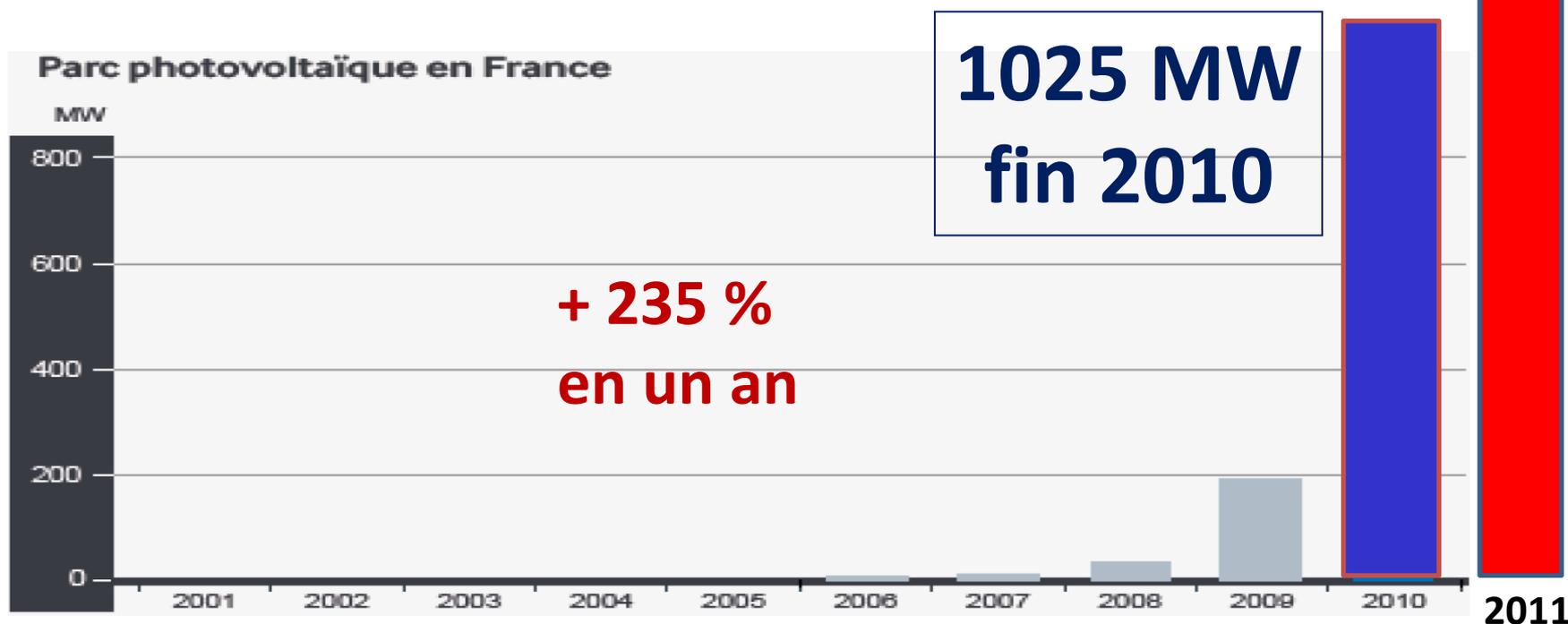
151.654 installations fin 2010

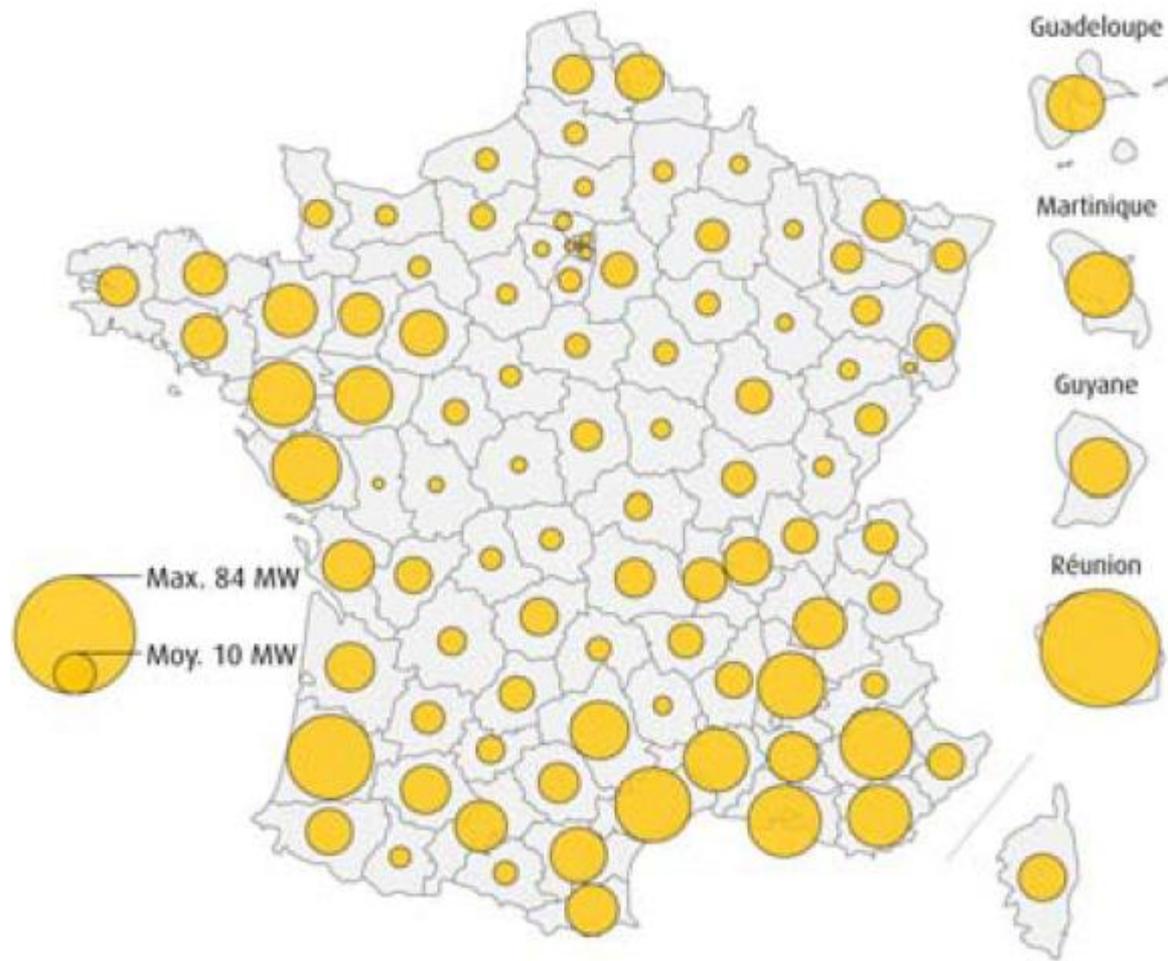
850 installations > 100 kW

92 installations > 250 kW

15 installations > 4000 kW (136 MW)

2000 MW
Sept 2011
+ 1000
en attente





Pourquoi un tel emballement?

- **Le prix moyen de production de l'électricité en France était en 2010 de 4,5 à 5,0 c€/kWh**
- **Il y a obligation par la loi d'acheter l'électricité solaire à un prix fixé par le gouvernement.**
- **En 2010 ce prix était de 30 à 58 c€/kWh selon la taille des installations (garanti 20 ans)**
- **Le propriétaire peut vendre à ce prix et acheter son électricité 11,5 c€/kWh (transport, taxes, commercialisation inclus)**
- **Il a payé son investissement en 7 ans environ.**

Comment se limiter à 500 MW/an

- si $P + Q$ est inférieure ou égale à 36 kW, alors $E = 1$;
- si $P + Q$ est supérieure à 36 kW et est inférieure ou égale à 100 kW,
- si $P + Q$ est supérieure à 100 kW, alors $E = 0$.

x 2

<i>Puissance crête cumulée des installations souhaitant bénéficier du tarif d'intégration au bâti et situées sur des bâtiments à usage principal d'habitation pour lesquelles une demande complète de raccordement a été effectuée durant le trimestre i</i>	<i>Valeur du coefficient S_i</i>
Supérieure à 65 MW	0,095
Supérieure à 55 MW et inférieure ou égale à 65 MW	0,075
Supérieure à 45 MW et inférieure ou égale à 55 MW	0,060
Supérieure à 35 MW et inférieure ou égale à 45 MW	0,045
Supérieure à 27 MW et inférieure ou égale à 35 MW	0,035
Supérieure à 23 MW et inférieure ou égale à 27 MW	0,026
Supérieure à 15 MW et inférieure ou égale à 23 MW	0,020
Supérieure à 5 MW et inférieure ou égale à 15 MW	0,015
Inférieure ou égale à 5 MW	0,000

x 2

$$T_1 = 46 \times D \times \prod_{i=1}^{N-1} (1 - S_i)$$

x 4

Et trois critères d'intégration + 8 exceptions

Evolution obligation achat électricité solaire (c€/kWh)

PUISSANCE kWc	2010	Avant 1/07/2011	Avant 1/10/2011	Avant 1/01/2011	Evol. 2011
Moins de 9	58	47	42,55	40,63	-14%
9 à 36	51	40,25	37,23	35,55	-12%
36 à 100 Collectivités industrie	44	28,8	26,1	23,61	-18%
Grandes Installations	A.0.	12	11,7	11,38	-5%

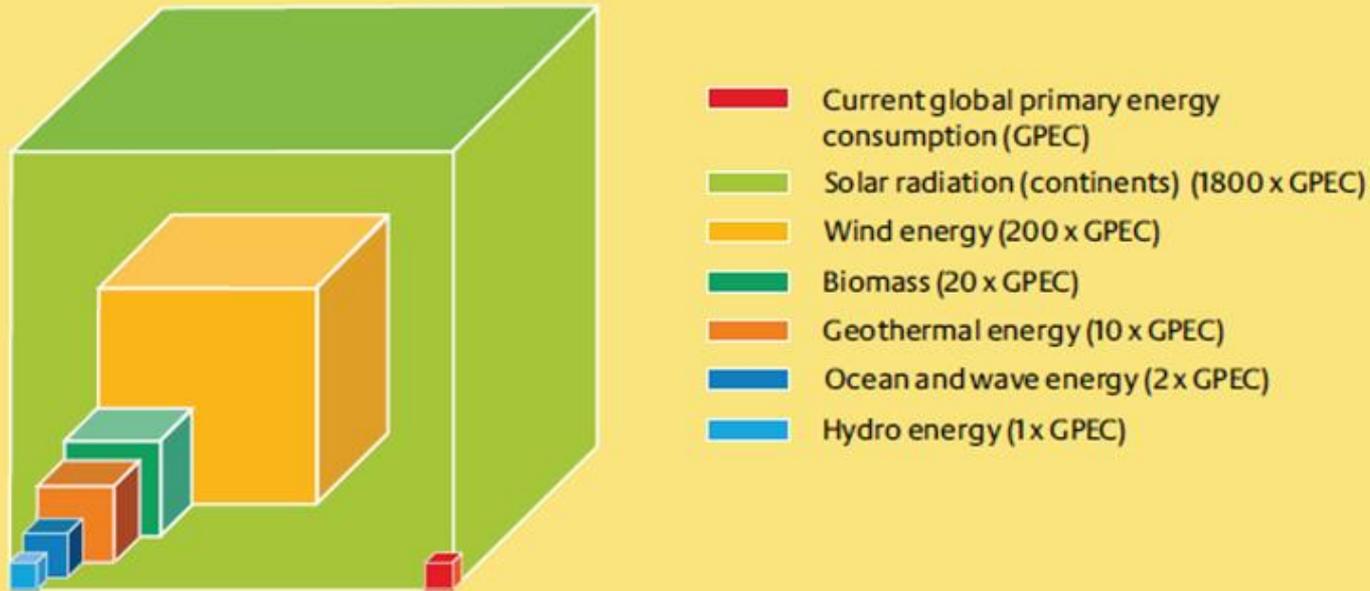
Moyenne France: 5 c€/kWh

Allemagne: 18 à 24,4 fin 2011 et Espagne: 20 à 28

QU'ATTENDRE DU SOLAIRE?

Quelques
données de base

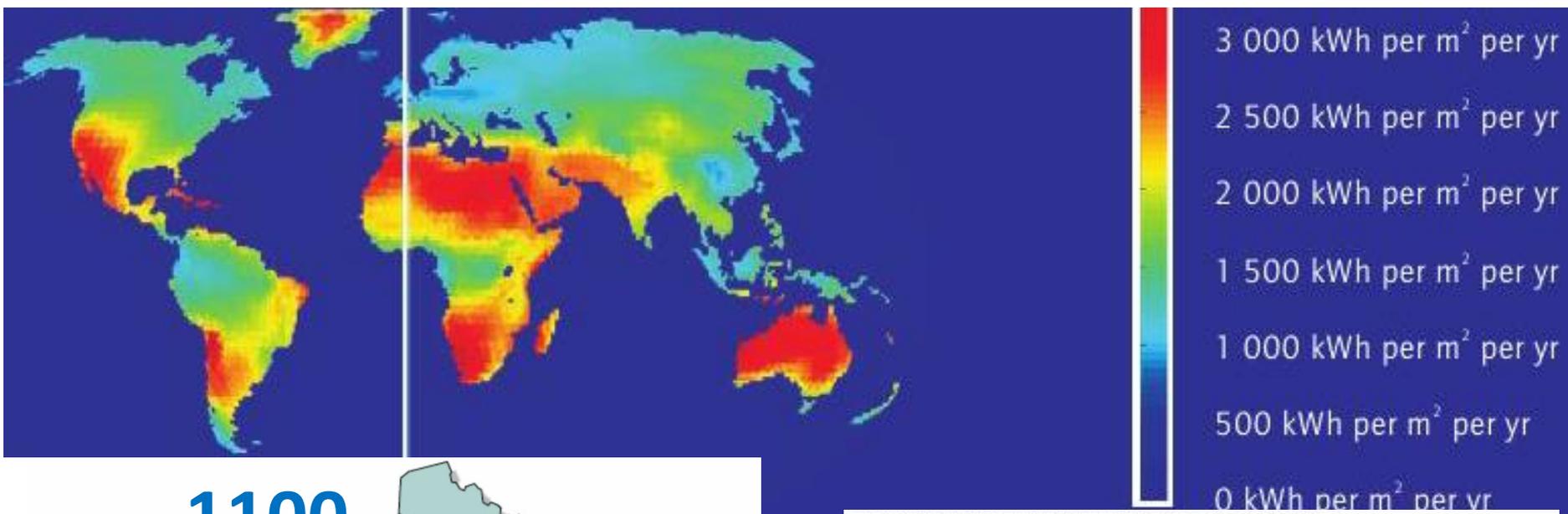
The physical potential of renewable energies



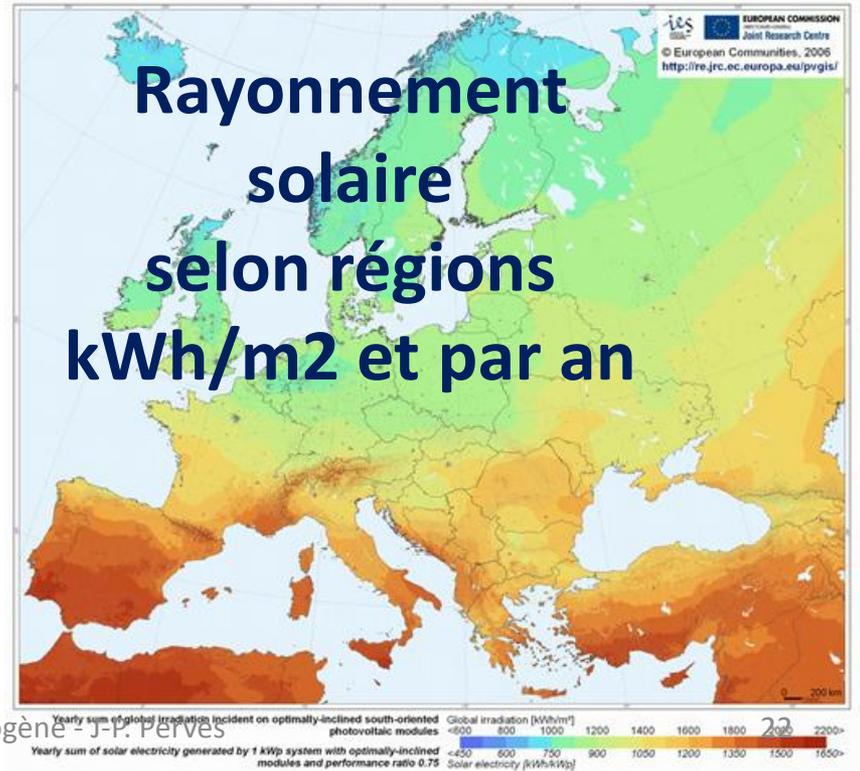
Source: Nitsch, F. (2007): Technologische und energiewirtschaftliche Perspektiven erneuerbarer Energien. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

**L'énergie solaire représente 6000 fois nos besoins
UNE COMPARAISON TROMPEUSE?
UNE VRAIE OPPORTUNITE?**





Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



1100

- 30 à 35%

- 20 à 22%

1800

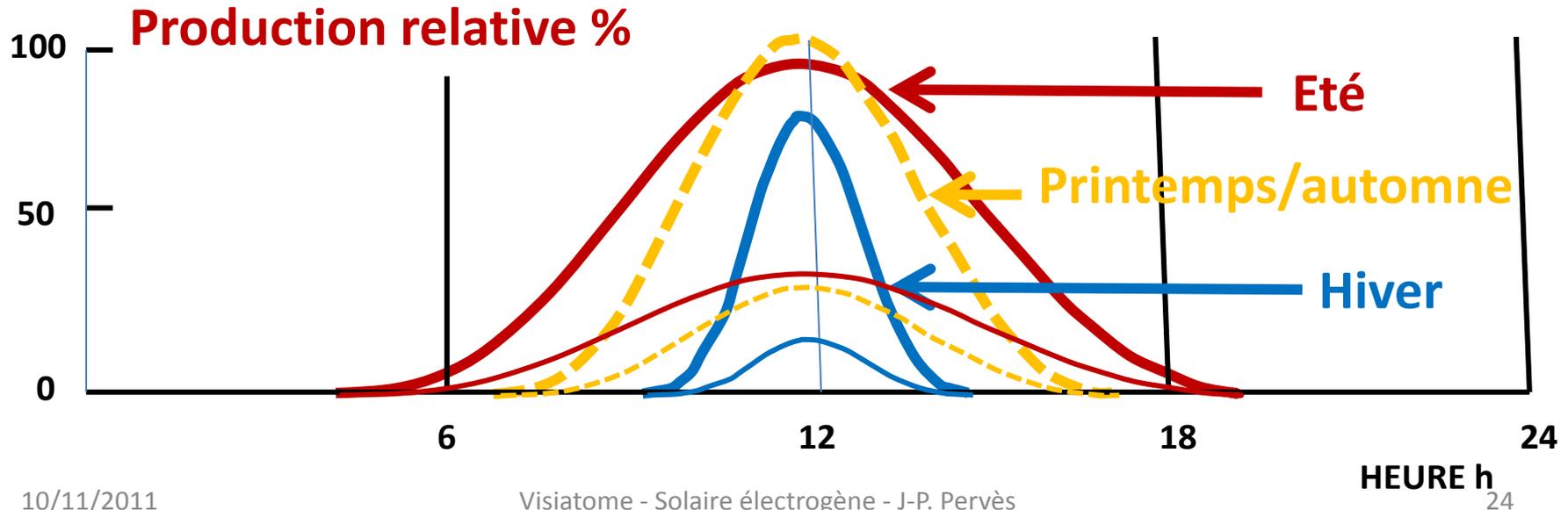
Le gisement solaire*
 (en kWh/m² par an)

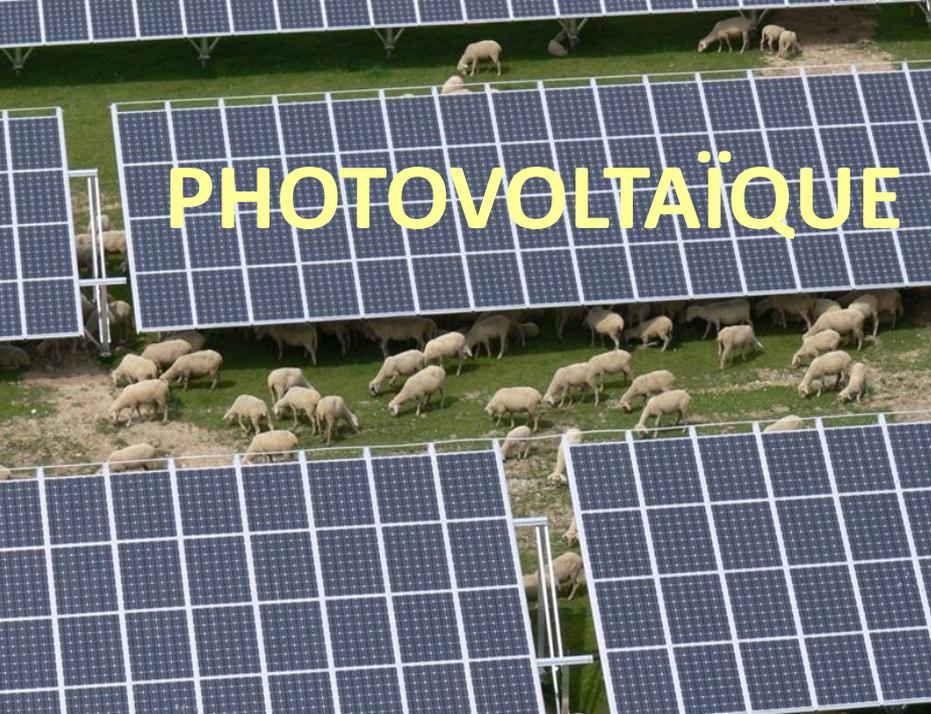
- moins de 1 220
- de 1 220 à 1 350
- de 1 350 à 1 490
- de 1 490 à 1 620
- de 1 620 à 1 760
- plus de 1 760

