

# Solaire à concentration, du présent au futur

LABORATOIRE  
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX  
et ENERGIE SOLAIRE

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

PROCESSES, MATERIALS  
and SOLAR ENERGY  
LABORATORY



Gilles

Flamant

Laboratoire

PROMES-CNRS

SFT

13.06.2012

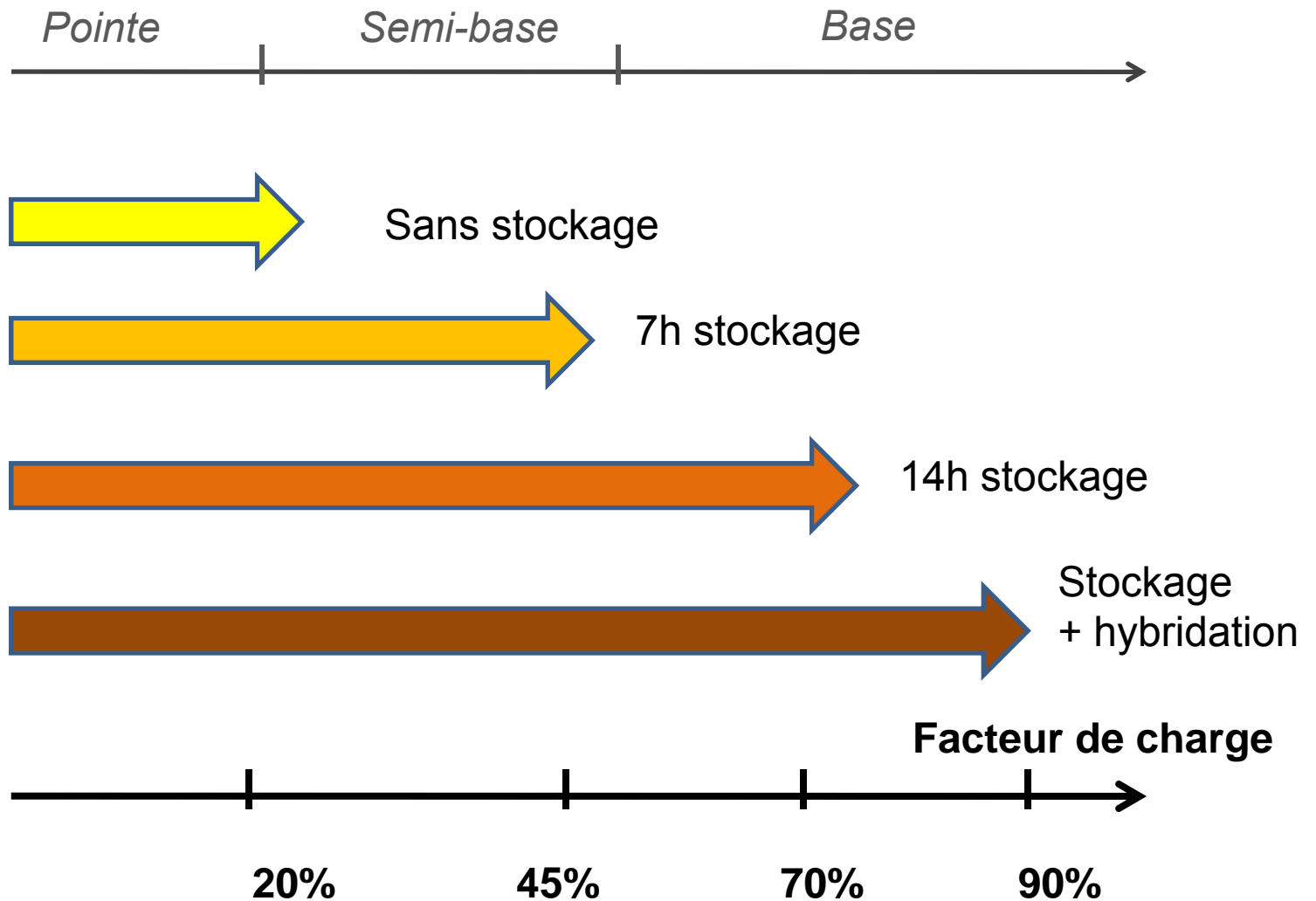
# Contenu

- Solaire concentré / Solaire photovoltaïque
- Principes et Technologies
- Paradigmes
- Etat de l'art
- Perspectives et R&D associée
- Exemples de contribution de la thermique
- Conclusion

# Solaire concentré / Solaire photovoltaïque

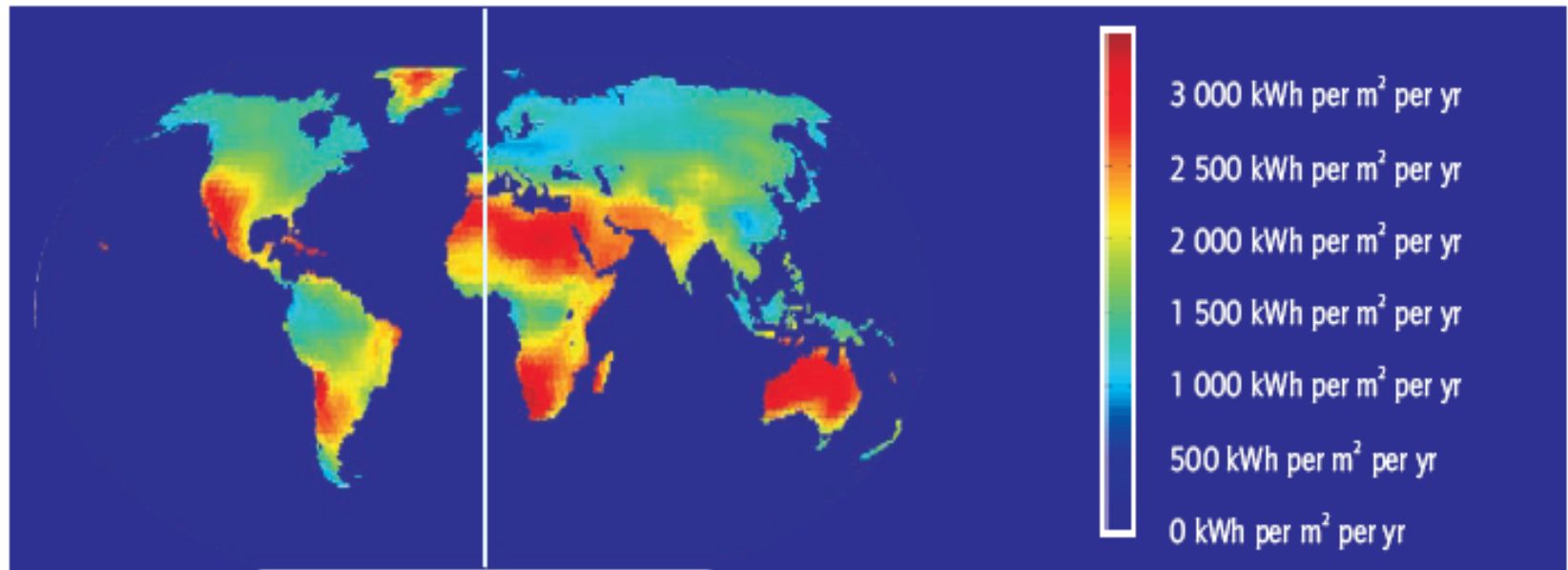
<b>Paramètre</b>	<b>Thermique à concentration</b>	<b>Photovoltaïque</b>
<b>Ressource solaire</b>	Rayonnement direct	Rayonnement total (direct + diffus)
<b>Mode de conversion</b>	Thermodynamique	Electronique
<b>Stockage</b>	Thermique	Electrochimique
<b>Hybridation</b>	Oui	Non
<b>Effet de taille</b>	Oui	Non
<b>Disponibilité</b>	25%-70%	20%-25%

# Solaire concentré, atouts



# Solaire concentré : Régions favorables

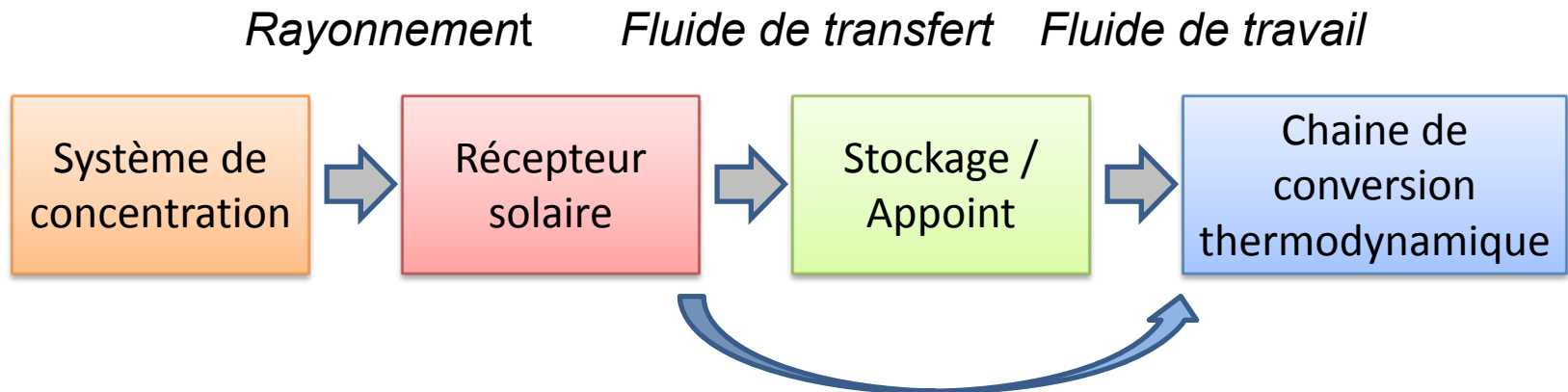
Figure 2: Solar resource for CSP technologies (DNI in kWh/m<sup>2</sup>/y)



Source: Breyer & Knies, 2009 based on DNI data from DLR-ISIS (Lohmann, et al. 2006).

