

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



Sommaire

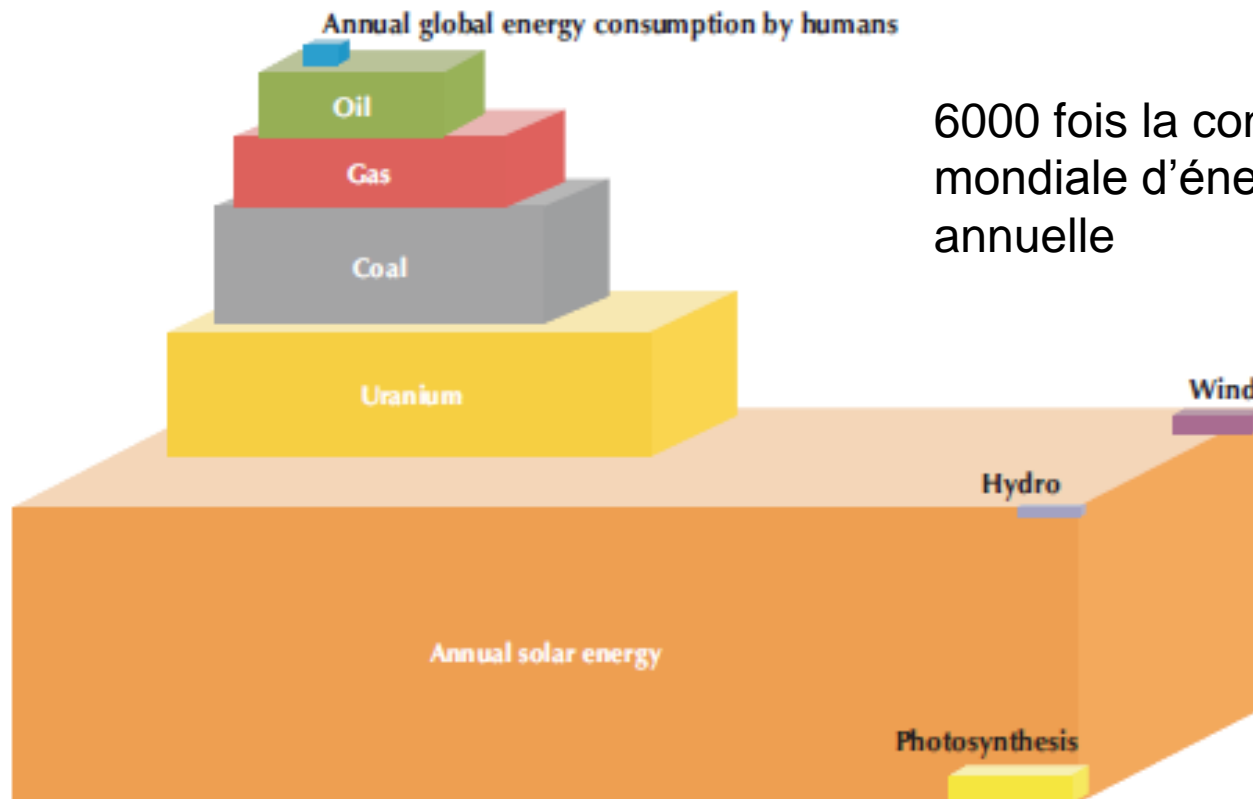
- Potentiel de l'énergie solaire
- Les voies de valorisation du solaire à concentration
- Les sous-systèmes composant une centrale solaire
 - Les technologies de concentration
 - Les récepteurs solaires
 - Le stockage
 - La turbine
- Les centrales solaires
- Coûts
- Défis

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

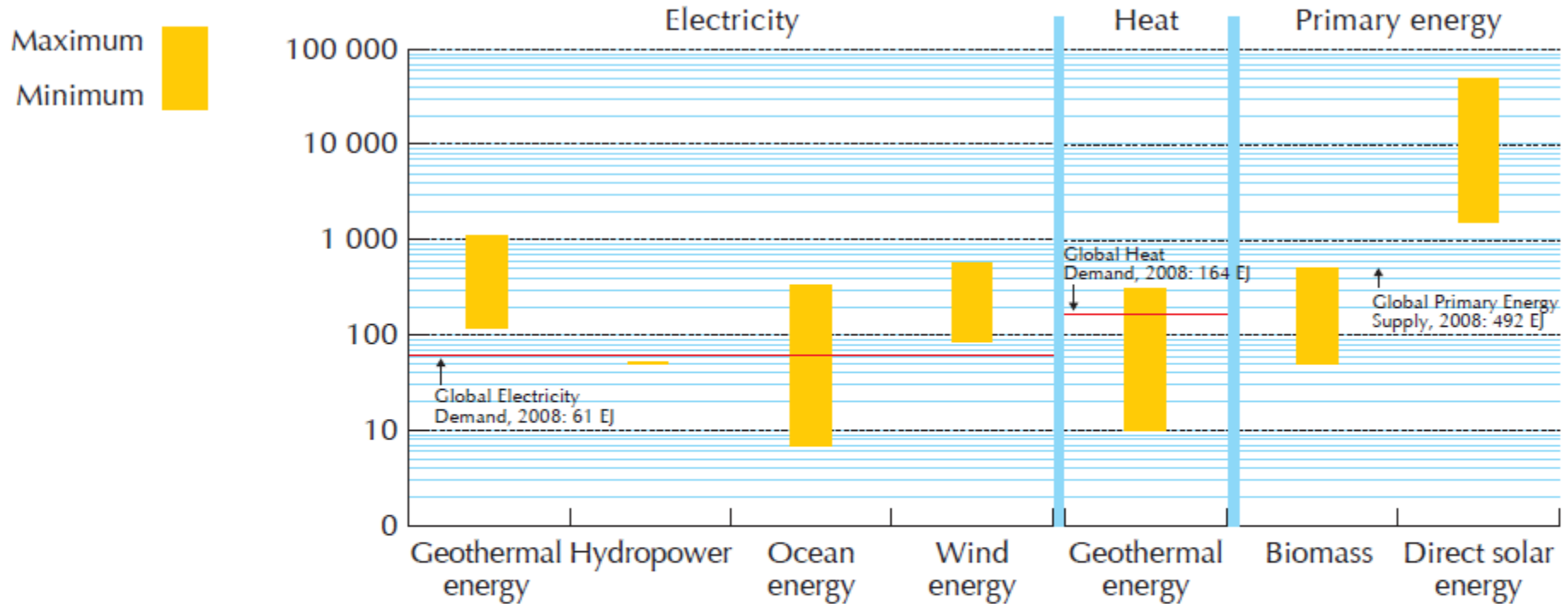


6000 fois la consommation mondiale d'énergie annuelle

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.

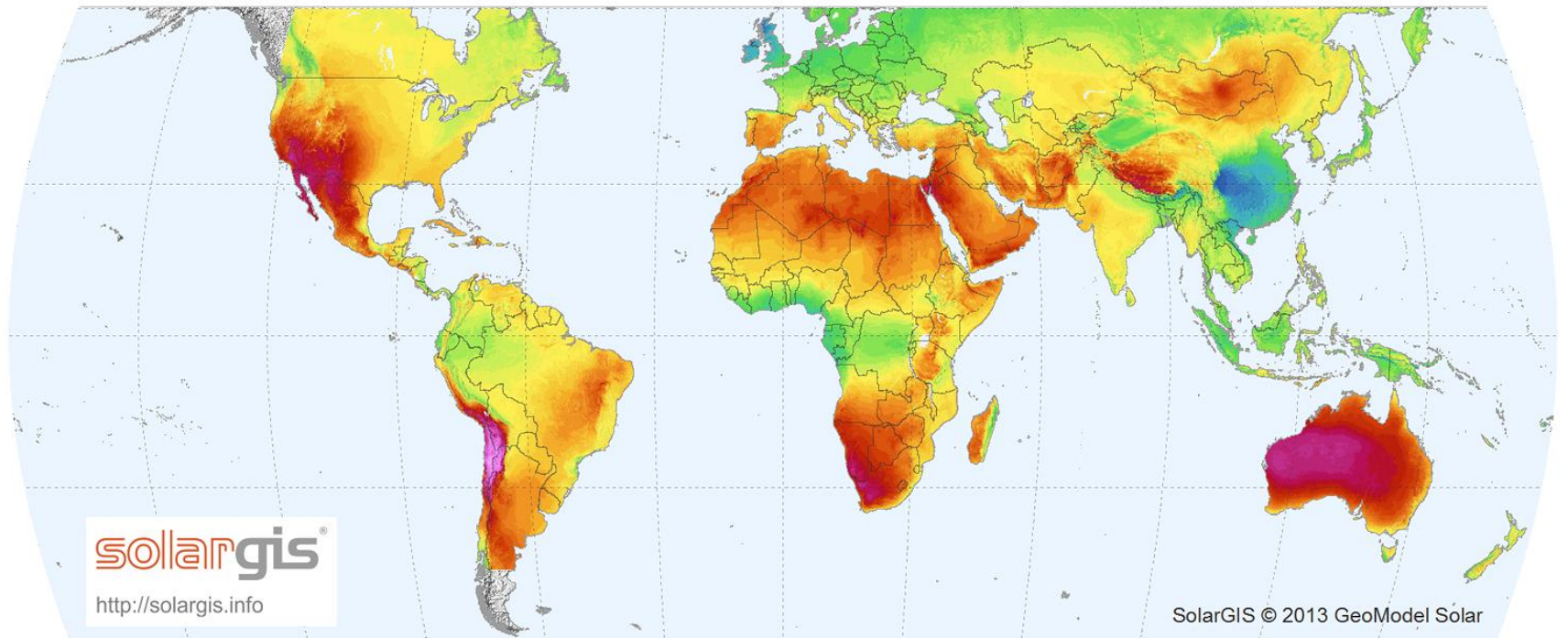
Source : IEA « Solar energy perspectives » 2011



Potentiel de l'énergie solaire

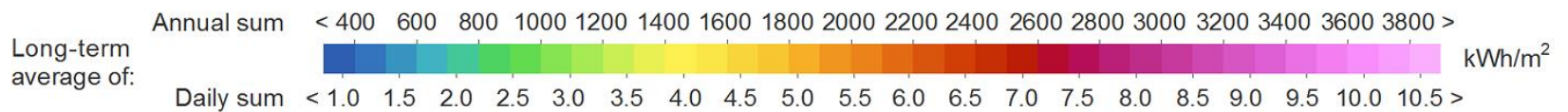
WORLD MAP OF DIRECT NORMAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR

