

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



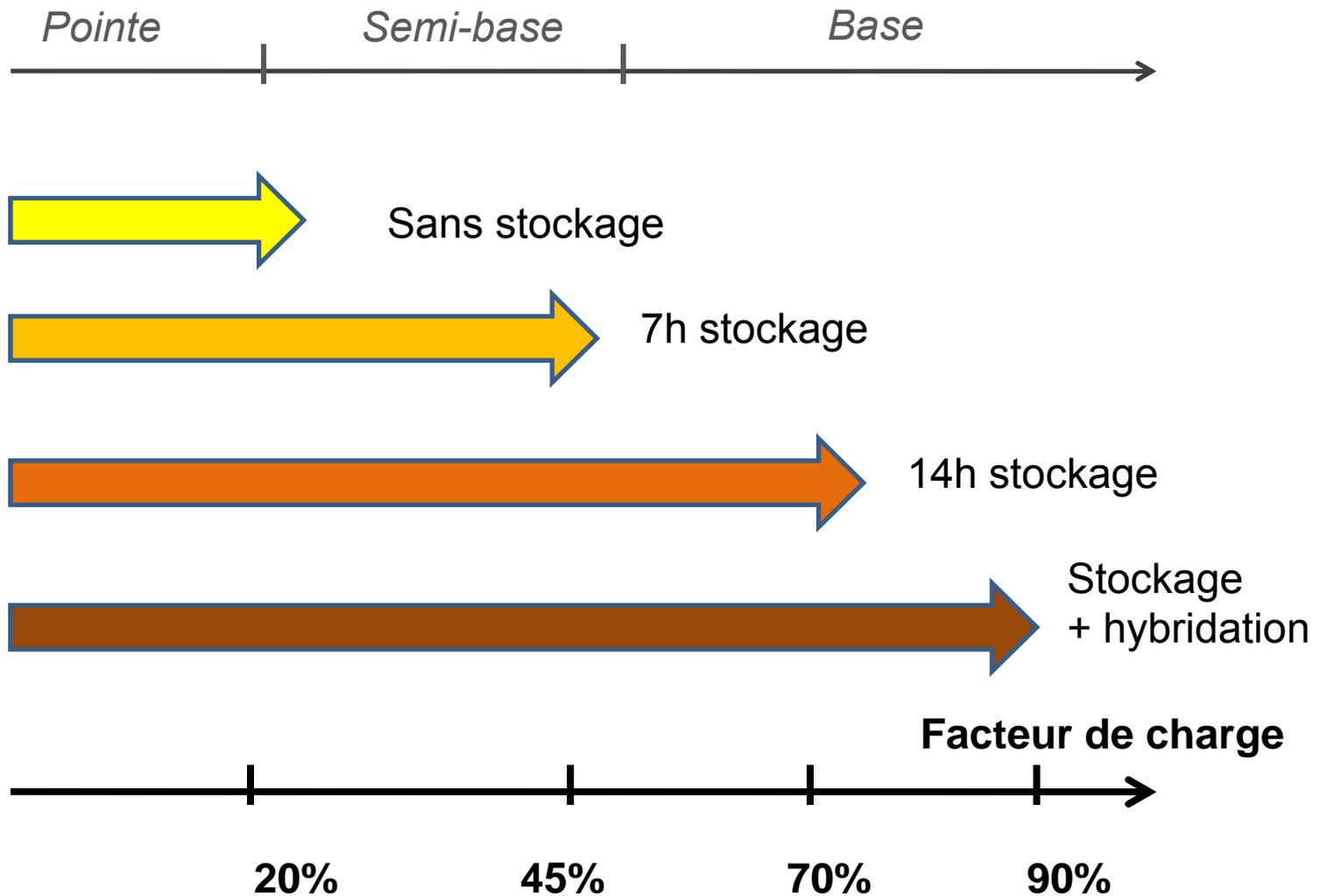
Contenu

- 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

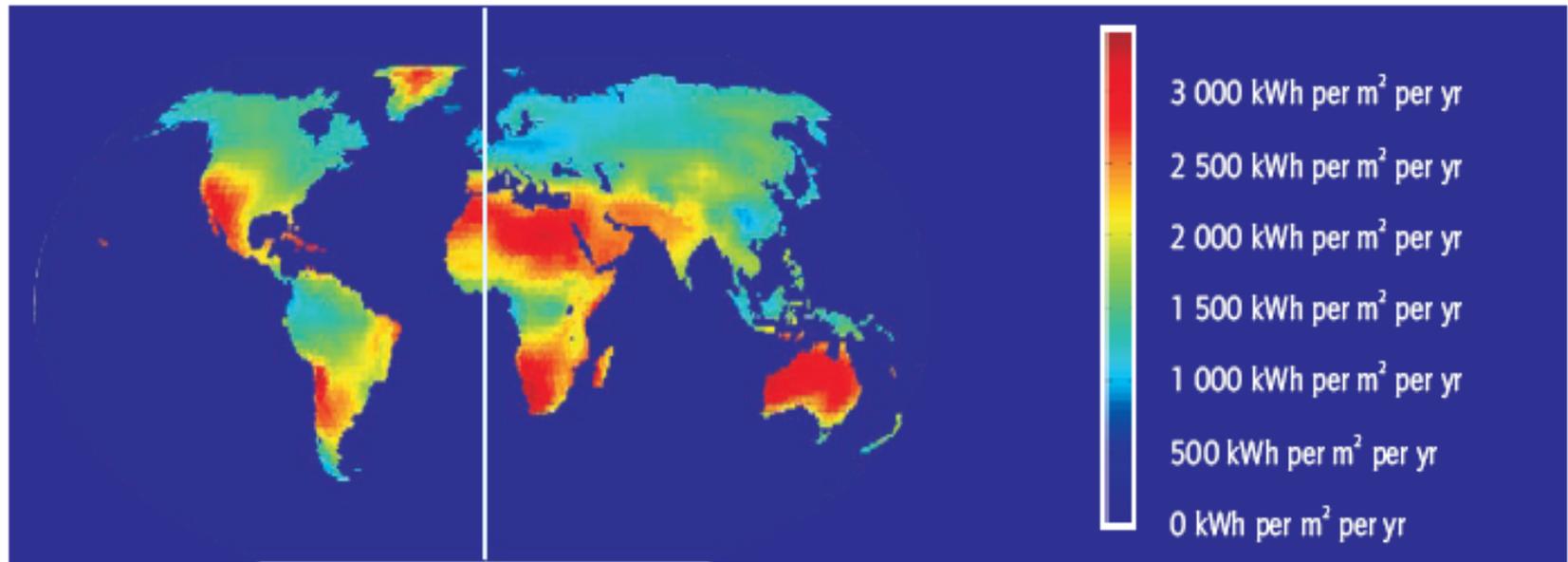
Paramètre	Thermique à concentration	Photovoltaïque
Ressource solaire	Rayonnement direct	Rayonnement total (direct + diffus)
Mode de conversion	Thermodynamique	Electronique
Stockage	Thermique	Electrochimique
Hybridation	Oui	Non
Effet de taille	Oui	Non
Disponibilité	25%-70%	20%-25%

Solaire concentré, atouts



Solaire concentré : Régions favorables

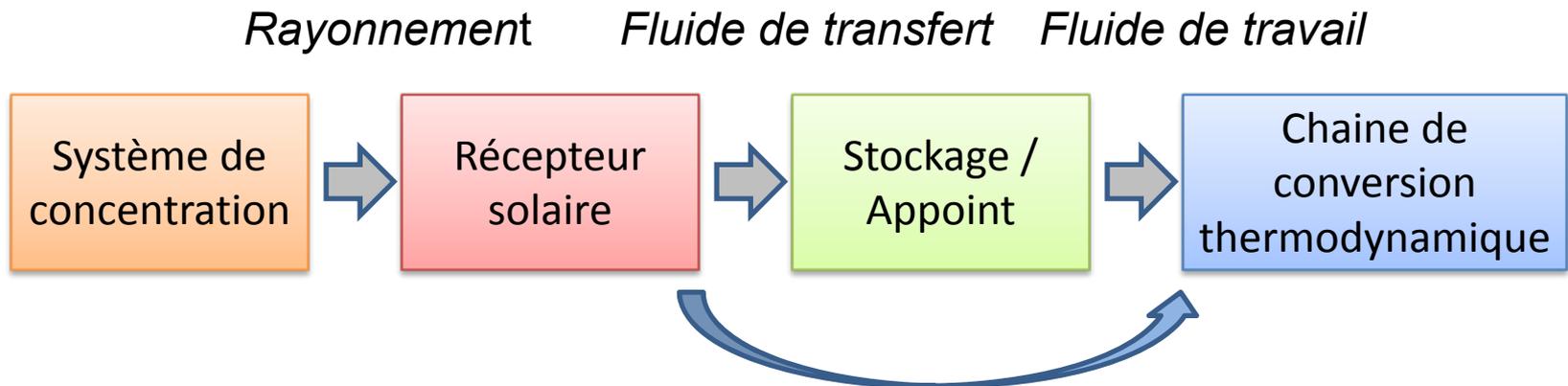
Figure 2: Solar resource for CSP technologies (DNI in kWh/m²/y)



