

# Le solaire thermique à concentration : Principes, technologies et défis

LABORATOIRE  
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX  
et ENERGIE SOLAIRE

UPR 8521 du CNRS.  
conventionnée avec  
l'université de Perpignan

PROCESSES, MATERIALS  
and SOLAR ENERGY  
LABORATORY



Master ER&S  
2015  
Université  
Mohammed V

**FLAMANT  
Gilles**

Directeur  
PROMES-CNRS

[Gilles.flamant@promes.cnrs.fr](mailto:Gilles.flamant@promes.cnrs.fr)



# Sommaire

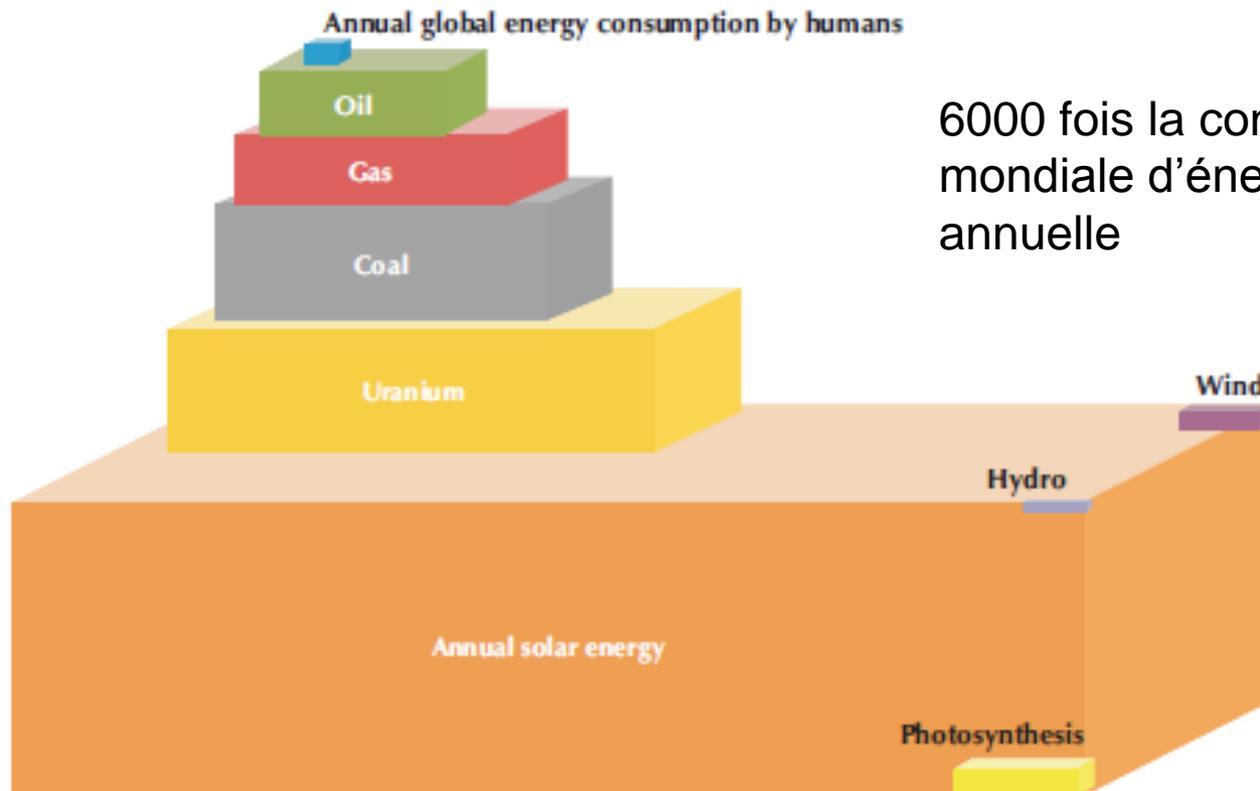
- Potentiel de l'énergie solaire
- Les voies de valorisation du solaire à concentration
- Les sous-systèmes composant une centrale solaire
  - Les technologies de concentration
  - Les récepteurs solaires
  - Le stockage
  - La turbine
- Les centrales solaires
- Coûts
- Défis

A modern building facade with a blue and white color scheme, featuring a grid of windows and a curved architectural element. The building is partially visible on the left side of the frame, set against a white background.

# Potentiel de l'Énergie Solaire

# Potentiel de l'énergie solaire

Figure 2.1 Total energy resources

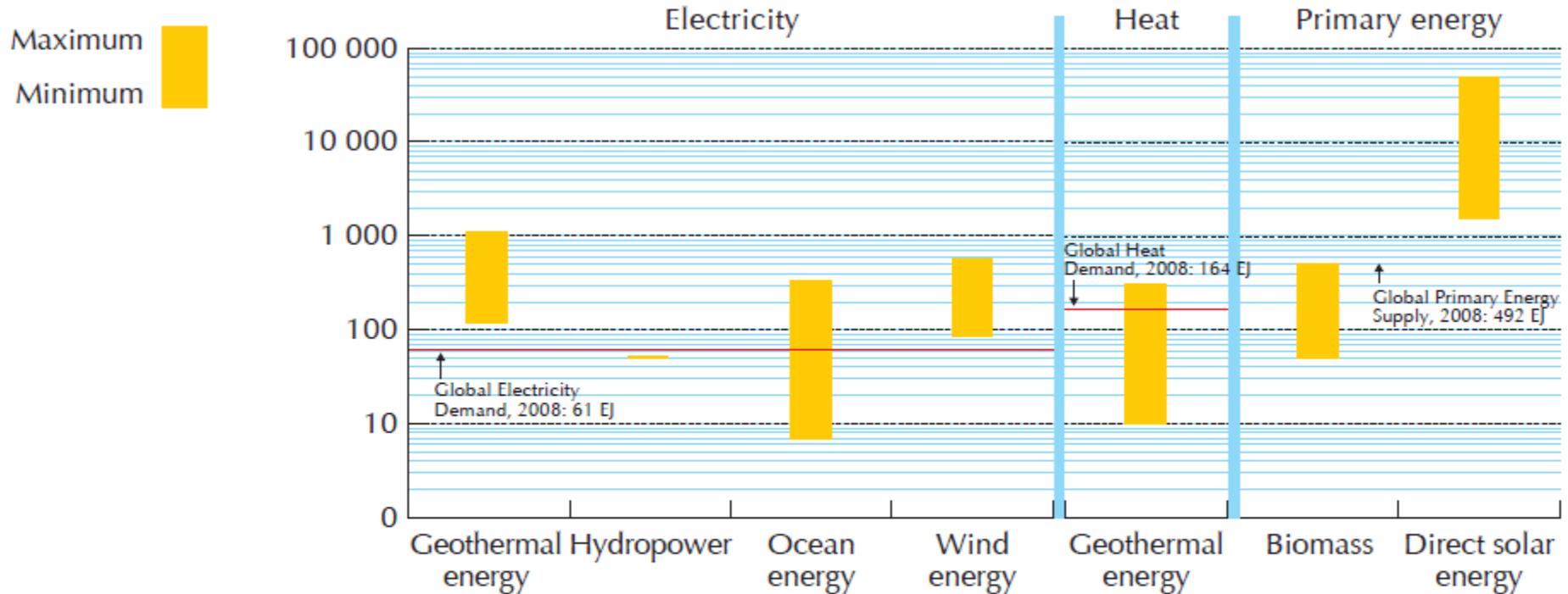


6000 fois la consommation mondiale d'énergie annuelle

Source: National Petroleum Council, 2007, after Craig, Cunningham and Saigo (republished from IEA, 2008b).

# Potentiel de l'énergie solaire

Global technical potential (EJ/yr, log scale)



Notes: Biomass and solar are shown as primary energy due to their multiple uses; the figure is presented in logarithmic scale due to the wide range of assessed data. Technical potentials reported here represent total worldwide potentials for annual RE supply and do not deduct any potential that is already being utilised. 1 exajoule (EJ)  $\approx$  278 terawatt hours (TWh).

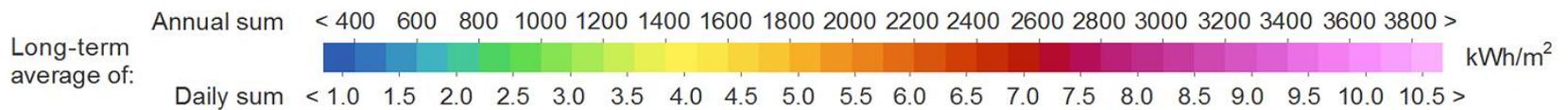
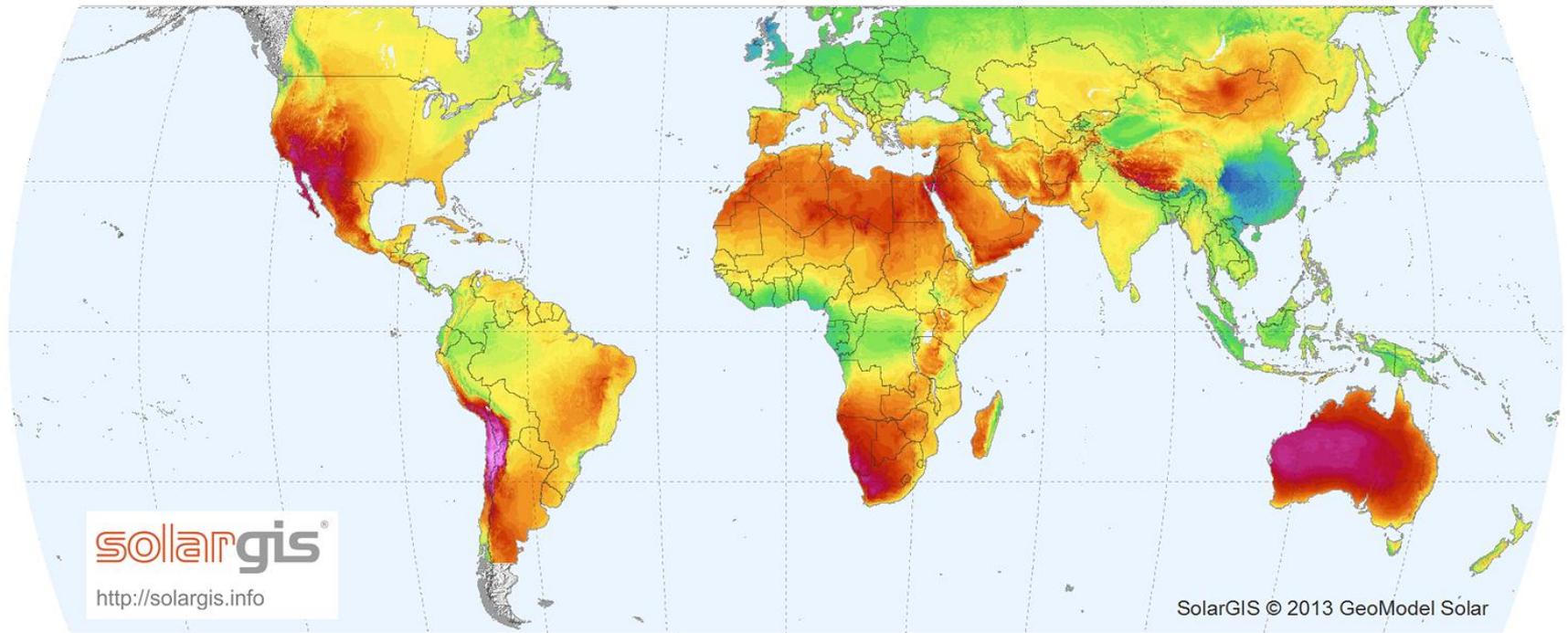
Source: IPCC, 2011.