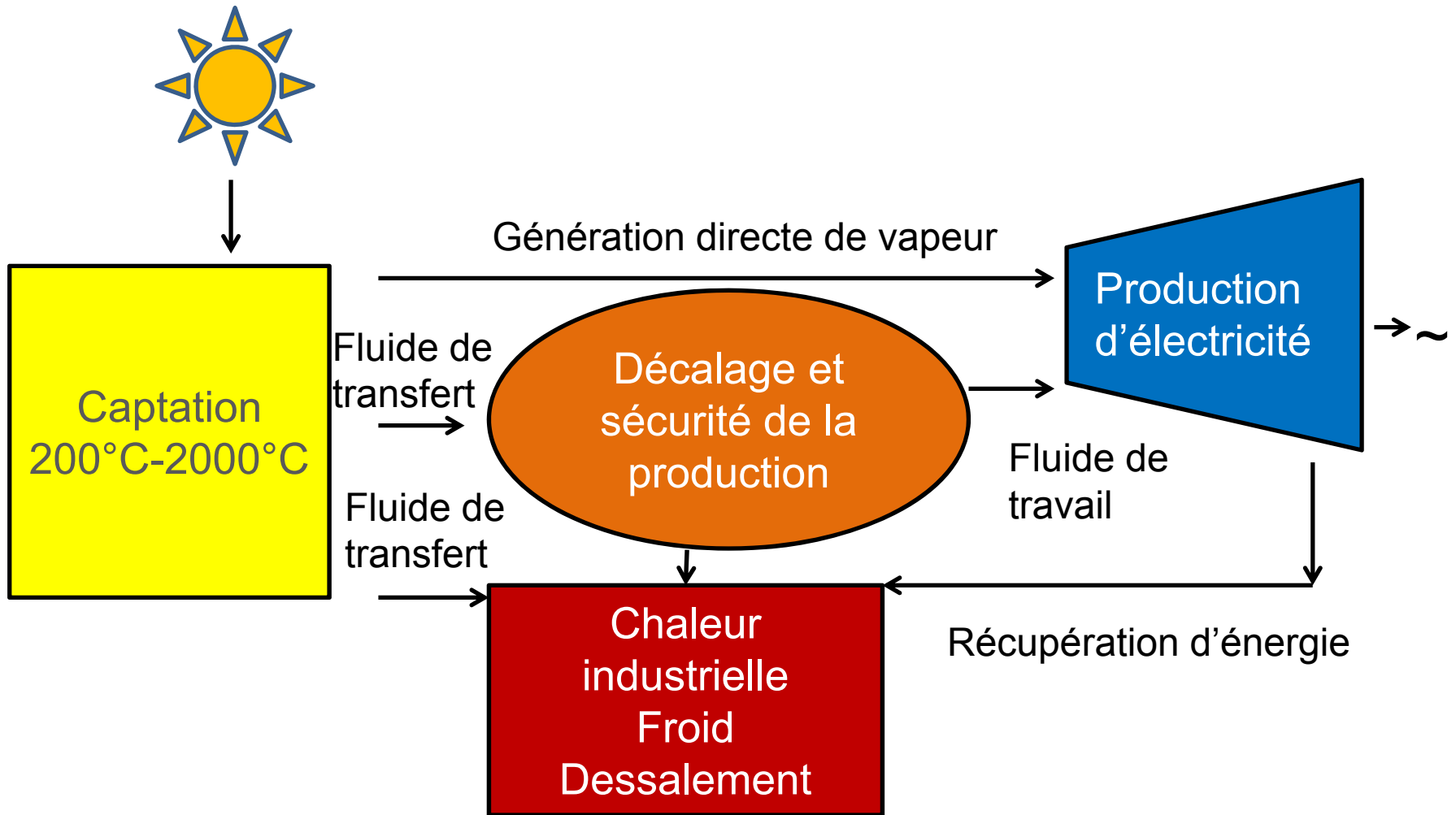
Source: IEA CSP Roadmap,  
2010

# Principe et Technologies





# Principe et Technologies



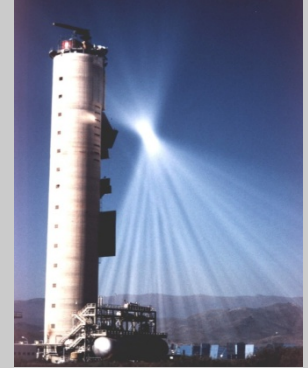
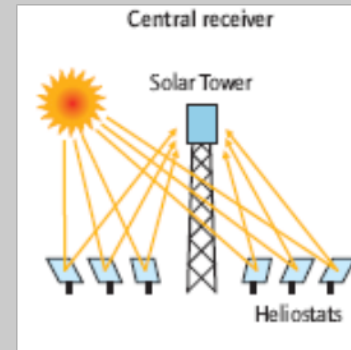
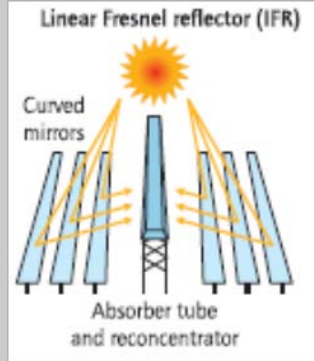
# Principe et Technologies

**Focalisation**  
**Récepteur**

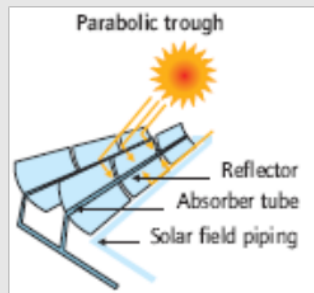
**Linéaire (x100)**

**Ponctuelle (X1000-10000)**

**Fixe**



**Mobile**







# Paradigme 1

## Température/Concentration

Rendement du récepteur ↓    Rendement de Carnot ↑

$$\eta = \left(1 - \frac{\sigma T_C^4}{IC}\right) \left(1 - \frac{T^0}{T_C}\right)$$

$\eta$  : rendement exergetique

$T_C$  : température de la source chaude

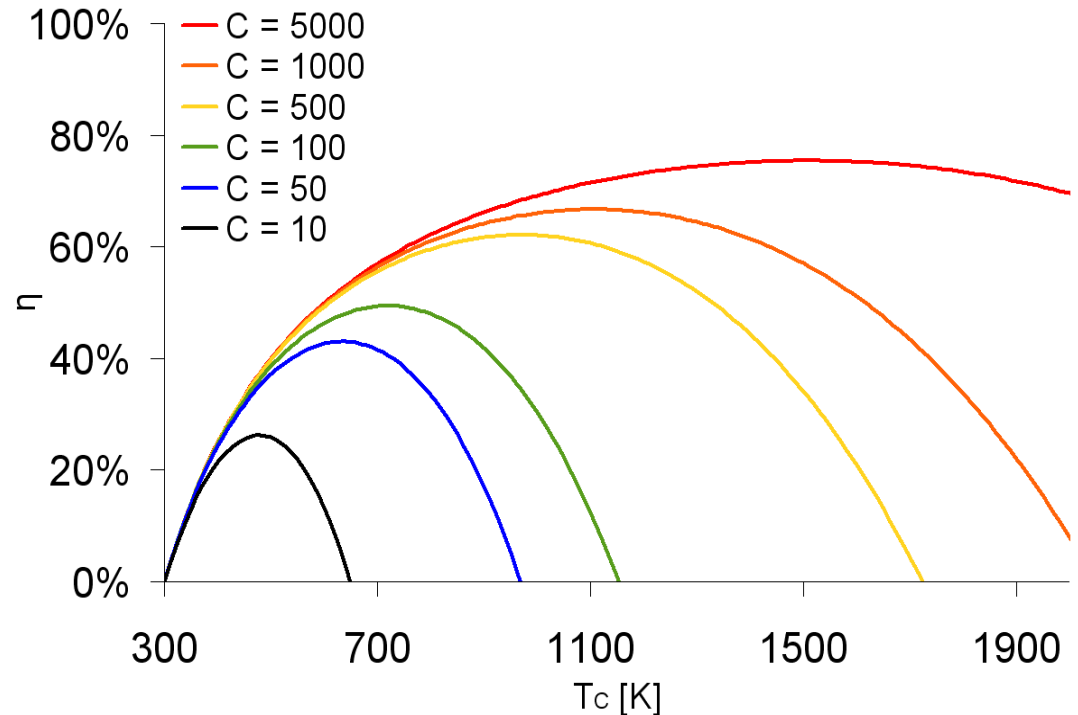
$T^0$  : température de l'environnement

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann

$C$  : concentration solaire

$I$  : flux solaire incident (1 kW/m<sup>2</sup>)

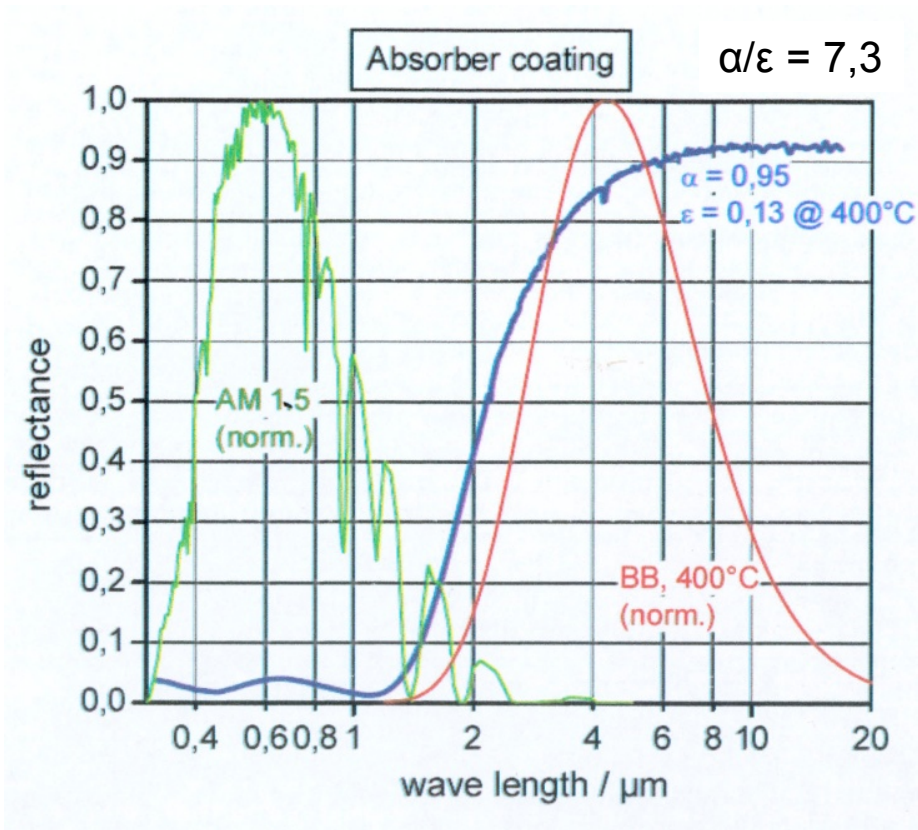
→ Pour un corps noir,  
existence d'un optimum à  $T_C$  et  
 $C$  fixées



# Paradigme 2

## Sélectivité spectrale

Corps noir :  $\alpha_s = \epsilon_{ir} = 1$   
 corps sélectif parfait :  $\alpha_s = 1, \epsilon_{ir} = 0$



