



# Chaleur solaire pour l'industrie (SHIP)



*Gilles Flamant, PROMES-CNRS*

Journées Nationales de l'Énergie Solaire  
Odeillo - 25 - 27 Août 2021



# Sommaire

- ✓ Pourquoi la chaleur solaire pour l'industrie? Enjeux
- ✓ Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie
- ✓ Solutions technologiques actuelles
- ✓ Exemples de réalisations
- ✓ Coûts des solutions technologiques actuelles
- ✓ Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures
- ✓ Conclusion

# Pourquoi la chaleur solaire pour l'industrie? Enjeux

# Pourquoi la chaleur solaire pour l'industrie?

L'industrie représente 32% de la consommation énergétique mondiale et la chaleur correspond à 74% de la consommation énergétique industrielle (chiffres 2014).

La moitié de cette fraction correspond à de la chaleur à basses (< 100°C) et moyennes températures (150-400°C), l'autre moitié est consommée à hautes températures (>400°C).

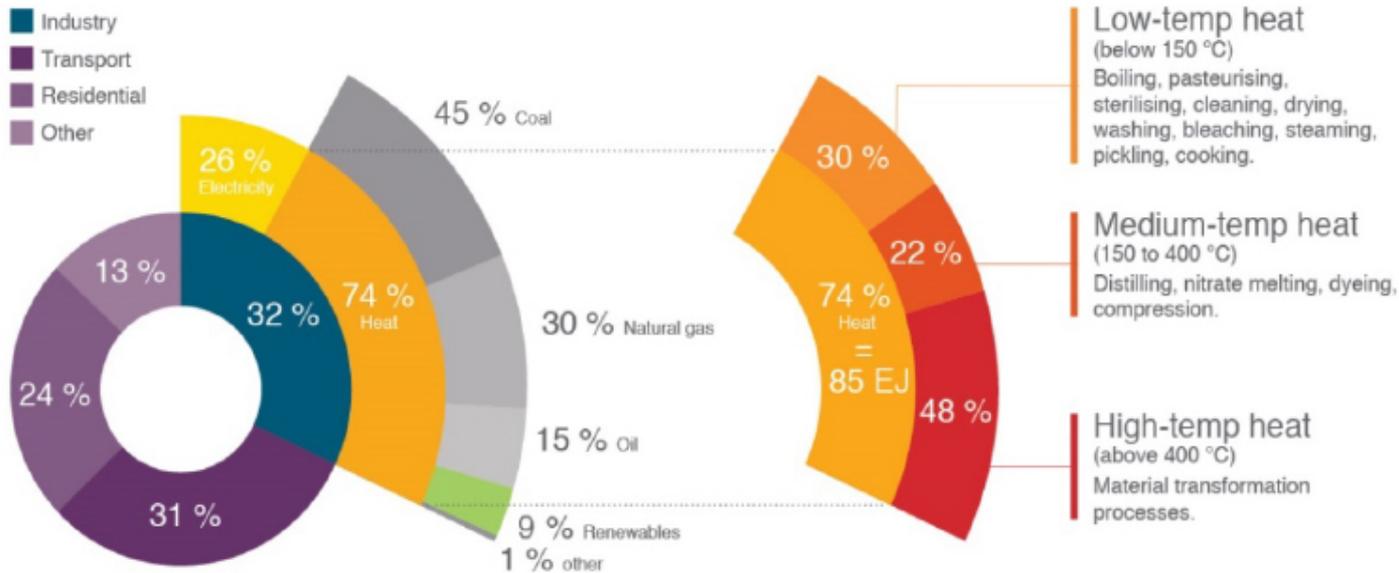
~90% de la chaleur industrielle sont fournis par combustion de combustibles fossiles (majoritairement le charbon).

L'industrie est responsable de 21% des émissions de CO<sub>2</sub>

- Les technologies solaires existent pour produire de la chaleur entre 50 et 1500°C, mais les procédés ne sont développés qu'à basse et moyenne températures.

