

Centrales solaires à tour

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**

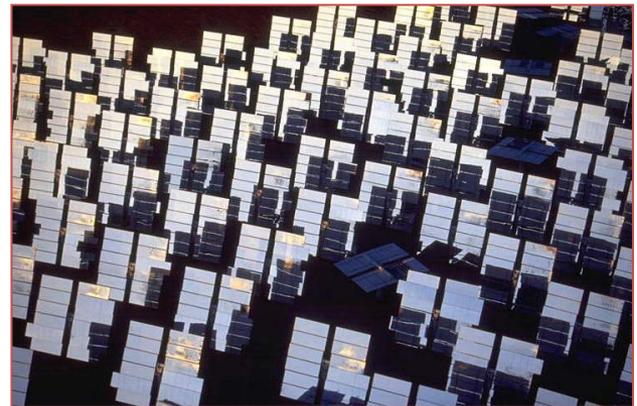
Directeur
PROMES-CNRS

Gilles.flamant@promes.cnrs.fr



Sommaire

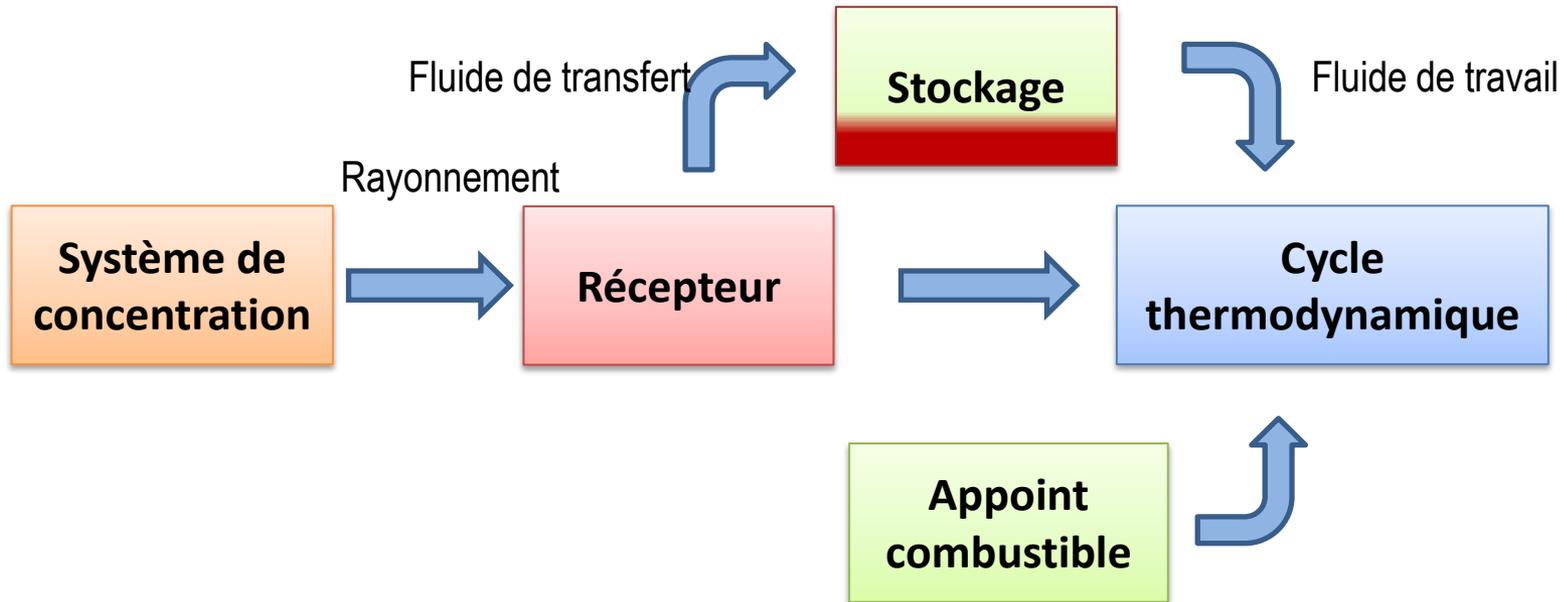
- Principe
- Exemples de centrales commerciales
- Composants et sous-ensembles
- Coûts





Principe

Configurations

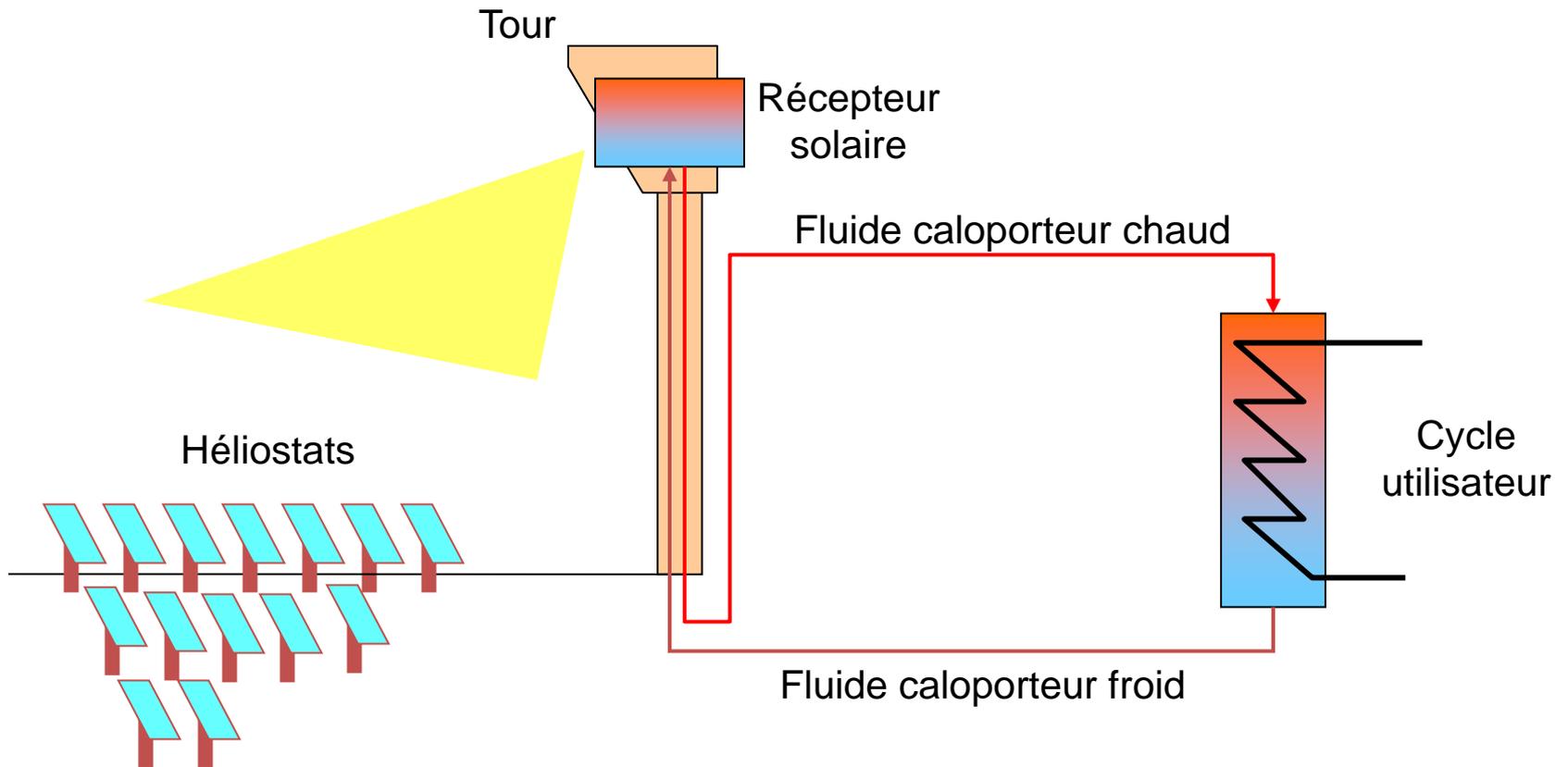


Les configurations possibles pour les centrales à tour sont plus nombreuses que pour les centrales cylindro-paraboliques car la concentration peut varier de 200 à 3000.

Configurations

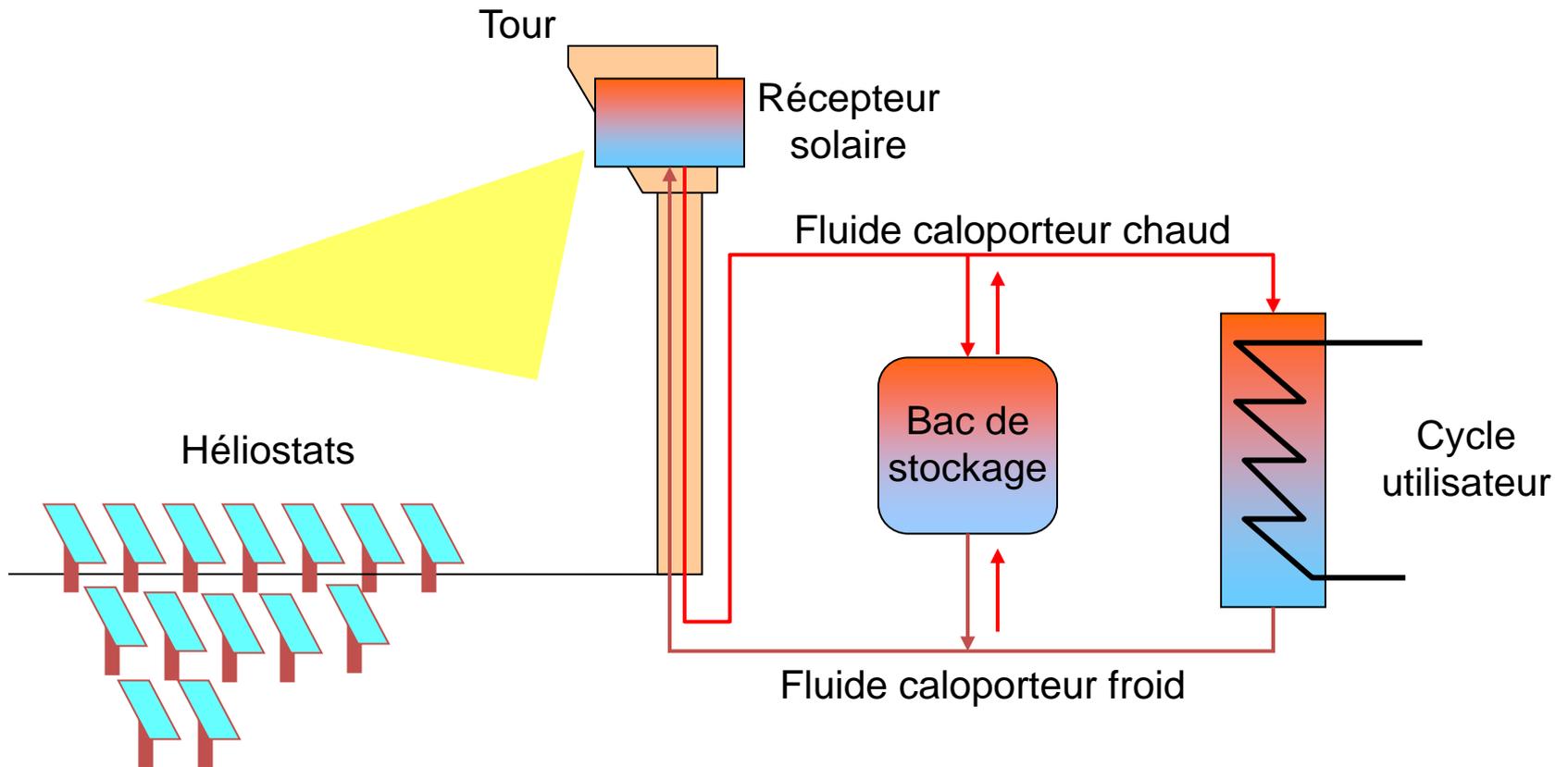
Central Receiver System (CRS)