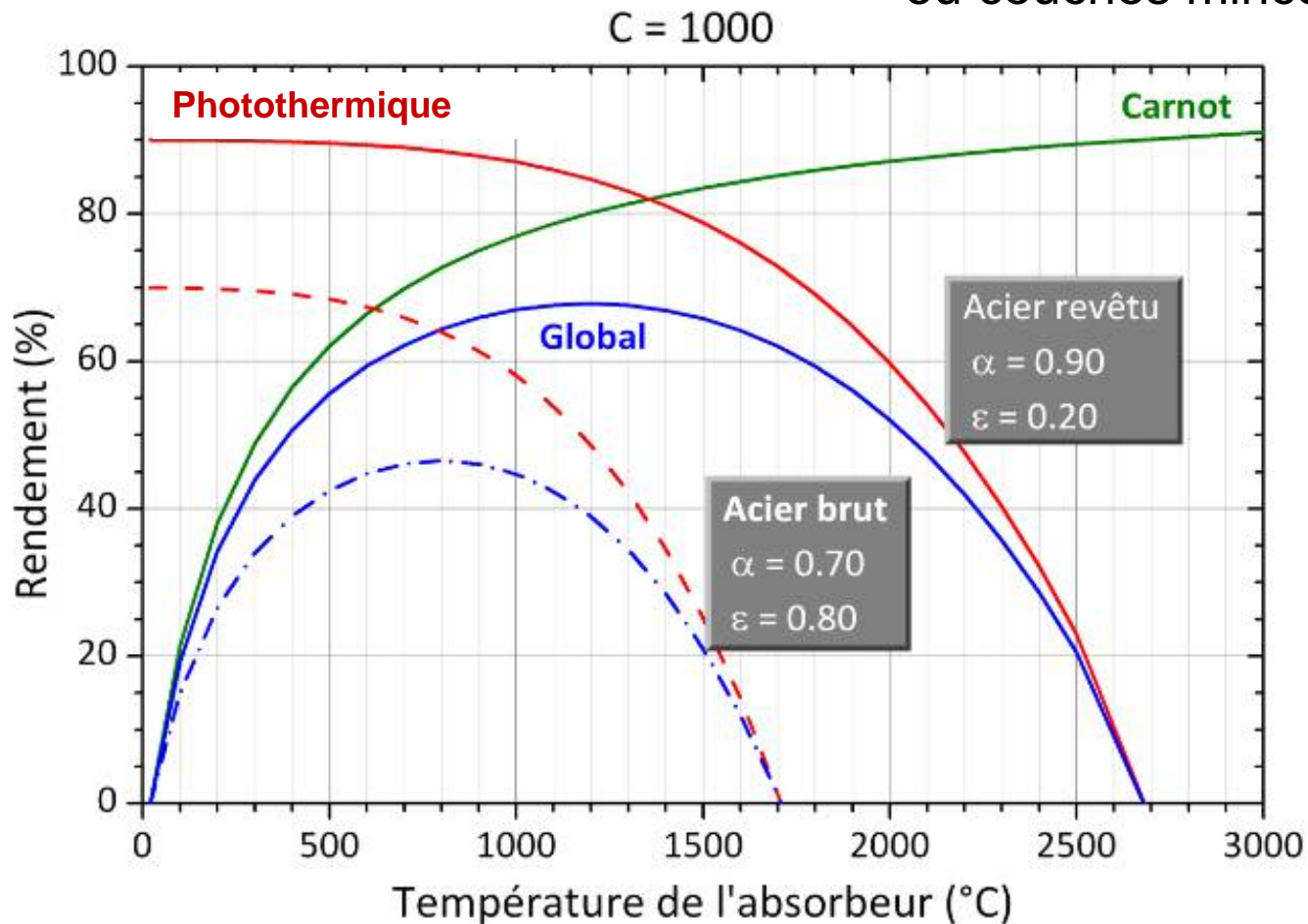
AR	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Cermet	$\text{Mo} / \text{Al}_2\text{O}_3$
IR-mirror	Mo
Barrier	Oxide
Metal Tube	



# Paradigme 2

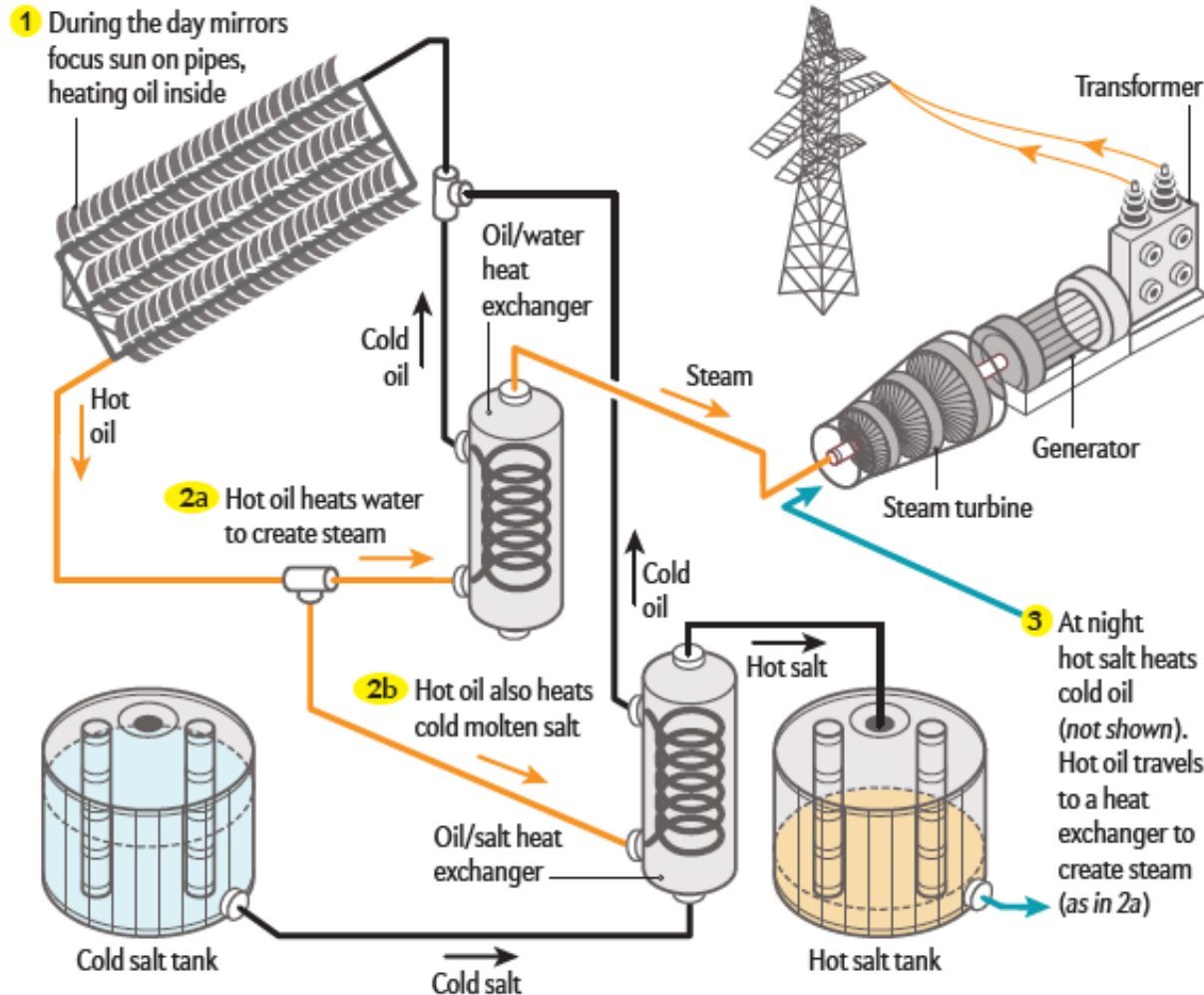
## Sélectivité spectrale

Gain potentiel, 30% - 50%  
Par micro/nano-structuration  
ou couches minces



# Paradigme 3

## Stockage



Apporte stabilité, prédictibilité et fiabilité à la production.

Mais, Coût, complexité et sécurité à améliorer

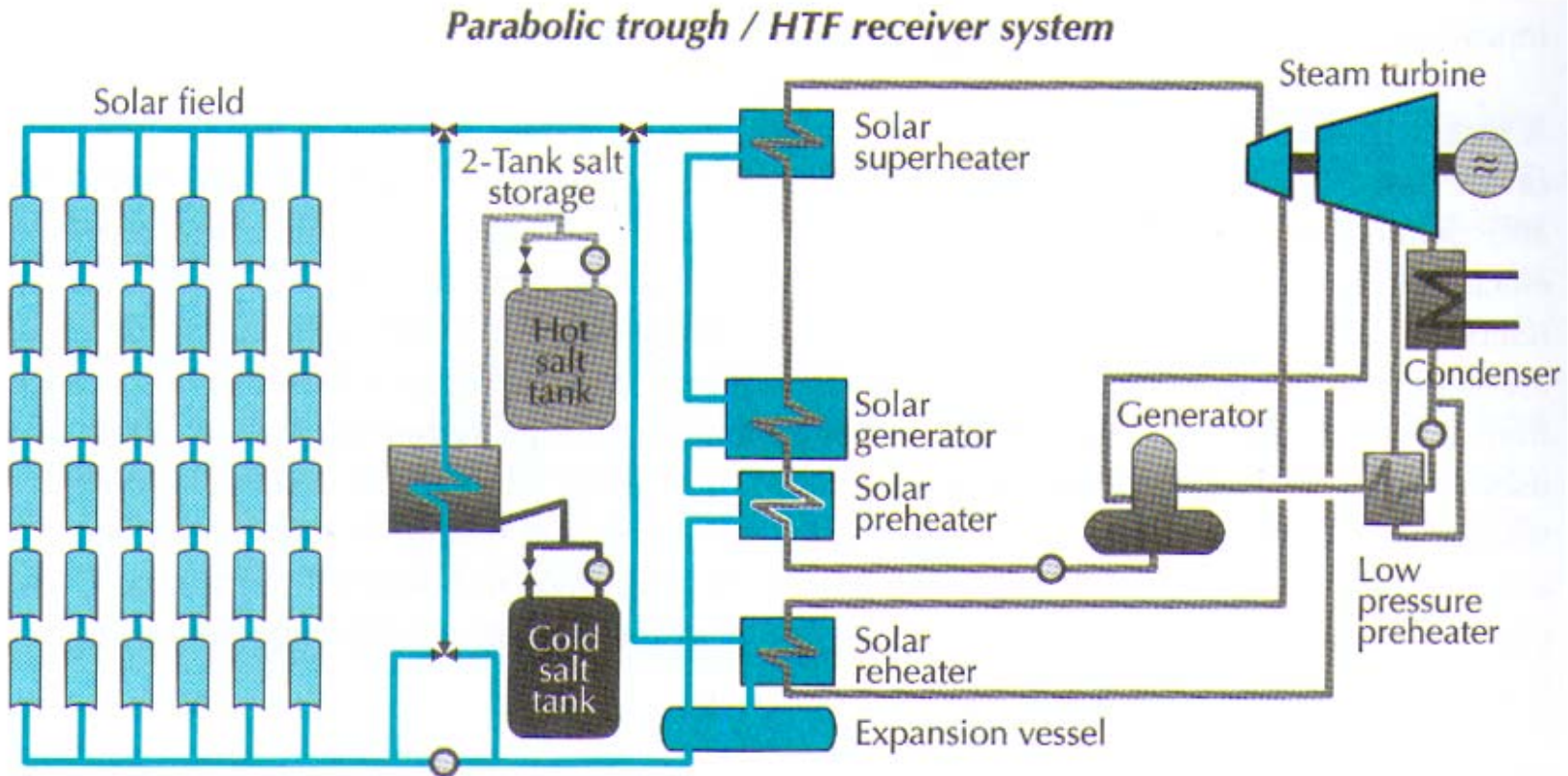
# Etat de l'art

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

1.6 GW en fonctionnement dont 1 GW en Espagne, 10 GW en 2015



# Etat de l'art



HTF: Huile synthétique

Stockage : sel

Cycle : vapeur

Disponibilité: 50% (x2 cas sans stockage)