Source : IEA « Solar energy perspectives » 2011

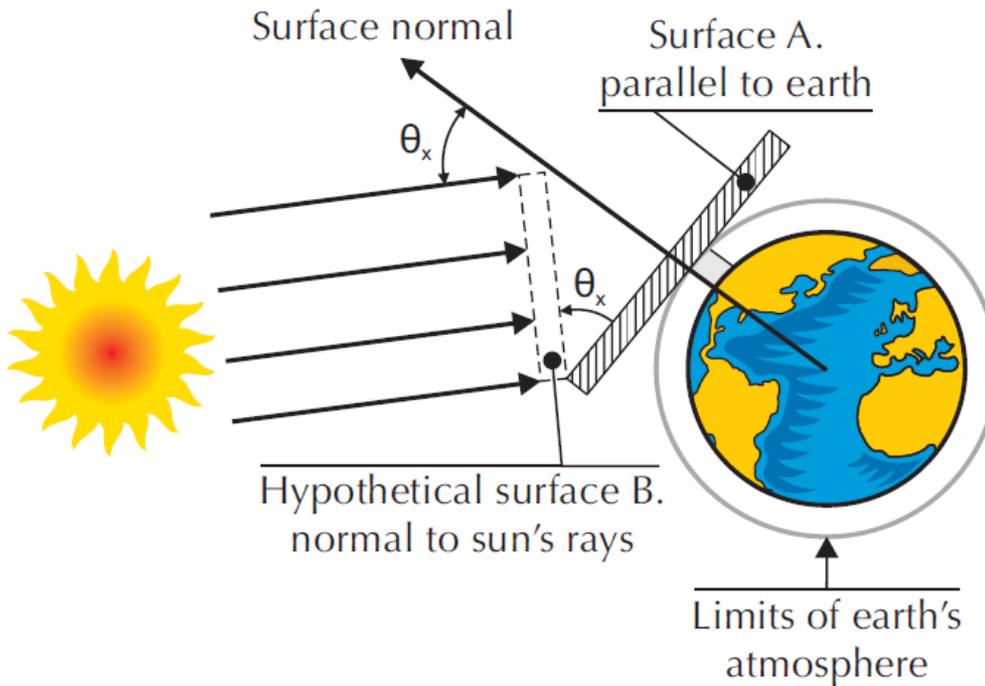
# Potentiel de l'énergie solaire

## WORLD MAP OF DIRECT NORMAL IRRADIATION

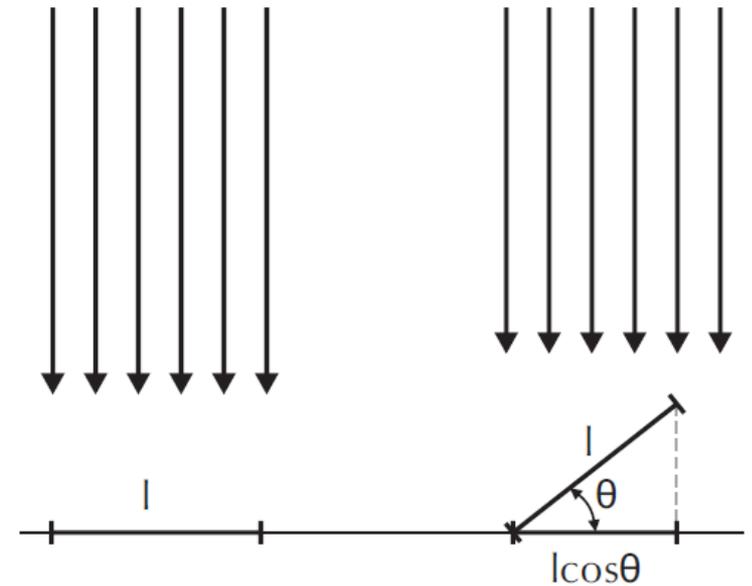
GeoModel  
SOLAR



# Potentiel de l'énergie solaire



## *Effet cosinus*

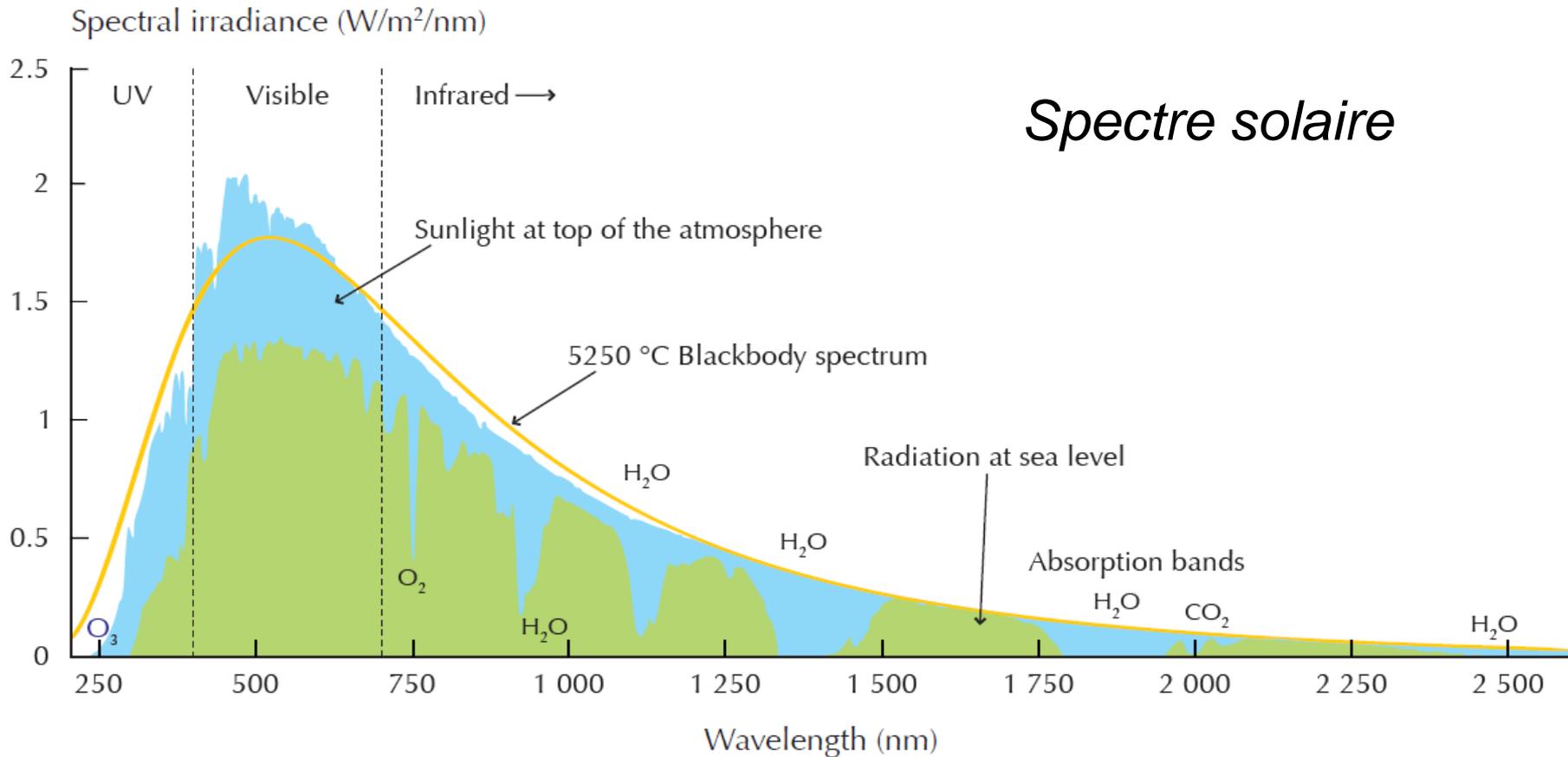


*Note: As a plate exposed to the sun tilts, the energy it receives varies according to the cosine of the tilt angle.*

*Source: Stine and Geyer, 2011 (left).*



# Potentiel de l'énergie solaire

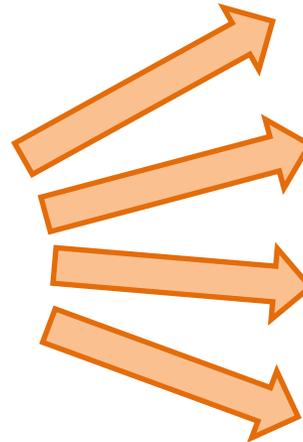
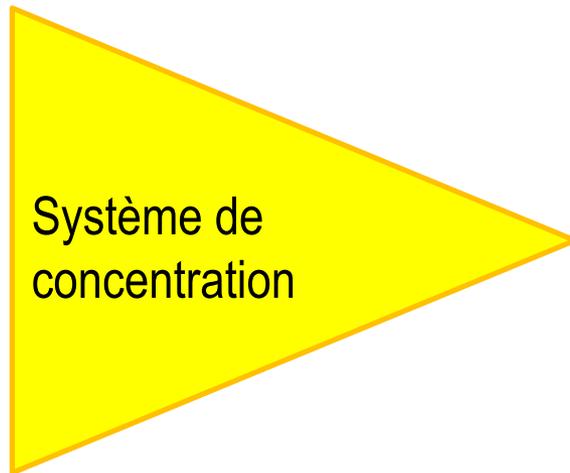




# Les voies de valorisation du solaire à concentration



# De la source aux besoins



Electricité (photovoltaïque à concentration)

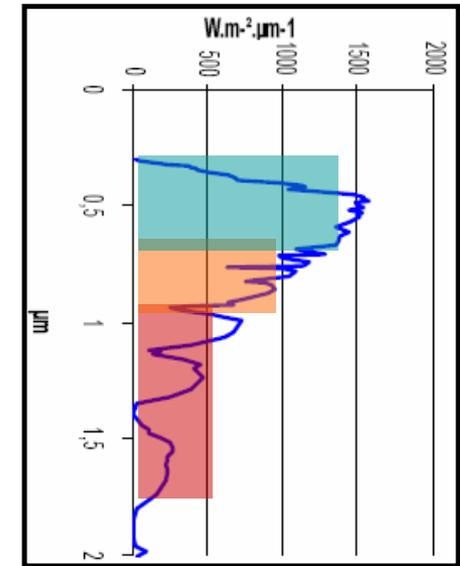
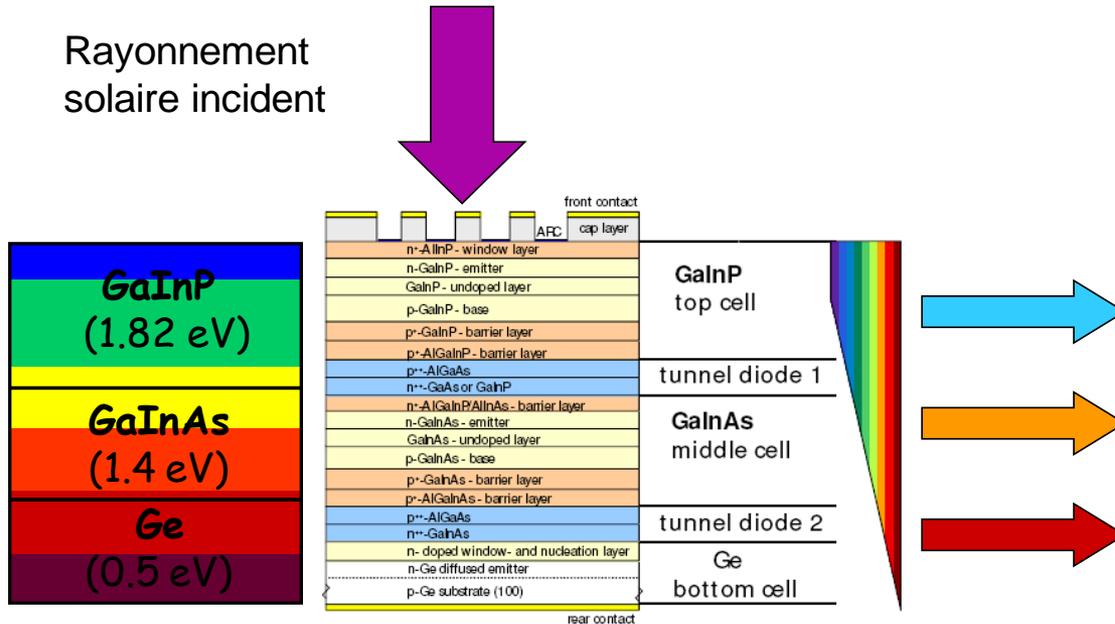
Electricité (conversion thermodynamique)

Chaleur industrielle

Combustibles de synthèse

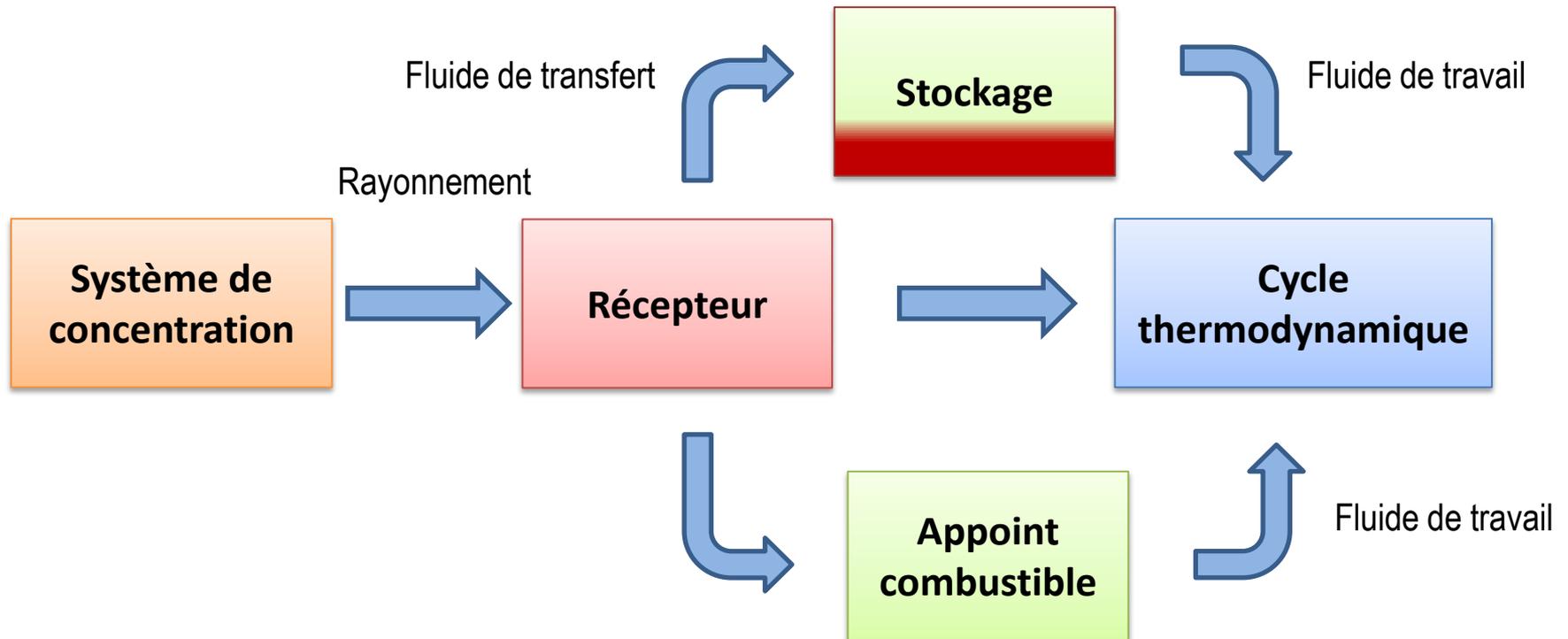
# PV sous concentration

Rayonnement solaire incident



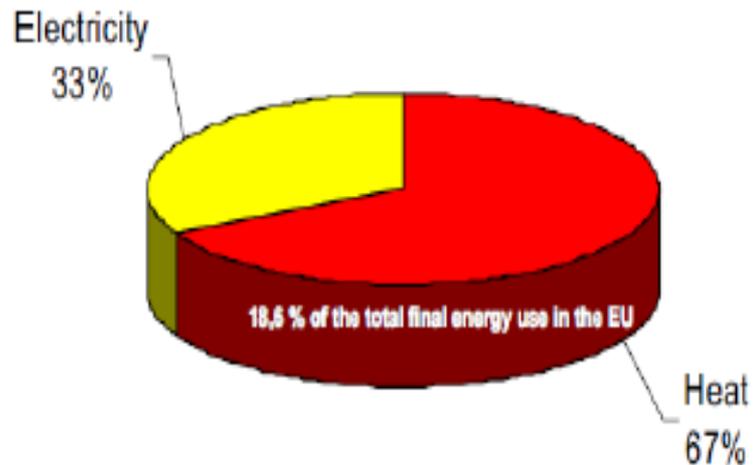
Record pour une cellule de laboratoire: 46%

# Centrales solaires thermiques

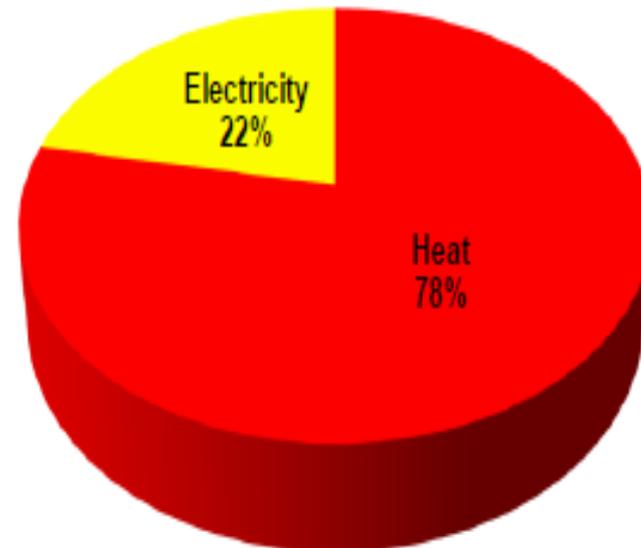


# Chaleur industrielle

**Final Energy Use of the EU - Industry**  
share of heat and electricity



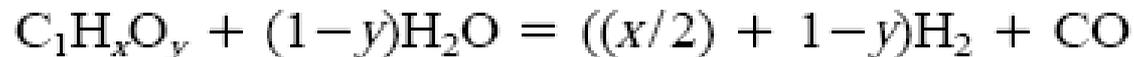
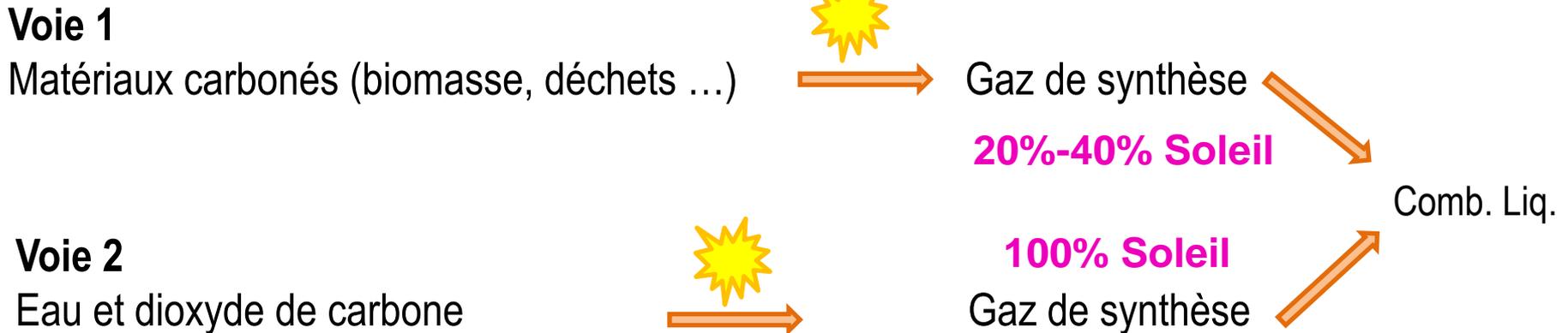
**Final energy Use of the SMCs - Industry**  
share of heat and electricity



Sources: *Green Paper - Towards A European Strategy For The Security Of Energy Supply, Brussels, 2001 (left); OME (right)*

# Combustibles solaires

Les combustibles de synthèse : produire des combustibles (liquides) grâce au solaire concentré (1000°C – 1600°C) via H<sub>2</sub> + CO, gaz de synthèse





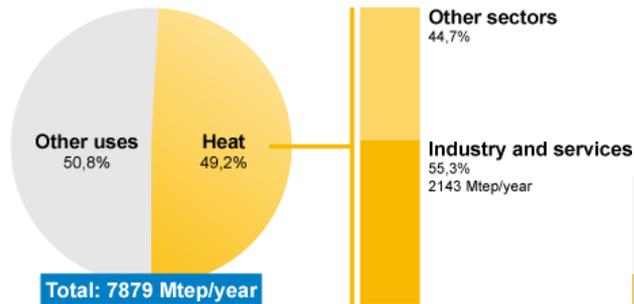
# Photovoltaïque/ Thermodynamique

<b>Paramètre</b>	<b>Thermique à concentration</b>	<b>Photovoltaïque</b>
<b>Ressource solaire</b>	Rayonnement direct	Rayonnement total (direct + diffus)
<b>Mode de conversion</b>	Thermodynamique	Electronique
<b>Stockage</b>	Thermique	Electrochimique
<b>Hybridation directe</b>	Oui	Non
<b>Effet de taille</b>	Oui	Non
<b>Facteur de charge annuel</b> (grande échelle)	20%-70%	20%-30%