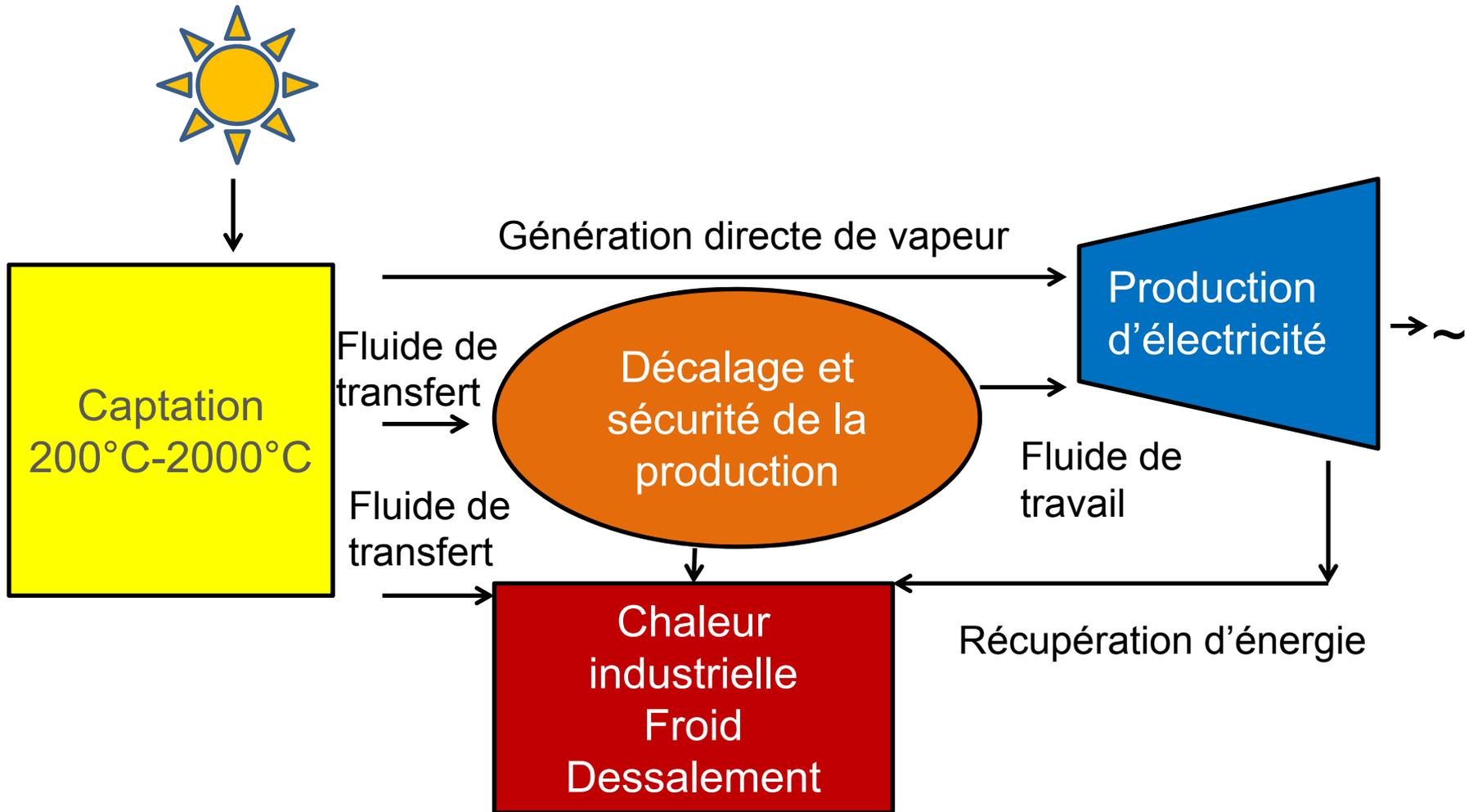
Source: Breyer & Knies, 2009 based on DNI data from DLR-ISIS (Lohmann, et al. 2006).

Source: IEA CSP Roadmap,
2010

Principe et Technologies



Principe et Technologies



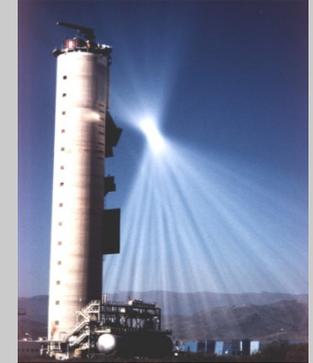
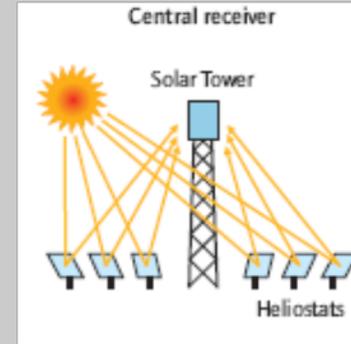
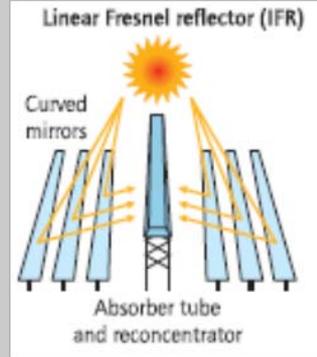
Principe et Technologies

Focalisation
Récepteur

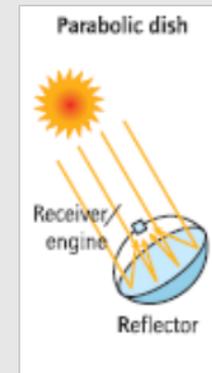
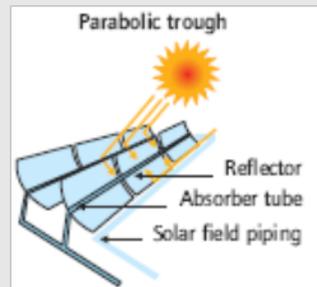
Linéaire (x100)

Ponctuelle (X1000-10000)

Fixe



Mobile





Paradigme 1

Température/Concentration

Rendement du récepteur ↓ Rendement de Carnot ↑

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

η : rendement exergetique

T_C : température de la source chaude

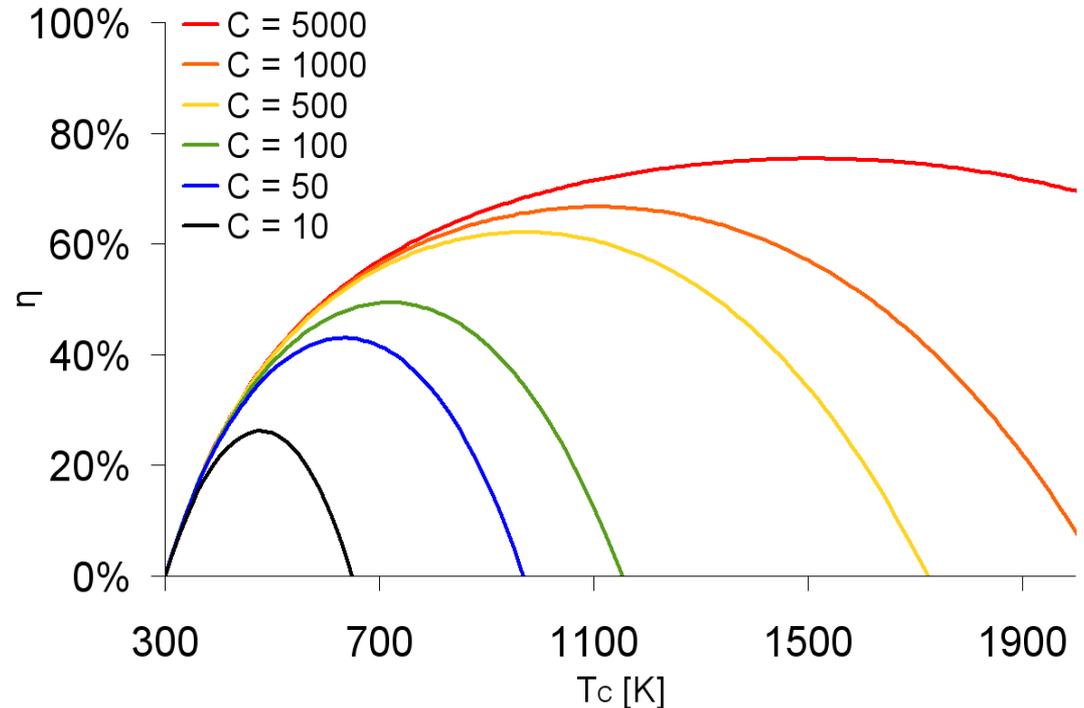
T^0 : température de l'environnement

σ : constante de Stefan-Boltzmann

C : concentration solaire

I : flux solaire incident (1 kW/m²)

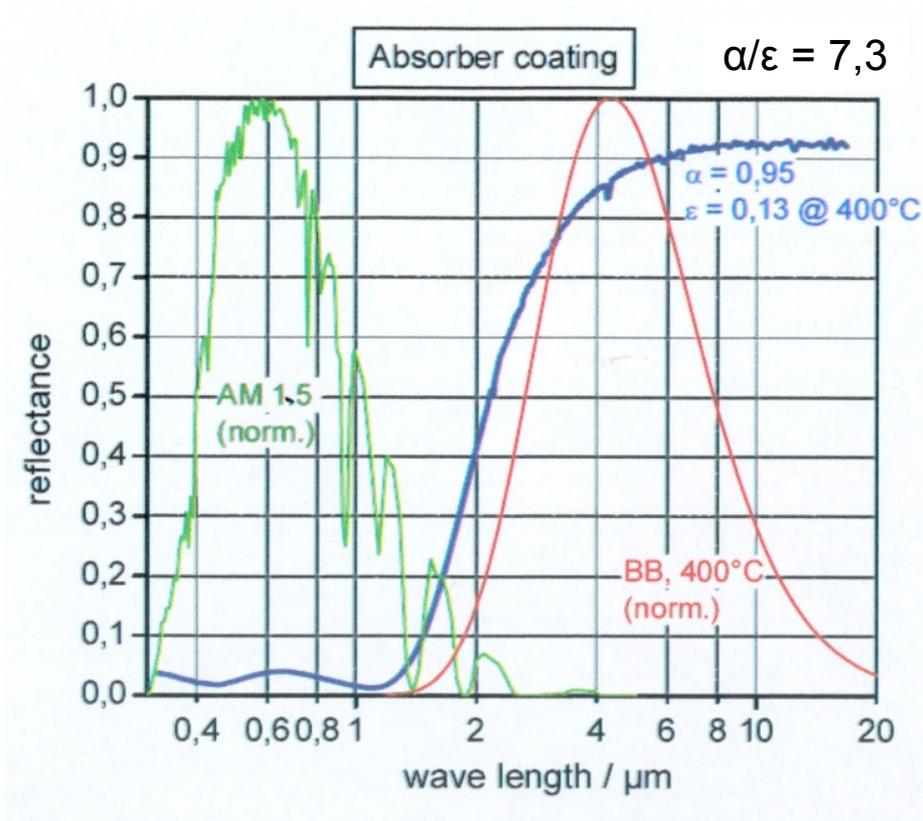
→ Pour un corps noir,
existence d'un optimum à T_C et
 C fixées