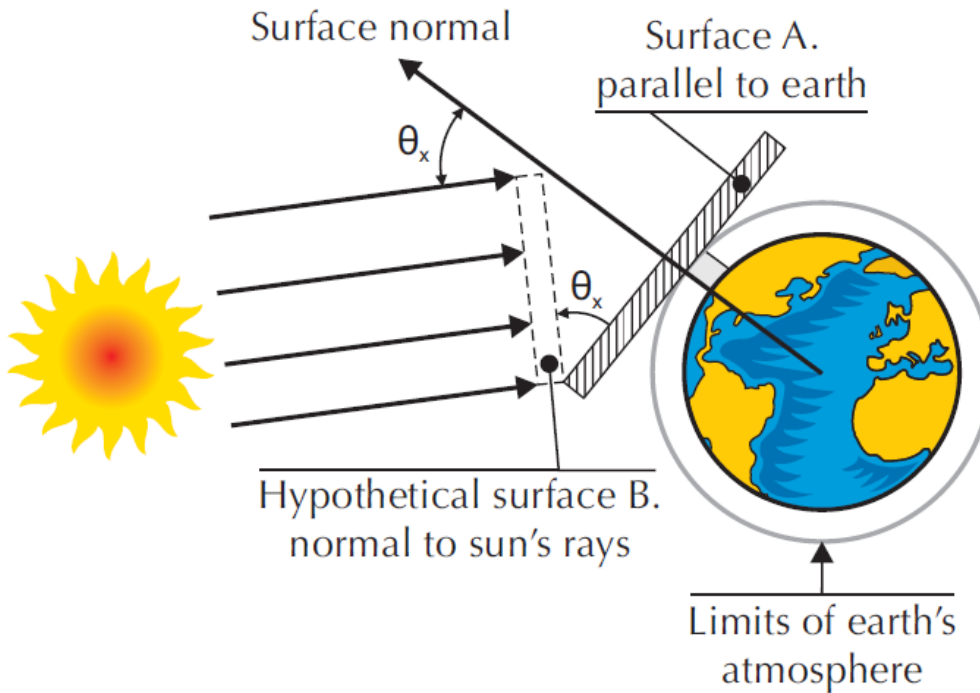


solarGIS
<http://solargis.info>

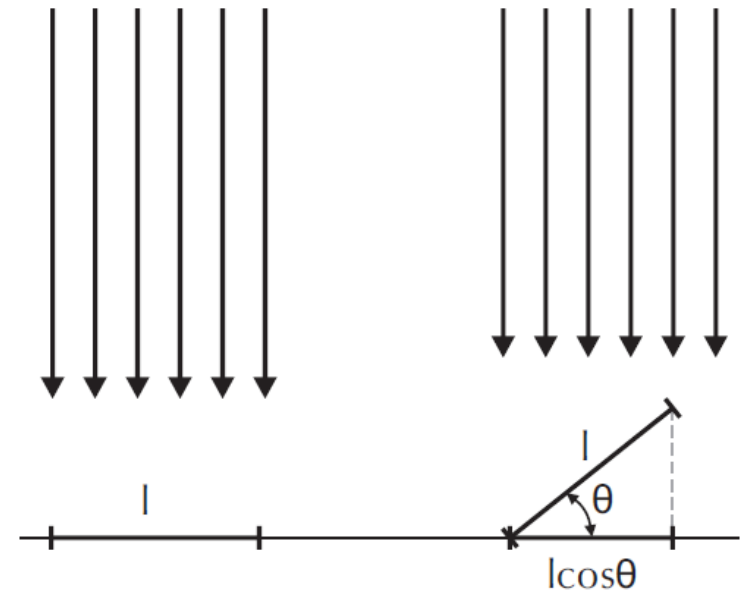
SolarGIS © 2013 GeoModel Solar



Potentiel de l'énergie solaire



Effet cosinus

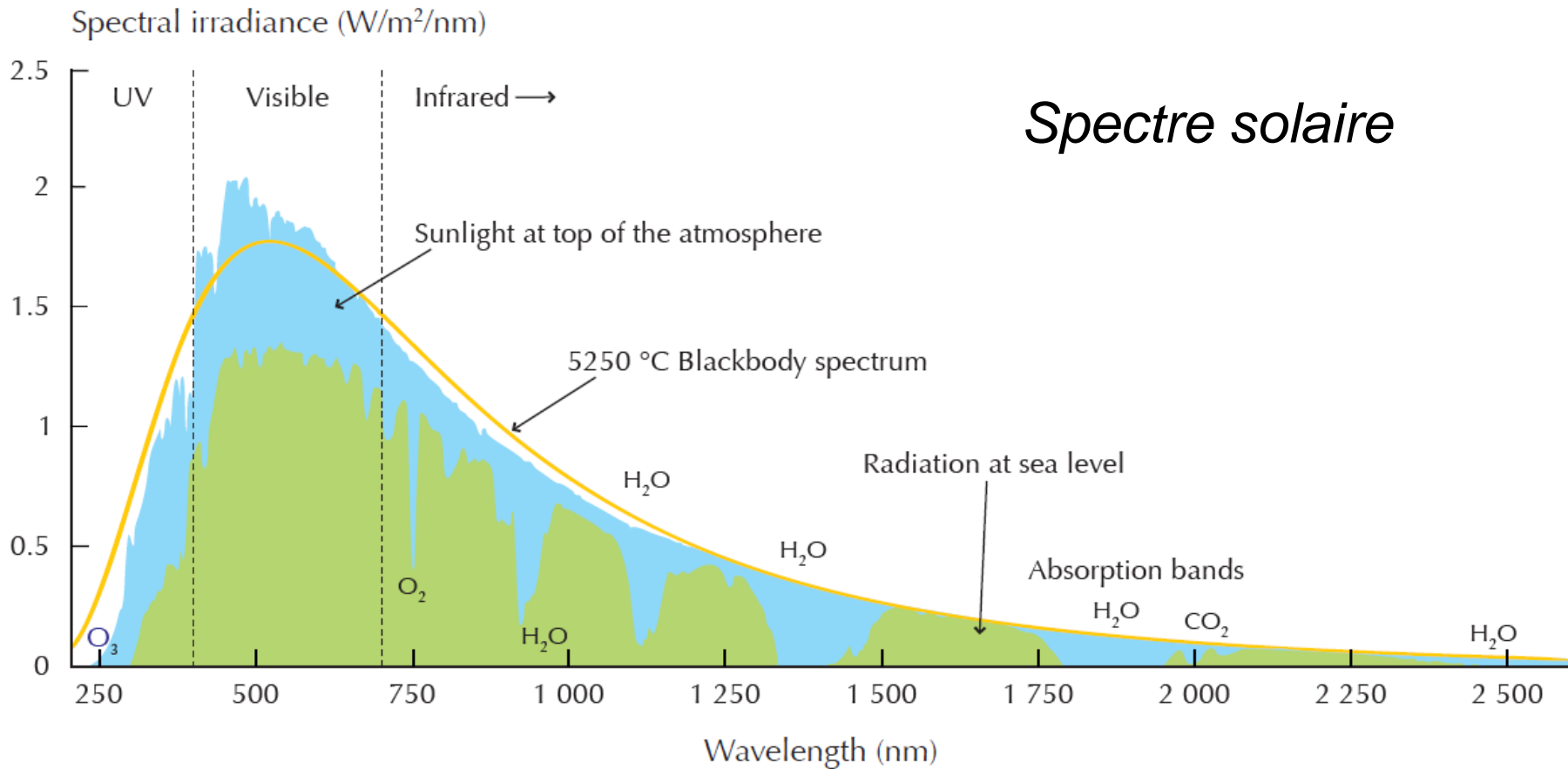


Note: As a plate exposed to the sun tilts, the energy it receives varies according to the cosine of the tilt angle.

Source: Stine and Geyer, 2011 (left).



Potentiel de l'énergie solaire

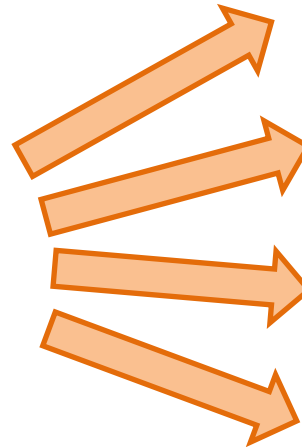
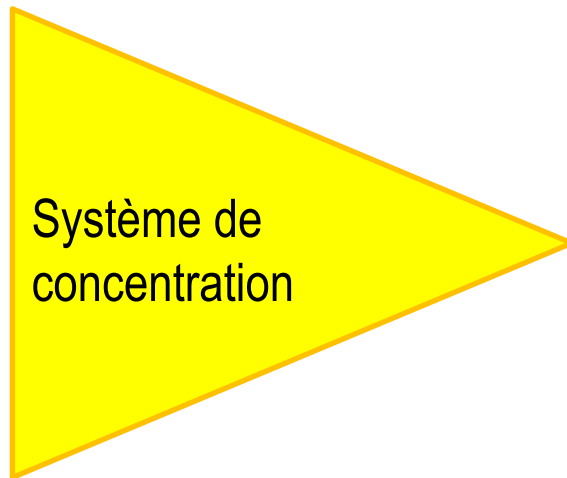




Les voies de valorisation du solaire à concentration



De la source aux besoins



Electricité (photovoltaïque à concentration)

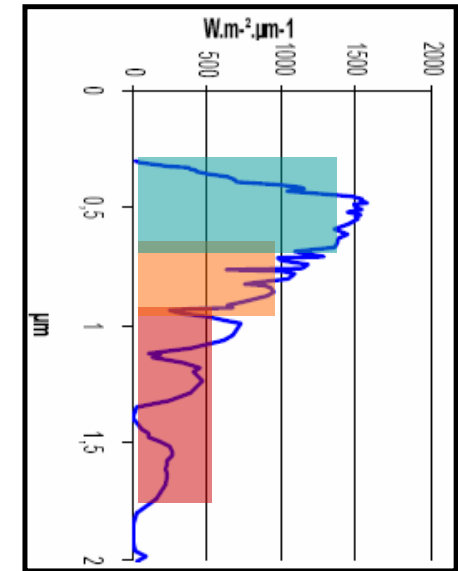
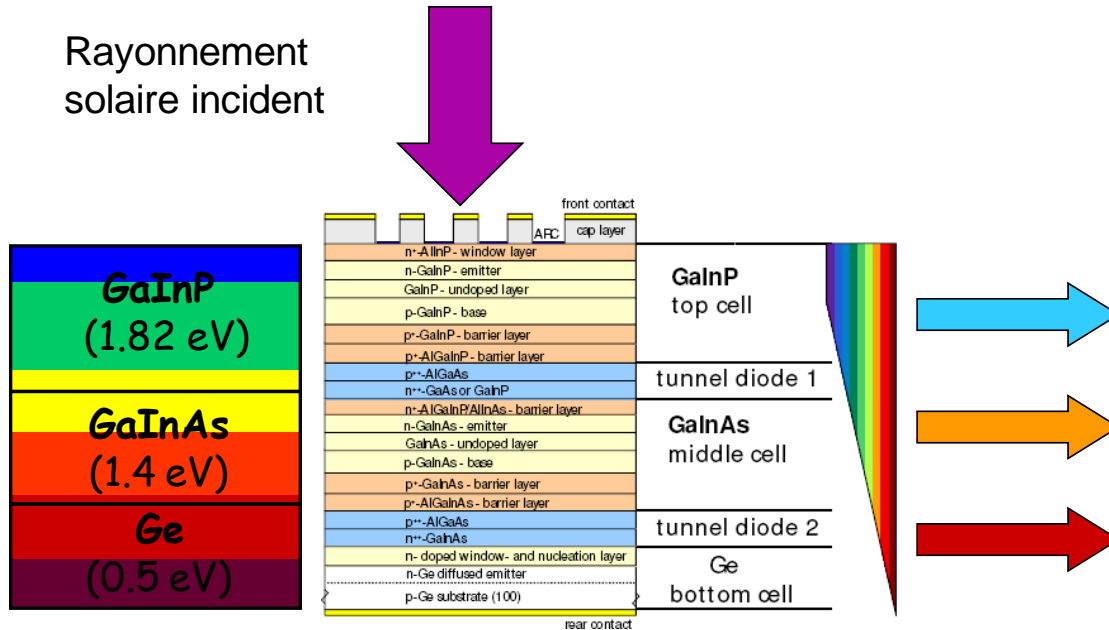
Electricité (conversion thermodynamique)

Chaleur industrielle

Combustibles de synthèse

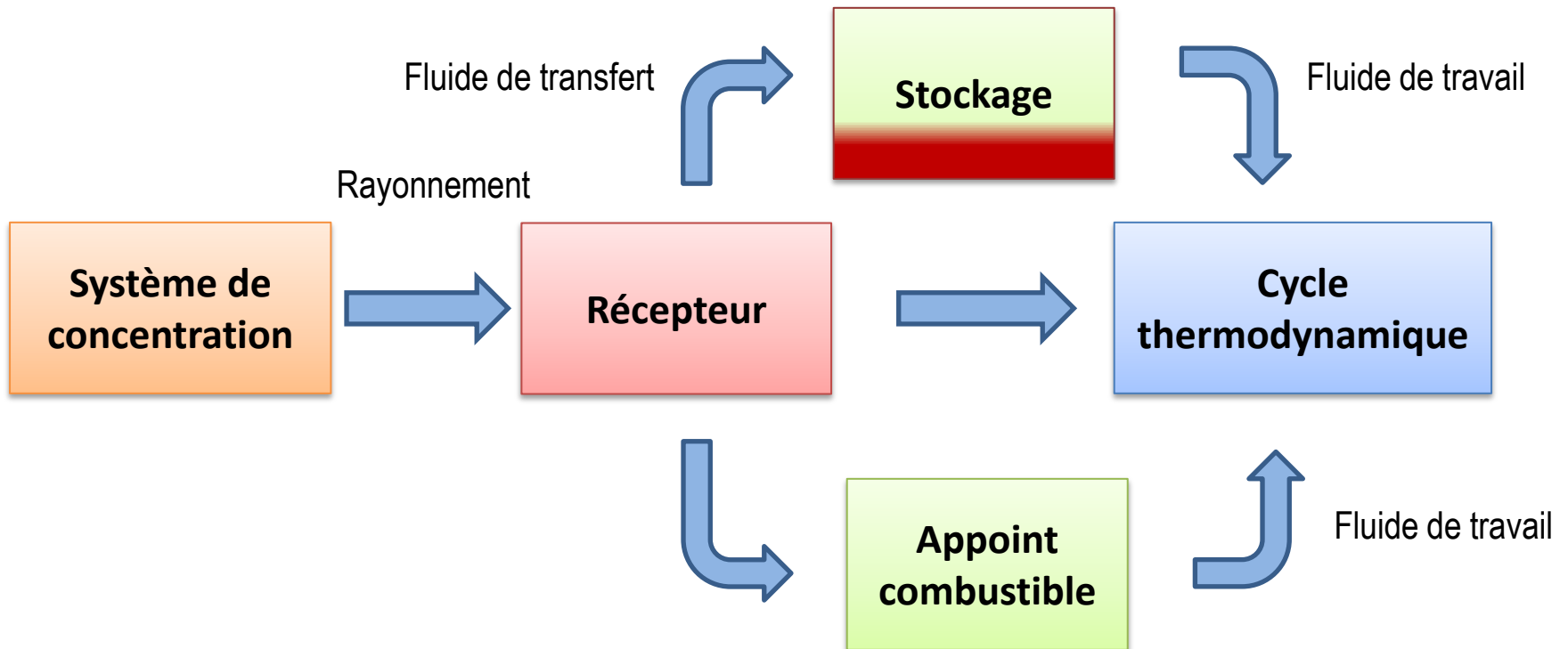
PV sous concentration

Rayonnement solaire incident



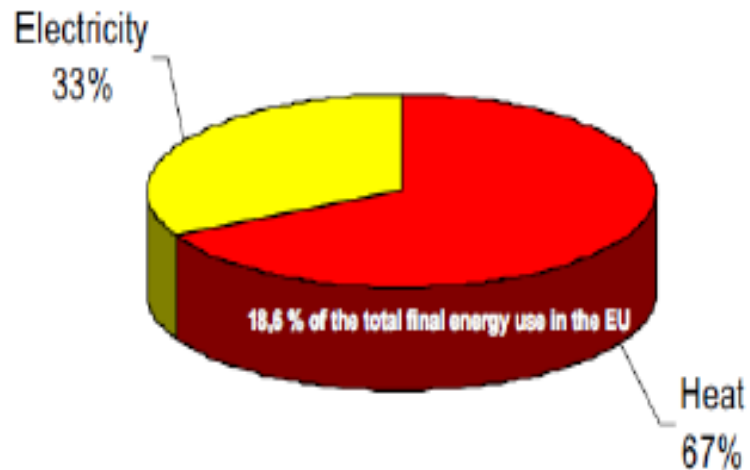
Record pour une cellule de laboratoire: 46%

Centrales solaires thermiques

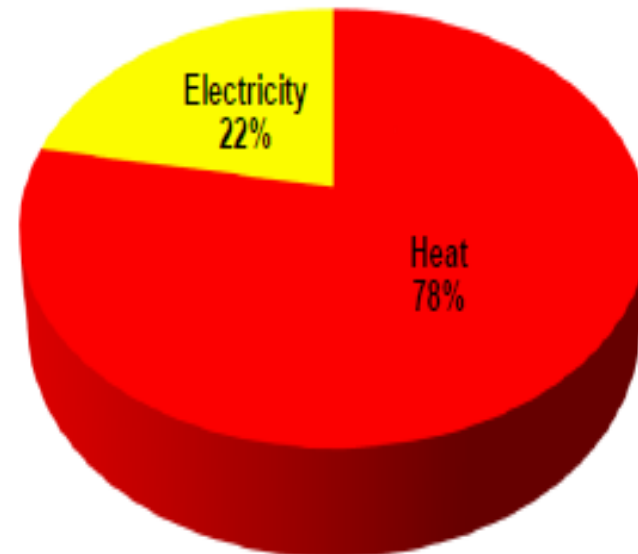


Chaleur industrielle

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



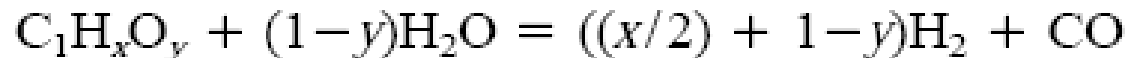
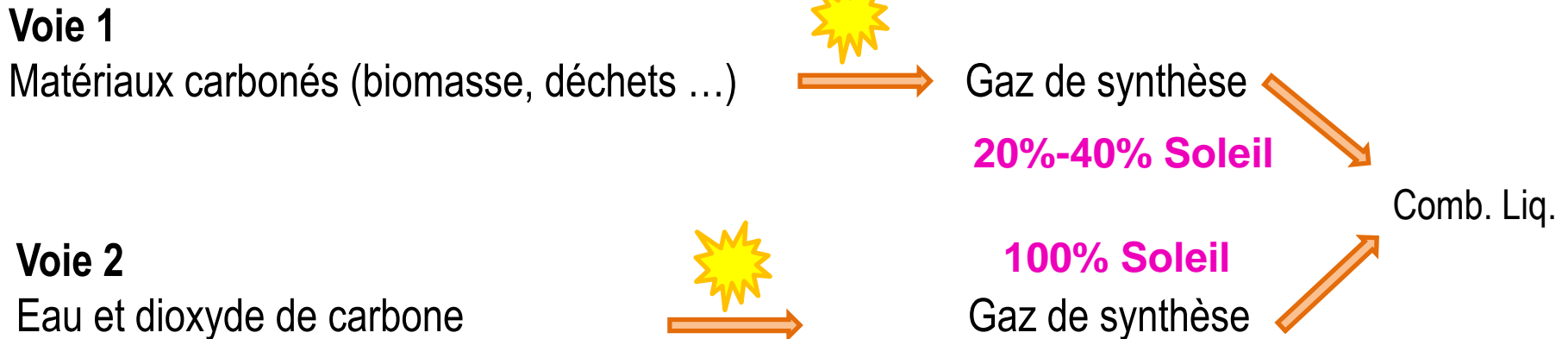
Final energy Use of the SMCs - Industry
share of heat and electricity