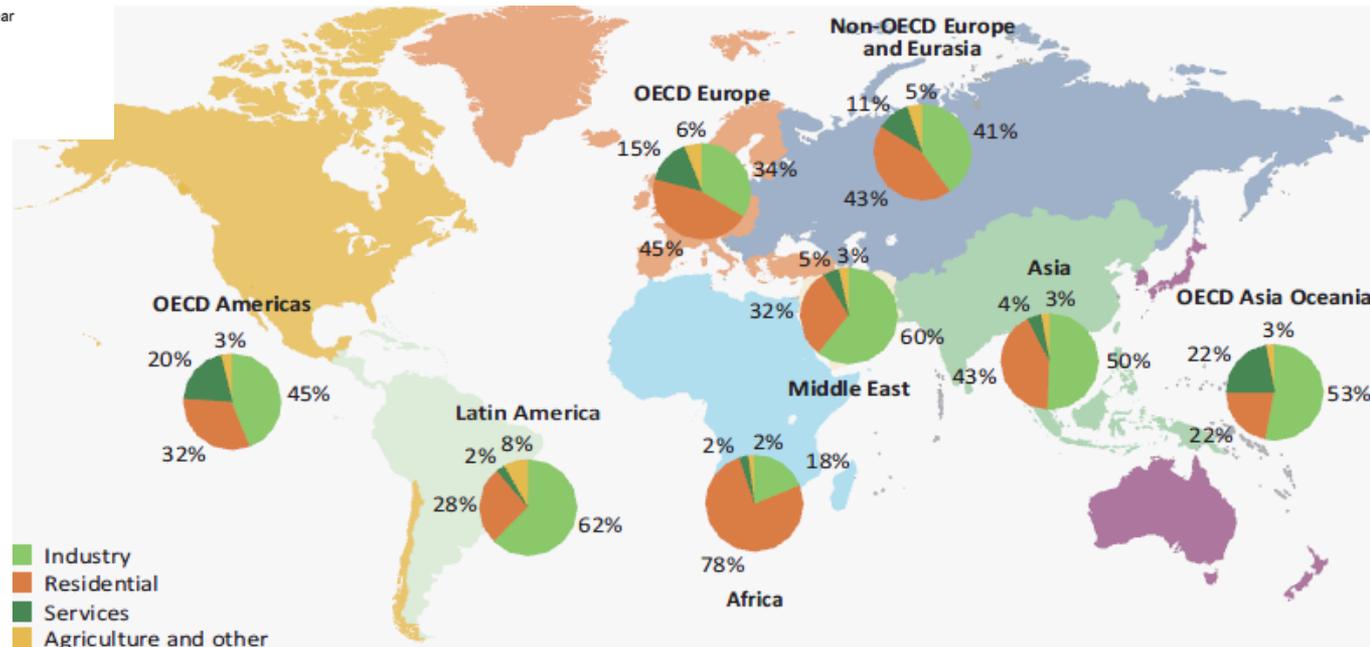
# Chaleur industrielle

Un potentiel énorme d'applications pour le solaire à concentration

Répartition de la demande mondiale de chaleur

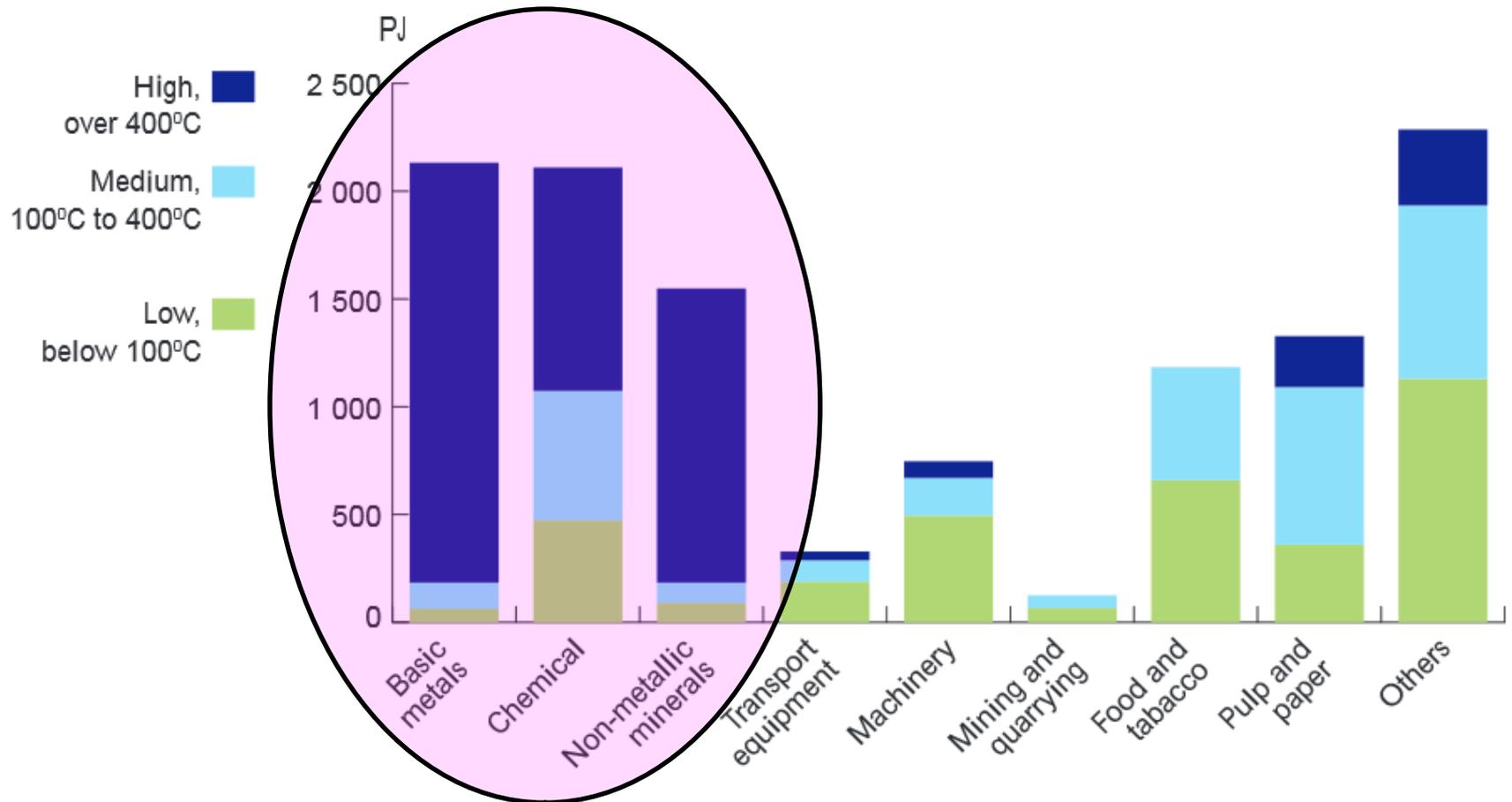


**Demande d'énergie mondiale :**  
**Environ 50% est de la chaleur**



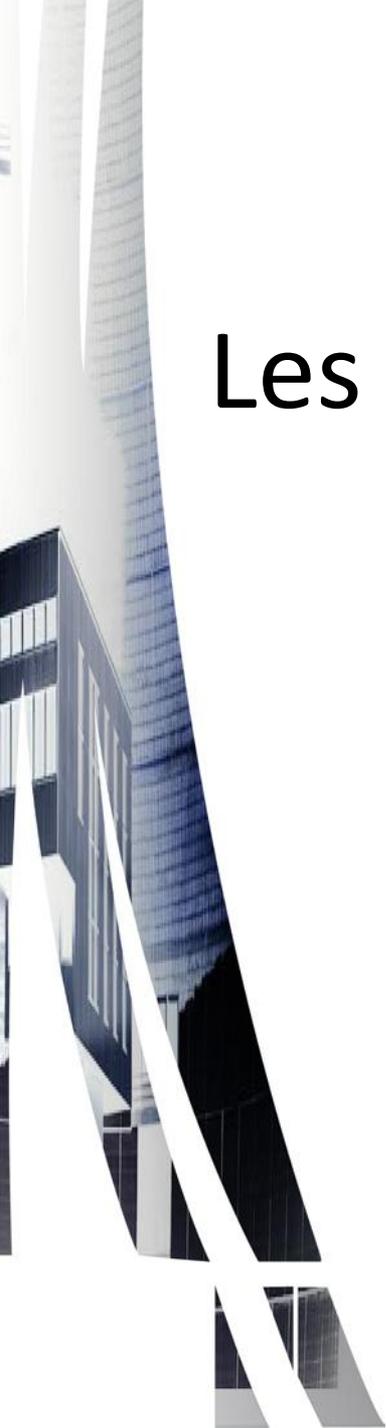
Figures, données 2009  
 Source: Energy Technology Perspectives 2012

# Chaleur industrielle



Source: Werner, 2005-2006.

Source : IEA « Solar energy perspectives » 2011



# Les sous-systèmes composant une centrale solaire

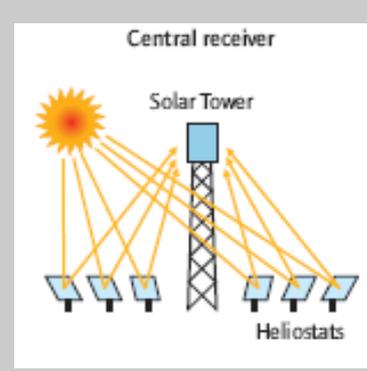
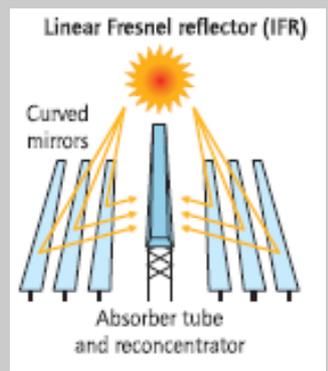
- Les technologies de concentration
- Les récepteurs solaires
- Le stockage
- La turbine
- La source froide (refroidissement)

# Technologies de concentration

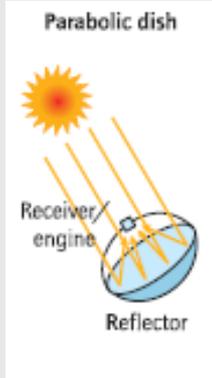
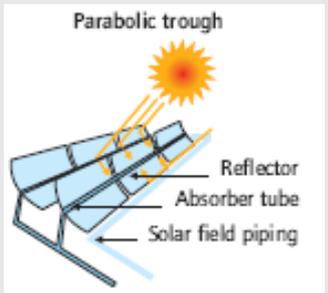


<b>Concentration Réception</b>	<b>Linéaire (30-100 soleils)</b> <b>300°C-500°C</b>	<b>Ponctuelle (500-10 000 soleils)</b> <b>500°C-1500°C</b>
--------------------------------	--	---

**Fixe**



**Mobile**





# Technologies de concentration

Technologie	Rendement optique annuel	Rendement de conversion annuel	Stockage	Hybridation	Potentiel d'amélioration technologique
Cylindro-parabolique	65%-70%	15%-16%	Oui	Oui	Faible
Fresnel linéaire	50%	9%-10%	Non si GDV	Oui	Moyen
Tour	60%-65%	15%-18%	Oui	Oui	Elevé
Parabole moteur	90%	20%-25%	Non	Non	Faible

# Les récepteurs solaires

Toutes les centrales commerciales actuelles utilisent des récepteurs tubulaires.

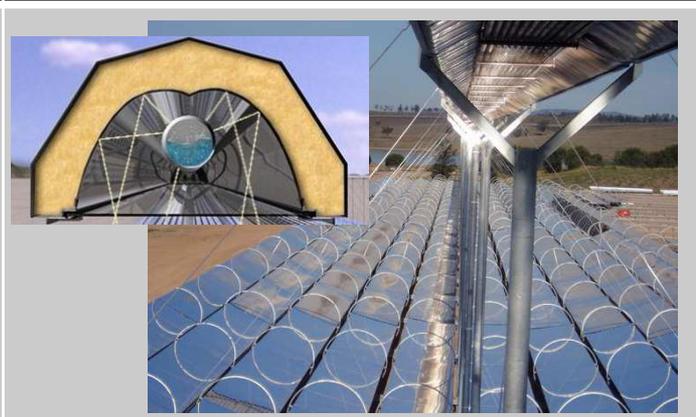


**Concentration**  
**Absorbeur**

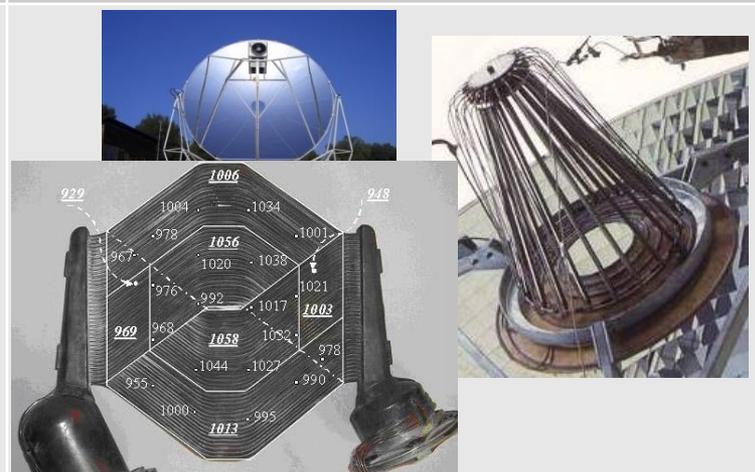
**Linéaire**

**Ponctuelle**

**Fixe**



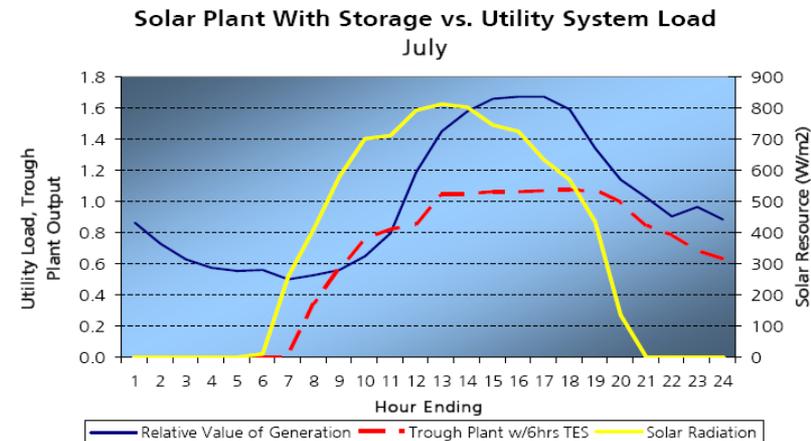
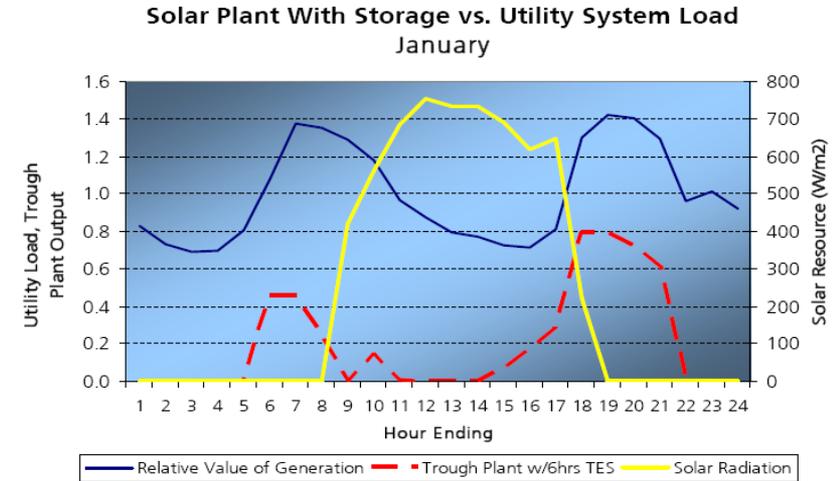
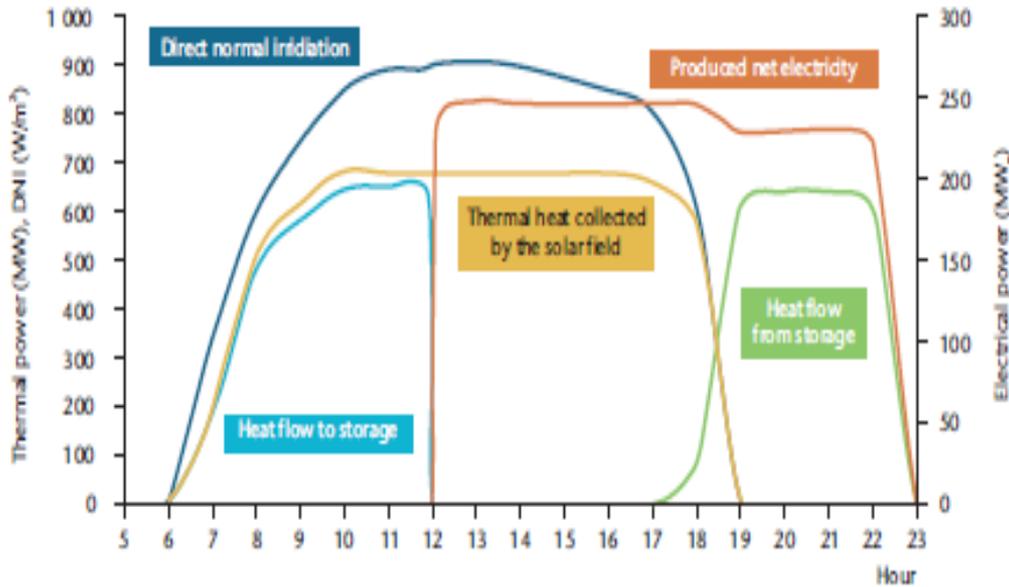
**Mobile**