Paradigme 2

Sélectivité spectrale

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

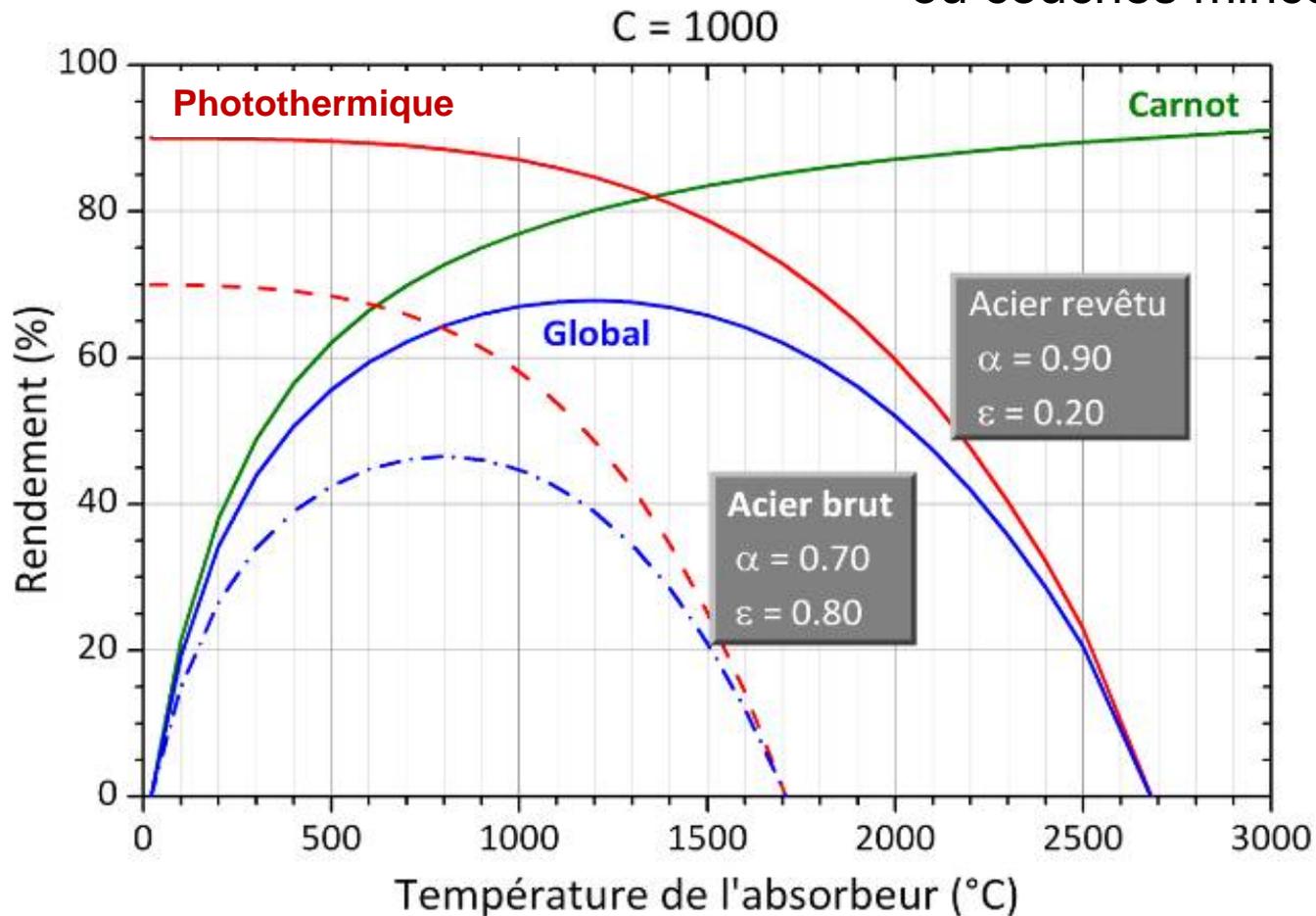


AR	Al_2O_3
Cermet	$\text{Mo} / \text{Al}_2\text{O}_3$
IR-mirror	Mo
Barrier	Oxide
Metal Tube	

Paradigme 2

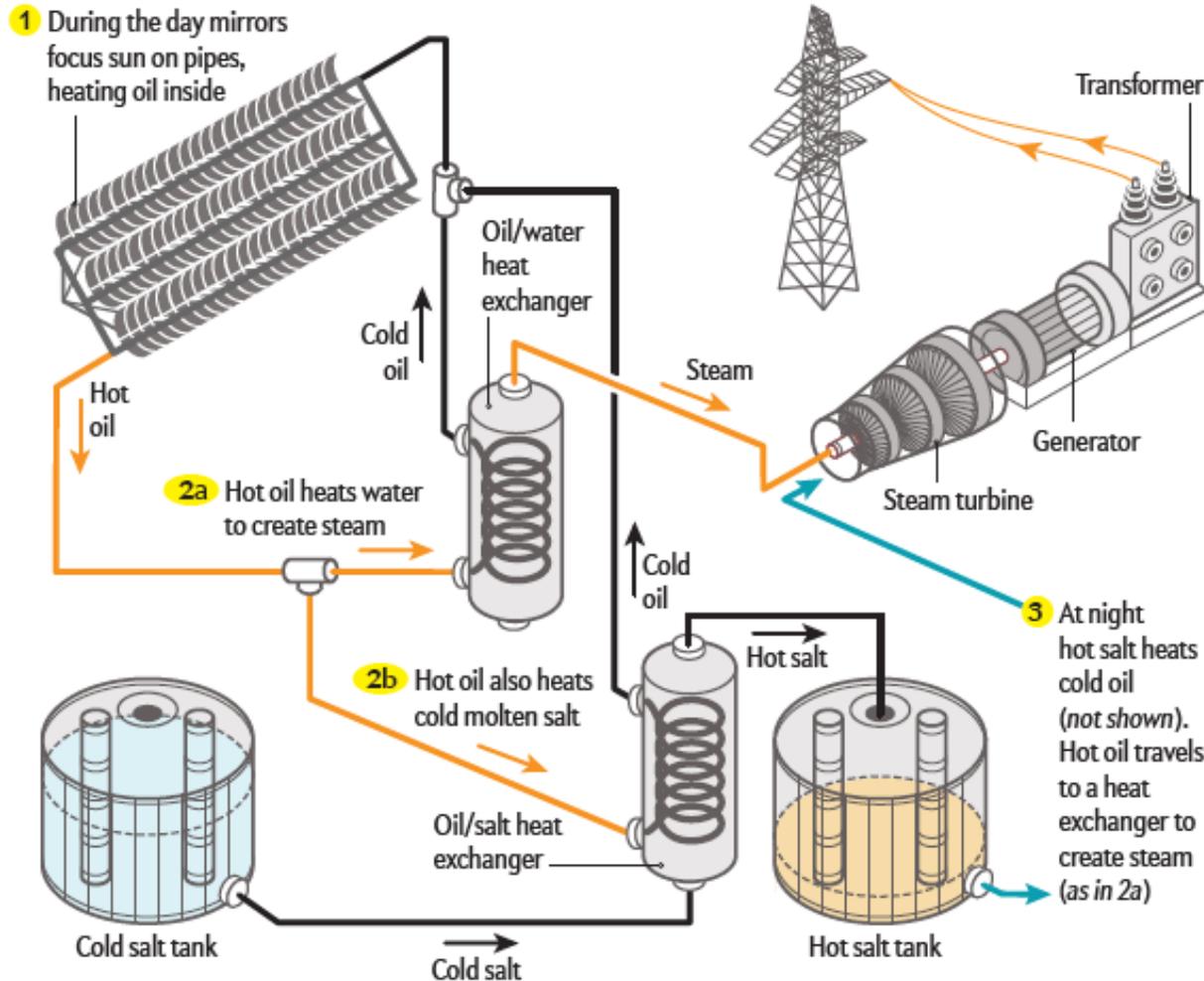
Sélectivité spectrale

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



Paradigme 3

Stockage



Apporte stabilité, prédictibilité et fiabilité à la production.