Source: IEA 2020

# Pourquoi la chaleur solaire pour l'industrie?



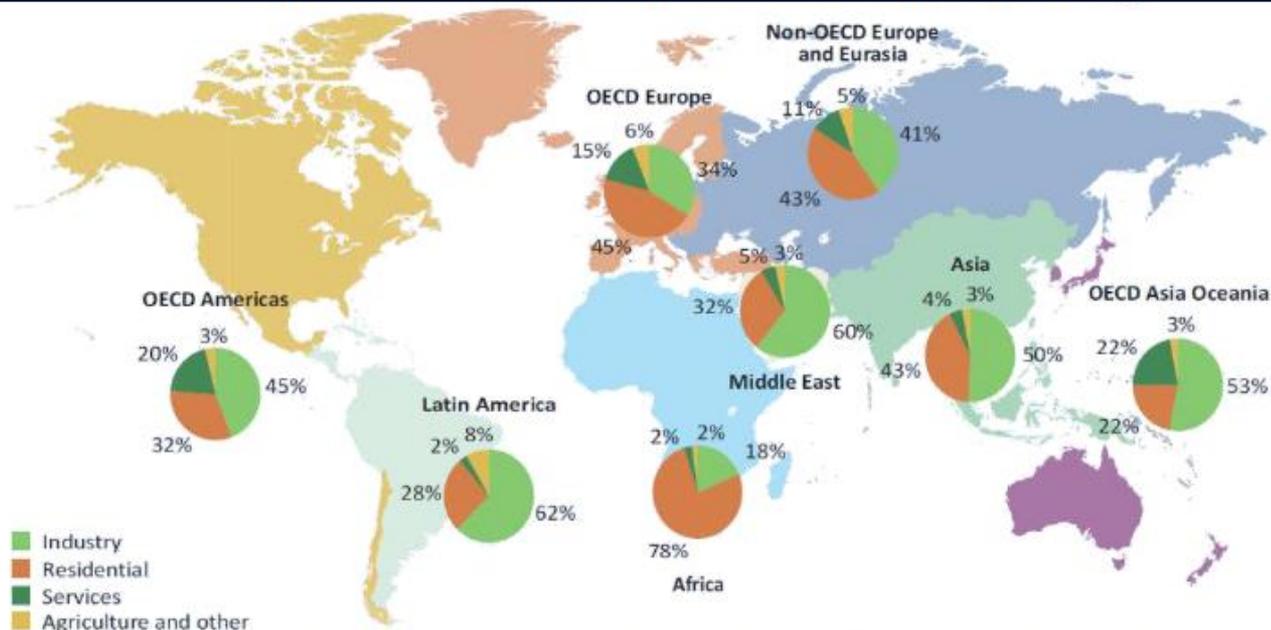
Consommation d'énergie de l'industrie : 360 EJ en 2014 (1EJ =  $10^{18}$  Joule)

