

Centrales solaires thermodynamiques

Préparation de la feuille de route
Energie solaire – Maroc Oriental

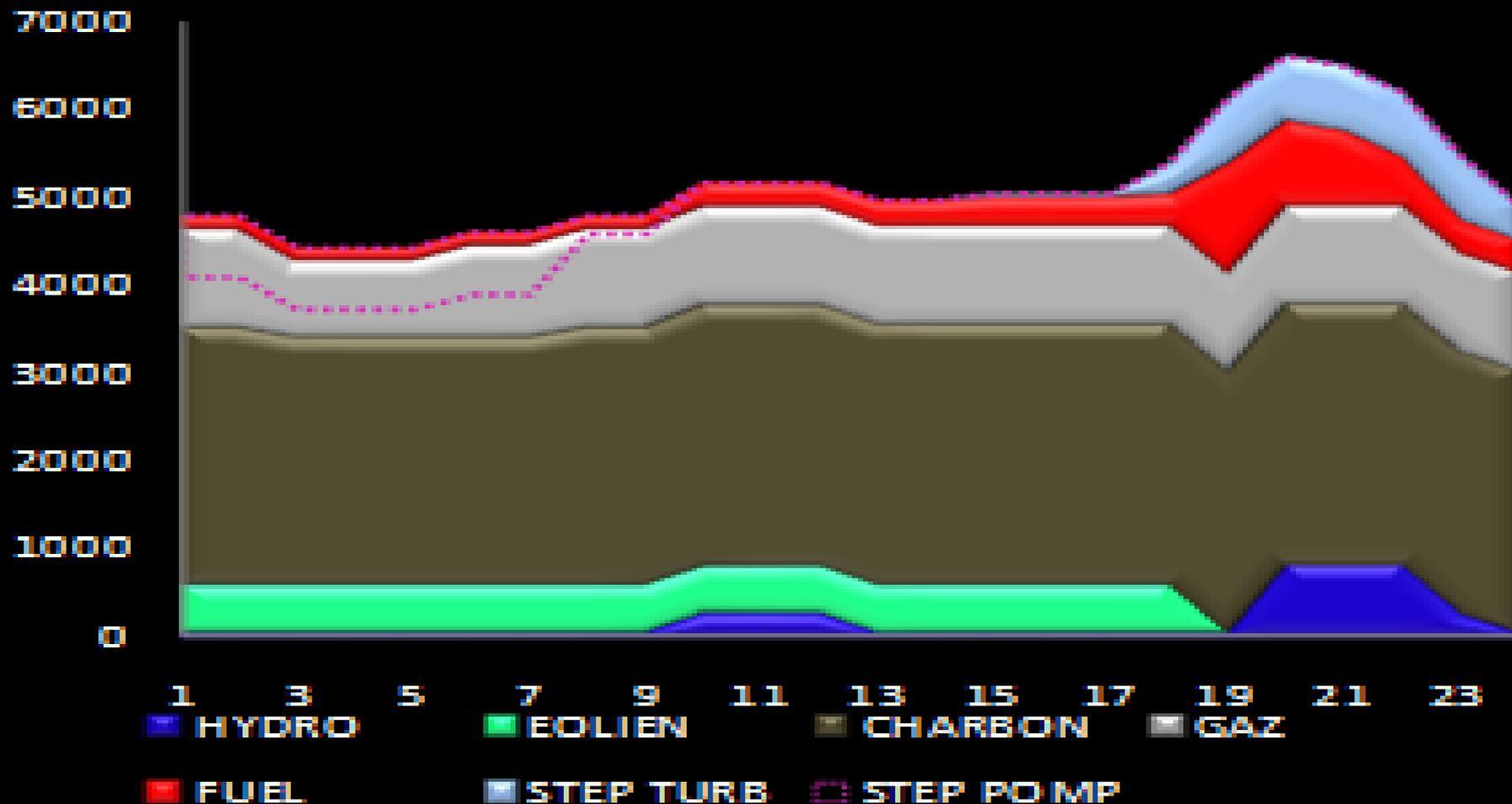
Frédéric SIROS – Oujda
21 mars octobre 2012

Positionnement par rapport aux autres filières renouvelables

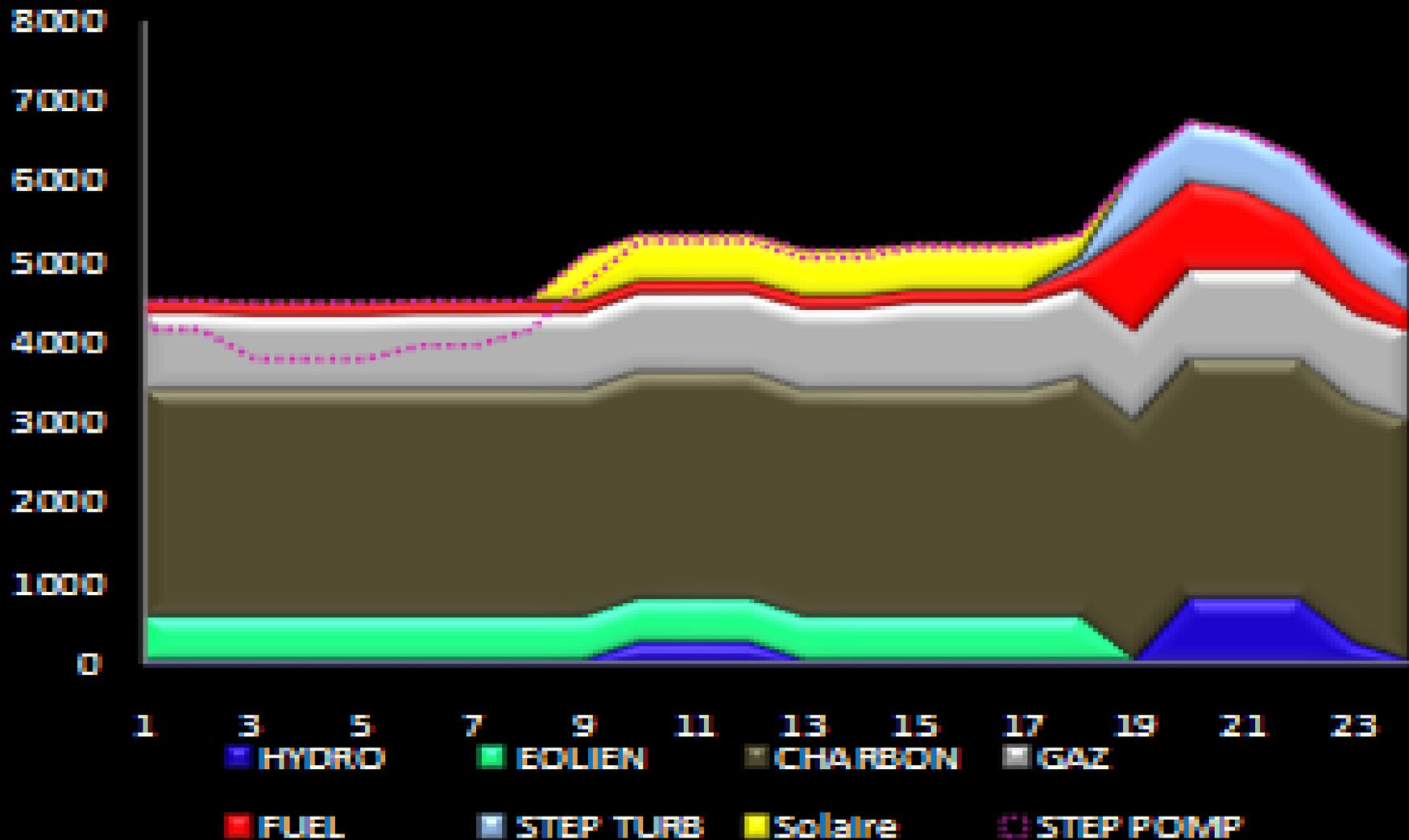
Rôle du solaire thermodynamique dans le mix énergétique d'un système électrique

- ▶ Beaucoup d'énergies renouvelables sont variables (éolien, photovoltaïque, etc.)
- ▶ Lorsque la part de renouvelables sera importante, le réseau électrique aura besoin de production flexible ET renouvelable
- ▶ Renouvelables flexibles = hydraulique, géothermie, biomasse et... solaire thermodynamique grâce au stockage thermique (performant et peu coûteux) et à l'hybridation
- ▶ Le MWh solaire thermodynamique est et restera plus coûteux que le MWh photovoltaïque mais a davantage de valeur
- ▶ Les renouvelables flexibles ne sont pas concurrentes mais « facilitatrices » des renouvelables variables . Ainsi le solaire thermodynamique avec le photovoltaïque