Sans stockage



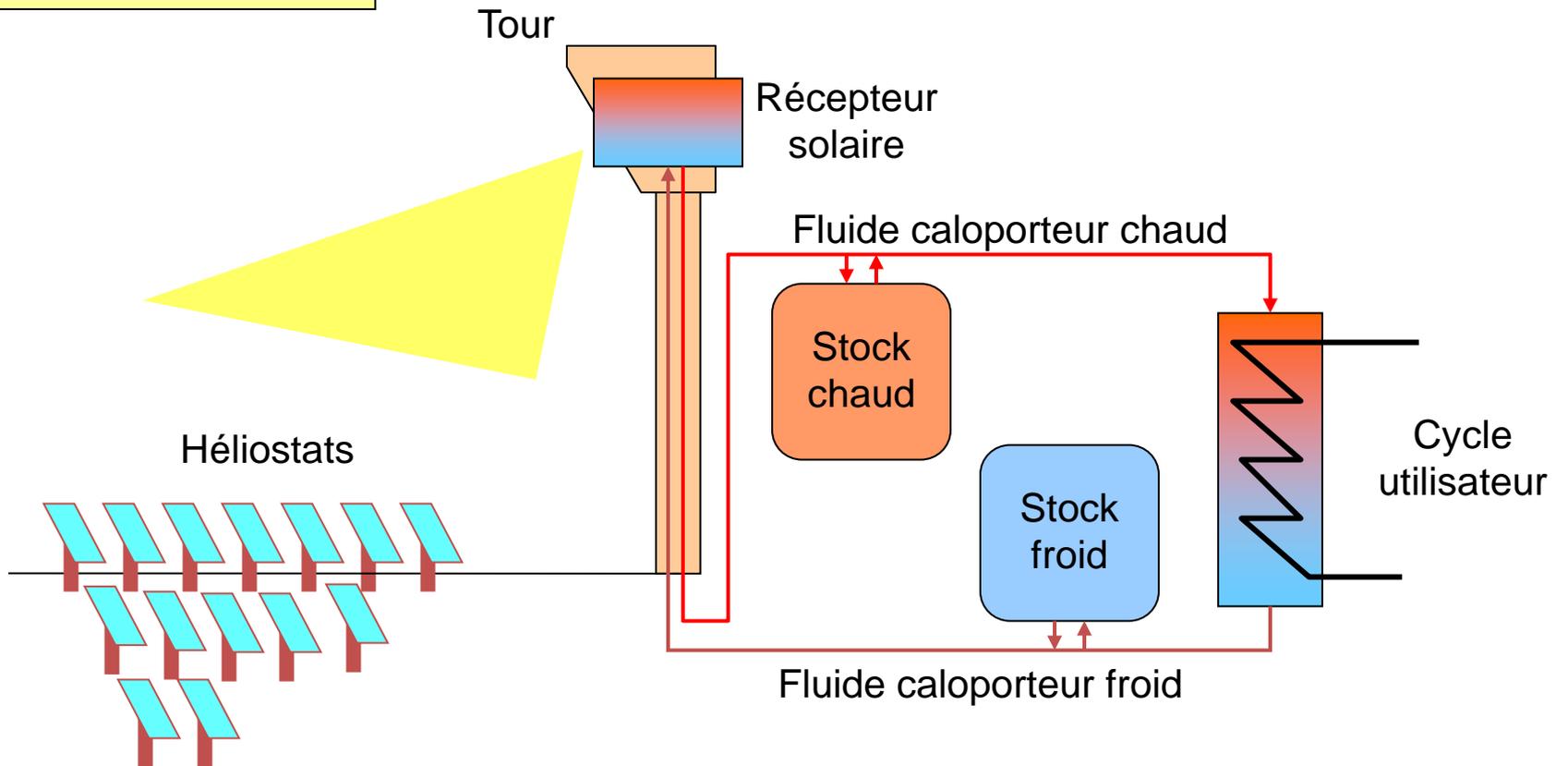
Configurations *Stockage*

Stockage de type
thermocline



Configurations *Stockage*

Stockage avec 2
réservoirs





Configurations

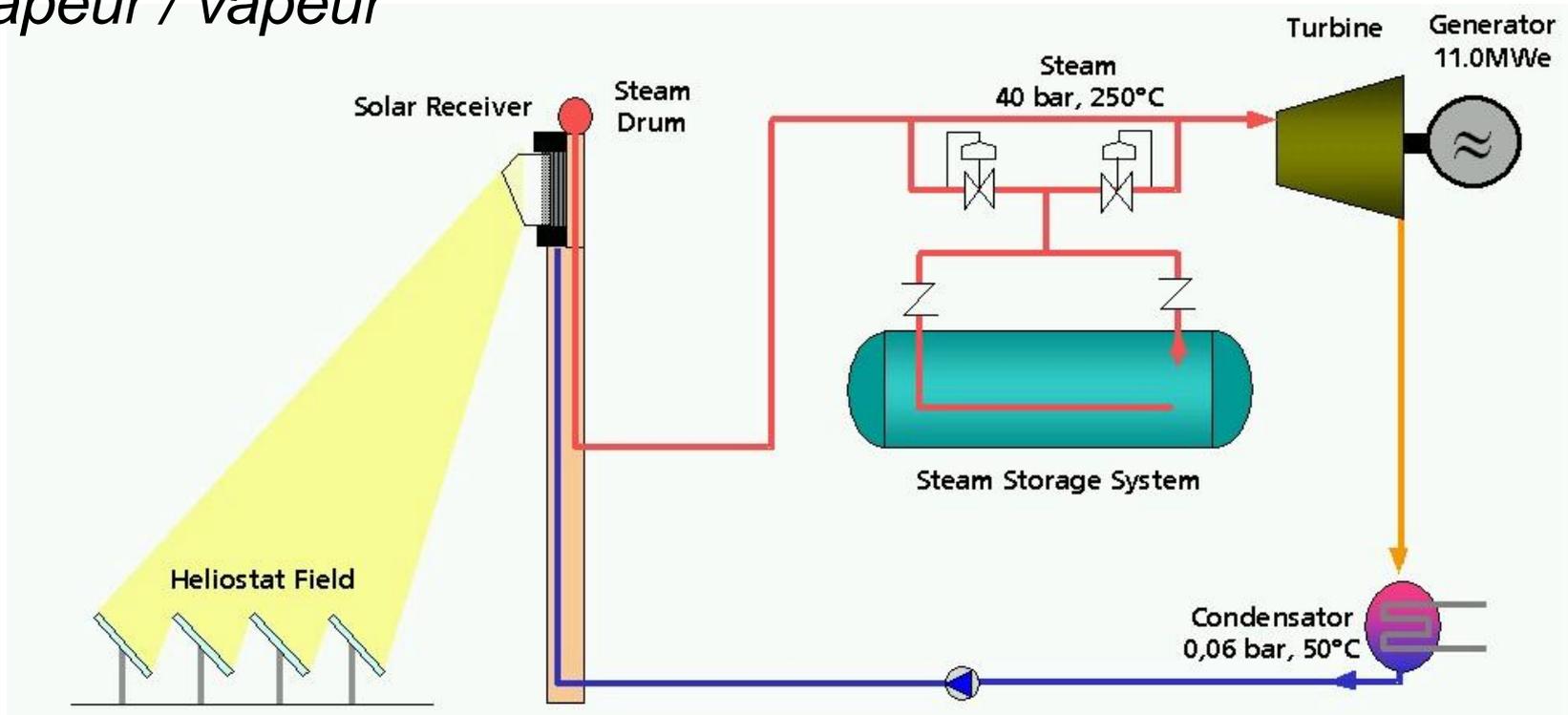
*Fluide caloporteur/
Fluide de travail*

Configuration	Fluide caloporteur	Stockage	Fluide de travail
« PS10 »	Vapeur	Vapeur	Vapeur
« Gemasolar »	Sel fondu	Sel fondu	Vapeur
« Julich » (pilote)	Air atmosphérique	Céramique	Vapeur
« Aora » (microcentrale)	Air sous pression	-----	Air sous pression