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

LE SOLAIRE ELECTROGENE EN 2010

Intermittence quotidienne et annuelle de l'énergie photovoltaïque

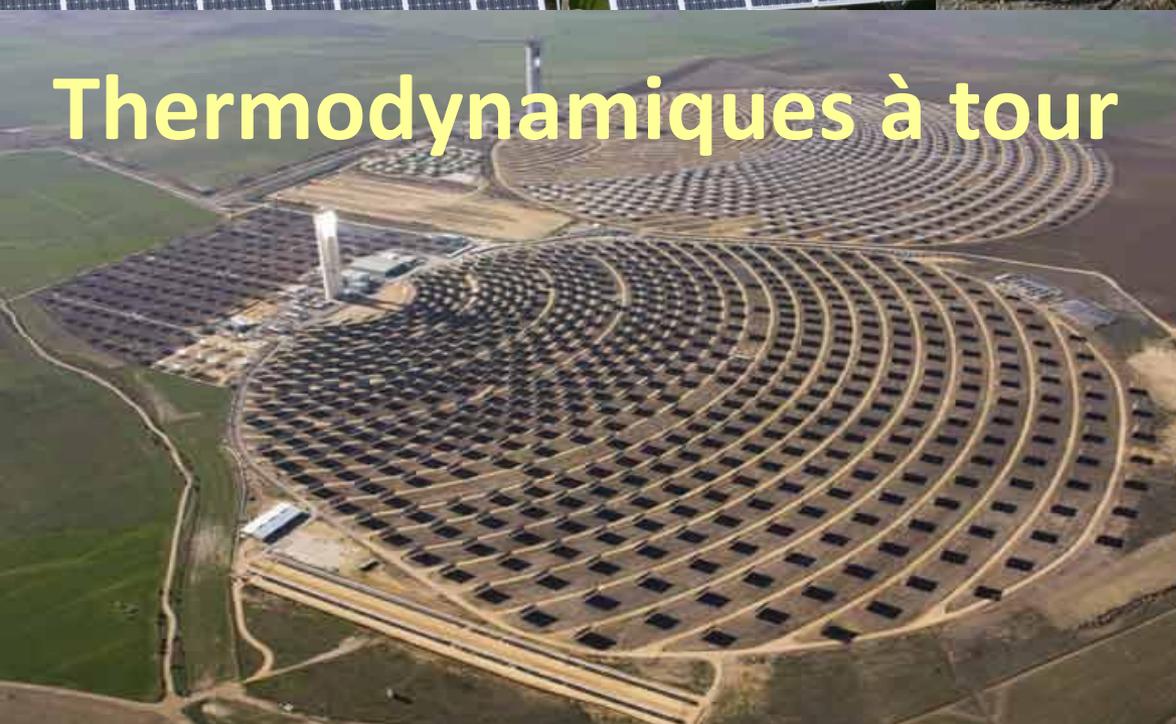




PHOTOVOLTAÏQUE



CYLINDRO-PAROBOLIQUES



Thermodynamiques à tour



**Parabolique
Sterling**

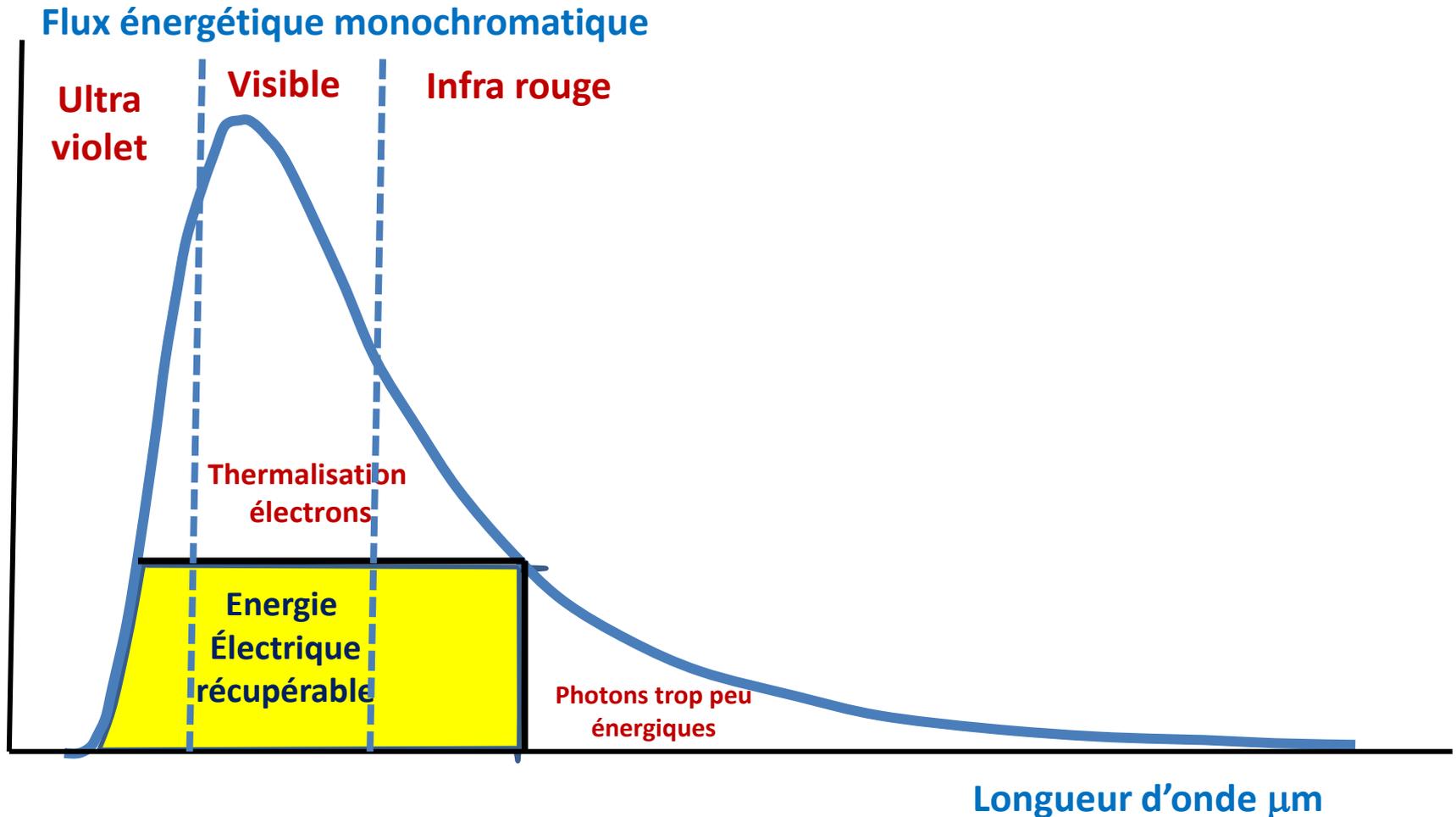
SOLAIRE Photovoltaïque

LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES COMPRENONS NOUS BIEN



- Environ 1000 W d'énergies solaire/m² en France
- Ils sont caractérisés par leur puissance crête
- Il faut tenir compte de:
 - Efficacité liée à l'ensoleillement: de 12 à 20 % en France (1100 à 1800 HEPP par an)
 - Efficacité panneaux solaires de 4 à 15%
 - Efficacité transfert/charge batteries: 95%
- Efficacité : 0,5 % à 2,4 % sur l'année
 - Soit de 60 kWh à 210 kWh/an par m²
 - Ou une puissance moyenne de 7 à 24 W/ m² selon le type de cellule: lampe basse consommation

Flux énergétique provenant du soleil au niveau du sol



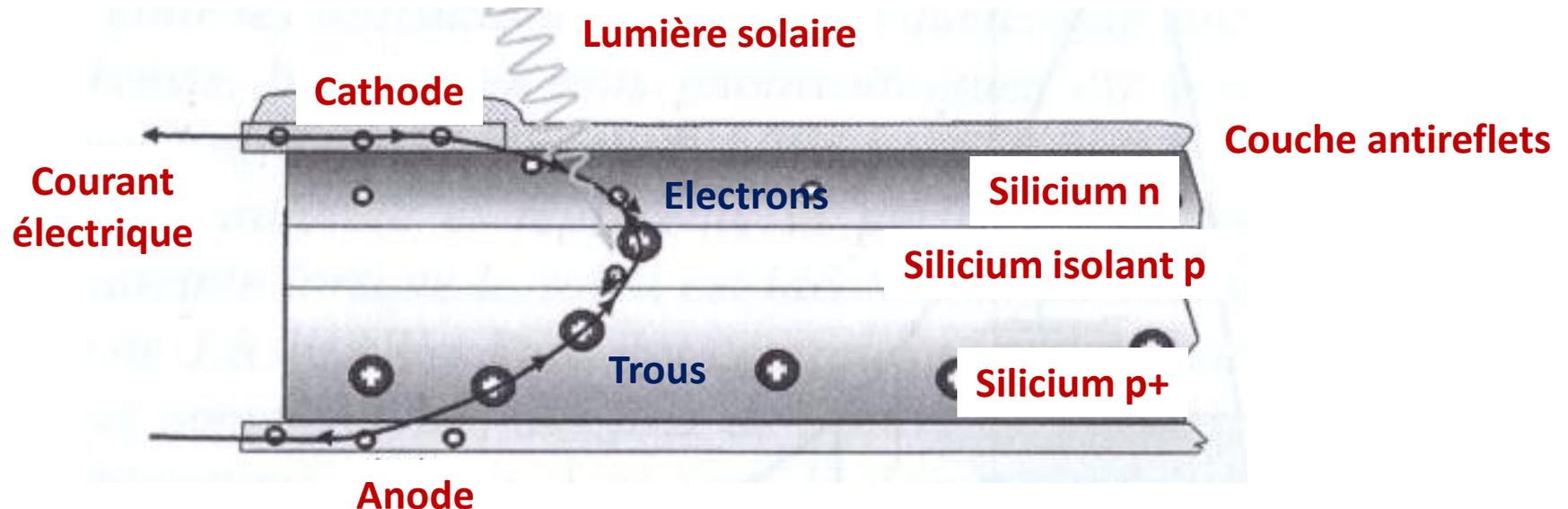
Les principales technologies

- **Silicium (plus de 85 % du marché)**
 - Monocristallin
 - Polycristallin
- **Films minces (environ 12% du marché)**
 - Silicium amorphe hydrogéné (a-SiH)
 - Cu(InGa)Se₂ (CIGS)
 - CdTe
 - Organiques

Cellule photovoltaïque silicium

Principe de fonctionnement

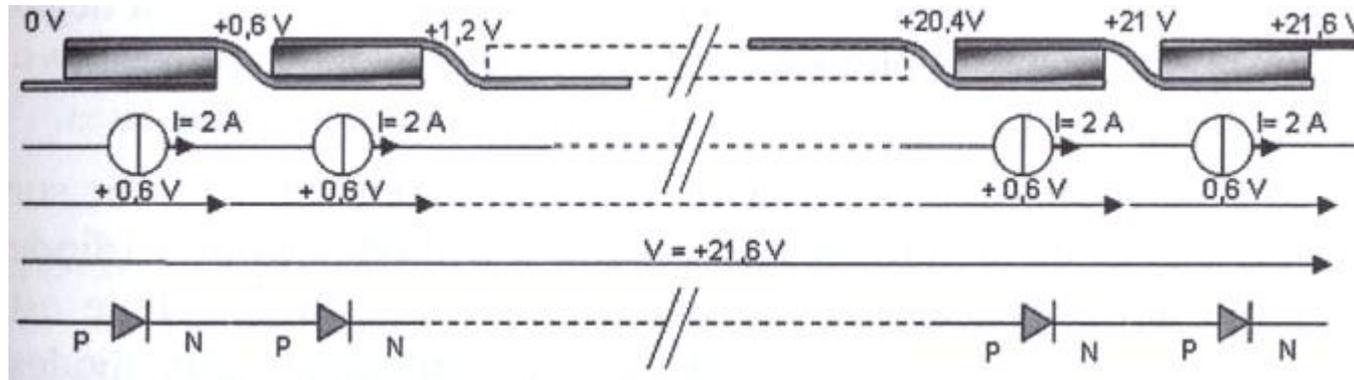
La cellule photovoltaïque est une photo diode, non polarisée, qui génère du courant quand elle est exposée à la lumière



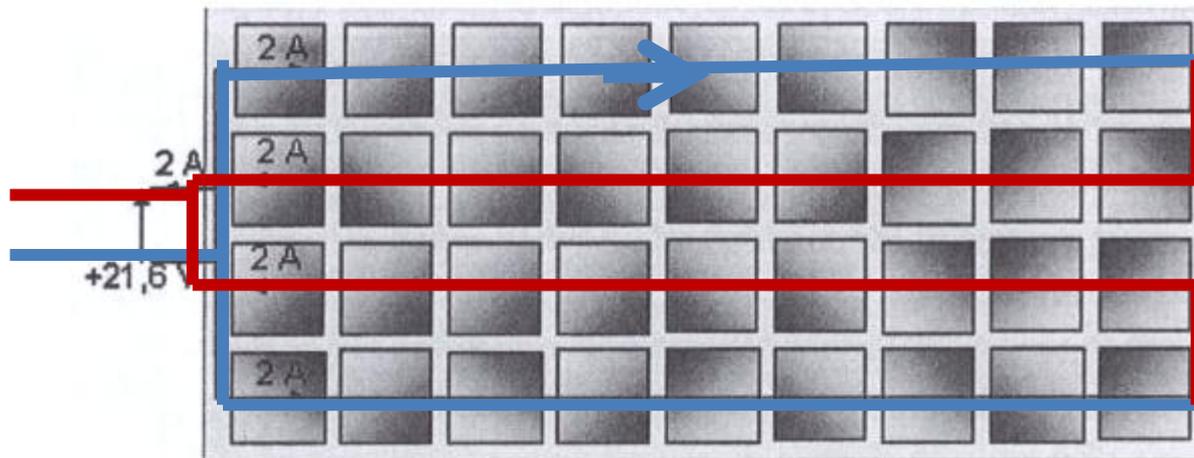
Comment est fabriquée une cellule photovoltaïque

- La base est le silicium, abondant sur terre sous forme d'oxydes
- Il est transformé en silicium métallurgique à 99% de pureté
- Cristallisation du Si (mono ou polycristal) et purification (impuretés: 1/10.000.000)
- Découpe de tranches de 200 à 300 microns d'épaisseur
- Dopage des galettes en salles blanches
- Encapsulage dans un polymère transparent (éthylène vinyle acétate)
- Montage entre du verre et une feuille réfléchissante
- Assemblage dans un châssis
- Il faut 60 à 150 g de CO² par kWh produit

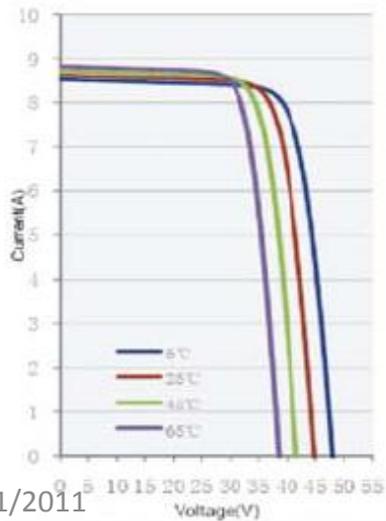
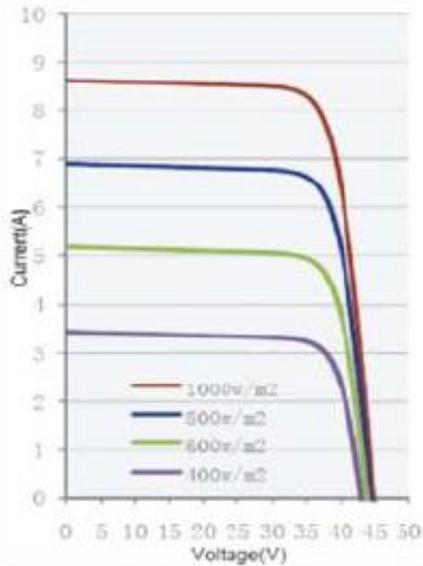
Assemblage de cellules photovoltaïques en modules



Guirlande de cellules photovoltaïques et modèle équivalent

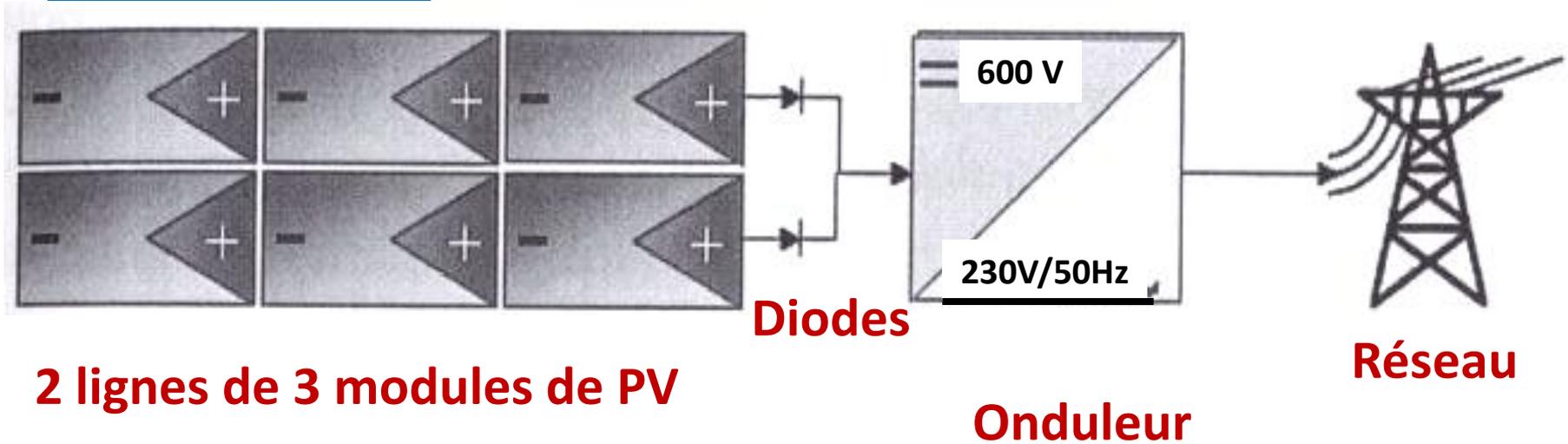


Montage classique de cellules

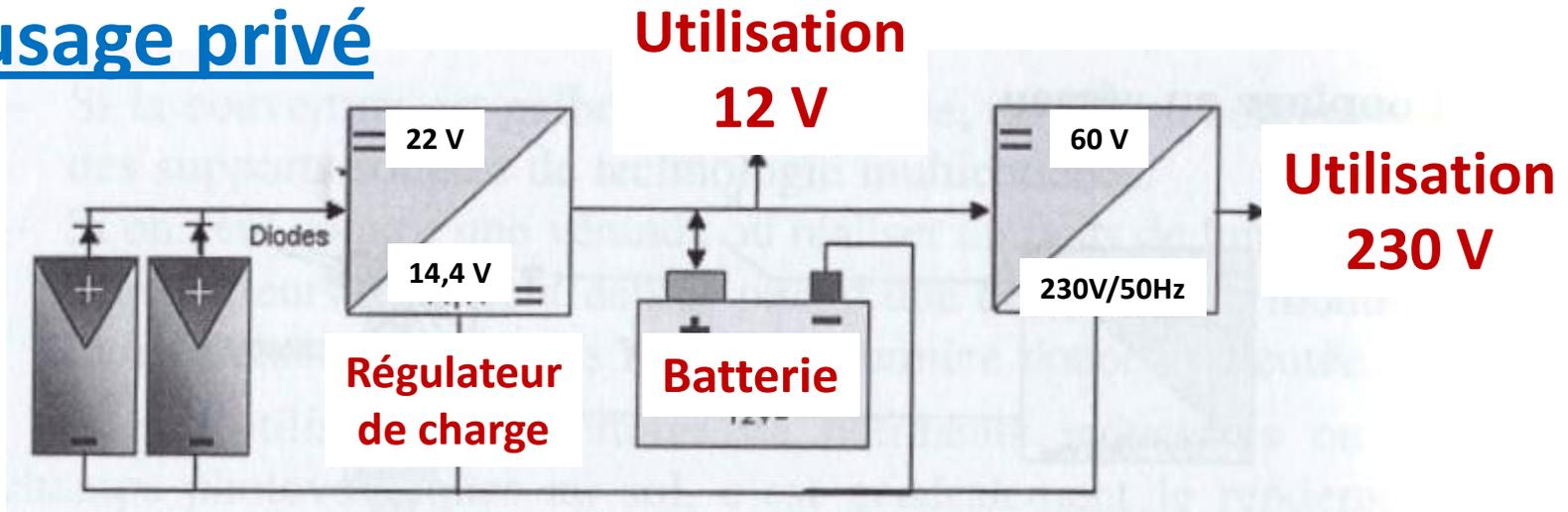


Le raccordement de panneaux photovoltaïques

A: au réseau



A: usage privé





Modules Canadian Solar monocristallins

STC	CS6X-280M	CS6X-285M	CS6X-290M
Nominal Maximum Power (Pmax)	280W	285W	290W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	36.0V	36.1V	36.3V
Optimum Operating Current (Imp)	7.78A	7.89A	8.00A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.6V	44.7V	44.7V
Short Circuit Current (Isc)	8.30A	8.40A	8.51A
Module Efficiency	14.59%	14.85%	15.11%
Operating Temperature	-40°C~+85°C		
Maximum System Voltage	1000V (IEC) /600V (UL)		
Maximum Series Fuse Rating	15A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ +5W		

Temperature Characteristics

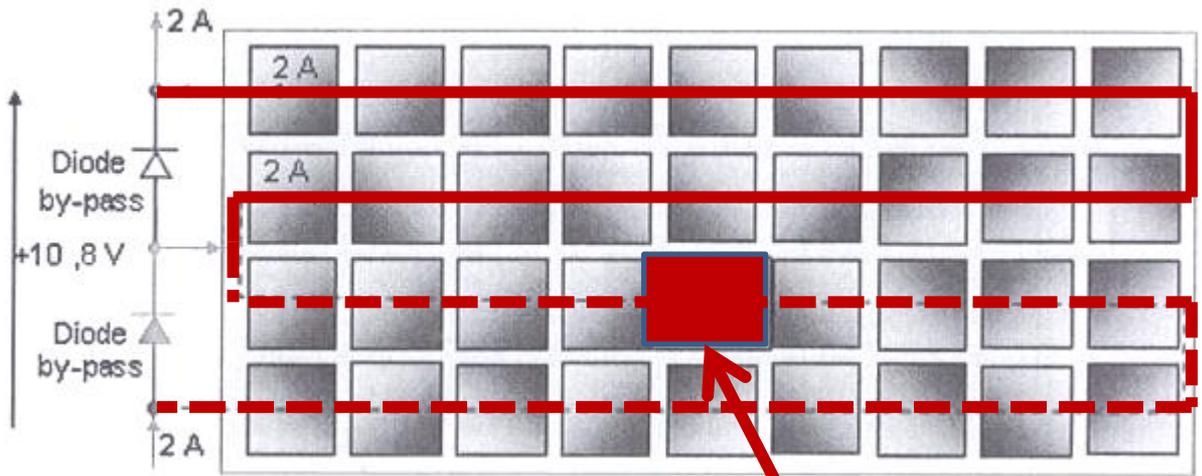
Temperature Coefficient	Pmax	-0.45%/°C
	Voc	-0.35 %/°C
	Isc	0.060 %/°C
Normal Operating Cell Temperature		45±2°C

Mechanical Data

Cell Type	Mono-crystalline 156 x 156mm, 2 or 3 Busbars
Cell Arrangement	72 (6 x 12)
Dimensions	1954 x 982 x 40mm (76.93 x 38.7 x 1.57in)
Weight	27kg (59.52 lbs)
Front Cover	4mm Tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-BOX	IP65, 3 diodes
Cable	4mm ² (IEC)/12AWG(UL), 1300mm
Connectors	MC4 or MC4 Comparable
Standard Packaging (Modules per Pallet)	24pcs
Module Pieces per container (40 ft. Container)	528pcs (40'HQ)

Effet de masques sur panneaux photovoltaïques

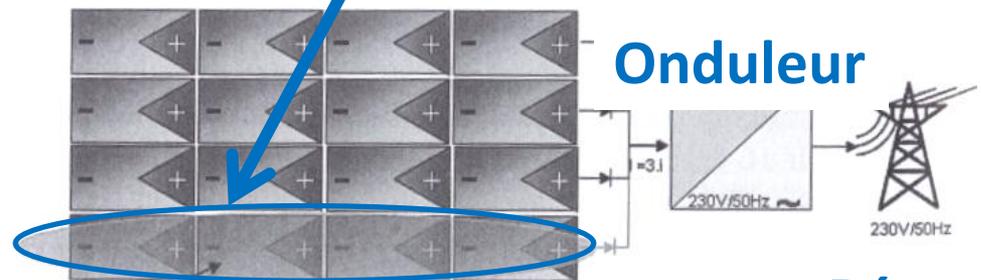
- la cellule occultée devient « réceptrice et chauffe »
- Pour la protéger une diode en by-pass coupe le courant sur la ½ chaîne de cellules



Cellule occultée

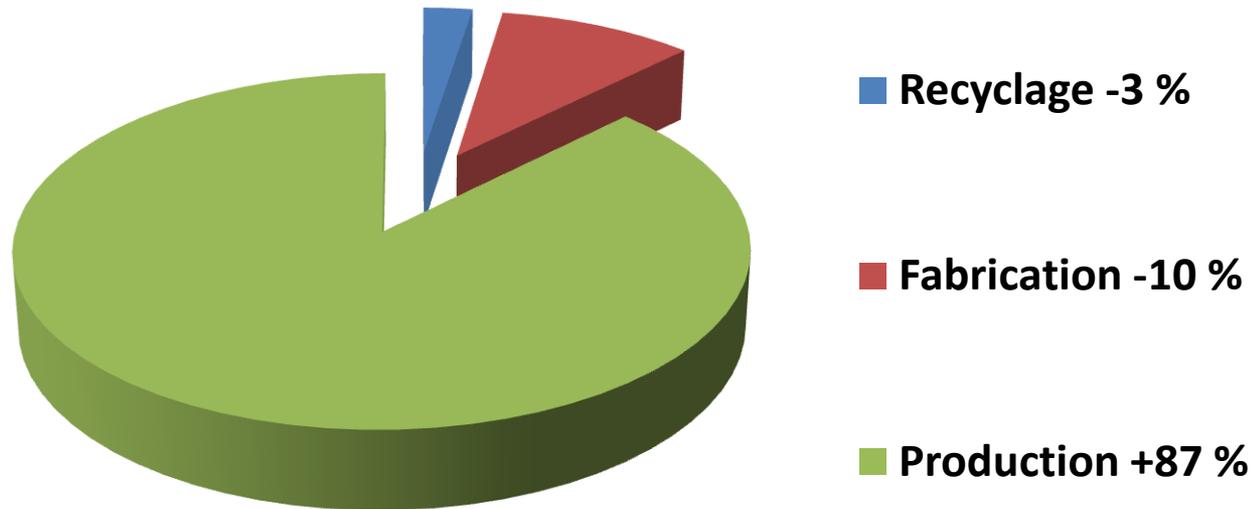
Panneaux occultés

- Un panneau est occulté
- Pour le protéger les panneaux en série sont by-passés



Réseau

Bilan énergétique et CO² d'une installation photovoltaïque Silicium



Bilan énergétique net sur 20 ans 87,5%
Bilan CO² dépendant de celui de la production d'énergie pour la réaliser (de 1 à 3ans?)