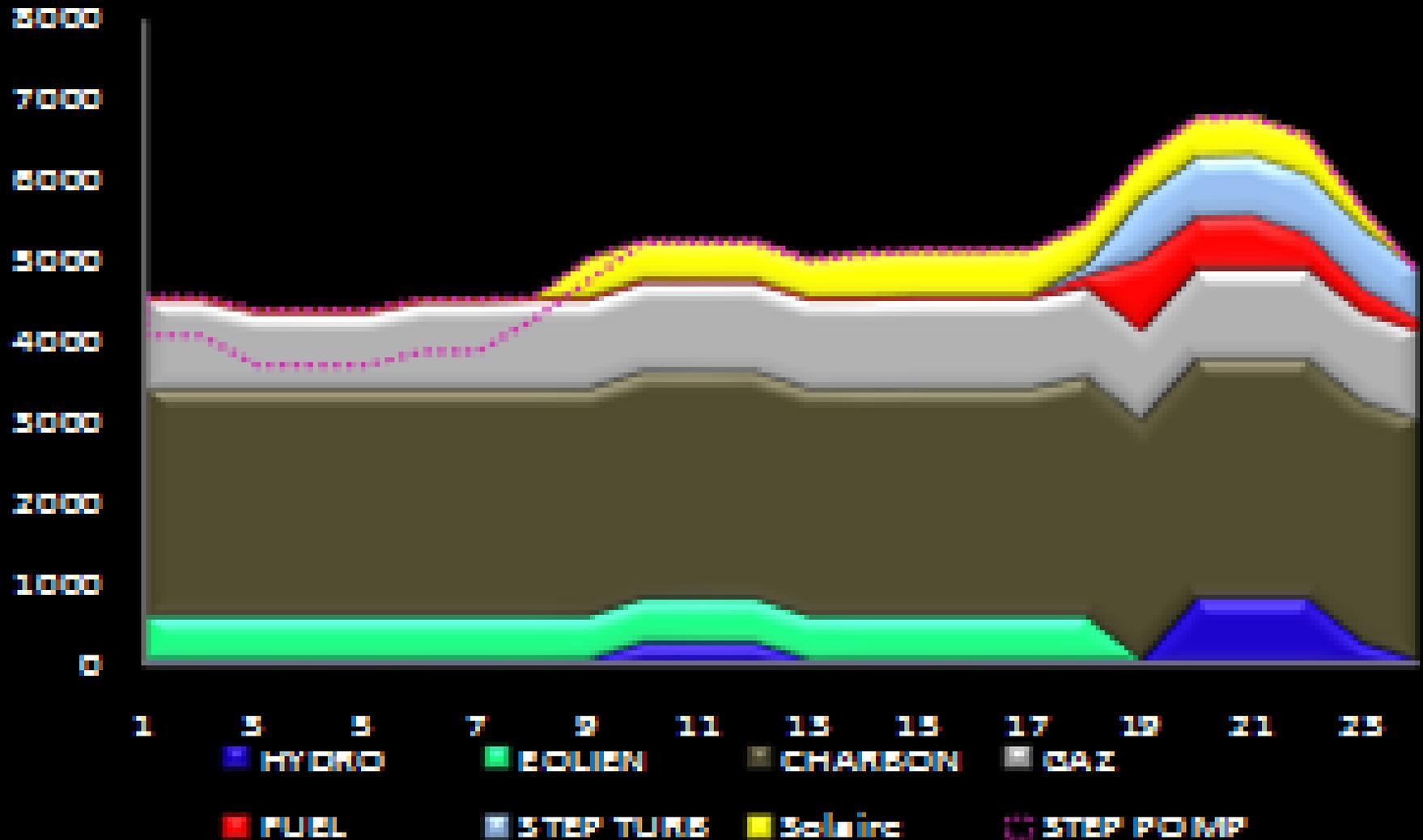
Courbe de charge et ordre d'appel des différents producteurs sans production solaire



Courbe de charge et ordre d'appel des différents producteurs avec photovoltaïque seul



Courbe de charge et ordre d'appel des producteurs avec photovoltaïque et solaire thermodynamique

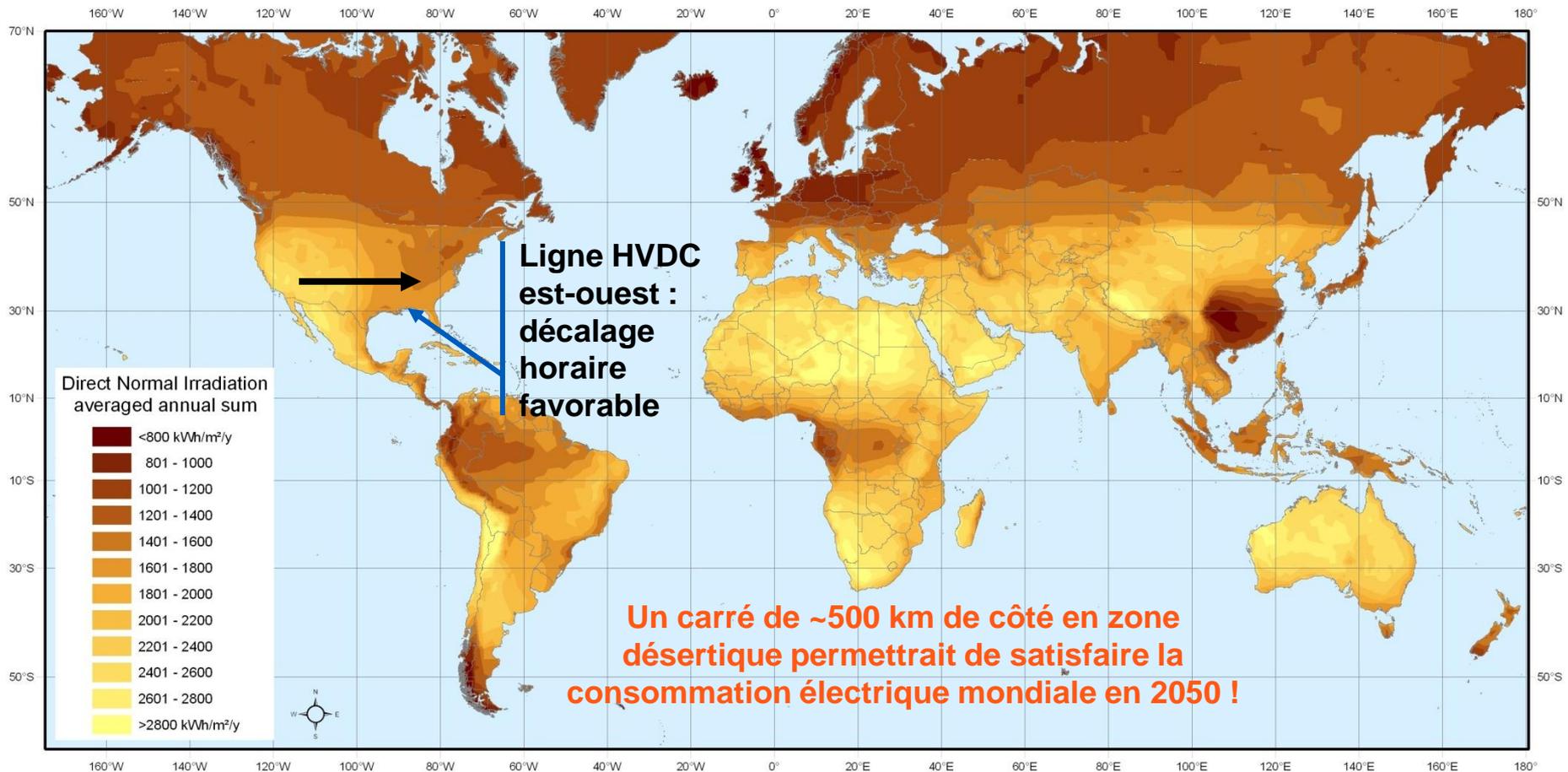


Ressource solaire

Ressource = rayonnement solaire direct

► Installation dans des zones désertiques ou semi-désertiques

Direct Normal Irradiation (DNI)



Quelle est la précision des données de DNI ?

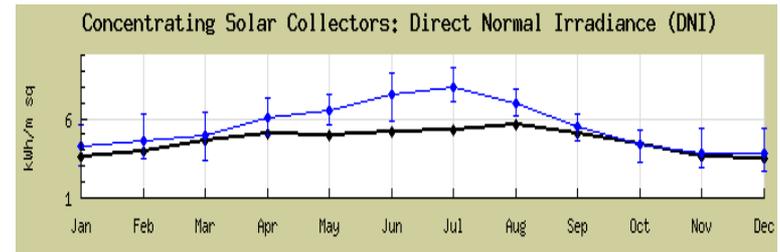
Cas du Maroc

SWERA:

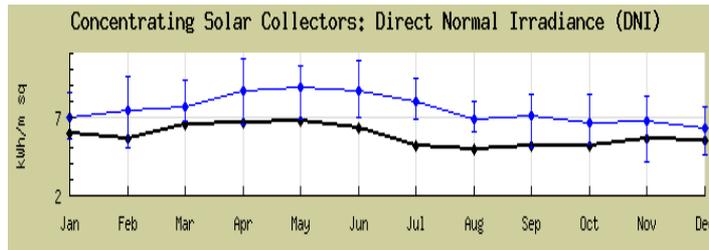
NASA 

NREL 

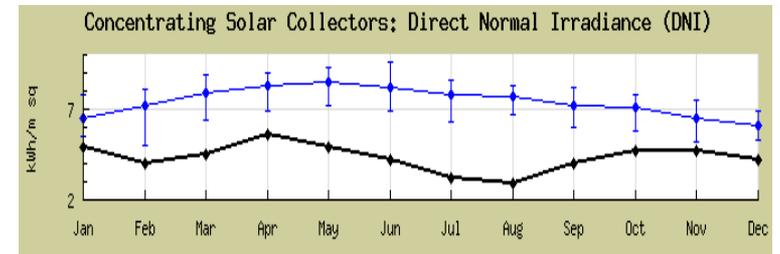
Ain Béni Mathar



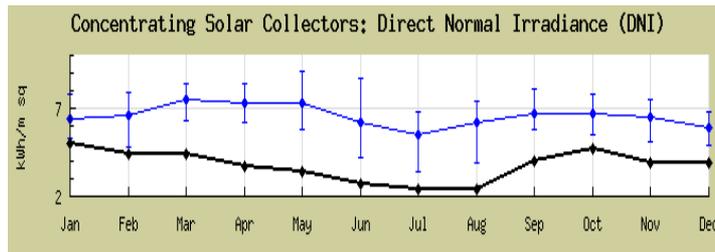
Ouarzazate



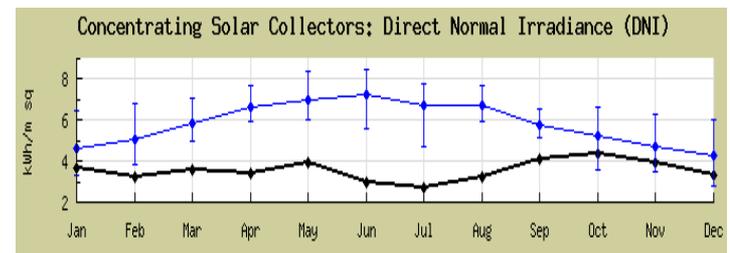
Boujdour



Foum Al Oued



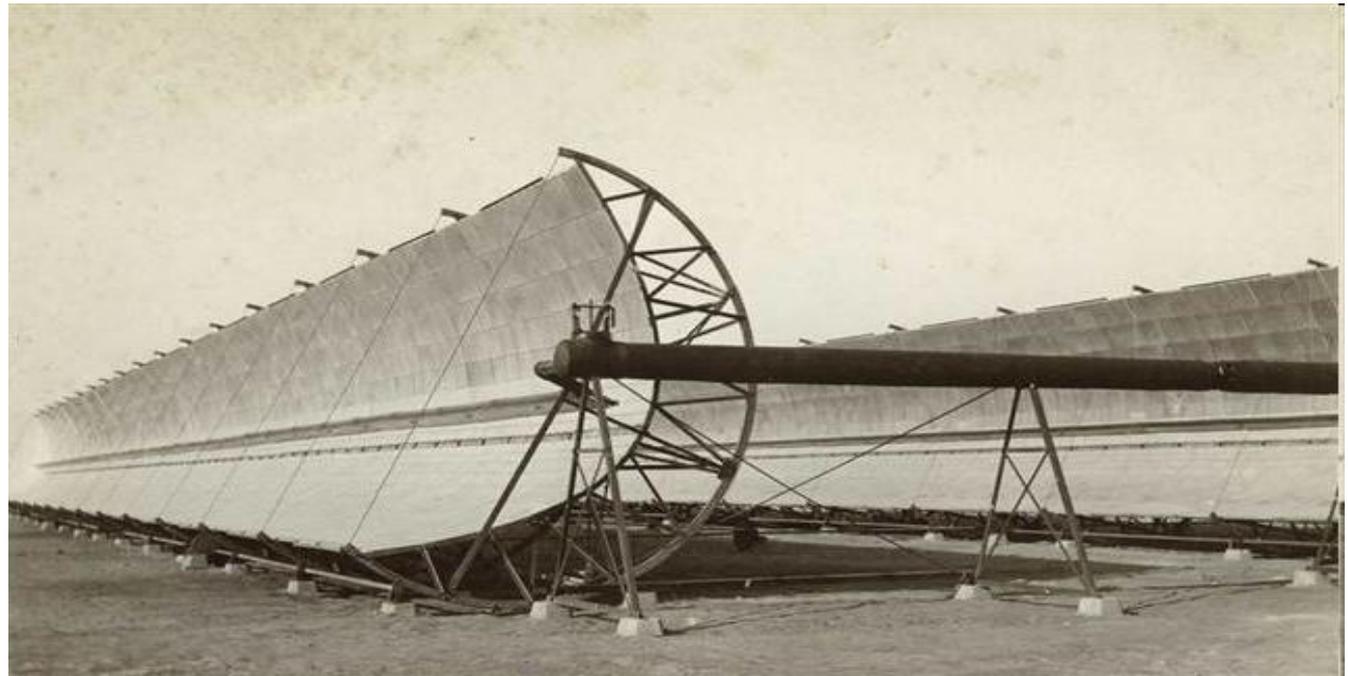
Sabkhat Tah



Filières technologiques

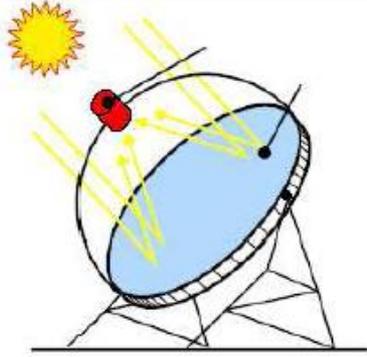
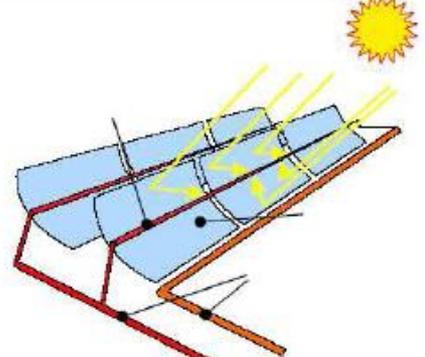
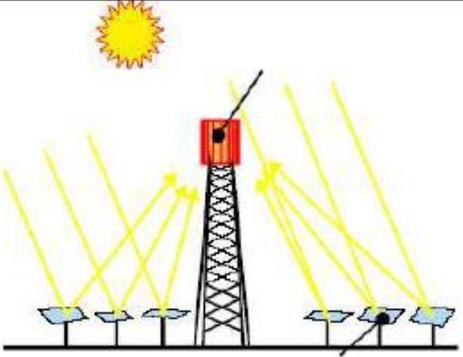
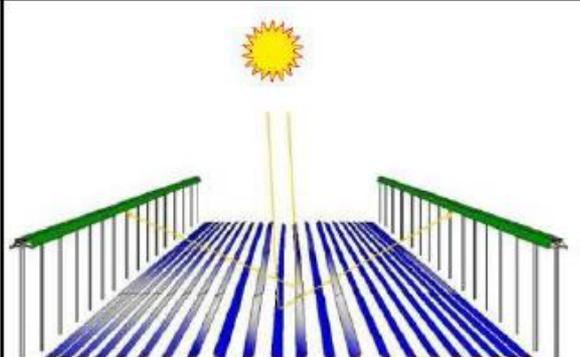
Histoire de la filière solaire thermo. : bref rappels

- ◆ Systèmes à concentration solaire (“dishes”) construits au XIXe siècle par Augustin Mouchot et Abel Pifre (par exemple destiné à la production de glace en 1878). Ils construisirent ensuite une unité de dessalement d’eau en Algérie.
- ◆ Systèmes similaires construits vers 1884 par l’ingénieur américain John Ericsson, utilisant des concentrateurs cylindro-paraboliques.
- ◆ En 1907 à Philadelphie, Shuman dévoile un système solaire thermodynamique non concentré permettant de pomper de l’eau. En 1913, il construit pour un village situé sur le Nil, en Égypte, une unité d’irrigation ($> 1300 \text{ m}^3/\text{h}$!) utilisant des collecteurs cylindro-paraboliques : les collecteurs produisent de la vapeur pour un moteur.



[Retour vers collecteurs actuels](#)

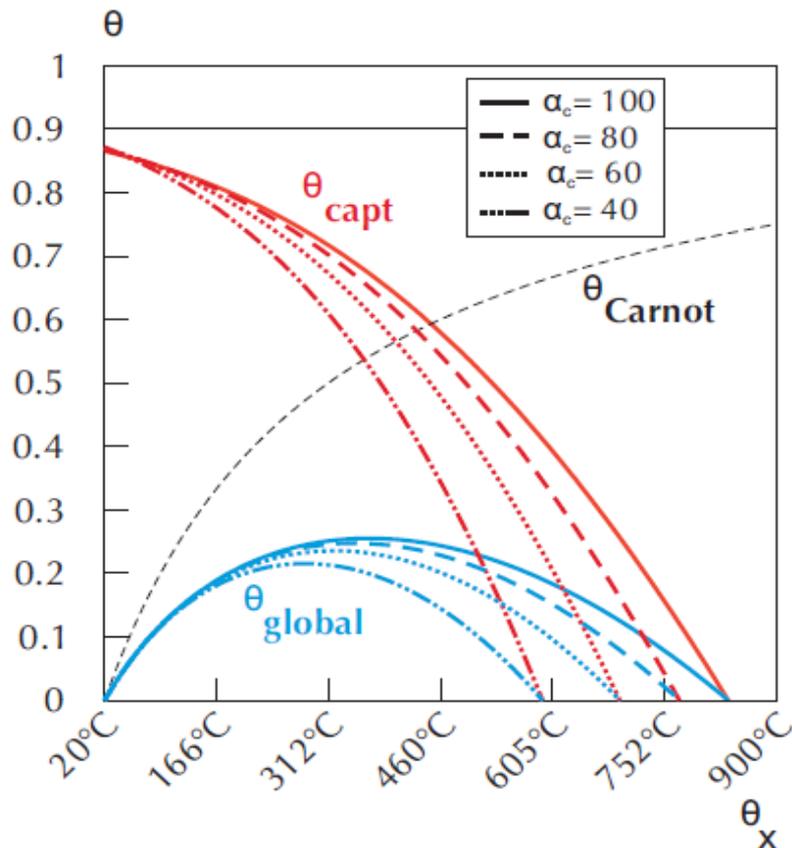
4 filières solaires thermodynamiques

RECEPTEUR \ SUIVI	2 AXES	1 AXE
MOBILE		
	DISH-STIRLING	CYLINDRO-PARABOLIQUE
FIXE		
	TOUR	FRESNEL

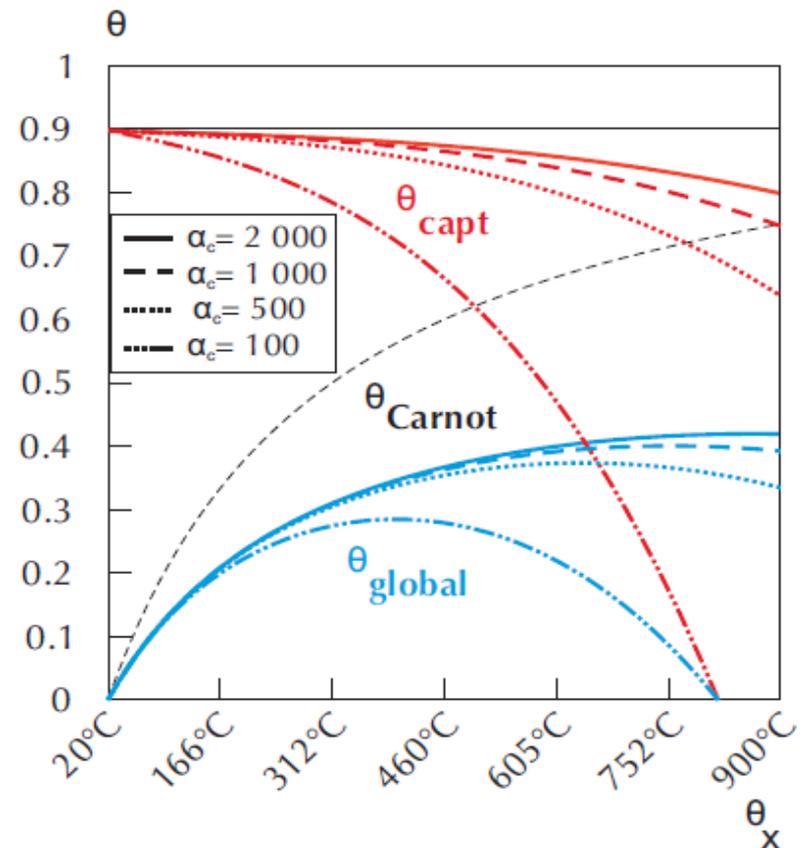
Température, concentration et rendement

- Compromis entre rendements du récepteur et du cycle thermodynamique
- Une T° optimale pour chaque facteur de concentration (et vice-versa)

Linear systems



Point-focus systems



La filière cylindro-parabolique est la plus mature...