Configurations

*Fluide caloporteur/
Fluide de travail*

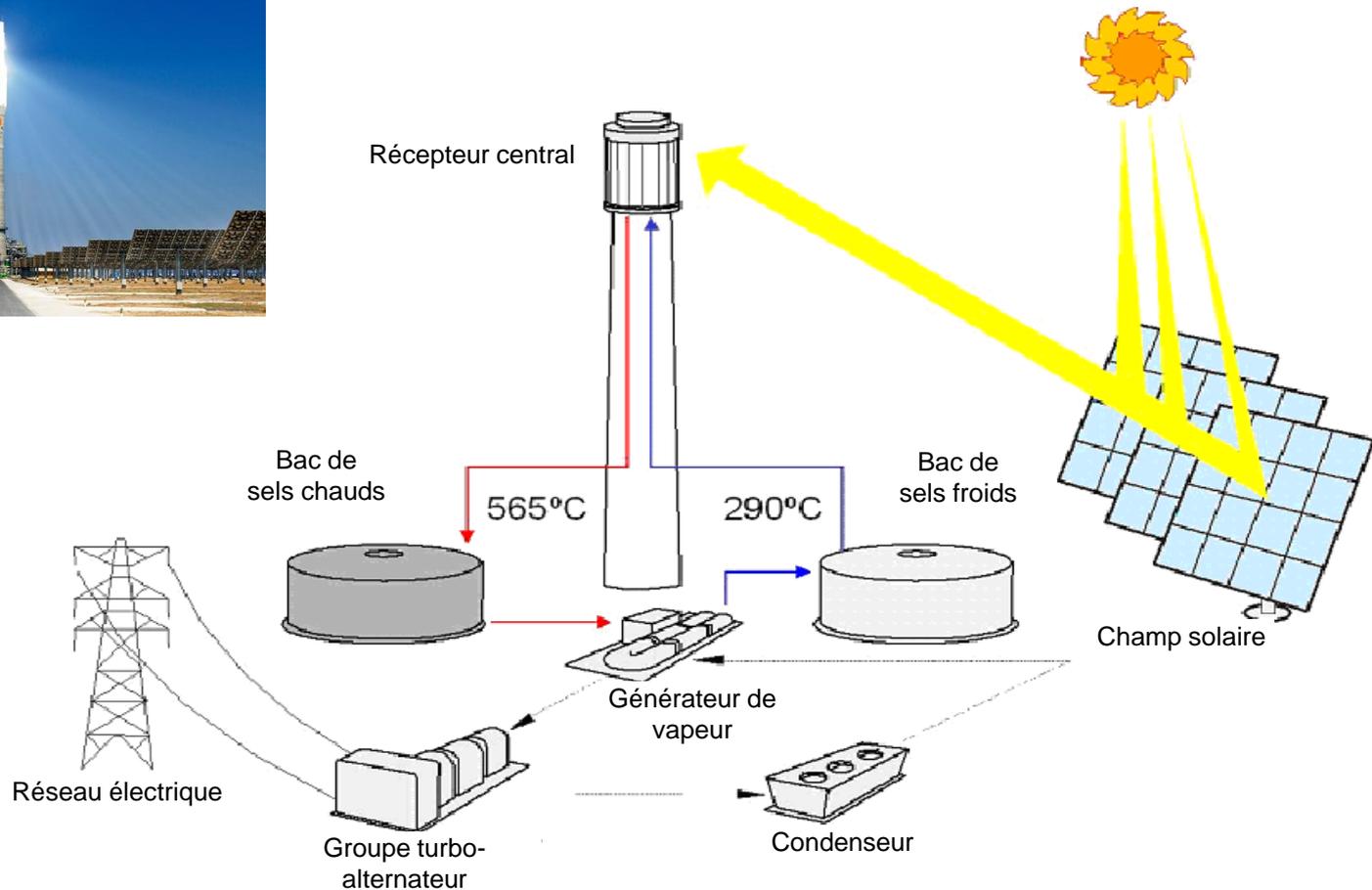
Vapeur / vapeur



Configurations

*Fluide caloporteur/
Fluide de travail*

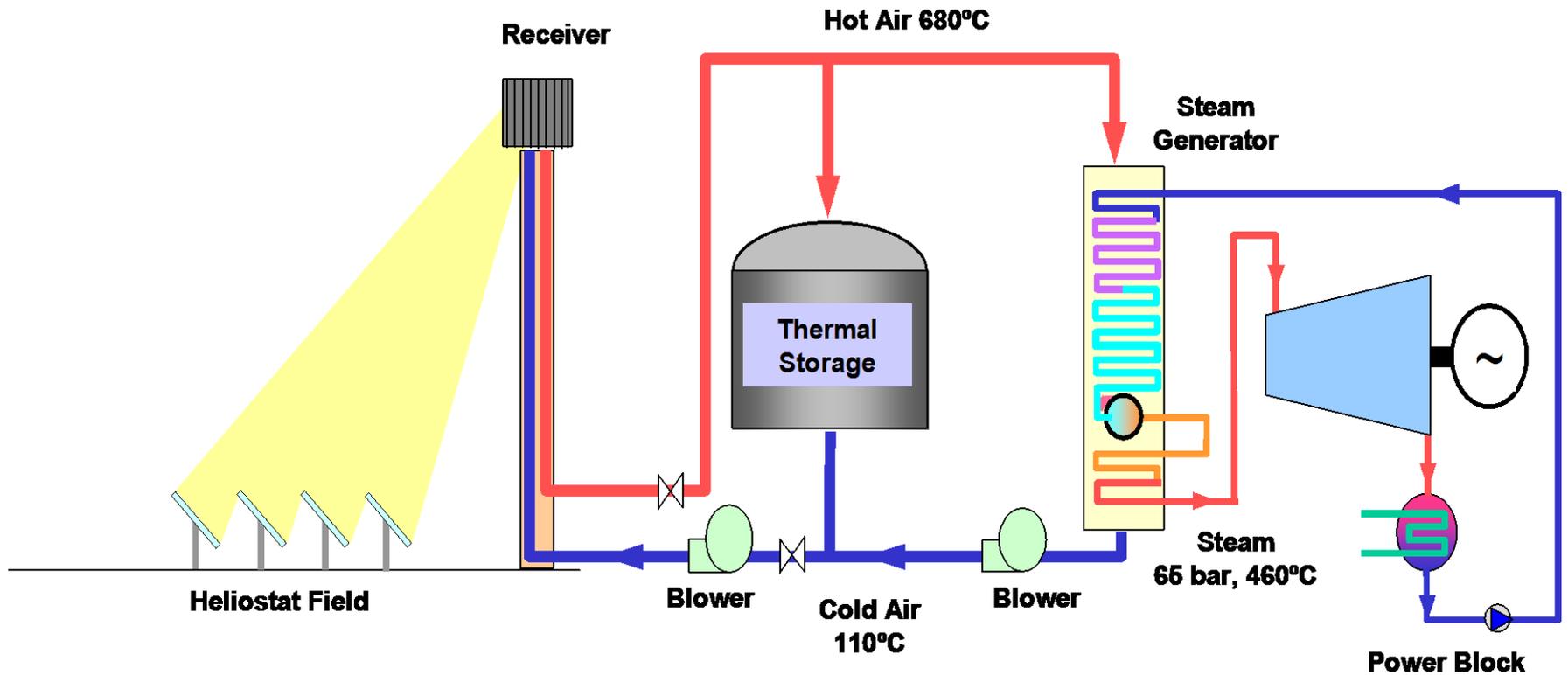
Sel fondu / vapeur



Configurations

*Fluide caloporteur/
Fluide de travail*

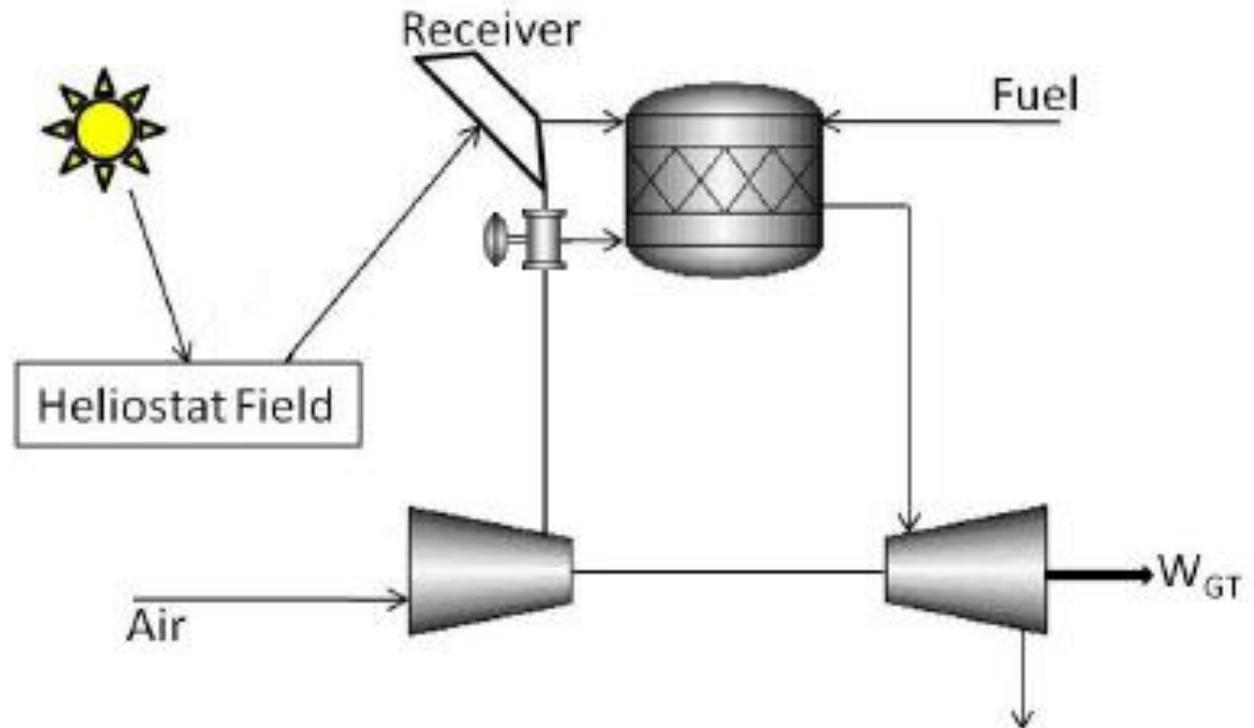
Air P atmosphérique / vapeur



Configurations

*Fluide caloporteur/
Fluide de travail*

Air HP / Air HP





Exemples de centrales Commerciales

Histoire

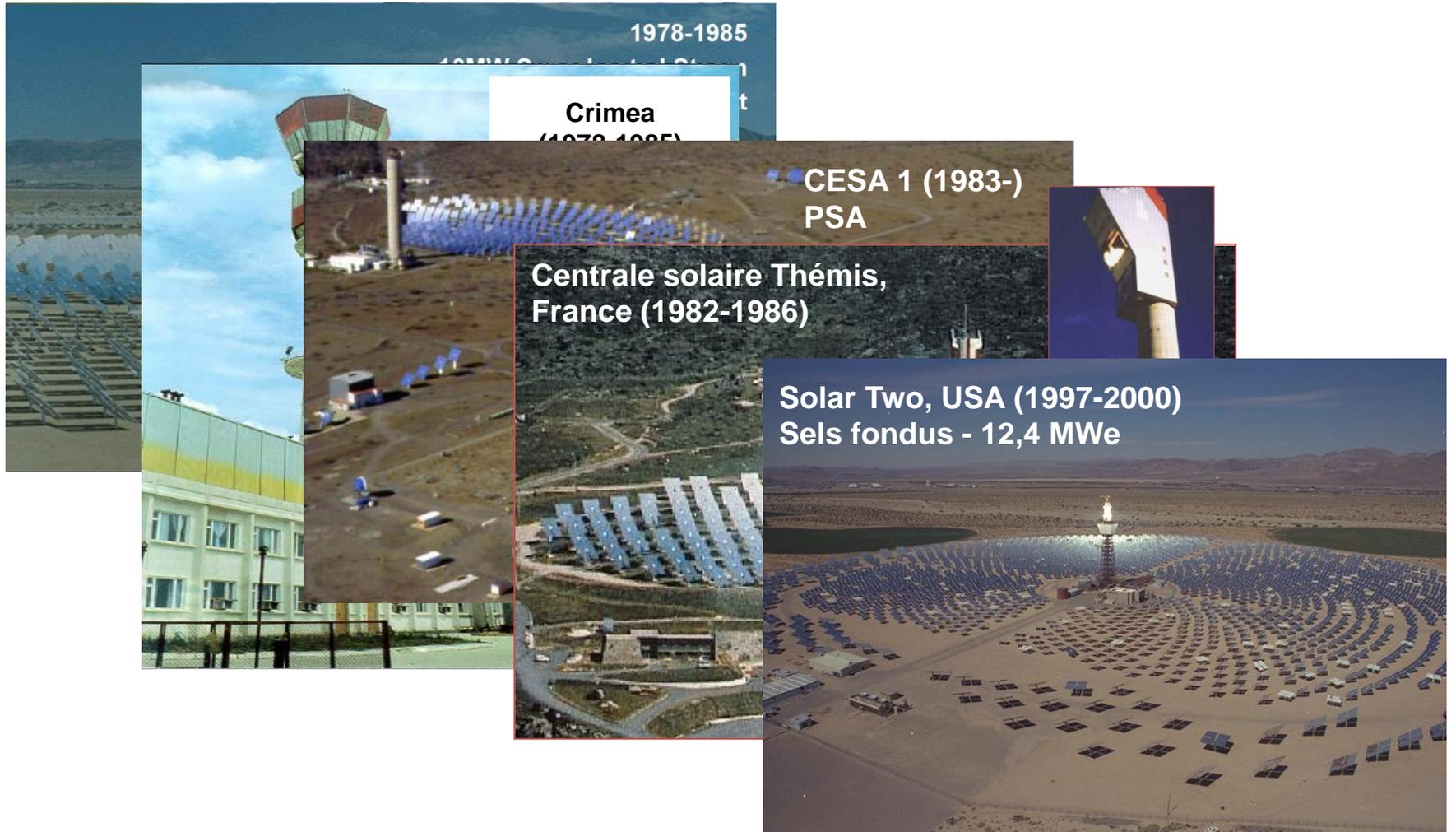
1978-1985

Crimea
(1978-1985)

CESA 1 (1983-)
PSA

Centrale solaire Thémis,
France (1982-1986)

Solar Two, USA (1997-2000)
Sels fondus - 12,4 MWe



Génération directe de vapeur

Vapeur saturée

PS10 (Abengoa)

Séville

DNI: 2000 kWh/m².an

11 MW

Mise en service: 2007

23 400 MWh/an

55 ha

624 héliostats de 120 m²
(75 000 m²)

Hauteur tour 120 m

Vapeur 250°C/45 bars

Stockage vapeur 50 min
(1/2 puissance)



Génération directe de vapeur

Vapeur surchauffée