Les défauts des cellules silicium

- **Coefficient d'absorption faible**
 - Couches épaisses requises
 - La plupart des électrons et des trous sont générés hors de la couche de charge d'espace
 - Une longueur de diffusion importante est requise
 - Il faut un matériau pur (mais moins que pour la micro électronique)
- **Matériau de base est abondant mais:**
 - Le silicium pur est coûteux

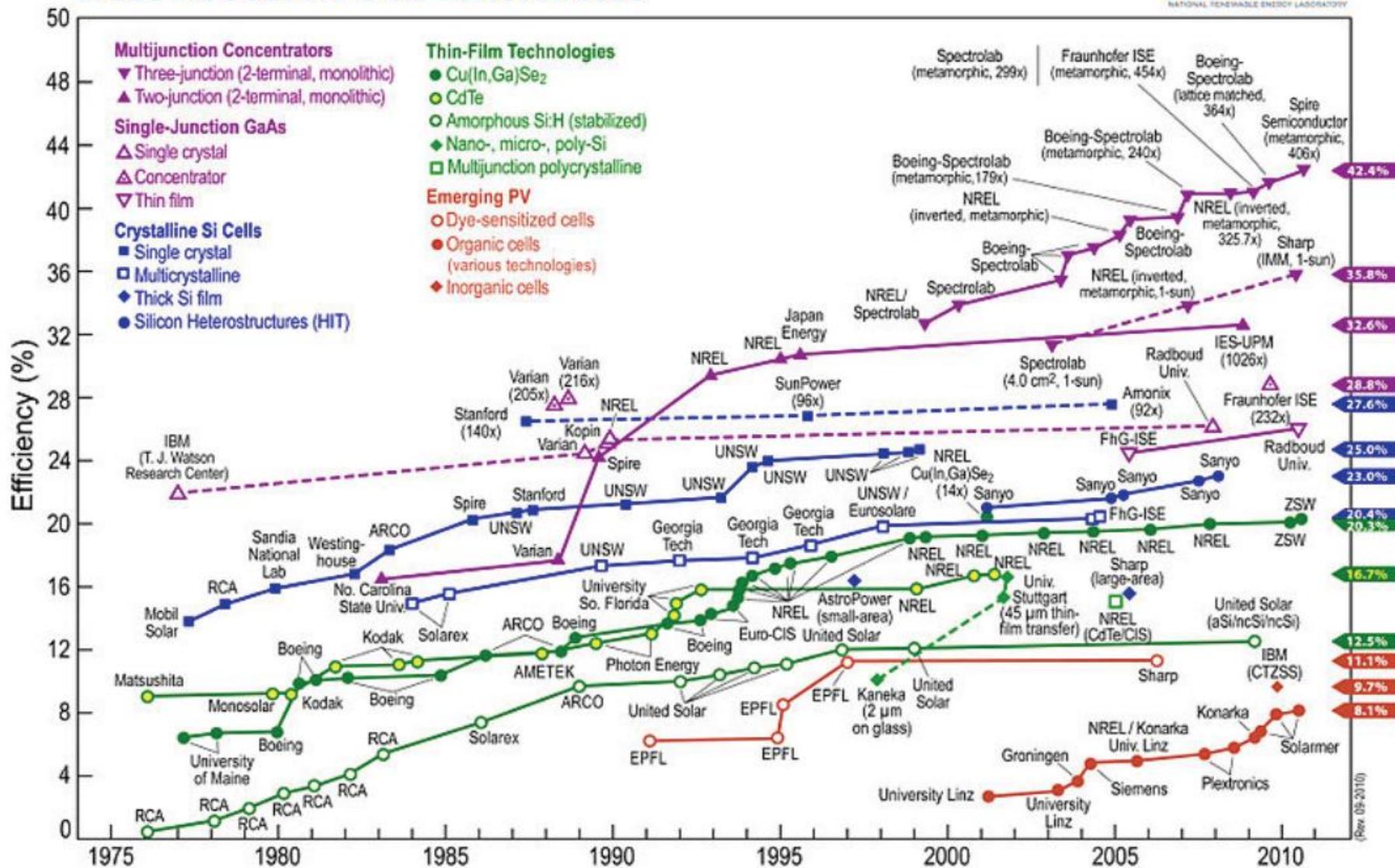
Cellules Photovoltaïques

Comment faire mieux et/ou moins cher?

Les voies sont nombreuses mais le silicium est difficile à détrôner

LES MEILLEURS RESULTATS « RECHERCHE » EN 2011

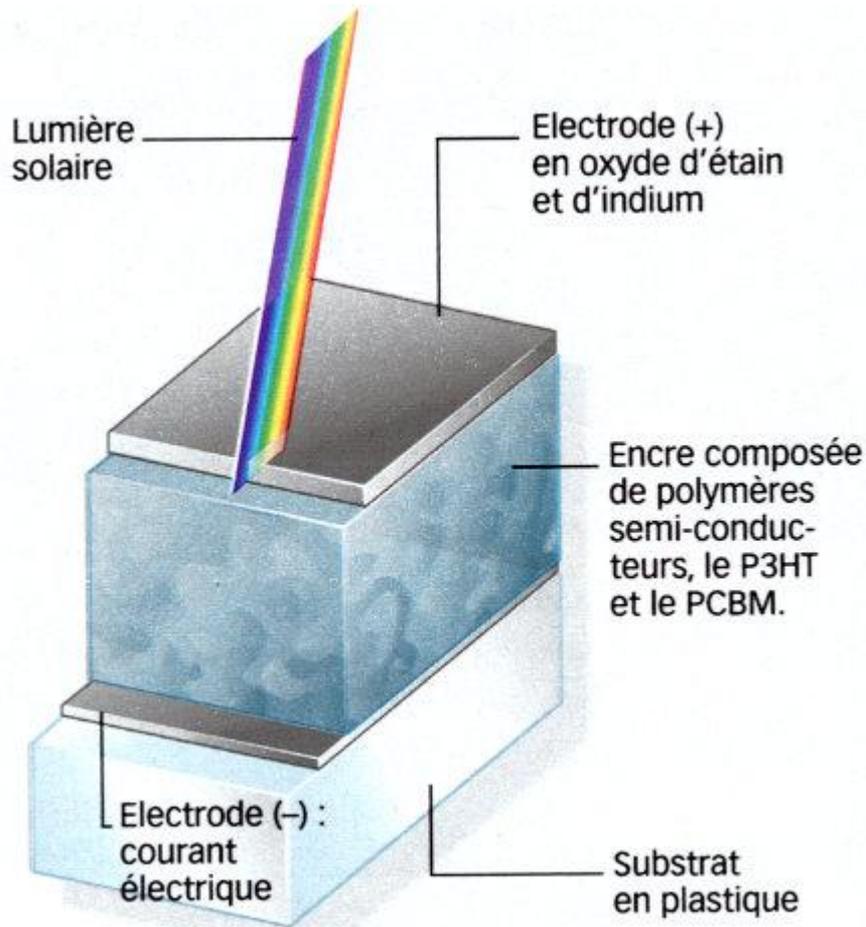
Best Research-Cell Efficiencies



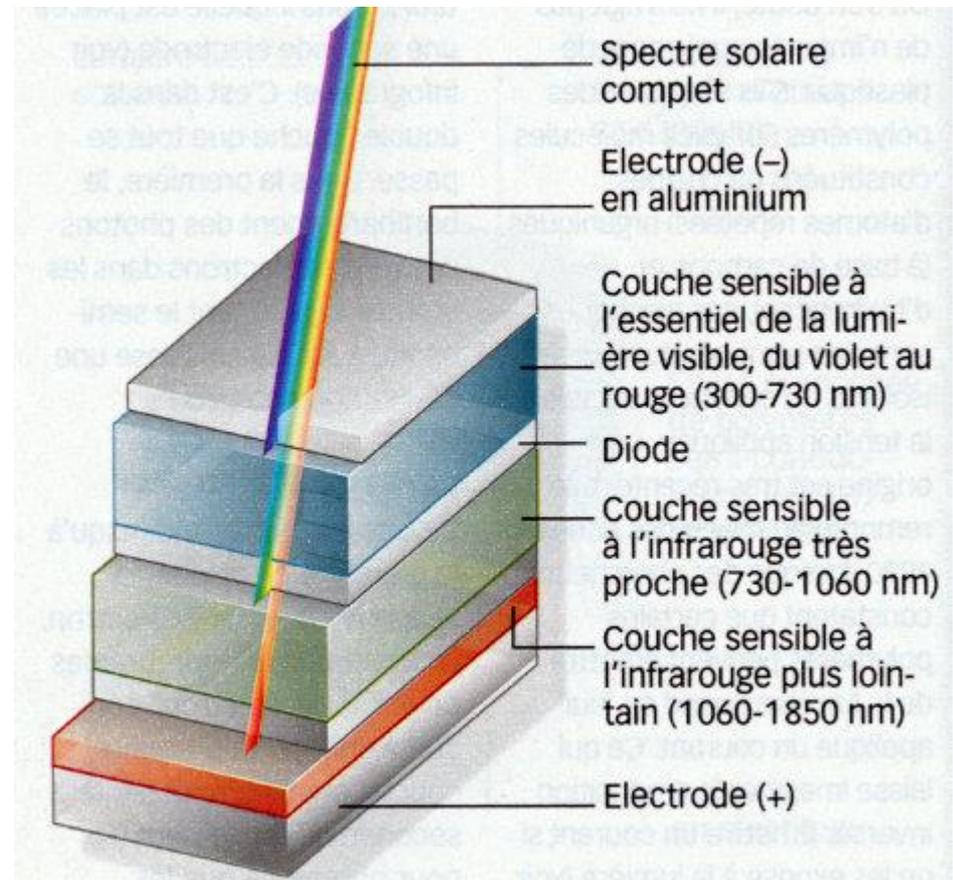
Loi de Moore: doublement puissance à prix constant tous les 18 mois = exponentielle ???

ON JOUE SUR

Le coût de fabrication

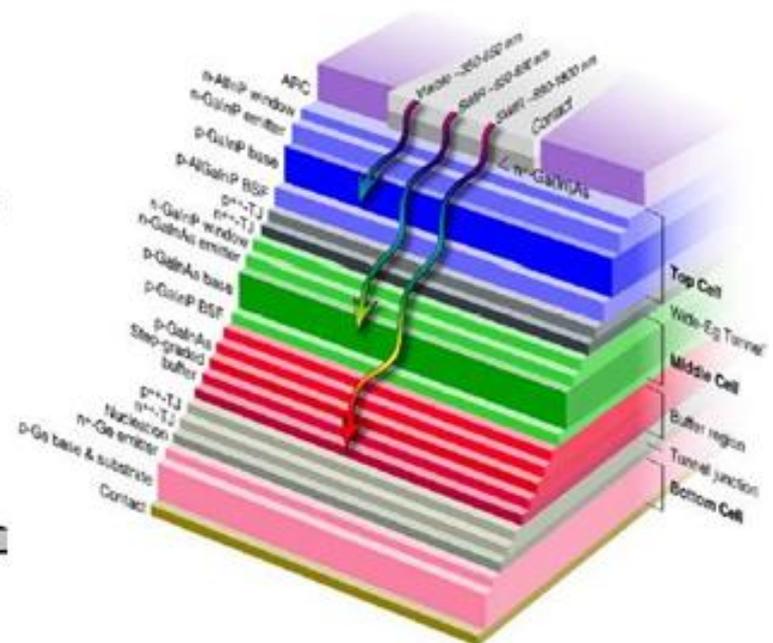
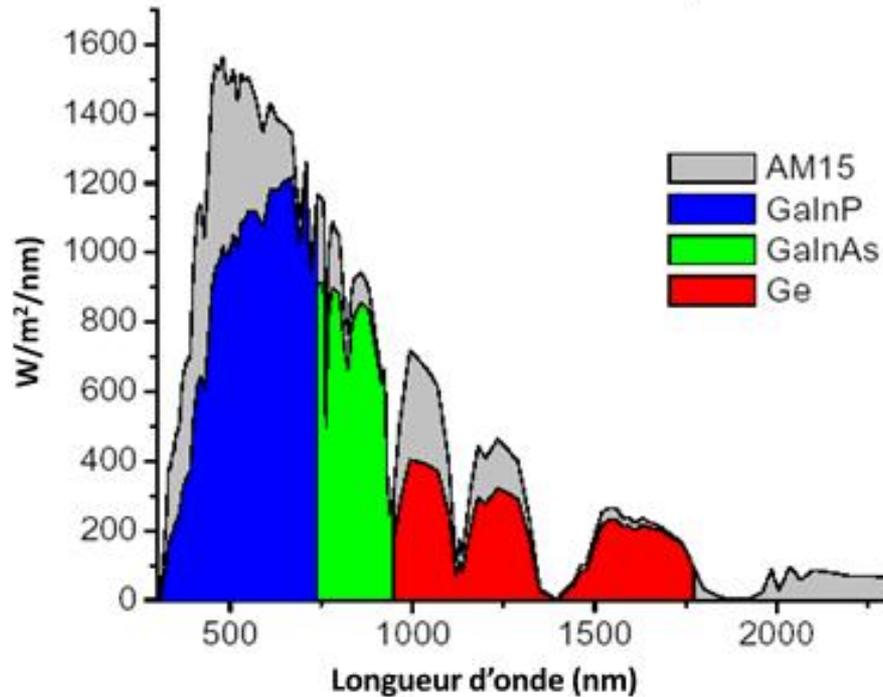


La performance



LA SOLUTION LA PLUS LUXUEUSE (ET CHERE) LE CONCEPT MULTIJONCTION

III-V Compounds and Si based

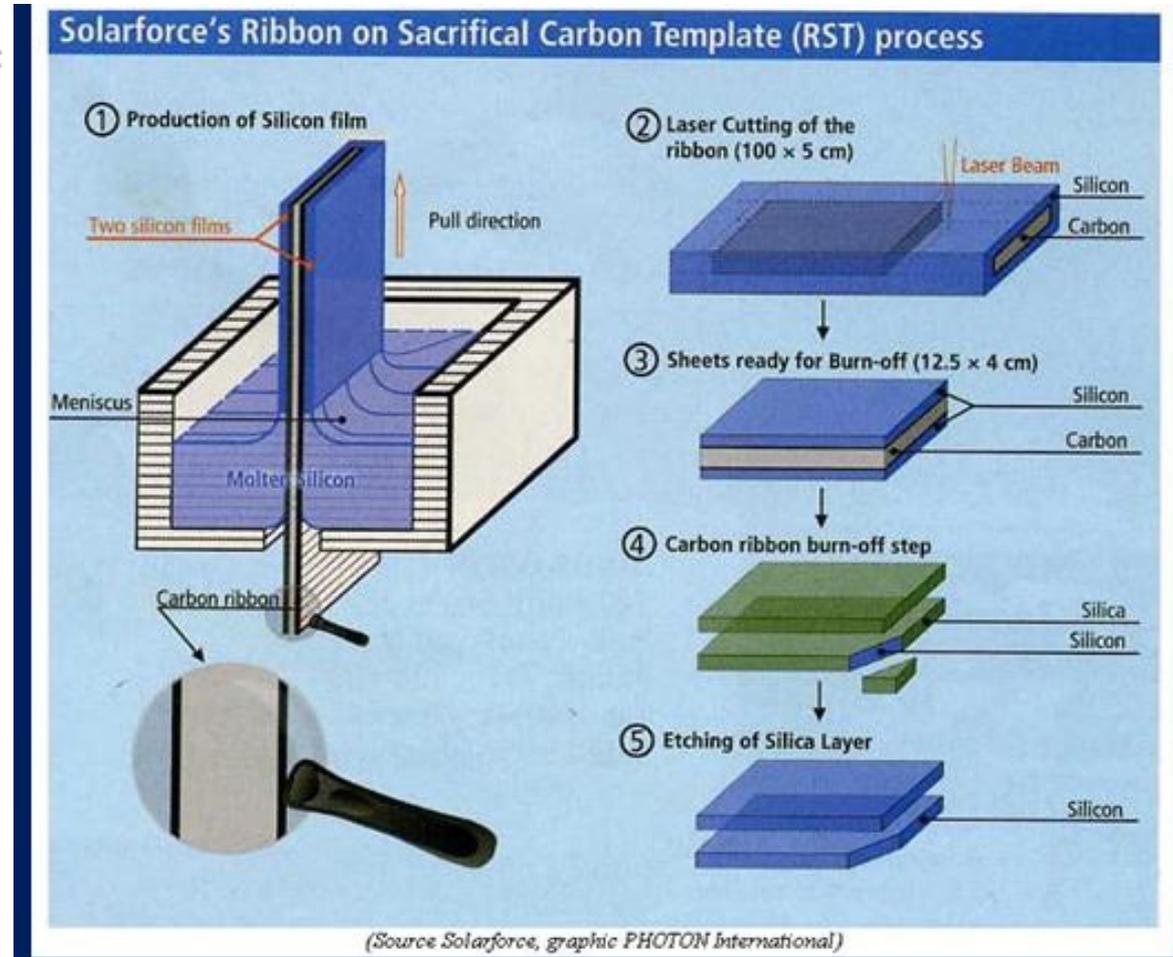
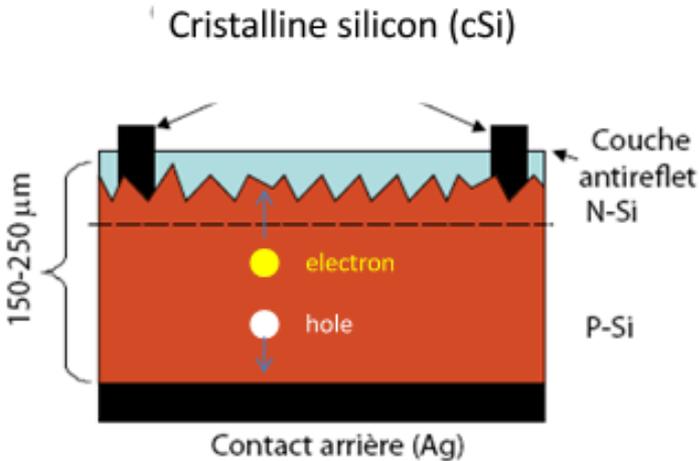


More than 40% under concentration (x 286)
Spectrolab
Very complex, very costly

Les progrès des cellules silicium

Découpe mince: 100 μ

Par trempé dans Si fondu



La filière « couches minces » 12% du marché

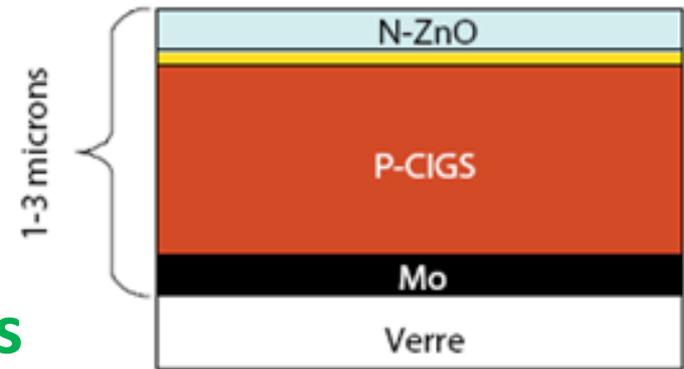
On dépose des couches successives
sur un substrat verre

Les couches étant très absorbantes
elles peuvent être très fines:
quelques microns au lieu de
200 pour le silicium

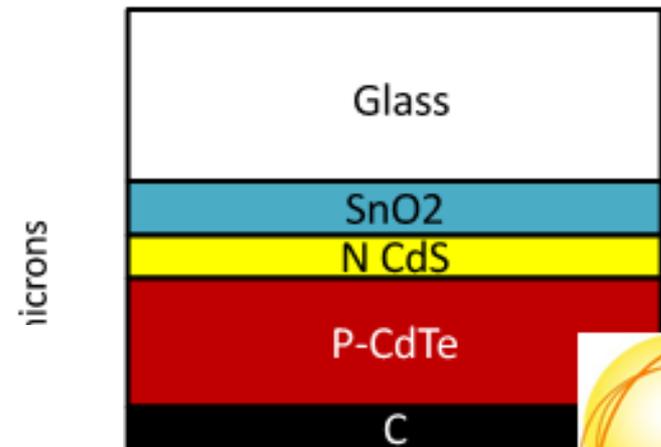
Tellure de cadmium (CdTe) : 16,5 % max 10-11% mod

Diséniure de cuivre et d'indium (CIS) : 20% max 10-14% mod

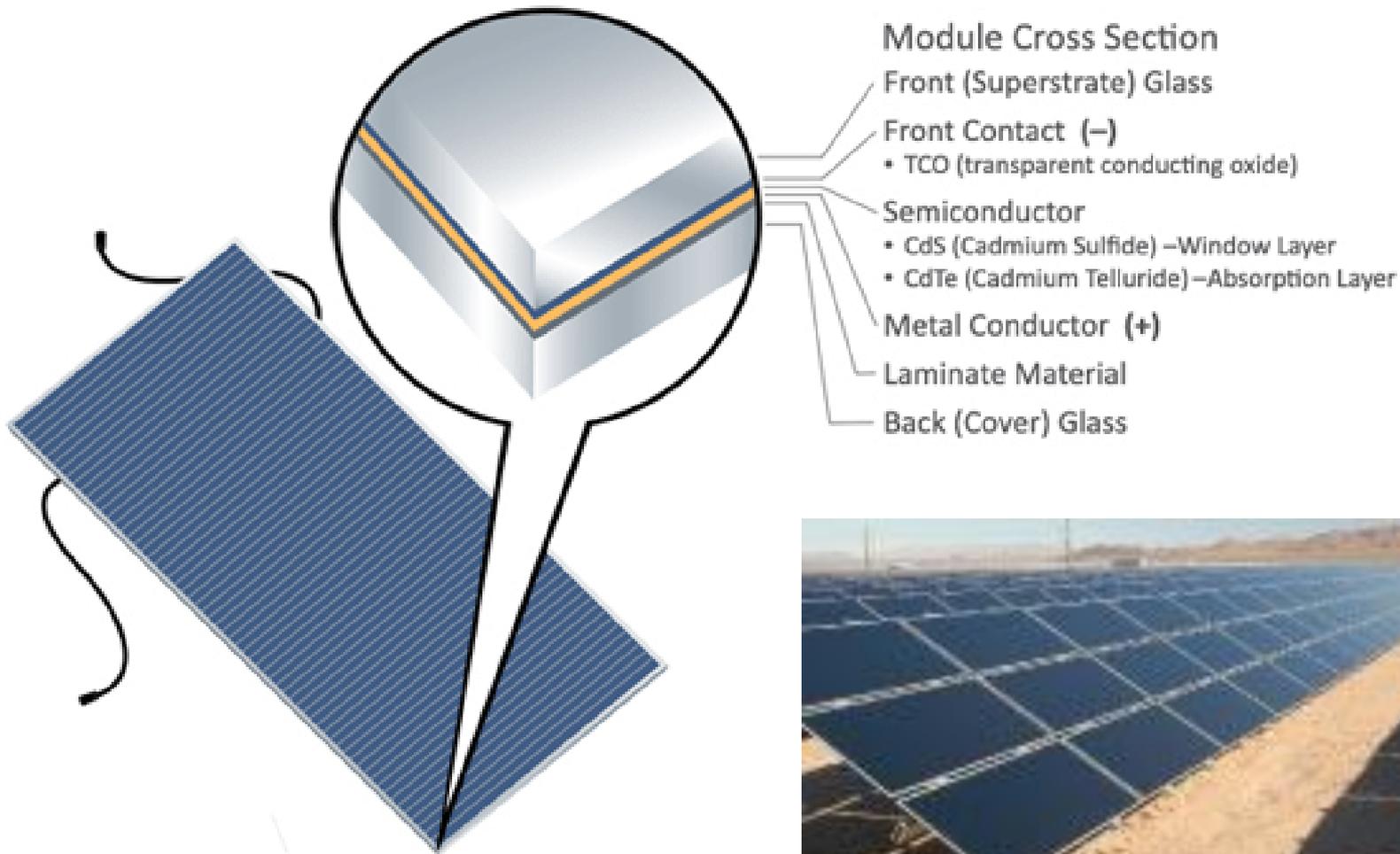
Copper Indium gallium diselenide (CIGS)



Cadmium telluride (CdTe)



First Solar: panneaux CdTe



Dépôts



First Solar Module Efficiencies: Reported Data (2001-Q1 2010), and Road Map Target (14.4%)

