

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a tall, white, rectangular solar tower stands prominently. It features a Swiss flag at the top and the text 'HS-SA' and 'SOLVER' on its side. A large solar plane with a long, dark, rectangular solar panel on its wing is positioned behind the tower. The campus below consists of numerous buildings, green spaces, and a road. The background shows a body of water and a clear blue sky.

Centrales Solaires Thermique à Concentration (CSTC) Etat de l'Art

Jean-Bernard Michel

Professeur, Haute Ecole Spécialisée de
Suisse Occidentale

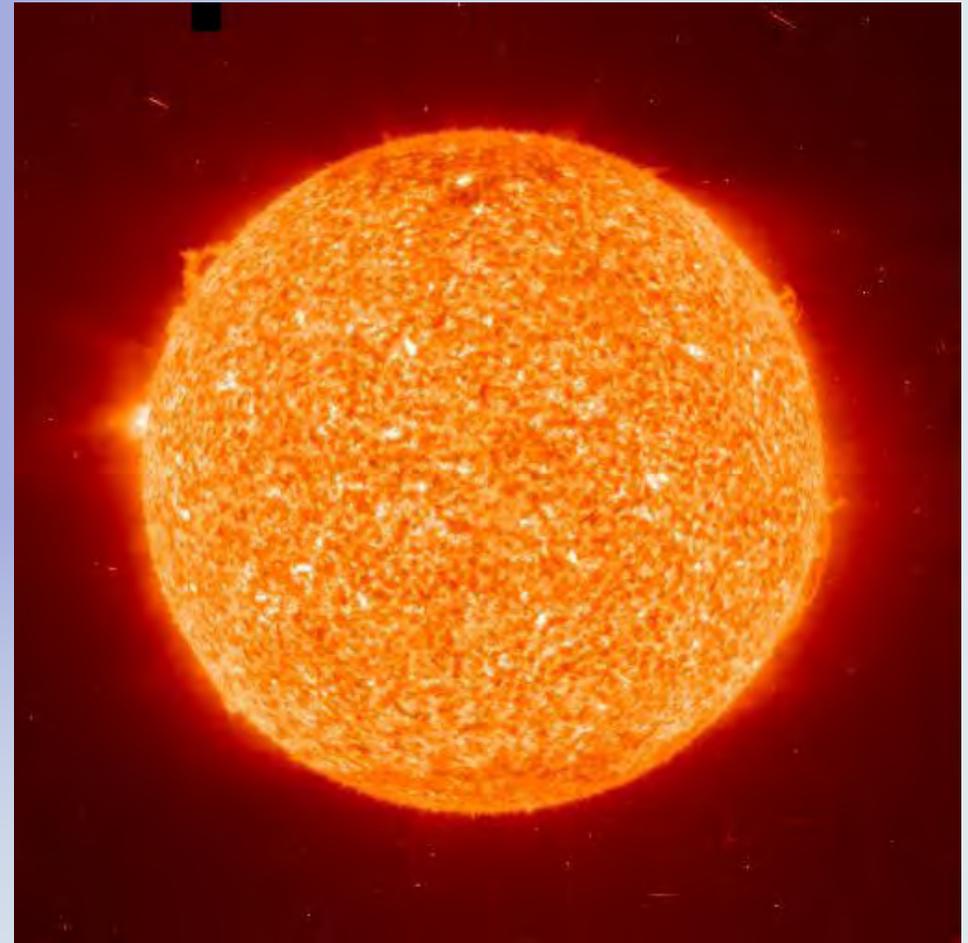
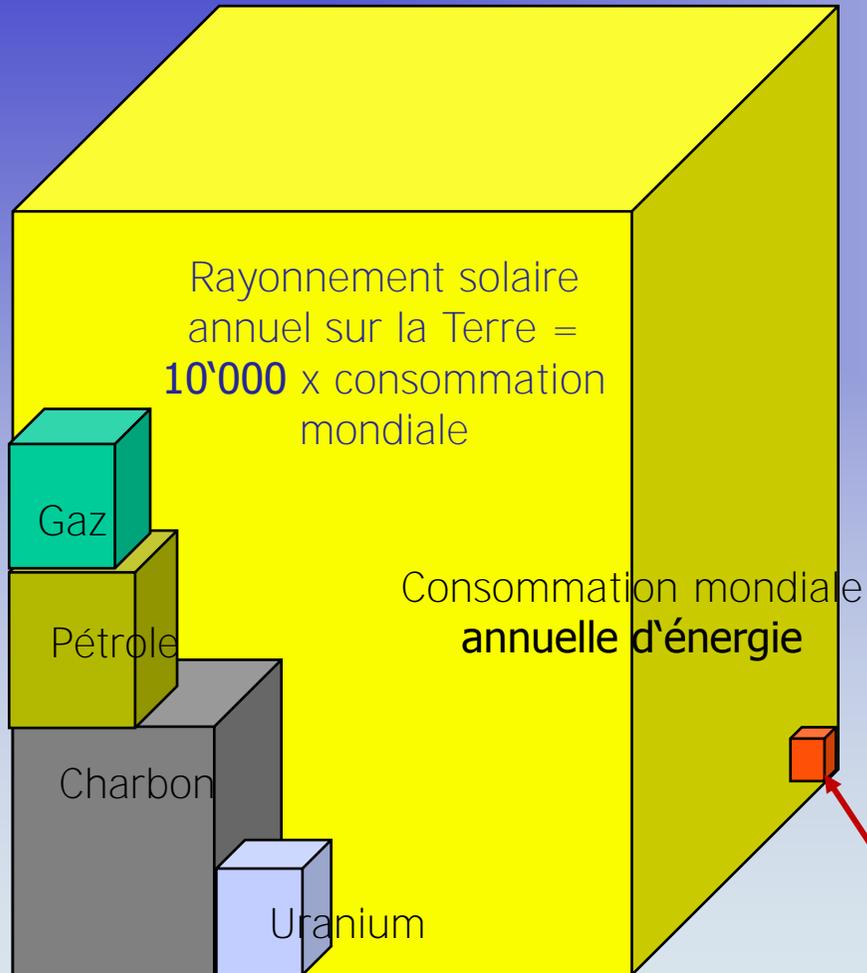
Directeur de l'Institut de Génie Thermique

Dr. Ing. en énergétique

Sommaire

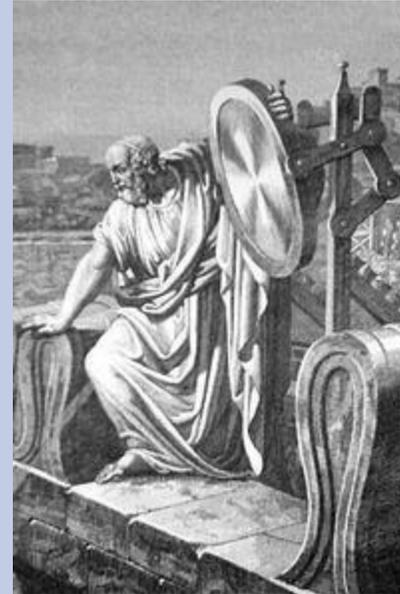
- Positionnement du thermique solaire à concentration
- Les technologies principales:
 - A miroirs de Fresnel
 - Cylindro-paraboliques
 - Tours
- Les centrales existantes et futures
- Le stockage, pourquoi et comment ?
- Les synergies et opportunités

Energie solaire



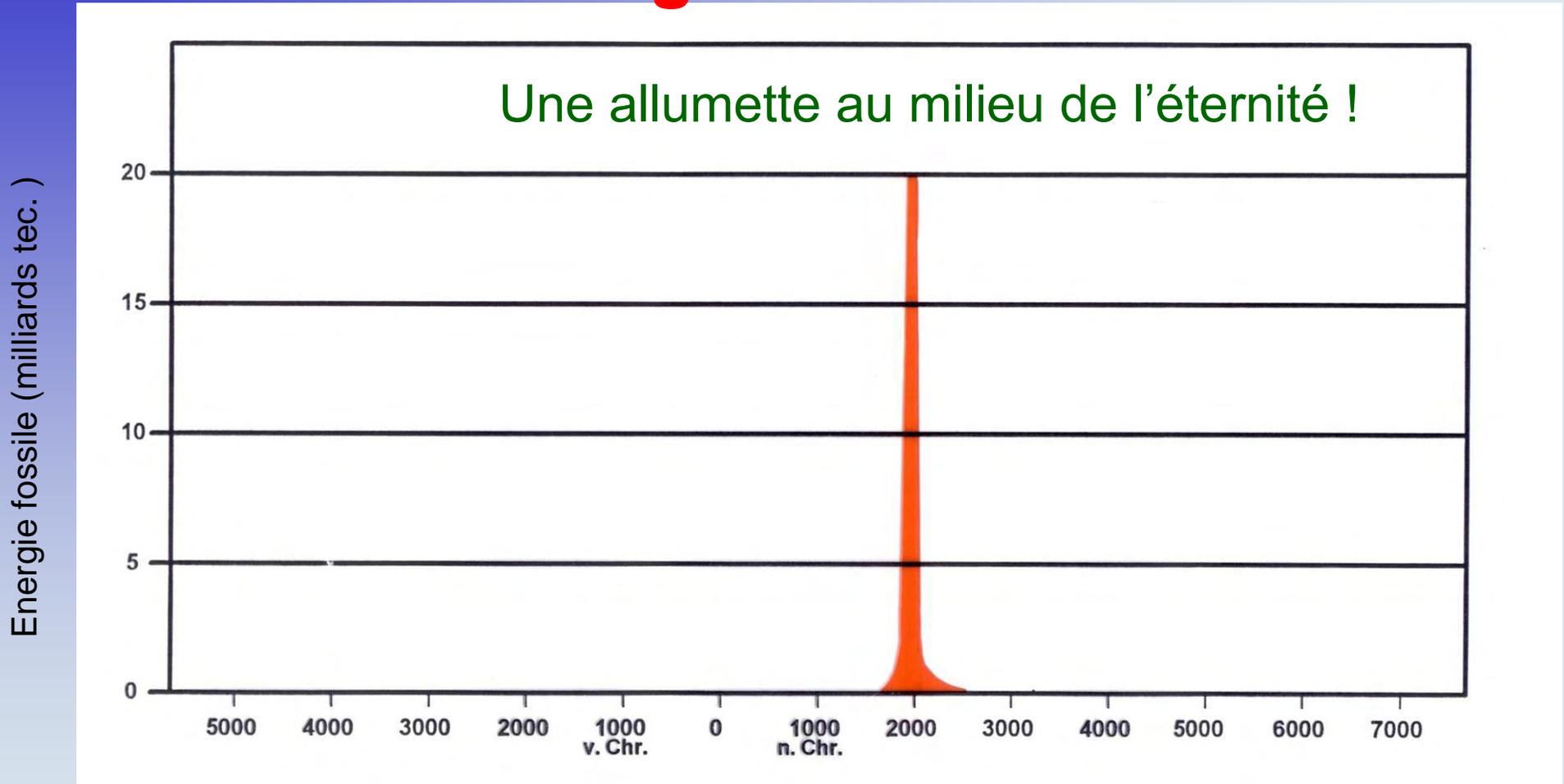
Activités humaines (06) env.: $140 \cdot 10^{12}$ kWh
(dont env. $1/10^{\text{eme}}$ en électricité)

Une histoire ancienne !