IVANPAH (BrightSource)

Primm (Californie)

DNI: 2700 kWh/m².an

3x130 MW

1000 emplois (construction)

Mise en service: 01.2014

1 080 000 MWh/an

1 416 ha

173 500 héliostats de 15 m²

(2 600 000 m²)

Hauteur tour 140m

Vapeur: 565°C / 140 bars

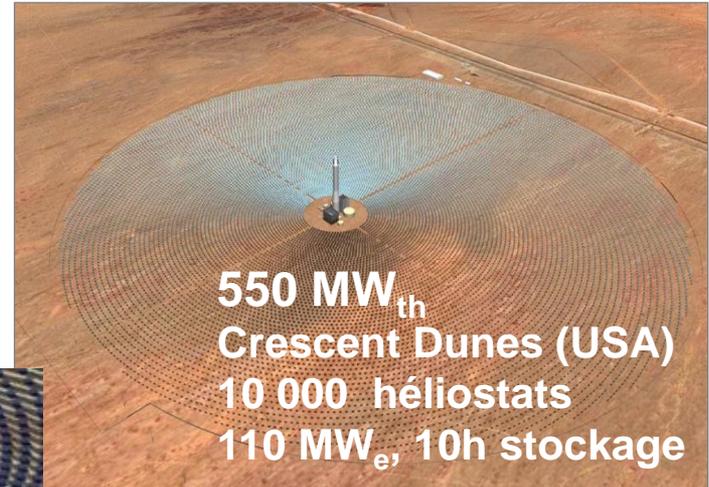
Complément: GN



Sel fondu

Changement d'échelle :
de Thémis à Crescent Dunes

2013



2011



120 MW_{th}
Gemasolar (Espagne)

1996-99



43 MW_{th}
Solar two (USA)

1983-86



10 MW_{th}
200 héliostats

Moteur:
Baisse des coûts

Sel fondu

GEMASOLAR (SENER)

Fuentes de Andalusia (Espagne)

DNI: 2170 kWh/m².an

19,9 MW

Mise en service: 04.2011

110 000 MWh/an

195 ha

2 650 héliostats de 120 m²

(304 750 m²)

Hauteur tour 140 m

Vapeur: 565°C / 140 bars

Stockage 15 h



Sel fondu



CRESCENT DUNES

(Solar Reserve)

Tonopah (Nevada)

DNI: 2685 kWh/m².an

110 MW

600 emplois (construction)

Mise en service: 2015

485 000 MWh/an

647 ha

17 170 héliostats de 62,4 m²

(1 071 361 m²)