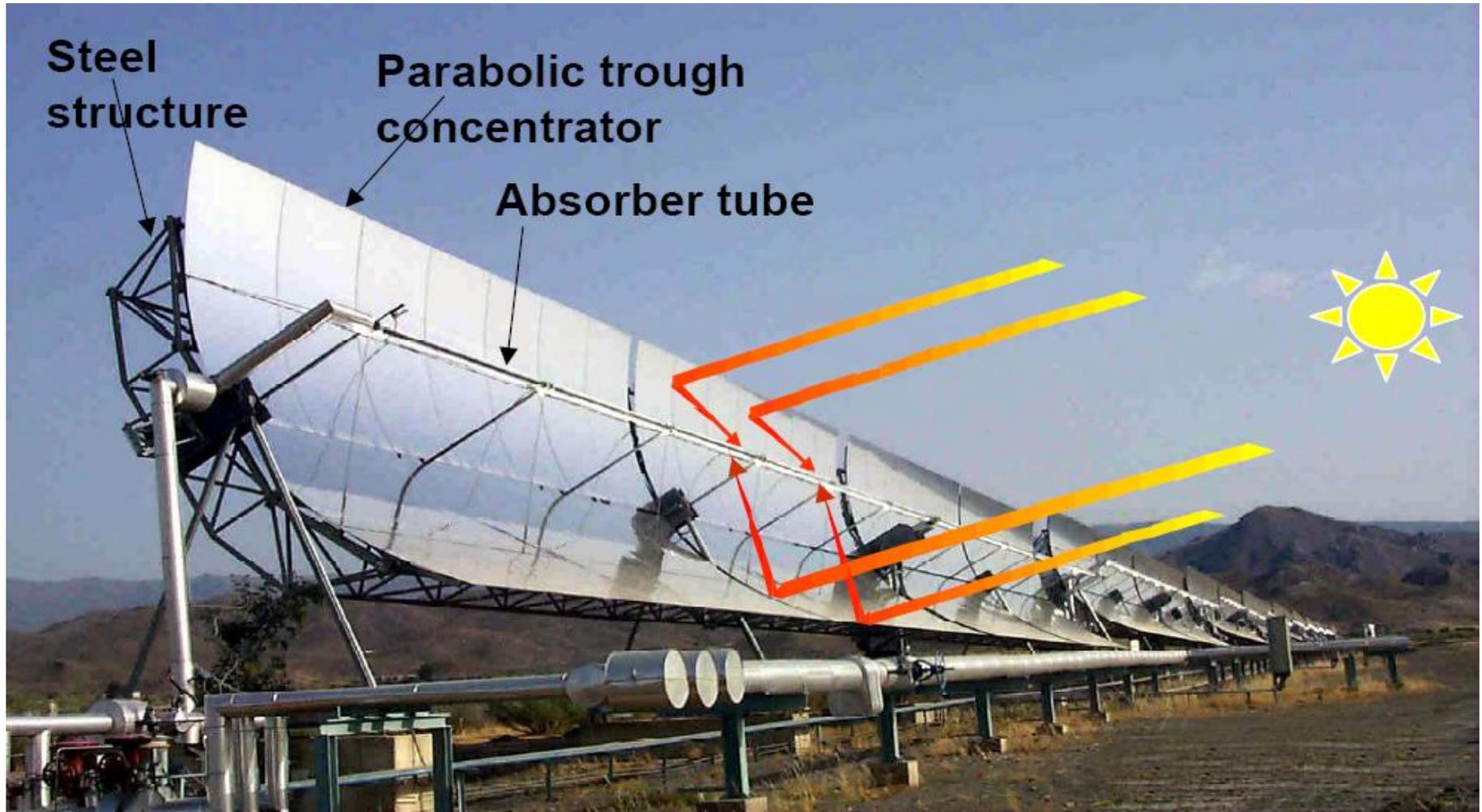


Schéma de principe cylindro-parabolique

Comparaison avec collecteurs Schuman de 1913

354 MW_e construits de 1984 à 1991 et opérationnels

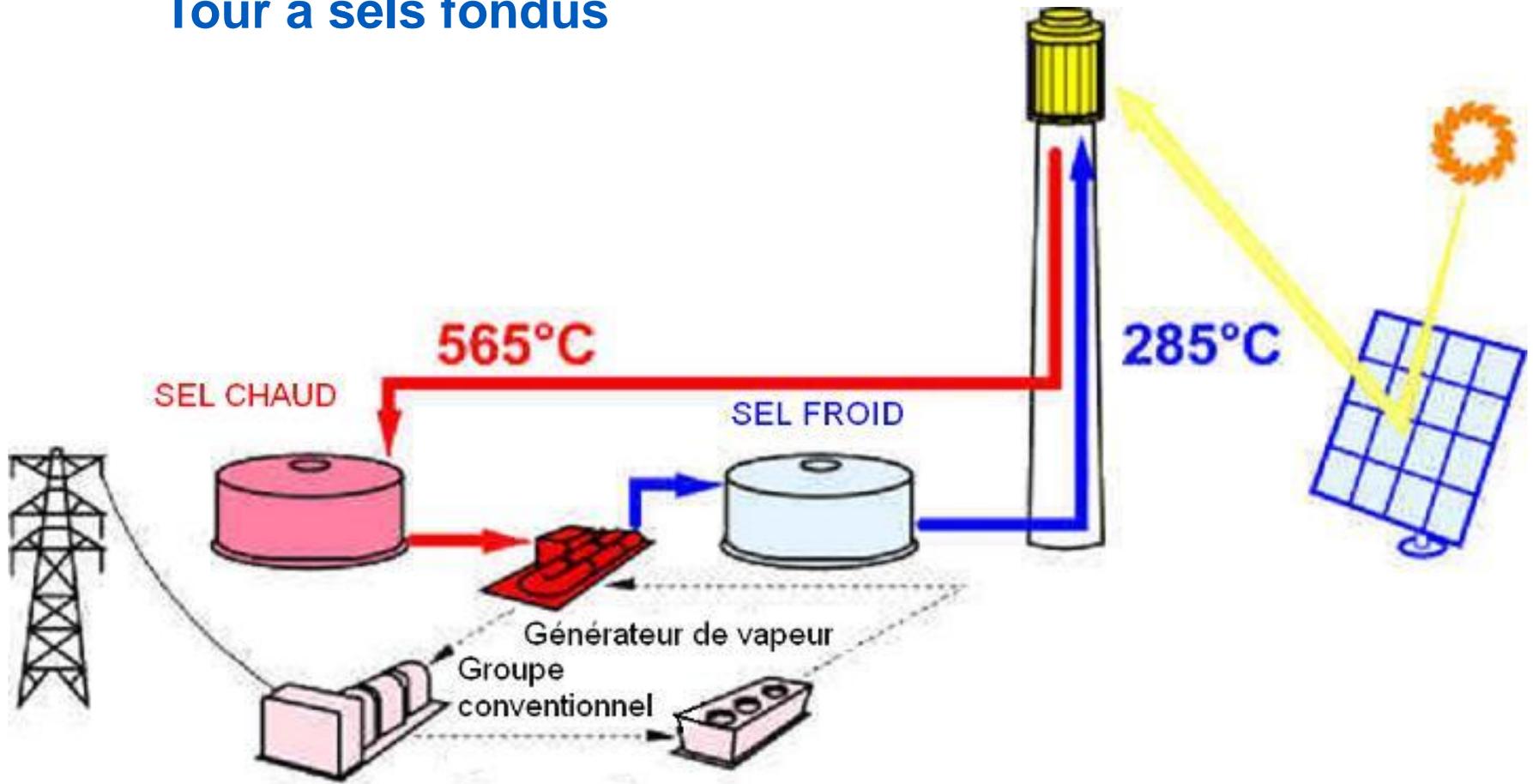


- Désert de Mojave (Californie)
- Connecté au réseau de Los Angeles
- 9 centrales de 30 à 80 MW_e
- 2 000 000 m² de miroirs cylindro-paraboliques



Mais les tours présentent un meilleur potentiel

Tour à sels fondus



Thémis



Héliostats (tour PS10, Séville, 120 m²)



Autres filières : Collecteurs linéaires de Fresnel – Paraboloïdes-Moteur Stirling (Dish-Stirling)



Fluides caloporteurs – Fluides de travail

Travail (cycle) \ Calo.	Huile	Sels fondus	Eau-Vapeur	Air/autre gaz
Eau-Vapeur (Rankine)	Cylindro-parab. (avec huile synthétique)	Tour à sels fondus Cylindro- parab.	Fresnel Tour Cylindro-parab.	Air à P atmosph. But : cycle super-critique haute T°
Air (Brayton)				Tour-Brayton Dish-Brayton
Autre gaz (Stirling)				Dish-Stirling
Organique (cycle ORC)	Fresnel avec huile végétale, moyenne T°		Eau liquide pressurisée, basse T°	

Fond bleu → Fluide de travail = caloporteur (ex. vapeur directe)

Gras → Potentiel prouvé (ou presque !) à échelle industrielle

Mérites et faiblesses des différentes filières

Technology	Optical efficiency	Annual solar-to-electric efficiency	Land occupancy	Water cooling (L/MWh)	Storage possible	Possible backup/hybrid mode	Solar fuels	Outlook for Improvements
Parabolic troughs	**	15%	Large	3 000 or dry	Yes, but not yet with DSG	Yes	No	Limited
Linear Fresnel receivers	*	8-10%	Medium	3 000 or dry	Yes, but not yet with DSG	Yes	No	Significant
Towers (central receiver systems)	**	20-35% (concepts)	Medium	2 000 or dry	Depends on plant configuration	Yes	Yes	Very significant
Parabolic dishes	***	25-30%	Small	none	Depends on plant configuration	Yes, but in limited cases	Yes	Through mass production

Note: Optical efficiency is the ratio of the energy absorbed by the solar receiver over the solar energy received in the entire device.