# Etat de l'art



Andasol 1 et 2  
50 MW  
7,5h stockage

ANDASOL 1  
and  
ANDASOL 2



# Etat de l'art

Des industriels français développent la technologie Fresnel linéaire



CNIM  
AREVA  
SolarEUROMED

# Etat de l'art



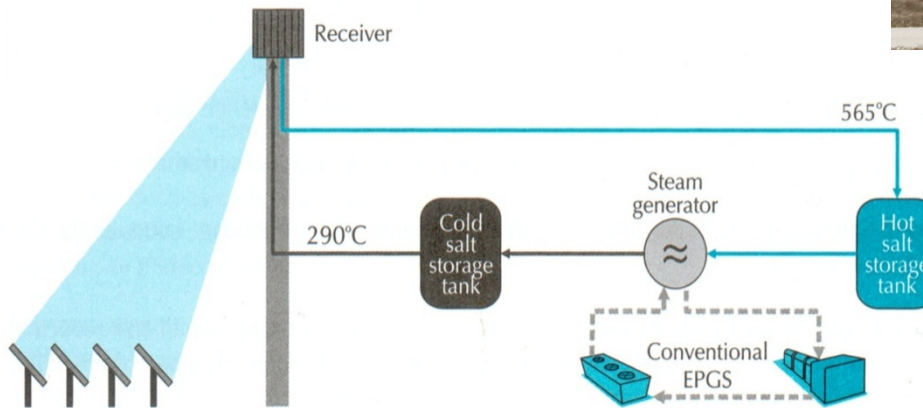
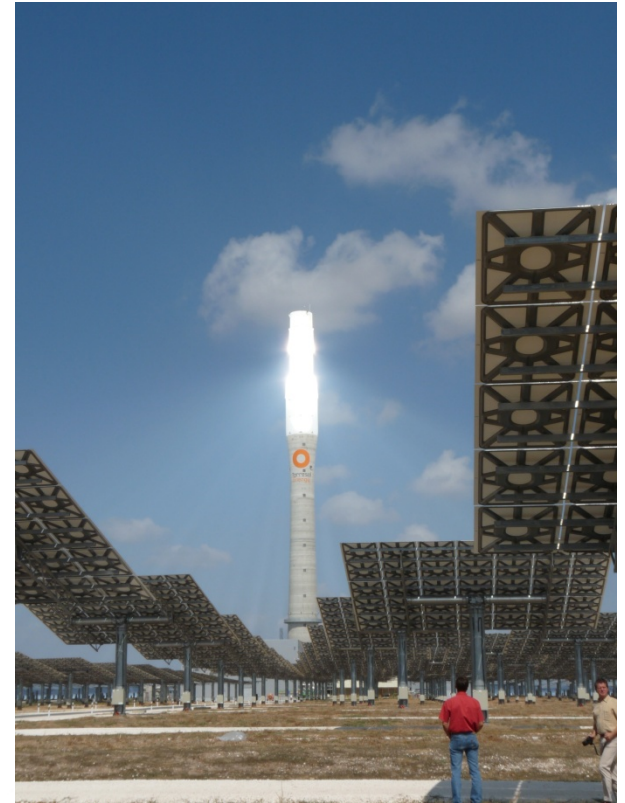
PS 10 et PS20  
HTF: Vapeur  
stockage vapeur