Miroir d' Archimède (250 avant JC)
Flamme olympique

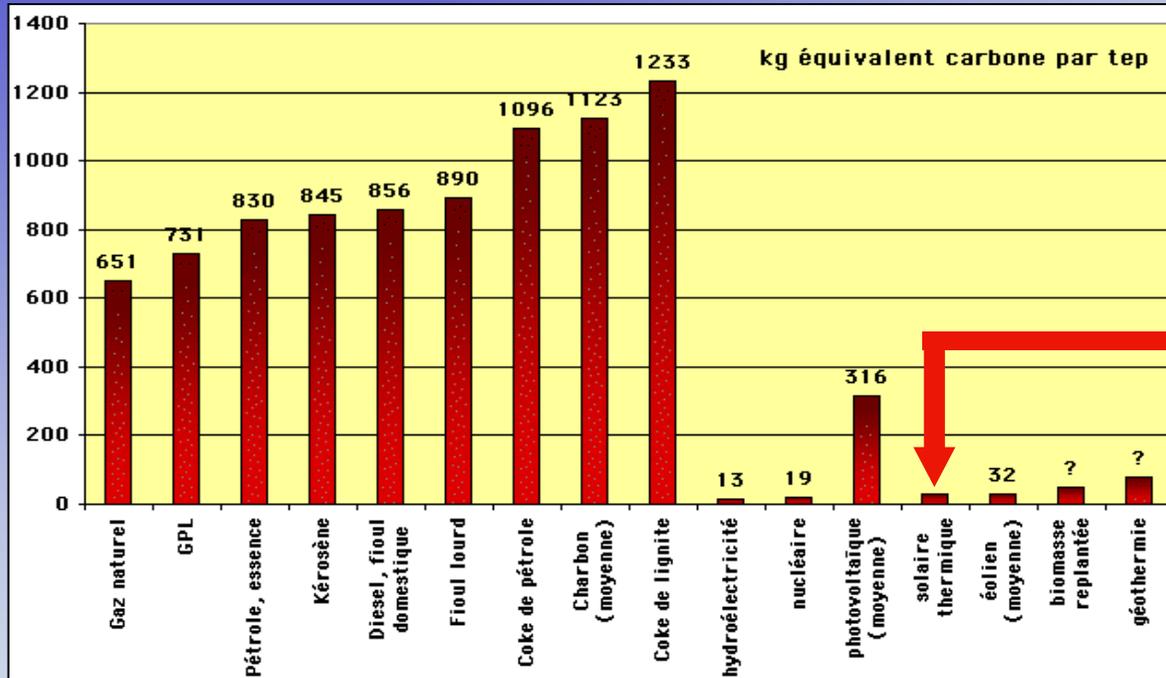
Une autre perspective à propos des énergies fossiles



1 tec = 1 tonne équivalent charbon (1 tec = 0.61 TEP)

Source: Energy Picture of the Future

Intérêt environnemental et social



| Filière | Emission CO ₂ [kg CO ₂ /MWhe] |
|-------------------|---|
| Charbon | 900 |
| Gaz C-C | 400 |
| Photovoltaïque | 100 |
| Solaire Thermique | <20 |
| Nucléaire | 6 |
| Hydraulique | 4 |

- Temps de retour énergétique: 5 mois
- Composants recyclables
- Création d'emplois: 1 MW_e installé = 2 emplois directs créés au minimum

Solaire thermique à concentration

- Systèmes qui concentrent le rayonnement solaire et le convertissent en énergie thermique à température élevée
- Utilisations:
 - Electricité (CSTC)
 - Procédés industriels
 - Dessalement
 - ...

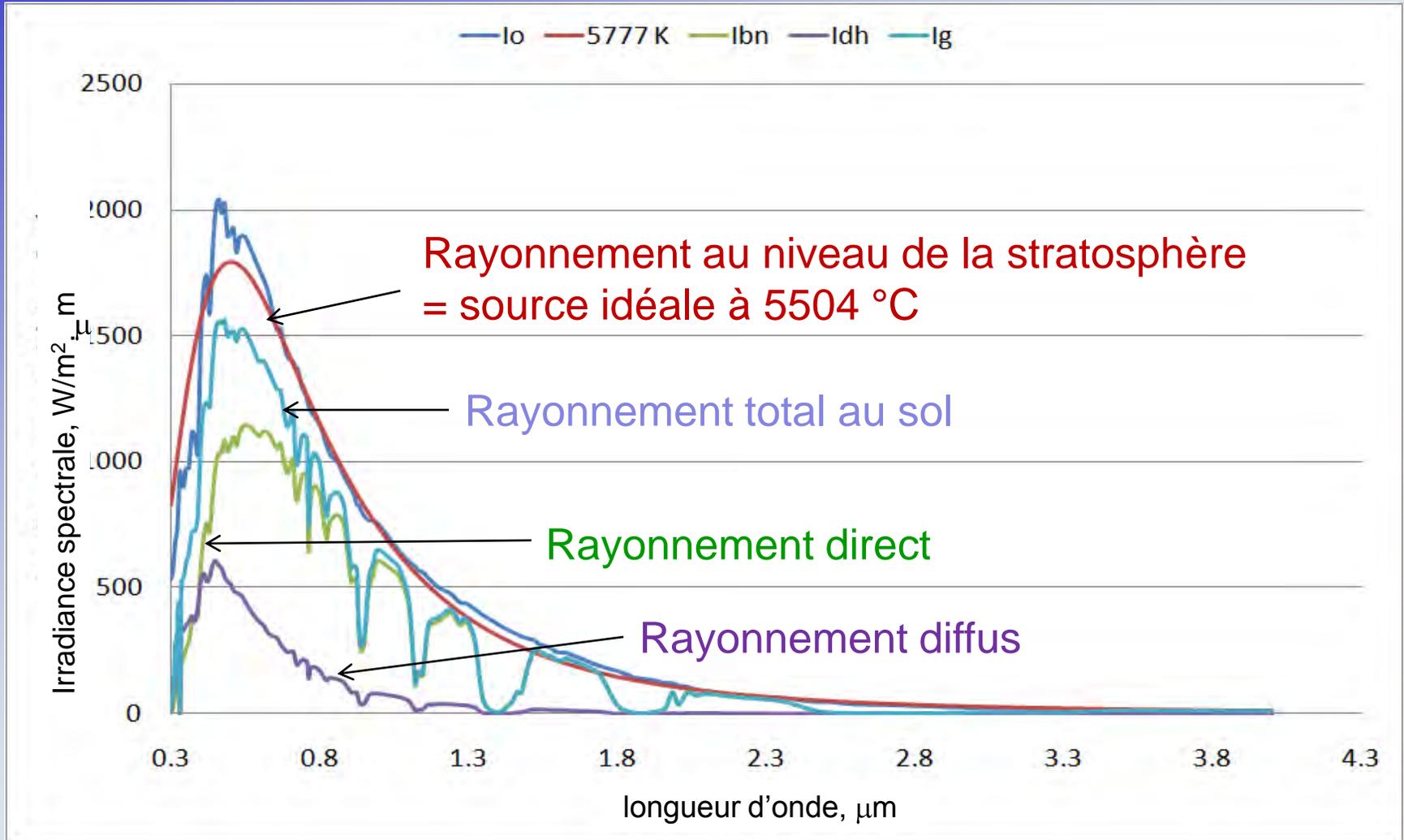
Energie solaire

- Abondante
- De haute qualité ($T_{\max} = 5000 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Variable dans le temps et l'espace
- Faible densité surfacique (7 à 8 kWh/m²/jour)

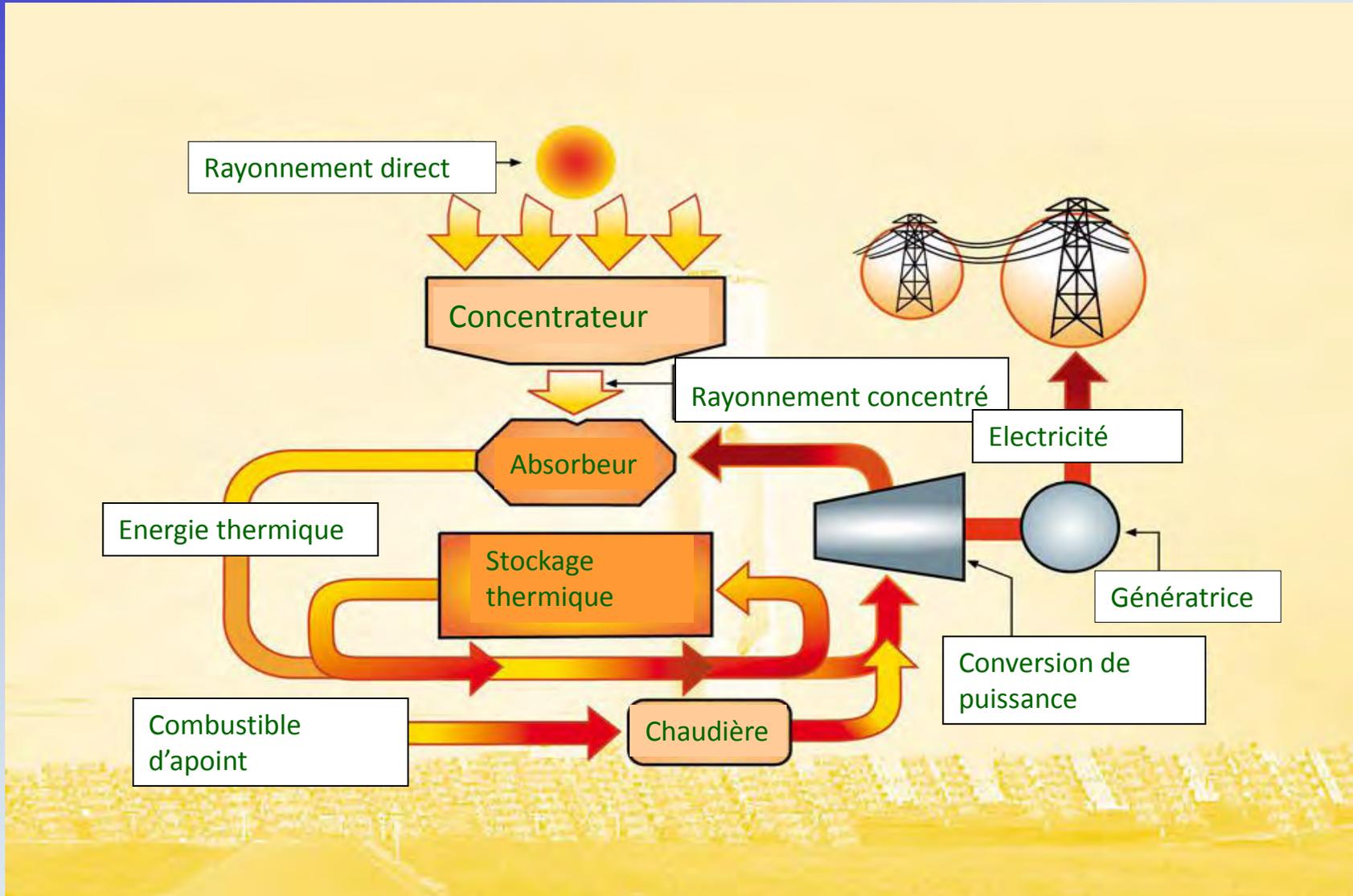
Questions clé

- Combien de ressource (kWh solaire) ?
- Quelle technologie ?
 - maturité, risque, évolution future,
 - rendement, facteur de disponibilité (stockage)
 - nombre d'unités ?
 - évacuation de la chaleur ($1 - \text{rendement}\%$), ressources en eau
 - investissement, retour direct et indirect sur l'investissement
 - financement
 - Etc.