Hauteur tour 164 m

Vapeur: 565°C / 140 bars

Stockage 10 h

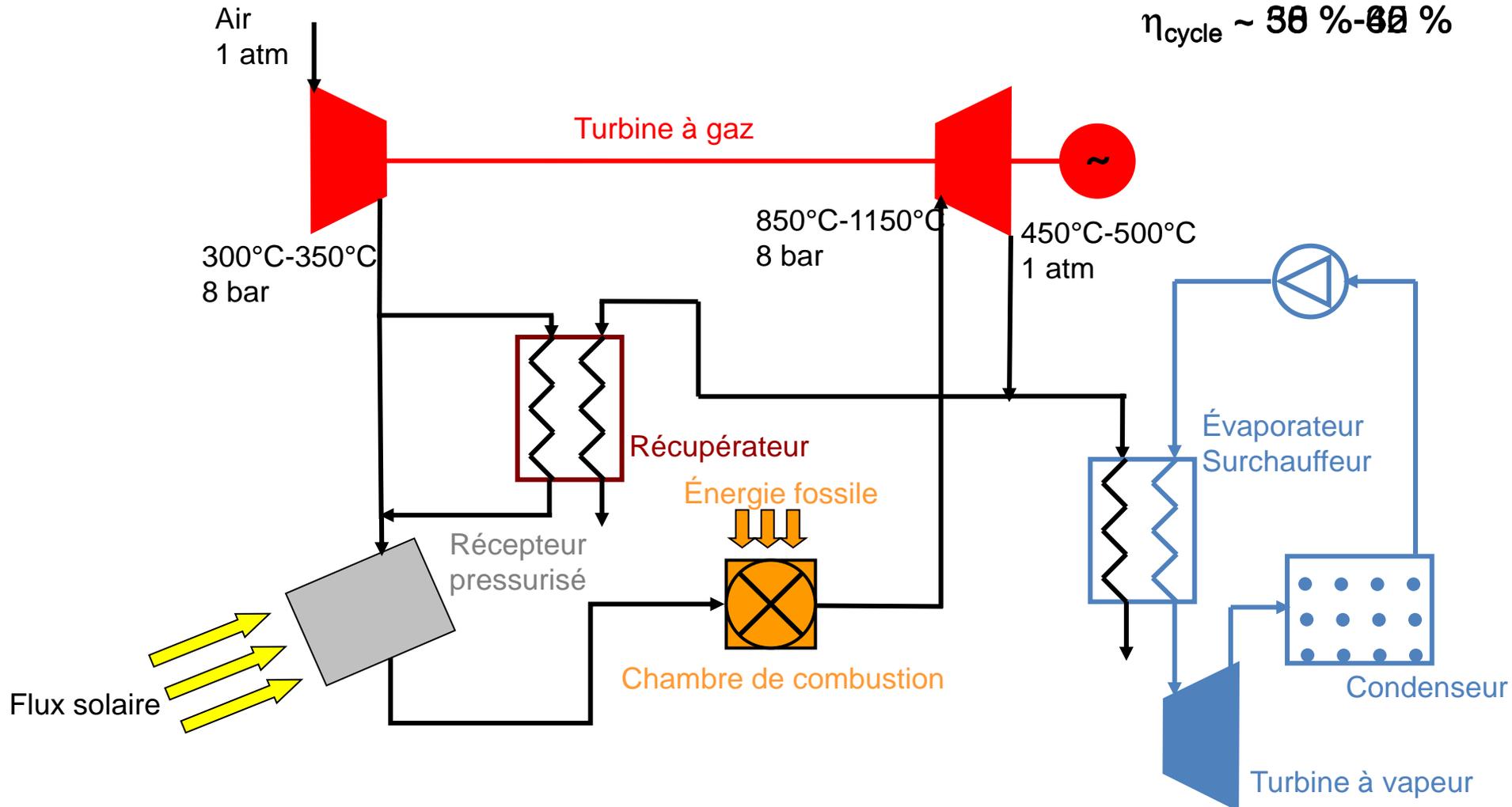


Options pour le futur

Cycles Brayton avec récupération et cycles combinés

Cycle à récupération

$$\eta_{\text{cycle}} \sim 38\% - 40\%$$



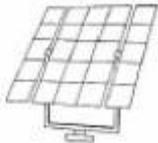


Composants et sous-ensembles

Héliostats / champ solaire



Odeillo (Saint Gobain)
1967/45 m²



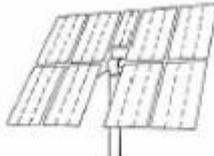
CRTF (MMC)
1977/37 m²



Solar One (MMC)
1981/40 m²



Eurelios (MBB)
1980/23 m²



Themis (Cethel)
1982/54 m²



Cesa-1 (Casa)
1982/40 m²



GAST-20 (Asinel)
1984/52 m²



2nd Generation (MDAC)
1981/57 m²



Arco
1990/95 m²



ATS
1990/148 m²



Arco
1992/150 m²



Stressed membrane (SKI, SAI)
1988/50 m², 1992/150 m²

40 ans de développement depuis 1967

- Miroirs
 - Verre + couche Ag
 - Film métallique (Al)
- Motorisation 2 axes
- Tenue au vent délicate, rigidité (déformations)
- Commande informatisée, précise (1 mrad), fiable
- Nettoyage

Les héliostats sont
(faiblement)
concentrateurs

Surface > Ouverture
récepteur

Héliostats

Système mécanique de suivi du soleil

Structure de support

Surface réfléchissante concentratrice constituée de facettes



Héliostat CETHEL de 54 m² à THEMIS

Héliostats



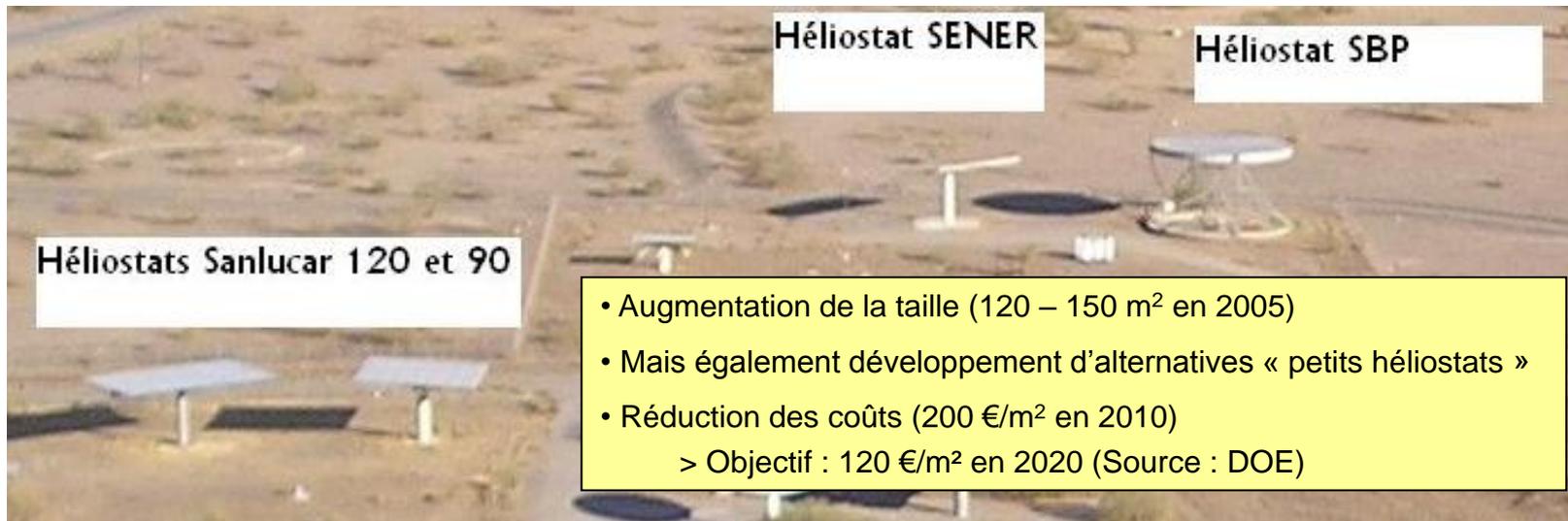
Héliostat test à la PSA



Héliostat Sanlucar de PS10 (120 m²)



Héliostat SENER 62 m²



Héliostats Sanlucar 120 et 90

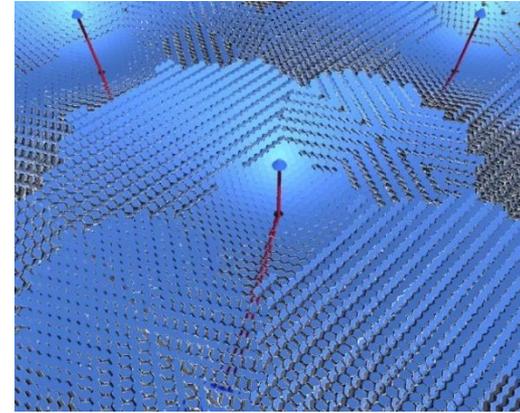
Héliostat SENER

Héliostat SBP

- Augmentation de la taille (120 – 150 m² en 2005)
- Mais également développement d'alternatives « petits héliostats »
- Réduction des coûts (200 €/m² en 2010)
 - > Objectif : 120 €/m² en 2020 (Source : DOE)

Héliostats

Héliostats couplés
mécaniquement
(Allemagne, Australie)



Champs
multi-tours
avec petits
héliostats
(Australie,
Japon)

eSolar

- Héliostats de petite taille
- Champs multi-tours
- Optimum économique $S \approx 1,1 \text{ m}^2$
- Héliostats préfabriqués en usine
- Installation sur site très rapide
- Méthode d'étalonnage automatisée



Héliostats

Le système de commande du champ

2 types de systèmes

- Centralisé : un contrôleur global envoie la consigne de position à chaque héliostat
- Local : la direction de tir est calculée par chaque héliostat
Seules la commande marche-arrêt, la sécurité et les stratégies de pointage sont gérées par un contrôleur central

Matériel de communication

- Filaire : par câbles ou fibres optiques
- Radio / WiFi : par modems placés sur chaque héliostat

Héliostats autonomes :

- Champ PCHA (*) à Almeria, PSA
 - 92 héliostats de 40 m²
 - Contrôle en local par radio
 - Alimentation par panneaux PV (55Wc – 12V) et batteries
- Champ Pégase à Thémis → 107 héliostats de 54 m² / Contrôle radio

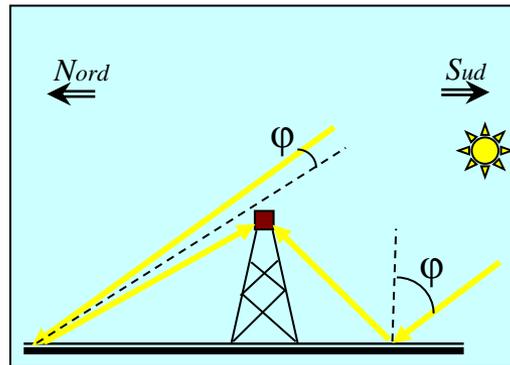
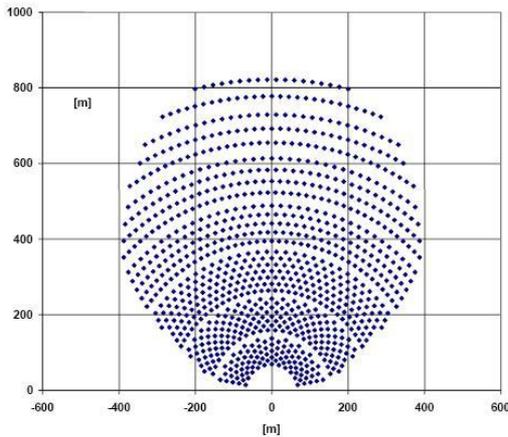


(*) PCHA : Primer Campo de Heliostatos Autonomos

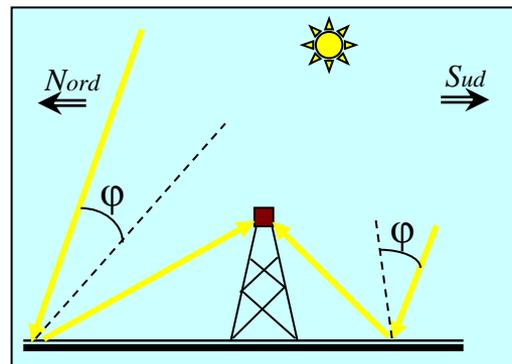
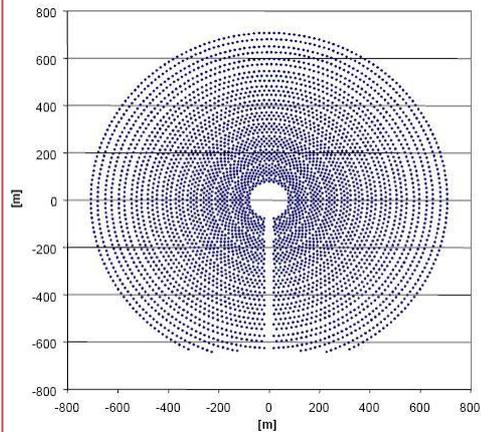
champ solaire