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 H₂ + CO, gaz de synthèse





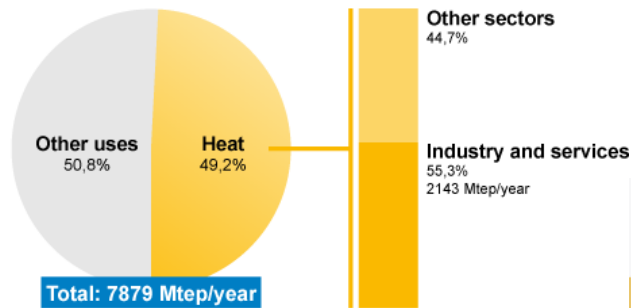
Photovoltaïque/ Thermodynamique

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

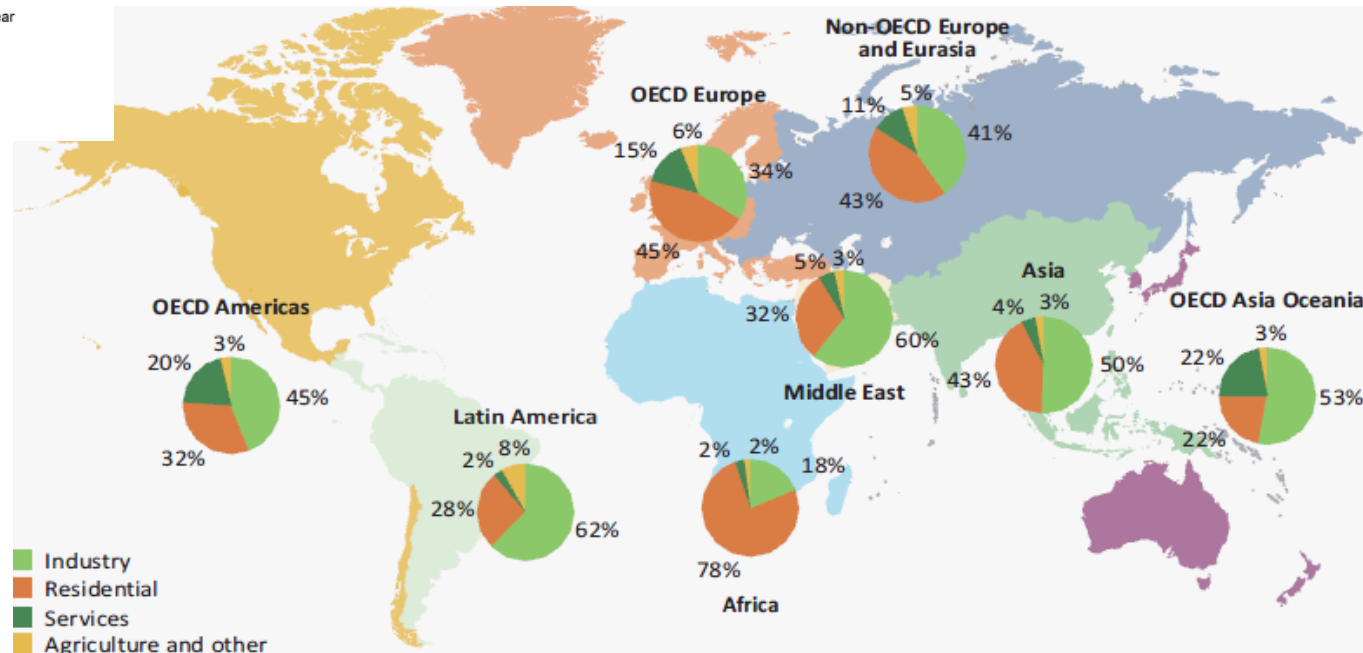
Chaleur industrielle

Un potentiel énorme d'applications pour le solaire à concentration

Répartition de la demande mondiale de chaleur

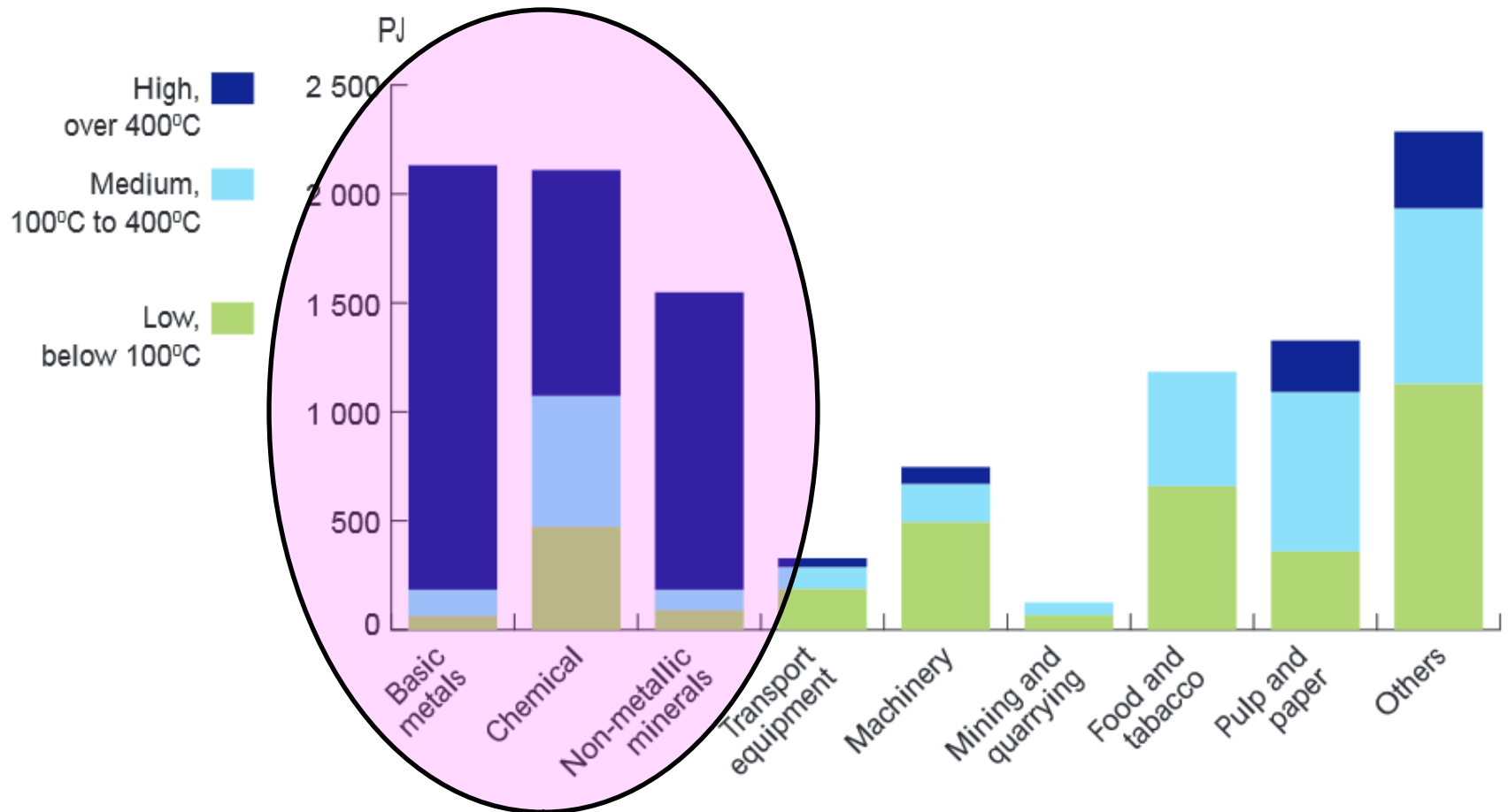


Demande d'énergie mondiale :
Environ 50% est de la chaleur



Figures, données 2009
 Source: Energy Technology Perspectives 2012

Chaleur industrielle



Source: Werner, 2005-2006.

Source : IEA « Solar energy perspectives » 2011



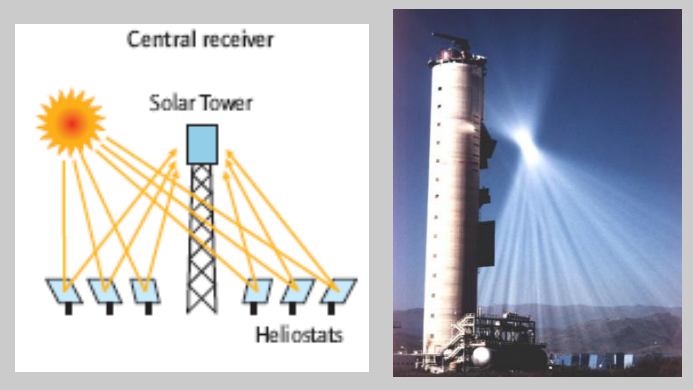
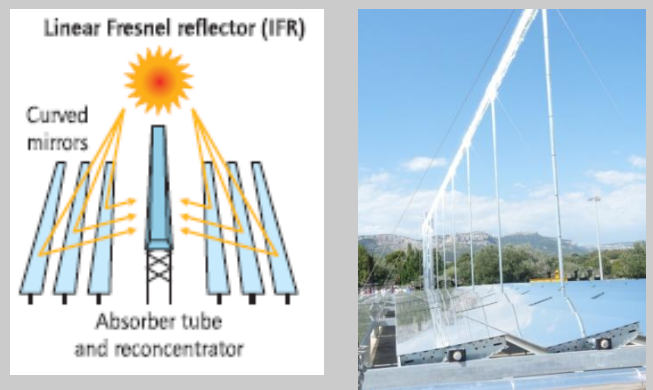
Les sous-systèmes composant une centrale solaire

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

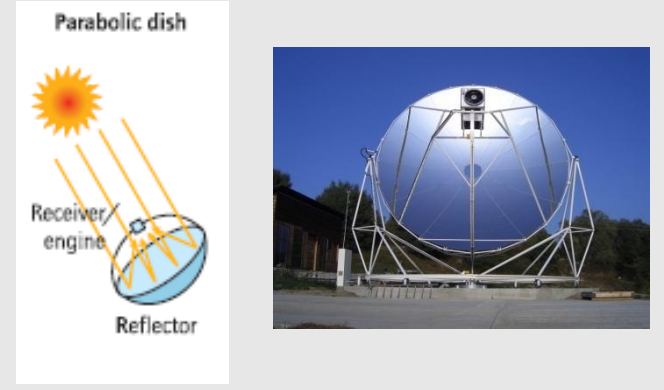
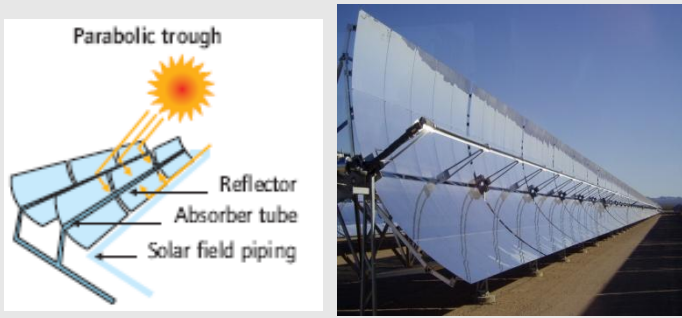
Technologies de concentration

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

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.

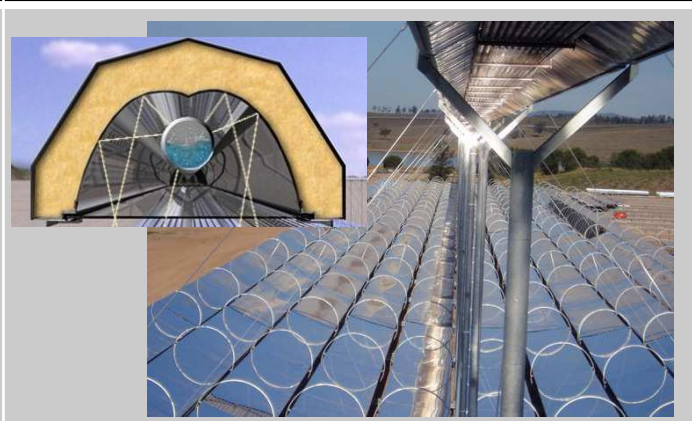


Concentration
Absorbeur

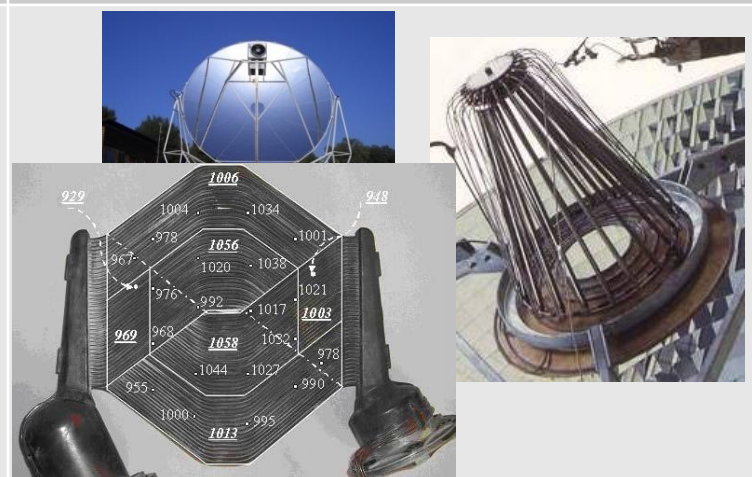
Linéaire

Ponctuelle

Fixe



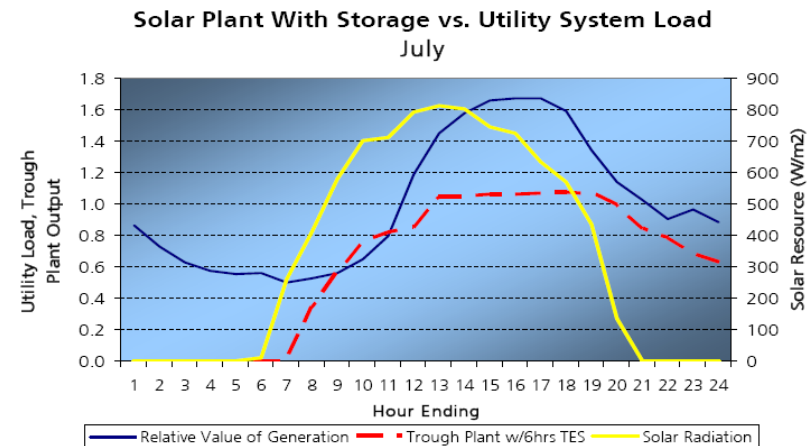
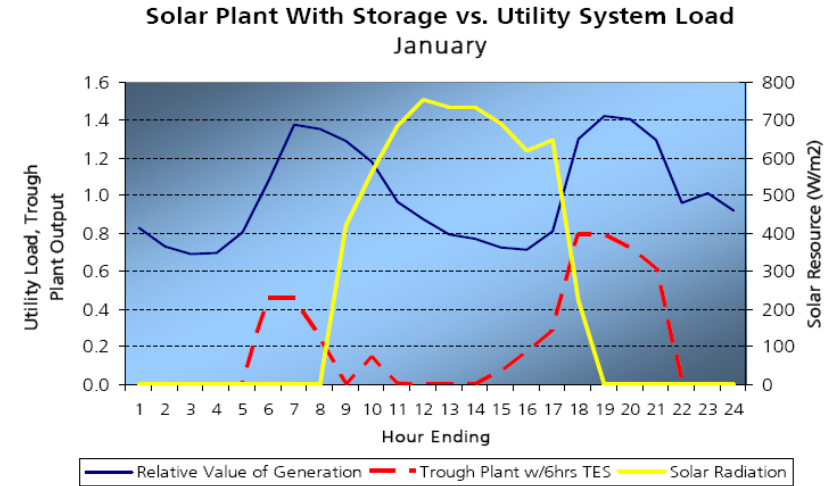
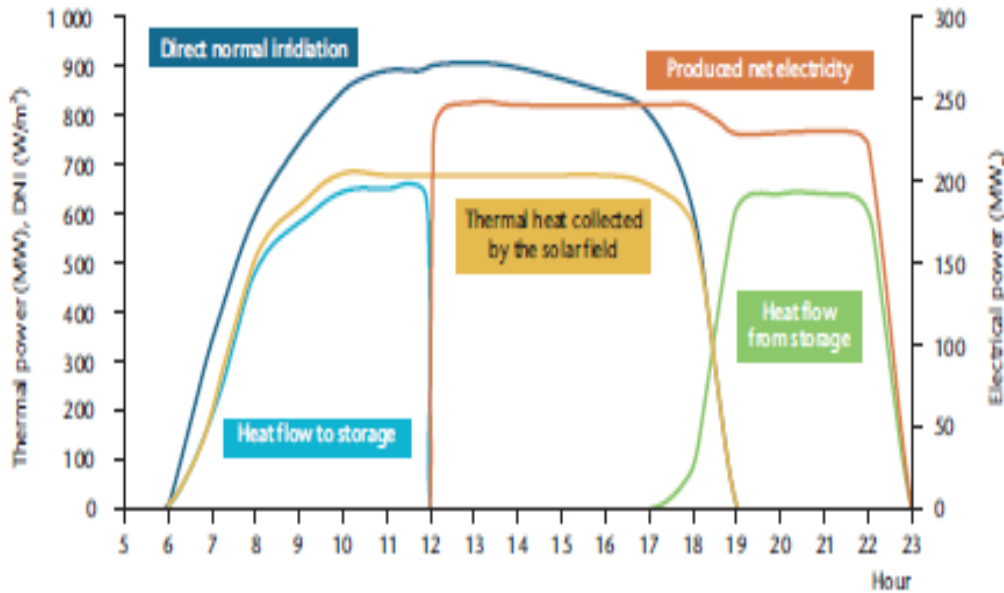
Mobile