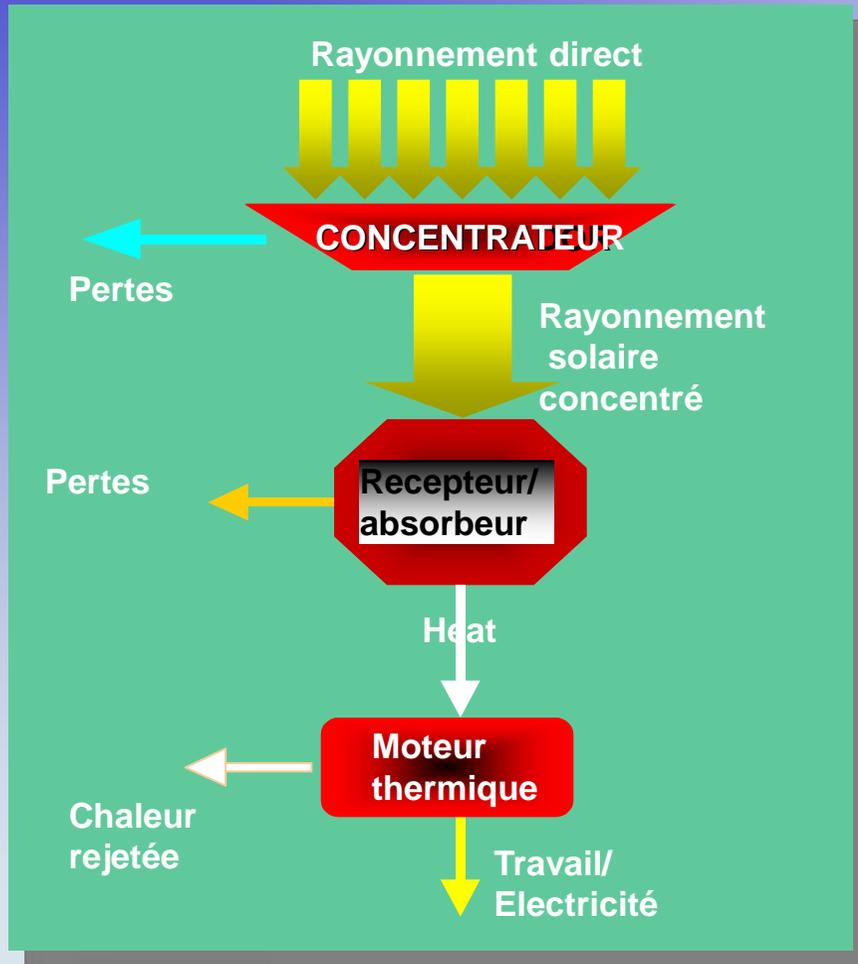
Rayonnement solaire



Configuration CSTC (CSP) de base

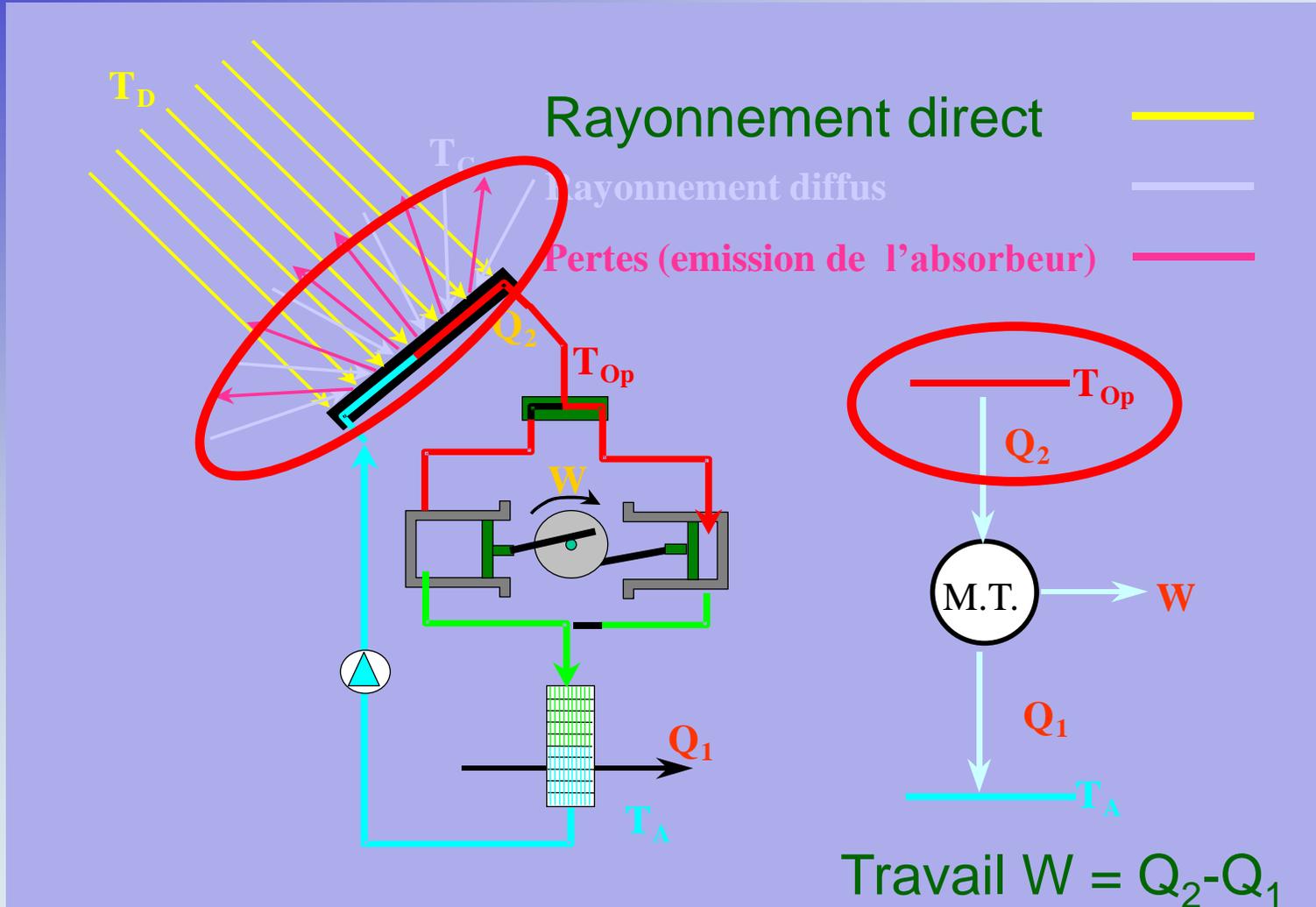


Le système de concentration idéal



- L'absorbeur convertit le rayonnement thermique en chaleur (énergie thermique)
- L'absorbeur idéal est un corps noir qui n'a que des pertes par rayonnement

Pourquoi concentrer l'énergie?

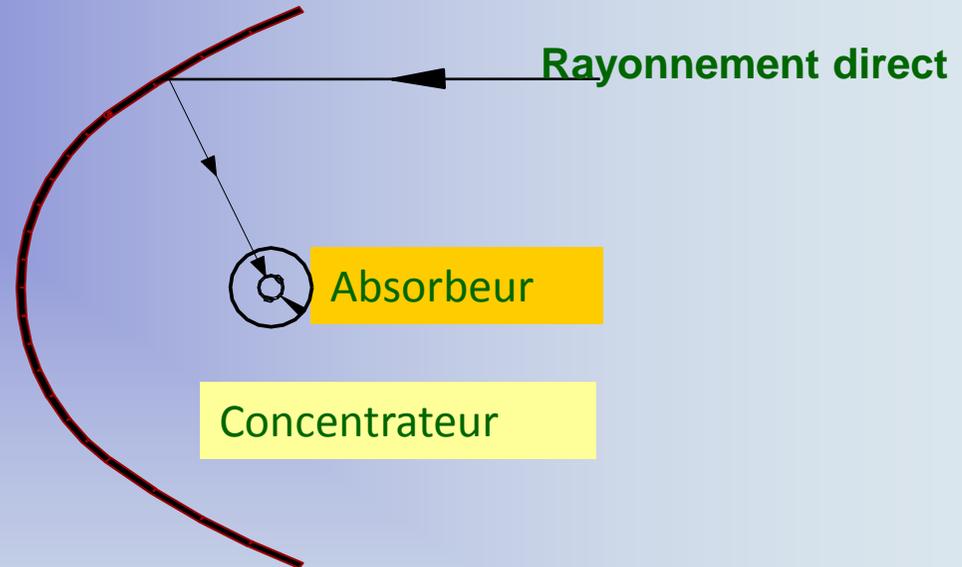


Rapport de concentration

$$C_g = \frac{A_c}{A_{abs}}$$

A_{abs} : aire de l'absorbeur

A_c : aire du collecteur



Linéaire, Fresnel: $C_g \sim 30$

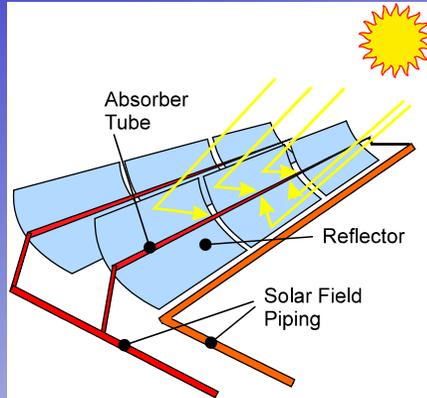
Cylindro-parabolique: $C_g \sim 80$

Héliostat : $C_g > 2000$

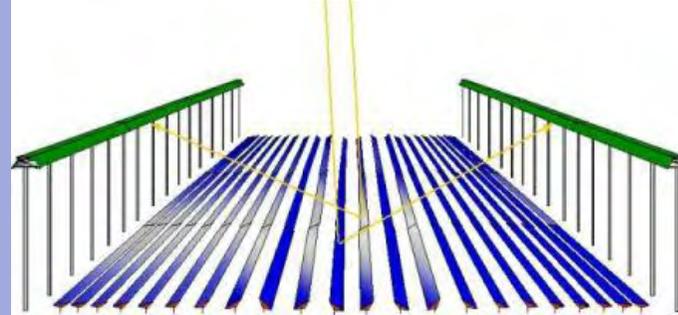
Concentrateur

- Le rendement maximal est obtenu pour l'absorption effective maximale = compromis entre plusieurs effets:
 - Plus la concentration est élevée ($C \cdot I$) et meilleur est le rendement optique.
 - Plus la température de l'absorbeur est élevée et plus les pertes par rayonnement augmentent (en T^4) ce qui diminue le rendement.
 - Plus la température du fluide de travail est élevée et meilleur est le rendement mécanique.

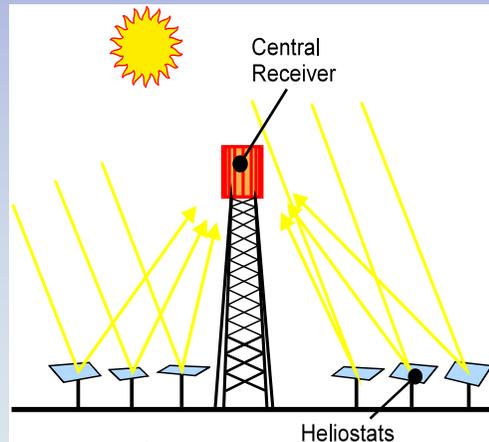
Principales technologies de concentration