# Etat de l'art



*Molten salt central receiver system*



GEMASOLAR

HTF: sel

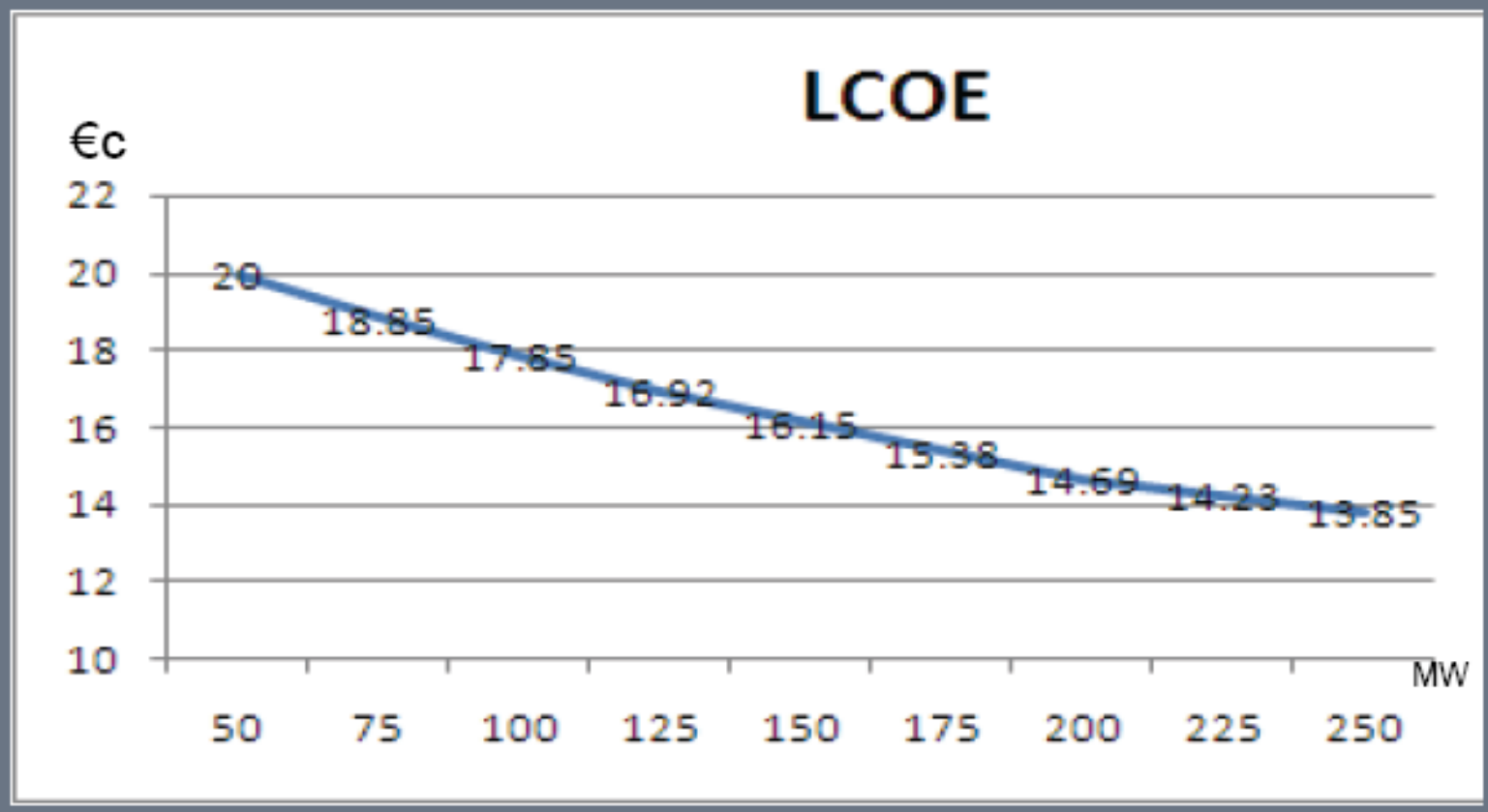
Stockage : sel, 15h

Cycle : vapeur, 20 MW



# Etat de L'art

Vers les fortes puissances



**CSP trough needs to push for large Solar Thermal Plants**

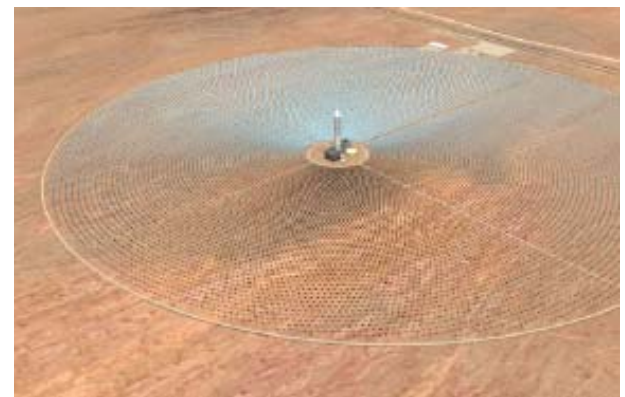


# Etat de L'art

Vers les fortes puissances

***Crescent Dunes Project***  
Tonopah, Nevada (USA)  
Industriel : Solar Reserve

**110 MW<sub>e</sub>**  
Sel fondu, tour



***Solana Project***  
Gila Bend, Arizona  
(USA)  
Industriel : Abengoa  
Solar

**280 MW<sub>e</sub>**  
cylindro-  
parabolique



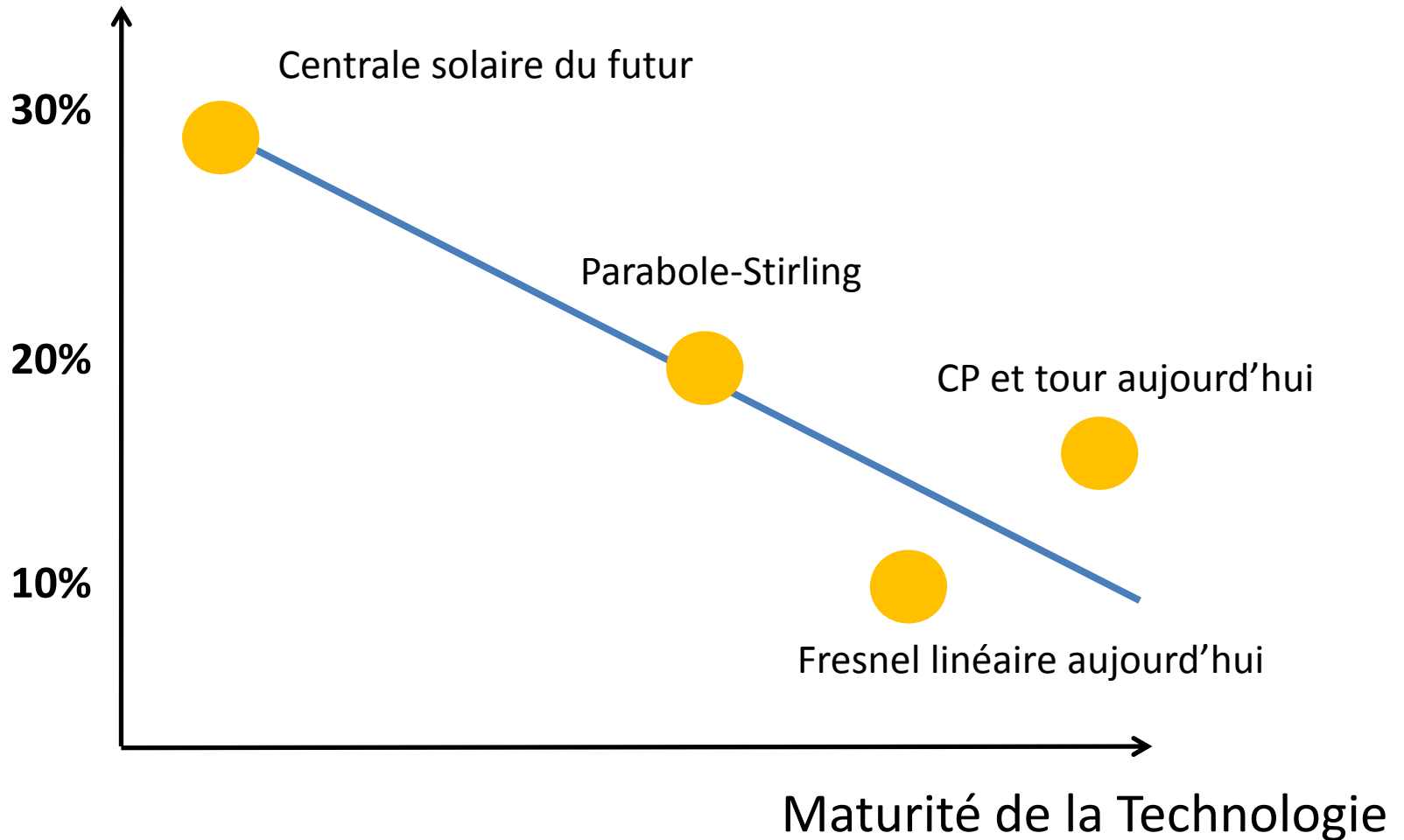
***Ivanpah Project***  
California (USA)  
Industriel : Bright Source

**370 MW<sub>e</sub>**  
3 centrales, DSG tour  
Vapeur surchauffée



# Perspectives

Rendement annuel





# Perspectives



années 80

## Generation 1

Démonstration des options technologiques au plan international. Plus de 25 ans de fonctionnement des centrales SEGS en Californie (354 MW<sub>e</sub>, 9 centrales de 30 à 80 MW<sub>e</sub>)  
Validation de la technologie à sel fondu à Solar Two (USA, 10 MW<sub>e</sub>) après Themis (France 2,5 MW<sub>e</sub> 1985)

2000

## Generation 2

Premier développement industriel des centrales CP avec stockage sel fondu et centrales à tour (vapeur saturée) en Espagne (température < 400°C)

2007

## Generation 3

Premier développement industriel des centrales à génération directe de vapeur surchauffée et à sel fondu (température > 500°C)

2011

2015-  
20

## Generation 4

Centrales solaires haute performance (25% et plus) fonctionnant dans le domaine de température 600°C-1000°C

# Perspectives

## Cycles thermodynamiques

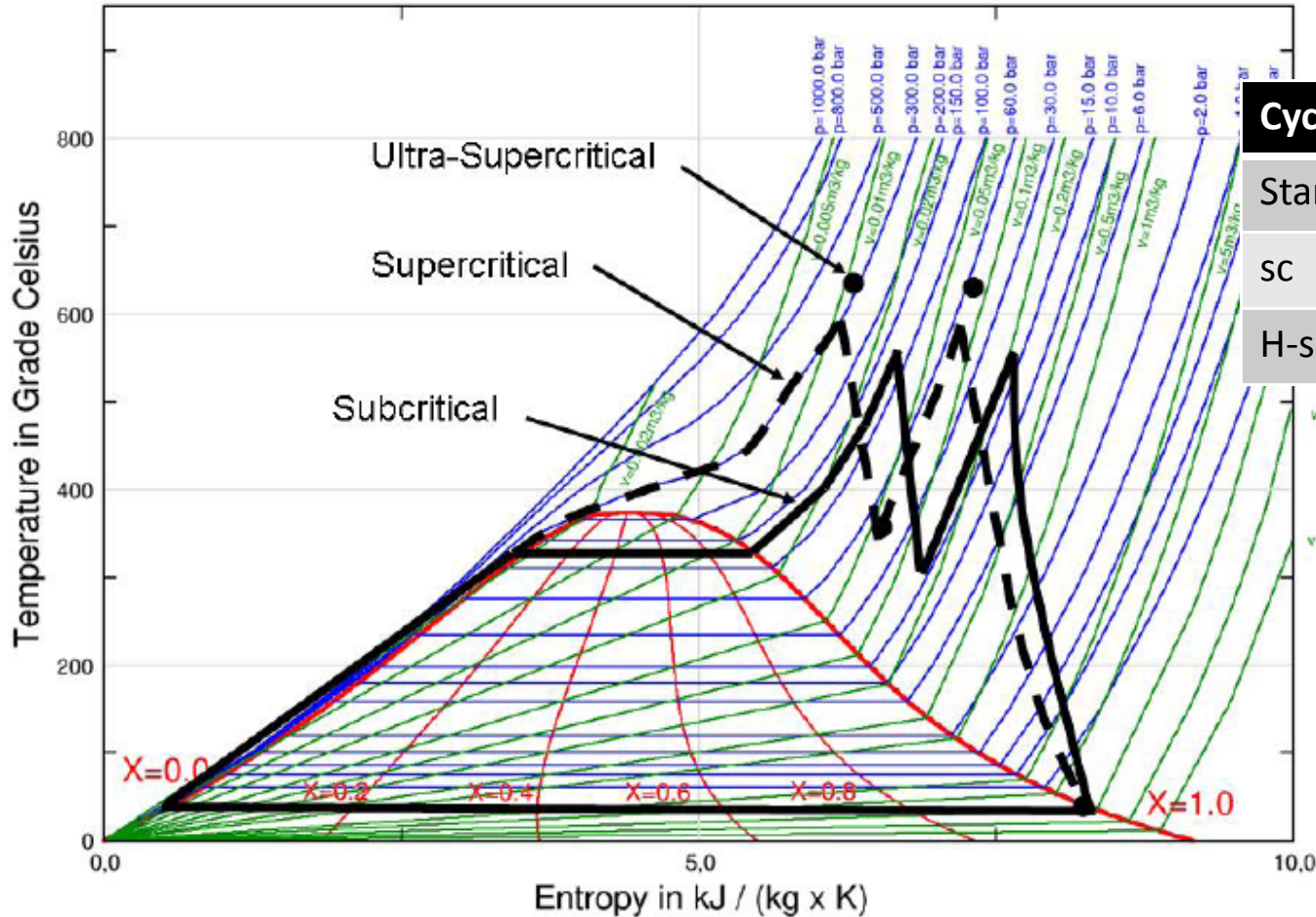
Cycle thermodynamique	Rendement du cycle	Rendement centrale solaire	Gain
Cycles vapeur (Rankine) 390°C-565°C	37% - 42%	20% - 23%	0
Vapeur supercritique ≥ 650°C	48%	27%	17% - 35%
CO2 supercritique Brayton 600°C – 800°C	50% - 55%	28% - 31%	22% - 55%
Cycle combiné (Brayton/Rankine) 1100°C-1300°C	55%-60%	31%-33.5%	40% - 67%

$$\text{Rendement centrale} : \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{rec}} \cdot \eta_{\text{cyc}} = 0.7 \times 0.8 \times \eta_{\text{cyc}}$$