Le stockage

Fonction :

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



Le stockage

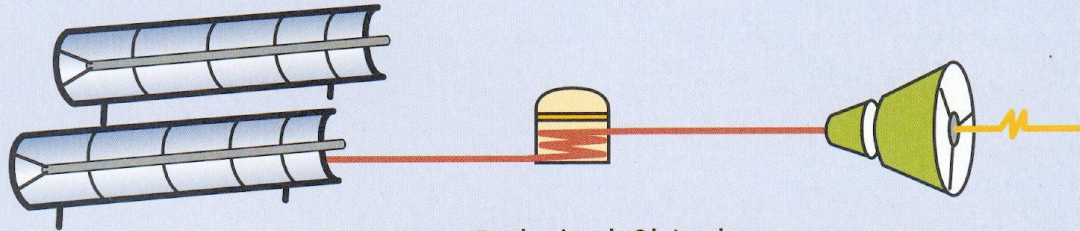
Différents modes de fonctionnement

Semi-base

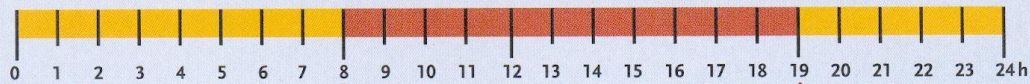
Champ solaire

Petit stockage

Turbine de 250 MW



Production de 8 h à 19 h

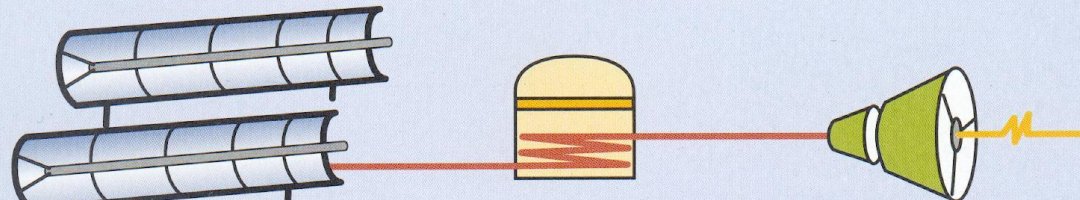


Semi-base décalée

Champ solaire

Stockage moyen

Turbine de 250 MW



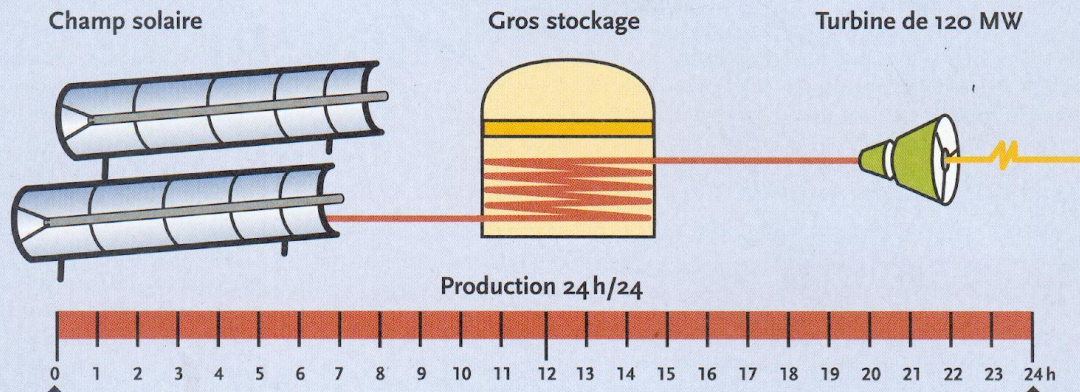
Production de 12 h à 23 h



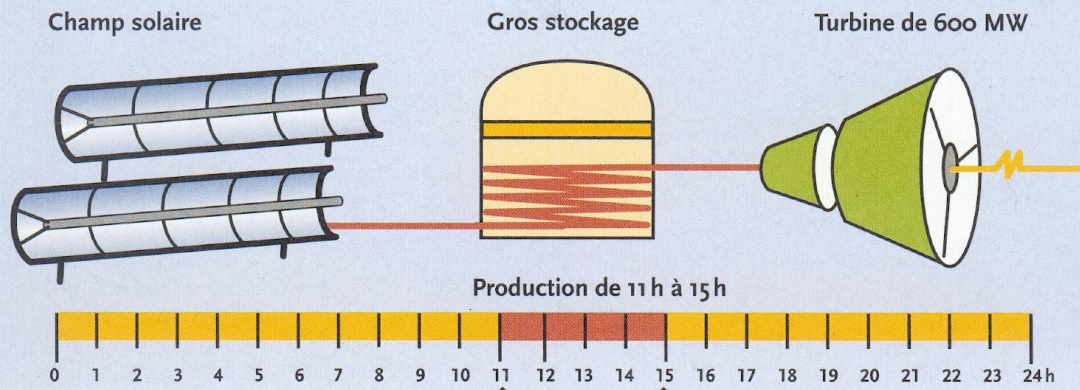
Le stockage

Différents modes de fonctionnement

Base continue



Pointe



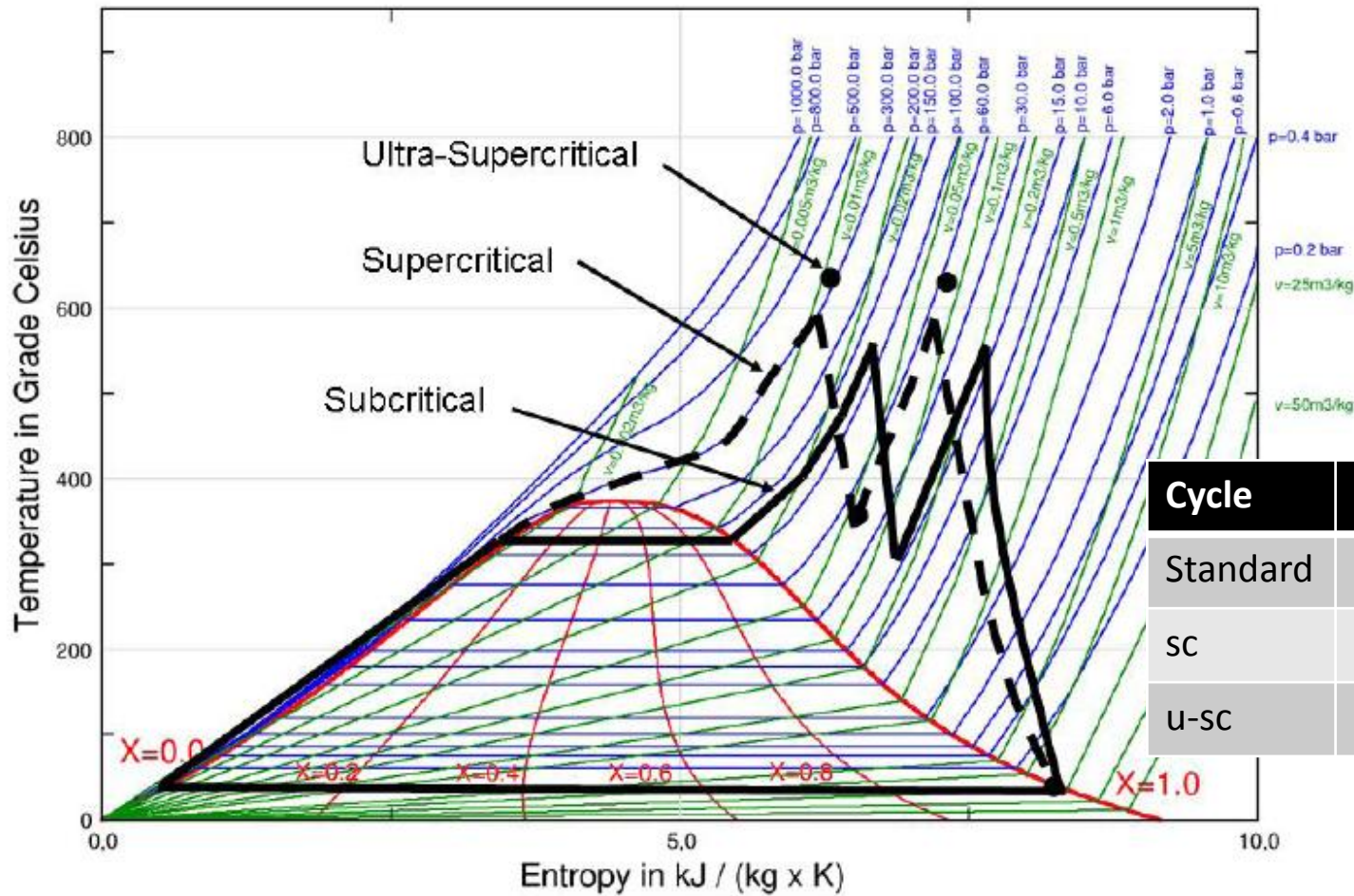


La turbine

Cycle Thermodynamique	Rendement de conversion électrique	Potentiel d'amélioration
Cycles vapeur (Rankine/Hirn) 390°C-565°C	37% - 42%	0 (Technologie actuelle)
Vapeur Supercritique ≥ 600°C	48%	17% - 35%
CO ₂ 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

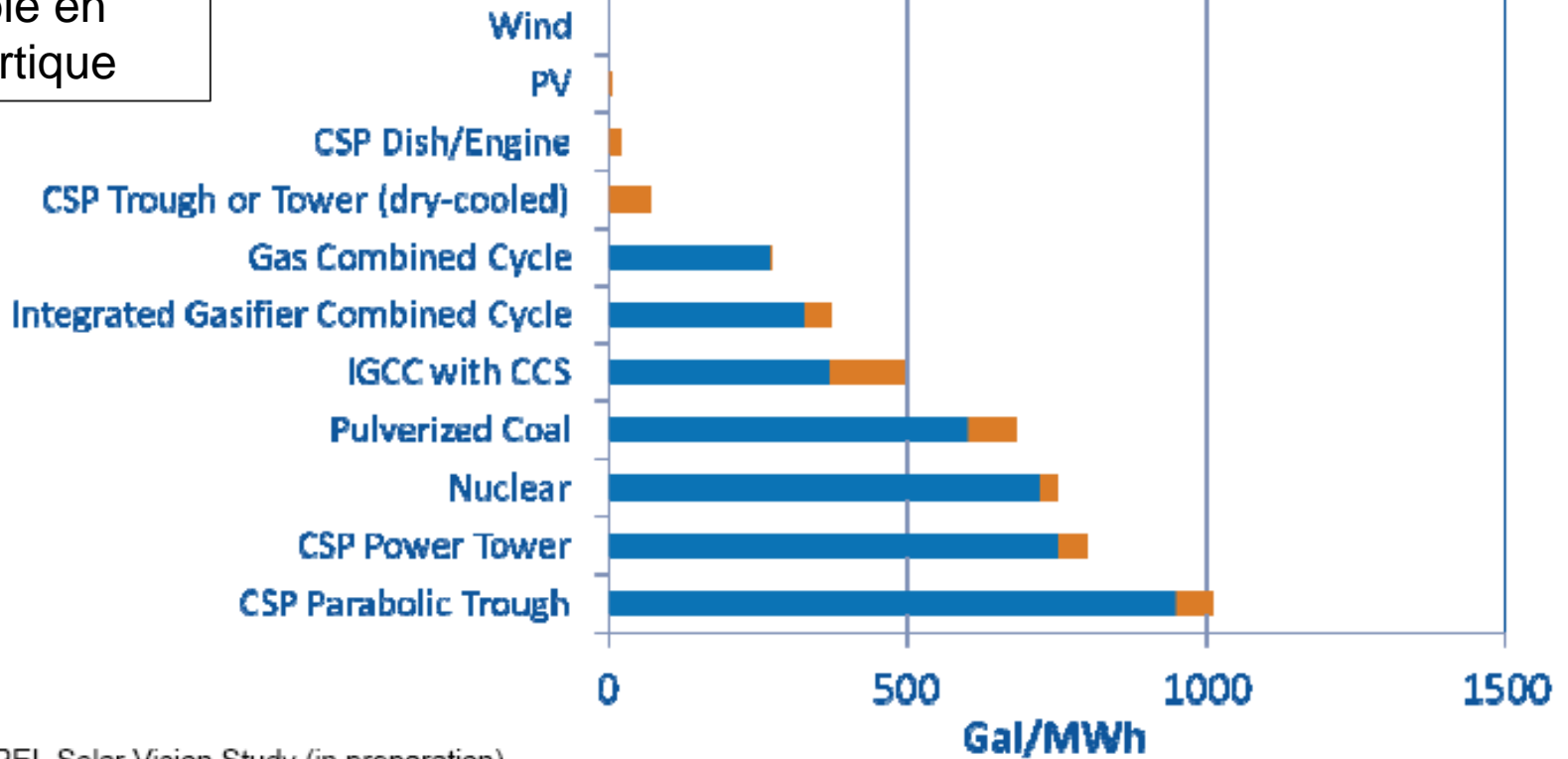


■ Water for Cooling ■ Other Water Use

m³/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)