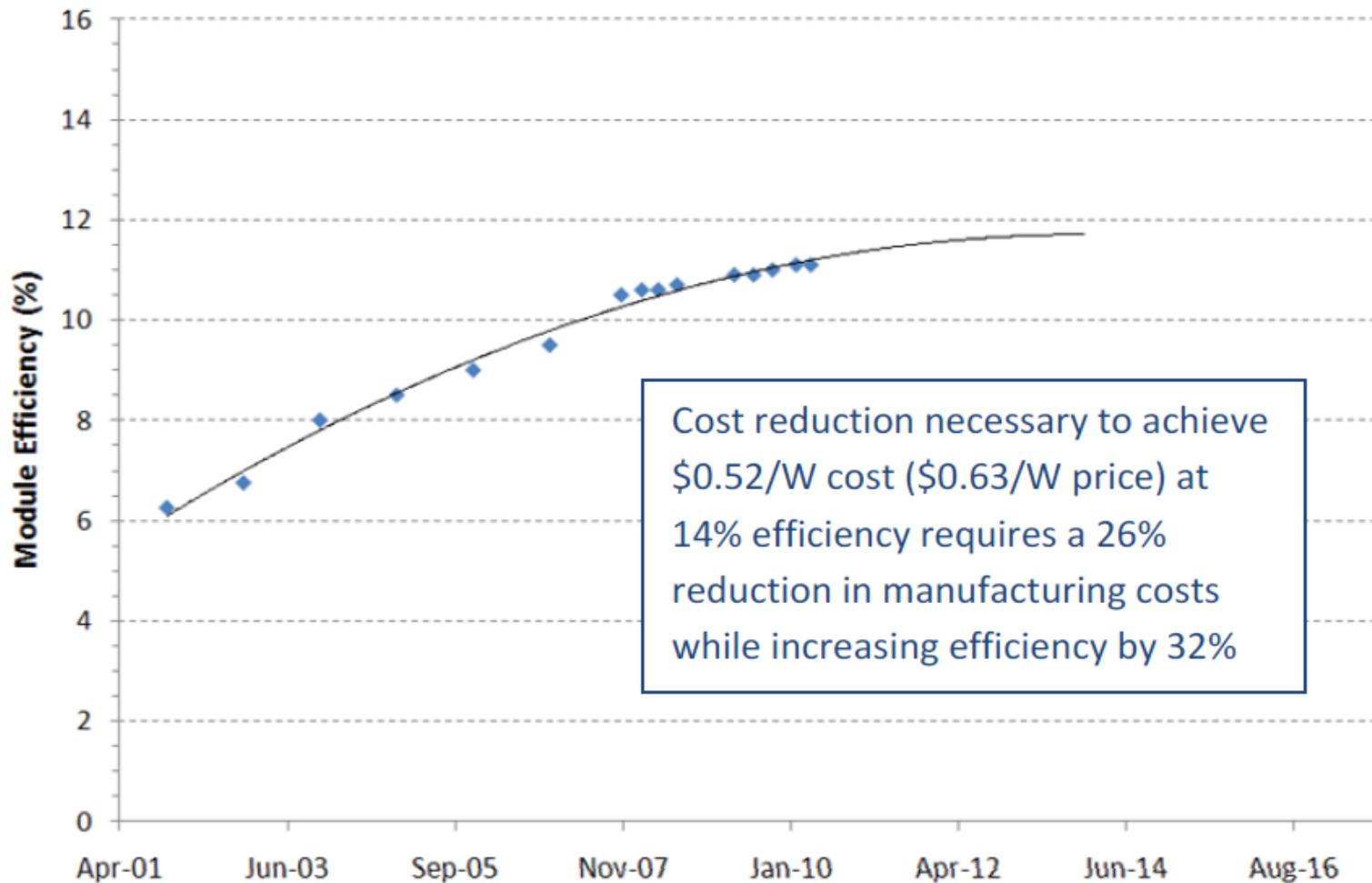
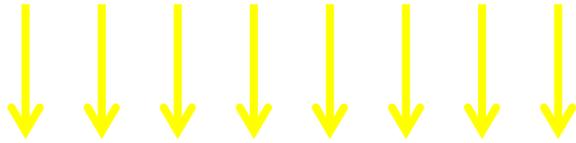
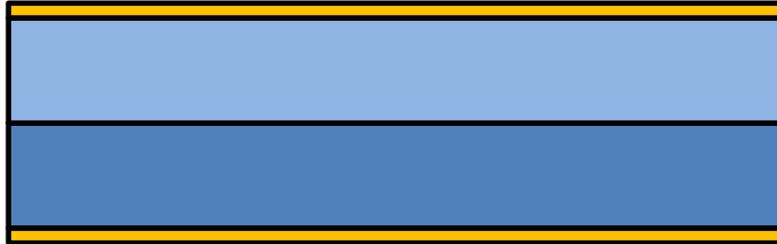


Figure 13 Quarterly reported module efficiencies for the leading CdTe manufacturer First Solar suggests that significant innovation is required to continue to advance the technology.

Les cellules organiques souples



100
nm



Conducteur anode transparente

Accepteur

Donneur

Conducteur cathode

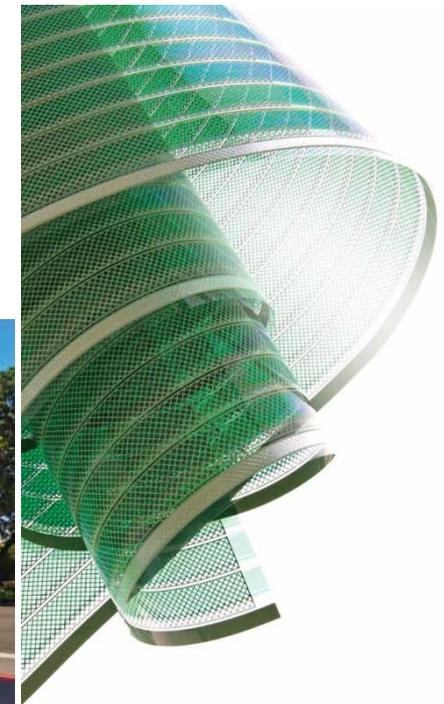
16 Wc/m²

12 V

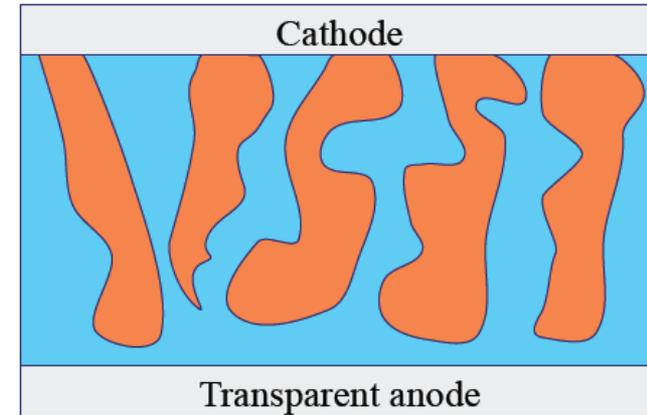
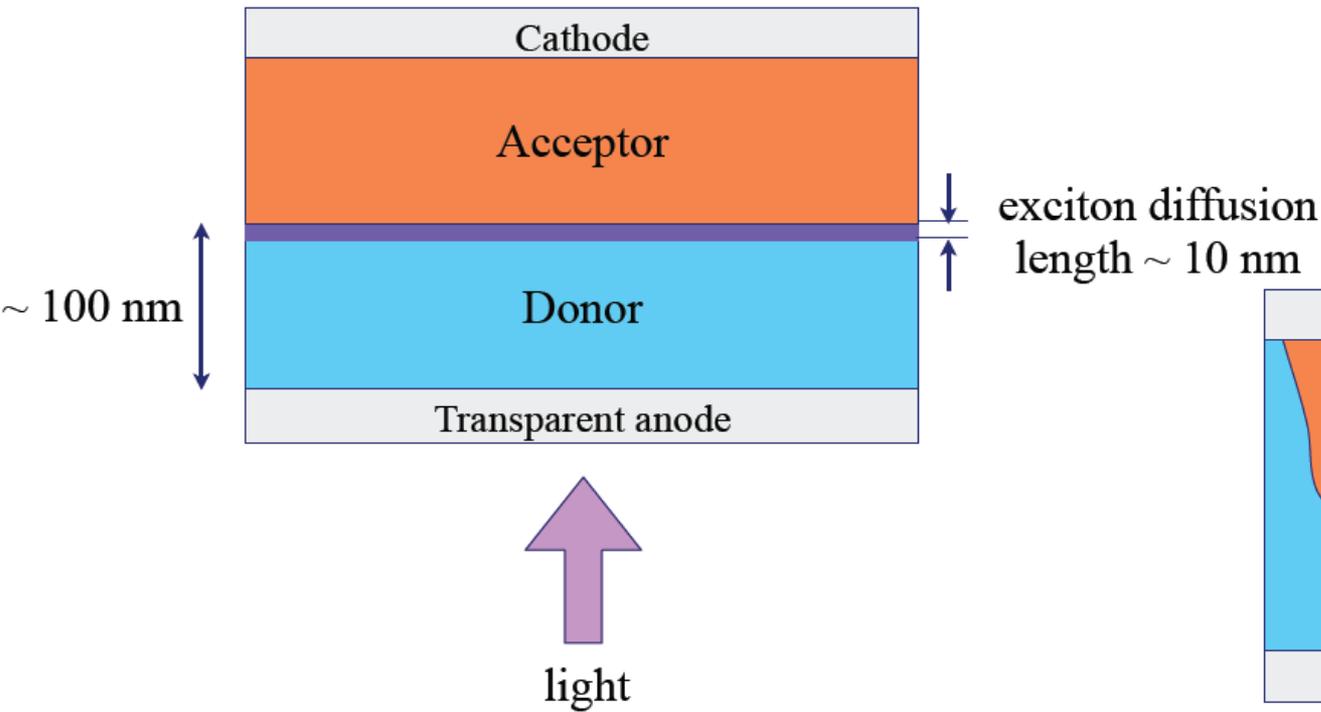
1500x350 mm



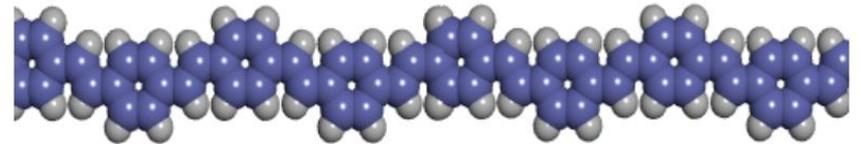
<http://www.konarka.com>



LES CELLULES ORGANIQUES



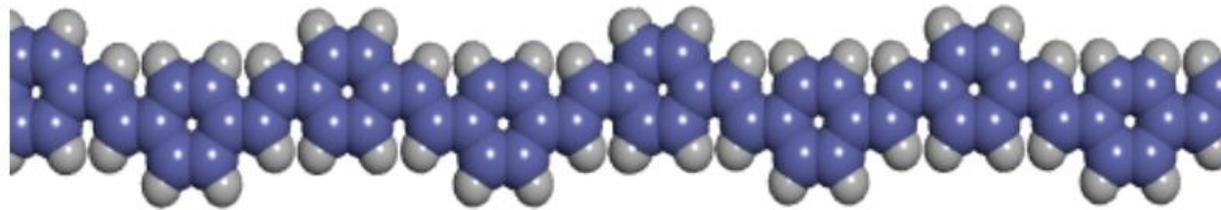
Poly(paraphenylenevinylene) (PPV)



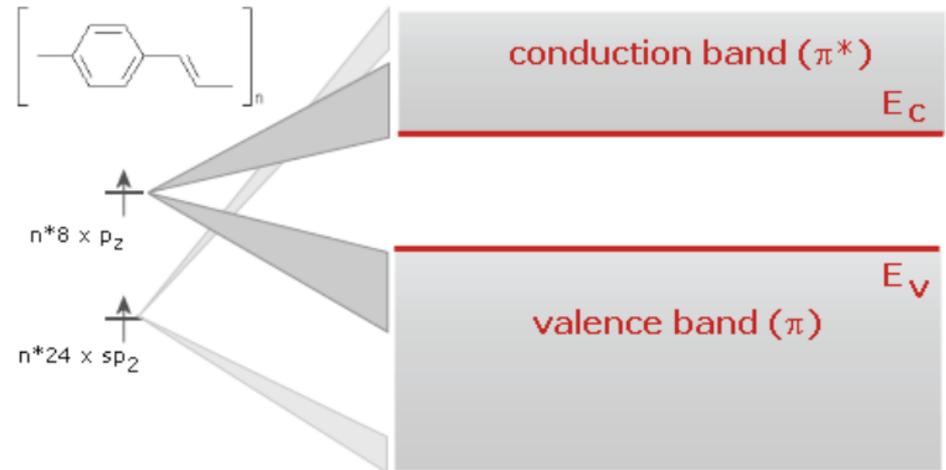
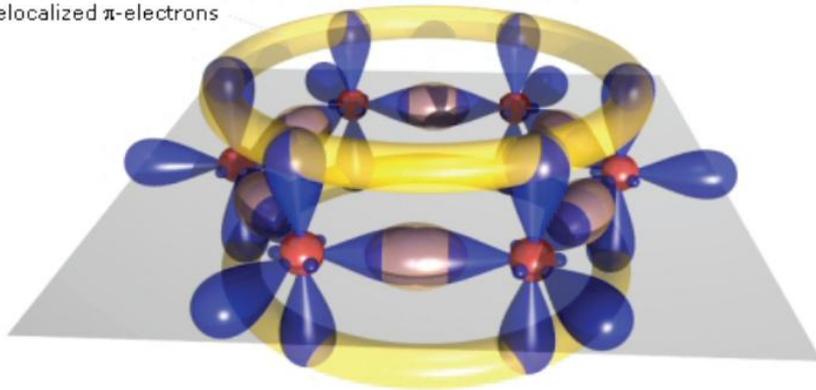
Cellules à double couche

Bulk heterojunction (BHJ) cell

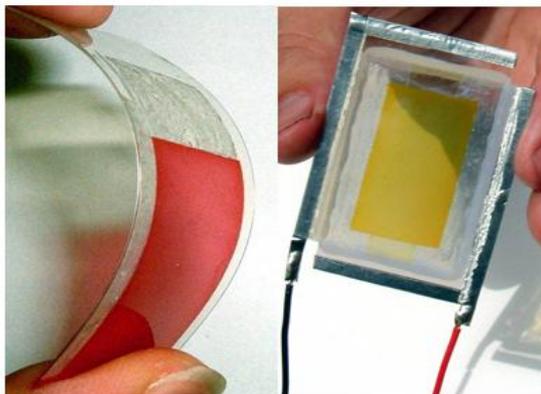
Poly(paraphenylenevinylene) (PPV)



delocalized π -electrons



LES CELLULES NANOCRISTALLINES A COLORANTS: rendement 5,6%



Rendement actuel 5,6 %

T. Yoshida et al.

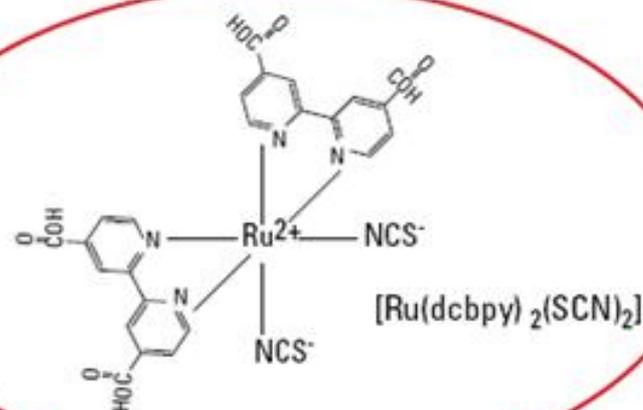
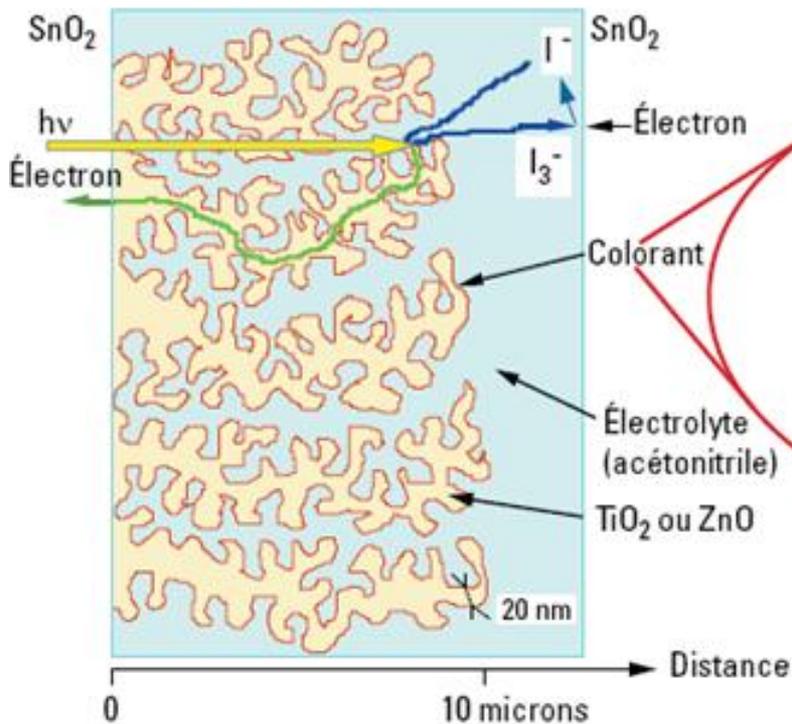
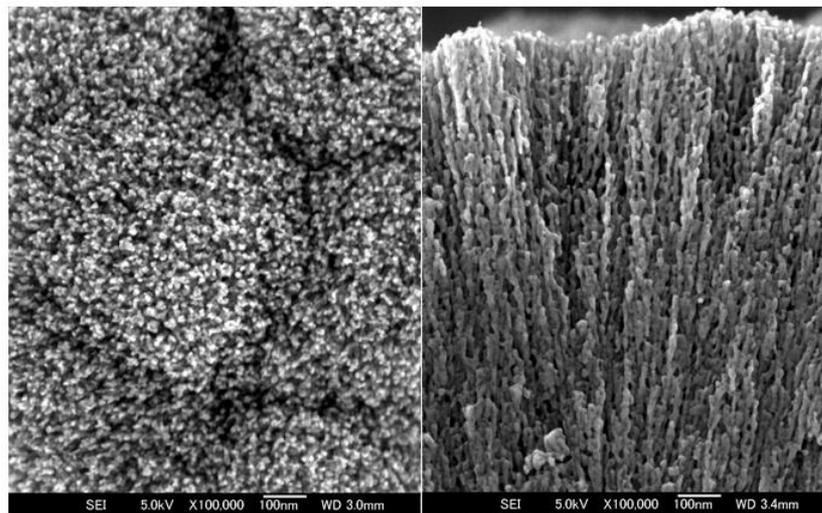
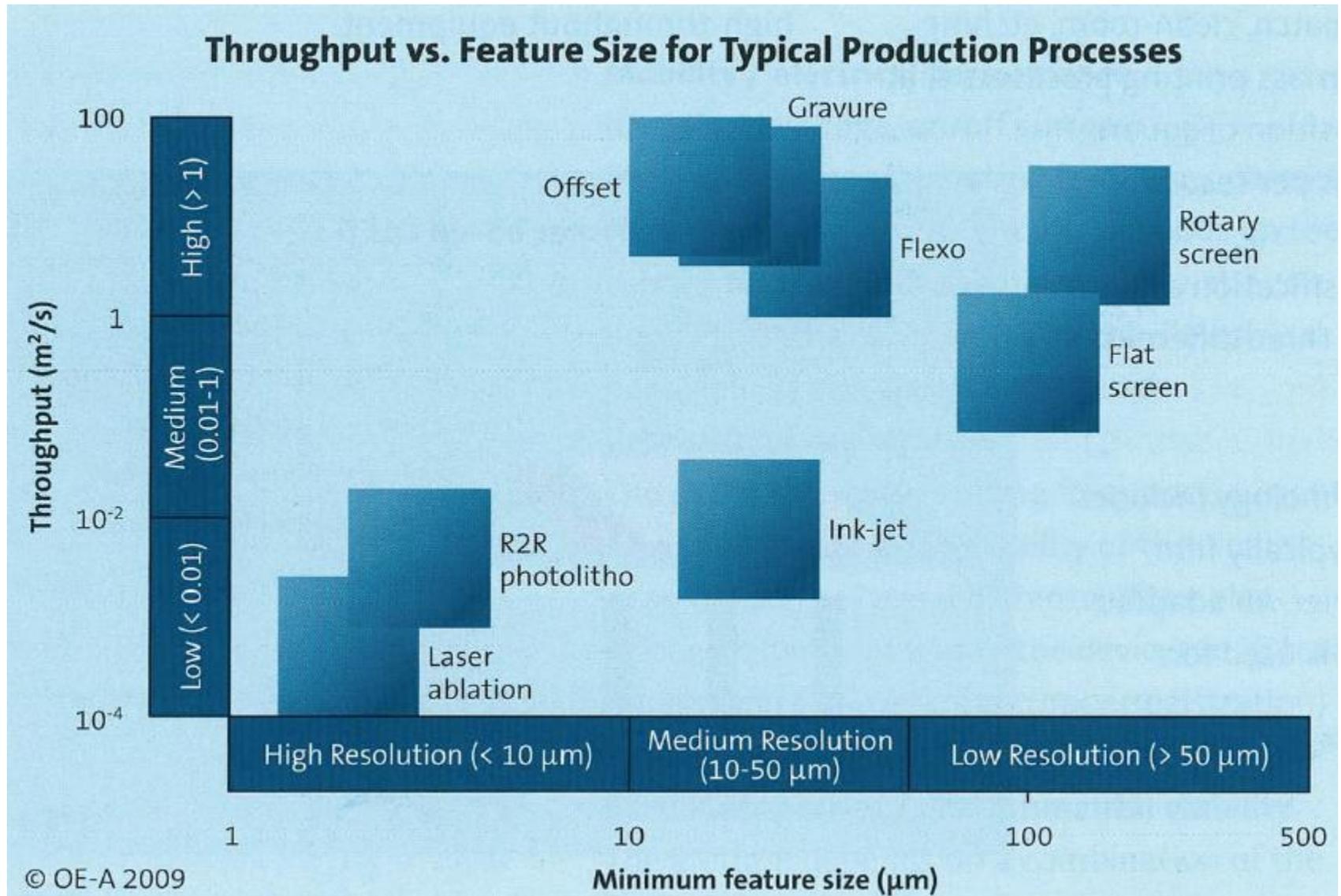


FIGURE 18
*Principe de fonctionnement
d'une cellule à colorants.*

Resolution / throughput



Rendement des cellules photovoltaïques de la cellule au module neuf (environ – 30%)

Technologie	Rendement des cellules en %	Rendement des modules en %
Monocristallin	24	13 à 17
Poly cristallin	18	11 à 14
Silicium amorphe	11	5 à 9
Couches minces CIS	10	7
Couches minces CdTe	15	8 à 10
Amorphes	6	4 à 5
Organiques	5	4

La réalité des rendements

Mais il faut tenir compte des conditions réelles

- **Salissures**
- **Effet de la température: -5% par 10 °C pour Si**
- **Vieillissement**
 - **Moins 20% sur 25 ans pour le silicium**
 - **Quelques années pour les cellules organiques (?)**
 - **Autres : ???**

France: les grandes centrales au sol 2010 (> 4 MWc)

<u>Lieu</u>	<u>MWc</u>	<u>Investisseur</u>	<u>cellules</u>
Gabardan/Landes	24	EDF/EN	CdTe - First solar
Les Mées/PACA	18,2	Bonafoux/Blanc	Polycristallin - Trina
Les Mées/PACA	12,3	Solaire direct	Polycristallin - Tenesol
La Roseraie/ Réunion	10,5	EDF/EN	Polycristallin - Photowatt
Perpignan/Hérault	9	Akuo Energie	Monocristallin - Sunstil
St Clar de Lomagne Gers	8,9	SNC St Clar	Polycristallin - Suntech
Saint-Amadou/Ariège	8,5	Juwi-ENR	CdTe – First Solar
Rapale / Haute Corse	7,7	Akuo Energy	CdTe – First Solar
Narbonne/Aude	7,1	EDF/EN	CdTe – First Solar
Pierrelatte/Vaucluse	7	Sechilienne Sidec	CdTe – First Solar
Ste Tulle/PACA	5,2	EDF/EN	CdTe – First Solar
Mangasaye/Réunion	5,1	EDF/EN	Polycristallin - Photowatt
Vinon sur Verdon / Paca	4,3	Solaire direct	Polycristallin – Yingli solar
Saulce sur Rh. Rhone-Alpes	4,1	CNR	Polycristallin - Tenesol
Manosque/PACA	4,1	EDF/EN	CdTe – First Solar
TOTAL	136		