# Perspectives

## Cycle vapeur supercritique

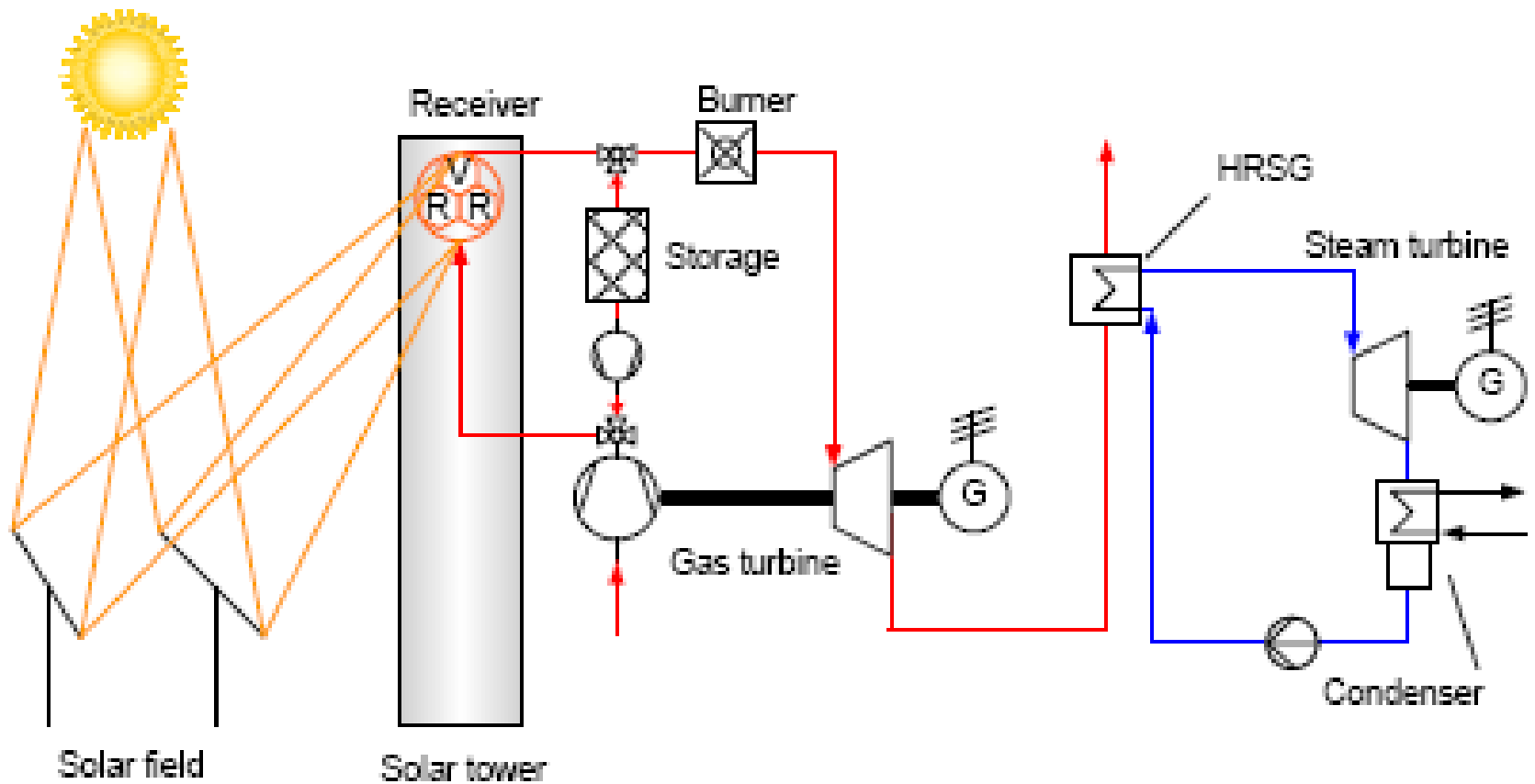


Cycle	P (bars)	T (°C)
Standard	125	535
sc	301	591
H-sc	331	630

Impact sur les technologies de stockage

# Perspectives

## Cycle combiné



Avec stockage HT et hybridation intégrés



# Perspectives R&D associée

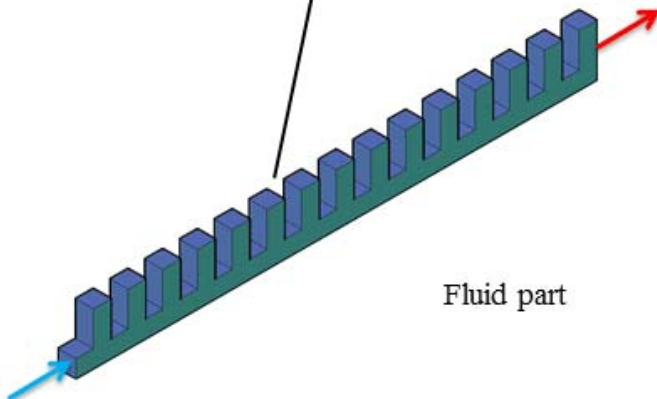
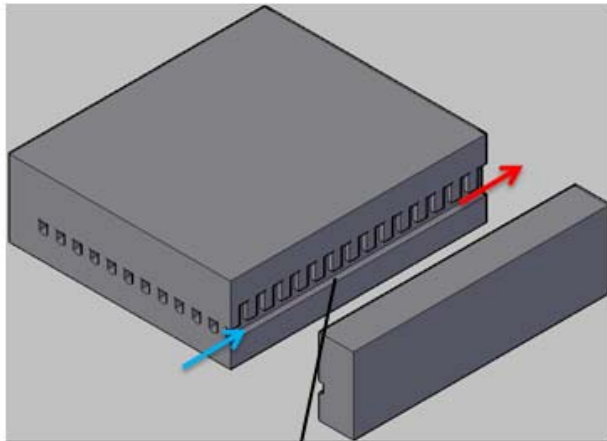
Composant	Défis court terme	Défis long terme
Système optique de concentration	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Optimisation et contrôle des grands champs de réflecteurs</li> <li>-Densification et qualification</li> <li>-Maintenance prédictive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réflecteurs autre que verre</li> <li>-Optique pour haute concentration</li> </ul>
Récepteur solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Surfaces sélectives 400°C-500°C</li> <li>-Intensification des transferts</li> <li>-Durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Surfaces sélectives 500°C-700°C</li> <li>-Récepteurs céramiques</li> <li>-Récepteurs multifonctionnels</li> </ul>
Fluide de transfert	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vapeur surchauffée</li> <li>-Gaz sous pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nouveaux sels fondus</li> <li>-Fluides supercritiques</li> <li>-suspensions gaz-solide</li> </ul>
Stockage	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Chaleur sensible pour vapeur</li> <li>-Chaleur latente moyenne température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Chaleur sensible haute température (1000°C)</li> <li>-Thermochimique</li> </ul>
Cycles thermodynamiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Brayton avec air <math>P \geq 1\text{MW}</math></li> <li>-Cycles combinés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Brayton fermé</li> <li>-Cycles Supercritiques</li> </ul>
Source froide	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Refroidissement sec optimisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nouveaux concepts</li> </ul>



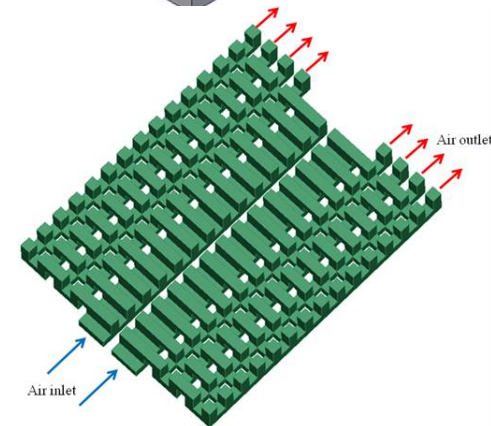
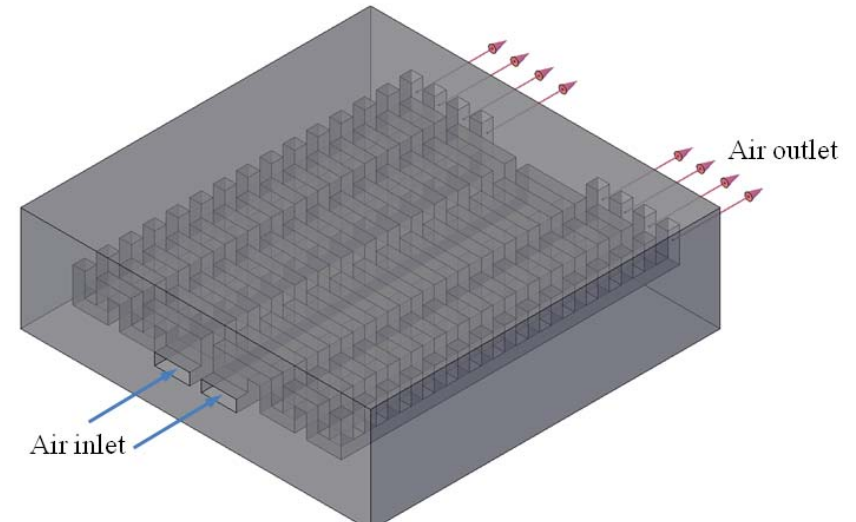


# Perspectives R&D récepteurs

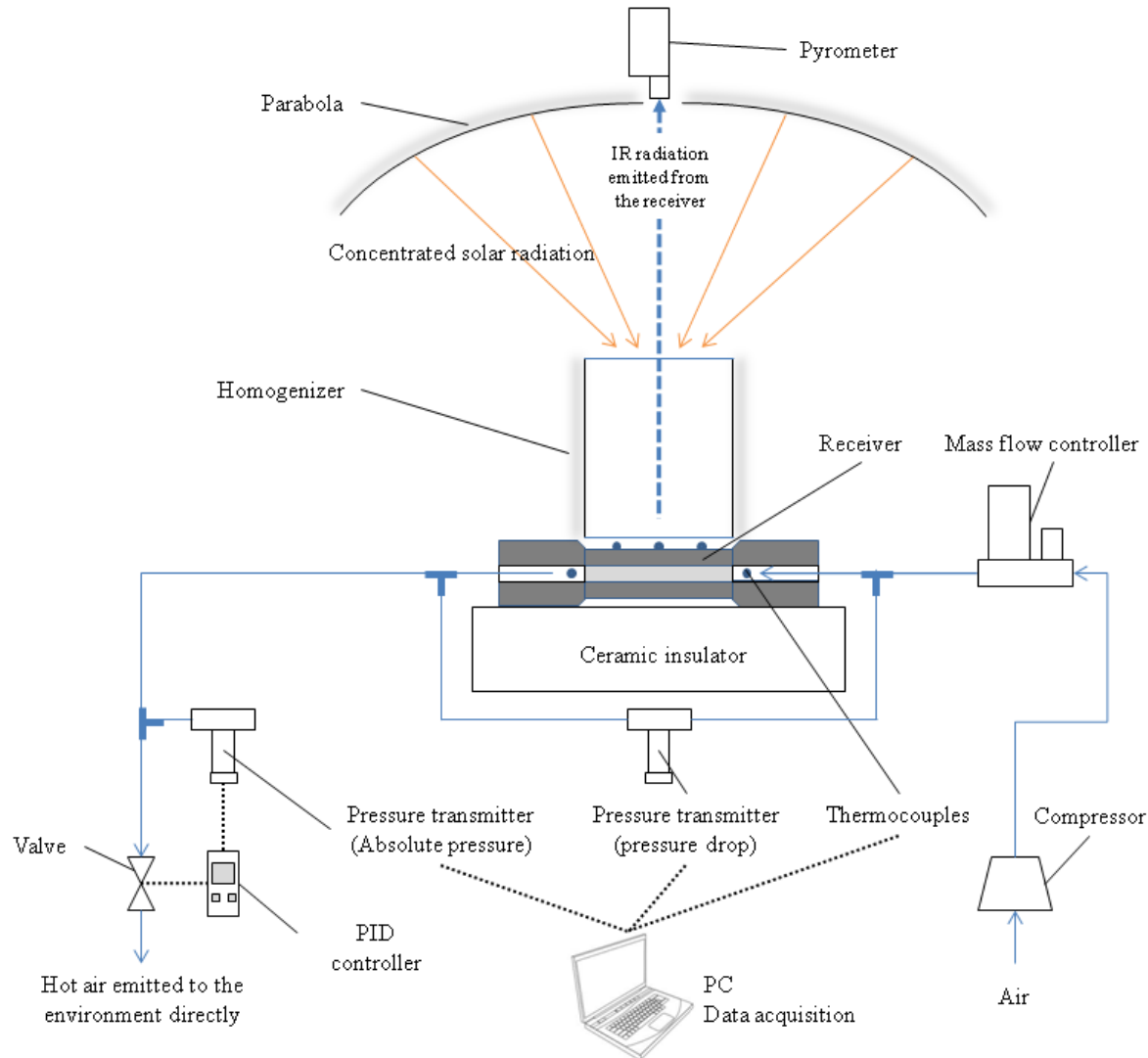
Intensification des transferts pariétaux dans des microrécepteurs solaires à air