# Le stockage

## Fonction :

- Atténuer les effets des variations brusques de d'éclairement solaire
- Adapter la production à la demande



# Le stockage

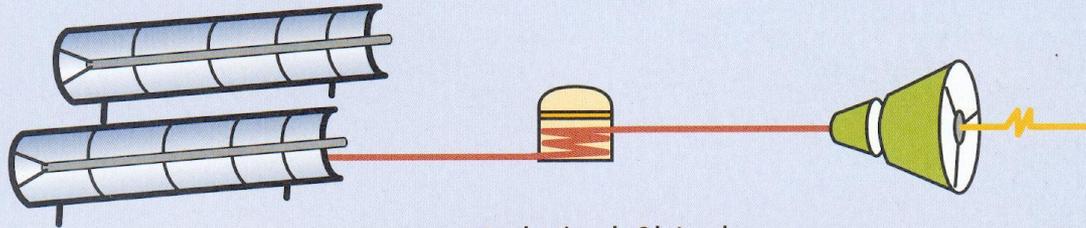
Différents modes de fonctionnement

## Semi-base

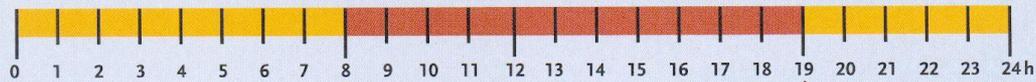
Champ solaire

Petit stockage

Turbine de 250 MW



Production de 8 h à 19 h

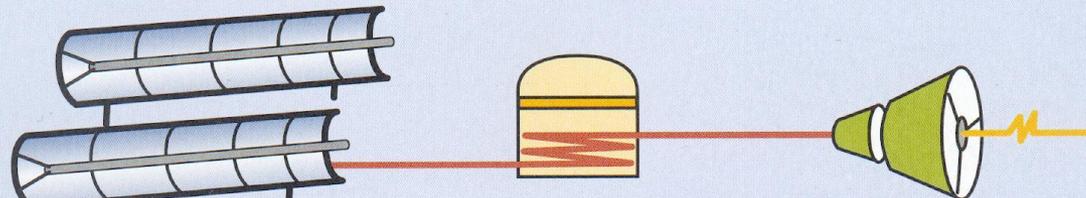


## Semi-base décalée

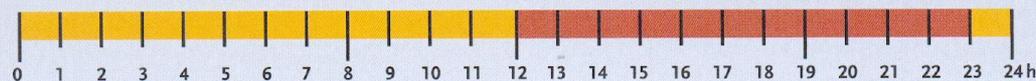
Champ solaire

Stockage moyen

Turbine de 250 MW



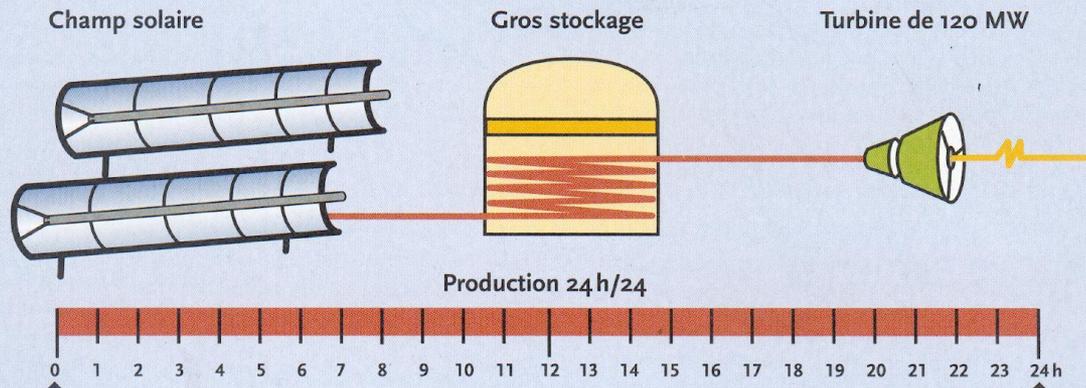
Production de 12 h à 23 h



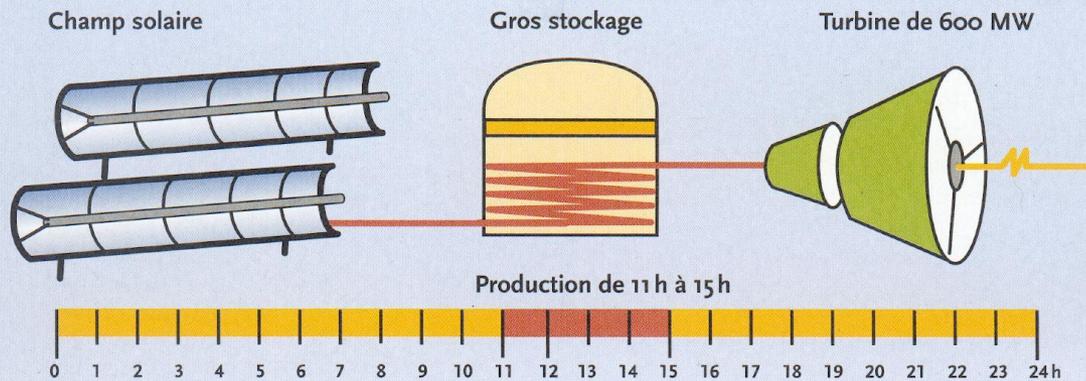
# Le stockage

Différents modes de fonctionnement

## Base continue



## Pointe



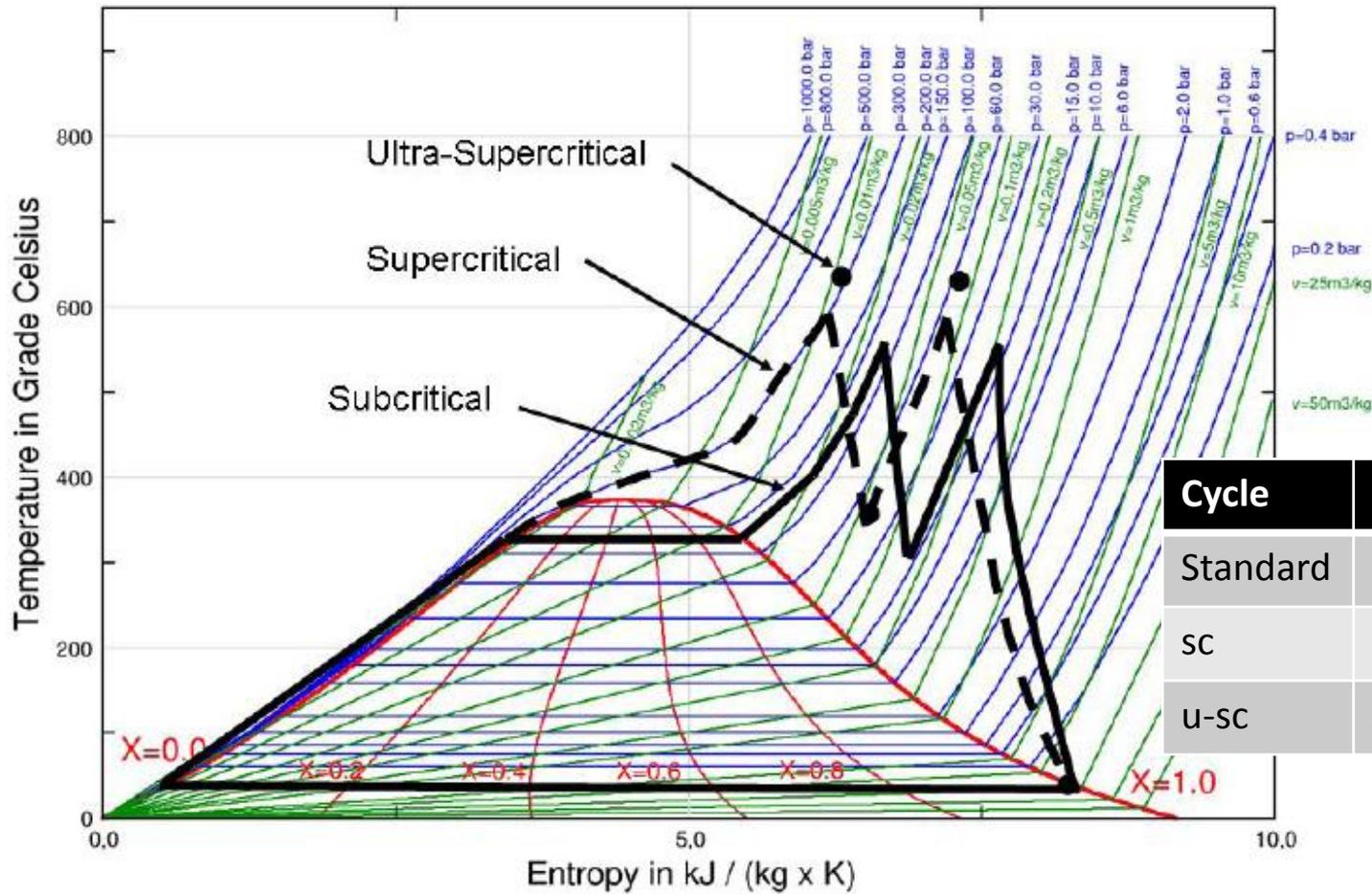


# La turbine

<b>Cycle Thermodynamique</b>	<b>Rendement de conversion électrique</b>	<b>Potentiel d'amélioration</b>
Cycles vapeur (Rankine/Hirn) 390°C-565°C	37% - 42%	0 (Technologie actuelle)
Vapeur Supercritique ≥ 600°C	48%	17% - 35%
CO <sub>2</sub> Supercritique (Cycle Brayton) 600°C – 800°C	50% - 55%	22% - 55%
Cycle combiné (Brayton/Rankine) 1300°C	60%	45% - 67%



# La turbine



Cycle	P (bars)	T (°C)
Standard	125	535
sc	301	591
U-SC	331	630

# Le refroidissement

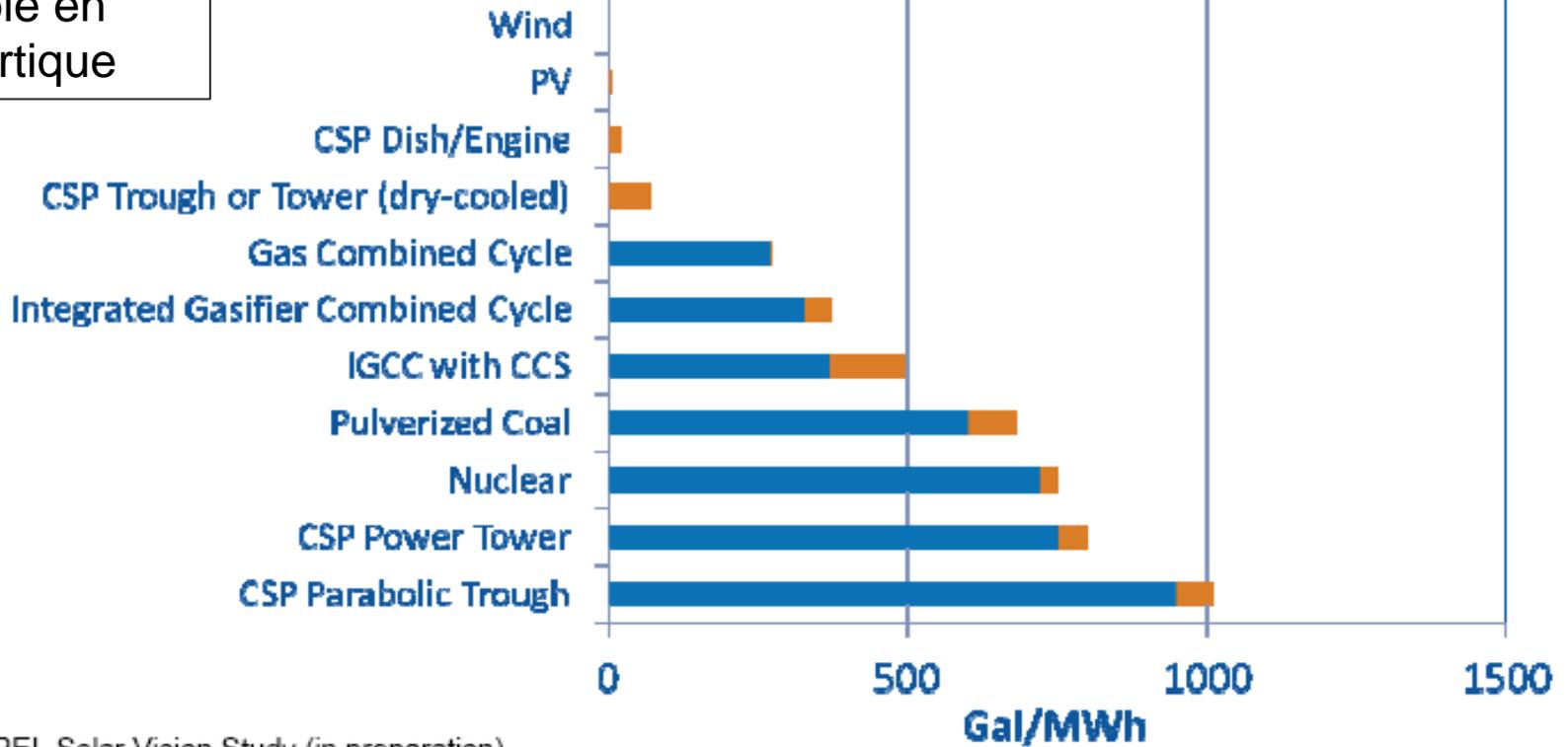


■ Water for Cooling ■ Other Water Use

m<sup>3</sup>/MWh

0,0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5

Refroidissement sec indispensable en région désertique



NREL Solar Vision Study (in preparation)