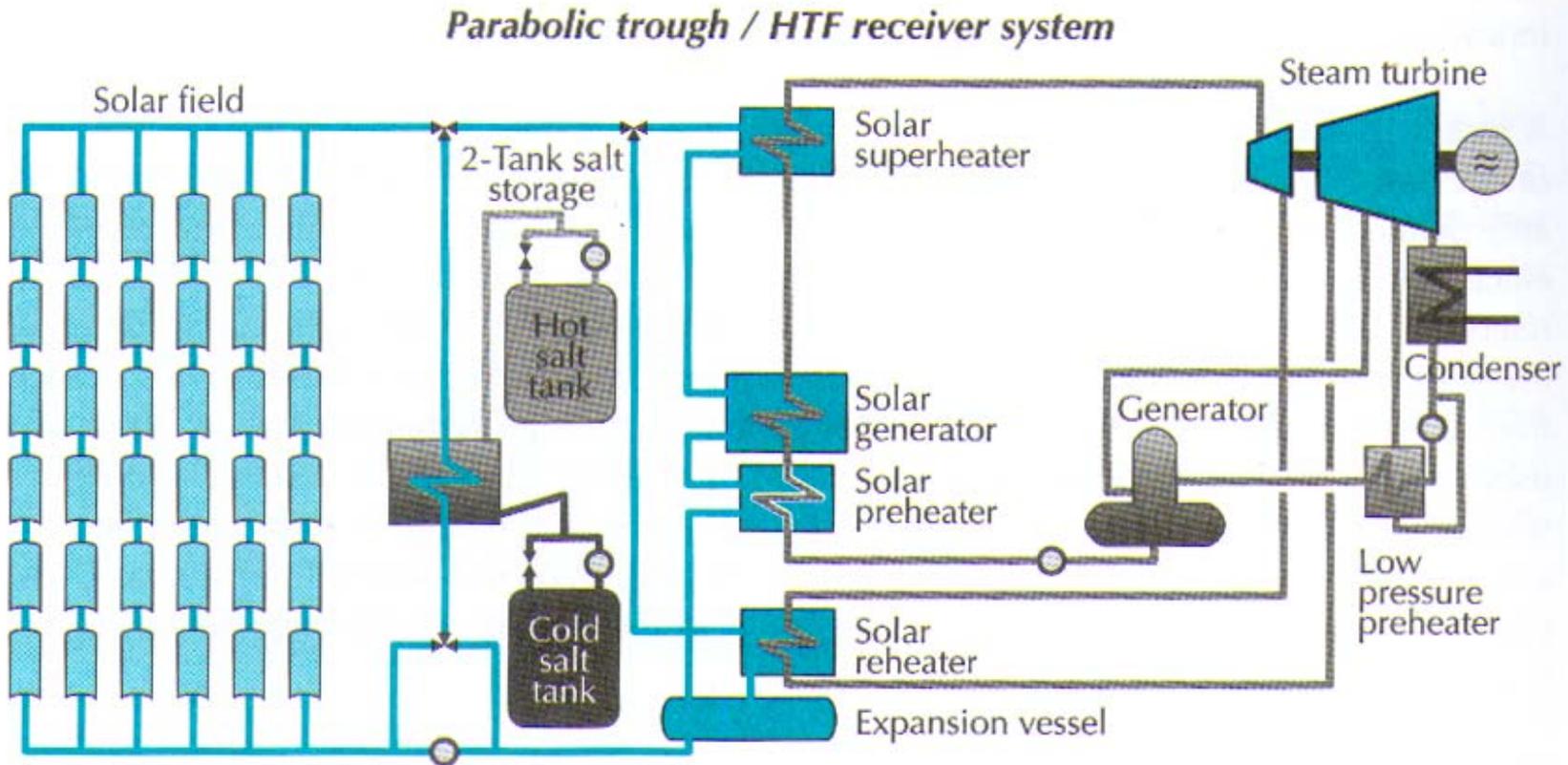
Mais, Coût, complexité et sécurité à améliorer

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

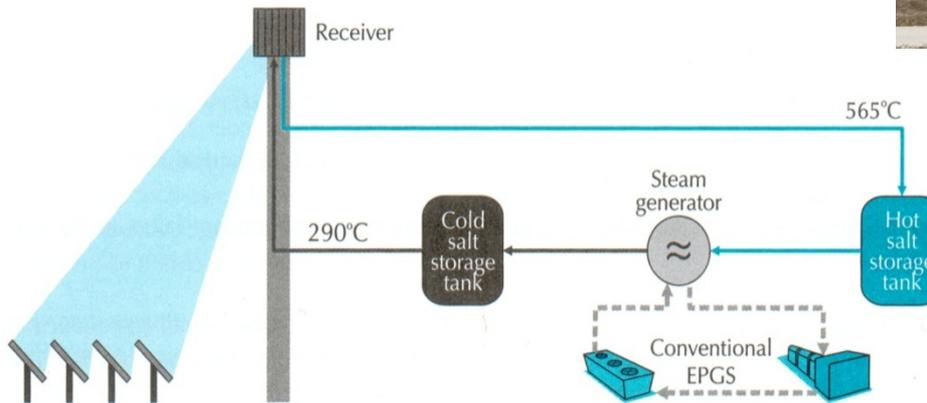
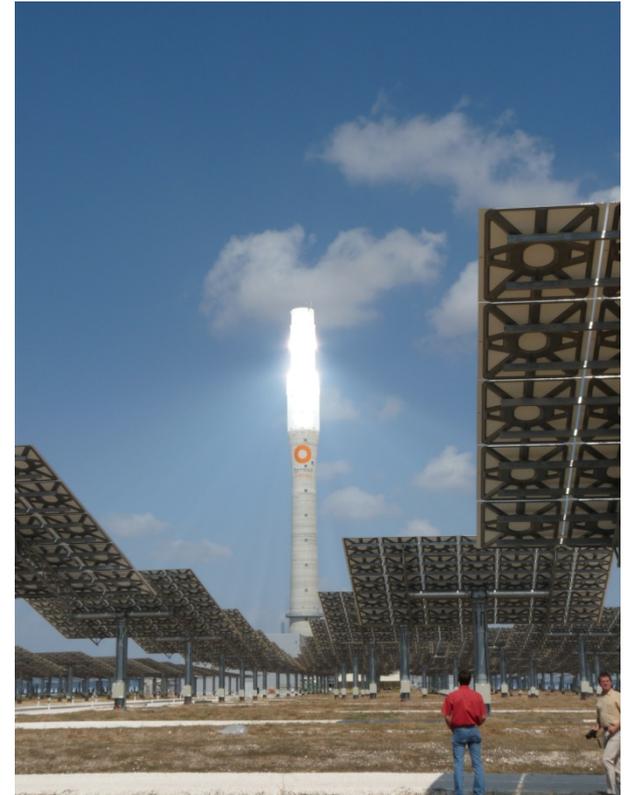