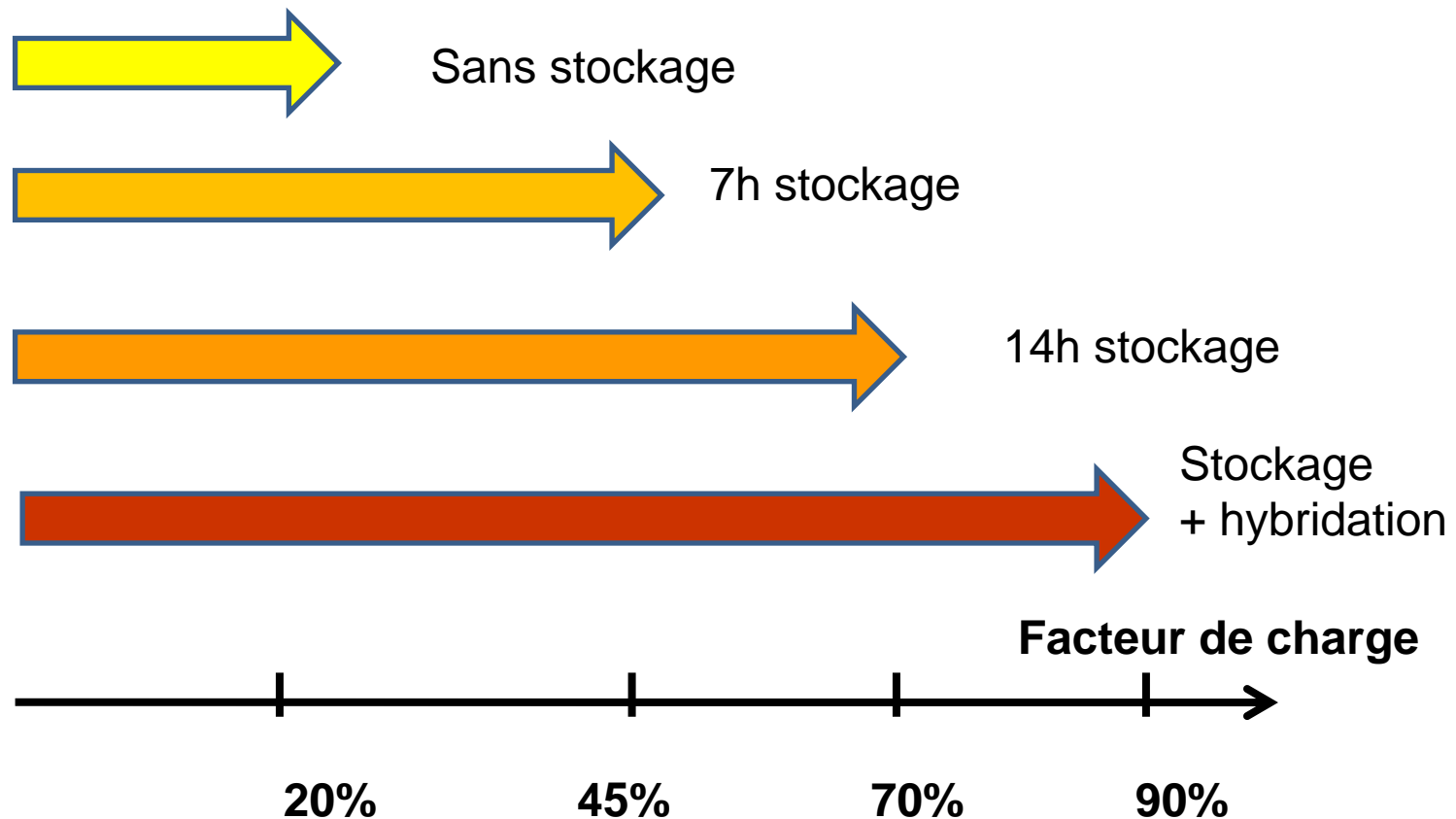
Source: C.S. Turchi, NREL, SolarPACES 2010



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 = η_G

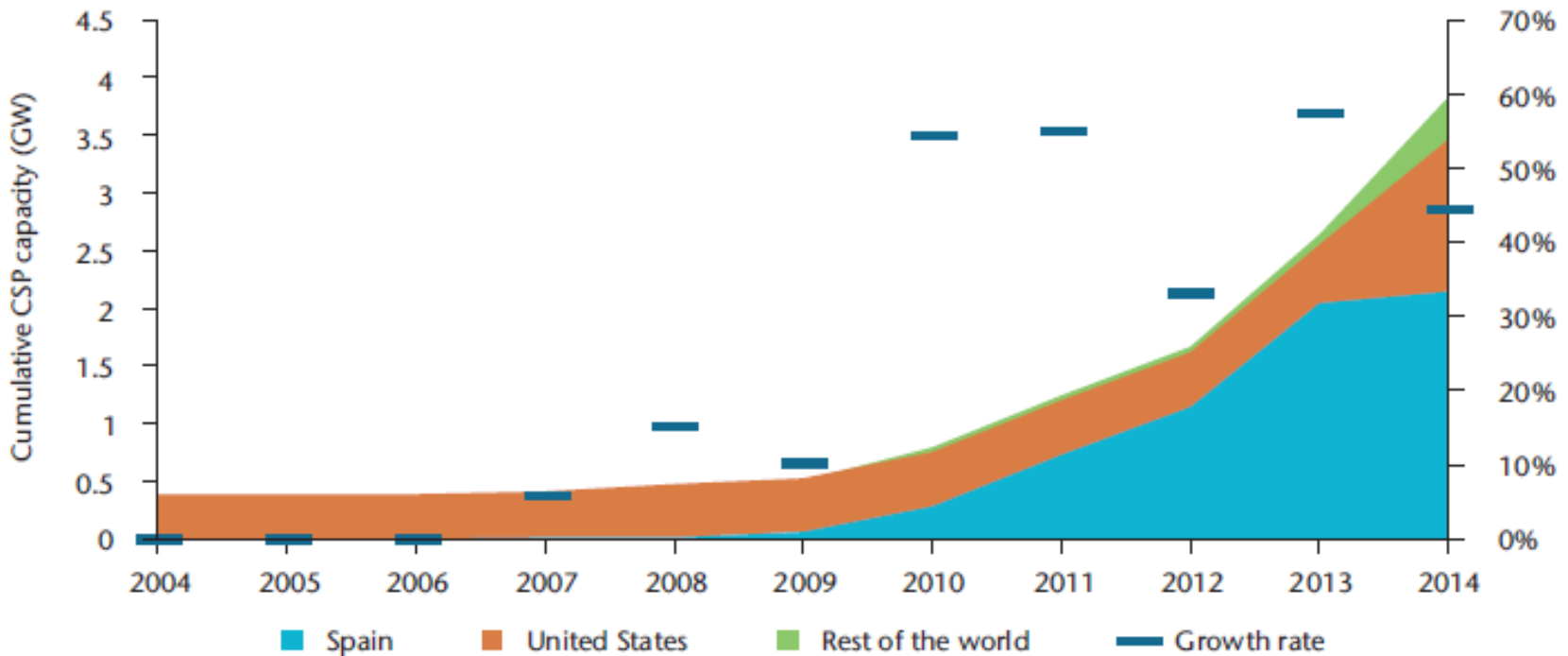
$$\eta_G = \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{Rec}} \cdot \eta_{\text{cyc}} \cdot (1 - \eta_{\text{par}})$$

η_{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



Technologies

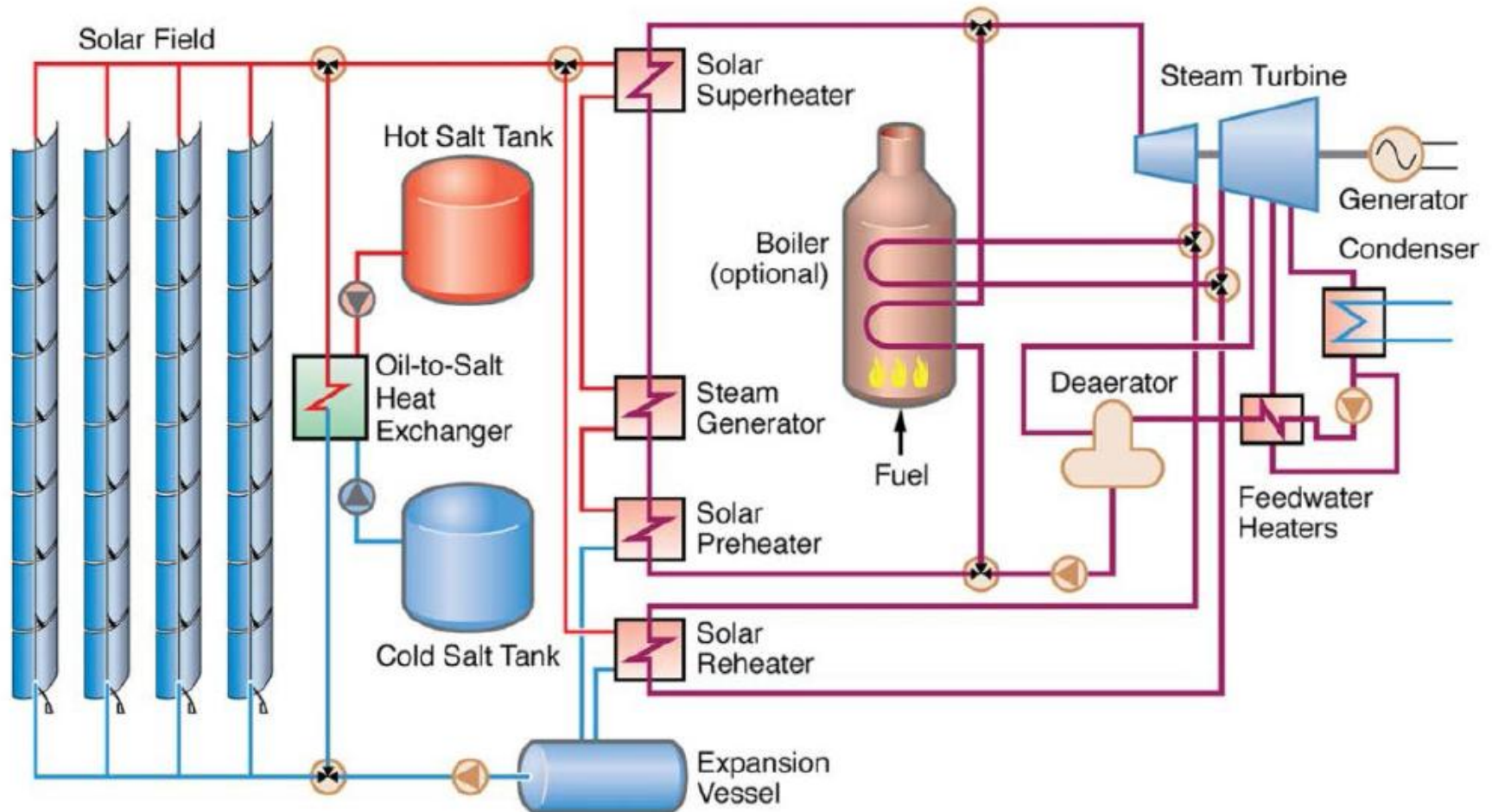
2 technologies dominant :