CONFIGURATION

Champ Nord (latitude $>35^\circ$)

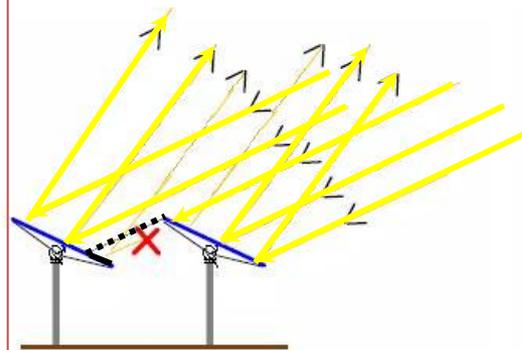
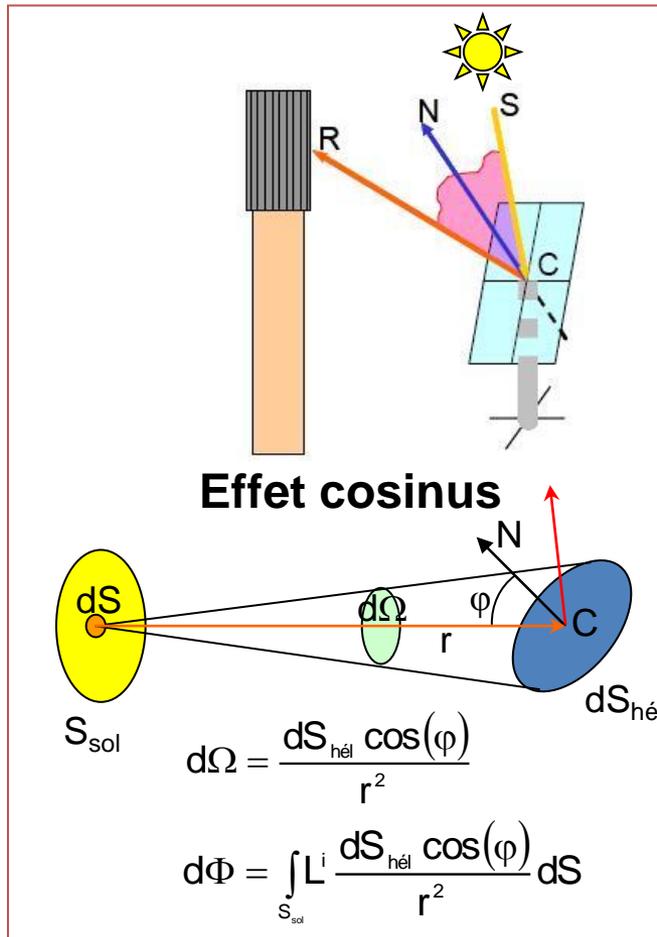


Champ circulaire (latitude $<35^\circ$)

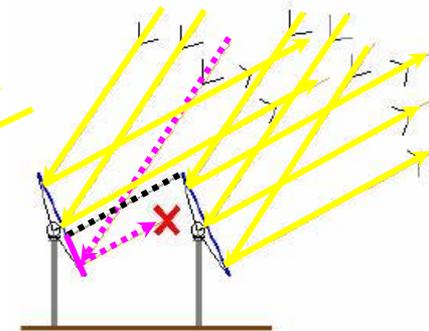


champ solaire

CONTRAINTES D'IMPLANTATION



Ombres



Blocages

Espacement nécessaire entre les héliostats (disposition optimale)

En pratique: la surface totale occupée au sol par la centrale représente **4 fois** la surface totale de miroirs

> Avantage aux concepts basés sur des héliostats de petite surface

champ solaire

AUTRES PERTES OPTIQUES

Réflexion: 90-95%

Absorption atmosphérique sur le trajet champ-récepteur : 1 à 5%

- Dépend de la taille du champ (distance moyenne)
- Dépend des conditions atmosphériques (humidité)

• Erreurs des héliostats

- Erreurs de structure des héliostats (focale et orientation des facettes)
- Erreurs de réglage des héliostats (montage des facettes)
- Imperfections de la surface réfléchissante des héliostats
- Erreurs de pointage

• Débordement à l'entrée du récepteur

- Distribution de flux sur le récepteur





champ solaire

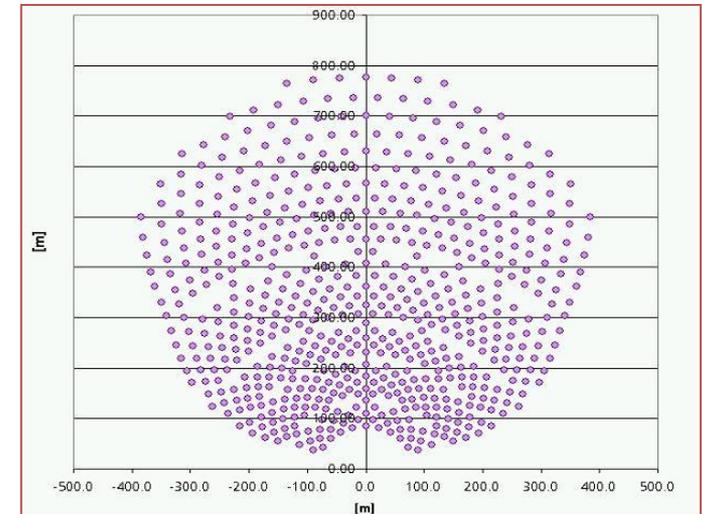
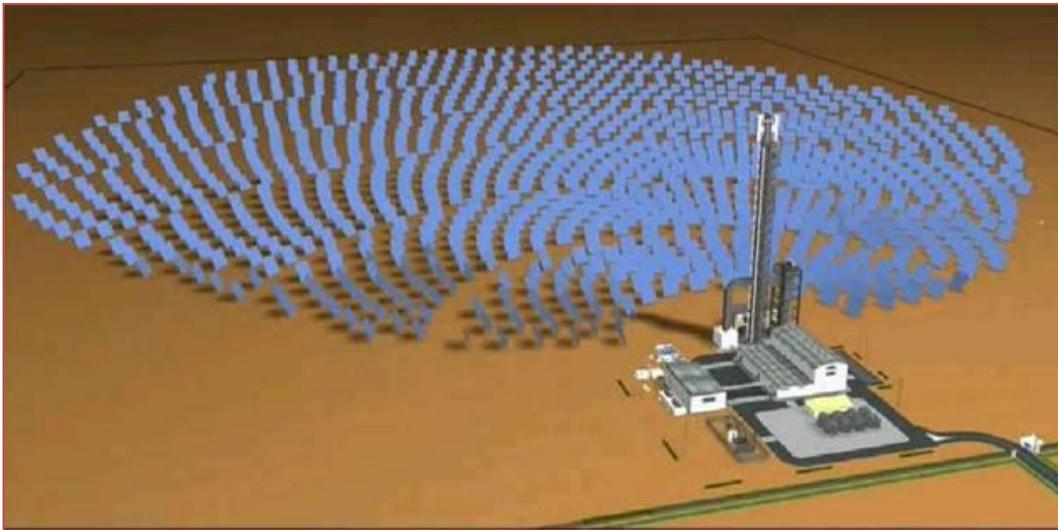
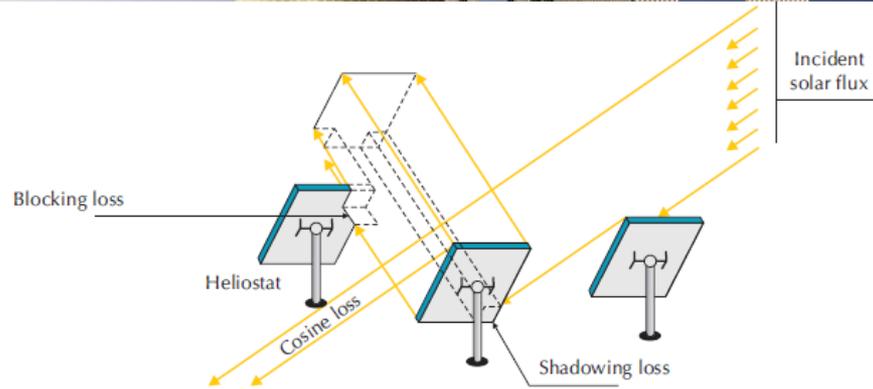
PERFORMANCES

Famille	1. « Optimisation »	2. « Analyse des Performances »
Objectif	Optimisation du système global	Analyse fine du sous-système optique
Exemples de Codes	WINDELSOL , HFLCAL	MIRVAL , SOLTRACE , TONATIUH , RayTRACE3D , SOLFAST-4D...
Méthode	Convolution simplifiée (optique des cônes)	Lancer de rayons (Monte-Carlo) ou apparenté
Temps de Calcul	Quelques secondes pour tout un champ	Quelques secondes pour un héliostat
Précision	Augmente avec la taille du champ	Précis même pour un seul héliostat
Modèle de récepteur et de cycle de conversion	oui	non
Calculs économiques	oui	non