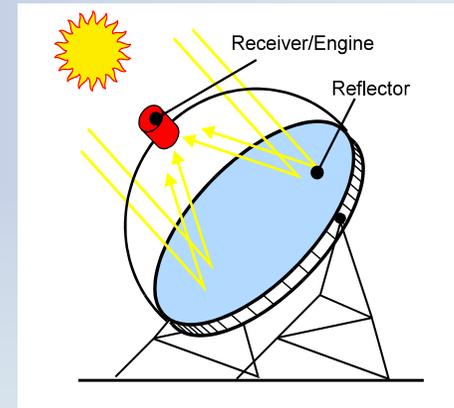
Cylindro-parabolique



Fresnel



Heliostats + Tour

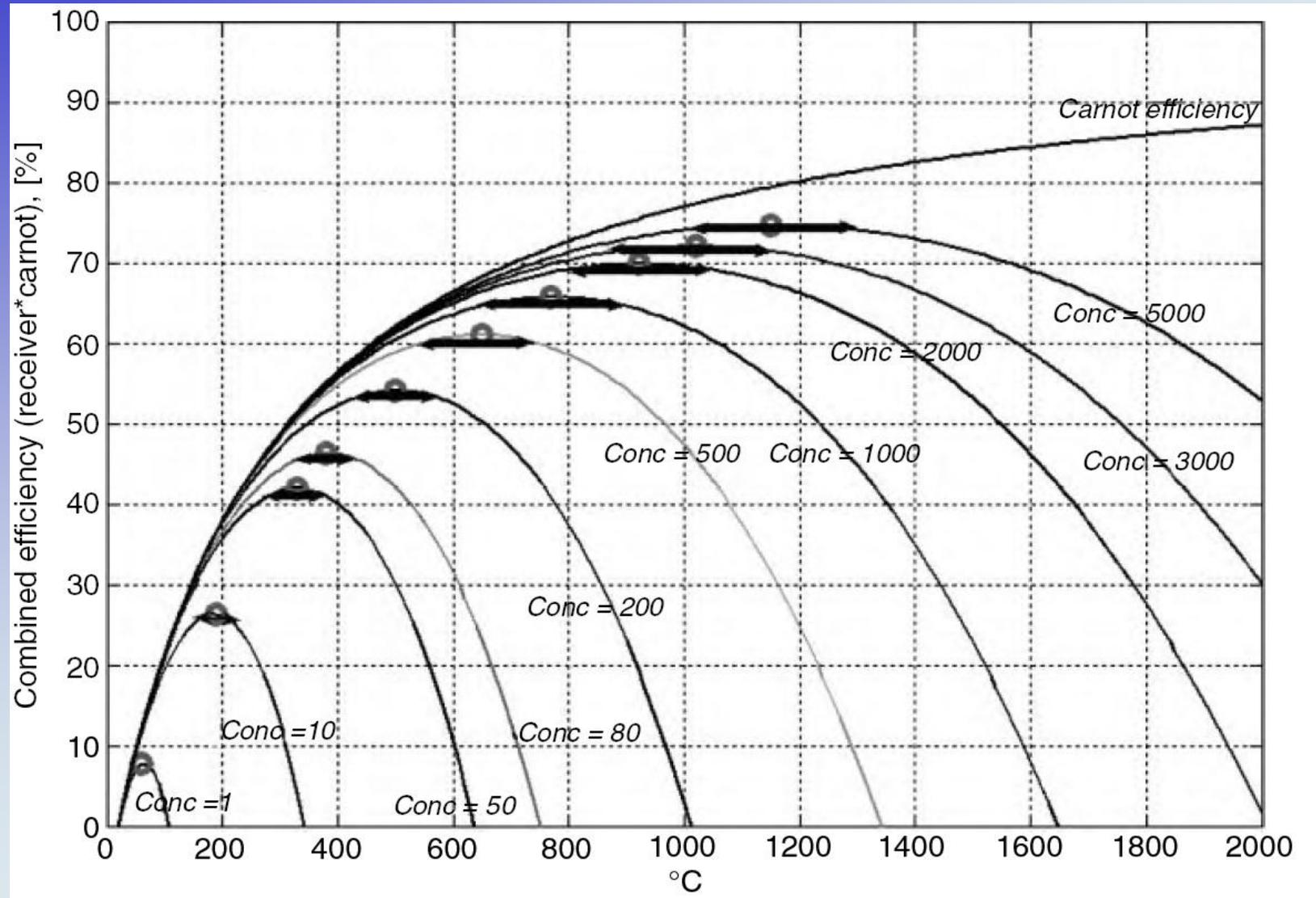


Paraboloïdes

Facteurs de concentration

- Linéaire, Fresnel: $C_g \sim 30$ (exemple: 5 megawatt (MW) Kimberlina en Californie), $T_{max} = 400^\circ\text{C}$
- Linéaire , Cylindro-parabolique: $C_g \sim 80$ – Ex: Solar Energy Generating Systems (SEGS) – 9 centrales de 44, 150 et 160 Mwe, $T_{max} = 400^\circ\text{C}$ limite du fluide thermique
- Central, Héliostat : $C_g > 2000$, $T_{max} = 1000^\circ\text{C}$
Ex: Planta Solar 20 (PS20), Andalousie

Rendement théorique du concentrateur idéal



Concentrateurs cylindro-paraboliques

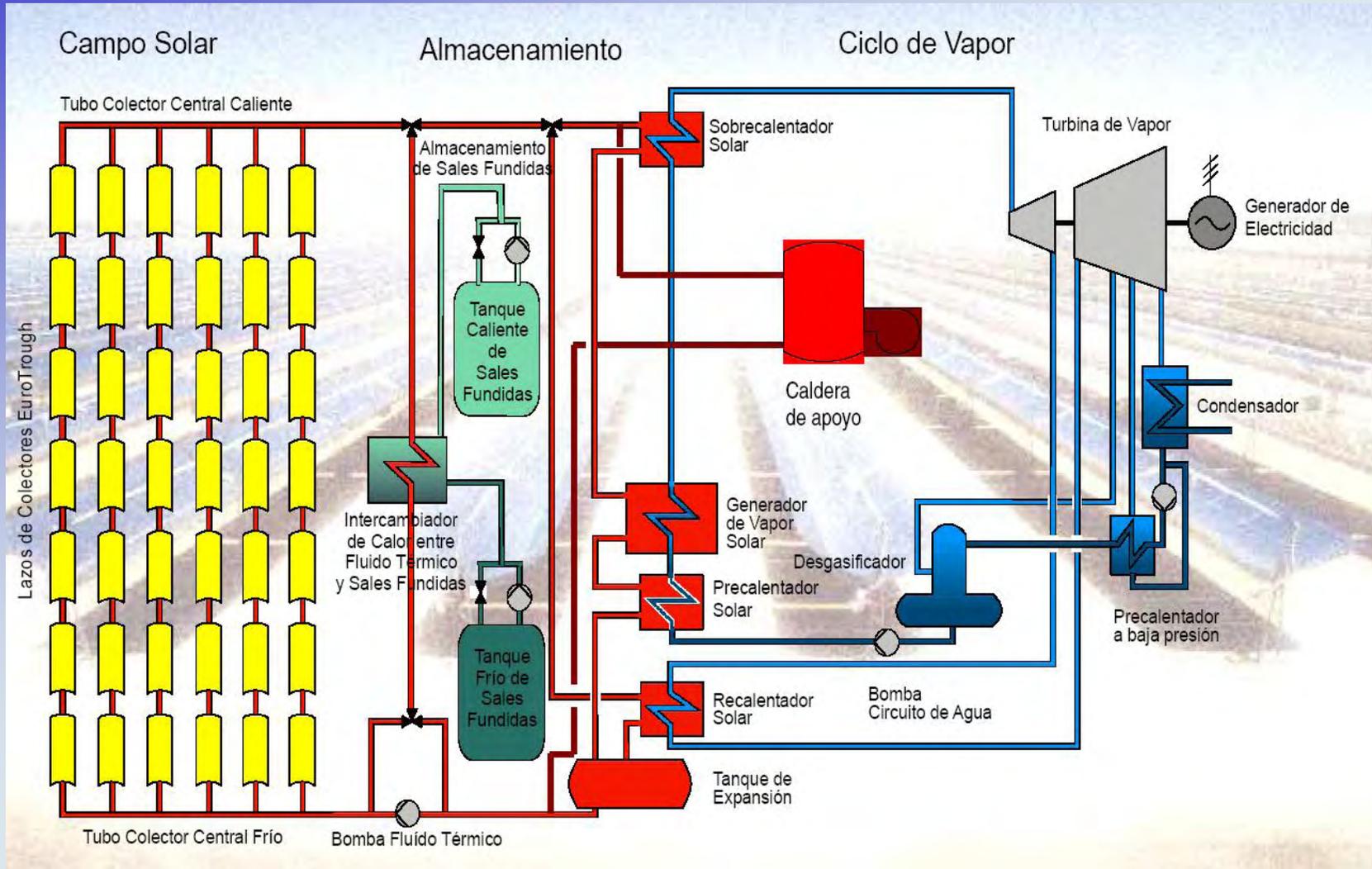


Schott PTR-70



Solel UVAC-2 y UVAC-3

Exemple de centrale avec stockage et chaudière d'appoint



Cylindro-Parabolique – pour et contre

- Pour:

- Technologie mature

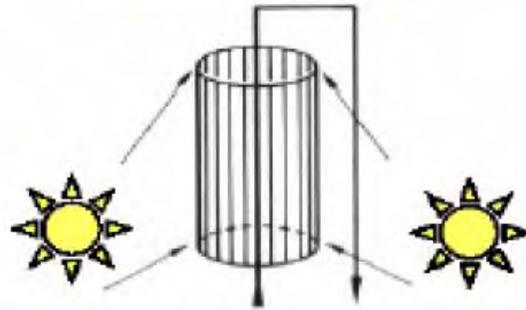
- Preuve commerciale, plus de 500 MW installé
- Expérience de longue durée: 9 unités (SEGS) 20 ans de fonctionnement.

- Contre:

- Peu de fabricants pour les composants clé (tubes absorbeurs, miroirs) → compétence limitée
- Temperature max. limitée → rendement limité
- Fluide de transfert coûteux avec risque de pollution
- Options de stockage limitées