**250.10<sup>6</sup> MWh<sub>th</sub>**

Source: IEA 2020

# Pourquoi la chaleur solaire pour l'industrie?

Au niveau mondial 45% de la chaleur est utilisée par l'industrie



This document and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

# Chaleur solaire photovoltaïque ou thermique?

*Solution 1 :*

Panneaux photovoltaïques + résistances :  
Rendement ~ 18%



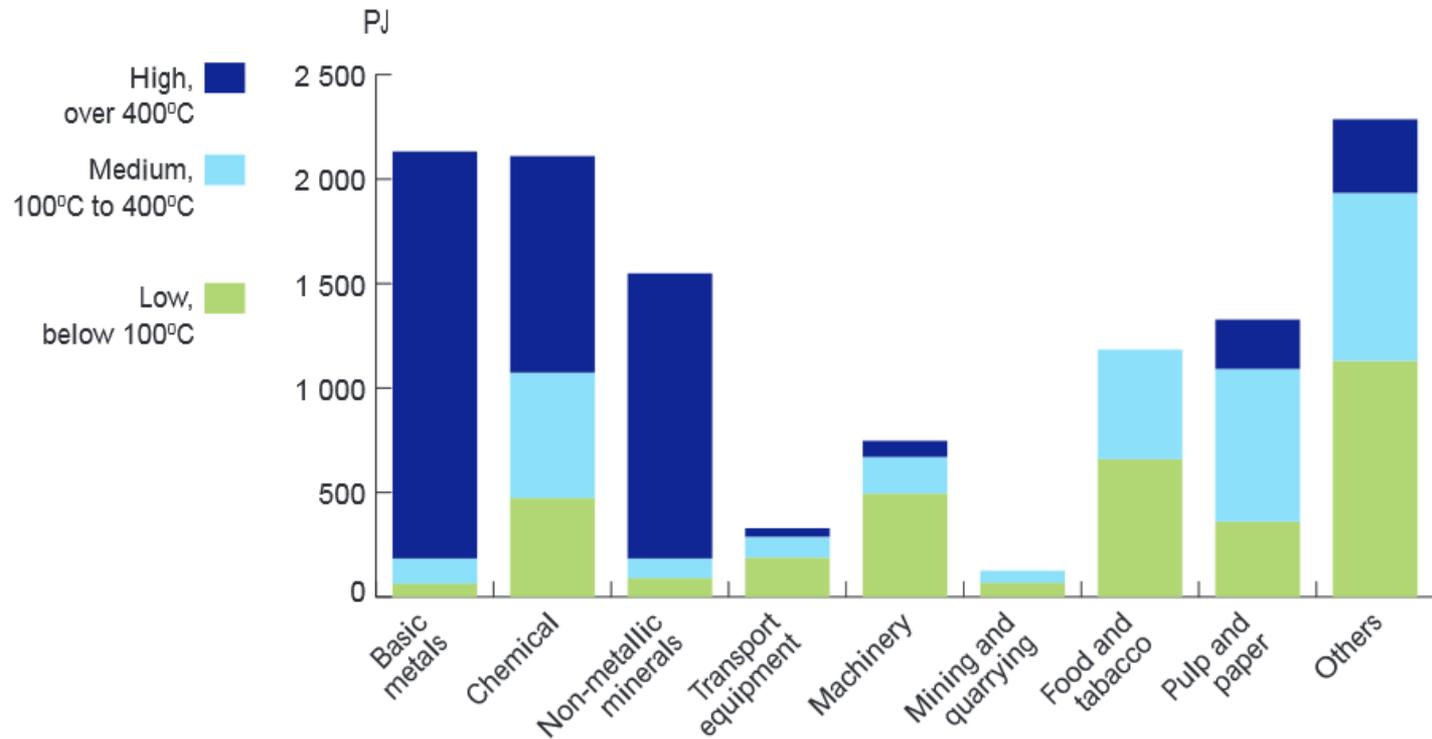
*Solution 2 :*

Collecteurs thermiques + stockage :  
Rendement capteurs plans ~ 70%  
Rendement avec concentration ~ 50%



# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie

# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie



Source: Werner, 2005-2006.

# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie

Applications à basses et moyennes températures (20-200°C)

## Secteurs industriels

Chimie  
Agroalimentaire  
Papier  
Traitement des métaux  
Caoutchouc et plastiques  
Machines outils et équipements  
Textile  
bois

## Types d'opération / procédé

Séchage et déshydratation  
Distillation  
Préchauffage  
Réfrigération  
Pasteurisation et stérilisation  
Nettoyage et lavage  
Réactions chimiques  
Traitements de surface  
Chauffage des locaux

# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie

## Applications à basses et moyennes températures (20-200°C)

Industrial Sector	Unit operation	Temperature range (°C)
Food	Drying	30-90
	Washing	60-90
	Pasteurising	60-80
	Boiling	95-105
	Sterilising	110-120
	Heat Treatment	40-60
	Beverages	Washing
Sterilising		60-90
Pasteurising		60-70
Paper Industry	Cooking and Drying	60-80
	Boiler feed water	60-90
	Bleaching	130-150
Metal Surface Treatment	Treatment, electro-plating, etc.	30-80
Bricks and Blocks	Curing	60-140