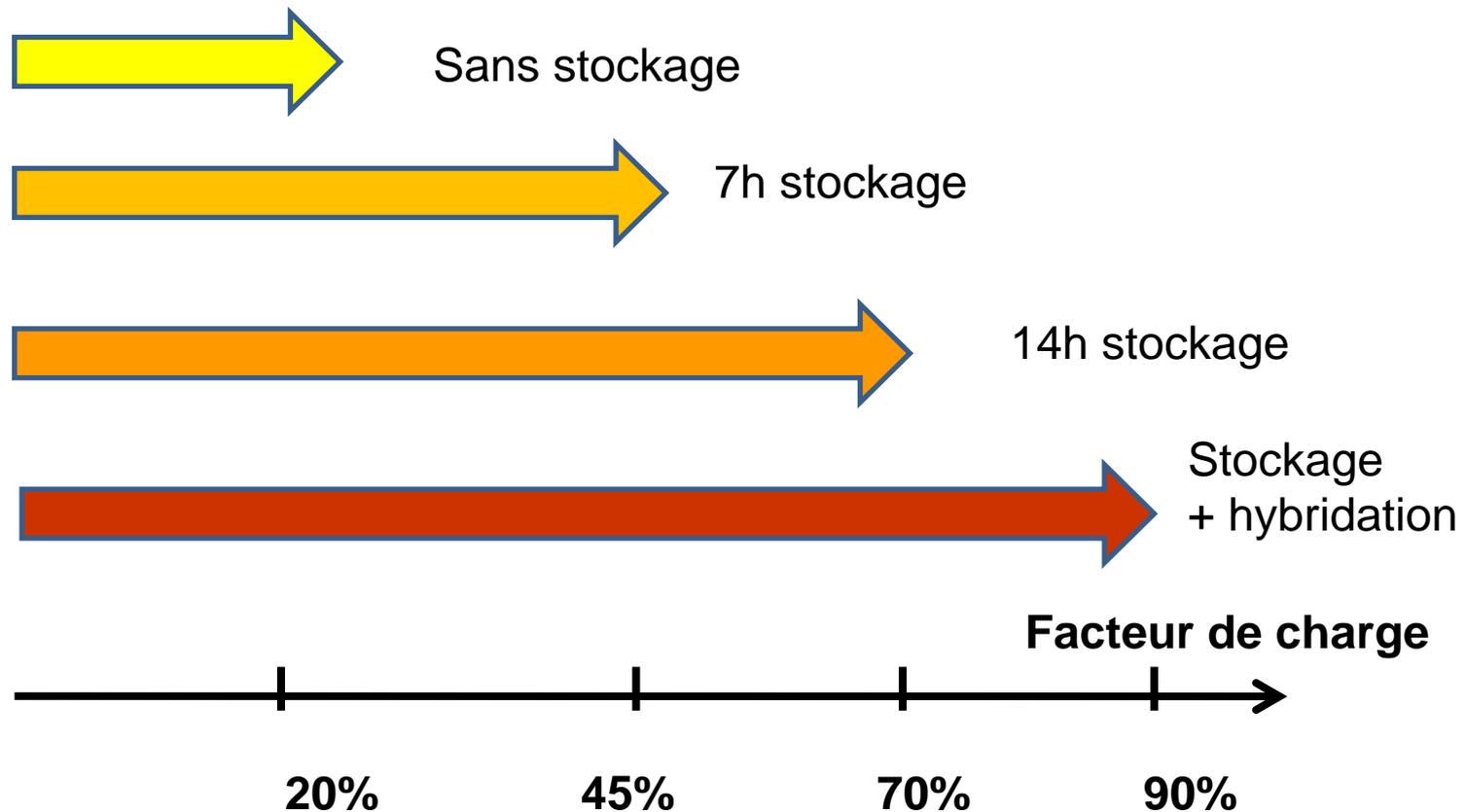
Source: C.S. Turchi, NREL, SolarPACES 2010



# Les centrales solaires thermodynamiques

# Avantage principal

- Production fiabilisée par le stockage et l'hybridation





# Rendement

**Rendement de conversion soleil → électricité**

Puissance électrique net produite = Puissance solaire disponible – Pertes

Pertes = Réflexion par le système de concentration + Réflexion, émission, convection par le récepteur + Thermique turbine + Consommation parasites (pompes) + Autres (canalisations)

Soit

Puissance électrique net produite/Puissance solaire disponible =  $\eta_G$

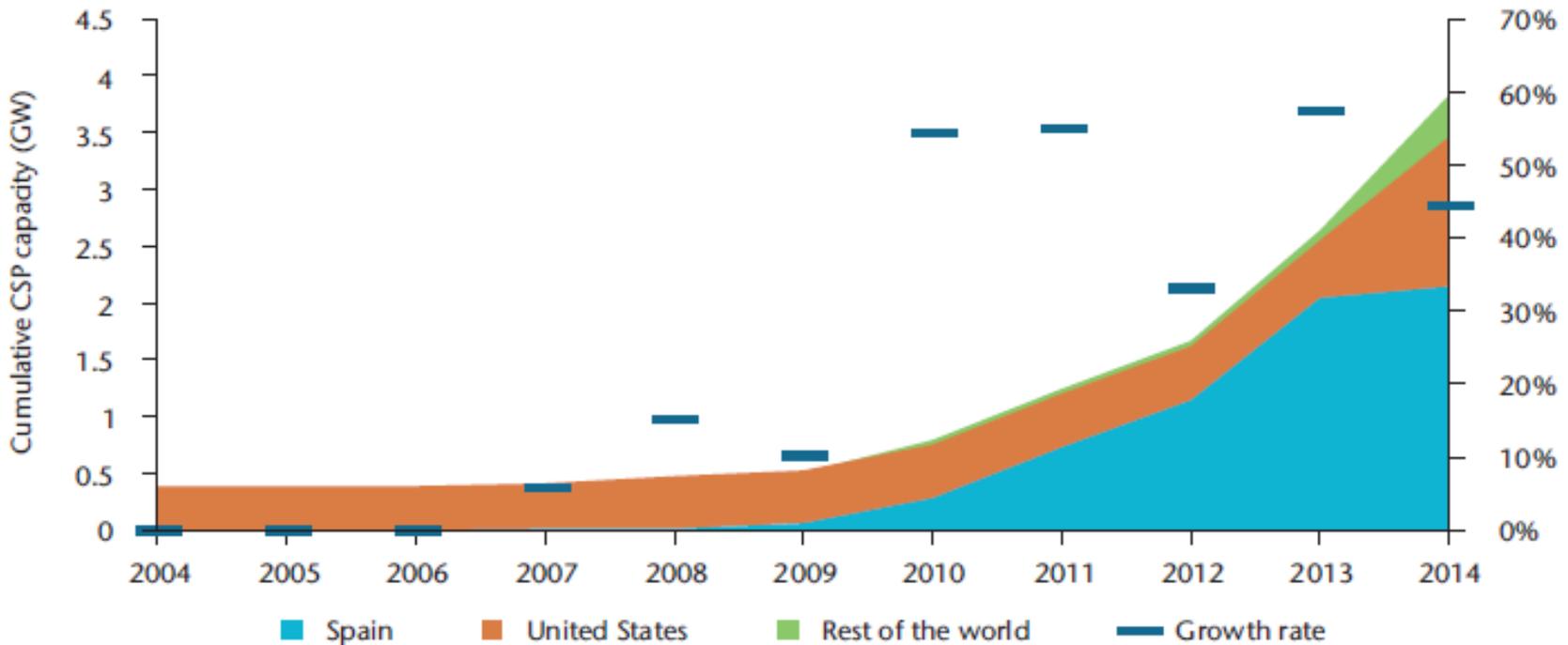
$$\eta_G = \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{Rec}} \cdot \eta_{\text{cyc}} \cdot (1 - \eta_{\text{par}})$$

$\eta_{\text{opt}}$  varie pendant la journée et au cours de l'année

Exemple :  $0,65 \times 0,85 \times 0,40 \times 0,90 \approx 0,20$  (20%)

# Développement industriel

Figure 1: Global cumulative growth of STE capacity



4 GW installé fin 2014  
2 GW prévus au Maroc

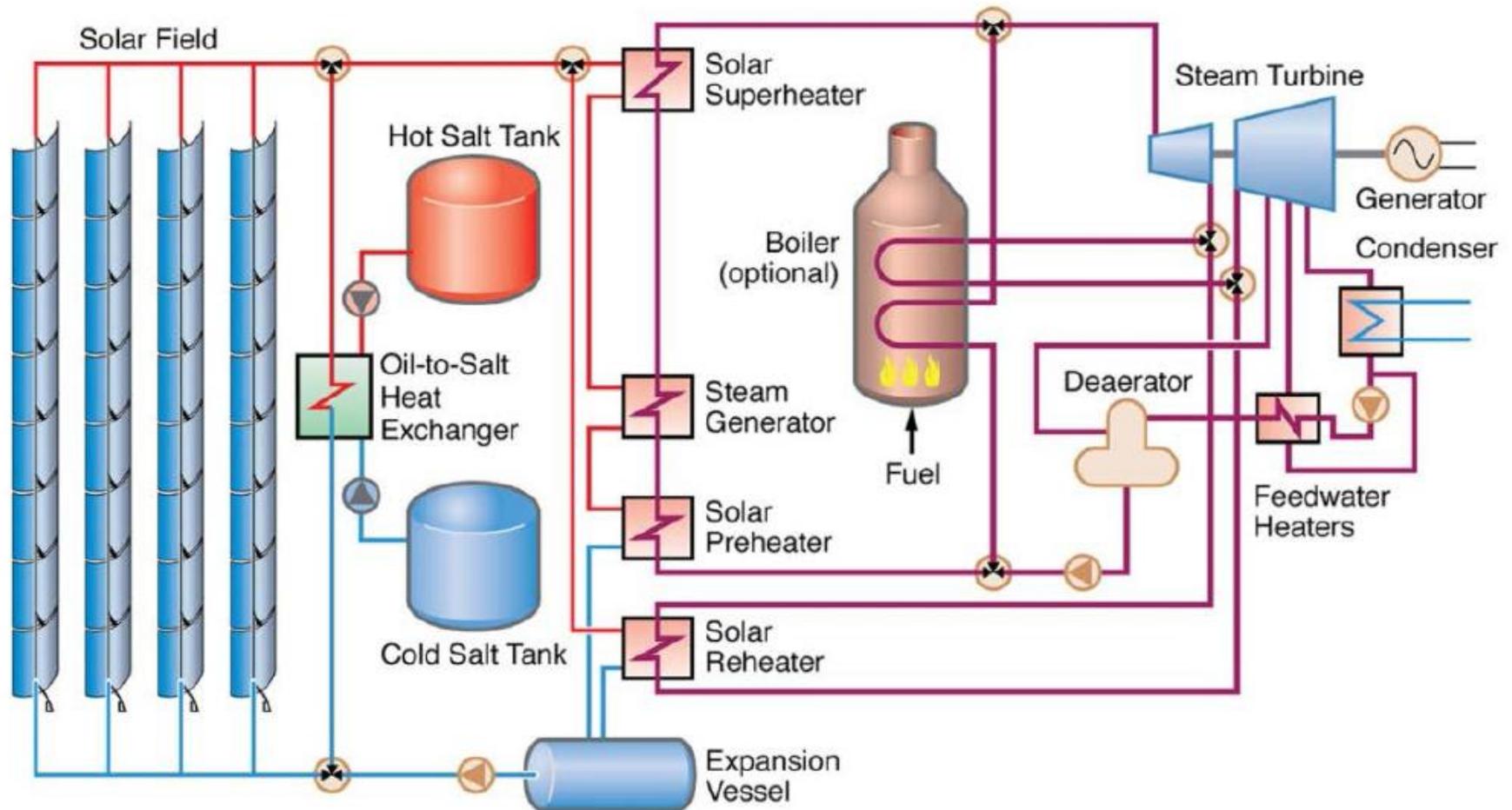
## *2 technologies dominant :*

**Cylindro-parabolique** avec huile comme fluide de transfert, stockage sel fondu et cycle vapeur (alternative en développement : Fresnel avec génération directe de vapeur)