Fluid part



# Perspectives R&D récepteurs

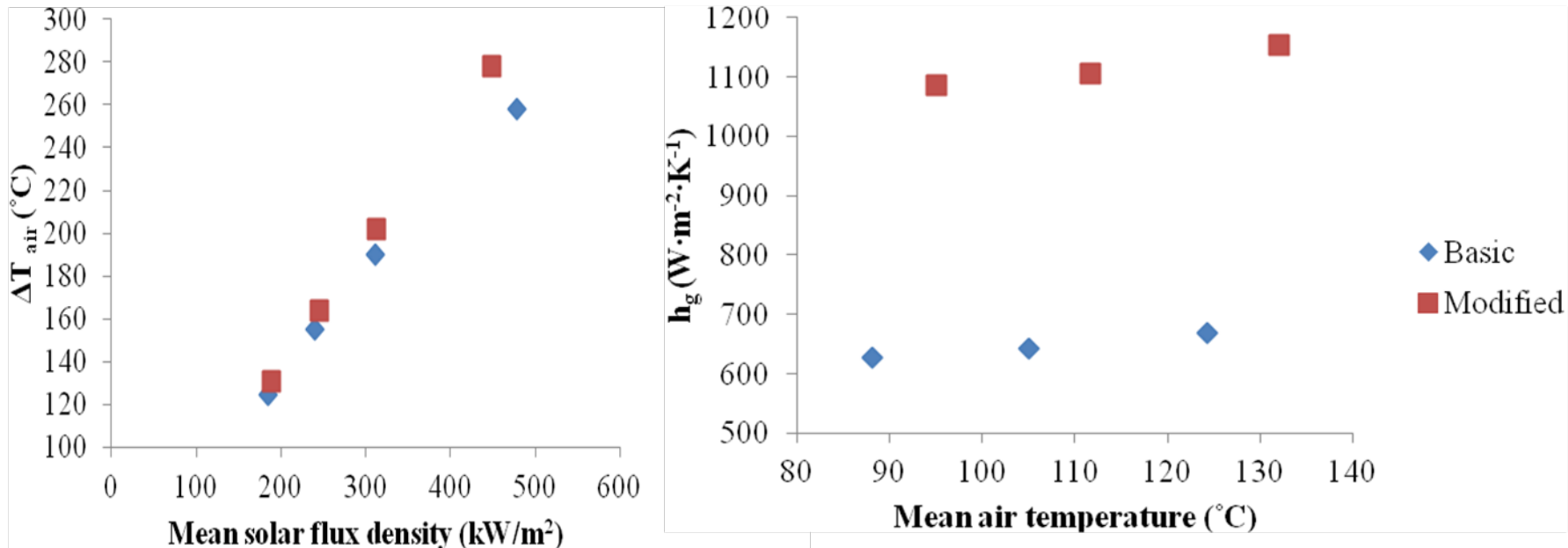


Microrécepteurs  
solaires à air ,  
Dispositif  
expérimental

# Perspectives

## R&D récepteurs

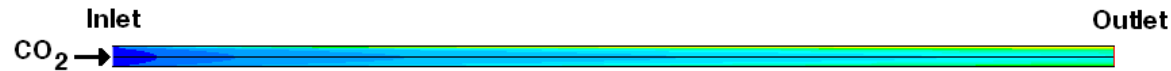
Intensification des transferts pariétaux dans des microrécepteurs solaires à air



6 bars, 0.86 g/s air

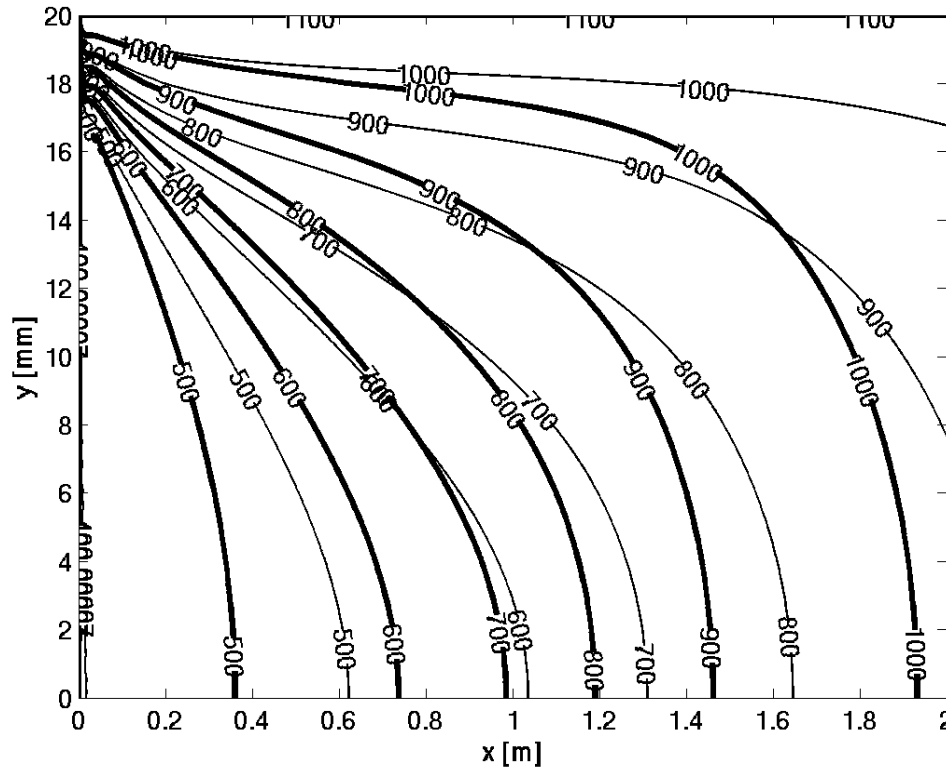
# Perspectives R&D récepteurs

Transferts radiatifs dans un récepteur CO<sub>2</sub> en fonction de la pression



Diam: 2 cm  
Long.: 2 m

Modèle ADF  
à partir de  
HIPTEMP-2010

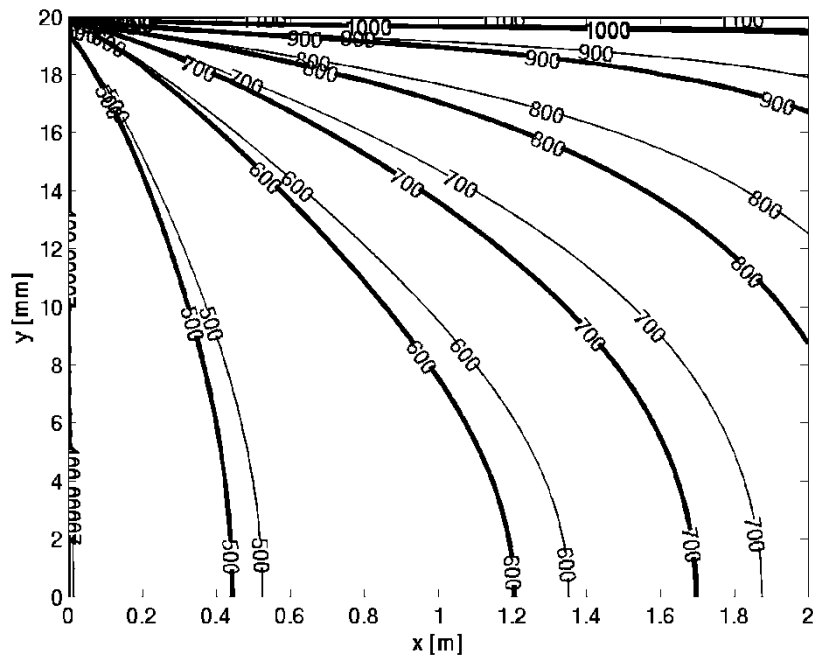


1 bar

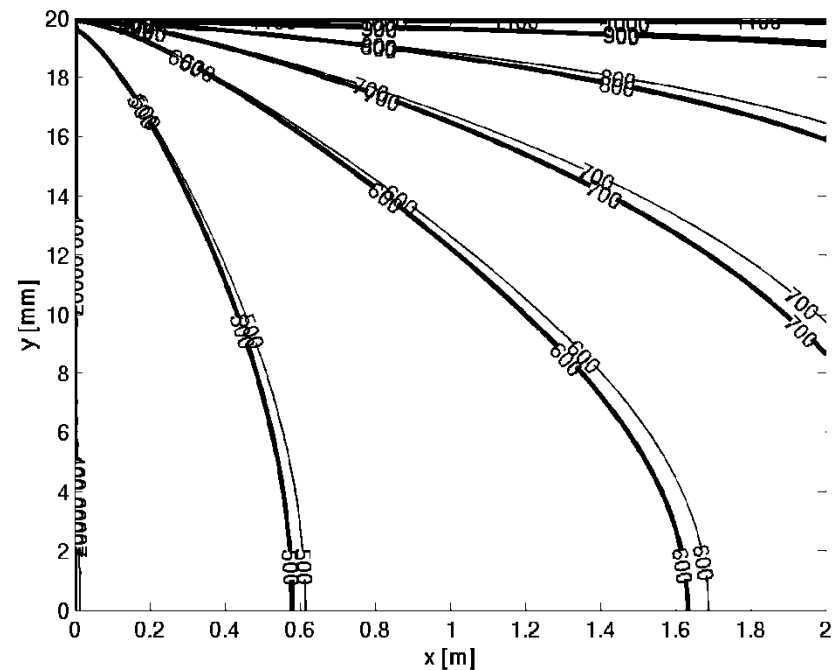
# Perspectives

## R&D récepteurs

Transferts radiatifs dans un récepteur CO<sub>2</sub> en fonction de la pression



10 bars



50 bars



# Perspectives

## R&D récepteurs

« Imagine! »

Taille caractéristique de l'élément absorbeur



m

mm

1/10 mm

nm

1/10 nm

Récepteur  
surfacique

Récepteur  
volumique  
(mousses ...)