Industrial Sector	Unit operation	Temperature range (°C)
Textile Industry	Bleaching	60-100
	Dyeing	70-90
	Drying, De-greasing	100-130
	Washing	40-80
	Fixing	160-180
	Pressing	80-100
Chemical Industry	Soaps	200-260
	Synthetic rubber	150-200
	Processing heat	120-180
	Pre-heating water	60-90
Plastic Industry	Preparation	120-140
	Distillation	140-150
	Separation	200-220
	Extension	140-160
	Drying	180-200
	Blending	120-140
Flour By-products	Sterilising	60-90
All Industrial Sectors	Pre-heating of boiler feed water	30-100
	Industrial solar cooling	55-180
	Heating of factory buildings	30-80

# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie

Applications à hautes températures ( $\geq 400^{\circ}\text{C}$ )

## Secteurs industriels

- Chimie & pétrochimie
- Métallurgie (sidérurgie et non ferreux)
- Minéraux

## Types d'opération / procédé

Vapocraquage  
Reformage  
Gazéification  
Hydrogénation  
Polymérisation  
Catalyse  
Réduction  
Fusion  
Purification  
Déshydratation  
Calcination

...

# Les domaines d'utilisation de la chaleur dans l'industrie

## Applications à hautes températures dans l'industrie minérale

REACTION	Température (° C)	Chaleur spécifique (kJ/kg produit)	Usage
Calcination Calcite $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO}$	800-950	1700-1800	Ciment, chaux
Calcination Dolomie $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{MgO}.\text{CaO}$	650-750	1000-1100	Ciment, chaux dolomitique, réfractaires
Déshydratation Gypse $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4$	140-180	700-1000	Plâtre
Kaolinite $\rightarrow$ metakaolinite	500-900	> 700	Ciment Pouzzolanique
Calcination des phosphates	700-800	-	Fertilisants, industrie du Phosphore
Traitement thermique des argiles	700-800	-	Céramiques, tuiles, briques ...