Les centrales photovoltaïques au sol (1ha \rightarrow 1 MWc \rightarrow 1-1,5 GWh/an)

Rendement: 12 à 17%



Le coût du photovoltaïque

La cellule s'intègre dans un montage complexe

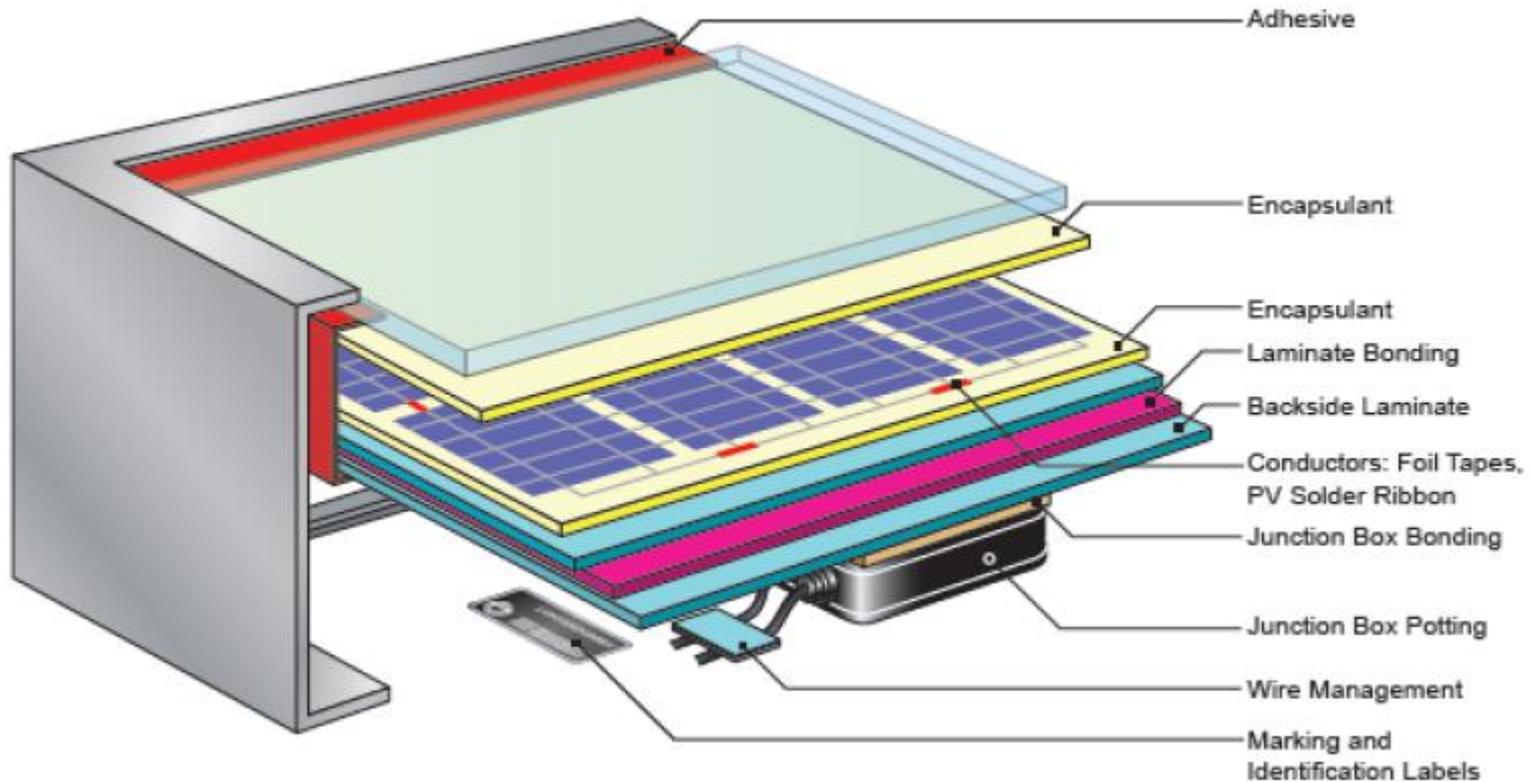
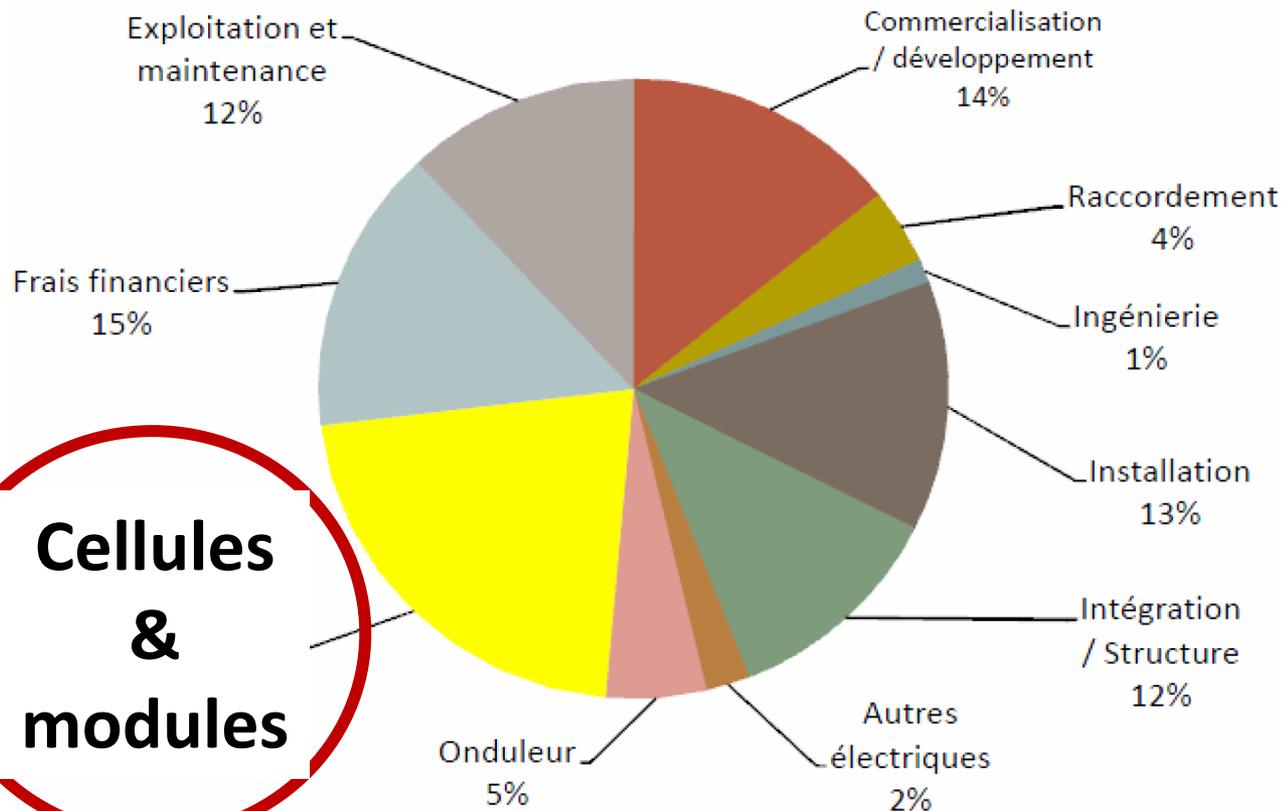


Figure 5: Silicon PV module contains many commoditized raw materials including silicon, glass, and aluminum. The challenge will be to reduce the costs or utilization of these materials while improving module efficiency. (Graphic source: Hisco)

Le module représentait moins du quart du prix en France en 2010

Décomposition du coût de production d'un kWh photovoltaïque

➤ Répartition des coûts d'installation et d'exploitation sur 20 ans en euros/kWh¹



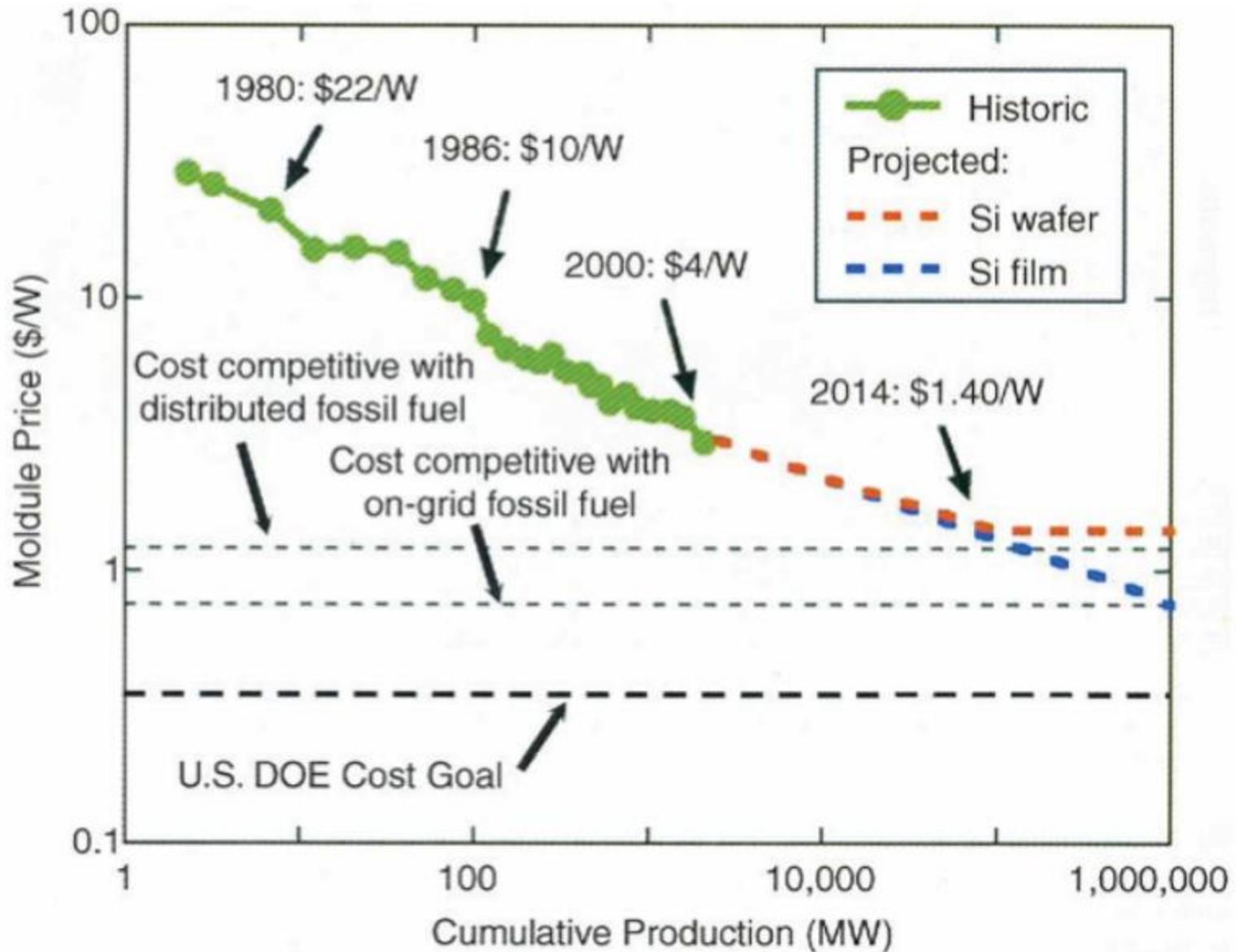
Hypothèses BIPE:
Taux prêt : 5%
Taux d'actualisation : 6%

Sources : ADEME,
SER, EPIA,
estimations BIPE,
entretiens

Source : SOLER-SER¹

**Cellules
&
modules**

• Il est nécessaire de considérer le coût de production, en incluant frais financiers et d'exploitation, en considérant le coût au kWh



	2010	2016	\$1/Watt
Module	\$ 1.70	\$ 1.05	\$ 0.50
BOS/Installation	\$ 1.48	\$ 0.97	\$ 0.40
Power Electronics	\$ 0.22	\$ 0.18	\$ 0.10
	\$ 3.40	\$ 2.20	\$ 1.00

Cost of Energy (\$/kwh)

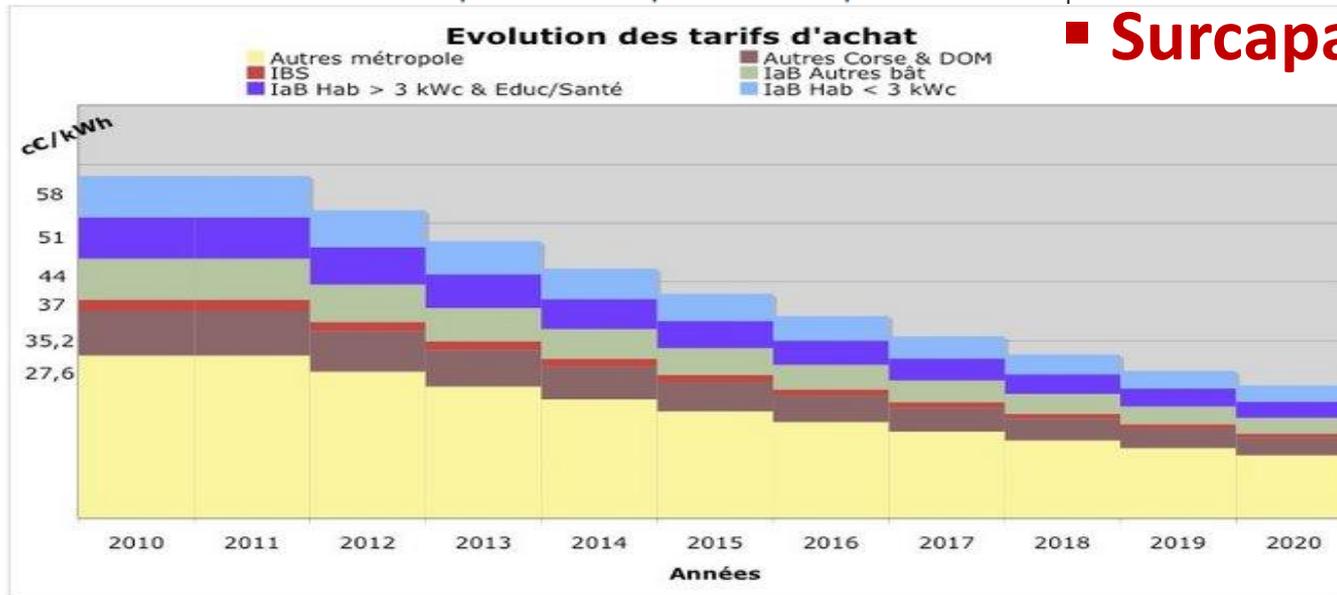
	2010	2016	\$1/Watt
Module	\$ 0.063	\$ 0.037	\$ 0.018
BOS/Installation	\$ 0.055	\$ 0.034	\$ 0.014
Power Electronics	\$ 0.008	\$ 0.006	\$ 0.004
O&M	\$ 0.013	\$ 0.009	\$ 0.003
	\$ 0.139	\$ 0.086	\$ 0.038

US DOE white paper 2010

2011

PRIX D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE:

- **2010: 3 €/Wc**
- **2011: 0,6 à 1 €/Wc**
- **Surcapacité production**



France
ADEME

Evolution obligation achat électricité solaire (c€/kWh)

Un prix toujours trop élevé

PUISSANCE kWc	2010	Avant 1/07/2011	Avant 1/10/2011	Avant 1/01/2011	Evol. 2011
Moins de 9	58	47	42,55	40,63	-14%
9 à 36	51	40,25	37,23	35,55	-12%
36 à 100 Collectivités industrie	44	28,8	26,1	23,61	-18%
Grandes Installations		12	11,7	11,38	-5%

Moyenne France: 5 c€/kWh

Solaire Allemagne et Espagne: 20 à 28 et Espagne

Régime fiscal du solaire

- Vous pouvez amortir 100% du prix de l'acquisition de l'installation. Vous déduisez les intérêts d'emprunts, les frais liés à l'exploitation et vous pouvez récupérer la TVA. Grâce à ce mécanisme vous achetez votre installation Hors Taxe (HT).
- Le différé d'amortissement permet de limiter fortement l'impact fiscal sur la fin de l'investissement. Les revenus générés par la location sont exonérés d'impôt même lorsque les charges d'exploitation sont quasi nulles.
- Vous pouvez même placer la T.V.A récupérée sur support financier rémunérateur.
- Objectif de l'investissement dans les panneaux solaires : obtenir des revenus complémentaires presque sans impôts, grâce à la revente de l'énergie produite

Régime fiscal du solaire (suite)

- **Si vous êtes soumis à l'ISF:**
 - 75% de votre investissement (plafonné à 50000€) est déductible immédiatement de votre ISF. Votre investissement se transforme alors en **réduction d'ISF.**
 - vous pouvez déduire 25% de votre investissement (plafonné à 10 000€) de votre impôt sur le revenu. Votre investissement se transforme alors en **réduction d'impôt.**

9 kWc en Poitou en sept 2011

- **8,8 kWc**
- **48 panneaux de 1,625 m²**
- **Surface panneaux: 78 m²**
- **Production: 8000 à 10000 kWh par an**
- **Rendement moyen: 10,5 à 13%**
- **Investissement: 48000 €**
- **Soit 5,45 €/Wc**
- **Tarif achat 42,55 c€/kWh**
- **Recette totale: 76600 €**
- **Achat EdF: 20900 €**
- **Gain brut: 55700**



Exemple de bilan financier

3 kWc en Dordogne

- **20 m² en Dordogne: 3 kWc**
- **Orientation Sud et pente 30°**
- **Prix panneaux chinois: 1300 € / kWc**
- **Prix installé France par kWc: 5700 €**
- **Investissement total: 17100 €**
- **Crédit d'impôt max 8000 €**
- **Aide régionale max sur intérêts: 2000 €**
- **Production sur 20 ans (1100kWh/anxm²): 69000 kWh**
- **Recettes sur 20 ans: 40000 €**
- **Gain brut: 22900 €**
- **Retour sur investissement total 4 à 8 ans**

Exemple de bilan financier d'une centrale Curbans (Suez/Electrabel, Provence)

- **Attribuée suite à appel d'offre en juin 2010**
- **Puissance: 33 MWc (en 2011)**
- **Production: 43.550 MWh**
- **Rendement 15%**
- **145000 panneaux sur une surface de 60 ha**
- **Investissement (4 M€/MWc) 132.000.000 €**
- **Vente annuelle électricité (314 € HT/MWh) 13.700.000 €**
- **Recette commune (loc. terrain) 180000 € (1,3%)**
- **CO2 économisé (120000 t) 1100 €/t**

Centrale Photovoltaïque Si Pour produire autant qu'une centrale thermique de 1000 MWe

- **Puissance solaire incidente: 40.000 MW**
- **Puissance électrique: 5900 MW**
- **Production annuelle: 7900 GWh**
- **Surface des miroirs: 42 km²**
- **Surface totale: 92 km²**
- **Investissement: 21 milliards €**
- **Cout de la tonne de CO² évitée: > 1000 €**

Qui fabrique les panneaux photovoltaïques en 2010

	% production mondiale
ASIE SUD-EST	74
Dont CHINE	48
USA	5
EUROPE	13
Dont Allemagne	10

Centrale Photovoltaïque Si

Pour produire autant qu'une centrale thermique de

1000 MWe

- **Puissance solaire incidente: 40.000 MW**
- **Puissance électrique: 5900 MW**
- **Production annuelle: 7900 GWh**
- **Surface des miroirs: 42 km²**
- **Surface totale: 92 km²**
- **Investissement: 21 milliards €**
- **Investissement: 12 milliards € 2020?**

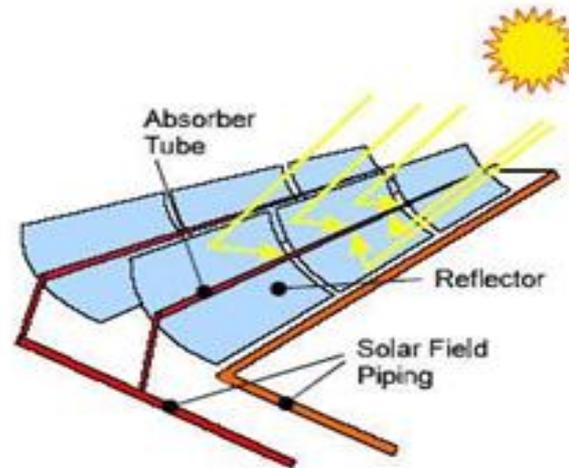
Technologies assez classiques: quel gain attendre?

SOLAIRE A CONCENTRATION

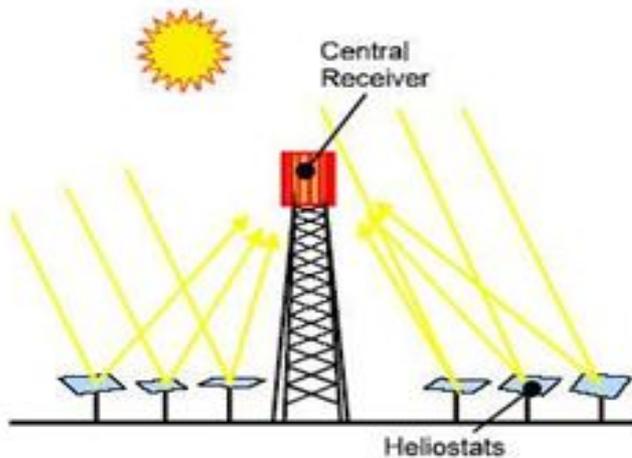
TROIS TECHNOLOGIES DOMINANTES



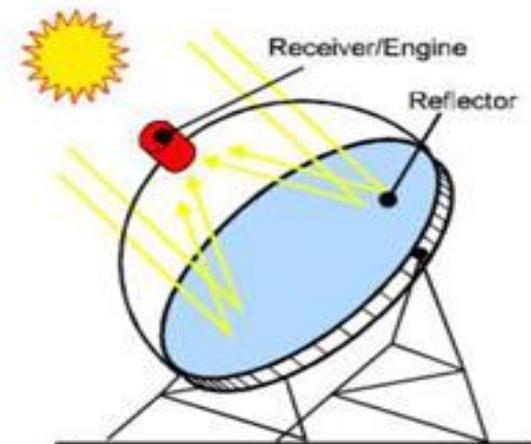
Centrales à capteurs cylindro-paraboliques



Centrales à Tour



Centrales à disques paraboliques

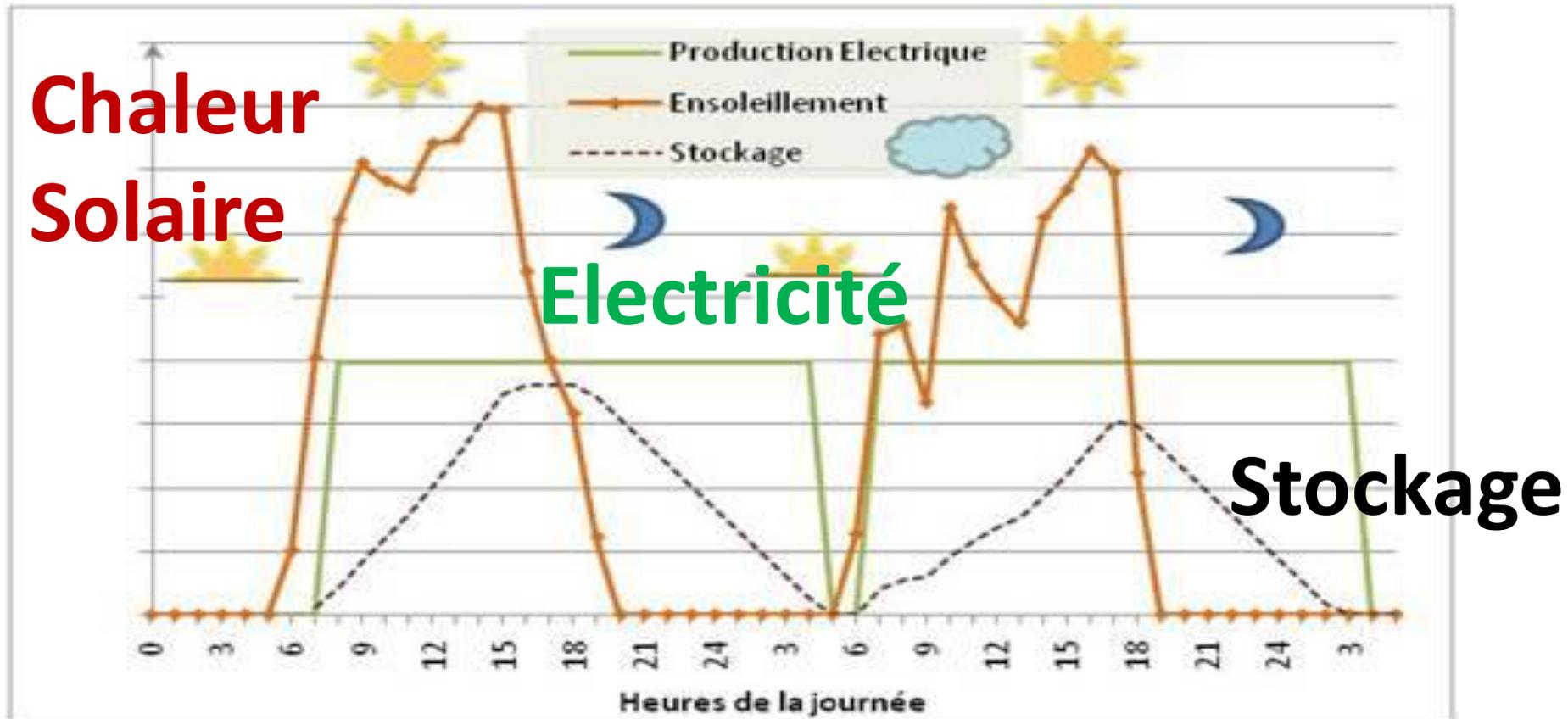


Centrales solaires thermiques

Situation mondiale (Wikipedia)