champ solaire

PERFORMANCES



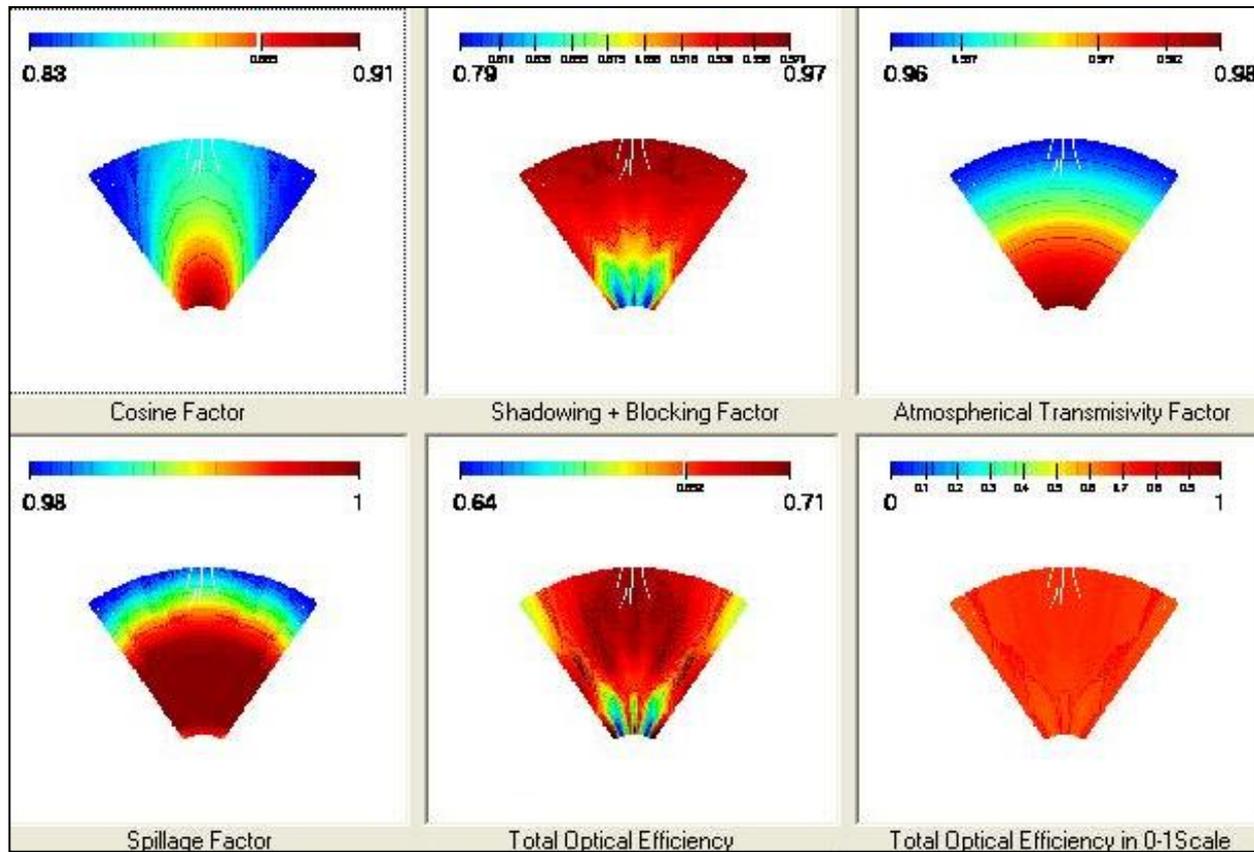
Optimisation du champ solaire
Efficacité maximum du champ ~75%

champ solaire

PERFORMANCES

Simulation de THEMIS avec WinDELSOL

- Champ plat défini par des densités d'héliostats
- Caractéristiques réelles des héliostats et de la tour
- Établissement de **matrices d'efficacité** du champ solaire



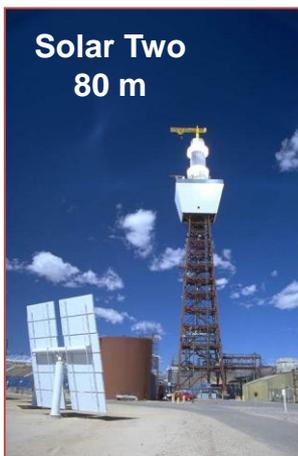
Tour

Contraintes

- Coût
- Métallique ou en béton
- Résistance au vent
- Ombre minimum sur le champ solaire
- Hauteur optimisée selon la latitude et dimension du champ solaire

Nouveaux concepts :

- Champs multi-tours
- Préfabrication (technologie industrie éolienne)



Tour



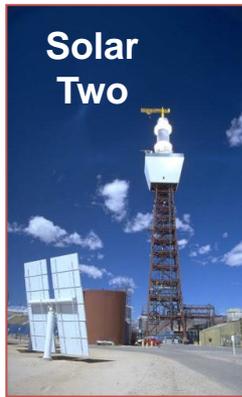
250 m



140 m



80 m



Hauteur tour

43 MWth

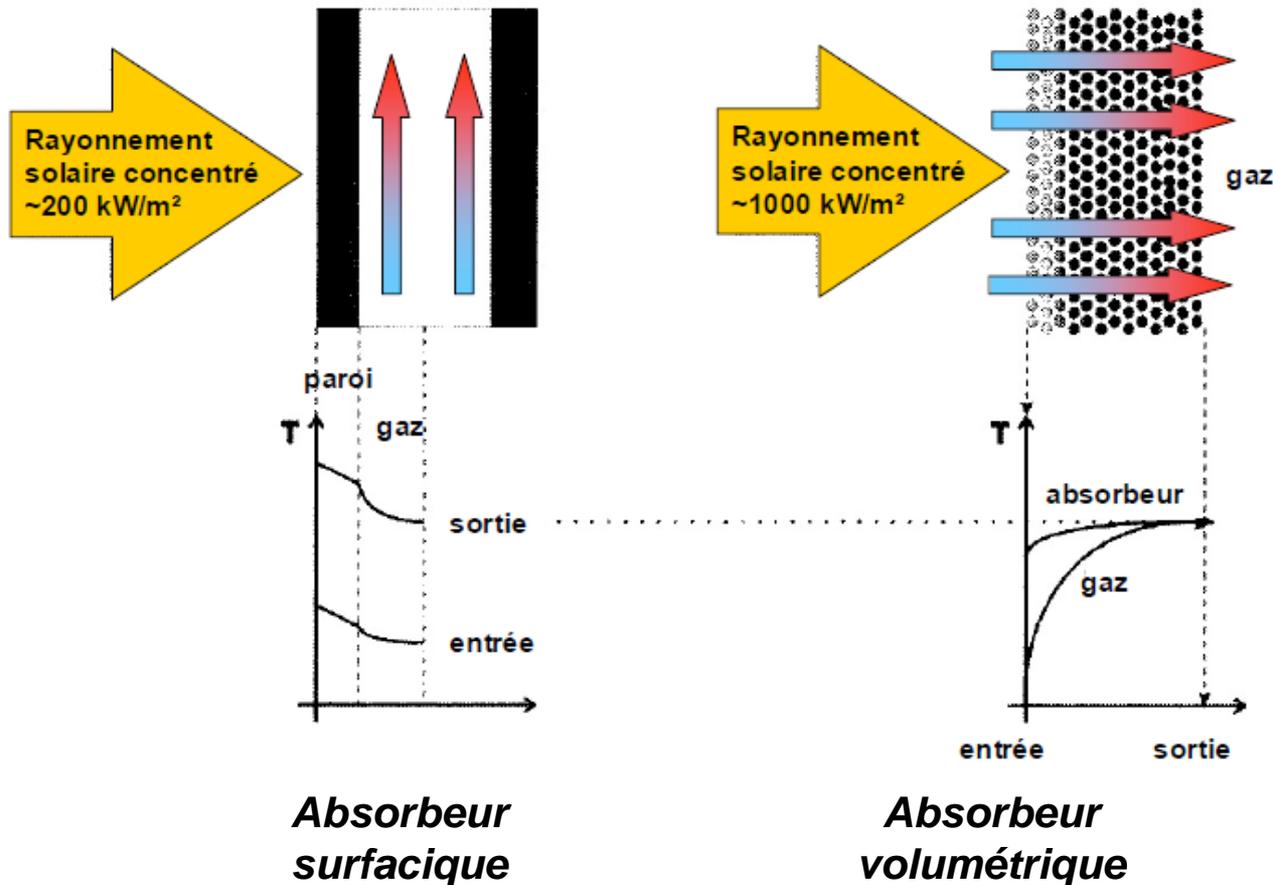
120 MWth

660 MWth

Puissance récepteur

Récepteur solaire

Les 2 familles d'absorbeur solaire pour récepteurs



Récepteur solaire

Cylindrique
(Champ circulaire)



Ivanpah

Cavité
(Champ nord-sud)