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

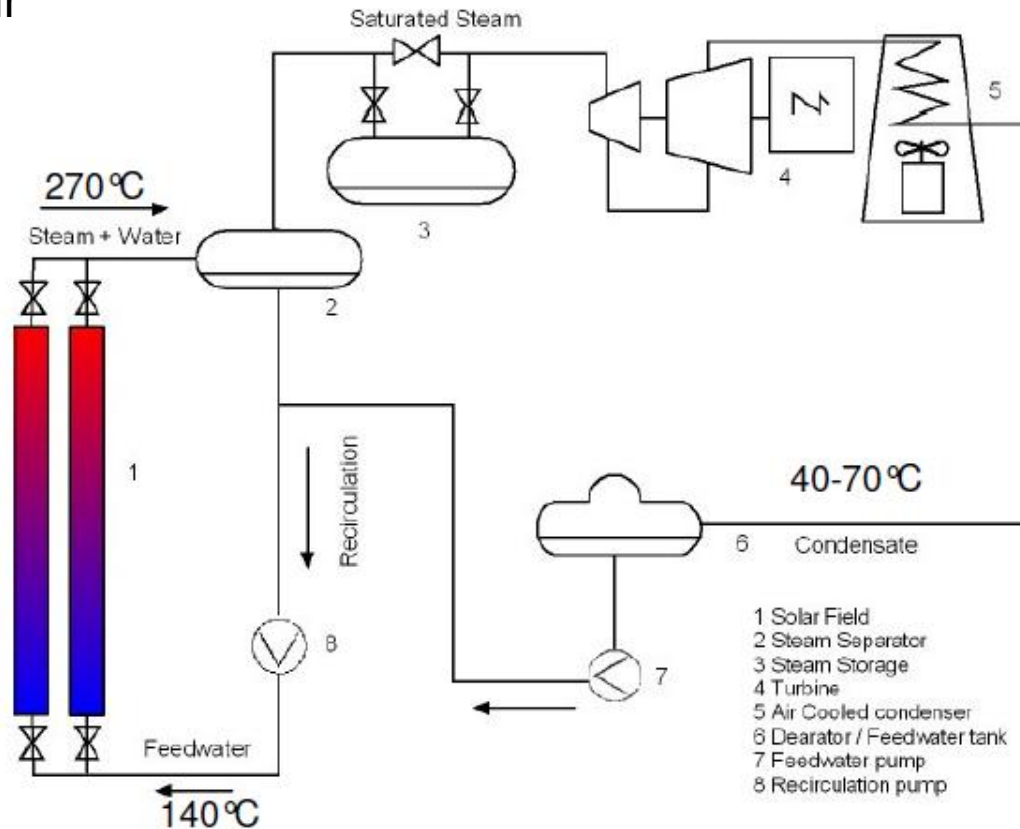
En anglais: parabolic troughs



Fresnel linéaire

En anglais: Linear Fresnel

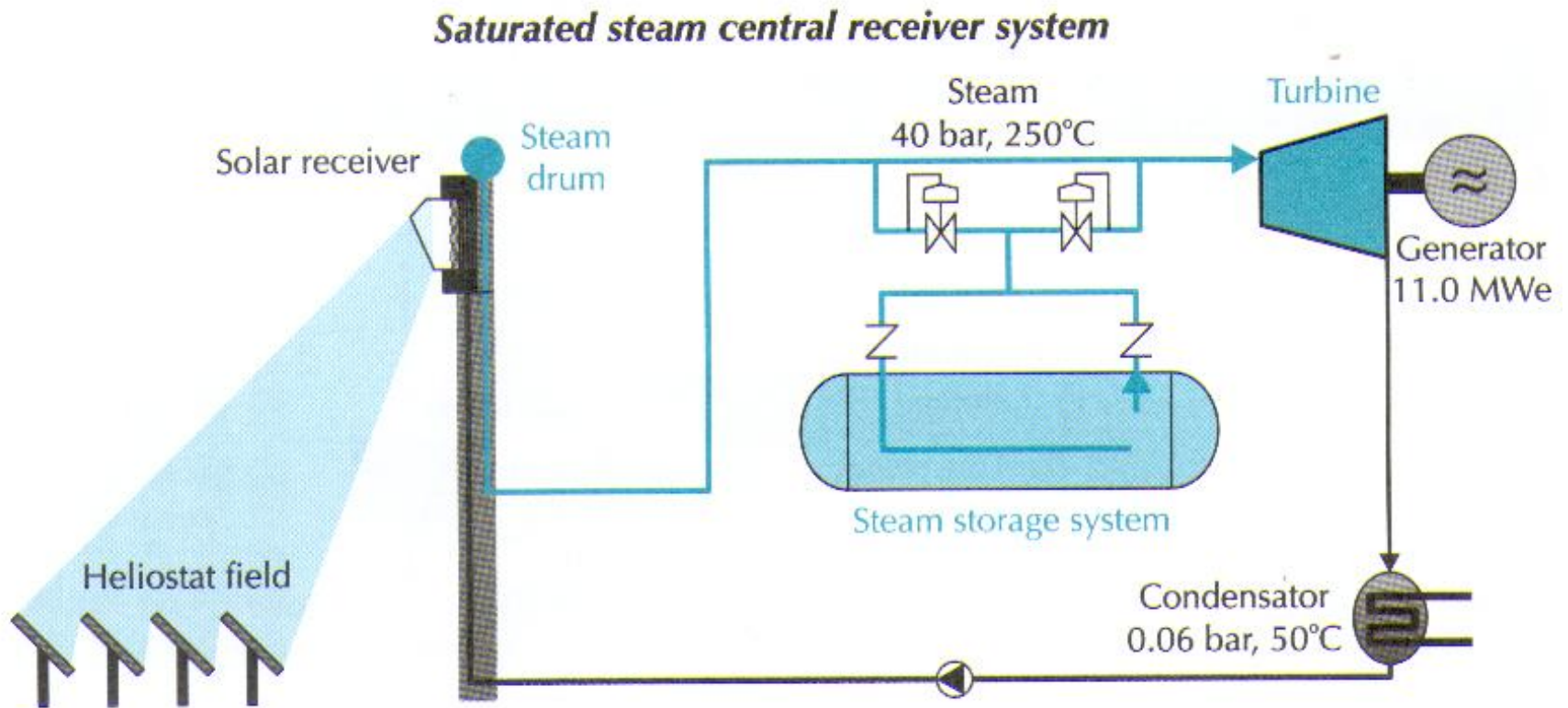
Génération
directe de vapeur



Source: Novatec

Centrales à Tour

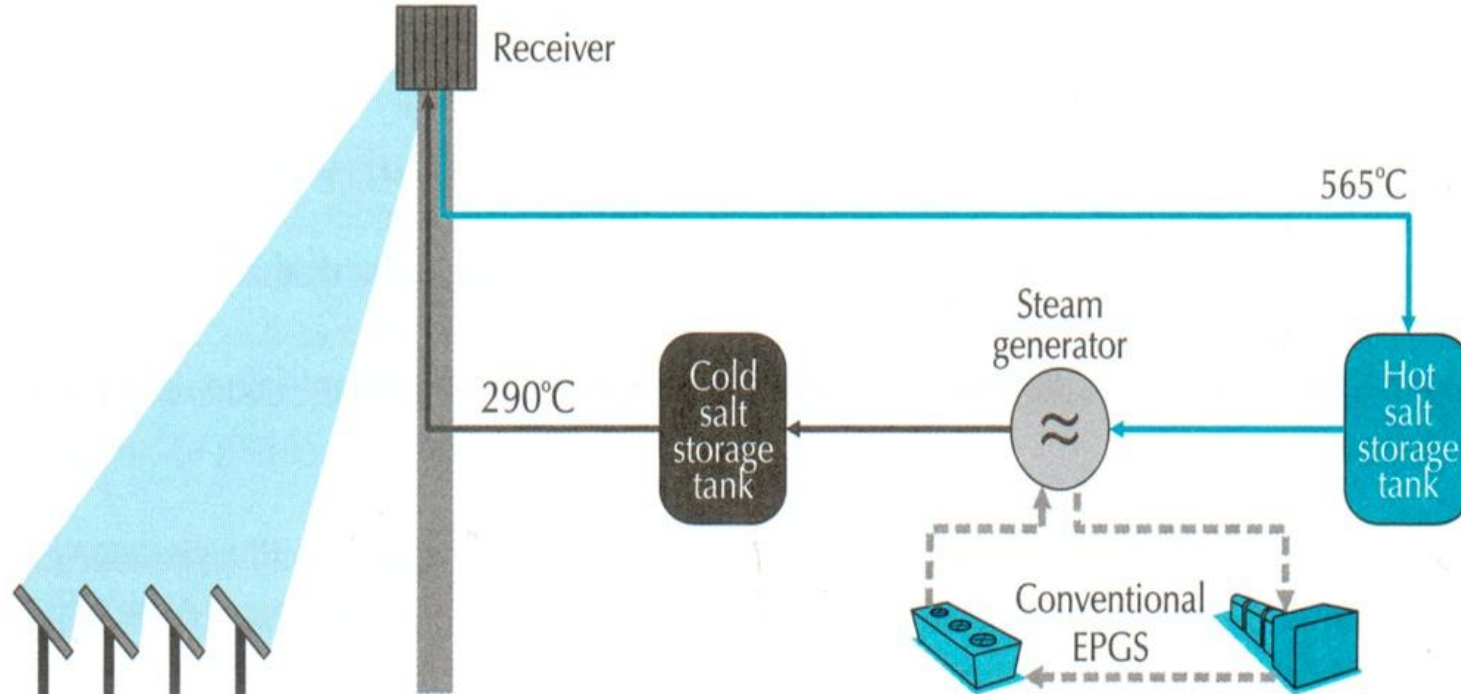
En anglais: Central Receiver (ou Power Tower)



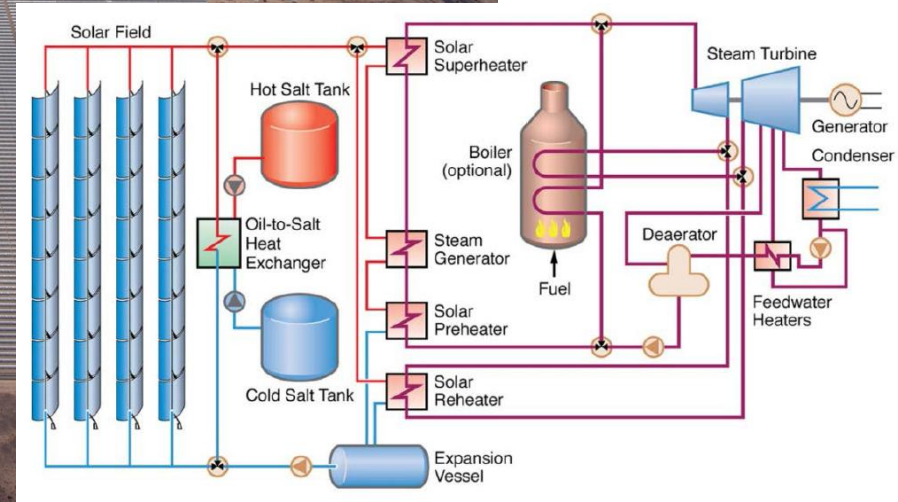
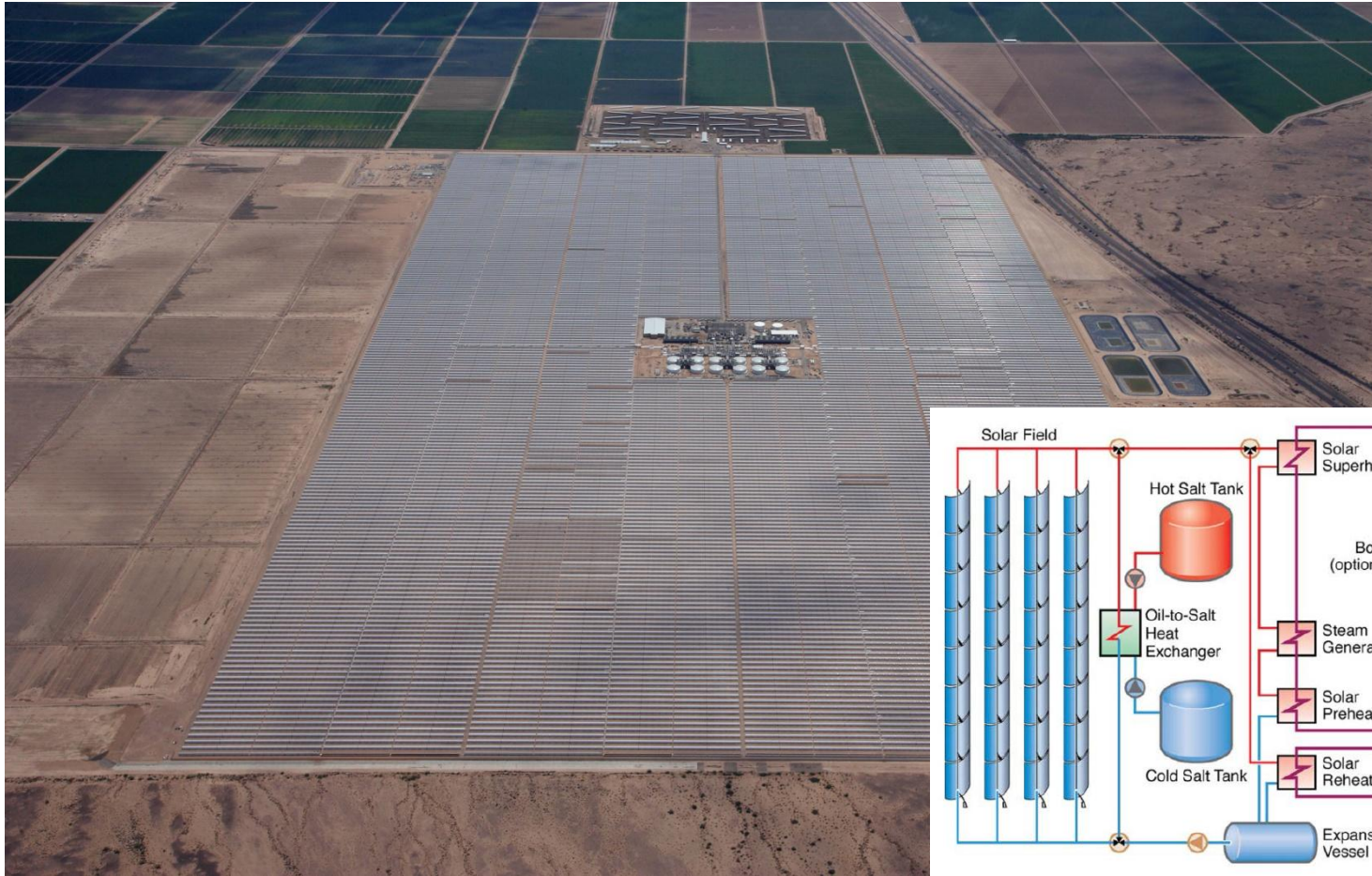
Centrales à Tour

En anglais: Central Receiver (ou Power Tower)

Molten salt central receiver system



Technologies : vers les grandes puissances




SOLANA (Californie) 250 MW_e net, Abengoa

Technologies : vers les grandes puissances



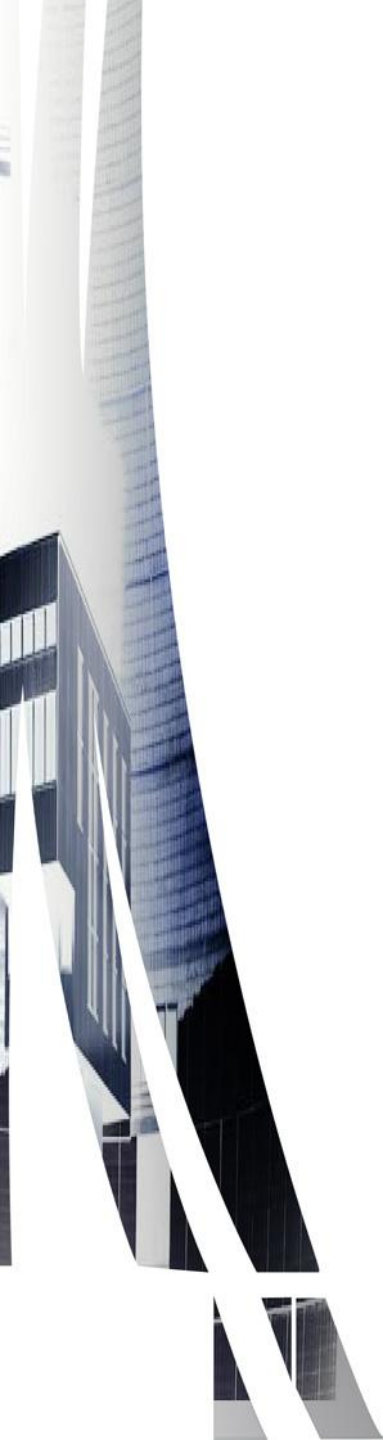
Ivanpah (Californie) 370 MW_e net, GDV
170 000 heliostats (BrightSource)



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

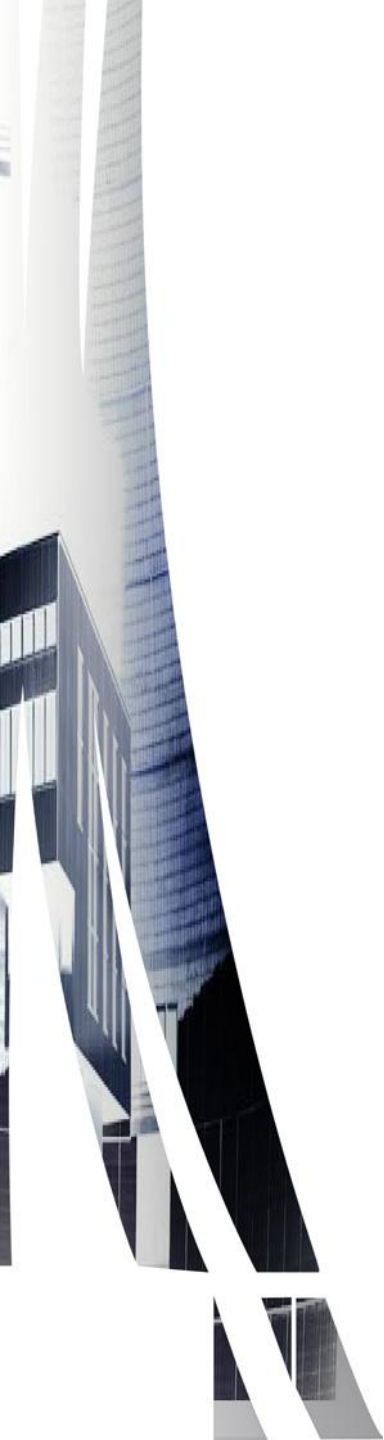


Création d'emplois

Fabrication / construction

Scenario	Installed capacity	Export market demand in 2022	Local share in manufacturing	Cost reduction ⁴	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