PS 10 et PS20
HTF: Vapeur
stockage vapeur

Etat de l'art



Molten salt central receiver system



GEMASOLAR

HTF: sel

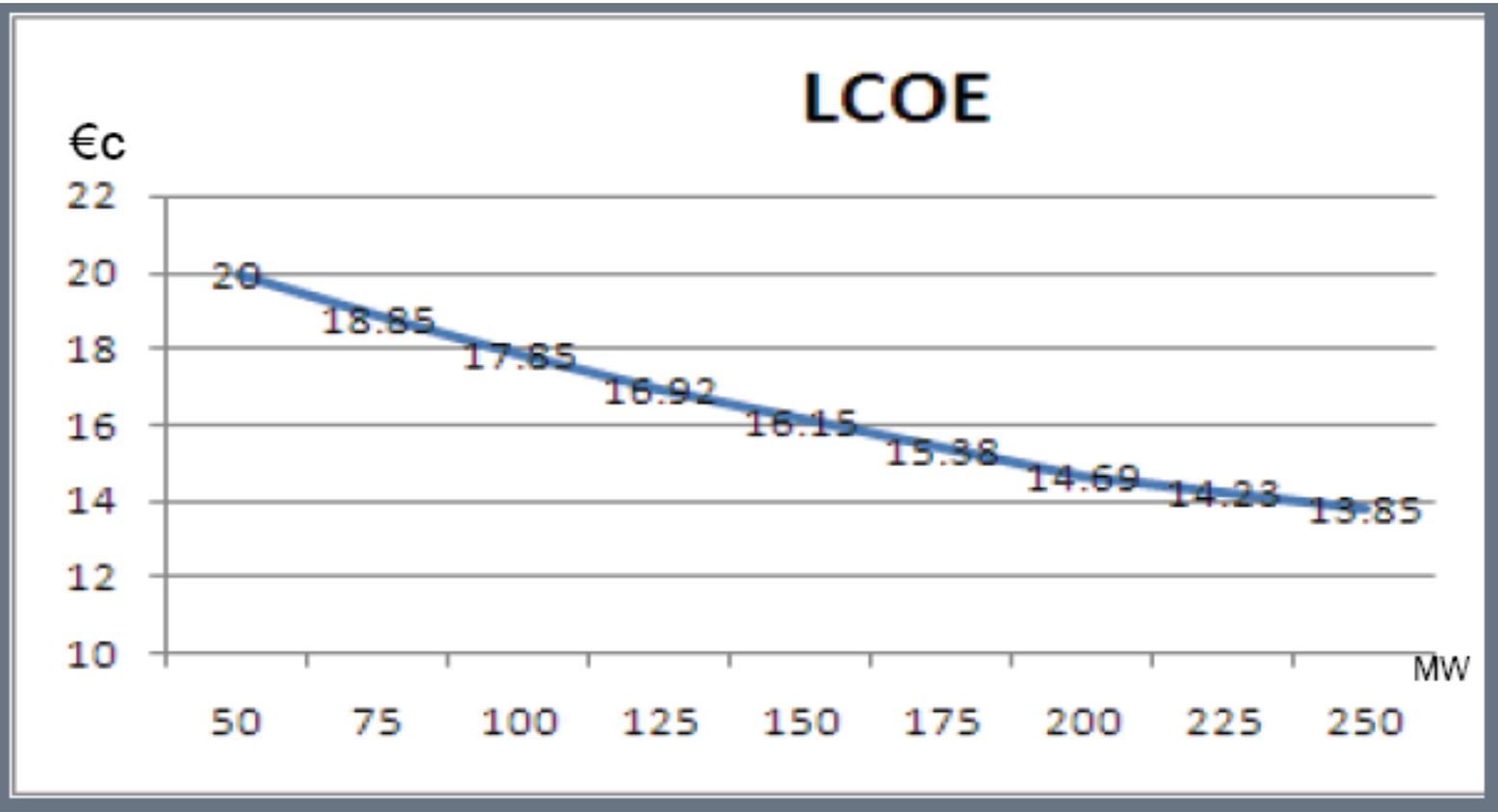
Stockage : sel, 15h

Cycle : vapeur, 20 MW



Etat de L'art

Vers les fortes puissances



CSP trough needs to push for large Solar Thermal Plants

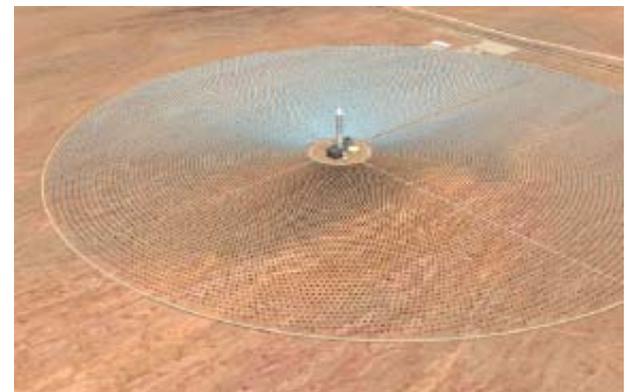


Etat de L'art

Vers les fortes puissances

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

110 MW_e
Sel fondu, tour



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

280 MW_e
cylindro-
parabolique

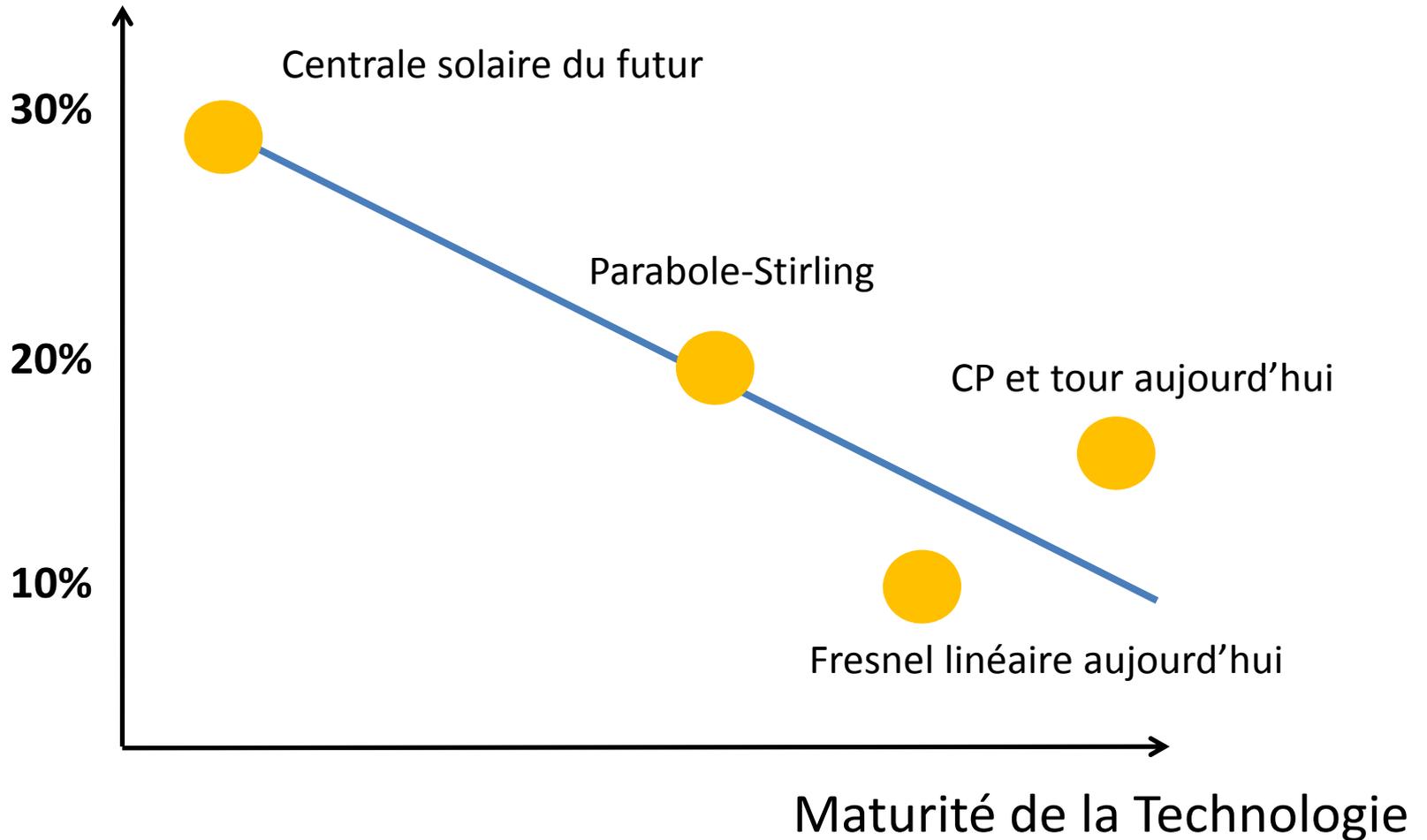
Ivanpah Project
California (USA)
Industriel : Bright Source

370 MW_e
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_e, 9 centrales de 30 à 80 MW_e)
Validation de la technologie à sel fondu à Solar Two (USA, 10 MW_e) après Themis (France 2,5 MW_e 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

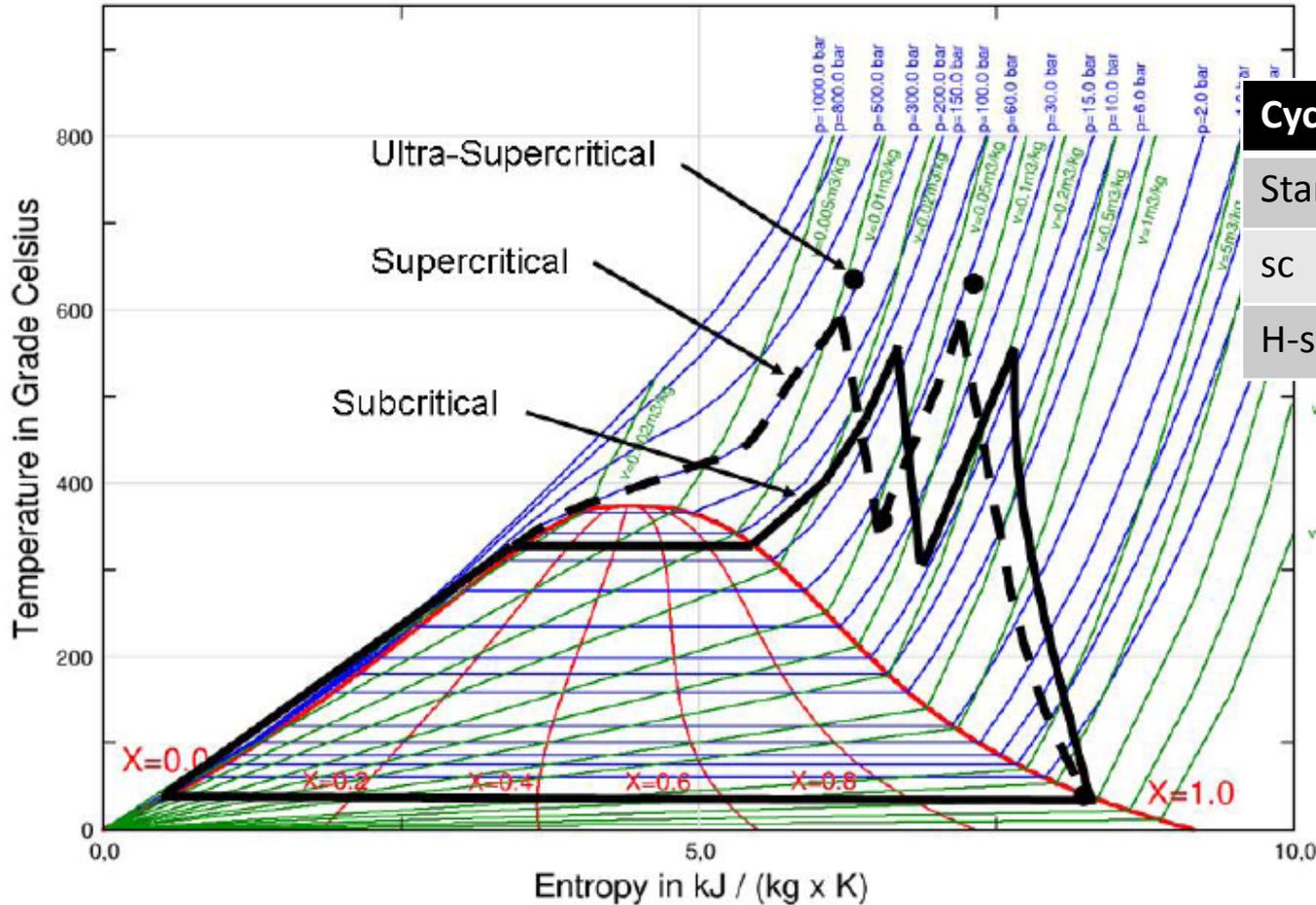
Cycle thermodynamique	Rendement du cycle	Rendement centrale solaire	Gain
Cycles vapeur (Rankine) 390°C-565°C	37% - 42%	20% - 23%	0
Vapeur supercritique ≥ 650°C	48%	27%	17% - 35%
CO2 supercritique Brayton 600°C – 800°C	50% - 55%	28% - 31%	22% - 55%
Cycle combiné (Brayton/Rankine) 1100°C-1300°C	55%-60%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