Source : CSP Roadmap 2010, AIE

Pistes futures pour baisser le coût

Par progrès incrémentaux

- ▶ Optimisation de la conception, industrialisation, production de masse, préfabrication en usine, effet d'échelle, etc.
- ▶ A priori, seule voie pour la filière cylindro-parabolique
- ▶ Moindre maturité des tours et Fresnel → importants gisements de progrès
 - Ex. (tours) : taille du champ solaire, des héliostats – Grande disparité

Par ruptures technologiques

- ▶ Baisser le coût du champ solaire et des systèmes associés
 - Ex. : vapeur directe, collecteurs linéaires de Fresnel
- ▶ Améliorer le rendement de conversion (→ champ solaire plus petit)
 - Cycles à vapeur supercritique
 - Cycle de Brayton (turbine à gaz). Hybridation permanente requise dans un premier temps [Schéma](#)

Quelle(s) filière(s) solaire(s) thermodynamique(s) demain ou après-demain ?

- ▶ Filière la plus prometteuse aujourd'hui : tour à cycle vapeur, 550°C, rendement du cycle thermodynamique ~40%
- ▶ ~80% du coût de l'électricité produite est dû à l'investissement dont le champ solaire représente environ la moitié
- ▶ Principal levier de baisse de coût : augmentation du rendement du cycle → Champ solaire réduit à production électrique égale
- ▶ Moyen : augmentation des températures au-delà de 600°C
 - Cycles à vapeur supercritique (>221 bar, par ex. 620°C et 300 bar). Rendement ~45%. Très coûteux, pas adapté dans la gamme de puissance que nous visons.
 - Cycles combinés turbine à gaz/turbine à vapeur en récupération de la chaleur d'échappement. Rendement > 50%, source froide divisée par presque 3. Faible coût d'investissement au kWe du cycle combiné.



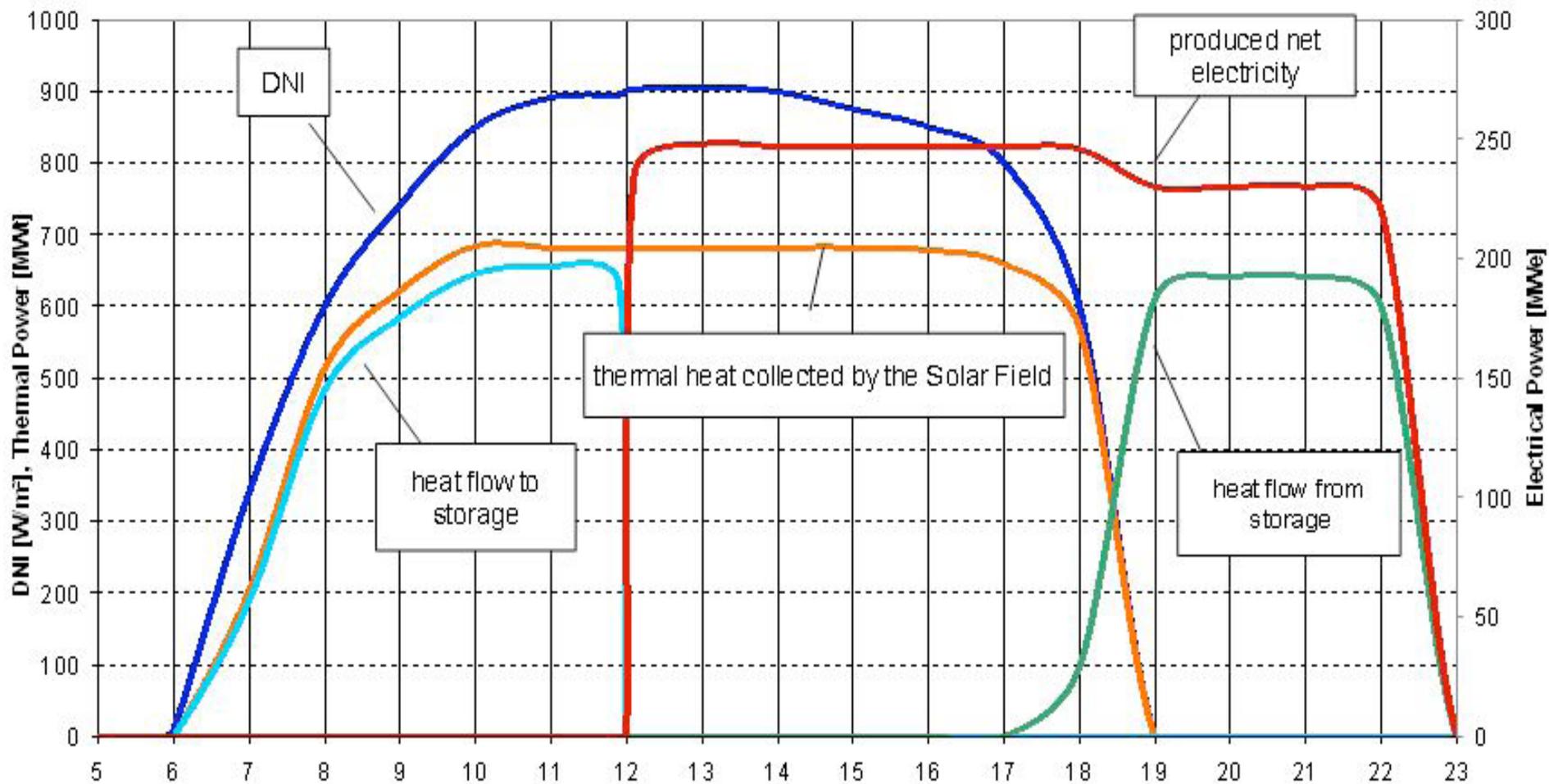
Intérêt de « solariser » une turbine à gaz

Progrès technologiques : jalons

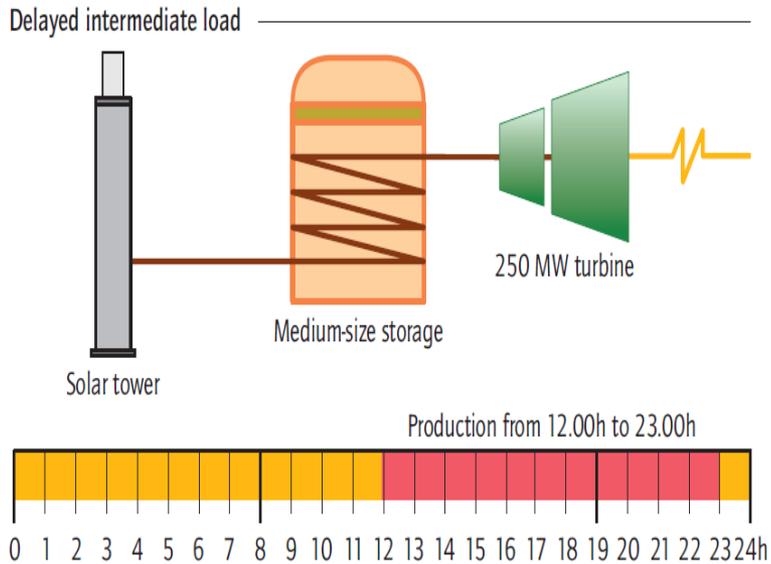
- Faisabilité industrielle des centrales cylindro-paraboliques à vapeur directe 2015-2020
- Tours solaires à sels fondus de grande puissance 2010-2015
- Production de masse de Dishes-Stirling 2015-2020
- Stockage à 3 étapes (sensible-latent-sensible) pour centrales à vapeur directe - Démonstration 2015-2020
- Tour avec cycle à vapeur supercritique – Démonstration 2020-2030
- Tour-Brayton (turbine à gaz solarisée) – Démonstration 2020-2030

Stockage thermique et hybridation

Exemple de production décalée par rapport au soleil grâce au stockage thermique

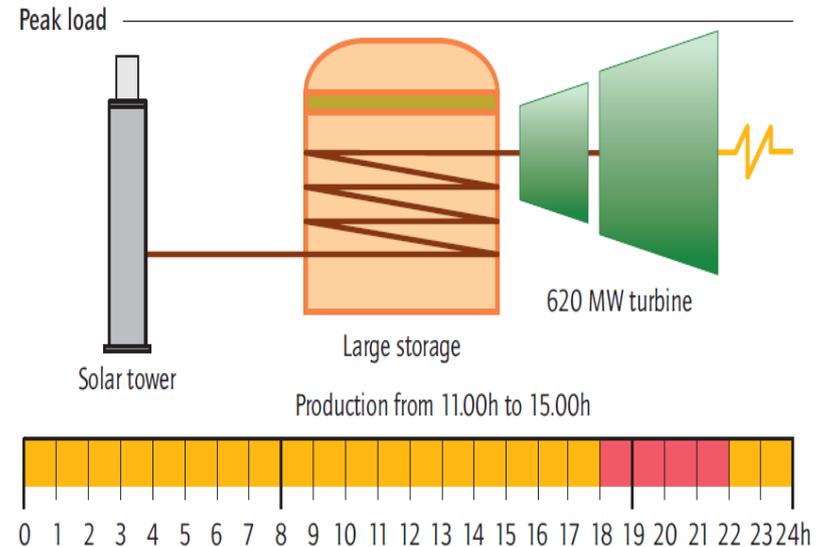
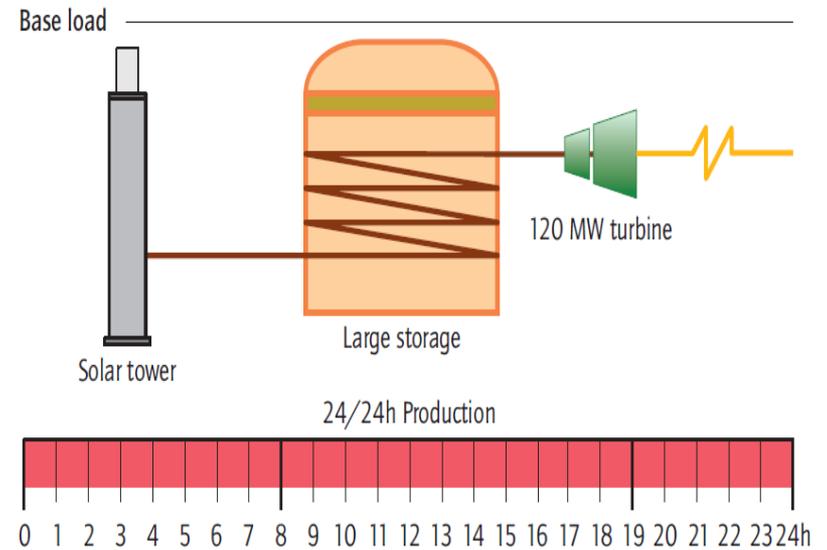