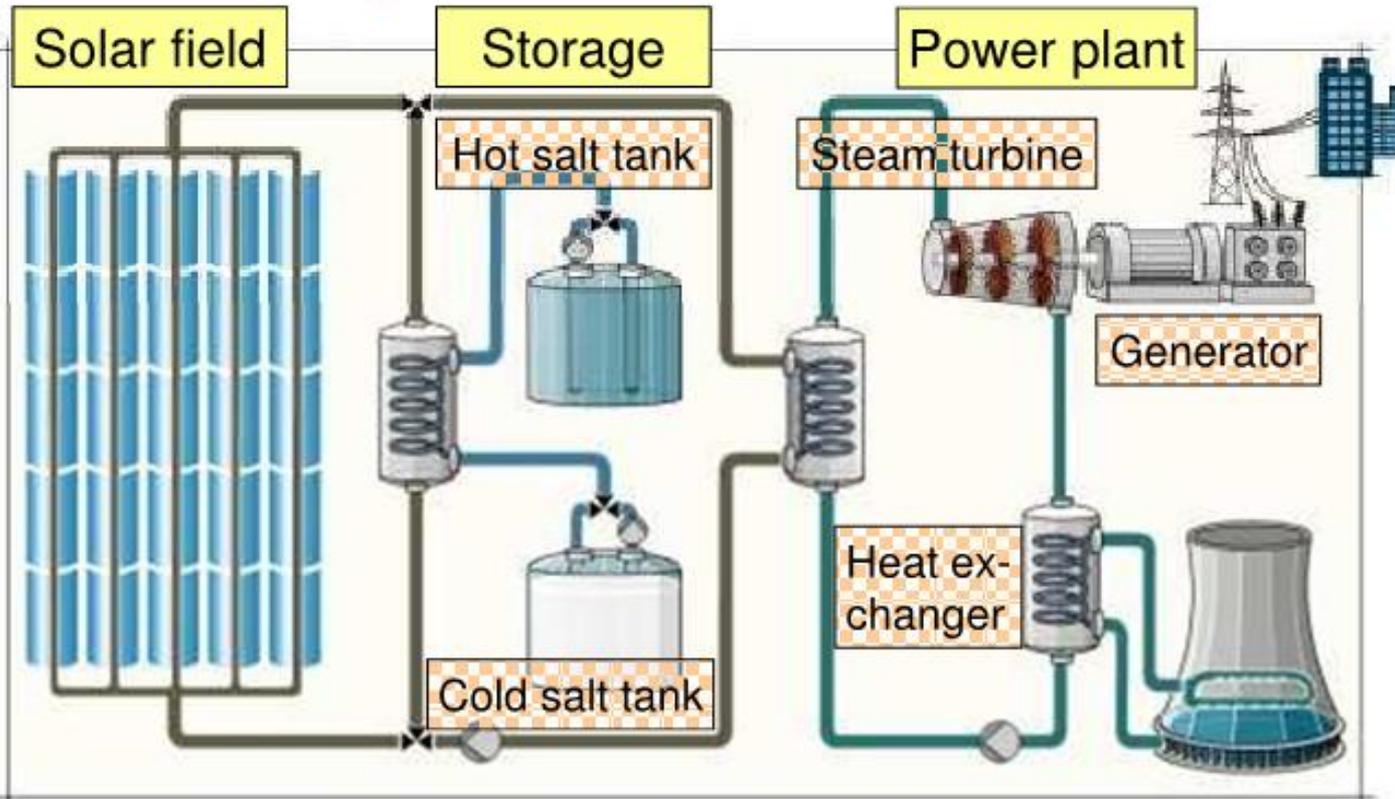
Nombre MW crête	Opérationnelles	En construction	3 En projet	TOTAL
Capteurs cylindro paraboliques	19 1218 MWc	25 3043 MWc	14 2900 MWc	58 7160 MWc
Héliostats Centrales à tour	4 38 MWc	2 400 MWc	10 1400 MWc	16 1840 MWc
Autres (Fresnel/stirling)	4 10 MWc	2 42	1 300	7 350MWc
TOTAL	27 1265 MWc	29 3153 MWc	25 4613 MWc	81 9030 MWc
Dont Espagne Dont USA	14 8	24 3	27	Environ 1 centrale nucléaire

UN AVANTAGE NET SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE LE STOCKAGE THERMIQUE



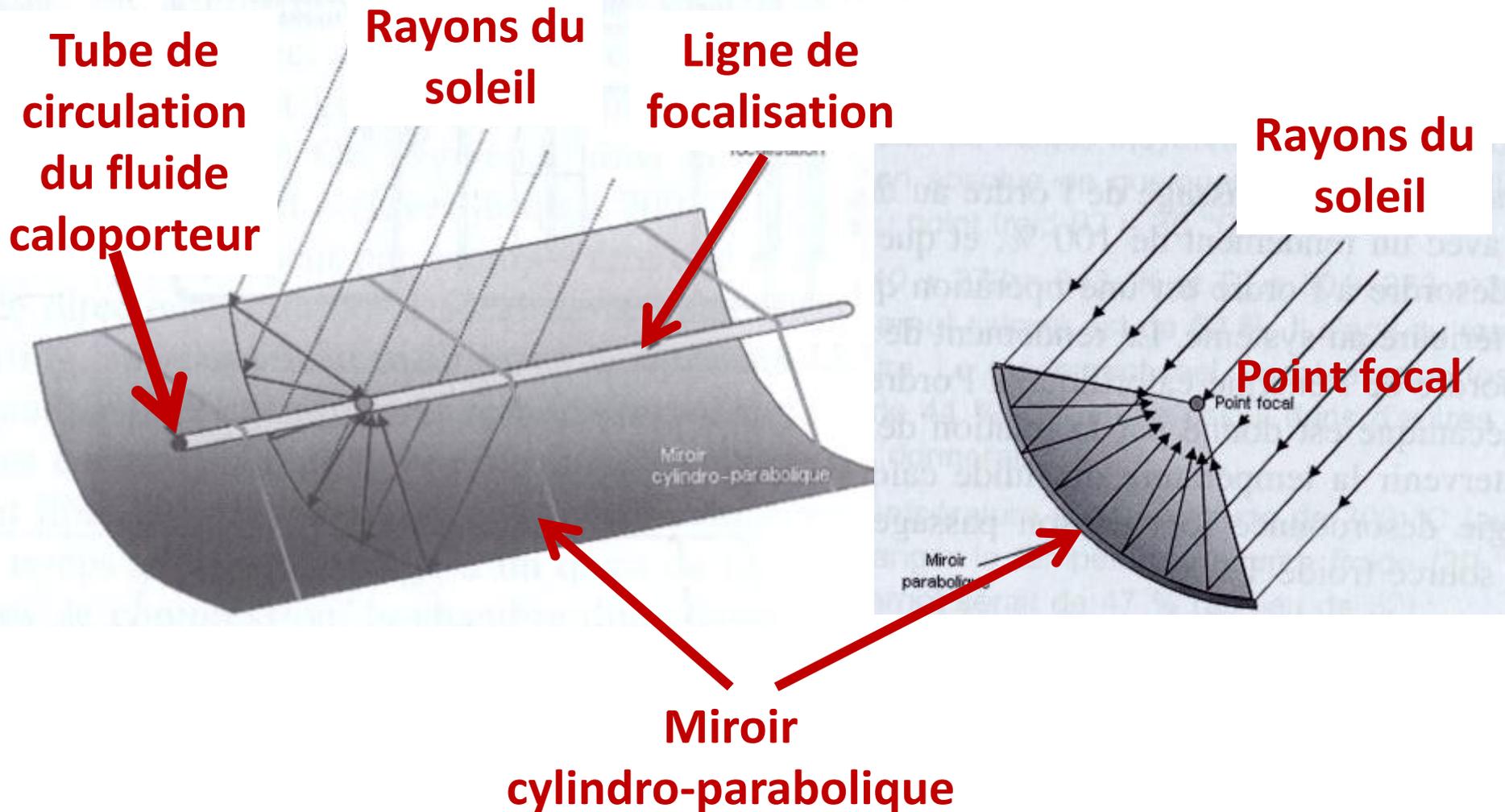
- LA PRODUCTION PEUT ÊTRE ÉTALEE SUR 15 H
- LA RENDEMENT DEPENS DE LA TEMPERATURE DU CALOPORTEUR (eau pressurisée, huile, sel)

EST description



Source: http://www.solarmillennium.de/Technologie/Parabolrinnen_Kraftwerke/Funktionsweise/Parabolrinnen_Kraftwerke_erzeugen_Strom_aus_Sonnenwaerme__lang1,104.html

Concentrateur cylindro-parabolique





ANDASOL - ESPAGNE

- Capteurs cylindro-paraboliques
- 150 MW en 3 tranches de 50 MW
- Production 160 Gwe
- Capteurs: 1.500.000 m²
- Rendement: 12 %
- Surface sol: 6 km²
- Stockage thermique
- Stockage de chaleur: 28500 t
- Nitrate de K et Na
- Rendement turbines: 30%
- Autonomie stockage: 7 h
- Rendement global 15%

50 installations
pour
produire
autant qu'une
centrale classique
de 1000 MW

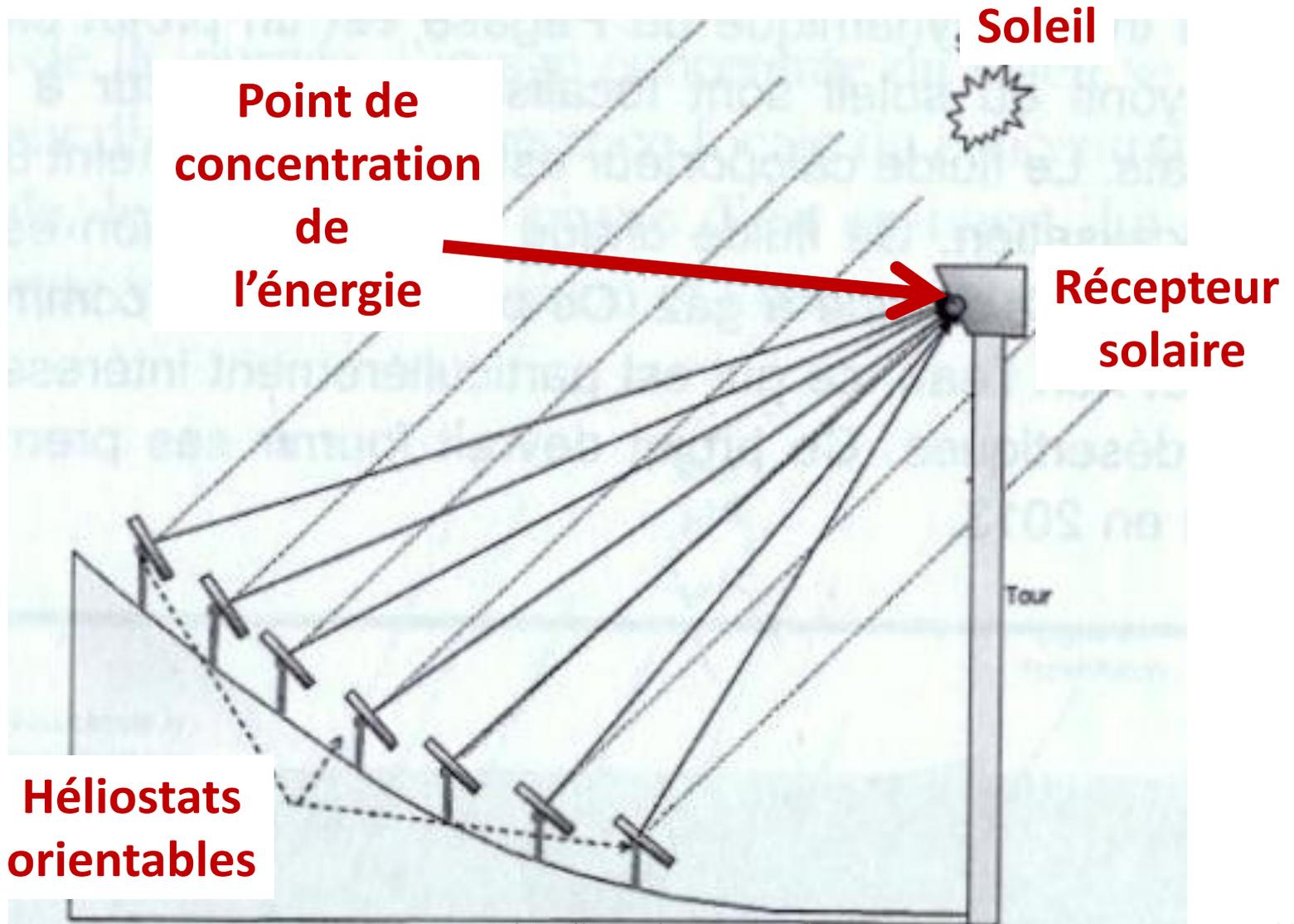


Harper lake solar plant



160 MWc Trough: au pic (conditionnement + complément gaz)

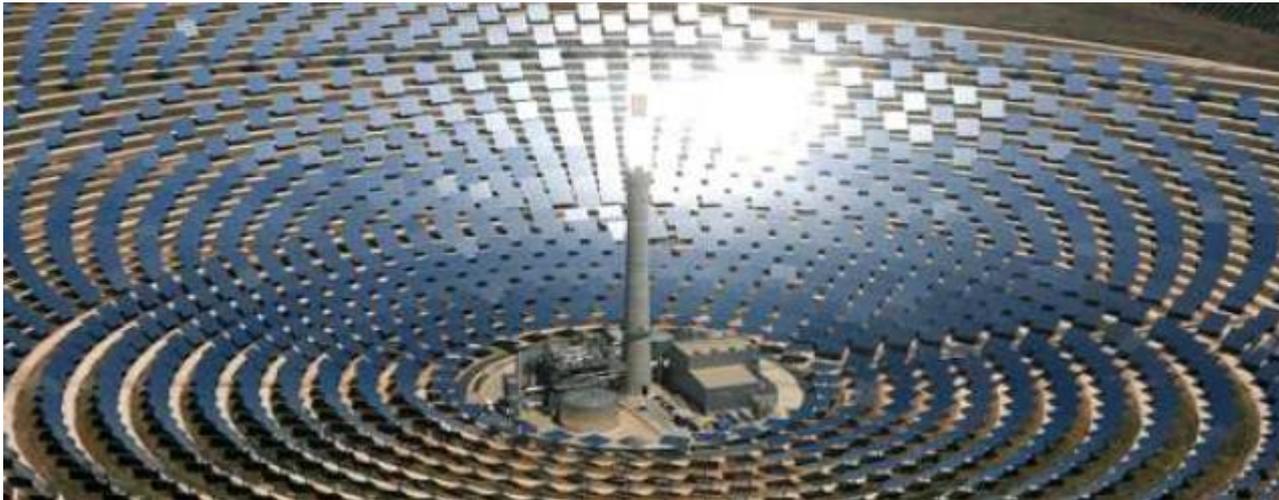
Centrale solaire à tour



Centrale à tour

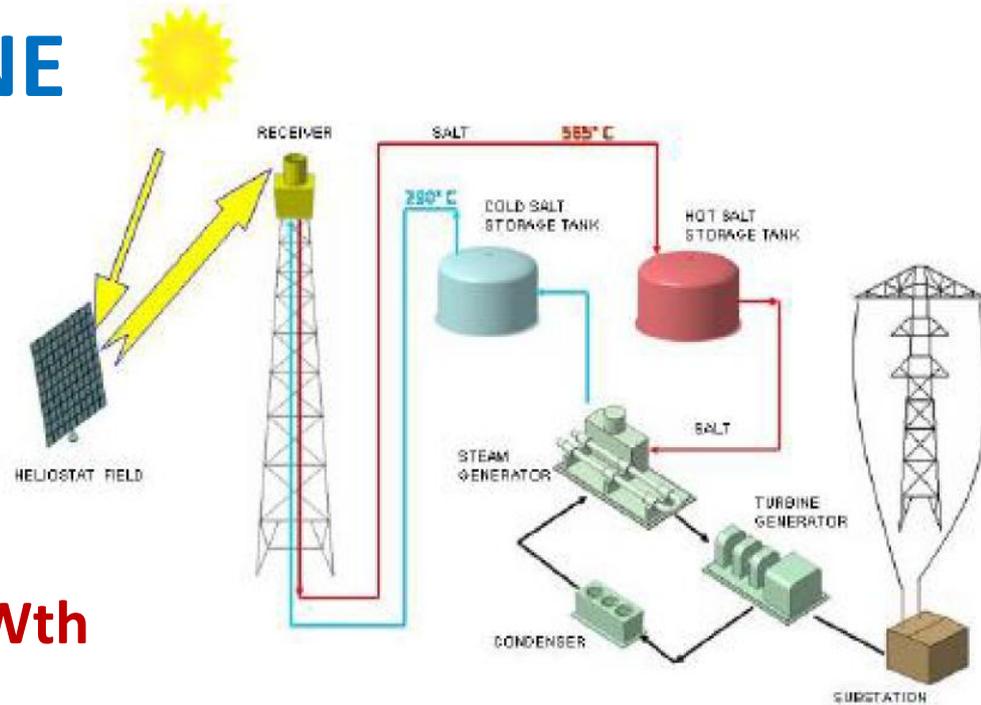
GEMASOLAR - Espagne - 2011

- Puissance 19,9 MW
- 2650 héliostats orientables de 110 m² (291000 m²) sur 185 ha
- Production 110 gigawatt/h par an
- Tour de 140 m
- 900 °C au réceptacle (concentration 1000/1)
- nitrate de K et Na porté à 565 °C
- Stockage sur 15 h
- 7 W moyen par m² de sol
- Investissement 171 millions €

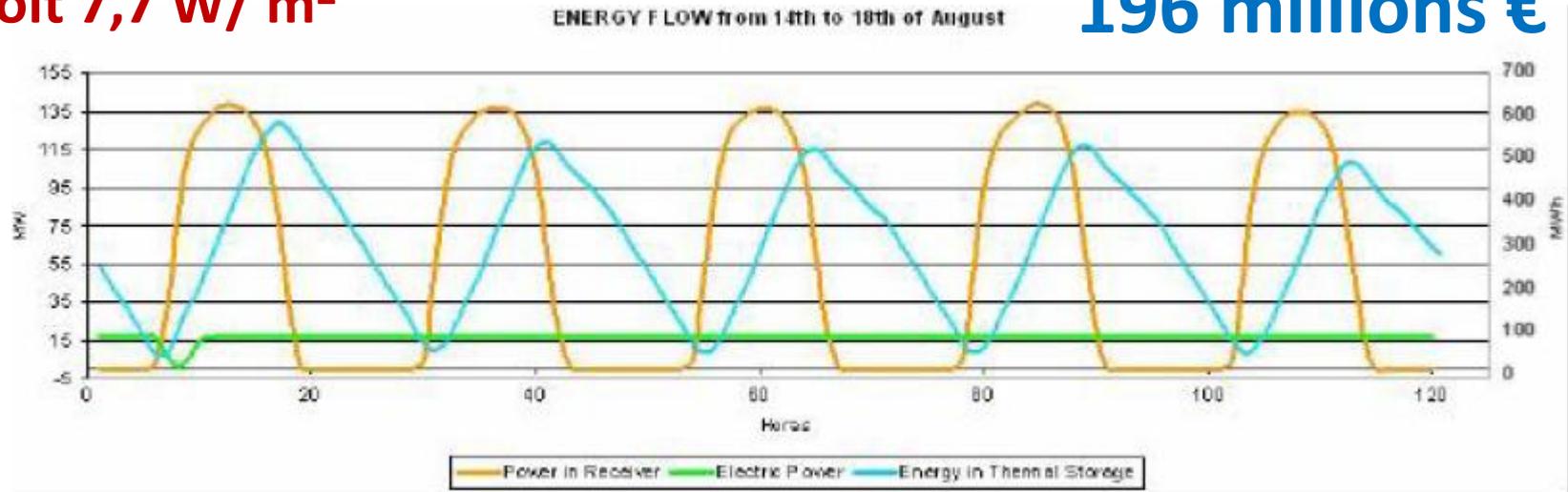


SOLARTRES - ESPAGNE

- 120 MWth
- 17 Mwe
- 2480 héliostats → 285000 m²
- Hauteur tour 120 m
- surface au sol 142 ha (x5)
- Stockage: 15 h
- Chaudière gaz d'appoint: 16 MWth
- Production annuelle: 96,4 GWh
- soit 7,7 W/ m²

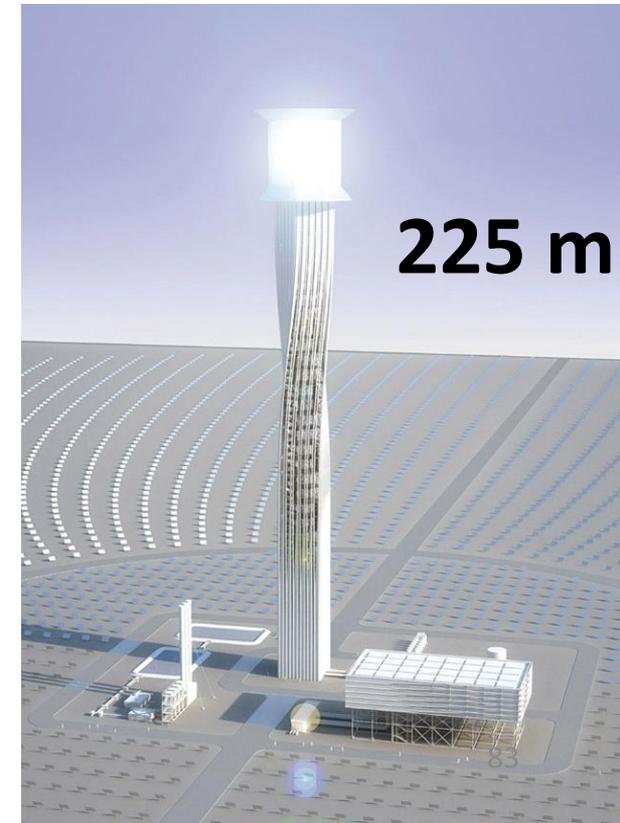


196 millions €





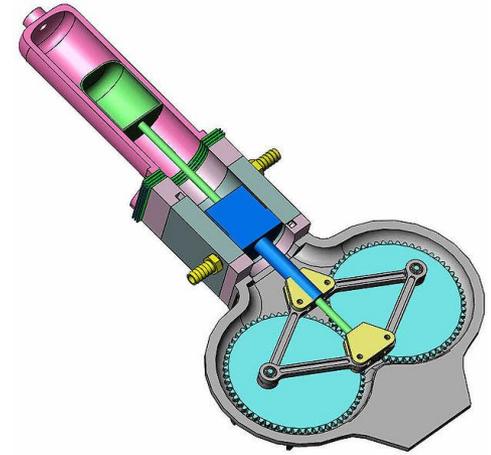
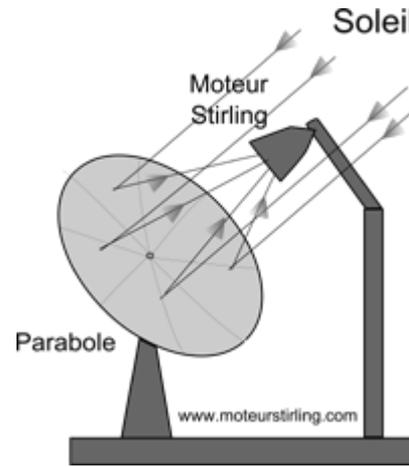
392 MW
174.000 miroirs plats orientables
15 km²
1,1 à 1,6 milliards \$
Aide 168 M\$ Google
réfrigérants secs
vapeur 550 °C



CYCLE STERLING

Imperial valley solar

- 30000 parabole
- 750 MW
- 29 km²
- 6 W moyen /
- 2 milliards €



10/11/2011

Visiatome - Solaire électrogène - J-P. Pervès

84

Centrale à tour avec stockage

Pour produire autant qu'une centrale thermique de 1000 MWe

- **Puissance solaire incidente: 20.000 MW**
- **Puissance électrique: 1430 MW**
- **Production annuelle: 7900 GWh**
- **Surface des miroirs: 20,7 km²**
- **Surface totale: 100 km²**
- **Investissement: 12 milliards €**
- **Puissance gaz d'appoint: environ 15%**

Technologies assez classiques: quel gain attendre?