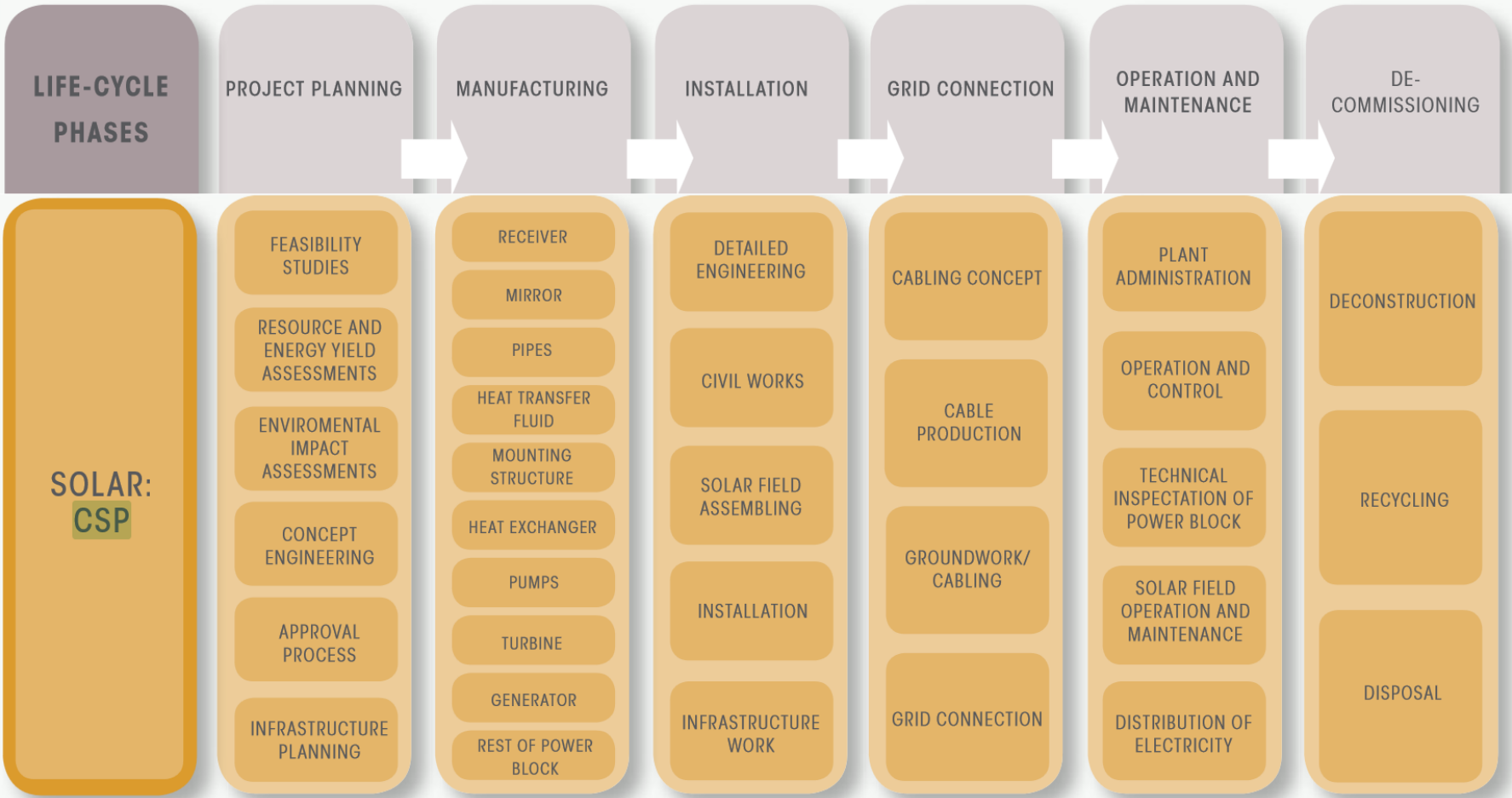


Coûts

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



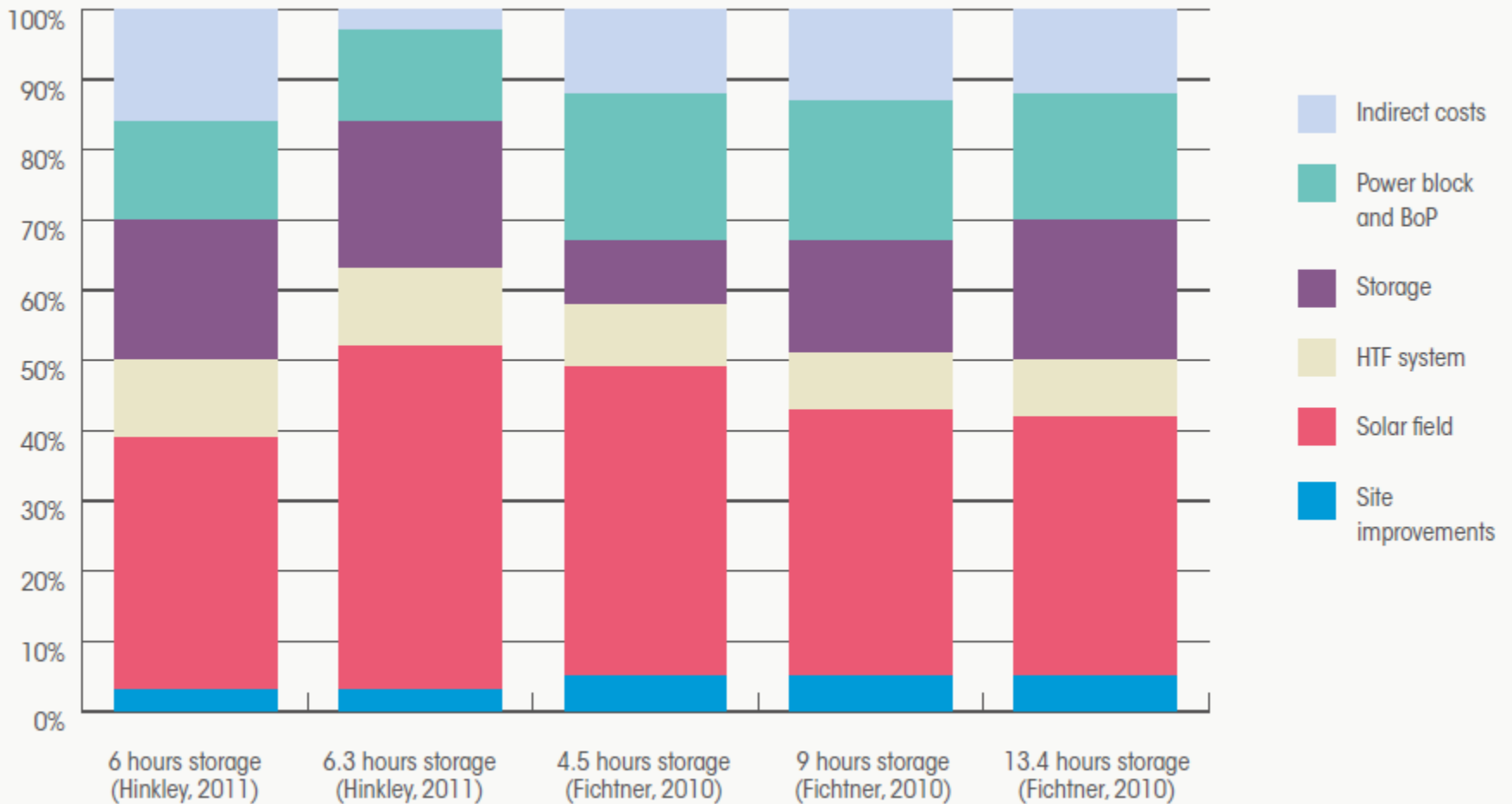


Investissement

	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

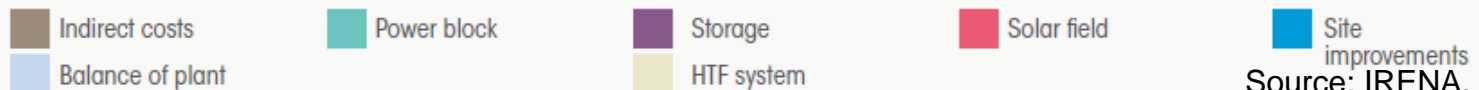
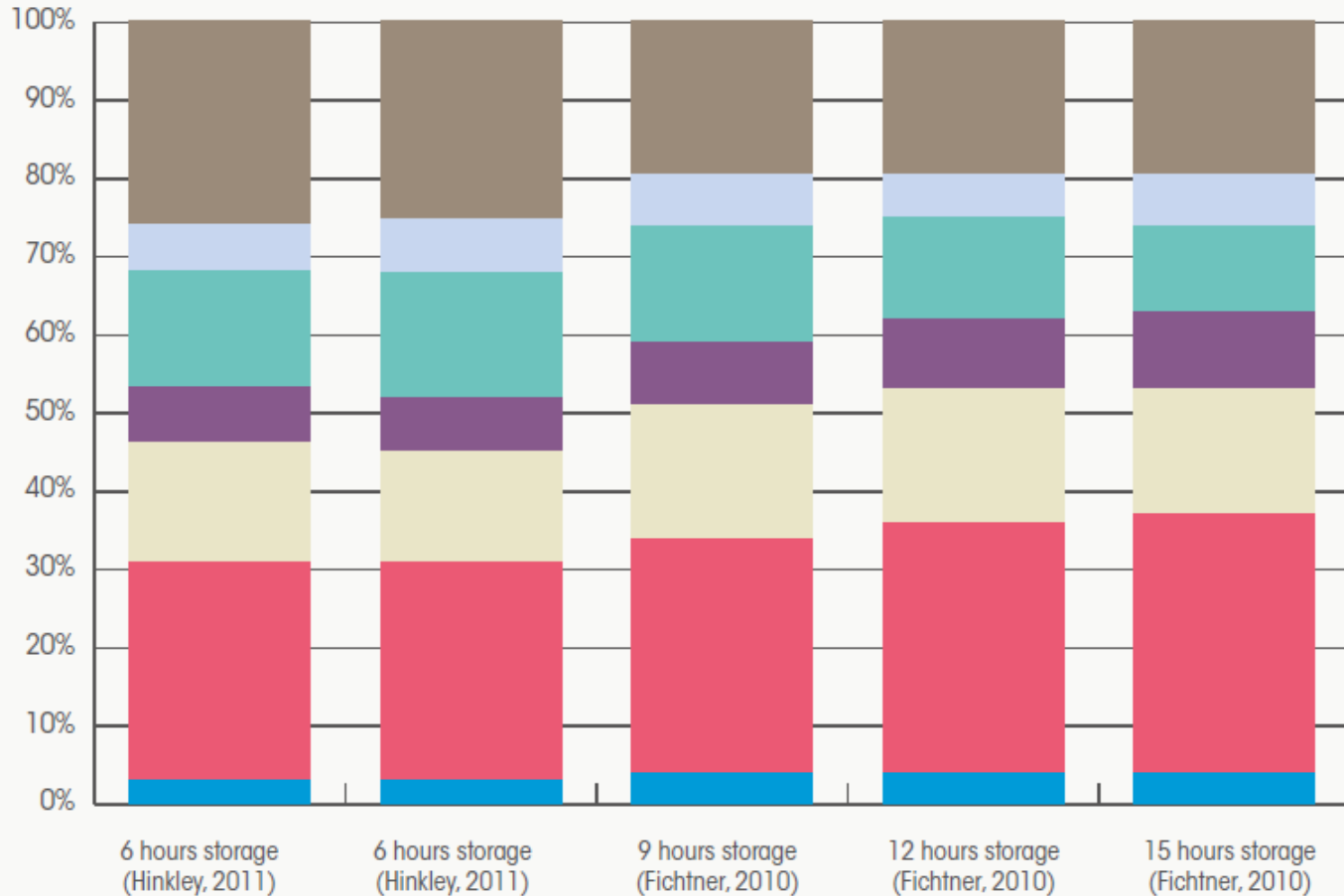
Répartition investissement