Utilisations possibles du stockage thermique

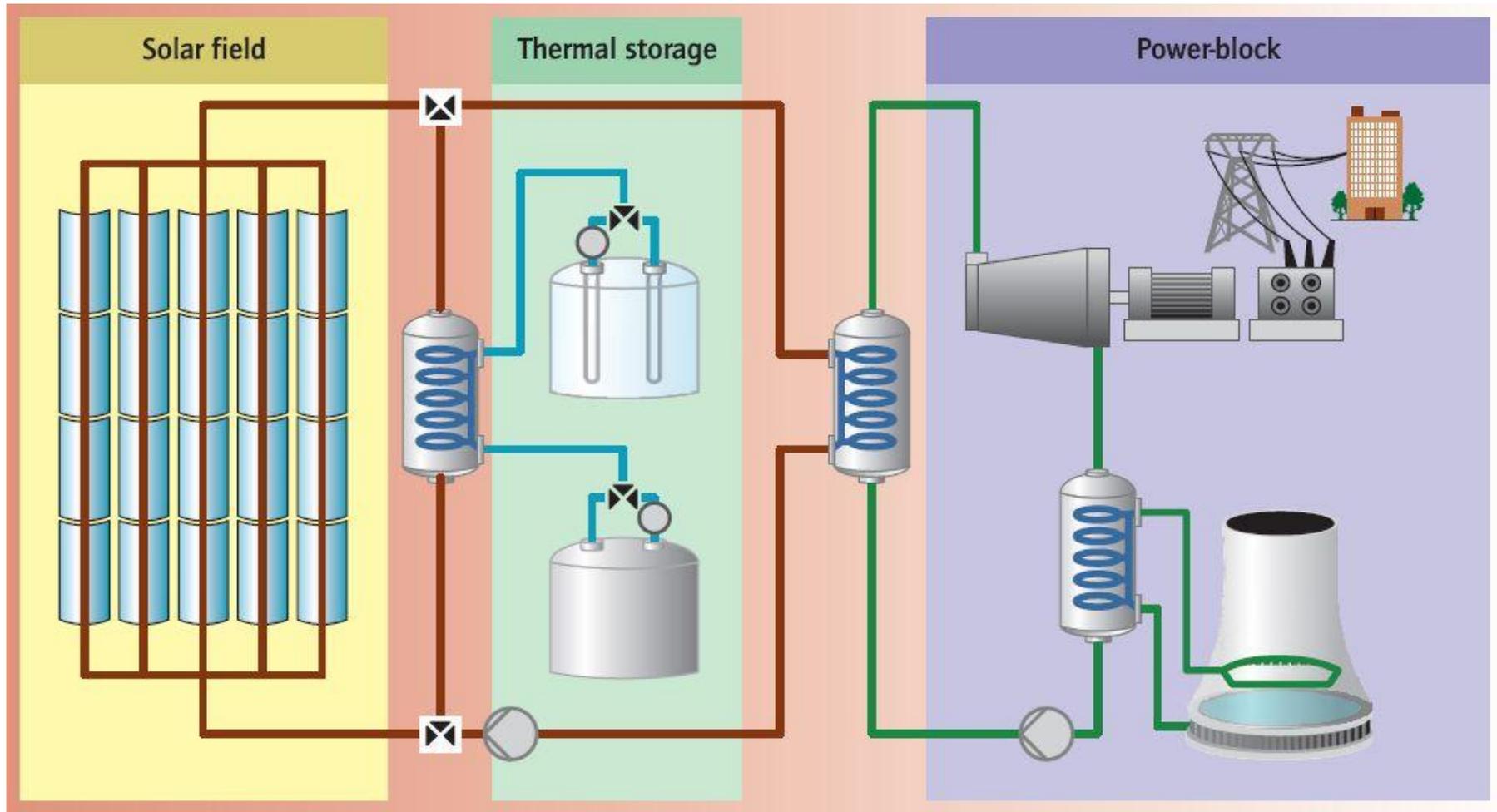


Source : CSP Roadmap 2010, AIE

- Déplacer la production
- L'étendre jusqu'à la production en base
- La concentrer sur les heures de super-pointe



Stockage thermique – Centrale cylindro-parabolique

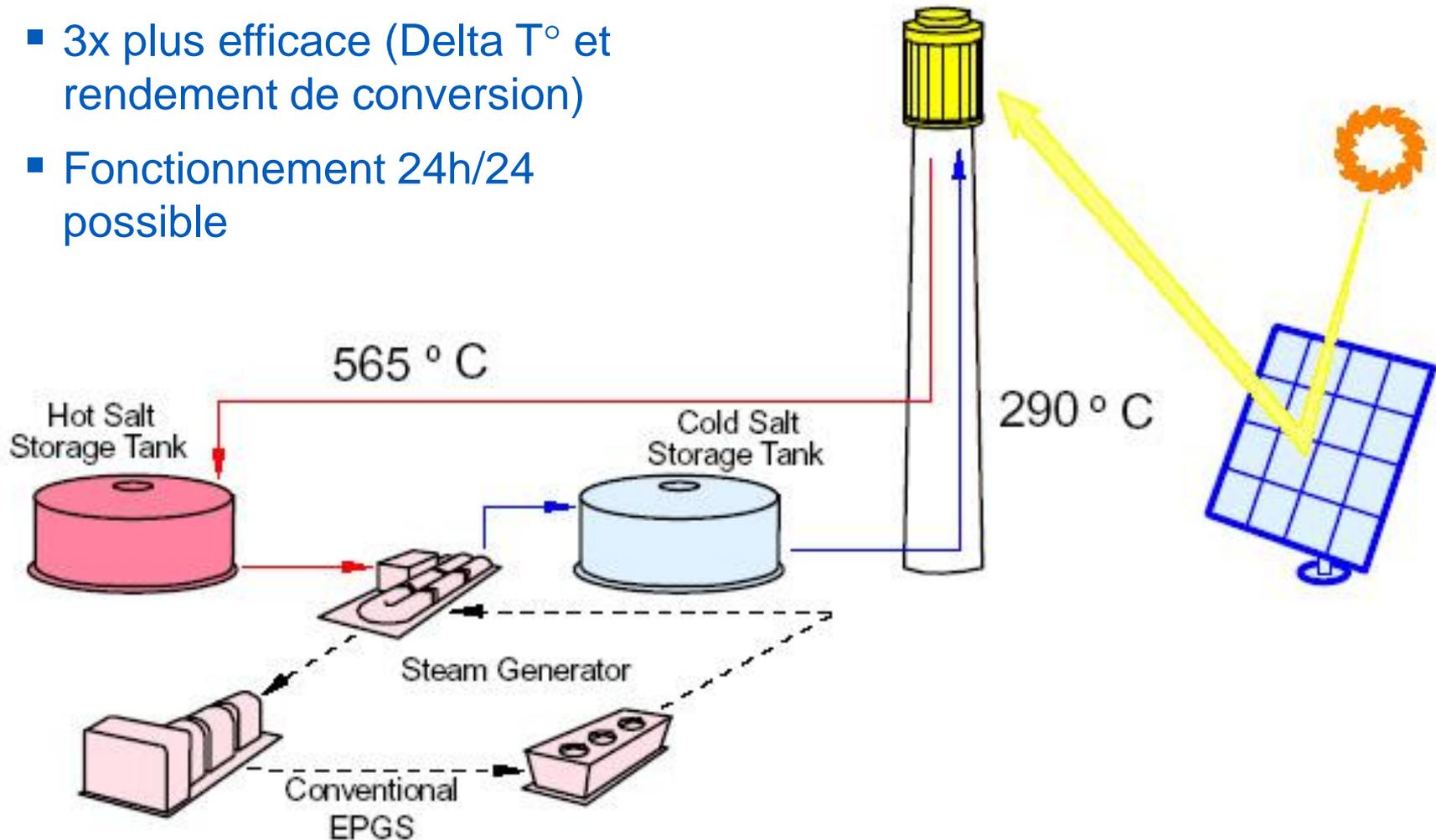


[Retour photo collecteur cylindro-parabolique](#)

Source : CSP Roadmap 2010, AIE

Stockage thermique – Tour à sels fondus

- 3x plus efficace (Delta T° et rendement de conversion)
- Fonctionnement 24h/24 possible