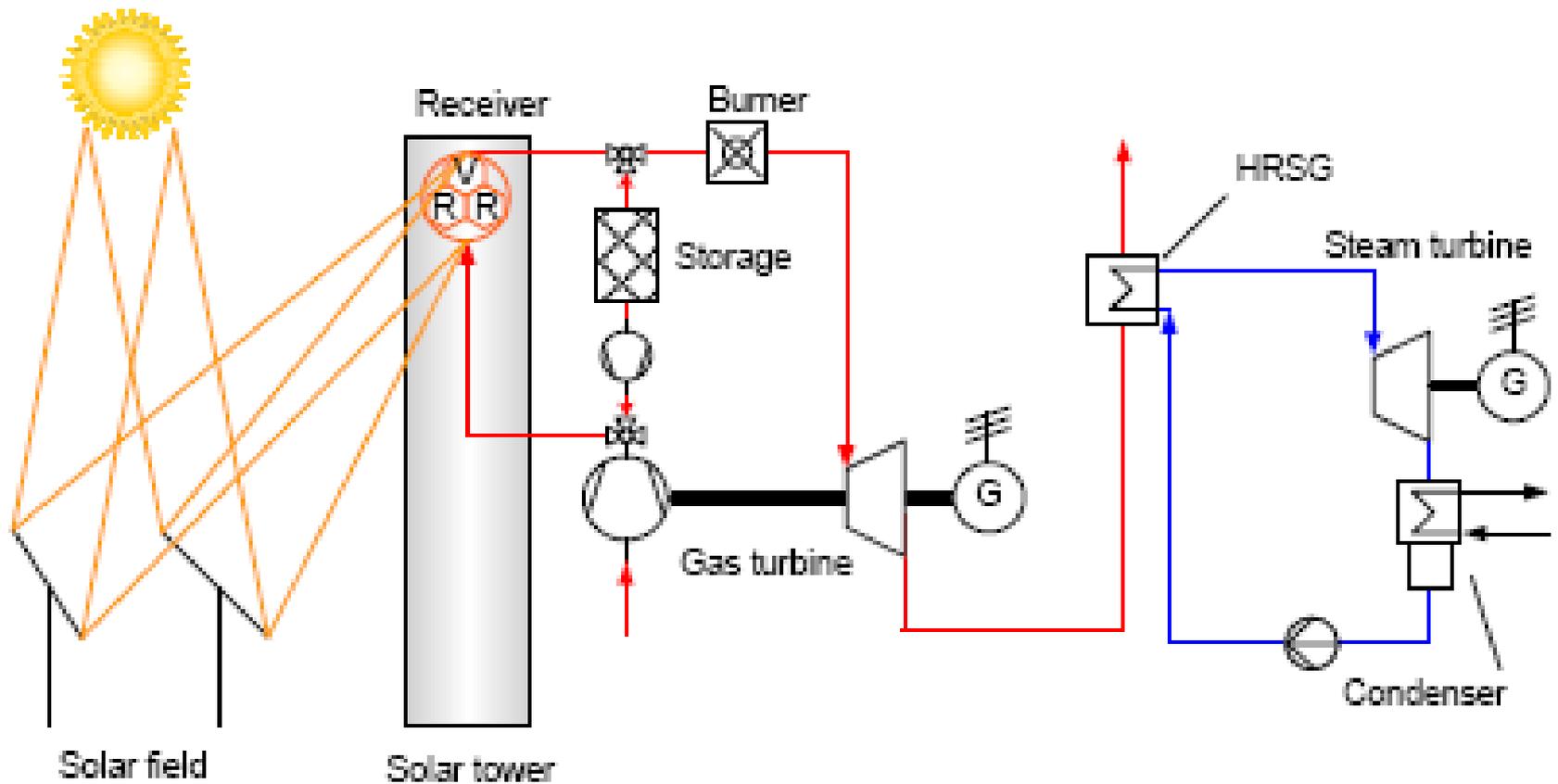
Cycle	P (bars)	T (°C)
Standard	125	535
sc	301	591
H-sc	331	630

Impact sur les technologies de stockage



Perspectives

Cycle combiné



Avec stockage HT et hybridation intégrés



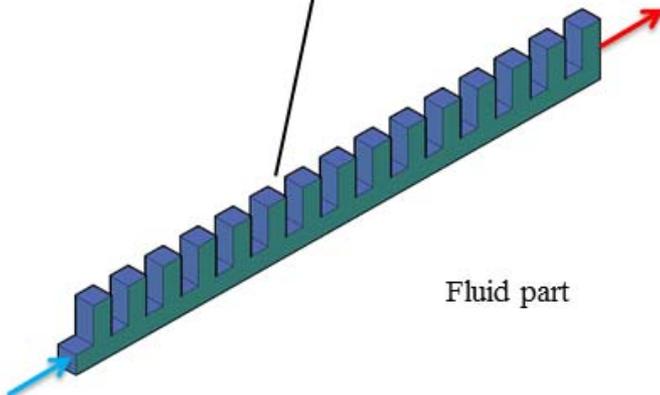
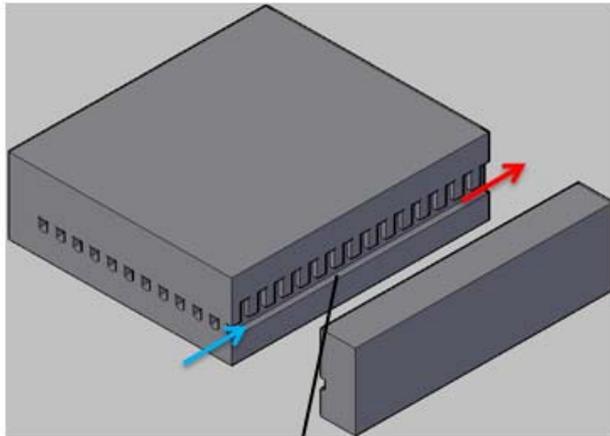
Perspectives R&D associée

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

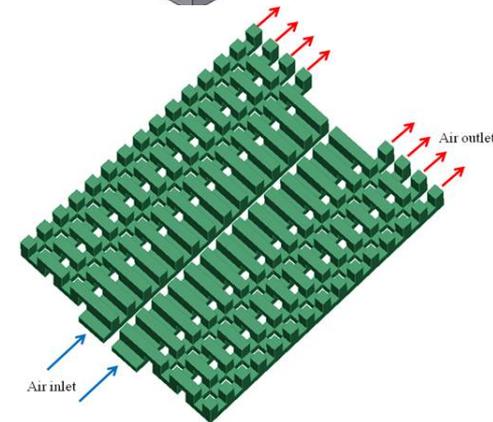
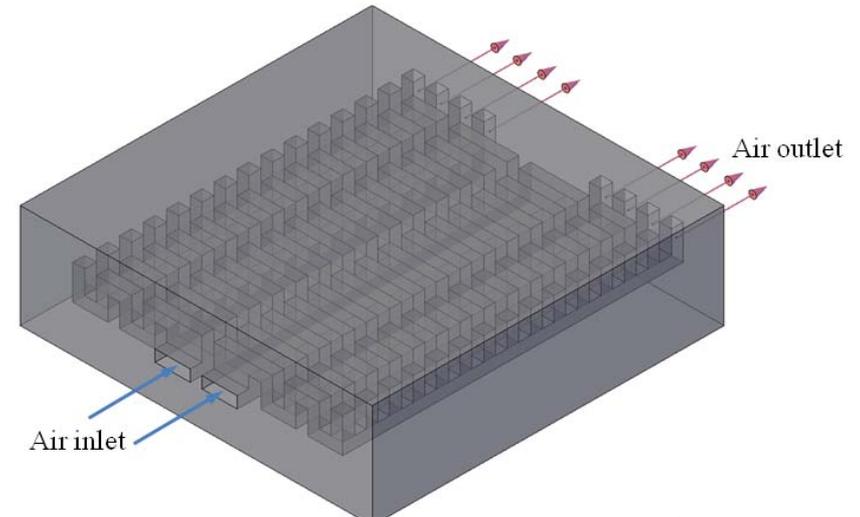


Perspectives R&D récepteurs

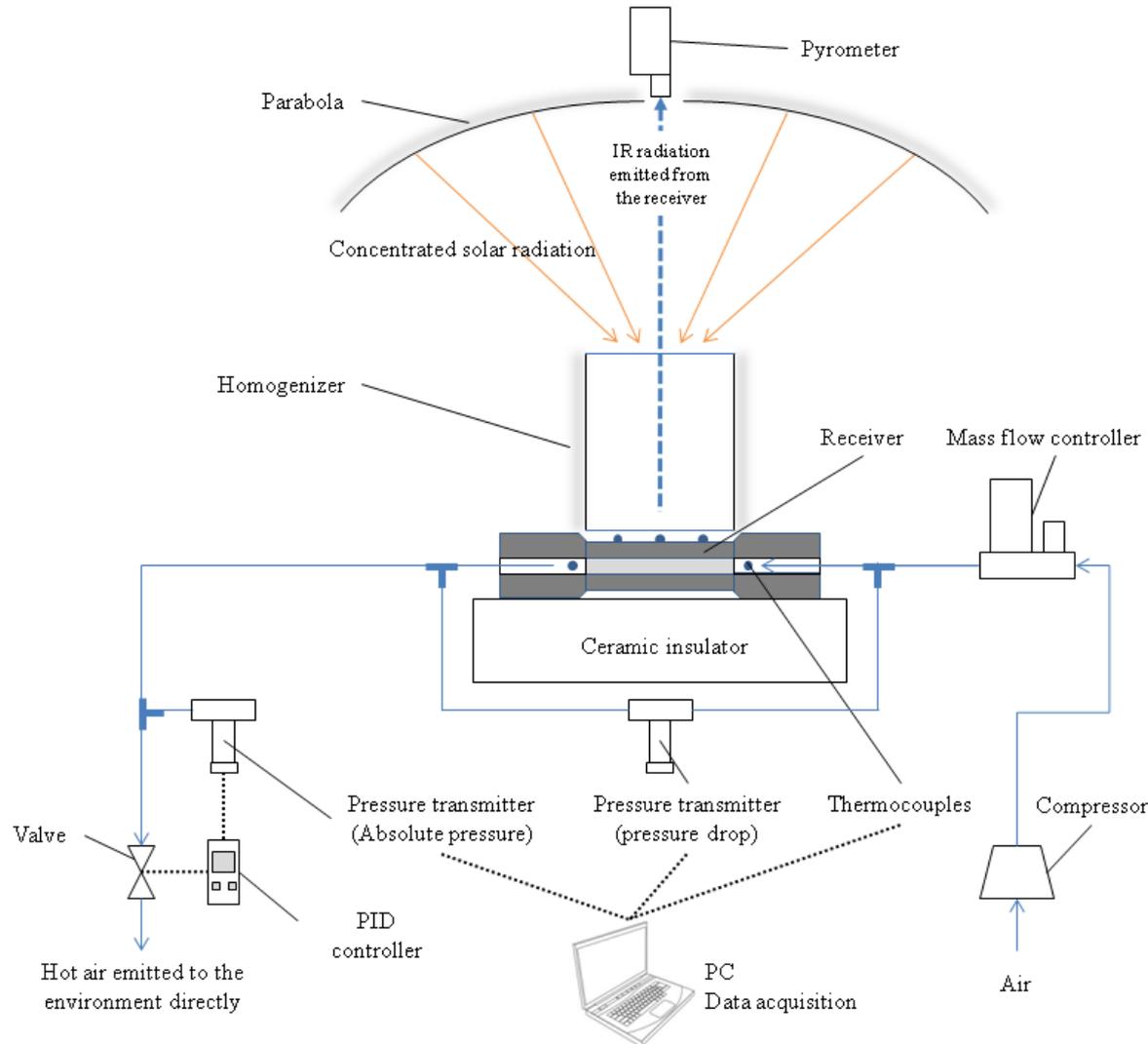
Intensification des transferts pariétaux dans des microrécepteurs solaires à air