Récepteur  
volumique  
particulaire  
(lit fluidisé)

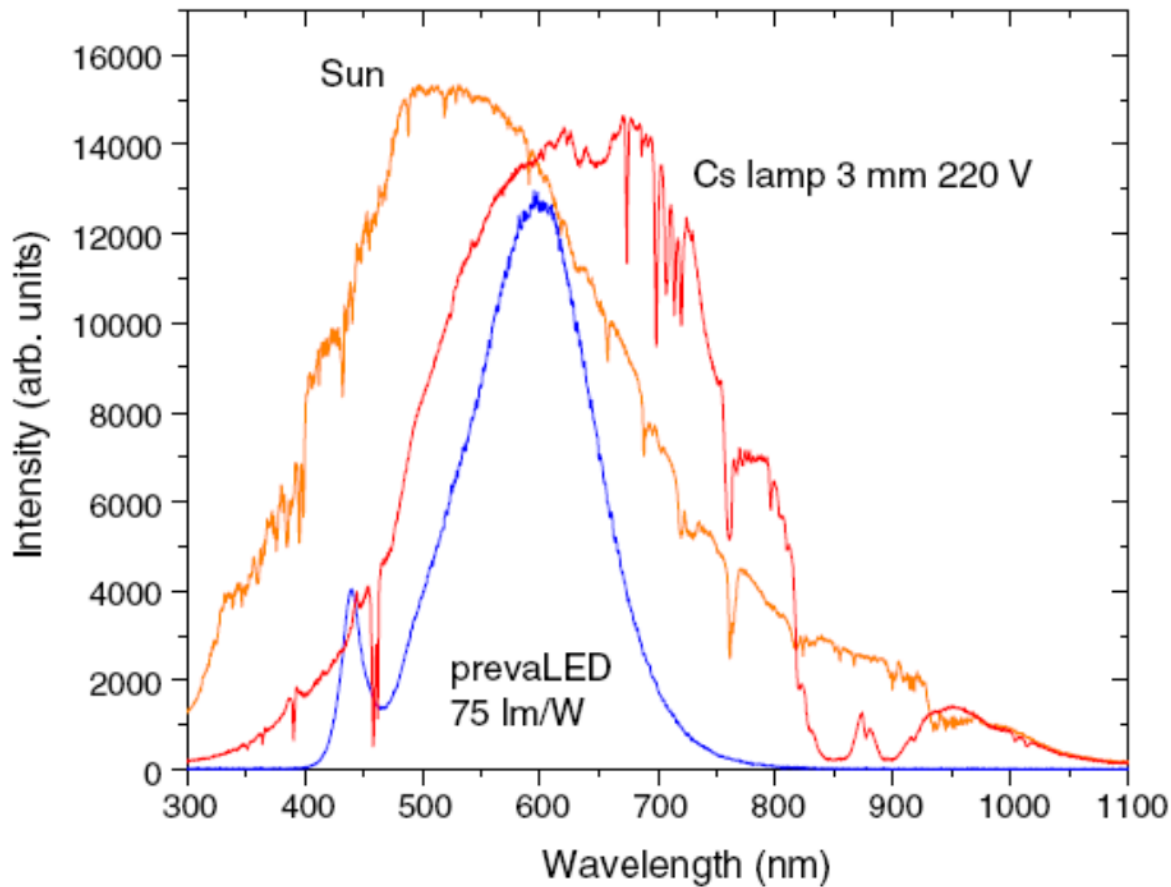
Récepteur  
volumique  
aérosol de  
noir de  
carbone

*Récepteur  
volumique  
moléculaire  
???*



# Perspectives

## R&D récepteurs « Imagine! »



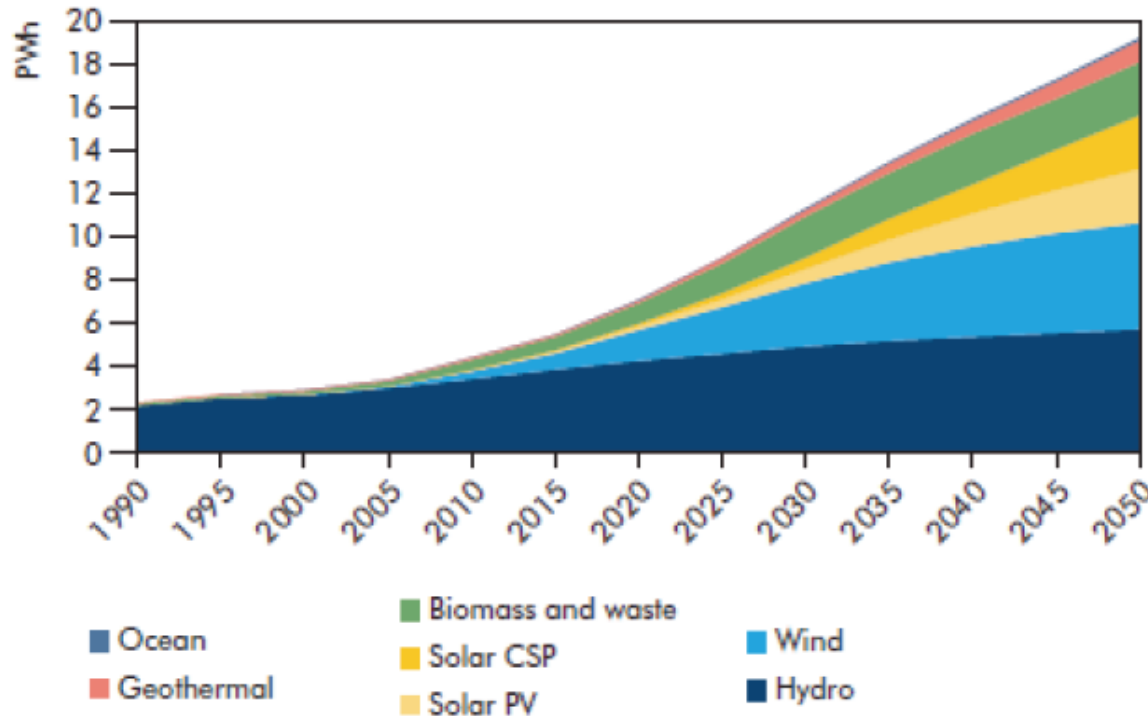
Récepteur volumique  
moléculaire:

**Vapeurs métalliques de Cs**

# Perspectives

## Scénarios

### Growth of renewable power generation in the BLUE Map



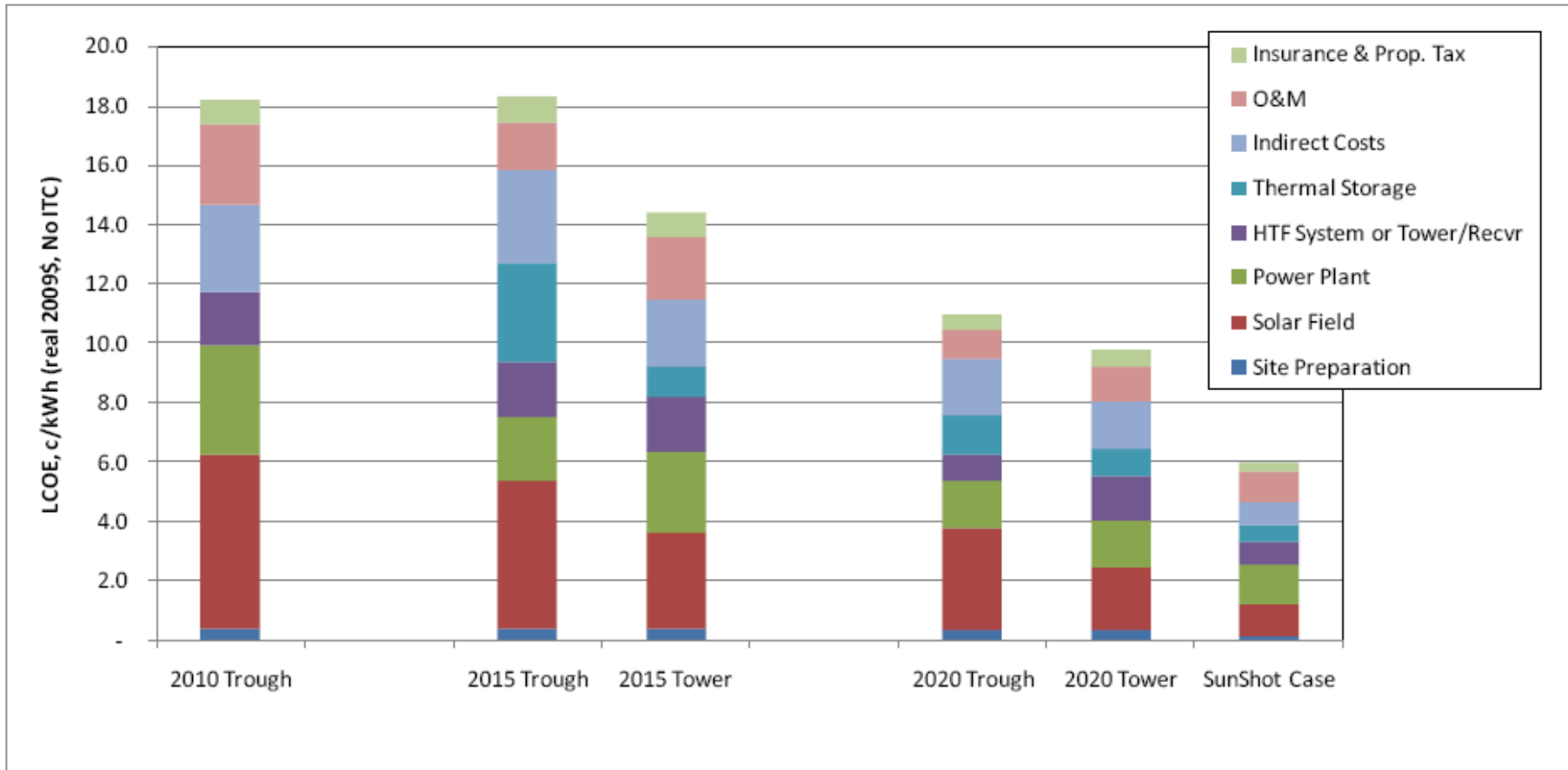
Selon le scénario “Blue Map” de l’IEA, le solaire pourrait représenter 20% à 25% de la consommation d’électricité en 2050, soit 9000 TWh par an évitant l’émission de  $6 \cdot 10^9$  tonnes de  $\text{CO}_2$ .

Photovoltaïque et solaire concentré contribueraient à 50/50 à cette production

La puissance installée de centrales solaires thermodynamiques serait alors supérieure à 1000 GW

# Perspectives

## Coûts



# Conclusion

- Le solaire à concentration est en plein développement après 20 ans de veille.
- Ses atouts sont le stockage et l'hybridation (production garantie).
- Les perspectives d'amélioration du rendement (+50%) et de baisse des coûts (-200/300%) ouvrent de larges perspectives de R&D dans le domaine de l'optique et de la thermique.
- Les industriels français commencent à investir (AREVA, Alstom, EDF, Total, CNIM, SolarEuromed ...)





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