Systemes de stockage thermique autres qu'à 2 réservoirs et sels fondus

► Sels fondus – Un seul réservoir

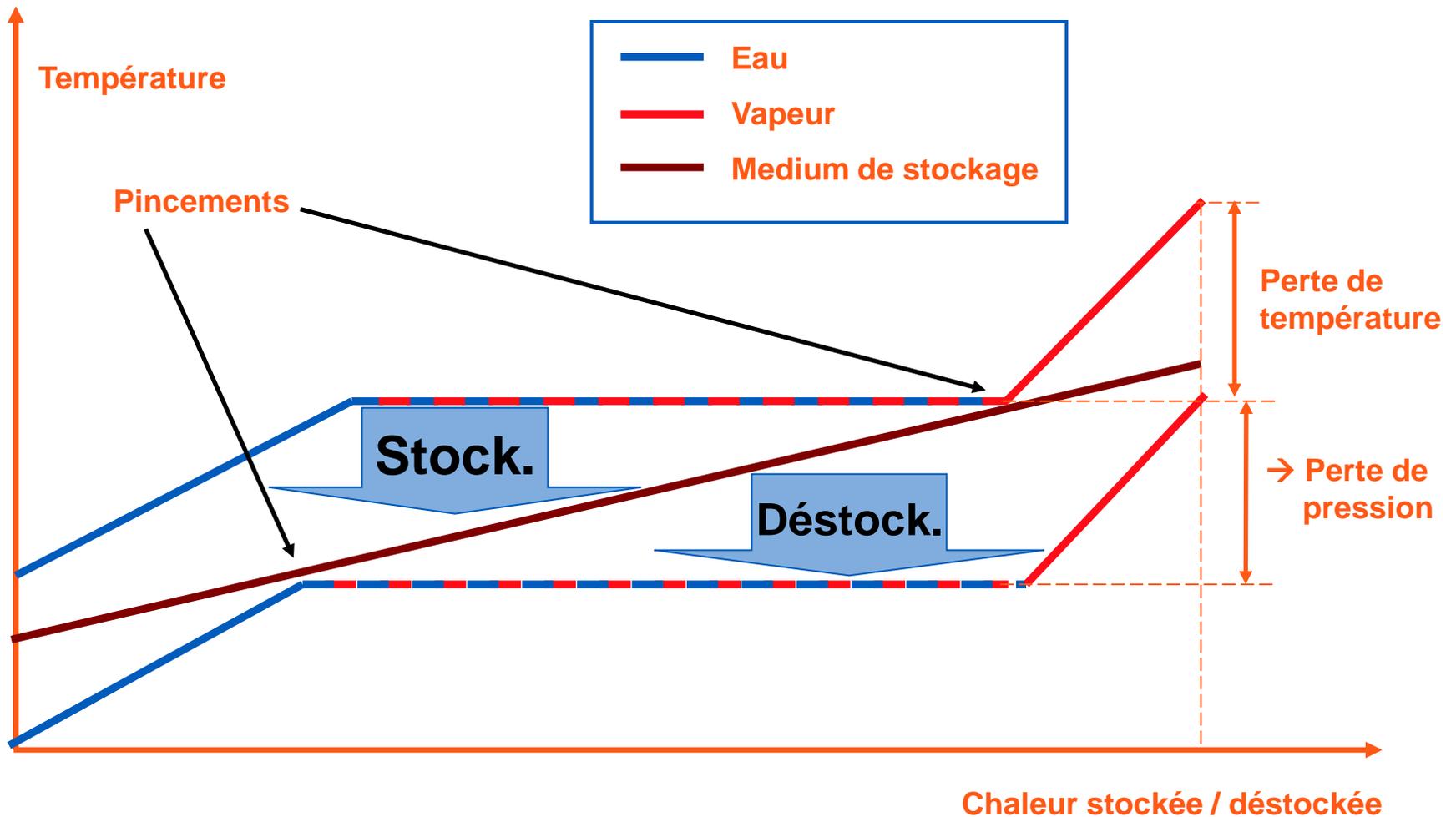
- Thermocline – Réservoir « en sablier » – Stratification des températures
Problème : maintien des T° chaude et froide dans le temps ?

- Réservoir unique – Zones chaude et froide séparées par paroi interne mobile
Problème : opération de maintenance nécessitant de vider le réservoir ?

► Médium solide : béton – céramique – Cofalit (déchets d'amiante vitrifiés)

- Très hautes températures autorisées par les céramiques et le Cofalit (à utiliser alors avec de l'air caloporteur)
- Problème avec un fluide pressurisé (vapeur directe – tour Brayton) :
 - Contact direct fluide-medium sous enceinte pressurisée (pas d'effet d'échelle) ?
 - Tubage du medium (complexité, conflit de matériaux,...) ?

Stockage thermique et vapeur directe : difficile...



Solutions envisagées pour associer le stockage thermique à la vapeur directe

- ▶ Stockage en 3 étapes : sensible – latent – sensible
 - Échanges thermiques problématiques dans un solide (conduction seule)
 - P vapeur inférieure en mode « décharge » → désadaptation de la turbine
 - Grande complexité qui fera perdre, et même au-delà, l'avantage de coût de la vapeur directe
- ▶ Proposition de BrightSource (papier de Koretz à Solar Paces 2011)
 - 2 heures de stockage avec 2 réservoirs de sels fondus
 - Beaucoup plus avec un 3^e réservoir
- ▶ Tour alliant un récepteur à vapeur directe et un récepteur à sels fondus en beam-down (Weizmann Institute of Science)
- ▶ **Aucune de ces proposition n'a prouvé qu'elle peut être avantageuse par rapport à la tour à sels fondus**

Hybridation : plusieurs philosophies (1/2)

Hybridation permanente d'une centrale essentiellement solaire

- ▶ Pour « booster » la T° de surchauffe/resurchauffe de la vapeur
 - Centrale Shams (Abu Dhabi)
 - Utilisation permanente du gaz, acceptable mais pas excellente

Hybridation en appoint d'une centrale essentiellement solaire schéma

- ▶ Pour prolonger sa production par ensoleillement nul ou insuffisant
 - Par chaudière à gaz d'appoint
 - Sur les centrales solaires thermodynamiques actuelles (cycle à vapeur) :
Rendement de conversion = rdt net du cycle x rdt chaudière (~93%)
Rdt du cycle ~42% (centrale à tour), ~37% (cylindro-parabolique)
Ce sont de **médiocres rendements pour brûler du gaz**

Hybridation : plusieurs philosophies (2/2)

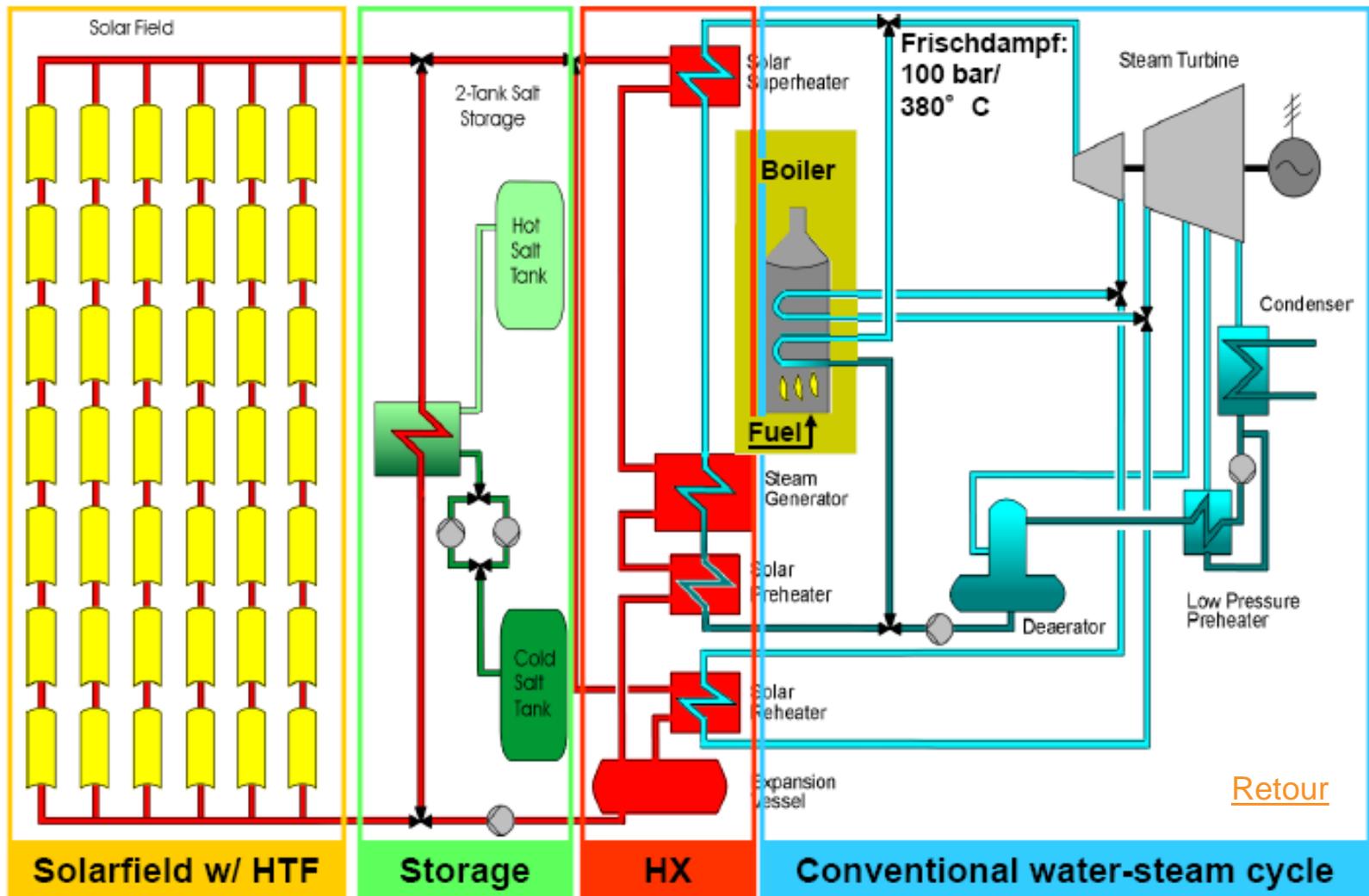
Appoint solaire modéré sur une centrale essentiellement fossile (projet Greenfield ou solarisation de centrale fossile existante)

- ▶ Hybridation d'une centrale à charbon – Plusieurs options possibles :
 - Préchauffage de l'eau alimentaire en remplacement des soutirages turbine Basse-moyenne T° – Une concentration optique moyenne suffit (ex. Fresnel)
 - Production de vapeur HP-HT – Idéalement, sur centrale supercritique
Meilleurs candidats a priori : Fresnel et surtout tour