Fluid part



Perspectives R&D récepteurs

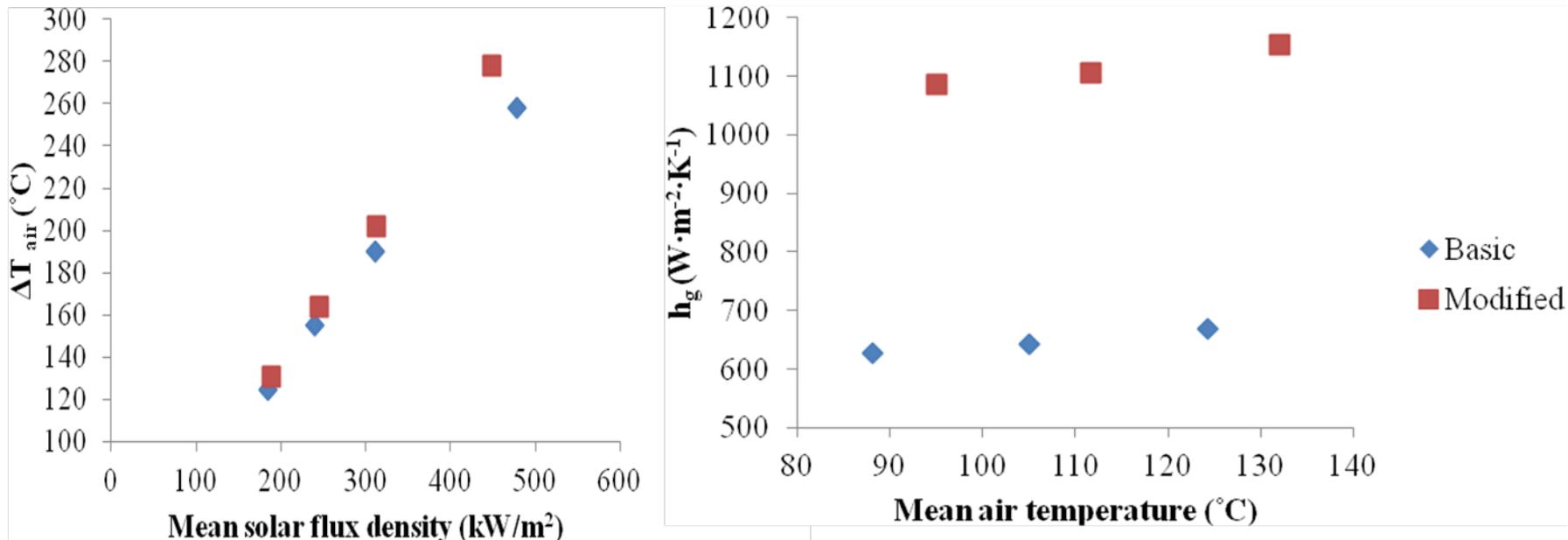


Microrécepteurs
solaires à air ,
Dispositif
expérimental

Perspectives

R&D récepteurs

Intensification des transferts pariétaux dans des microrécepteurs solaires à air



6 bars, 0.86 g/s air

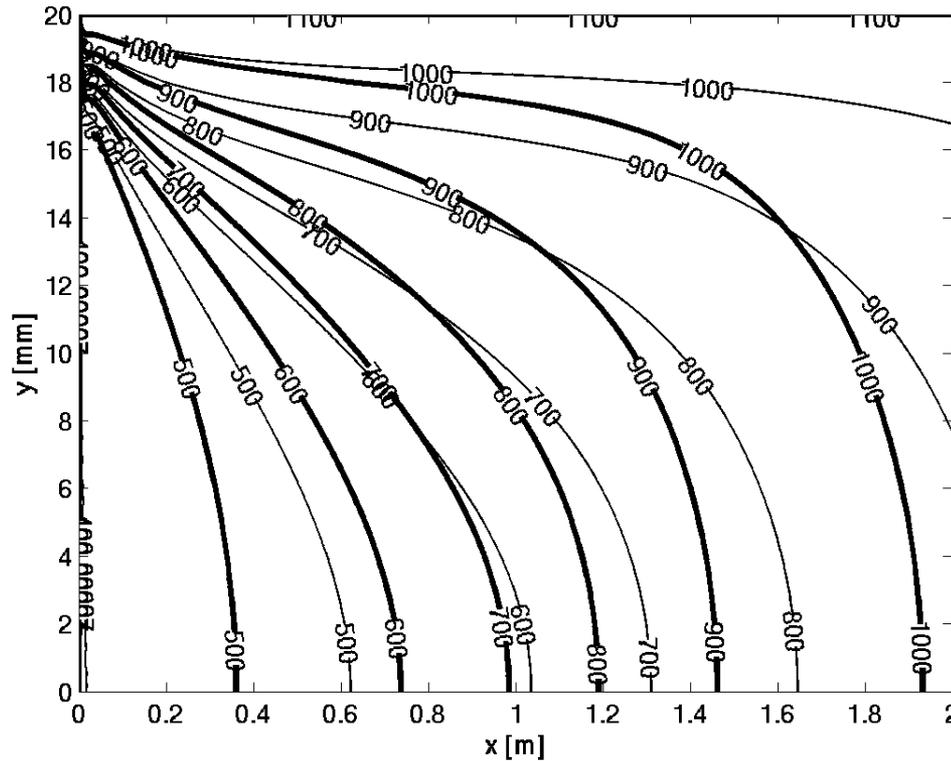
Perspectives R&D récepteurs

Transferts radiatifs dans un récepteur CO₂ en fonction de la pression



Diam: 2 cm
Long.: 2 m

Modèle ADF
à partir de
HIPTEMP-2010

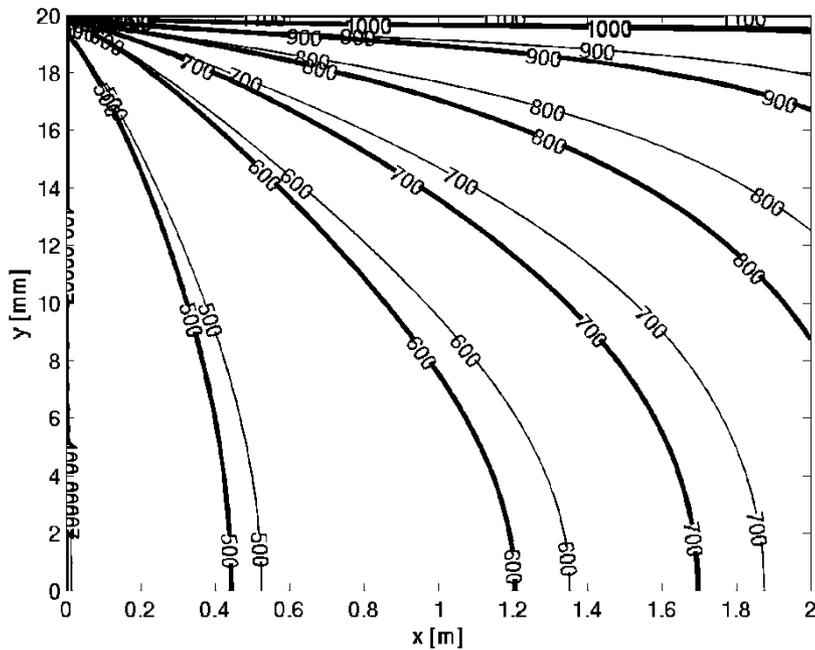


1 bar

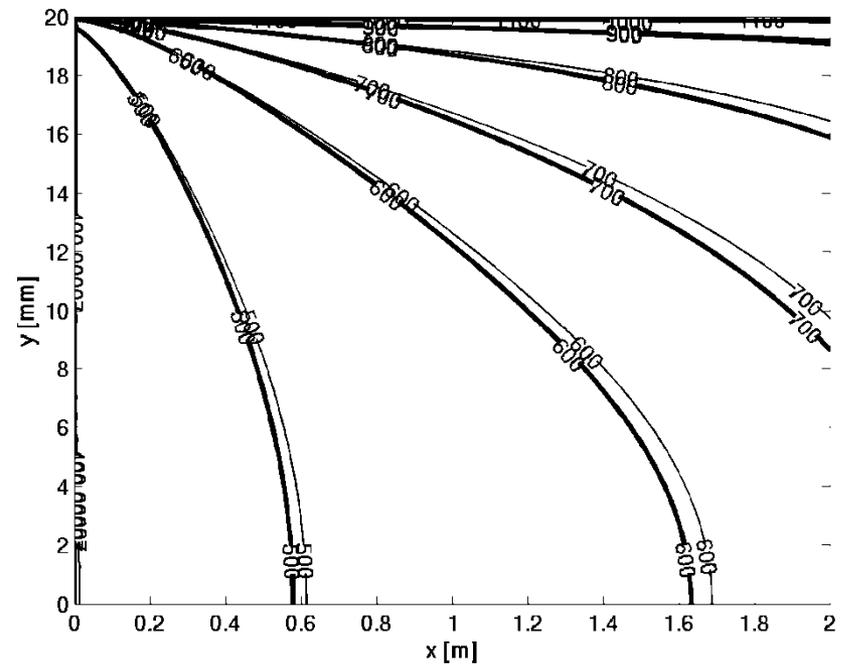
Perspectives

R&D récepteurs

Transferts radiatifs dans un récepteur CO₂ 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 ...)