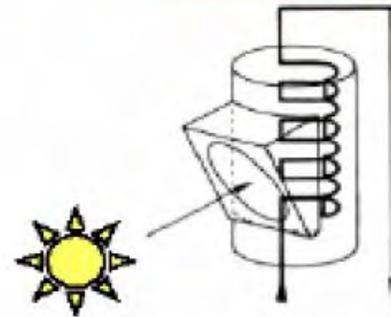
Types d'héliostats

External



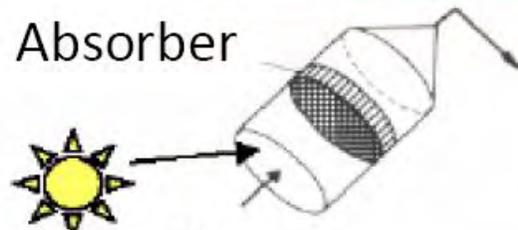
Working fluid

Cavity



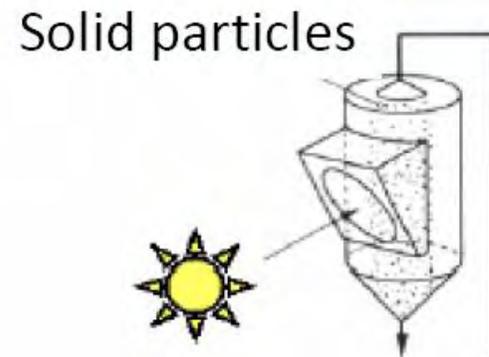
Working fluid

Volumetric

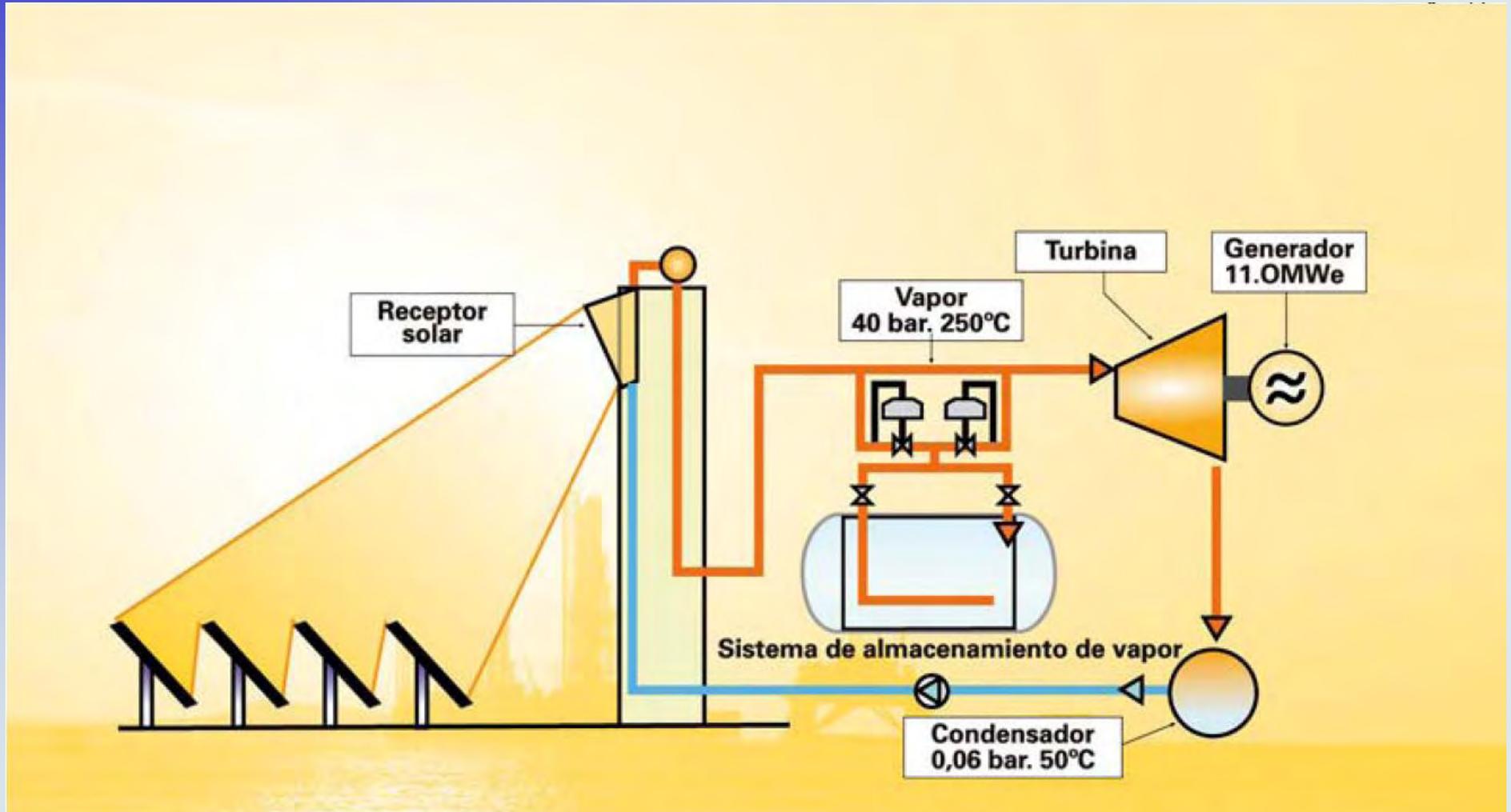


Air intake

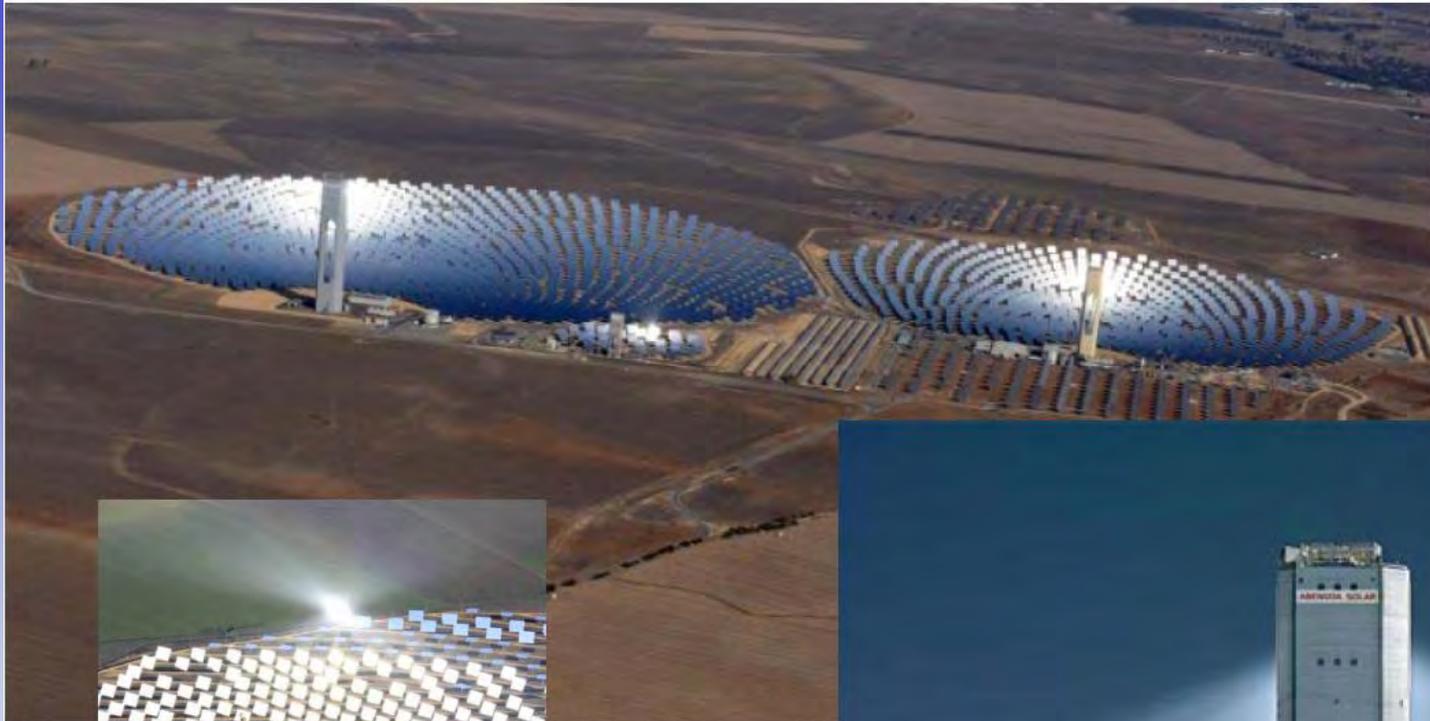
(Fluidized bed)



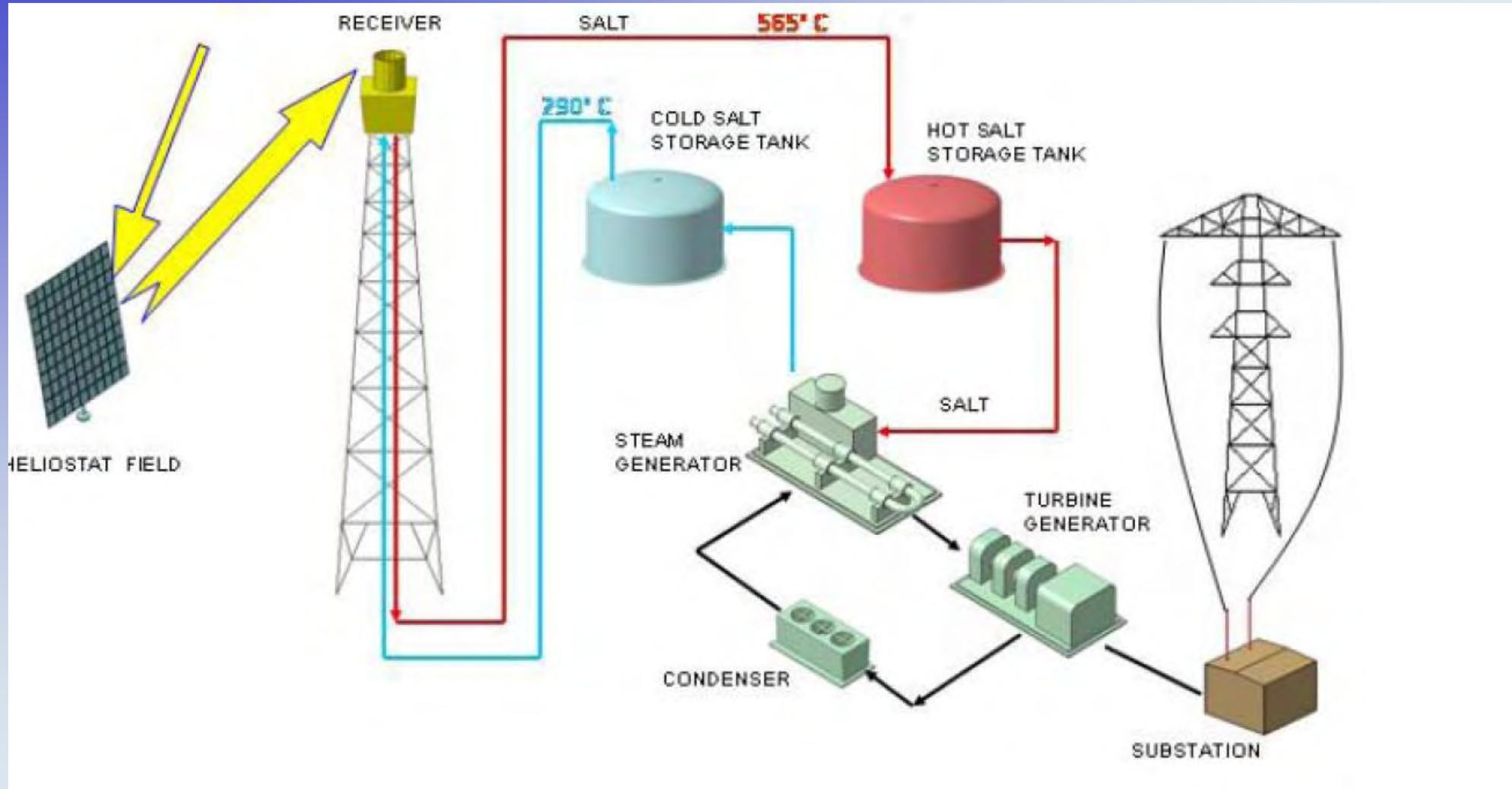
Exemple: PS10



PS10 et PS20 (Espagne)



GEMA Solar: Tour avec sels fondus



GEMA Solar (Espagne)



GEMA Solar - Caractéristiques

| Design Data | |
|---|------------------------|
| Total Reflective Area | 285.200 m ² |
| Number of heliostats | 2480 |
| Total Area covered by Heliostat Field | 142.31 Ha |
| Thermal output of the Receiver | 120 MWt |
| Tower height | 120 m |
| Heat Storage Capacity (equivalent to turbine operation) | 15 hours |
| Steam Turbine power | 17 MWe |
| Natural Gas Thermal Power | 16 MWt |

| Projected Operative Figures | |
|--|-------------------------|
| Direct solar radiation over Heliostats | 2062 kWh/m ² |
| Annual Energy sales | 96.400 MWhe |
| Contribution of Natural Gas | 15% |
| Capacity utilization | 65 % |
| CO ₂ savings | 23.000 – 85.000 t/y |

Héliostats – Pour et Contre

Pour:

- Atteinte de températures élevées → rendement
- Intégration industrielle: disponibilité de la plupart des composants
- Nombreuses options technologiques
- Démonstration technique établie
- Options de stockage thermique multiples
- Grand potentiel de réduction des coûts et d'augmentation du rendement.

Contre:

- Complexité
- Peu d'expérience commerciale, maturité

Liste des projets: réalisés, en construction, en projet

- Total en fonctionnement (2010): 940 MW (USA, Espagne etc.)
- En construction: 1934 MW (USA, Espagne)
 - 370 MW - Ivanpah Solar Power Facility (californie) le plus grand projet CSTC en construction – Tour
 - Espagne: 26 centrales , 50 à 100 MW, Paraboliques, ENV. 1000 MW prévus pour fin 2010
- Annoncés 13.9 GW USA: 9'600, Maroc: 2'000, Chine; 2'000, Espagne: 1'080, Autres: 2'800

CSTC en fonctionnement

| P | MW | Nom | Pays | Lieu | Technologie |
|---|-----|---|-------|--------------------------------------|----------------------------|
| | 354 | Solar Energy Generating Systems | USA | Mojave Desert California | P (1984- 1991) 9 unités |
| | 150 | Solnova | Spain | Seville | P 3 unités |
| | 100 | Andasol solar power station | Spain | Granada | P 2 unités |
| | 64 | Nevada Solar One | USA | Boulder City, Nevada | P |
| | 50 | Ibersol Ciudad Real | Spain | Puertollano, Ciudad Real | P |
| | 50 | Alvarado I | Spain | Badajoz | P |
| | 50 | Extresol 1 | Spain | Torre de Miguel Sesmero (Badajoz) | P |
| | 50 | La Florida | Spain | Alvarado (Badajoz) | P |
| | 20 | Beni Mathar | Maroc | Oujda | P, cycle combiné |
| | 20 | PS20 solar power tower | Spain | Seville | T |
| | 17 | Yazd integrated solar combined cycle power station | Iran | Yazd | T |
| | 11 | PS10 solar power tower | Spain | Seville | T |
| | 5 | Kimberlina Solar Thermal Energy Plant | USA | Bakersfield, California | F |
| | 5 | Sierra SunTower | USA | Lancaster, California | T |
| | 5 | Archimede solar power plant | Italy | Syracuse, Sicile | P |