Comment comparer les investissements

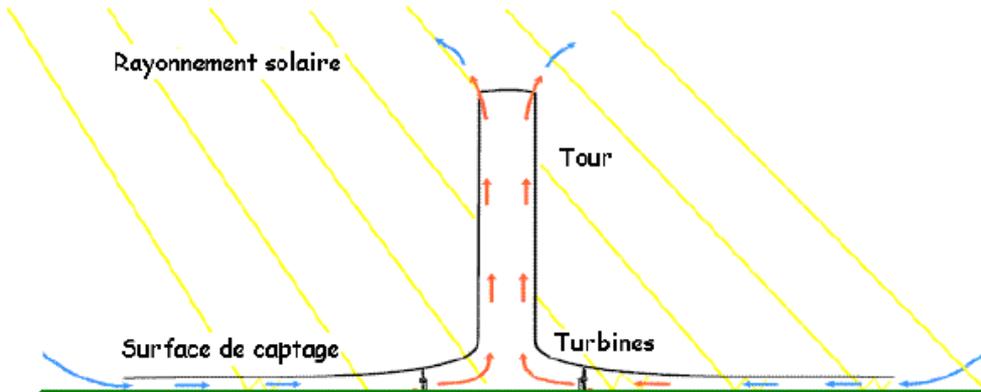
La comparaison pertinente entre plusieurs investissements repose sur l'investissement consenti en regard de la production. On peut ainsi évaluer l'investissement par MWh produit annuellement

	Invest. Unitaire (M€)	Invest. (M€/MW)	Invest. €/MWh sur durée vie
Eolienne terrestre: 3 MWc et 23% annuel	4,5	1,5	30
Eolienne marine: 5 MWc et 30% annuel	15	3	45,6
Centrale photovoltaïque: 46 MWc (15% annuel)	261	5,7	173
Centrale solaire thermique: 100 MWc (13%)	480	4,8	182
Centrale de série 1600 MW et 85% annuel	5000	3,1	8

**UNE ENERGIE A HAUT INVESTISSEMENT CREE DES EMPLOIS (où?)
MAIS COUTE EN PRODUCTIVITE**

(1) En supposant une durée de vie de 25 ans pour éolien et solaire (EPR: 60 ans)

LES CENTRALES A CHEMINEE



Manzanares (Espagne)

- Puissance maximum = 50 kW
- Hauteur acier = 195 m
- D cheminée = 5 m
- Surface serre = 5 (ha)



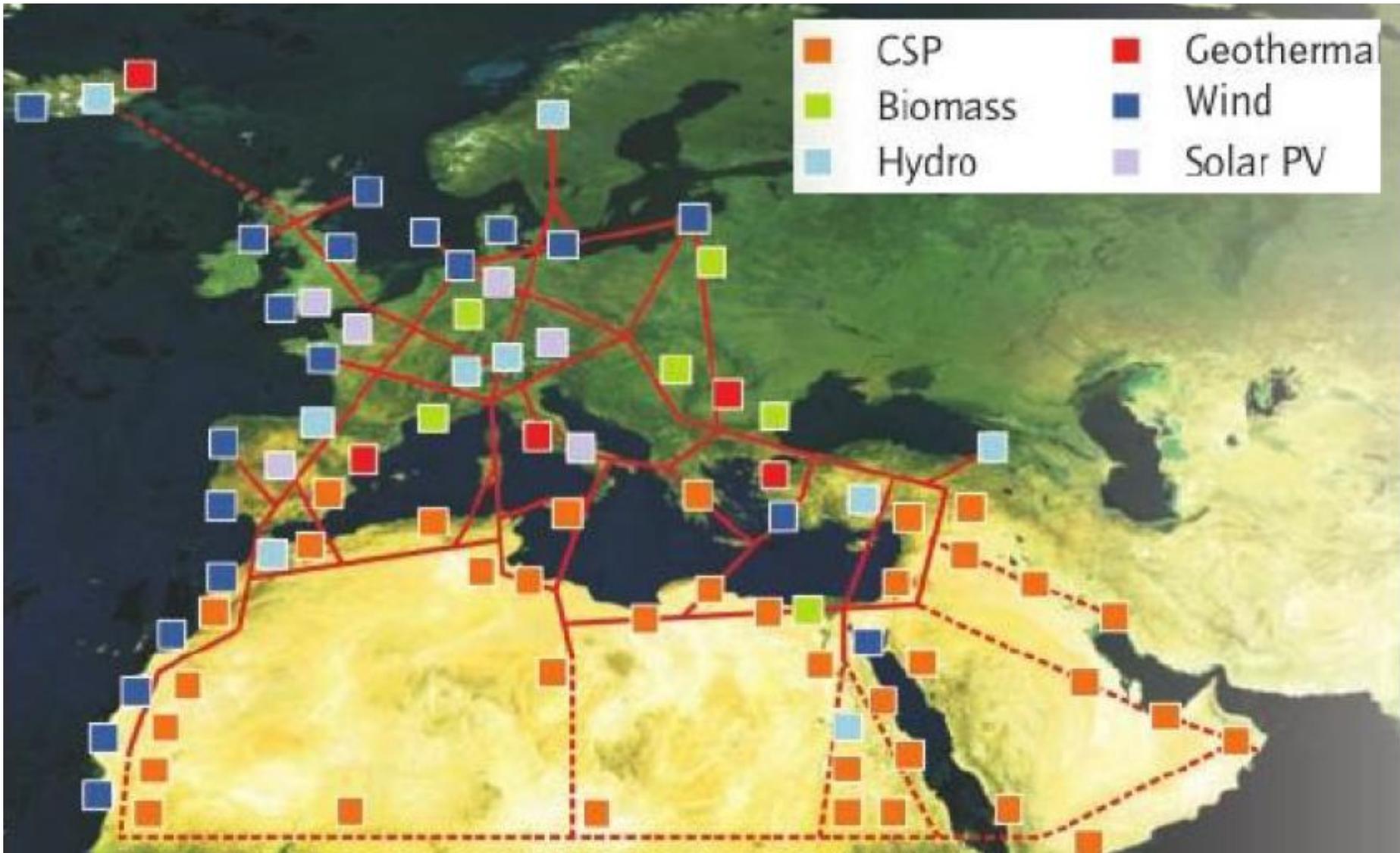
Australie (projet)

- P = 200 MW
- H béton = 1.000 m
- D = 38 m
- S serre = 3300 ha
- d serre = 6,5 km



COMMENT DEVELOPPER LES ENR LA VISION EUROPEENNE

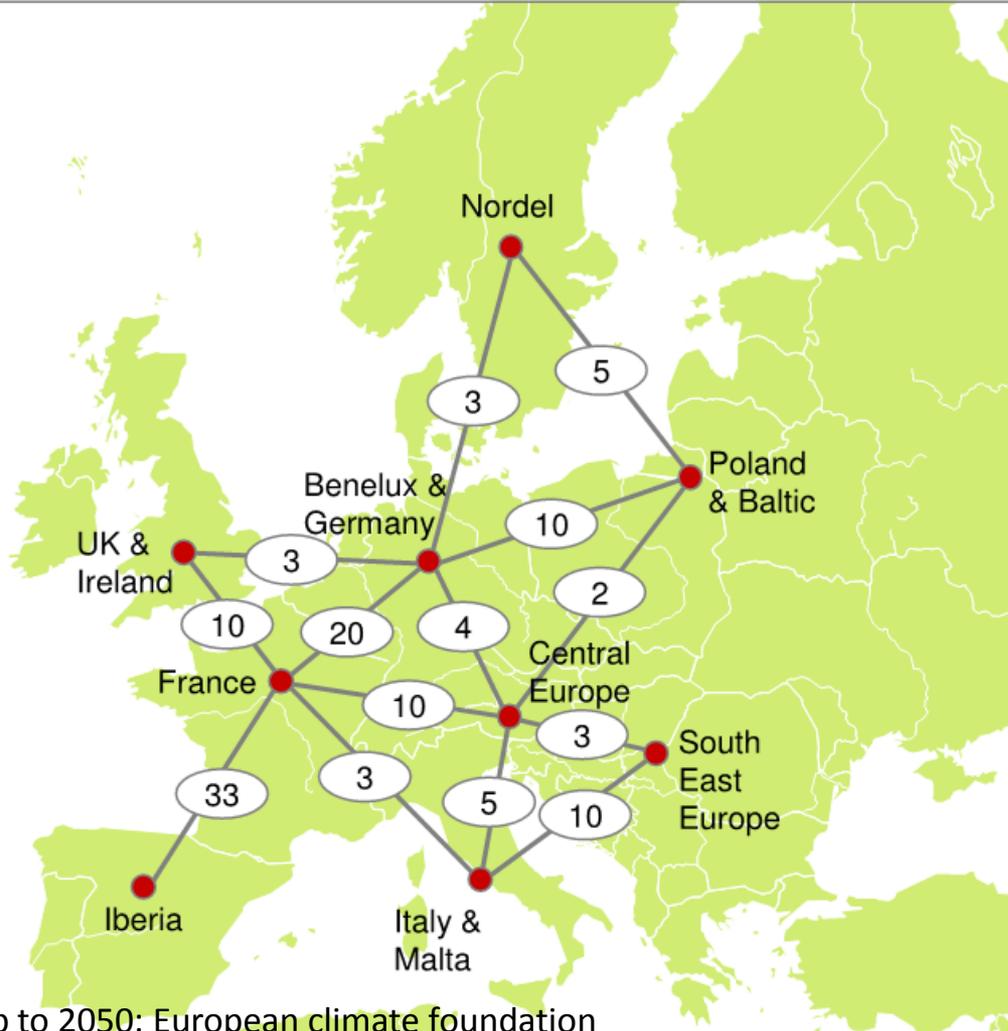
Jouer sur leur complémentarité et le foisonnement des productions



EUROPE ROADMAP: 60% ENR, 20% séquestration C, 20% nucléaire

Total net transfer capacity requirements

GW (existing + additional)



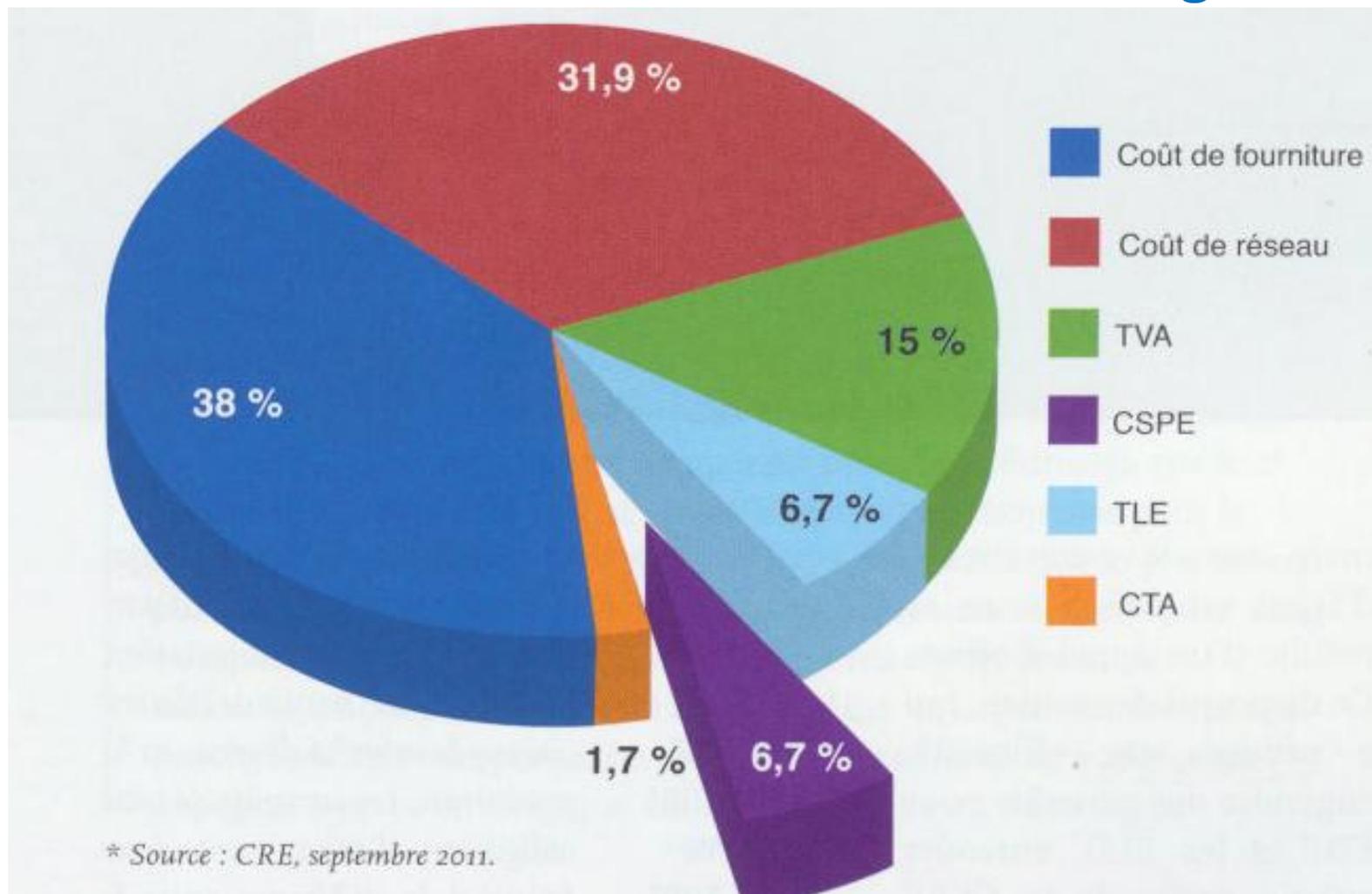
Interconnection

- UK&Ireland-France
- UK&Ireland-Nordel
- UK&Ireland-Benelux & Germany
- France-Iberia
- France-Benelux & Germany
- France-Central-Europe
- France-Italy&Malta
- Nordel-Benelux & Germany
- Nordel-Poland&Baltic
- Benelux & Germany-Central-EU
- Benelux & Germany-Poland&Baltic
- Central-Europe-Poland & Baltic
- Central-South East EU
- Central-Europe-Italy
- South East EU-Italy

Roadmap to 2050: European climate foundation

CONSEQUENCES DU DEVELOPPEMENT DU SOLAIRE

Décomposition du coût de l'électricité en 2011 pour un consommateur résidentiel au tarif réglementé



CSPE: contribution au service public de l'électricité

TLE: taxes locales de l'électricité

CTA: contribution tarifaire assise sur les prestations de transport et de distribution

Filière	Coût d'achat moyen constaté 2010* (périmètre EDF) (€/MWh)	Tarif maximal en vigueur (€/MWh)**
Photovoltaïque	537,5	460
Eolien à terre	84,3	87
Biomasse	98,4	168,7
Biogaz	86,1	132,5
Hydraulique	60,2	110,9
Géothermie	/	285,6
Incinération	52,7	64,6
Total ENR	81,6 (coût d'achat prévisionnel 2011 = 107 €/MWh)	-

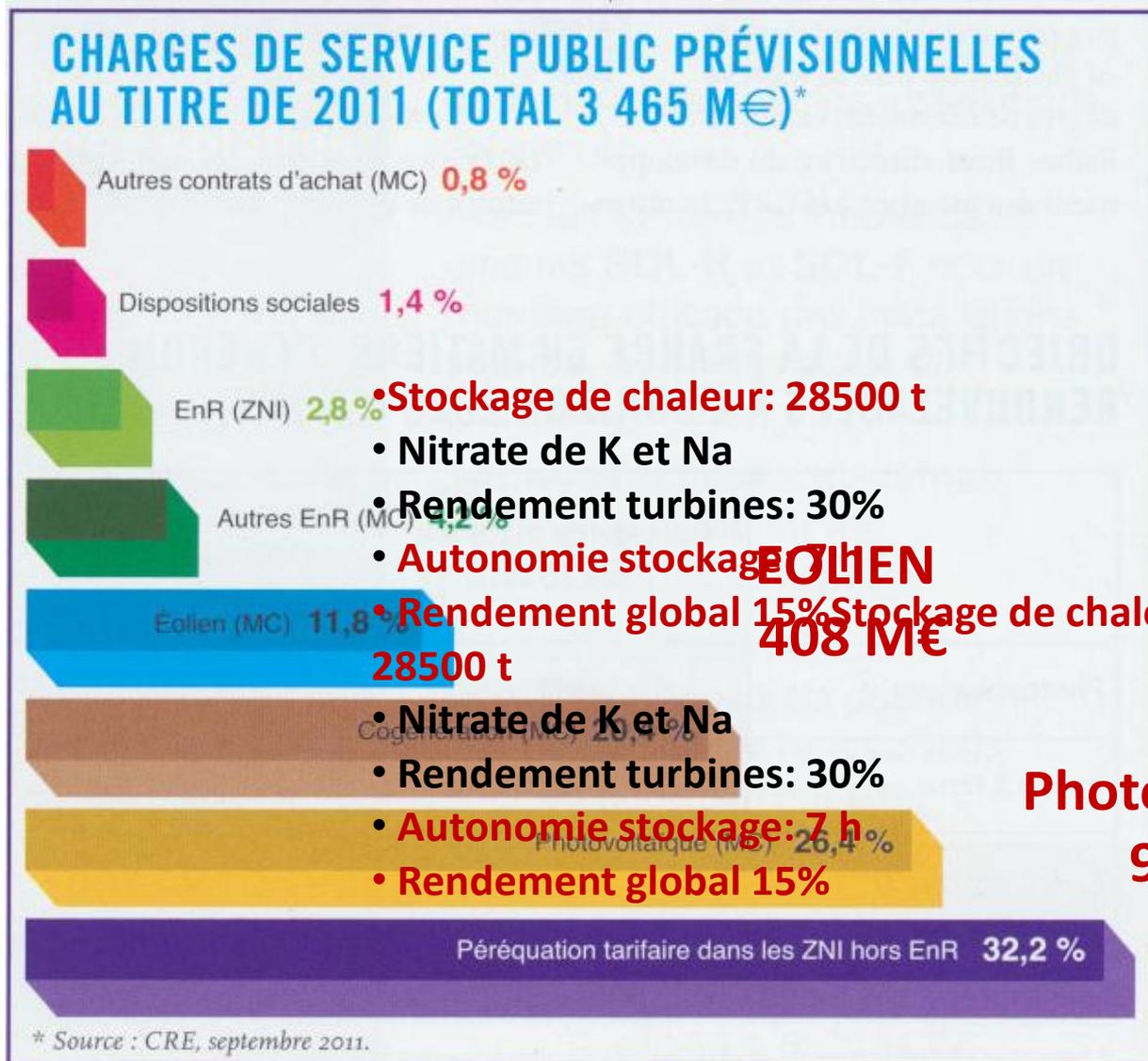
Le prix de marché de gros moyen sur une année n'évolue pas forcément à la hausse d'une année sur l'autre. Entre 2005 et 2009, il a atteint son minimum en 2007 à 41 €/MWh et son maximum en 2008 à 69 €/MWh. En 2010, il s'élève à 47,5 €/MWh.

Nous avons considéré une évolution du prix de marché de 4%/an soit +2%/inflation

Le prix de marché moyen atteint en 2020 est de 82 €/MWh

Source: Audition de Philippe de Ladoucette, Président de la CRE

La CSPE en 2011 par poste de dépense



Une somme équivalente est à la charge d'EdF: l'écart de coût du calcul CSPE est basé sur le prix moyen européen soit 75 €/MWh (coût EdF moyen 50 €/MWh)

- **Stockage de chaleur: 28500 t**
 - **Nitrate de K et Na**
 - **Rendement turbines: 30%**
 - **Autonomie stockage: 7 h**
 - **Rendement global 15%**
- ÉOLIEN**
408 M€
- Photovoltaïque:**
914 M€

Développement du parc de production à partir de sources d'énergies renouvelables bénéficiant d'un dispositif de soutien

Charges induites

Filière	Parc en métropole continentale (MC) bénéficiant d'un dispositif de soutien			Charges en MC + DOM/Corse (ZNI)	
	Puissance totale installée fin 2010 (MW, hors ELD)	Hypothèse de Puissance installée en 2020 = PPI ou plus (MW)	Objectif PPI 2020 (MW)	Charges prévisionnelles 2011 ⁴ (M€)	Charges estimées 2020 (M€) ³
Photovoltaïque	808	7 142	5 400	998	2 294
Eolien à terre	5 664	19 000	19 000	413	576
Eolien en mer et énergies marines	0	6 000	6 000	0	2 474
Biomasse	315	1 890	2 521	53	1 084
Biogaz		631 ¹		33	344
Hydraulique ²	2 077	1 910		68	-30
Géothermie	0	2	-	0	10
Incinération ordures	865	356		-5	-52
Total ENR		36 931 (ZNI : 1 350 MW)		1 567 (dont 6% en ZNI)	6 700 (dont 4% en ZNI)

1 objectif du Plan national d'action en faveur des ENR transmis par le Gouvernement à la Commission Européenne

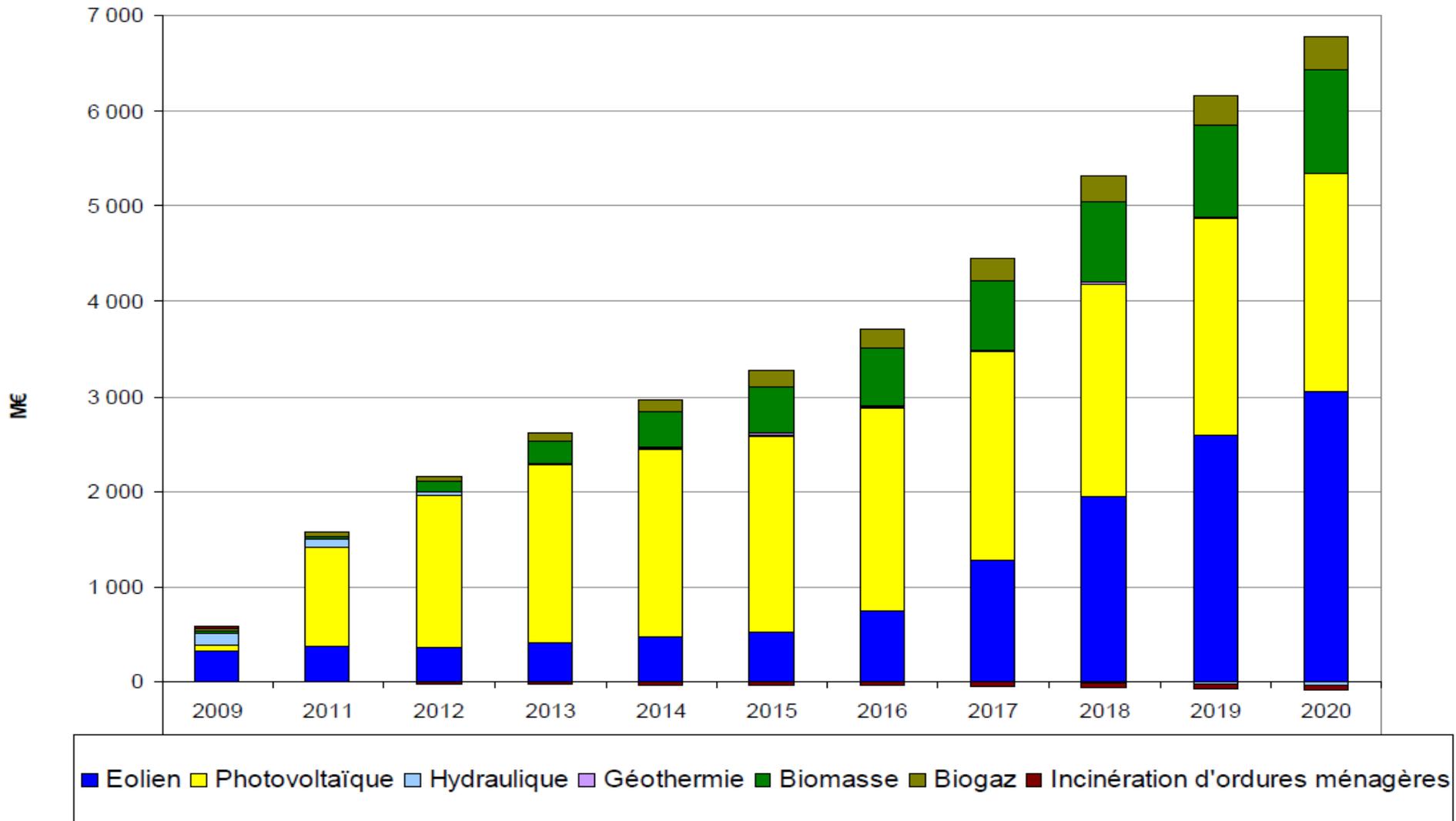
2 Le parc total hydraulique installé fin 2010 est de 13 900 MW, dont 2 077 bénéficient de l'obligation d'achat. L'objectif PPI 2020 est de 16 900 MW pour l'hydraulique, dont la part bénéficiant de l'obligation d'achat est estimée à 1 910 MW.