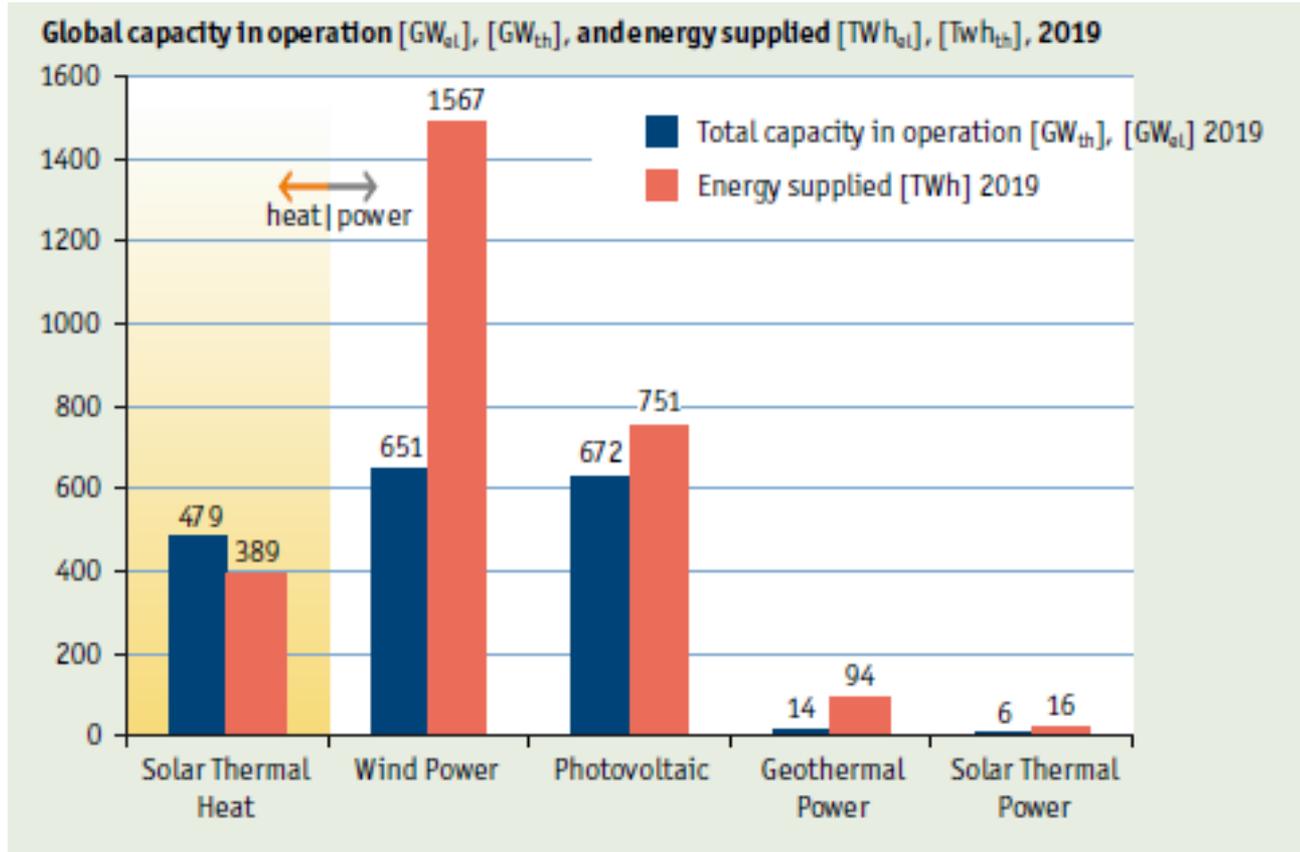
# Solutions technologiques actuelles

PROMES



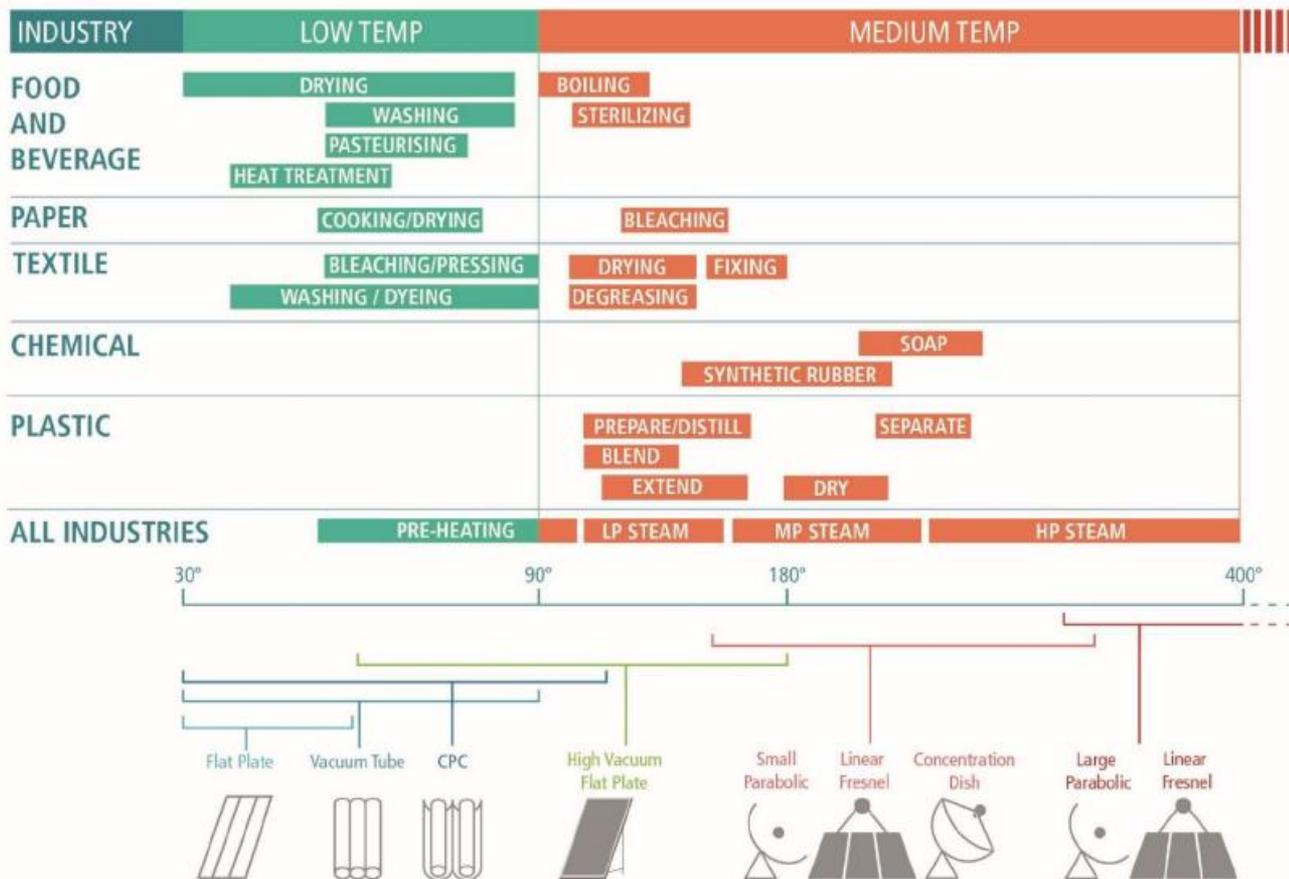
UNIVERSITÉ  
PERPIGNAN  
VIA  
DOMITIA





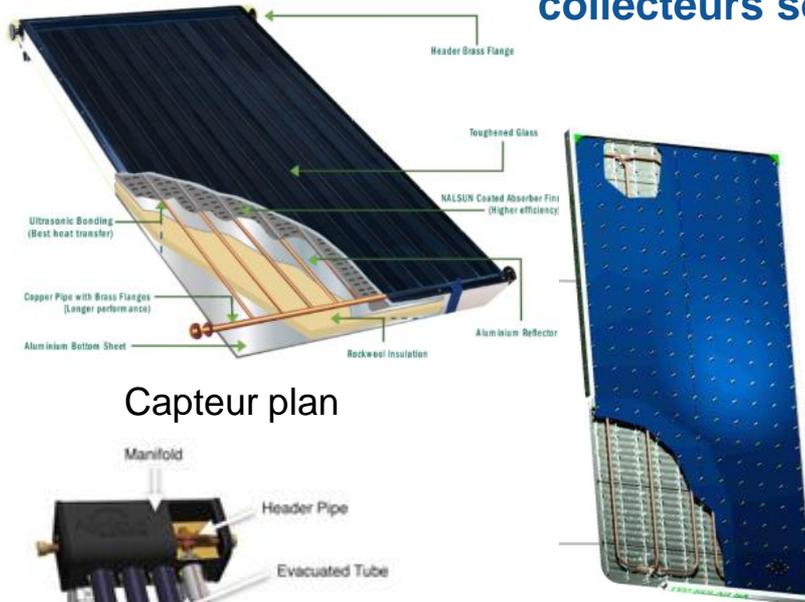
# Solutions technologiques actuelles

## Températures / collecteurs solaires



# Solutions technologiques actuelles

## collecteurs solaires



Capteur plan



Tube sous vide

Capteur plan sous ultra vide