Cylindro-parabolique 100 MW



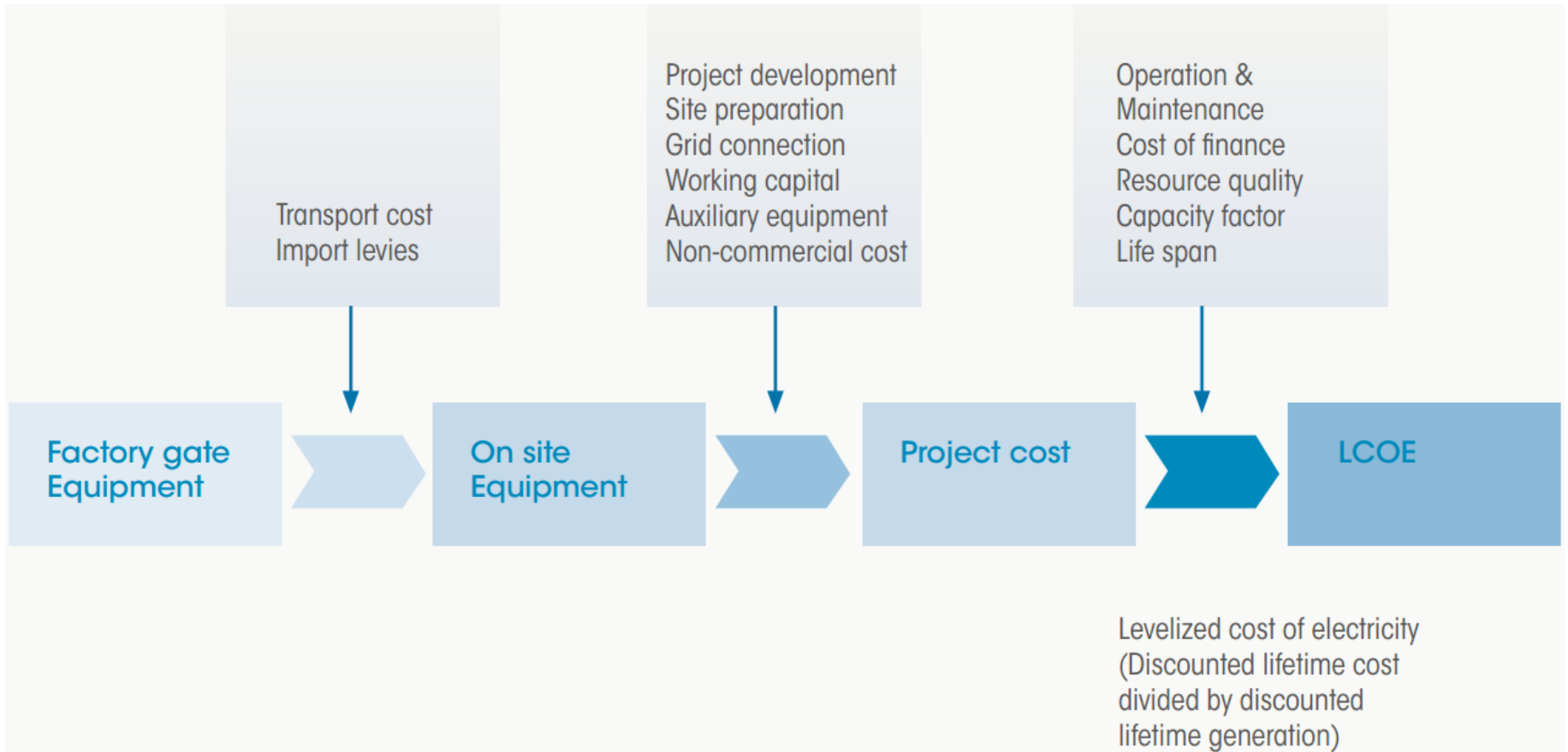
Répartition investissement

Tour 100 MW



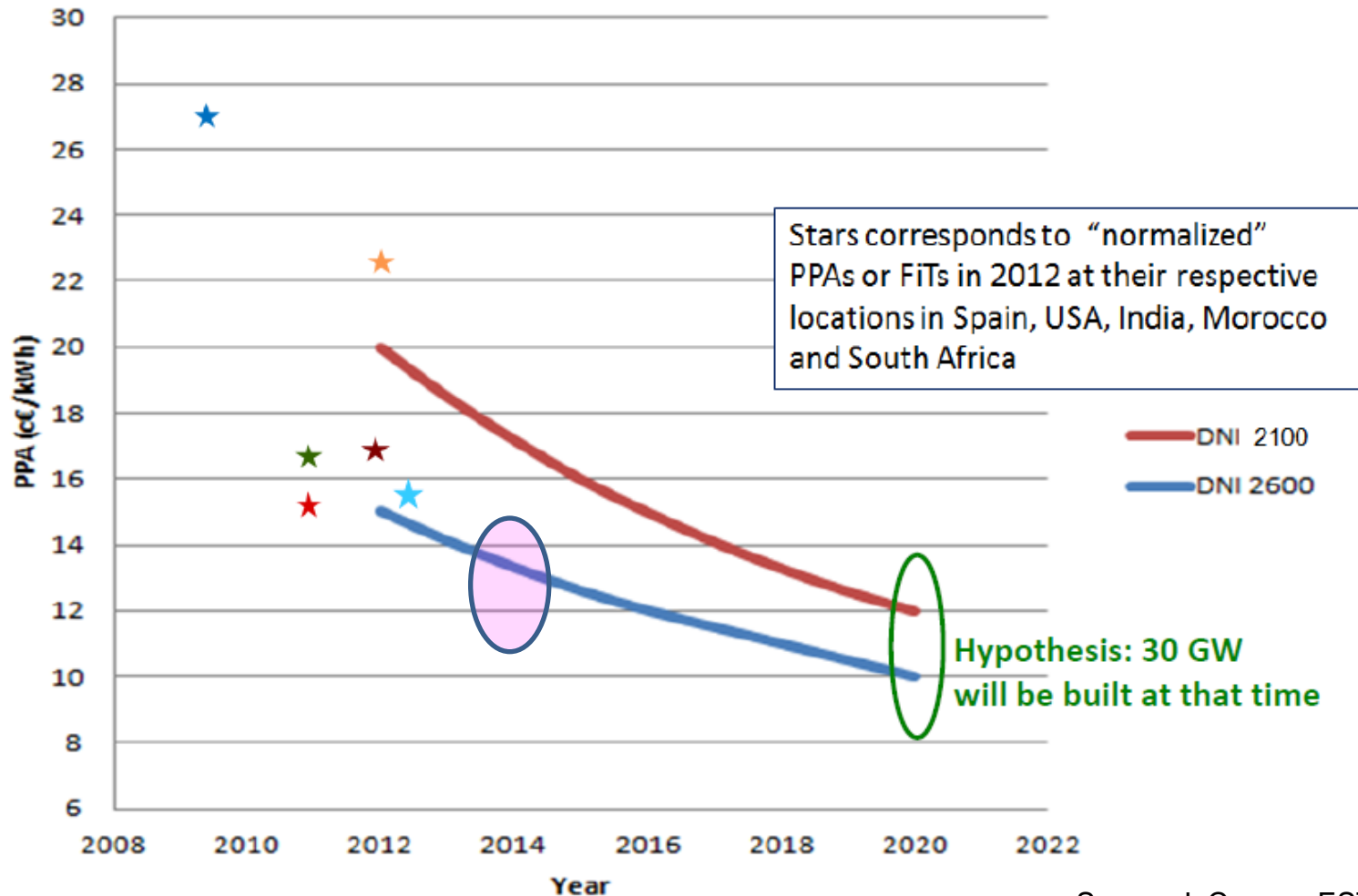
Source: IRENA, 2013

Coûts électricité

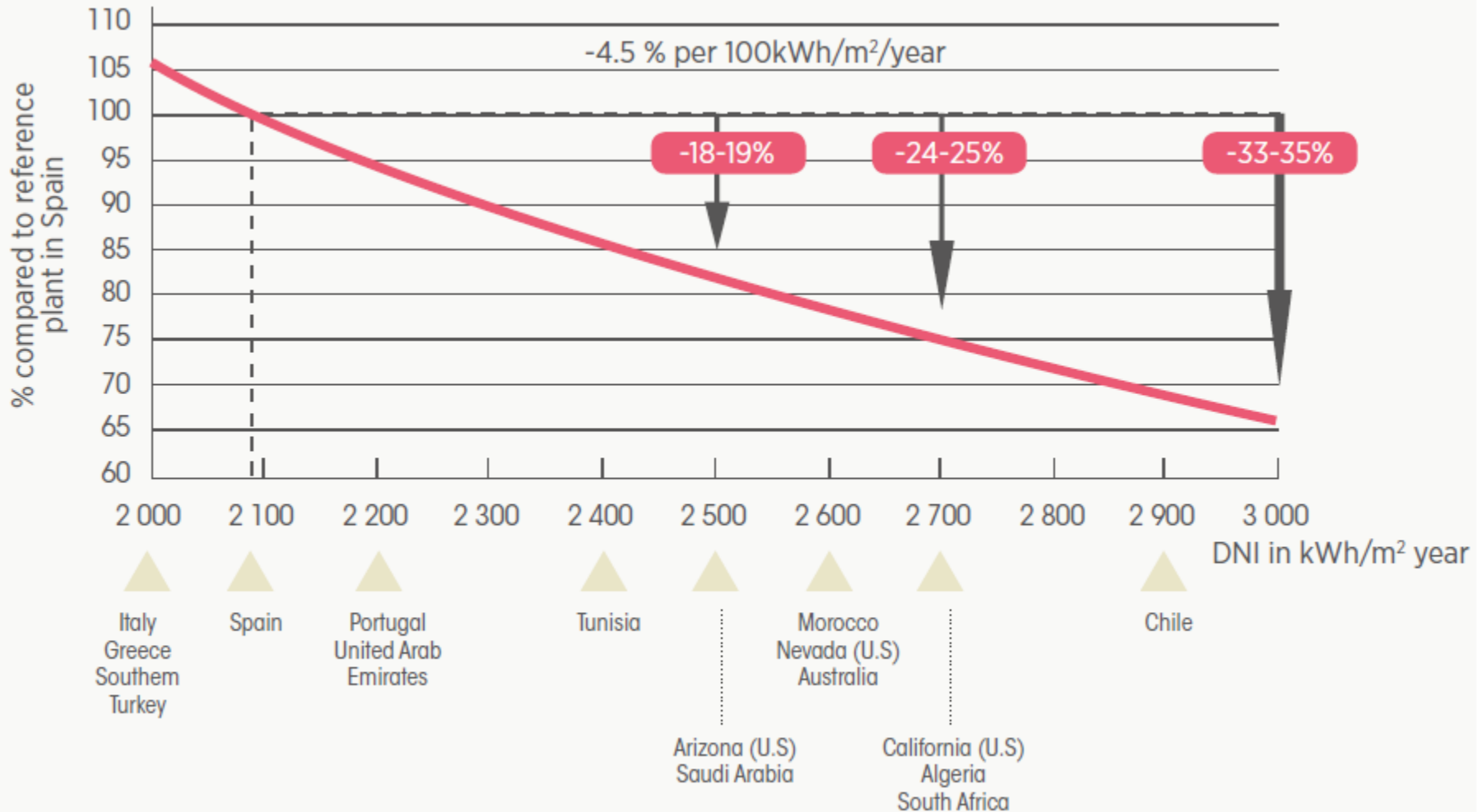


Coûts électricité

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

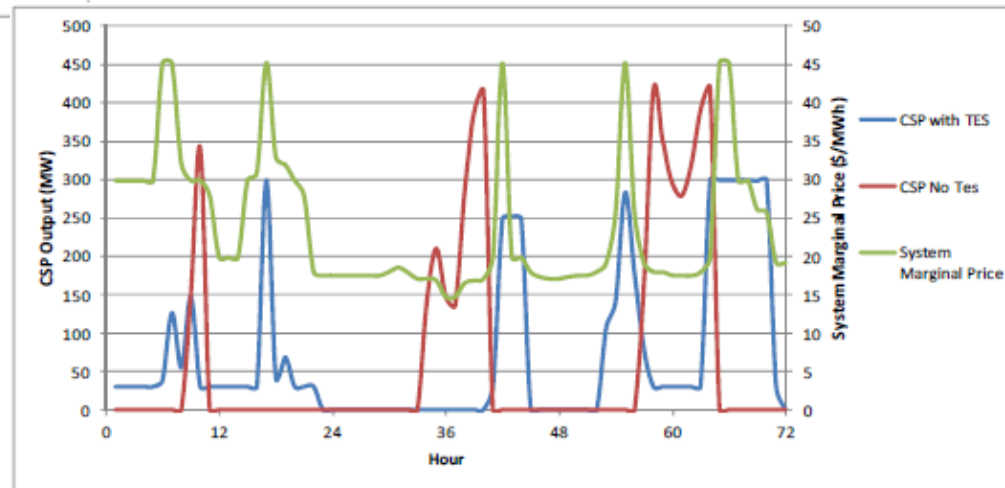
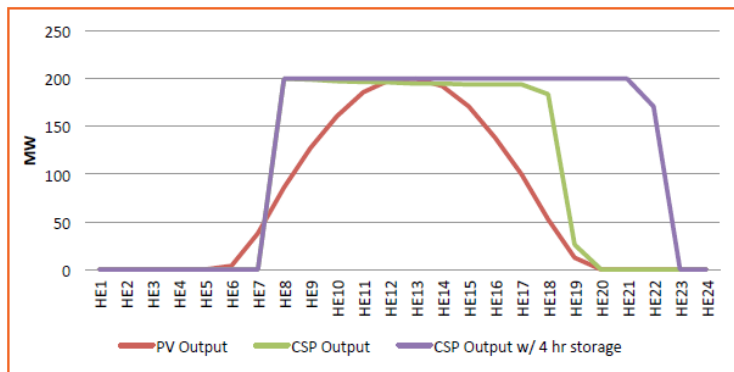
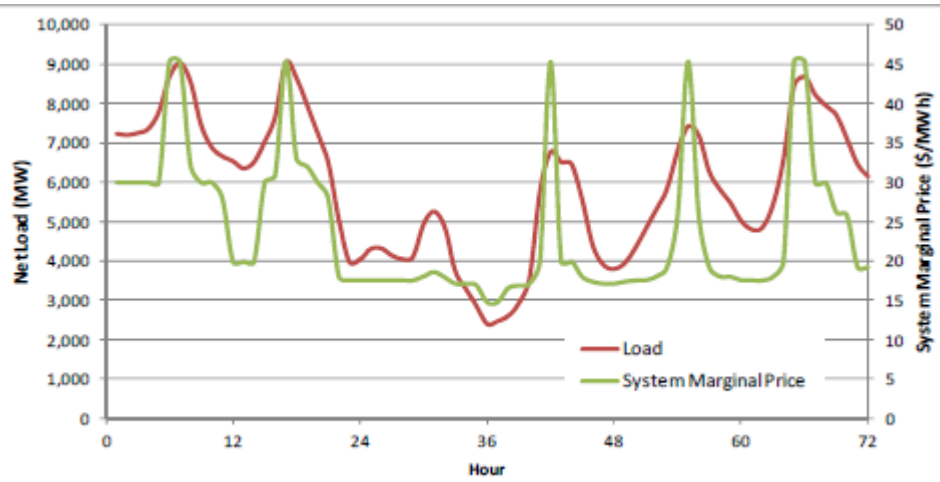


Coûts électricité



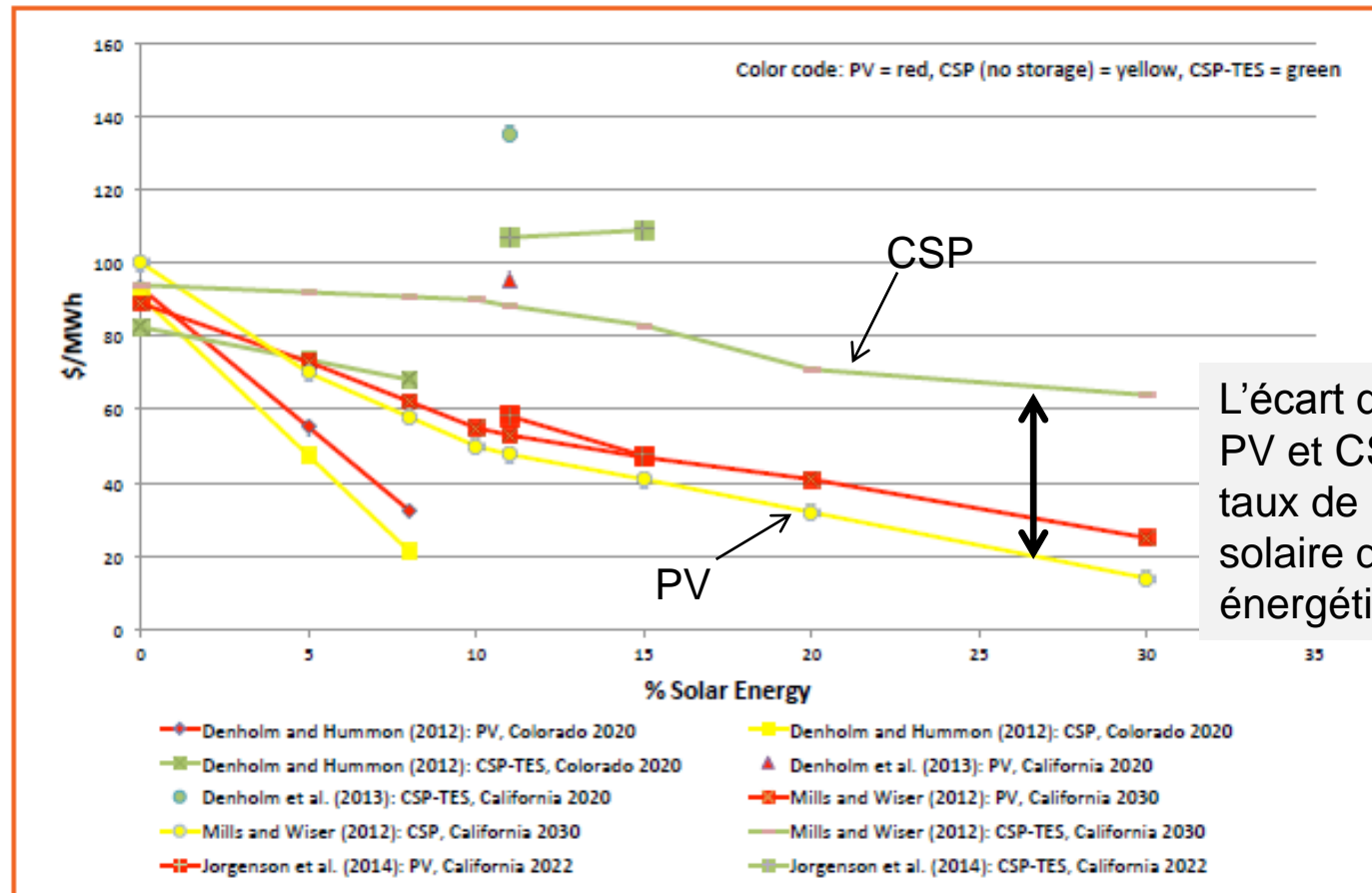
Coûts électricité

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



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
H₂O v : 250-300°C
huile : 390°C
Sel fondu : 565°C
S-CO₂/S-H₂O : 600-850°C
Gaz (pressurié) : >800°C
Particules : >800°C

Choix politiques
pour le solaire

Merci de votre attention