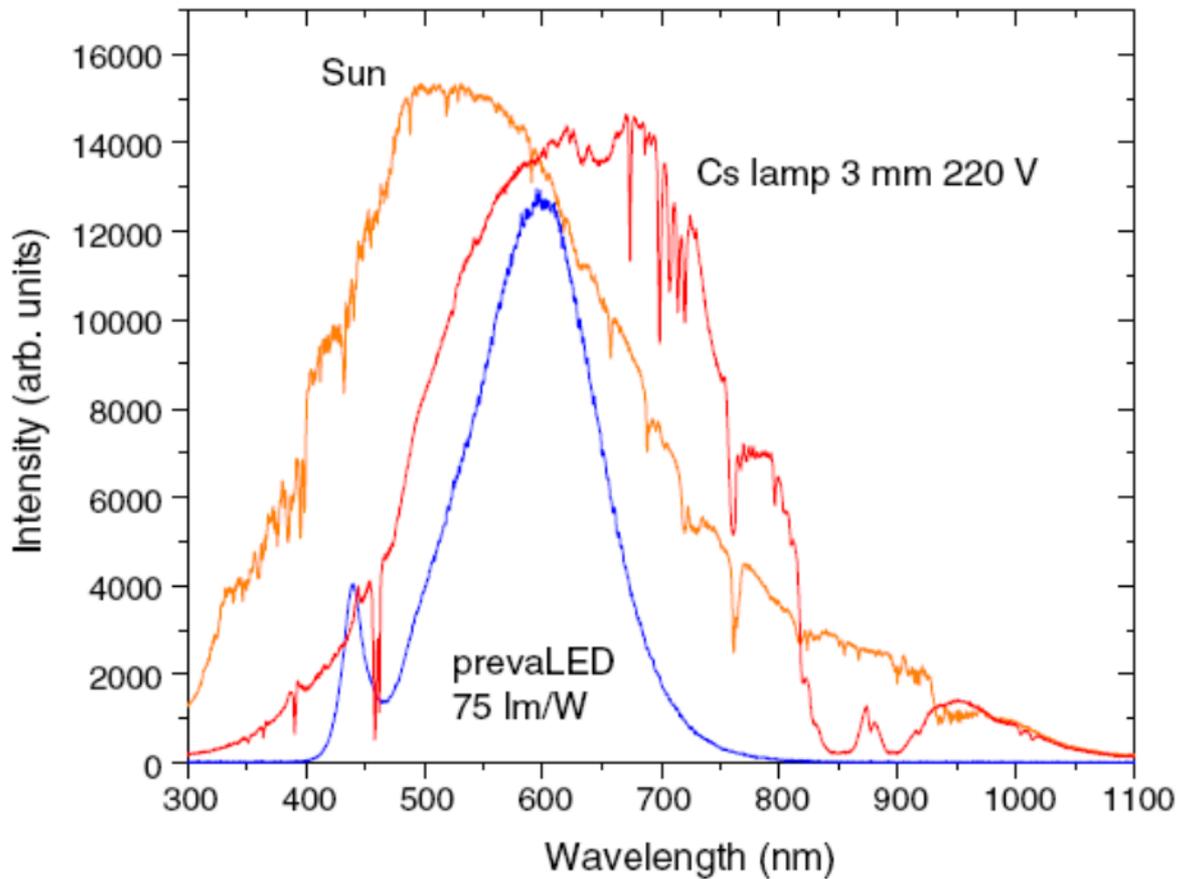
Récepteur
volumique
particulaire
(lit fluidisé)

Récepteur
volumique
aérosol de
noir de
carbone

*Récepteur
volumique
moléculaire
???*

Perspectives

R&D récepteurs « Imagine! »



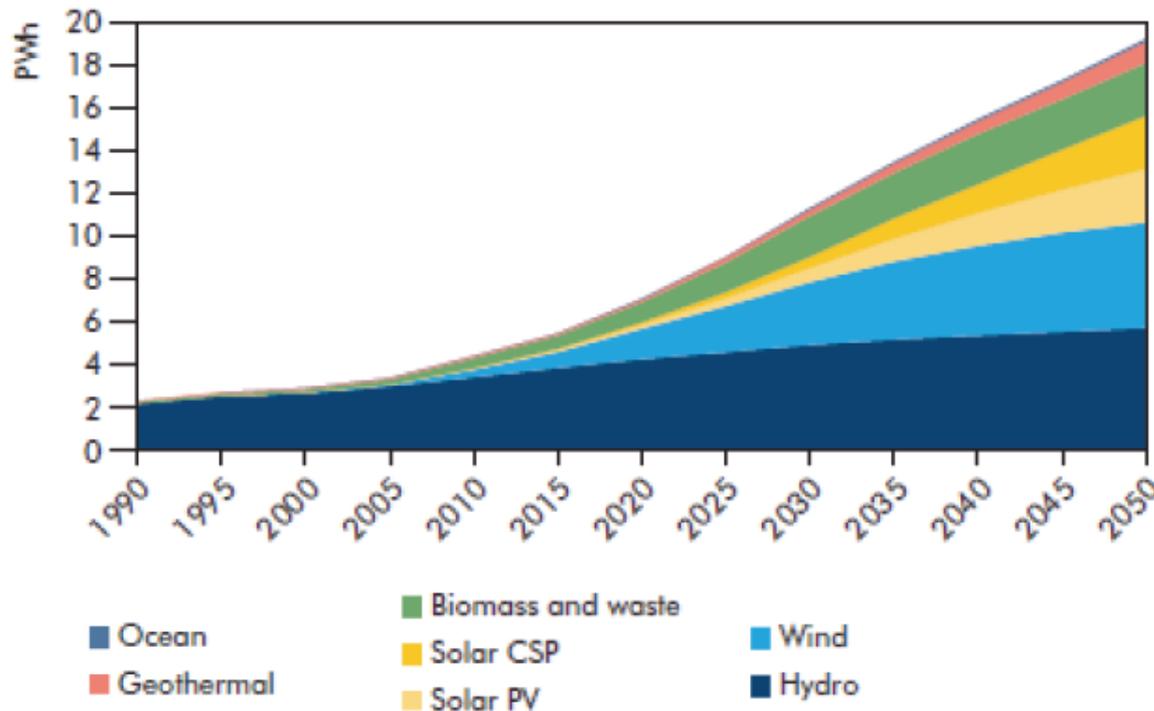
Récepteur volumique
moléculaire:

Vapeurs métalliques de Cs

Perspectives

Scénarios

Growth of renewable power generation in the BLUE Map



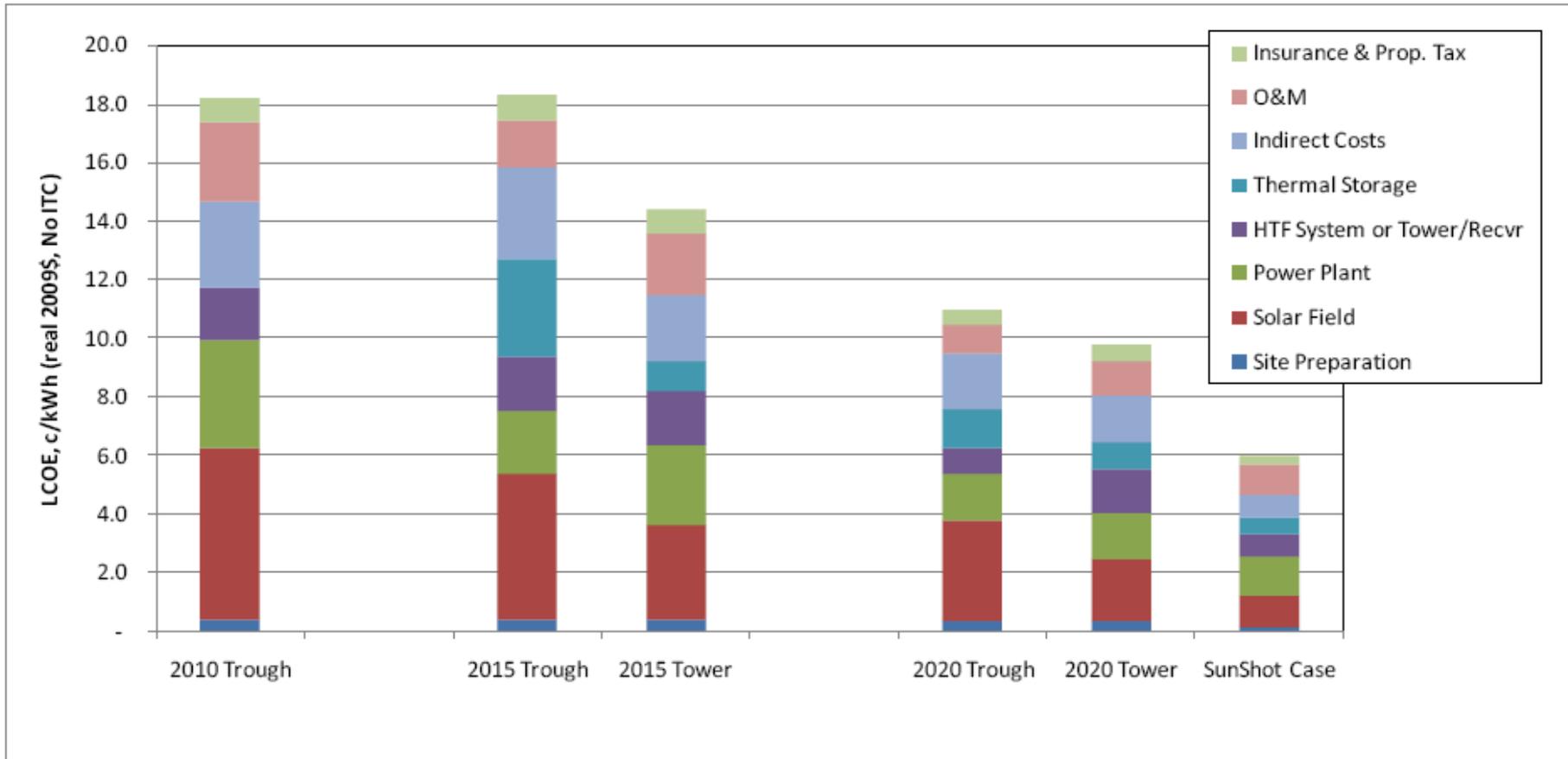
Selon le scénario “Blue Map” de l’IEA, le solaire pourrait représenter 20% à 25% de la consommation d’électricité en 2050, soit 9000 TWh par an évitant l’émission de $6 \cdot 10^9$ tonnes de CO_2 .

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, Alsthom, EDF, Total, CNIM, SolarEuromed ...)



gilles.flamant@promes.cnrs.fr