Fresnel linéaire



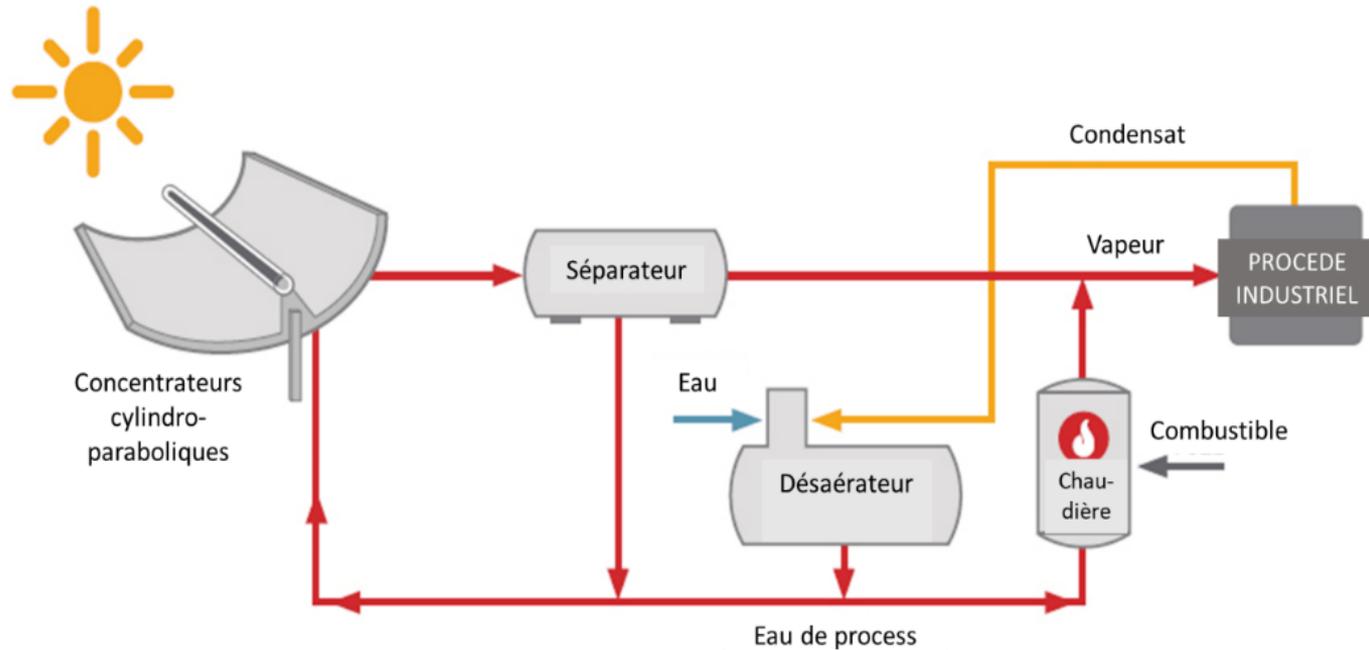
Paraboloïde



Cylindro-Parabolique

# Solutions technologiques actuelles

## Procédés



*Exemple avec génération directe de vapeur*

# Exemples de réalisations

## Exemples de réalisations



Papeterie de Condat, France. Surface de capteurs solaires thermiques sur trackers 4212 m<sup>2</sup>,  
3,4 MW<sub>th</sub> crête.  
*newheat*, 2019

## Exemples de réalisations



Fabrique de tabac, Jordanie. 1254 m<sup>2</sup> Fresnel linéaire.  
Vapeur, 225°C, 25 bars, 705 kW<sub>th</sub>

# Exemples de réalisations



Cogénération électricité-chaleur, *Aalborg*, Danemark. Concentrateurs cylindro-paraboliques  
 $16,6 \text{ MW}_{\text{th}}$

## Exemples de réalisations



Cuisine collective. « Arun dish » (*Clique Solar*, Inde), 80-100 kW<sub>th</sub>, 100-120 kg/h vapeur.