Fluides de travail

1. Fluide de transfert (huile, eau/vapeur, sel fondu)
2. Fluide de stockage (sel fondu, PCM...)

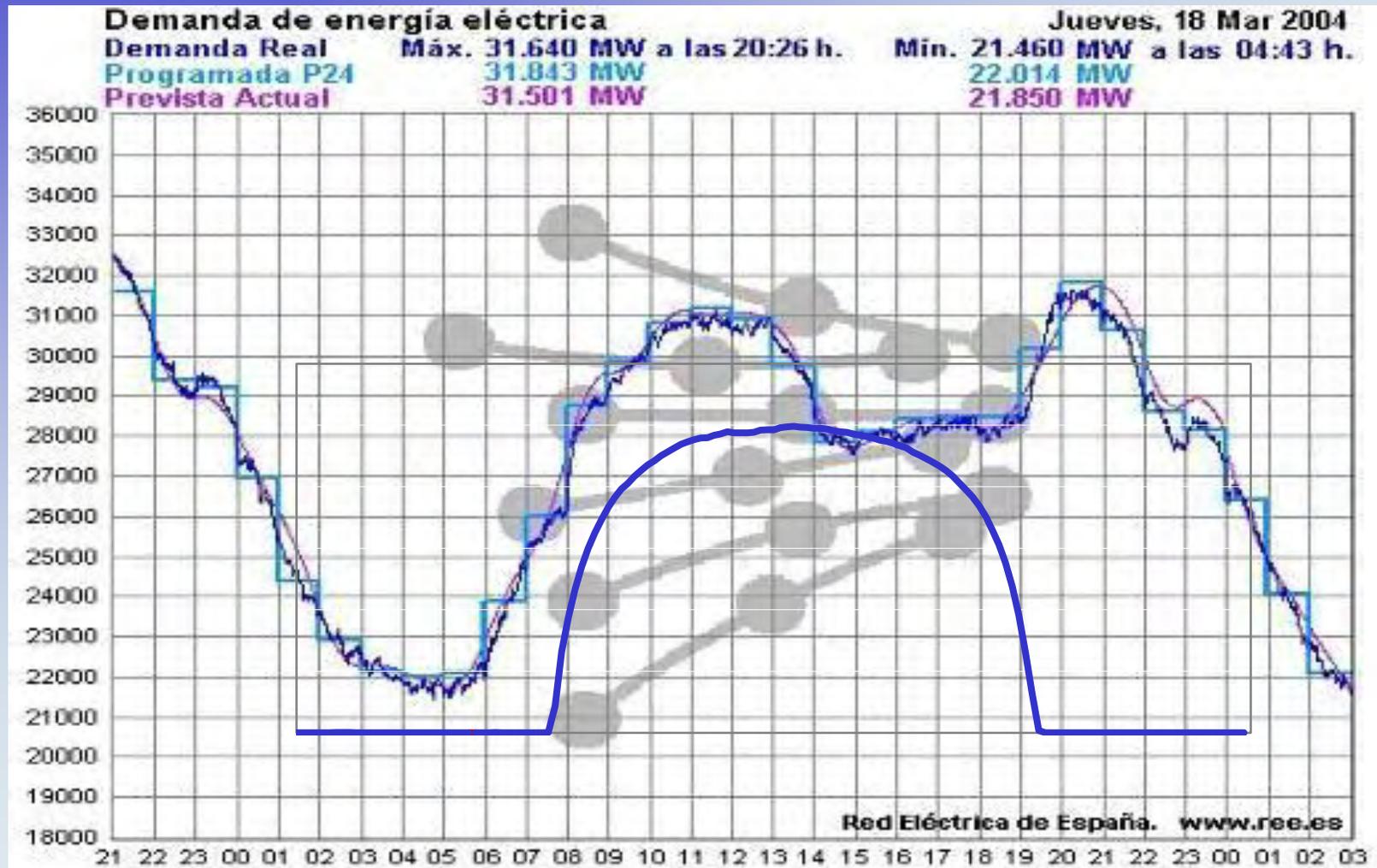
Critères:

- Grande conductivité
- Faible viscosité
- Stabilité aux températures de fonctionnement
- Delta T (température maxi – Température mini)
- Prix

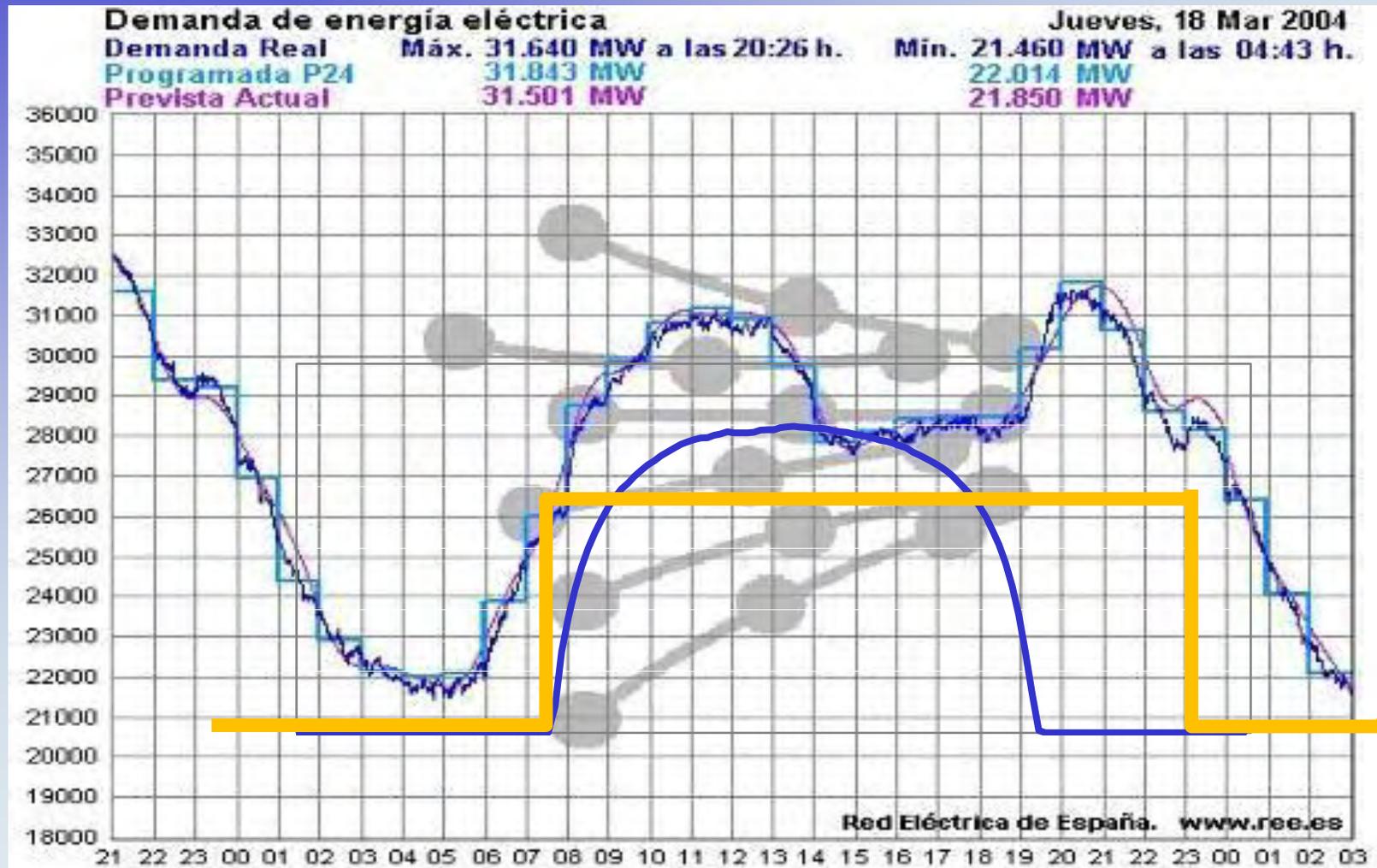
Pourquoi le stockage thermique?

- Stabilise le fonctionnement (moins d'arrêts)
- Augmente la disponibilité de la centrale (nombre d'heures de fonctionnement)
- Permet de suivre la demande
- Réduit les coûts du kWh (tant que le stockage est moins coûteux que l'augmentation de la puissance)
- Coût additionnel: 20 à 25 €/kWh de stockage

CST sans stockage: ex. de l'Espagne



Solaire avec stockage



Stockage thermique

- Une fraction de l'énergie thermique produite au niveau de l'absorbeur est stockée dans un matériau. Les formes possibles sont:
 - La chaleur sensible (capacité calorifique du matériau) . La plus courante: sels fondus
 - La chaleur latente (énergie de changement de phase). Liquide -> vapeur ou Solide -> liquide
 - L'énergie de liaison chimique (en développement):
 - Réactions réversibles
 - Dissociation de l'eau ou du méthane pour production d'hydrogène

Classement des types de stockage

- Par utilisation
 - Court terme
 - Apporte une stabilité de fonctionnement (nuages)
 - Moyen terme
 - Augmente la disponibilité (capacity factor)
 - Permet de suivre la demande de charge
- Par type
 - Direct (même fluide que le fluide de travail, pas besoin d'échangeur thermique)
 - Indirect (matériau différent, nécessite un échangeur thermique entre le stock et le fluide)

Exigences techniques pour le matériau de stockage

- Grande densité énergétique (par unité de masse ou de volume)
- Bonne conductivité thermique
- Bon transfert de chaleur entre le fluide de travail et le matériau de stockage
- Stabilité mécanique et thermique
- Mechanical and chemical stability
- Compabilité chimique avec le fluide de travail et l'échangeur de chaleur
- Réversibilité sur un grand nombre de cycles
- Facilité de contrôle.

Options de stockage thermique

| Storage Medium | Temperature | | Average density (kg/m ³) | Average heat conductivity (W/mK) | Average heat capacity (kJ/kgK) | Volume specific heat capacity (kWh/m ³) | Media costs per kg (\$/kg) | Media costs per kWh _t (\$/kWh _t) |
|--|-------------|----------|---|-------------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|--|
| | Cold (°C) | Hot (°C) | | | | | | |
| Solid media | | | | | | | | |
| Sand-rock-mineral oil | 200 | 300 | 1,700 | 1.0 | 1.30 | 60 | 0.15 | 4.2 |
| Reinforced concrete | 200 | 400 | 2,200 | 1.5 | 0.85 | 100 | 0.05 | 1.0 |
| NaCl (solid) | 200 | 500 | 2,160 | 7.0 | 0.85 | 150 | 0.15 | 1.5 |
| Cast iron | 200 | 400 | 7,200 | 37.0 | 0.56 | 160 | 1.00 | 32.0 |
| Cast steel | 200 | 700 | 7,800 | 40.0 | 0.60 | 450 | 5.00 | 60.0 |
| Silica fire bricks | 200 | 700 | 1,820 | 1.5 | 1.00 | 150 | 1.00 | 7.0 |
| Magnesia fire bricks | 200 | 1,200 | 3,000 | 5.0 | 1.15 | 600 | 2.00 | 6.0 |
| Liquid media | | | | | | | | |
| Mineral oil | 200 | 300 | 770 | 0.12 | 2.6 | 55 | 0.30 | 4.2 |
| Synthetic oil | 250 | 350 | 900 | 0.11 | 2.3 | 57 | 3.00 | 43.0 |
| Silicone oil | 300 | 400 | 900 | 0.10 | 2.1 | 52 | 5.00 | 80.0 |
| Nitrite salts | 250 | 450 | 1,825 | 0.57 | 1.5 | 152 | 1.00 | 12.0 |
| Nitrate salts | 265 | 565 | 1,870 | 0.52 | 1.6 | 250 | 0.70 | 5.2 |
| Carbonate salts | 450 | 850 | 2,100 | 2.0 | 1.8 | 430 | 2.40 | 11.0 |
| Liquid sodium | 270 | 530 | 850 | 71.0 | 1.3 | 80 | 2.00 | 21.0 |
| Phase change media | | | | | | | | |
| NaNO ₃ | 308 | | 2,257 | 0.5 | 200 | 125 | 0.20 | 3.6 |
| KNO ₃ | 333 | | 2,110 | 0.5 | 267 | 156 | 0.30 | 4.1 |
| KOH | 380 | | 2,044 | 0.5 | 150 | 85 | 1.00 | 24.0 |
| Salt-ceramics (NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO) | 500-850 | | 2,600 | 5.0 | 420 | 300 | 2.00 | 17.0 |
| NaCl | 802 | | 2,160 | 5.0 | 520 | 280 | 0.15 | 1.2 |
| Na ₂ CO ₃ | 854 | | 2,533 | 2.0 | 276 | 194 | 0.20 | 2.6 |
| K ₂ CO ₃ | 897 | | 2,290 | 2.0 | 236 | 150 | 0.60 | 9.1 |