**Tour** avec génération directe de vapeur (sans stockage) ou sel fondu (fluide de transfert et stockage).

# Cylindro-parabolique

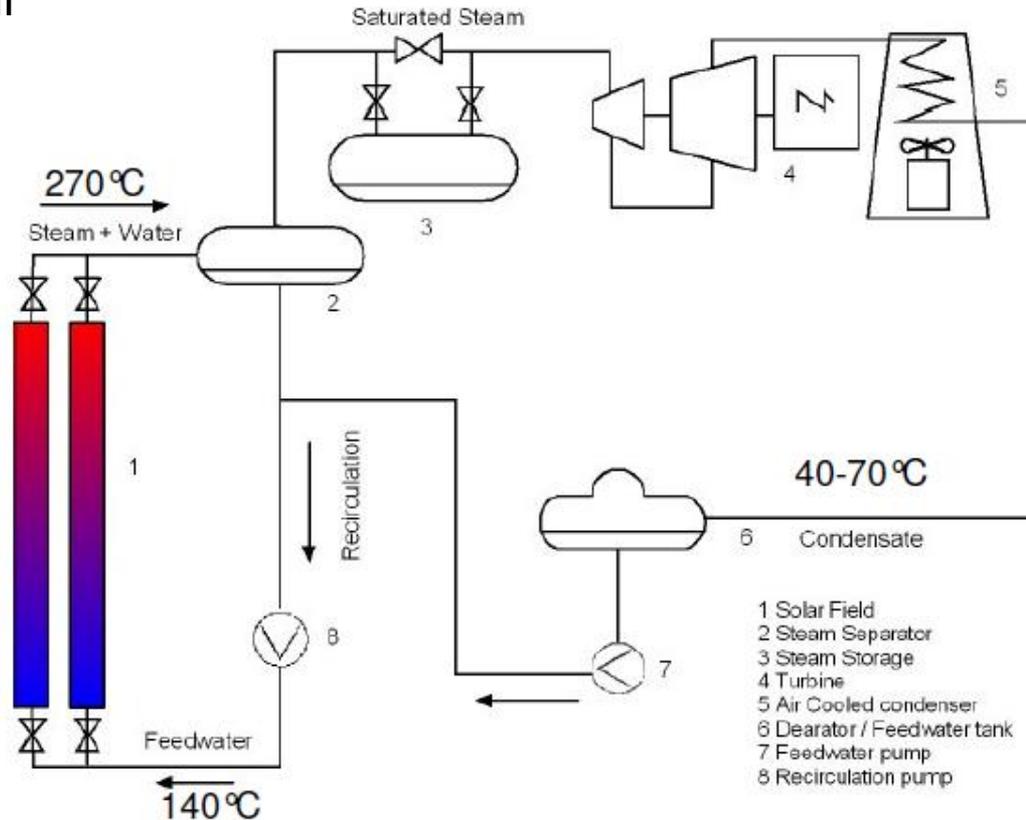
*En anglais: parabolic troughs*



# Fresnel linéaire

*En anglais: Linear Fresnel*

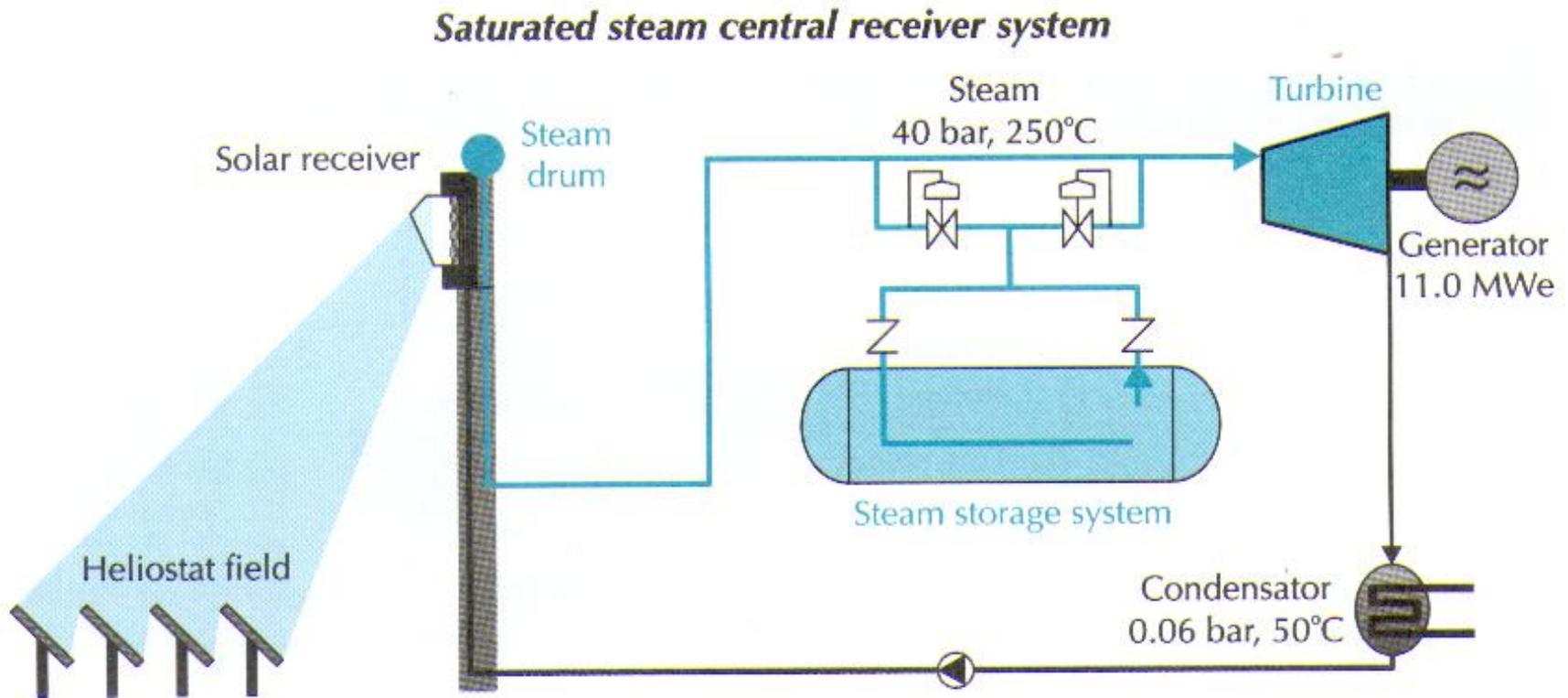
Génération  
directe de vapeur



Source: Novatec

# Centrales à Tour

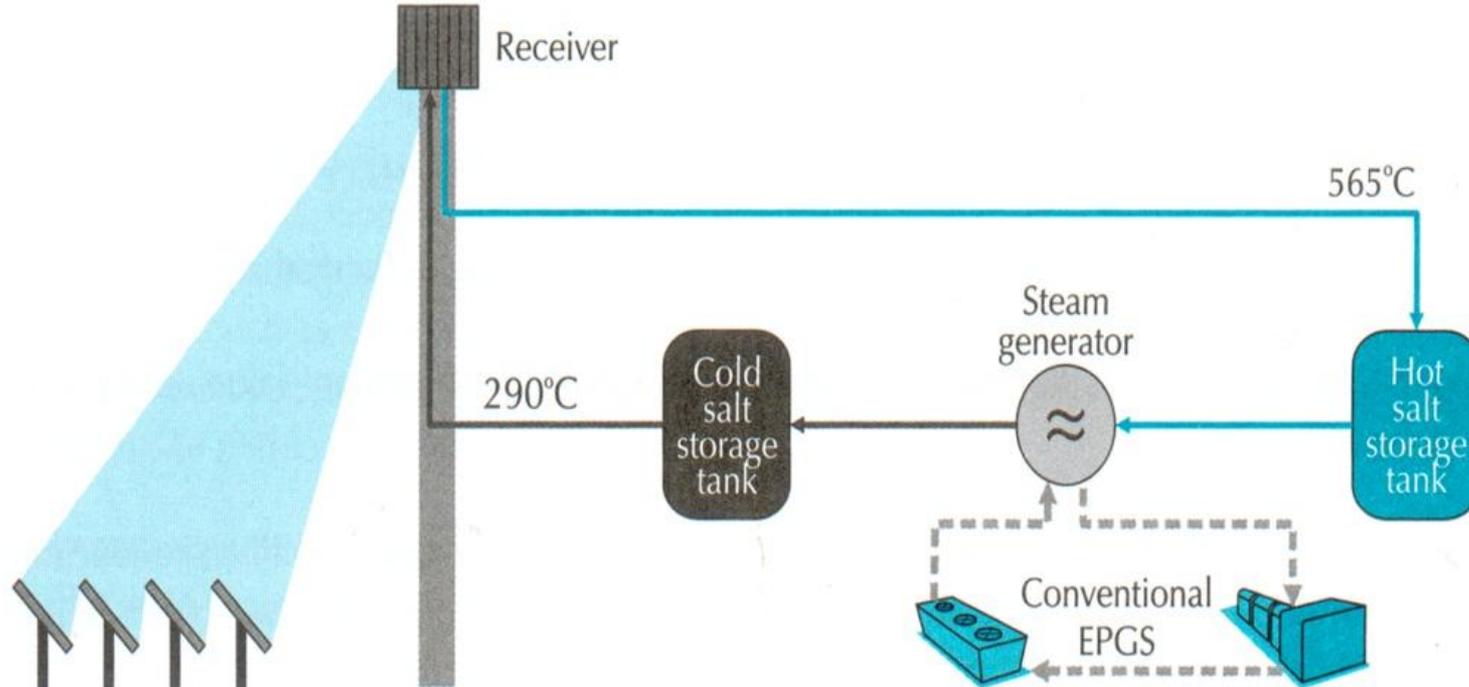
*En anglais: Central Receiver (ou Power Tower)*



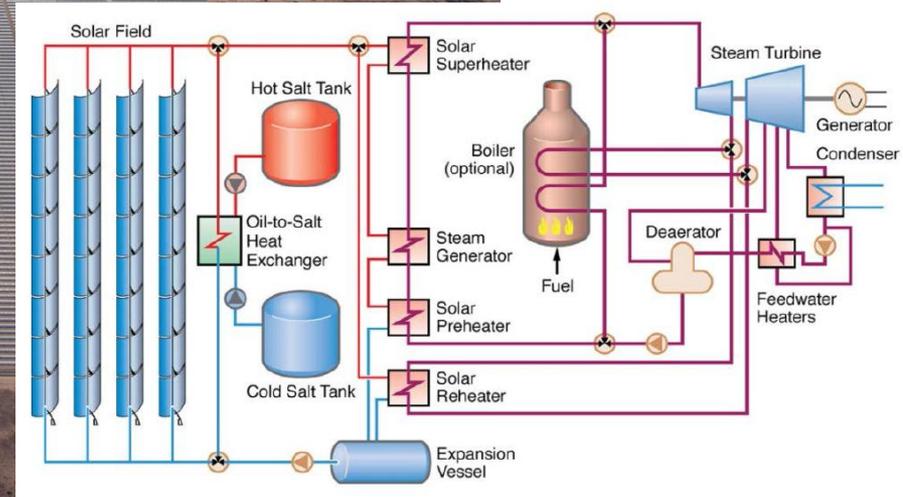
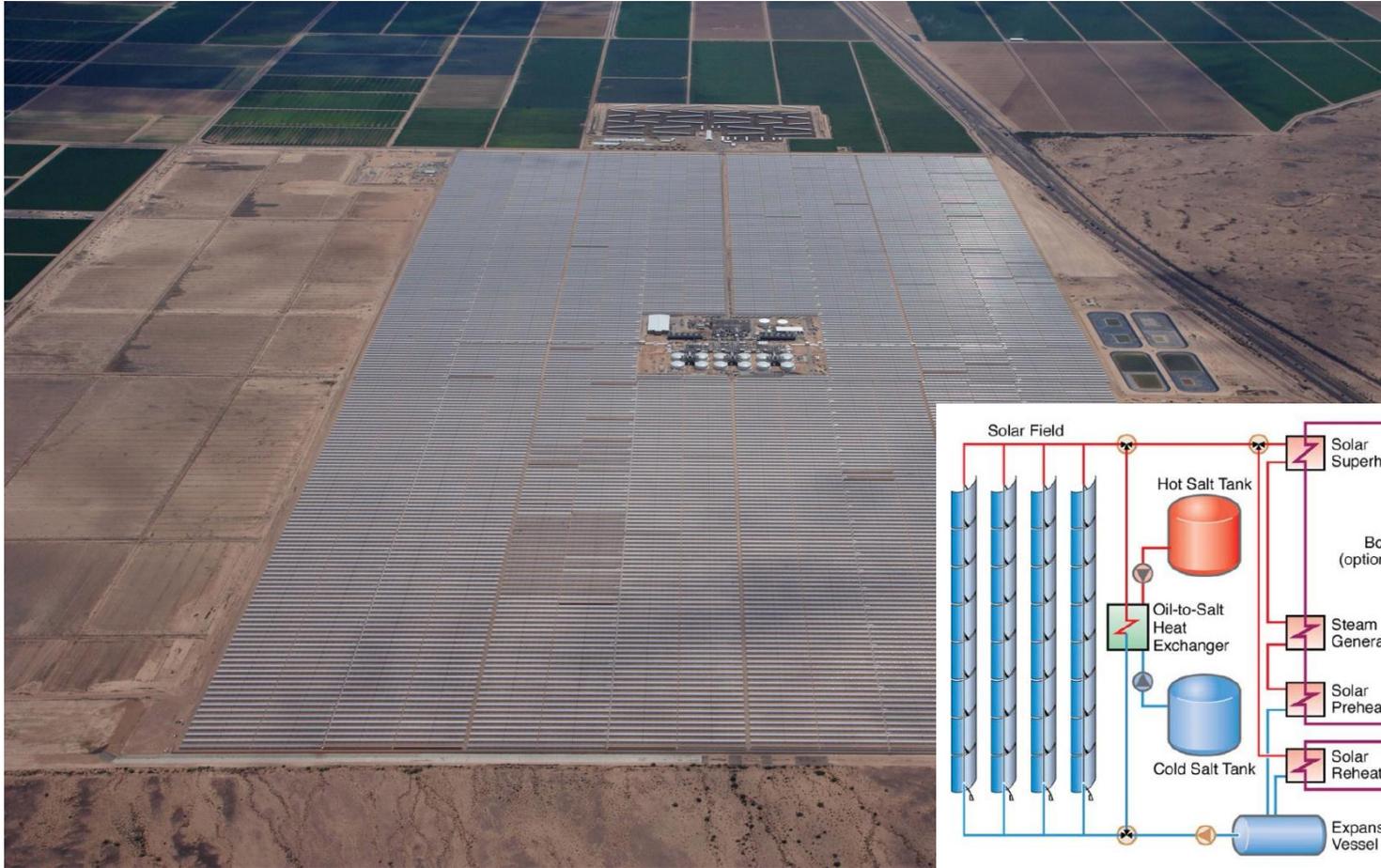
# Centrales à Tour

*En anglais: Central Receiver (ou Power Tower)*

*Molten salt central receiver system*



# Technologies : vers les grandes puissances



SOLANA (Californie) 250 MW<sub>e</sub> net, Abengoa

# Technologies : vers les grandes puissances



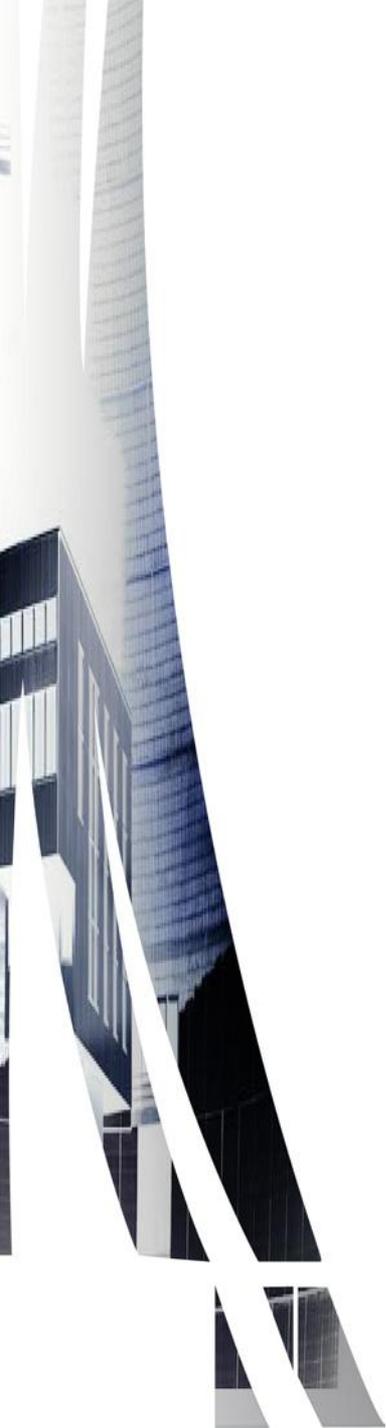
Ivanpah (Californie) 370 MW<sub>e</sub> net, GDV  
170 000 heliostats (BrightSource)



# Technologies : Simulation des centrales solaires

## LOGICIELS

- **SAM** (NREL/Sandia Lab, freeware)
  - Solar Advisor Model (Fortan)
  - Technologies : PT, CR, DS et CPV
  - Basé sur les modèles historiques américains (Excelergy, Solergy, Delsol, ...)
  - Champ solaire CRS modélisé sous Delsol3
  - PT : modèle empirique et modèle physique (nouveau 2010)
- **GREENIUS** (DLR, démo)
  - Technologies : PT, DS et CR (récepteur à air ouvert, 2010)
  - Modèle simplifié utilisé par de nombreux professionnels...
  - Fonctions limitées dans la version gratuite
- **TRNSYS** (Prix indicatif : 4600 € HT/poste)
  - Environnement de simulation dynamique des systèmes
  - Librairie STEC développée pour le CSP



# Emplois



# Création d'emplois

## Fabrication / construction

Scenario	Installed capacity	Export market demand in 2022	Local share in manufacturing	Cost reduction <sup>4</sup>	Jobs created
Scenario A (pessimistic)	2,000 MW	0 MW	76%	13%	19,000
Scenario B (moderate)	6,000 MW	0 MW	83%	16%	58,000
Scenario C (optimistic)	10,000 MW	2,000 MW	90%	20%	96,000

Source : Development of local supply chain (India)  
ESMAP for World Bank, 2013

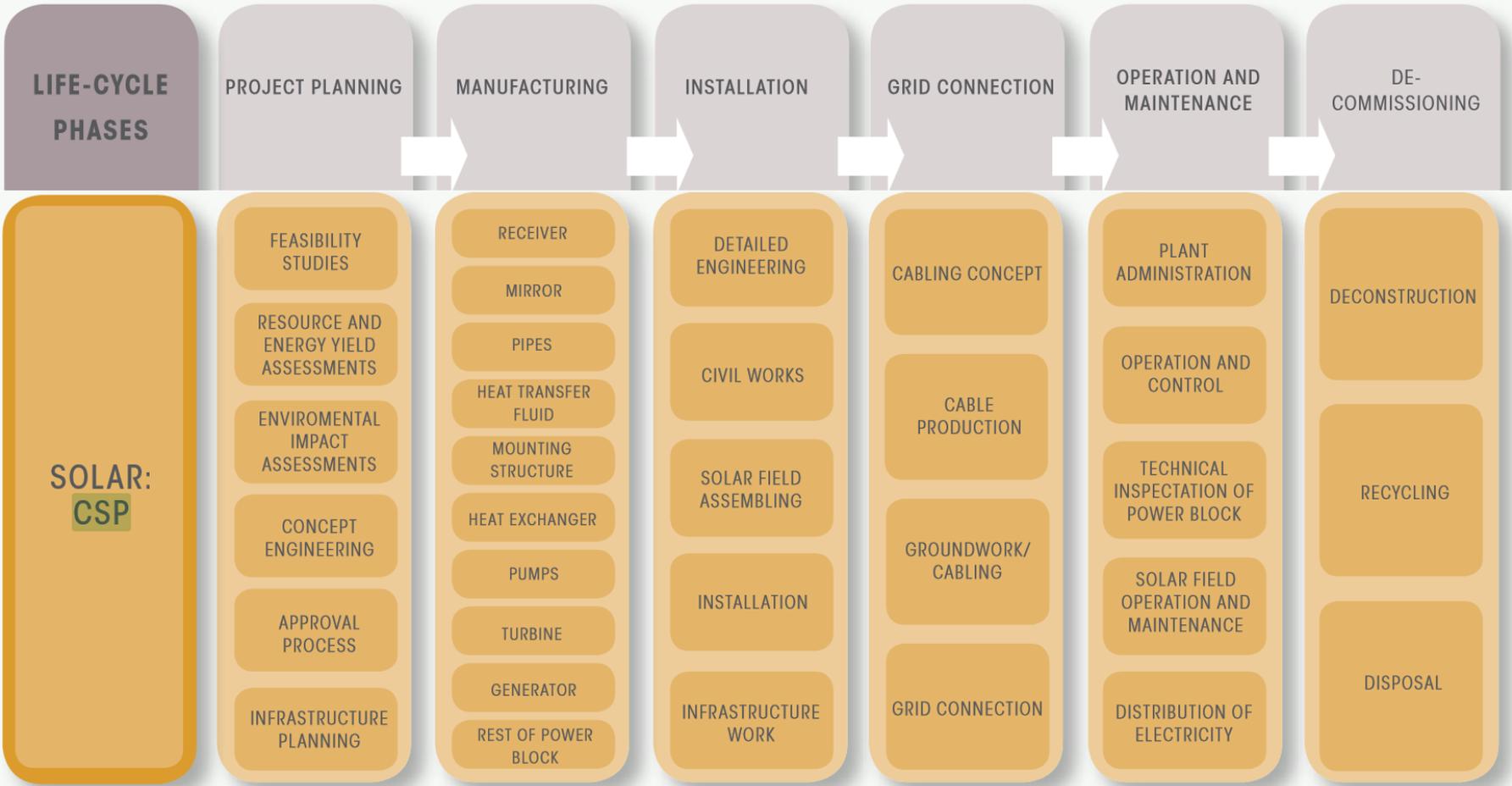


# Coûts

# Investissement

FIGURE 1.3 LIFE CYCLE PHASES AND RELATED SUB-PROCESSES AND PRODUCTS OF WIND AND SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES

Source: Based on EWEA 2012; EPIA et al. 2009; Breitschopf et al. 2011, 2012; Gazzo et al. 2011



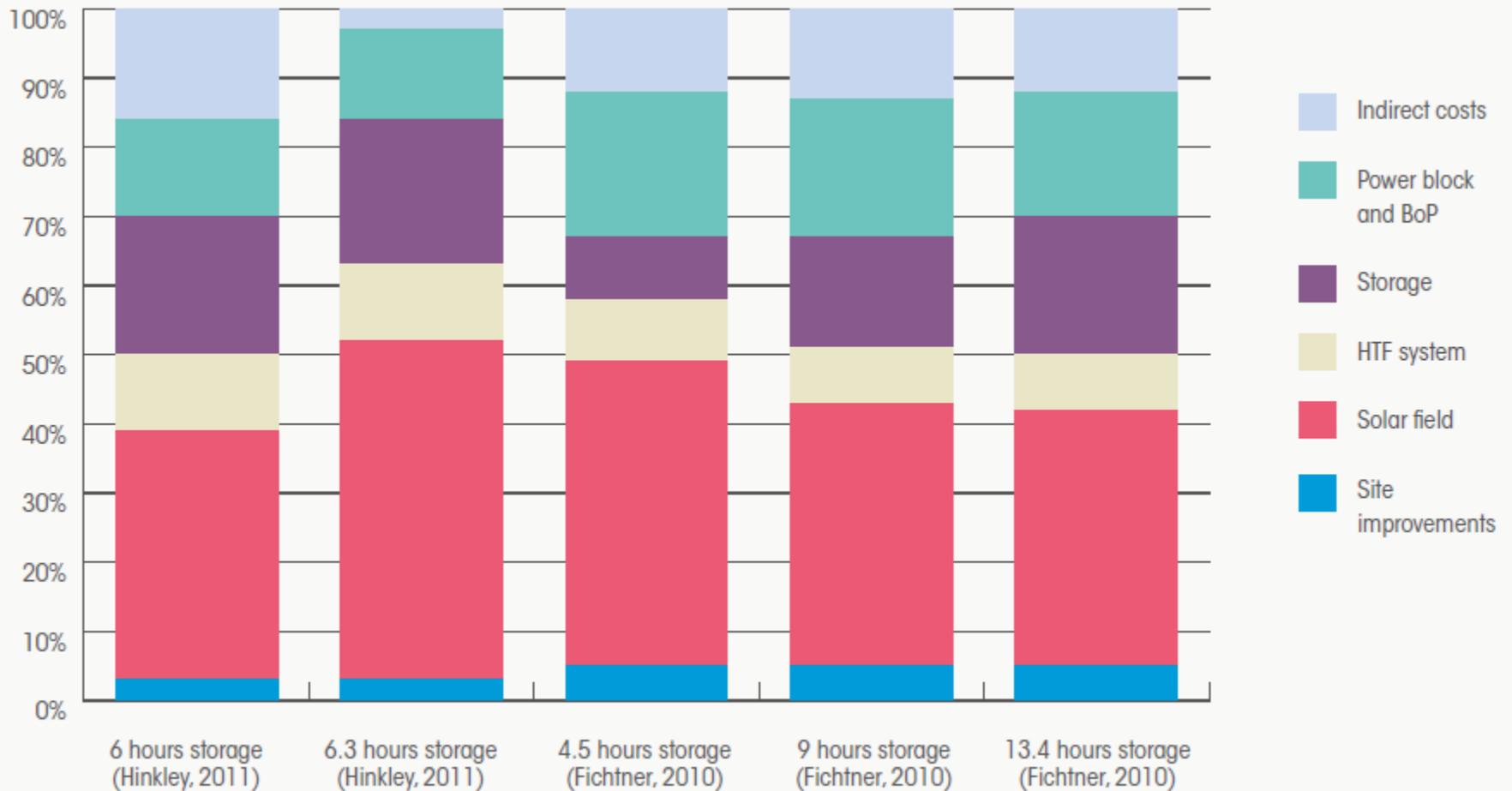


# Investissement

	CAPEX – 2011 (M€/MW)	CAPEX – 2015 (M€/MW)
LPT without TES	3.3	2.8-3.0
LPT with 6 h TES	5.2-7.1	4.6-6.0
ST with 6-7.5 h TES	4.6-5.4	4.1-4.6
ST with 12-15 h TES	6.6-7.6	6.0-6.6

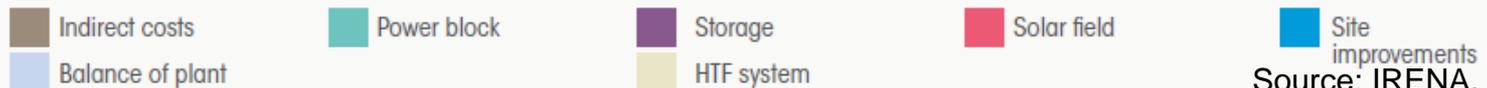
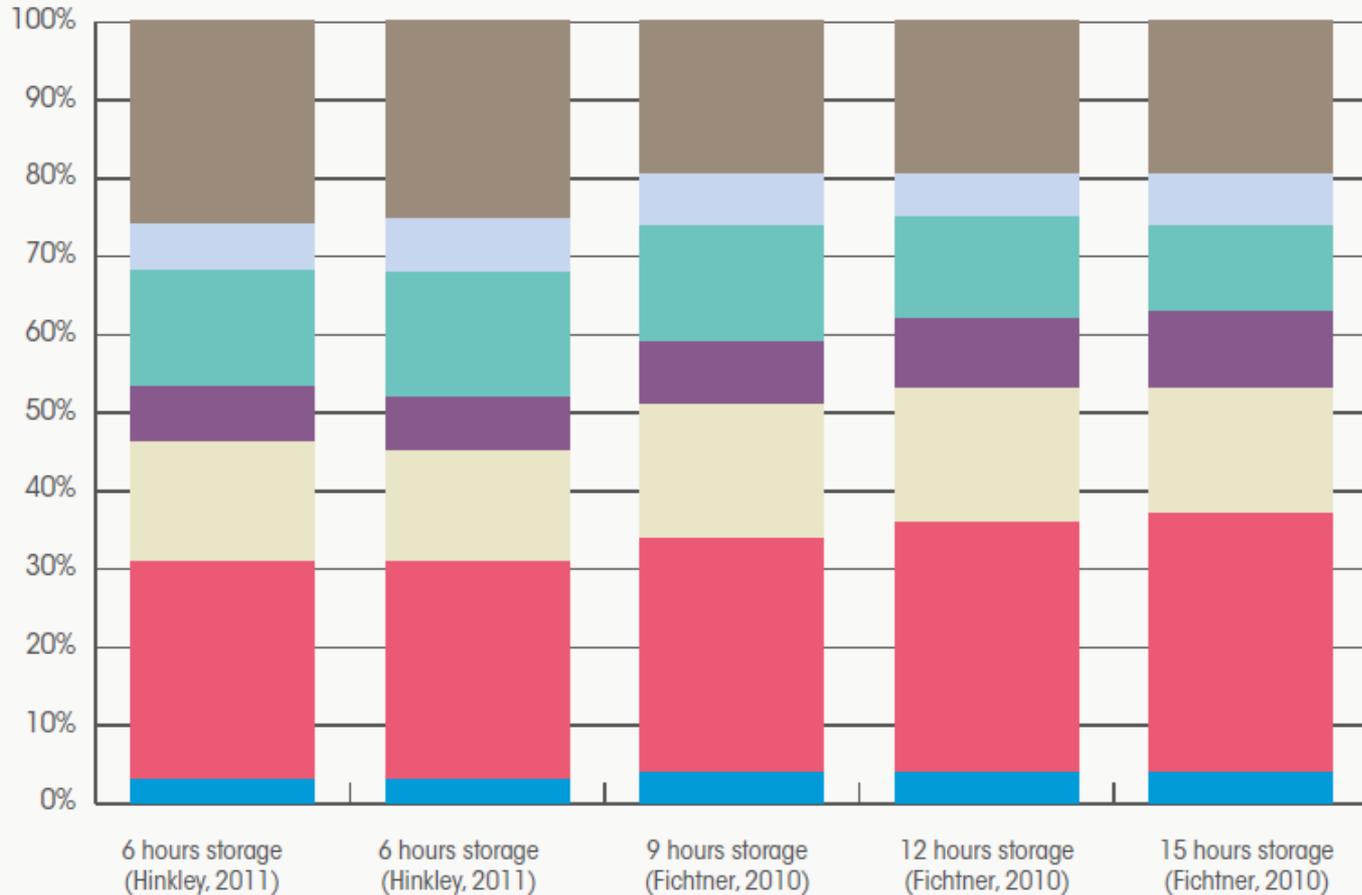
# Répartition investissement