3 hypothèse de prix de marché : hausse de 4% par an depuis 2012

4 Charges évaluées par la CRE dans sa proposition du 7 octobre 2010

Source: Audition de Philippe de Ladoucette, Président de la CRE

Evolution des charges dues aux ENR 2009¹ et 2020 en M€ (métropole continentale + ZNI)



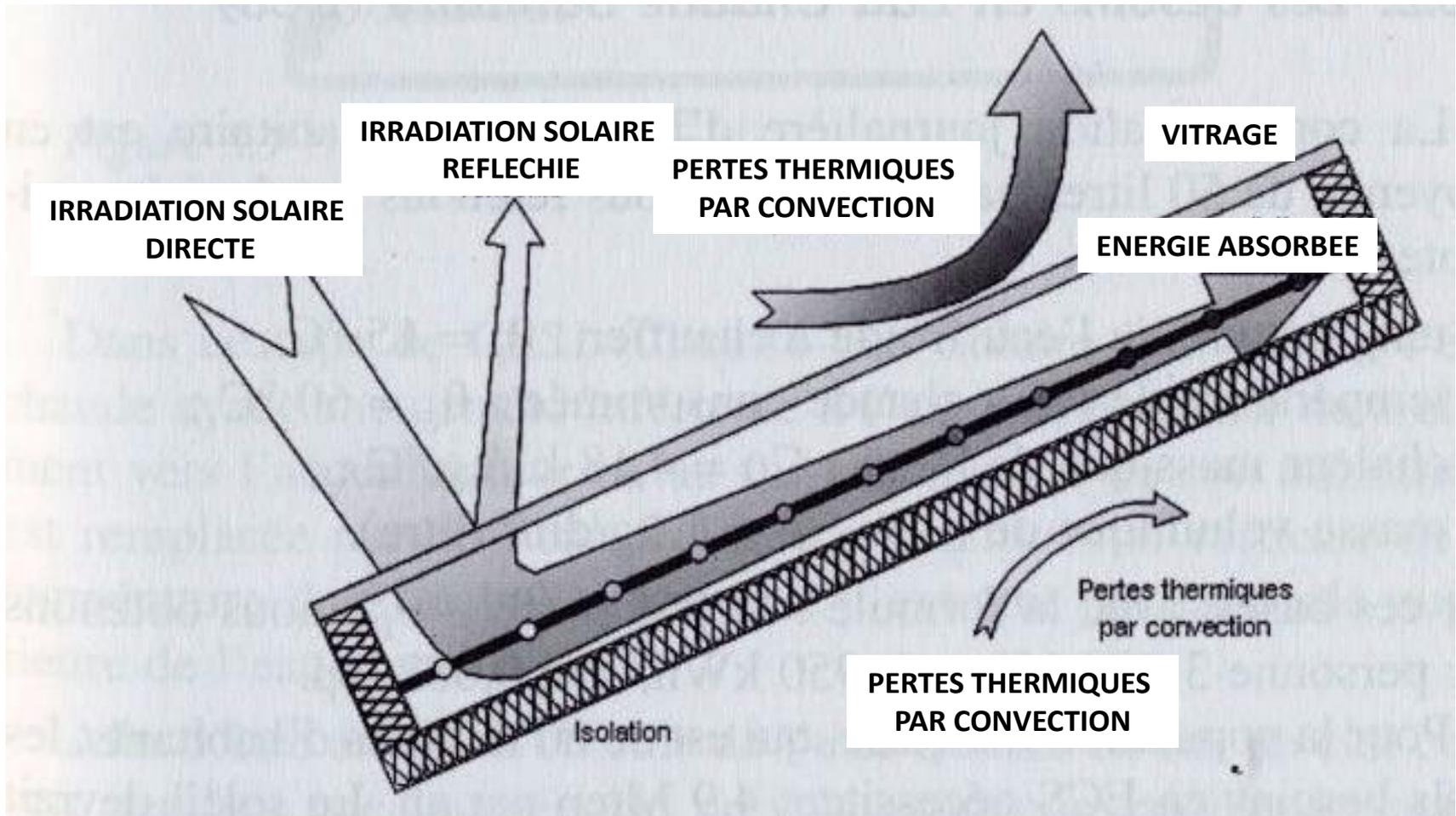
Source: Audition de Philippe de Ladoucette, Président de la CRE

Une conclusion?

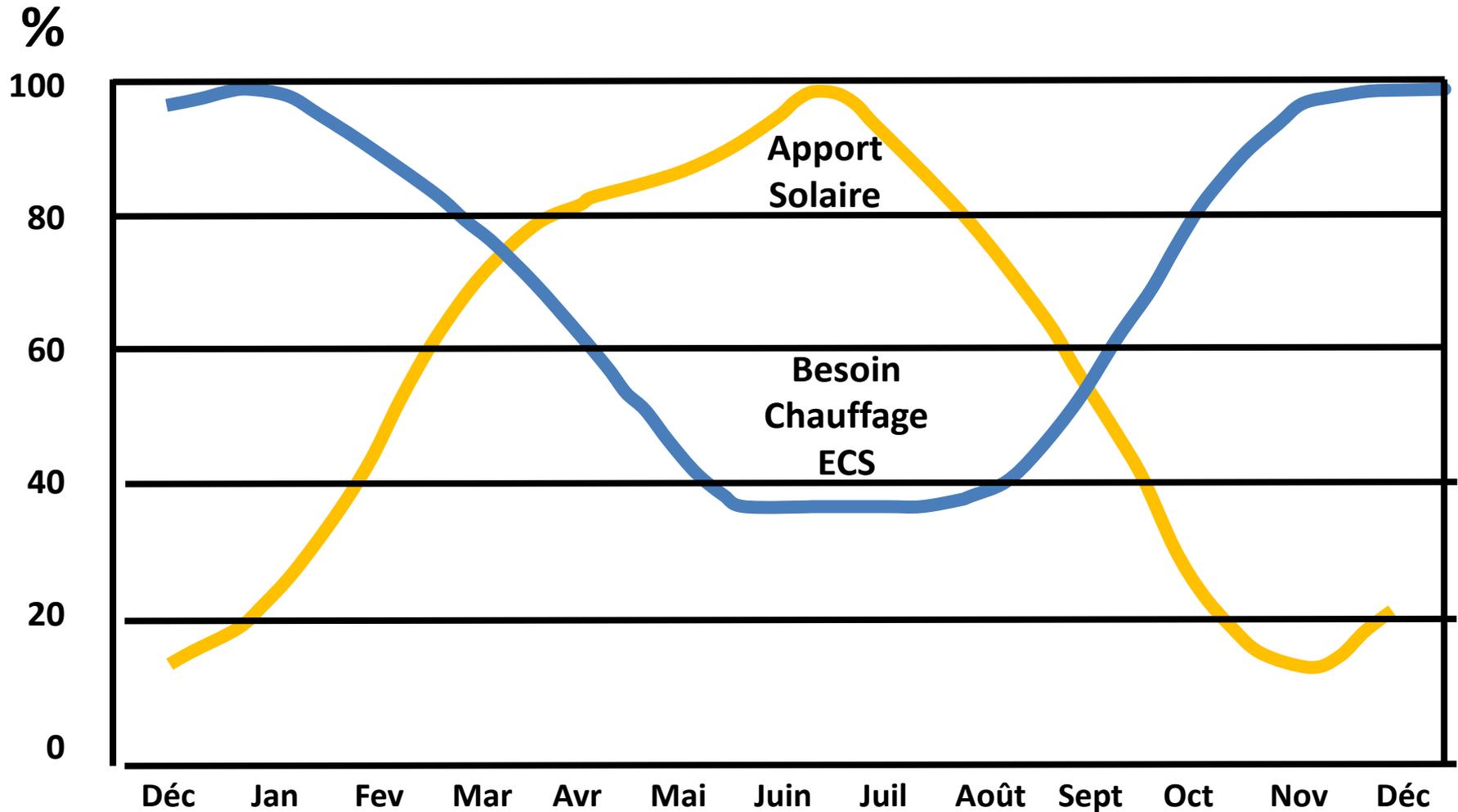
- **C'est cher et ça le restera**
- **Il sera difficile de supplanter le silicium**
- **La technologie de base sera massivement importée pour longtemps encore**
- **Un développement trop rapide à prix d'enlèvement élevé pèsera sur notre économie, donc sur l'emploi**
- **Le solaire apparaît comme une niche fiscale et spéculative qui pèse sur le consommateur**
- **Il est indiscutable dans certaines régions du monde**
- **La France devrait avoir d'autres priorité**

SOLAIRE THERMIQUE ET ECOLOGIE VRAIE

Le capteur thermique



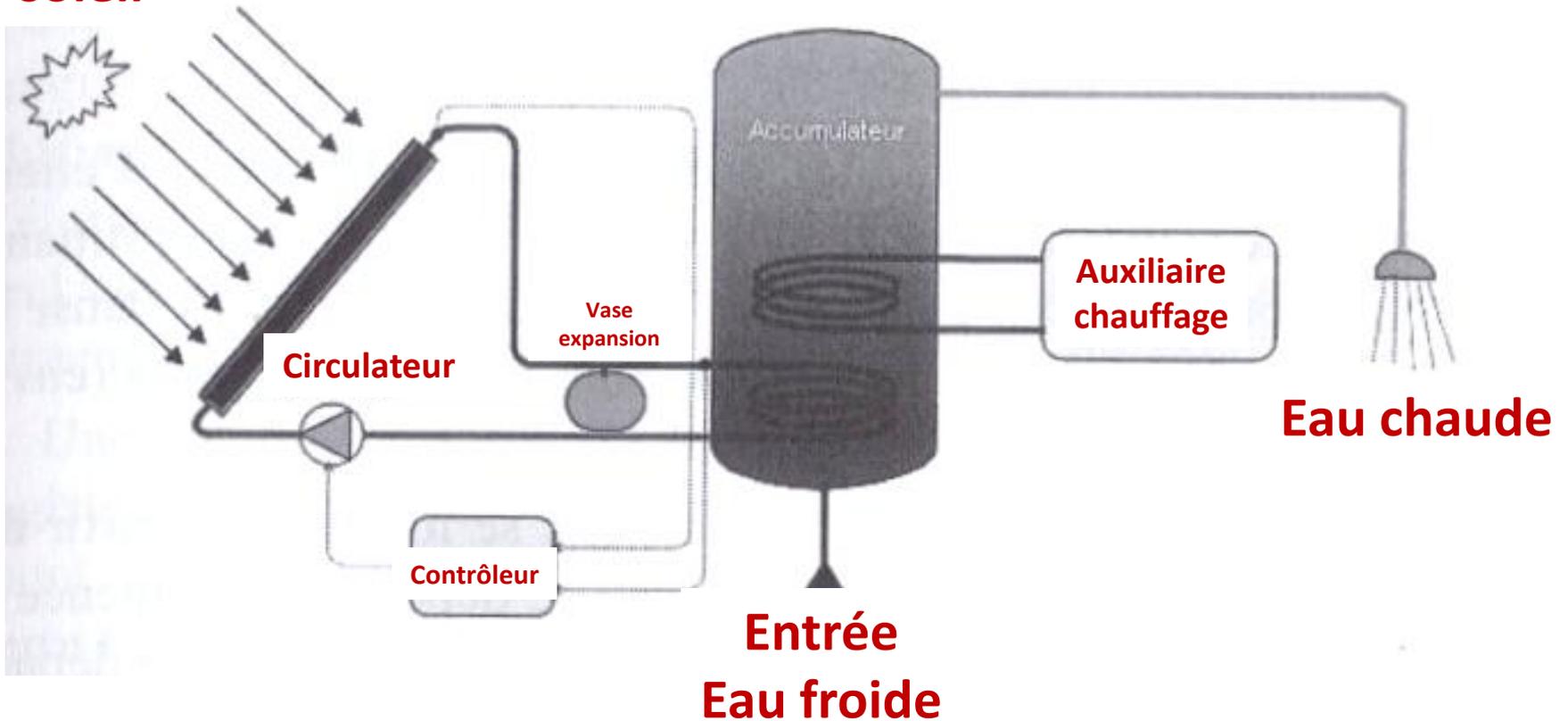
Comparaison entre ensoleillement mensuel et besoins de chauffage et eau chaude sanitaire



Chauffe eau avec appoint d'énergie

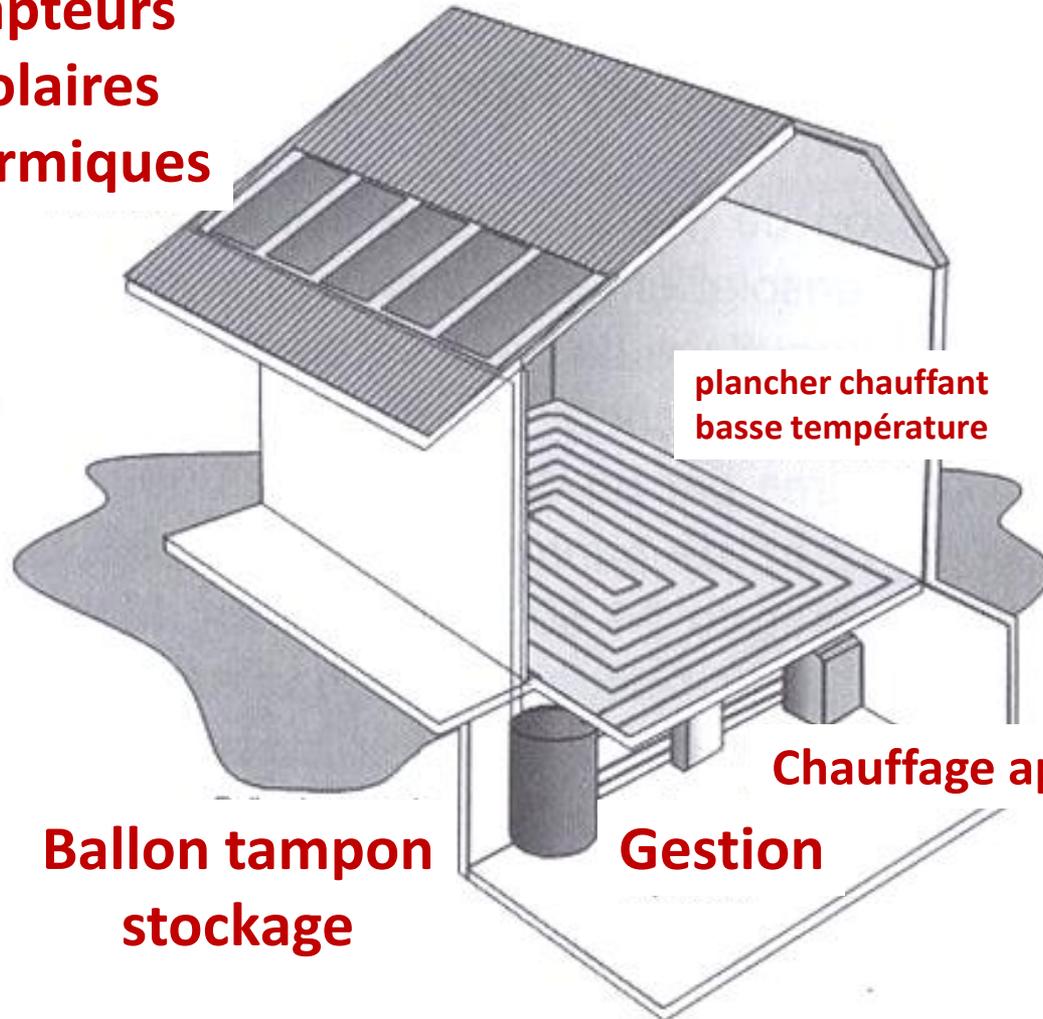
Rayons du soleil

Accumulateur

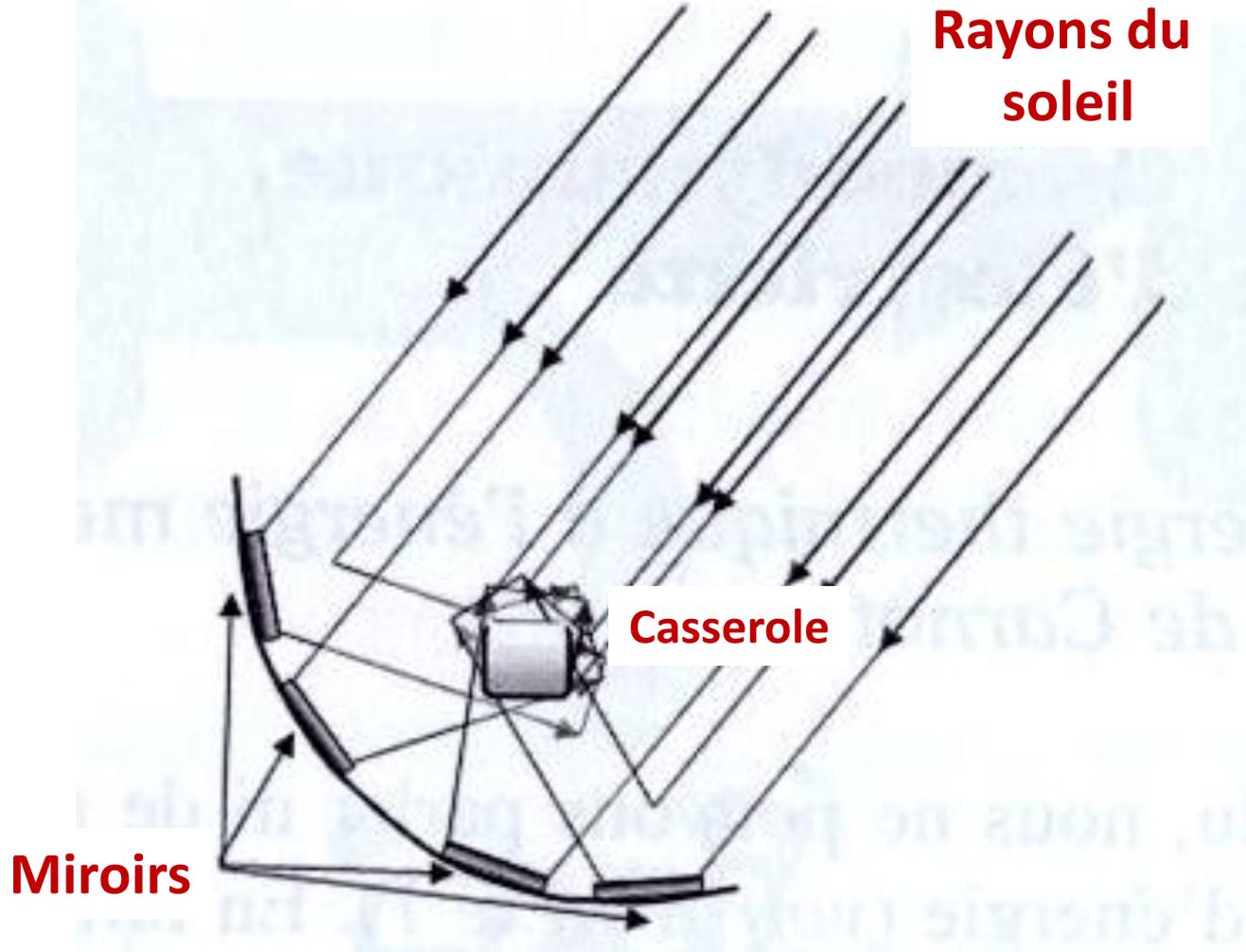


Plancher chauffant basse température

**Capteurs
solaires
thermiques**



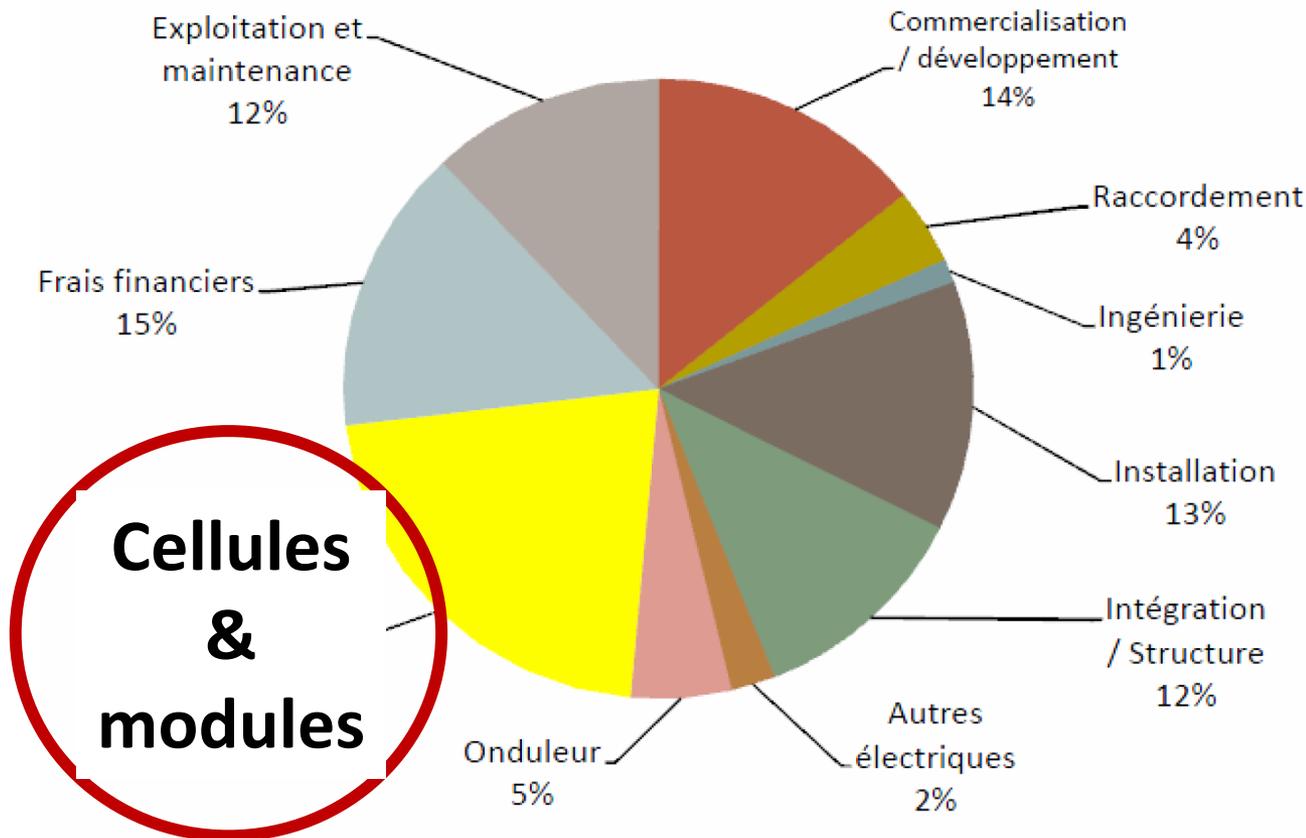
Cuiseur solaire



Le poids des cellules et modules dans le coût du kWh (2010)

Décomposition du coût de production d'un kWh photovoltaïque

➤ Répartition des coûts d'installation et d'exploitation sur 20 ans en euros/kWh¹



• Il est nécessaire de considérer le coût de production, en incluant frais financiers et d'exploitation, en considérant le coût au kWh

Sources : ADEME, SER, EPIA, estimations BIPE, entretiens

Source : SOLER-SER¹