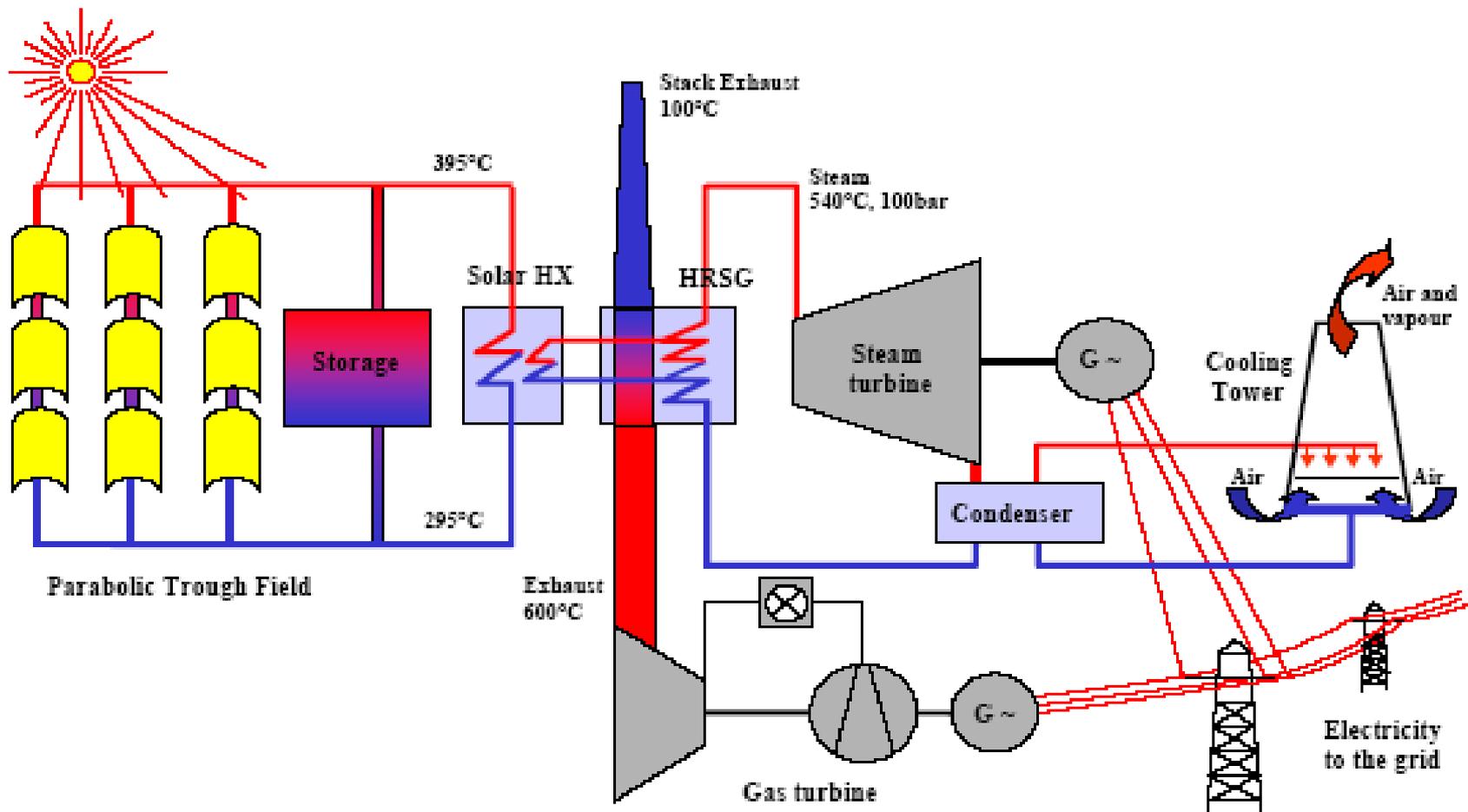
La vapeur directe paraît bien adaptée à ces applications

- ▶ Hybridation d'un cycle combiné (ISCC) : appoint solaire sur cycle vapeur
 - Meilleure option a priori : produire de la vapeur HP surchauffée
 - Le MWh cycle combiné gaz émet 2x moins de CO₂ et beaucoup moins de polluants que le MWh charbon
- ▶ Le futur (maturité technologiques vers 2020) : turbine à gaz solarisée, utilisée en cycle combiné ou en cycle récupéré [Schéma](#)

Exemple d'hybridation d'une centrale essentiellement solaire

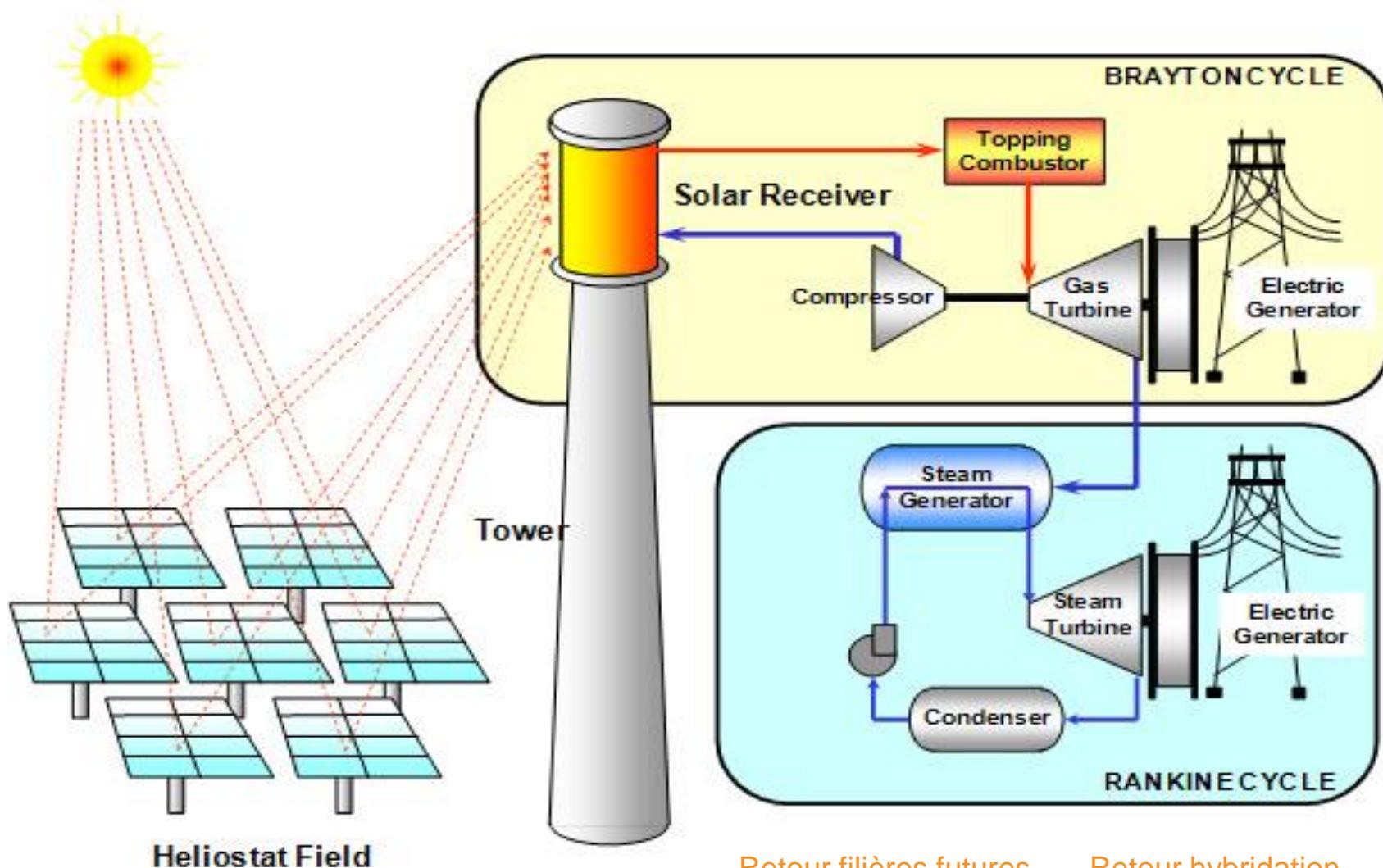


Exemple d'hybridation d'une centrale essentiellement fossile : ISCC



Hybridation – Le futur : turbine à gaz solarisée

En cycle combiné (schéma) ou récupéré



[Retour filières futures](#)

[Retour hybridation](#)

Ne pas opposer stockage thermique et hybridation

- ▶ Considérons un stockage de très forte capacité (>15 h par ex.)
- ▶ Les premières heures de stockage seront utilisées quotidiennement, pour la pointe du soir : ~350 cycles charge/décharge par an
- ▶ Les dernières heures ne serviront que lors des aléas climatiques : par ex. quelques dizaines de cycles charge/décharge par an.
- ▶ Or le coût de l'heure de stockage est ~le même dans les deux cas...
- ▶ Dans le 2° cas, le coût net des émissions évitées (CO₂, polluants) est excessif. Mieux vaut investir dans d'autres projets renouvelables
- ▶ **CONCLUSION** : Il existe généralement un optimum stockage/hybridation où les deux coexistent

Hybridation d'une centrale solaire avec courbe de charge et ensoleillement quasi-synchrones

- ▶ Une hybridation utilisée 1 ou 2 h / jour suffit et est acceptable
- ▶ L'absence de stockage, elle-même source d'économies, autorise les technos à vapeur directe qui baissent encore le coût d'investissement
- ▶ MAIS quid, alors, d'une centrale PV (ou de PV réparti) ? A étudier.
 - Le PV est et restera sensiblement moins cher que le solaire thermodynamique
 - Le soutien éventuel d'une turbine à gaz de pointe coûte, en investissement :
 - Turbine industrielle, rdt ~37% (> cylindro-parab en hybridation) : 700 \$/kWe
 - Turbine aérodérivée, rdt ~42% (> tour solaire en hybridation) : 1100 \$/kWe
- ▶ **CONCLUSION** : là où une hybridation à faible rendement peut justifier un usage quotidien, le PV est un concurrent sérieux
- ▶ Au fait : beaucoup de projets californiens de centrales solaires thermodynamiques ont été récemment transformés en PV...

Hybridation d'une centrale solaire avec pointe de demande électrique en soirée

- ▶ Exemple extrême : centrale solaire thermodynamique sans stockage, fonctionnant 24h/24 grâce à l'hybridation
- ▶ 9h solaire, 15h en hybridation avec un rendement net de 36% (par ex.)
- ▶ Un cycle combiné gaz fonctionnant 24h avec un rendement net de 58% ne consomme pas plus de gaz.
 - Son coût d'investissement est plutôt inférieur à celui du seul power block de la centrale solaire
- ▶ L'équation économique et écologique d'une centrale solaire fonctionnant toute la soirée au gaz, certes moins éliminatoire, est difficile à justifier
- ▶ La bonne solution : une centrale solaire thermodynamique avec stockage thermique significatif
Une hybridation utilisée pour parer aux aléas climatiques est bienvenue

Que demander au solaire thermodynamique ?

- ▶ Être une technologie flexible, capable de suivre la charge
- ▶ Viser les périodes de pointe, celles qui ont le plus de valeur
- ▶ Réduire les coûts, mais sans trop espérer battre le PV sur ce terrain. Jouer la carte de la valeur des MWh produits !
- ▶ Mettre en œuvre des concepts d'hybridation efficaces (rendement). Quelques pistes d'avenir à moyen terme :
 - Hybridation de centrales charbon supercritiques par tour solaire
 - Solarisation de la turbine à gaz de cycles combinés gaz
- ▶ Favoriser les concepts de stockage thermique efficaces et peu coûteux

Merci !