## Cylindro-parabolique 100 MW



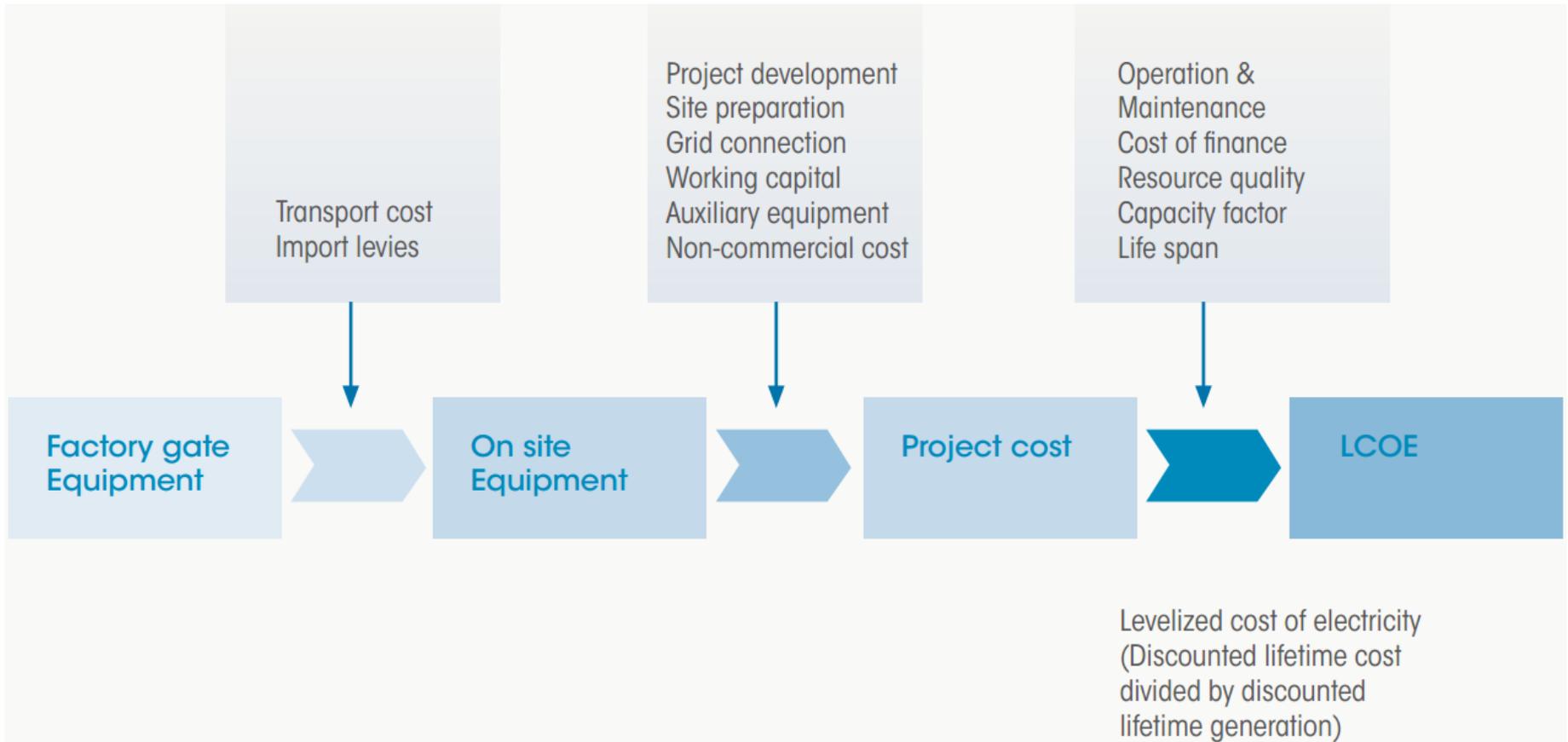
# Répartition investissement

## Tour 100 MW



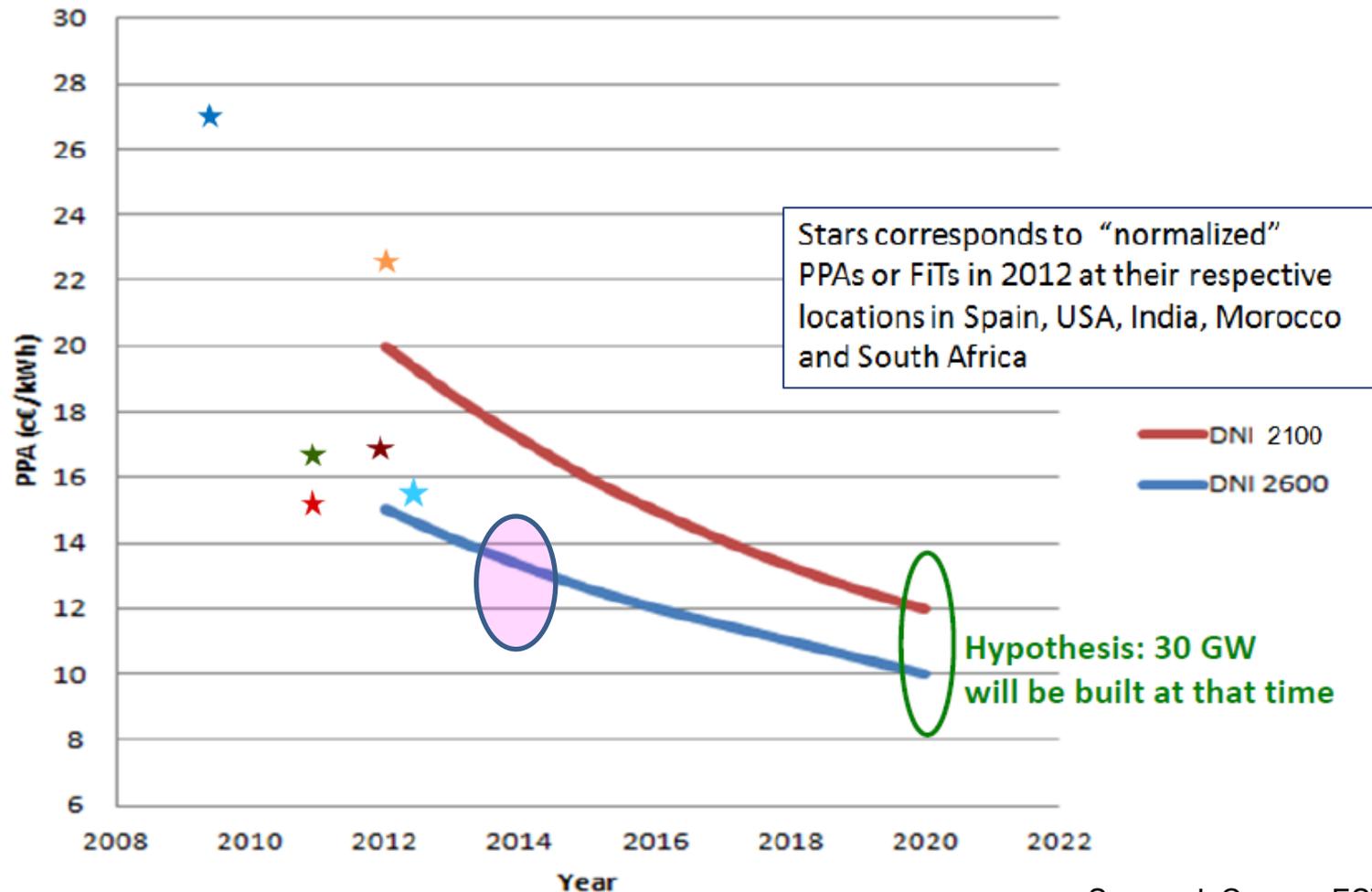
Source: IRENA, 2013

# Coûts électricité

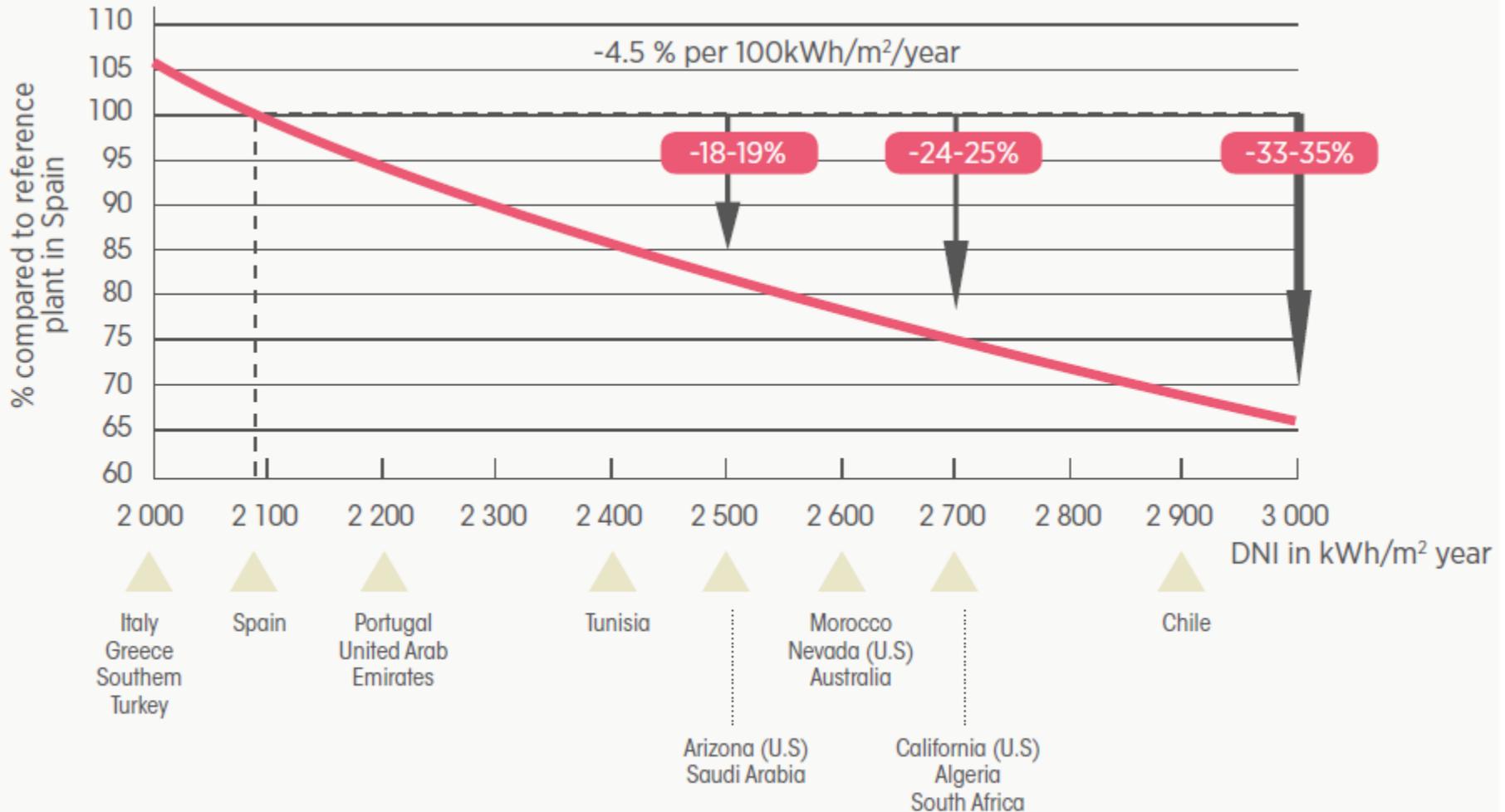


# Coûts électricité

Required value of a 25 years PPA for a 150 MW, 4 hours storage, STE plant without any public financial aids and no escalation

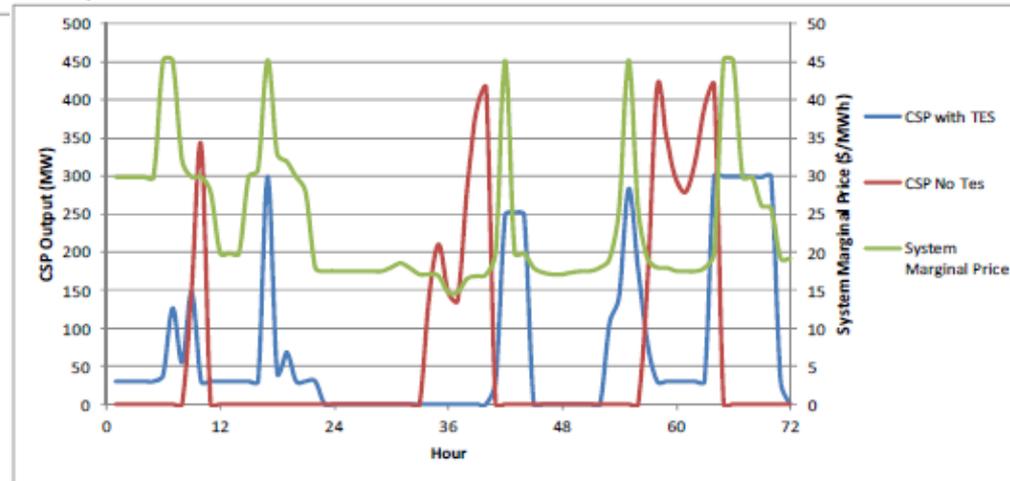
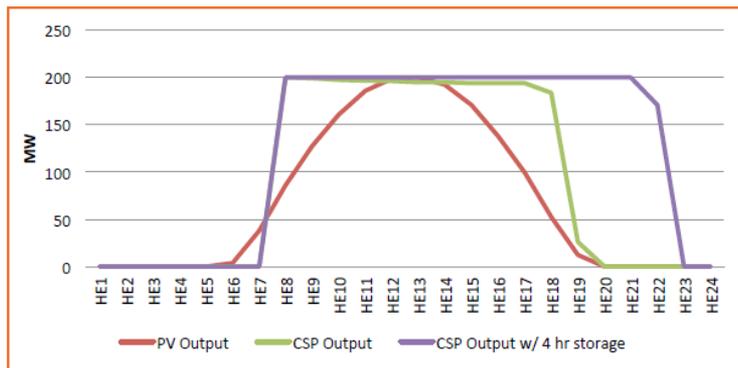
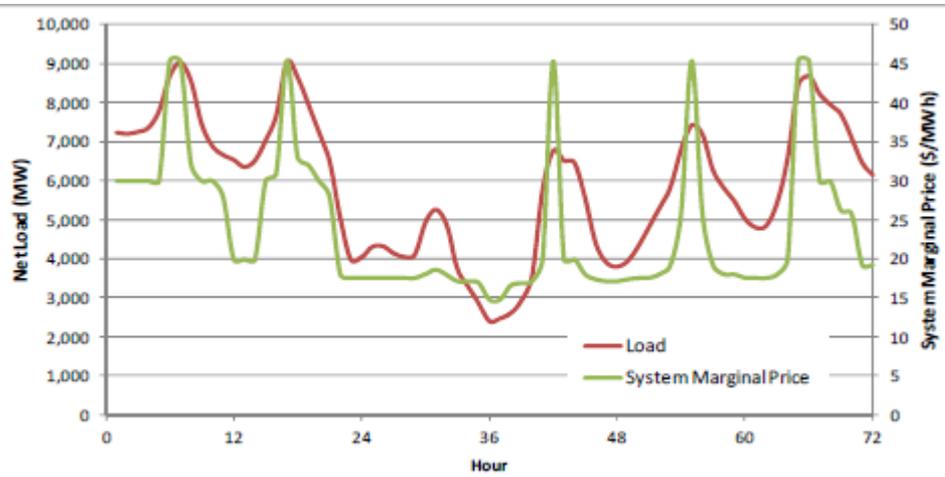


# Coûts électricité



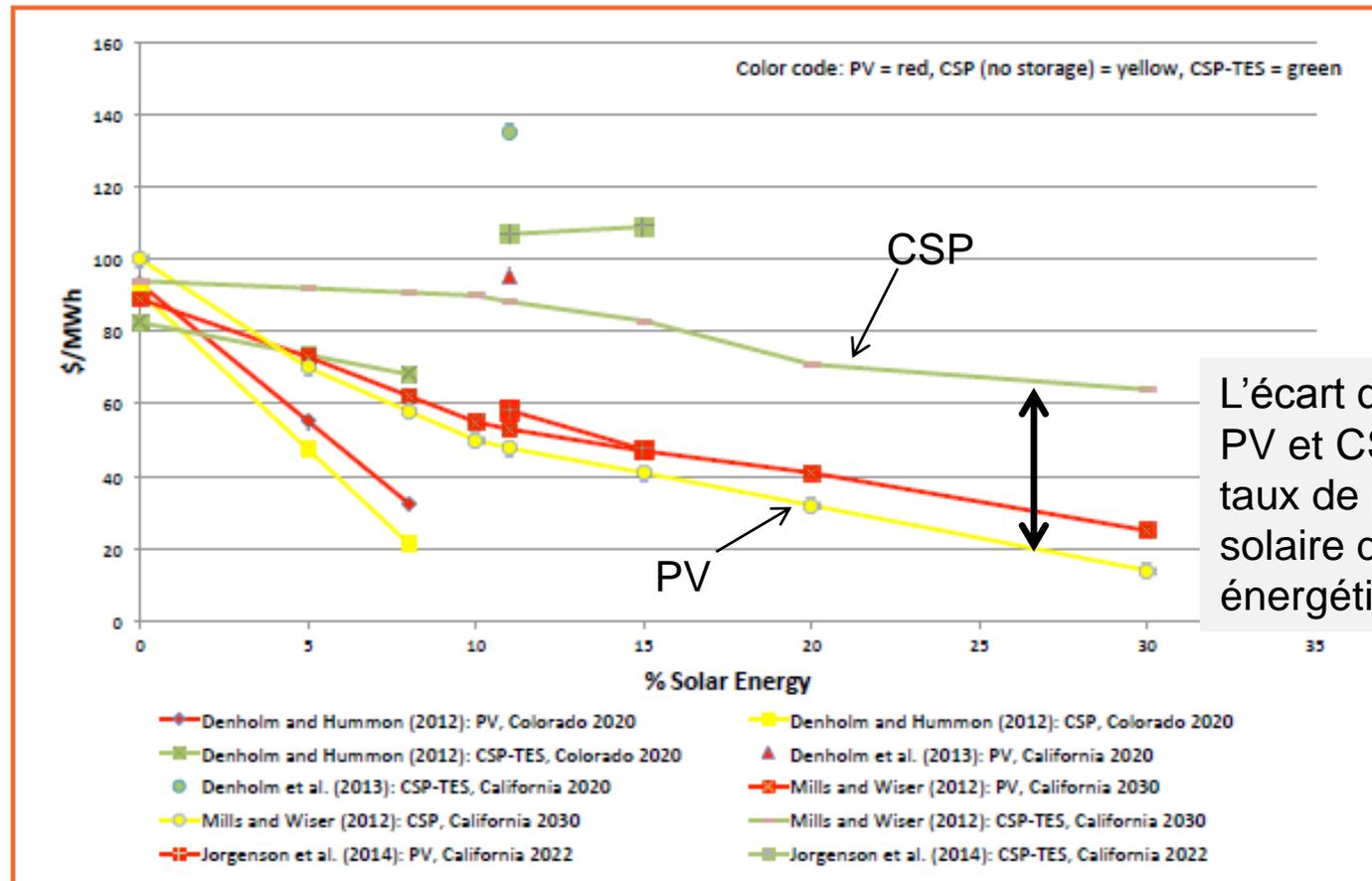
# Coûts électricité

La notion de coût de l'électricité (LCOE) est insuffisante car l'électricité n'a pas le même prix à toutes les heures de la journée, elle peut même avoir une valeur nulle en cas de surproduction, la notion de VALEUR est donc plus appropriée



# Coûts électricité

Figure 10-1: Total economic benefits (\$/MWh) of alternative solar resources from selected studies of increasing solar penetration



L'écart de valeur entre PV et CSP croît avec le taux de pénétration du solaire dans le mix énergétique

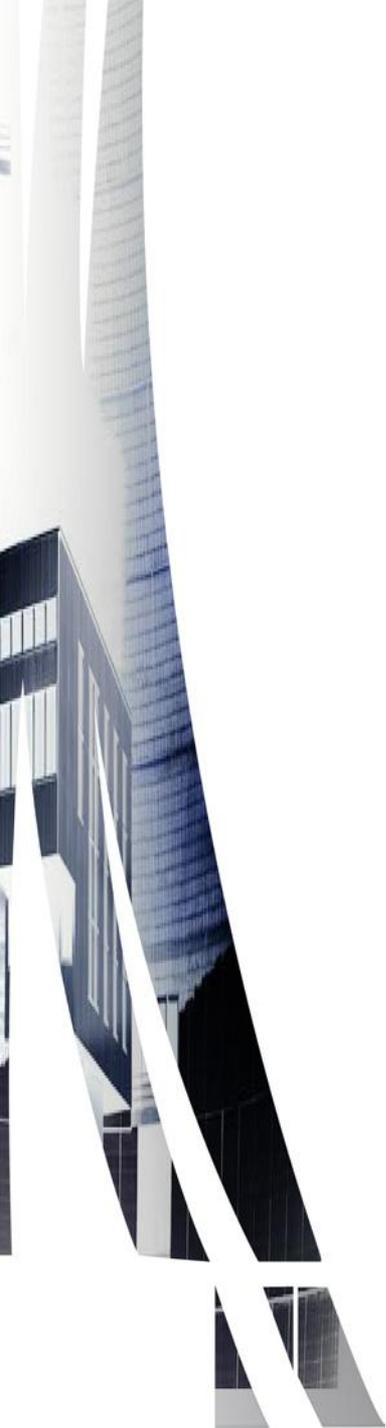
Source: based on a figure in Helman (2014).

Source : CSP Alliance, sept. 2014, csp-alliance.org

# Coûts PV & CSP complémentaires



SolarReserve &  
ACWA's power  
Redstone  
project



# Défis pour l'avenir

# Baisser les coûts et augmenter le rendement

Système de  
Concentration

Récepteur  
solaire

Stockage /  
Hybridation

Cycle  
thermodynamique



Nouveaux  
matériaux et  
composants  
**Supports  
Miroirs**



Nouveaux  
récepteurs  
**Design  
Matériaux HT  
Surfaces sélectives**



Stockage  
**Concepts  
Matériaux**



Chambre  
de  
combustion  
adaptée



Cycles  
Rankine 42%  
**Brayton 45%**  
Supercritical 45-50%  
Combiné 50-60%

Fluides de transfert  
H<sub>2</sub>O v : 250-300°C  
huile : 390°C  
Sel fondu : 565°C  
S-CO<sub>2</sub>/S-H<sub>2</sub>O : 600-850°C  
Gaz (pressurié) : >800°C  
Particules : >800°C

Choix politiques  
pour le solaire

# Merci de votre attention