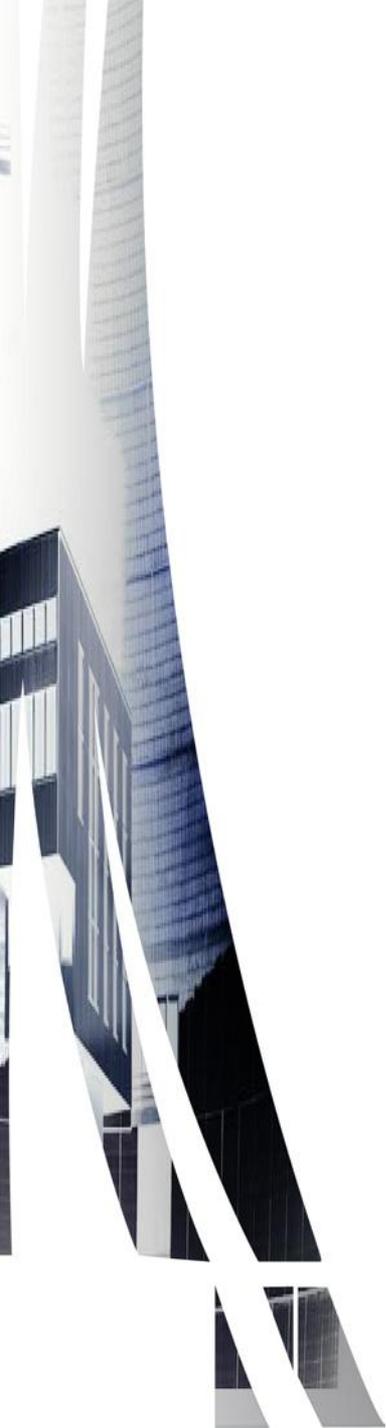
Themis



Crescent Dunes



PS10



Coûts

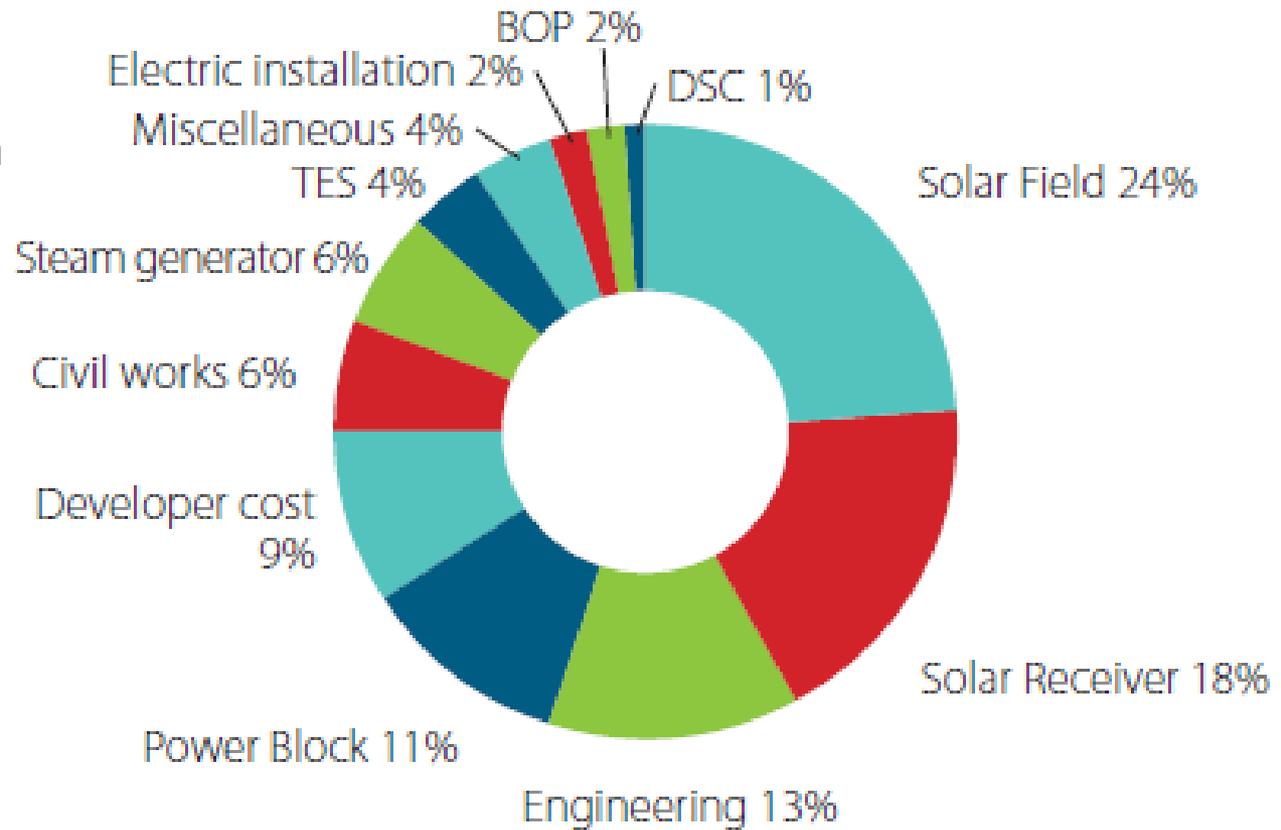
Investissement

110 MW

Sel fondu

DNI:

2400 kWh/m².an

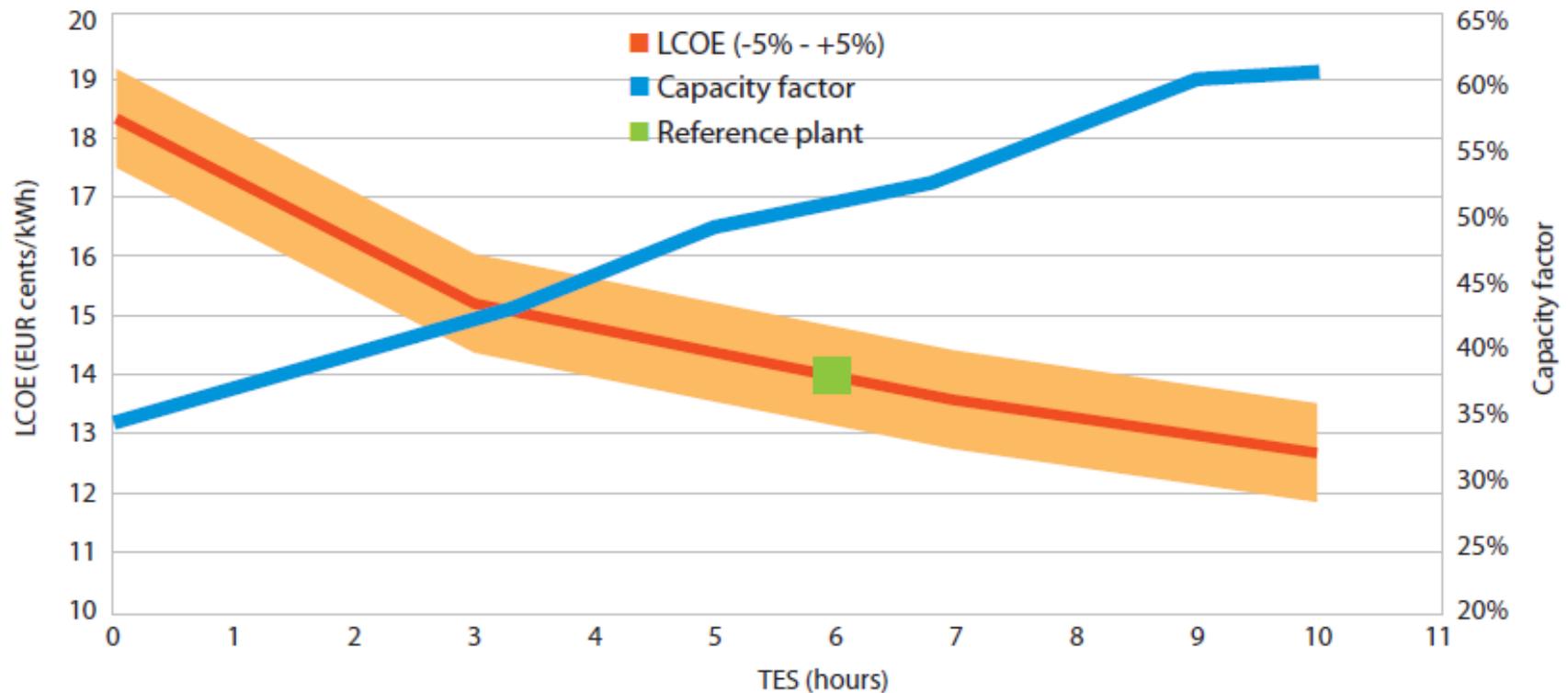


Coût de l'électricité

110 MW

Sel fondu

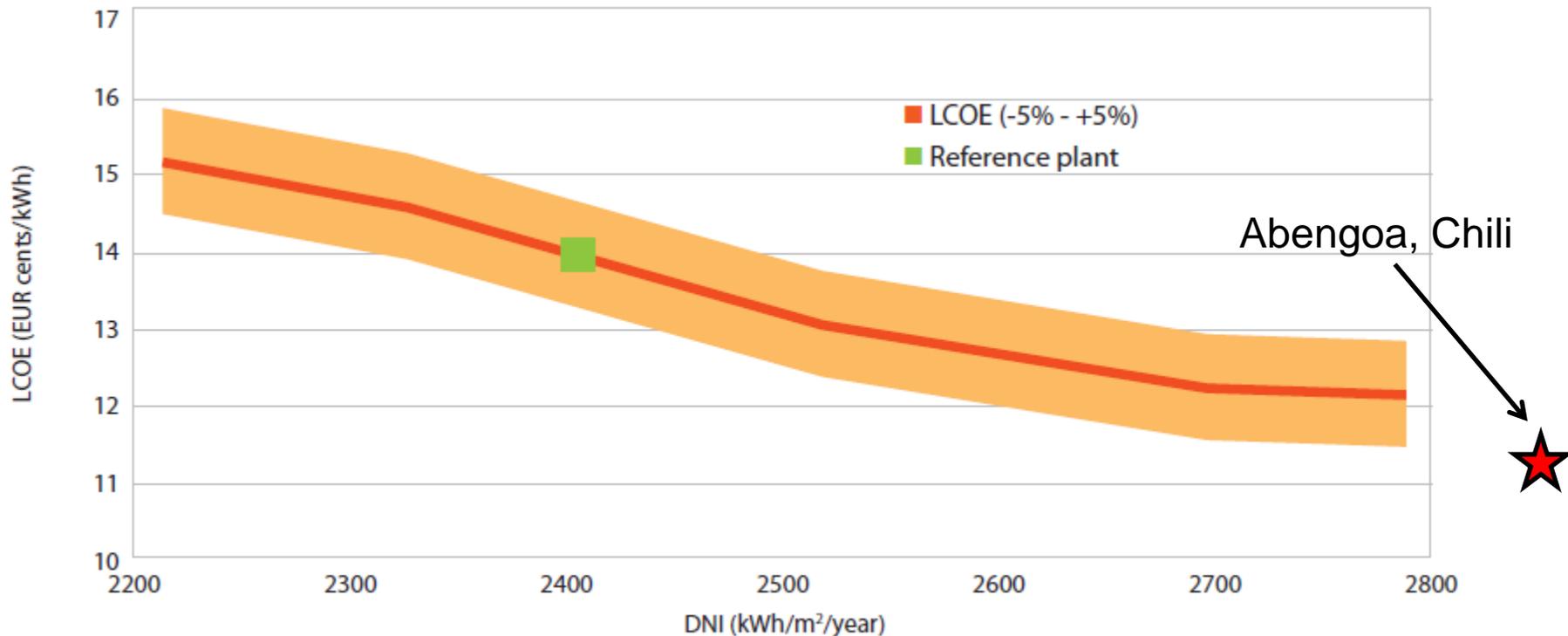
DNI: 2400 kWh/m².an



Source: CSP Today, Solar Tower report 2013

Coût de l'électricité

110 MW
Sel fondu
6h stockage



Source: CSP Today, Solar Tower report 2013



Conclusion / Perspectives

- Les centrales à tour atteignent le niveau de maturité industrielle permettant leur déploiement commercial
- L'intégration d'un stockage thermique peut se faire de façon efficace
- Les options de développement pour le futur sont nombreuses et encore très ouvertes (grand potentiel pour la R&D)

Merci de votre attention