Expériences de stockage thermique

| Project | Type | Storage Medium | Cooling Loop | Nominal Temperature | | Storage Concept | Tank Volume (m ³) | Thermal Capacity (MWh _t) |
|---|---------------------|-------------------|----------------|---------------------|----------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | Cold (°C) | Hot (°C) | | | |
| Irrigation pump Coolidge, AZ, USA | Parabolic Trough | Oil | Oil | 200 | 228 | 1 Tank Thermocline | 114 | 3 |
| IEA-SSPS Almería, Spain | Parabolic Trough | Oil | Oil | 225 | 295 | 1 Tank Thermocline | 200 | 5 |
| SEGS I Daggett, CA, USA | Parabolic Trough | Oil | Oil | 240 | 307 | Cold-Tank Hot-Tank | 4160 4540 | 120 |
| IEA-SSPS Almería, Spain | Parabolic Trough | Oil Cast Iron | Oil | 225 | 295 | 1 Dual Medium Tank | 100 | 4 |
| Solar One Barstow, CA, USA | Central Receiver | Oil/Sand/ Rock | Steam | 224 | 304 | 1 Dual Medium Tank | 3460 | 182 |
| CESA-1 Almería, Spain | Central Receiver | Liquid Salt | Steam | 220 | 340 | Cold-Tank Hot-Tank | 200 200 | 12 |
| THEMIS Targassonne, France | Central Receiver | Liquid Salt | Liquid Salt | 250 | 450 | Cold-Tank Hot-Tank | 310 310 | 40 |
| Solar Two Barstow, CA, USA | Central Receiver | Liquid Salt | Liquid Salt | 275 | 565 | Cold-Tank Hot-Tank | 875 875 | 110 |

Installations commerciales avec stockage

- Court terme (quelques minutes): eau pressurisée
 - PS10 and PS20
- Moyen terme (quelques heures): sels fondus, 2 réservoirs
 - Direct (CRS) – Gema Solar (Solar Tres)
 - Indirect (PT) – Andasol I

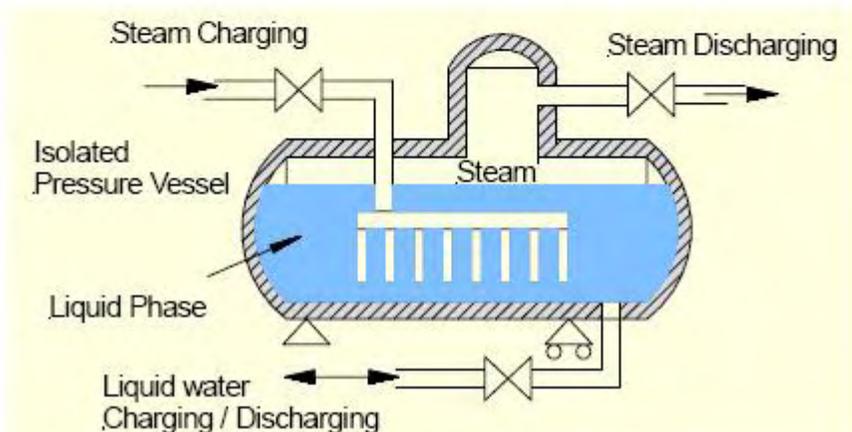
Stokage à court terme

PS10 / PS20

- Réservoir à eau pressurisée

Caractéristiques principales

- Pression maxi: 40 bar
- Capacité du stock: 20 MWh (50 min à 50% charge)
- Volume total: 600 m³
- 4 réservoirs, fonctionnement en séquence

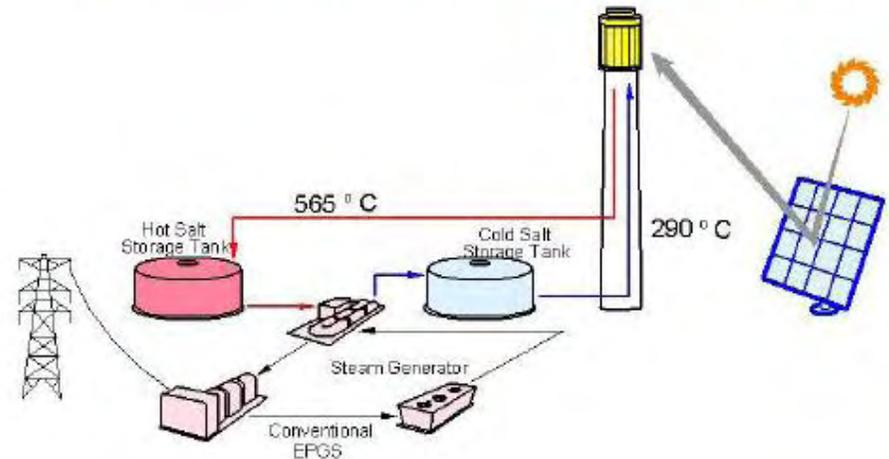


Stockage à sels fondus, 2 réservoirs, direct

- Stock thermique proportionnel à ΔT
- Stock chaud – Stock froid
- Commercial (utilisé largement dans l'industrie)

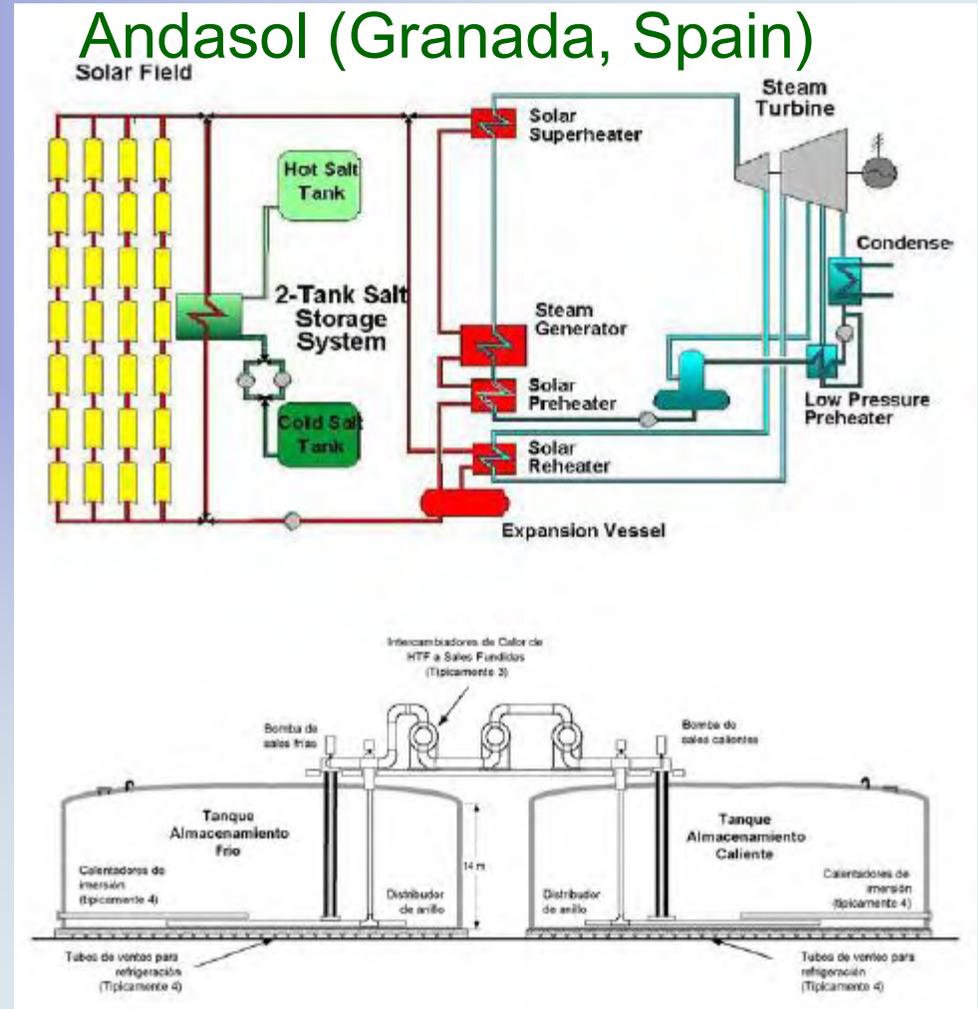
- T chaud limité par la décomposition du sel
- T froid limité par le point de fusion
- Préchauffage nécessaire
- Equipement couteux (pompes, vannes...)

Solar Two (Barstow, CA)



Stockage à sel fondus, indirect

- Huile thermique comme fluide de transfert
 - Grande capacité de stockage
- Besoin d'un échangeur intermédiaire huile – sel fondu
 - Temp. de fusion = 220 °C
 - Temp. chaud limitée par l'huile
 - Volumes élevés
 - Coûts d'investissements plus élevés.



Andasol - Caractéristiques techniques du stockage.

- Type: 2-réservoirs, sels fondus
- Fluide: Mélange de nitrates (60% NaNO₃ et 40% KNO₃)
- Point de fusion: 223°C
- Capacité du stock: 1,010 MWh (~7.5 hrs full load operation)
- Taille du réservoir: Hauteur 14 m diamètre 37 m
- Masse de sel: 27,500 tonnes
- Débit: 953 kg/s
- Température côté froid: 292° C
- Température côté chaud: 386°C

ANDASOL: vue des deux réservoirs



Coûts et bénéfices du stockage

- Améliore le contrôle et le fonctionnement de la centrale en élargissant l'éventail des stratégies de fonctionnement
- Facilite l'équilibrage du réseau (« dispatching »)
- Avec une conception adéquate peut améliorer aussi:
 - Le rendement global
 - La rentabilité du projet
- Augmente la durée de vie de l'équipement (en réduisant le nombre de démarages et d'arrêts)
- **Augmente l'investissement**
 - Champ de captage solaire plus grand
 - Réservoirs, échangeurs, MCR pour sels fondus, sécurité...
- **Augmente les coûts de fonctionnement et maintenance**

Centrales solaires hybrides

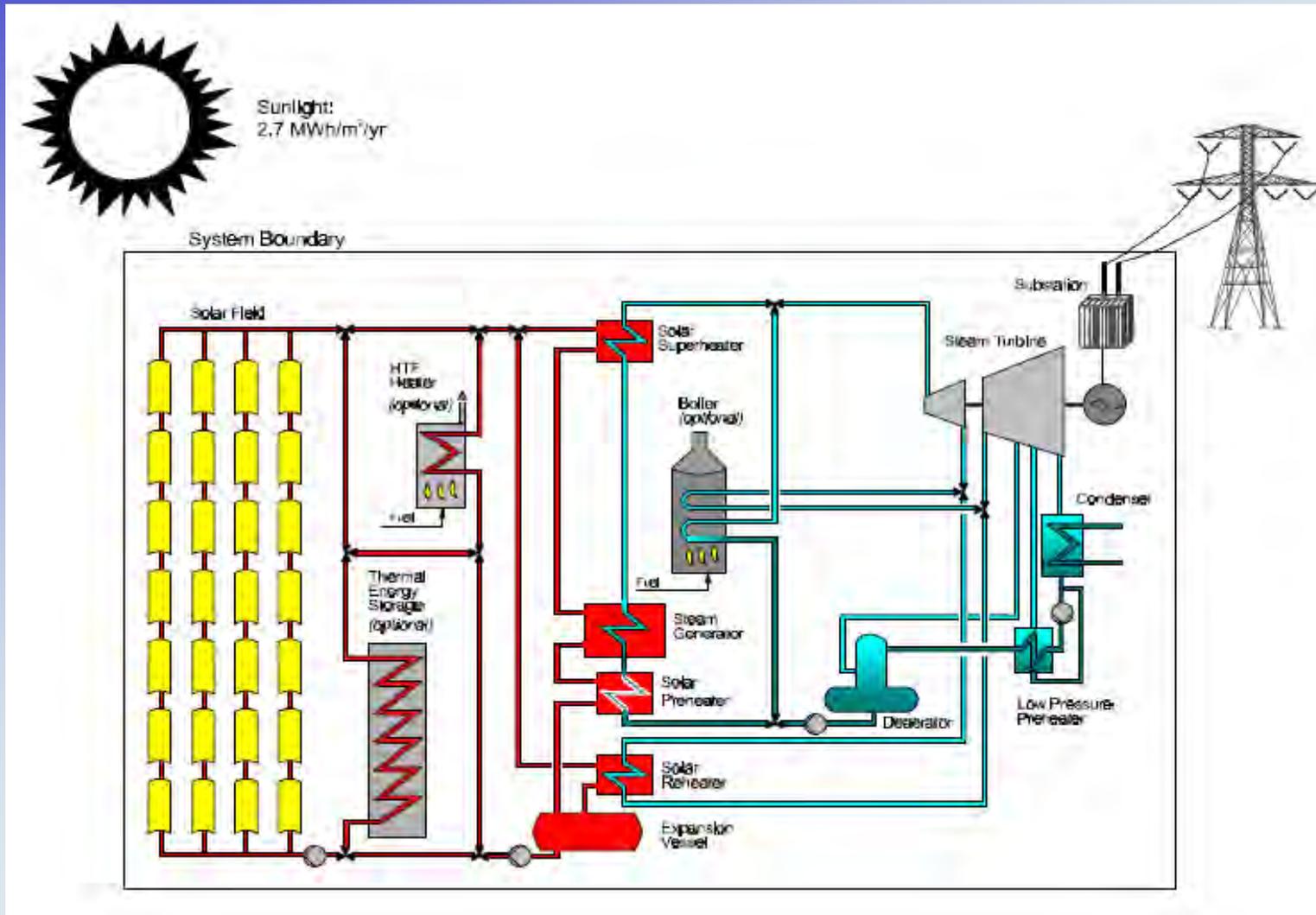
Deux sources d'énergie:

- Solaire
- Fossile ou renouvelable: en appoint

Avantages:

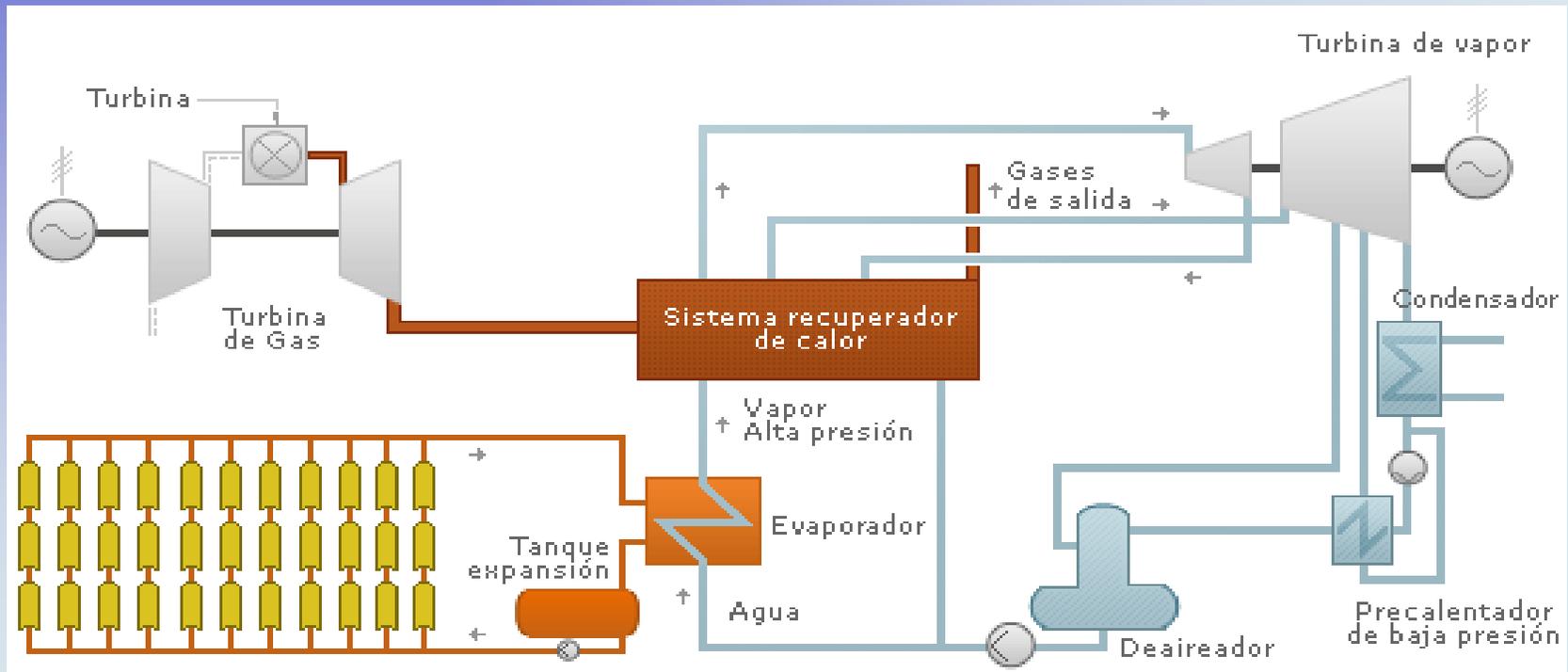
- Améliore le fonctionnement durant les transitoires
- Facilite le démarrage de la turbine
- Réduit le nombre d'arrêts de la turbine
- Augmente la disponibilité (facteur d'utilisation)
- Peut servir à maintenir la température des fluides de transfert et de stockage

Exemple: SEGS 30 MW



Solaire intégré dans un cycle combiné

- Exemple: Beni Mathar, 20 MW Solaire (472 MW total)



Hybridation, coûts et bénéfices

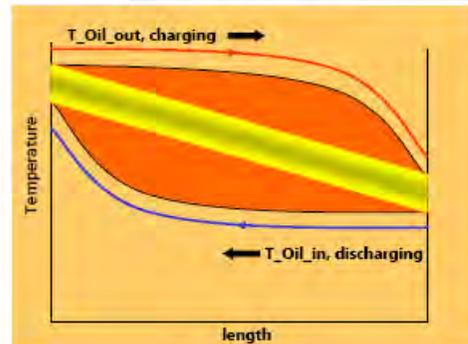
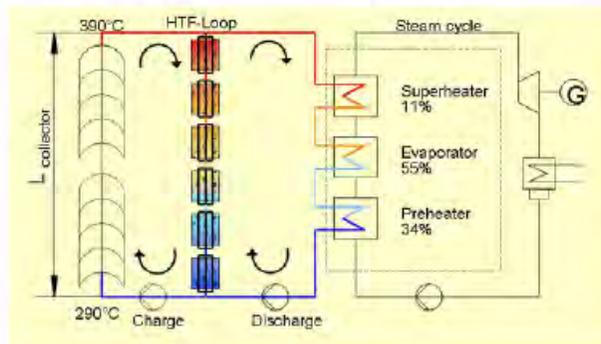
- Améliore le contrôle et le fonctionnement
- Facilite l'équilibrage du réseau (« dispatching »)
- Améliore le rendement global
- Améliore la disponibilité
- Améliore la profitabilité
- Allonge la durée de vie
- Augmente les coûts d'investissement et de fonctionnement
- Emissions de CO₂

Projets de Ra&D: stockage

Selected projects and RTD activities Concrete Storage for Trough Plants



- dual medium indirect storage system
- current RTD project of   
- main emphasis to minimize embedded HX
- modular and scalable design
- 2 year operation of 350 kWh at PSA
- storage integration is specific issue
- expected investment cost > 20 €/kWh

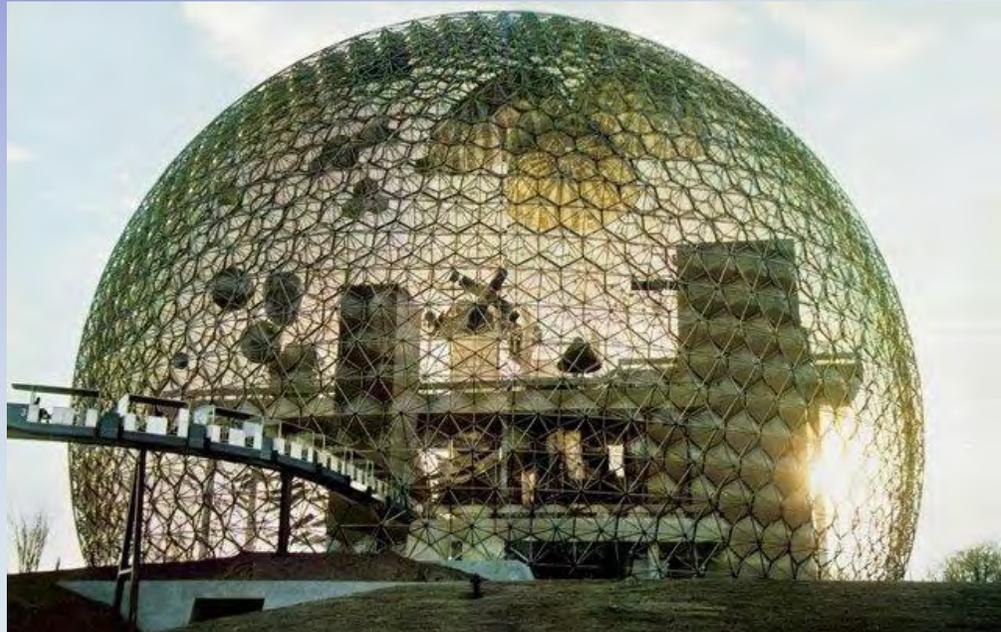
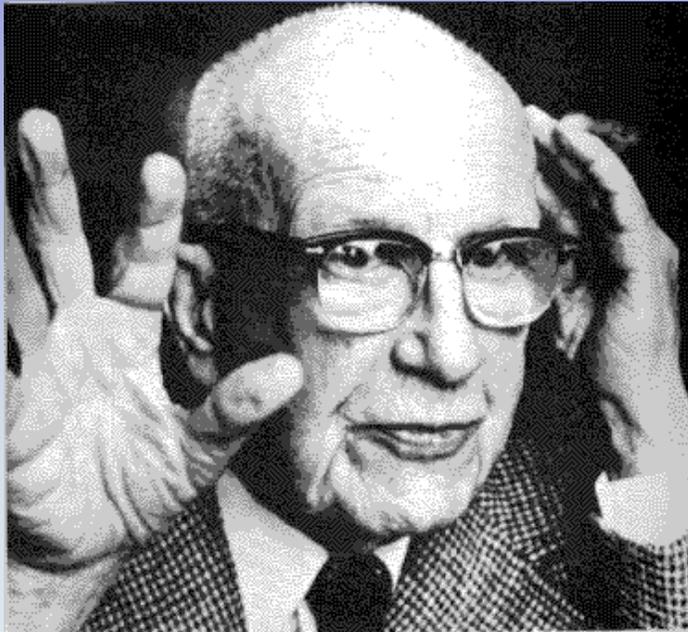


Couplages intelligents

- CSTC + dessalement
- CSTC + production d'hydrogène
- CSTC + création d'espaces de culture (Fresnel uniquement)

**"Il n'y a pas de crise de l'énergie, mais simplement
une crise d'ignorance"**

Richard Buckminster Fuller (1895-1983)



Sources

- MED-CSP: “Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region” Final Report by German Aerospace Center (DLR), 16-04-05
- Manuel Silva, CSP Webinar, Leonardo Energy (2010) www.leonardo-energy.org/node/5840
- Site web de Desertec Foundation : www.desertec.org
- Julie Way “Storing the Sun: Molten Salt Provides Highly Efficient Thermal Storage” June 26, 2008 www.renewableenergyworld.com
- Rainer Tamme “Development of Storage Systems for SP Plants”, TREN -DG RTD Consultative Seminar “Concentrating Solar Power”, Brussels, 27. June 2006
- List of solar thermal power stations. Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations
- Survey of thermal storage for parabolic trough power plants, Pilkington Solar Int. (2000)
- R. Sioshansi, P. Denholm, “The Value of Concentrating Solar Power and Thermal Energy Storage” National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL-TP-6A2-45833 February 2010