# Exemples de réalisations

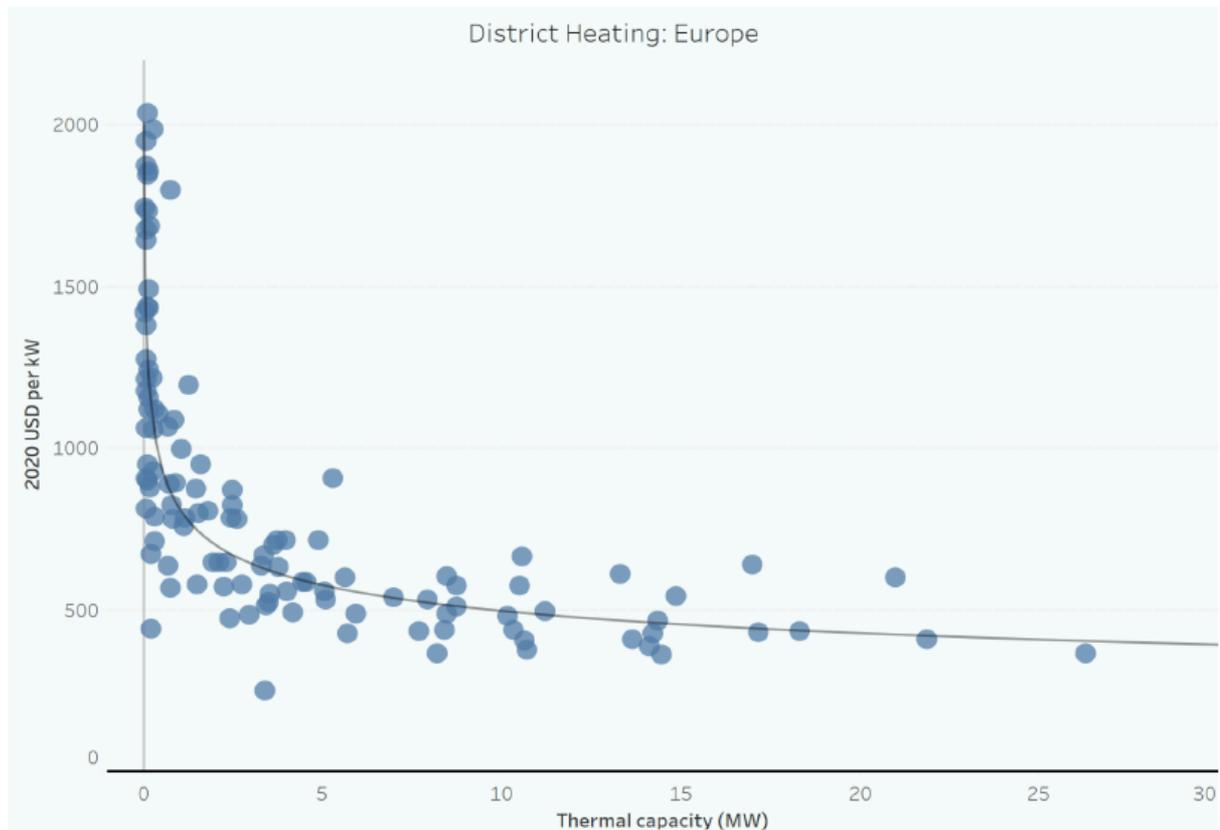
## Nouvelles installations multi-MW en 2020

Installation site	Size of solar field	Technology provider	Type of collector	Application	Commissioning date
Nibbixwoud, Netherlands	15,000 m <sup>2</sup> 10.5 MW	G2 Energy, Netherlands	Flat plate	Heating Freesia farm greenhouses	April 2020
Sanya, Hainan, China	6,645 m <sup>2</sup> 4.6 MW	Linuo Paradigma, China	Vacuum tube	Process heat	July 2020
Ganzhou, Tibet, China	5,500 m <sup>2</sup> 3.9 MW	Vicot, China	Parabolic trough	Preheat for agricultural drying	May 2020
Lhasa, Tibet, China	5,000 m <sup>2</sup> 3.5 MW	Sunrain, China	Vacuum tube	Heating agricultural greenhouses	September 2020
Izmir, Turkey	5,000 m <sup>2</sup> 3 MW	Soliterm, Germany	Parabolic trough	Process heat for packaging company	September 2020

# Coûts des solutions technologiques actuelles

# Coûts des solutions technologiques actuelles

Economies of Scale in District Heating Installed Costs



Source IRENA/Solrico/IEA Task 64, 2021

# Coûts des solutions technologiques actuelles

Table 3: Costs of concentrators

	Specific thermal power (kW/m <sup>2</sup> )	Location	Cost (USD/m <sup>2</sup> )	Cost (USD/kW)
CPC vacuum tube	0.60-0.65	China	130	200-220
		Europe	450-900	690-1500
	0.3	India <sup>a</sup>	333	1133
Parabolic dish fixed	0.21-0.31	India	113-300	365-1430
Parabolic dish tracking	0.34-0.74	India <sup>b,c</sup>	300-600	600-1760
Parabolic trough	0.50-0.56	Europe	650	1160-1300
	0.22- 0.28	India <sup>d</sup>	445	1580-2040
	0.55-0.7	Mexico	400-629	570-1100
Linear Fresnel	0.50-0.56	Europe	650-900	1160-1800

# Coûts des solutions technologiques actuelles

## Structure du coût (investissement, CAPEX)

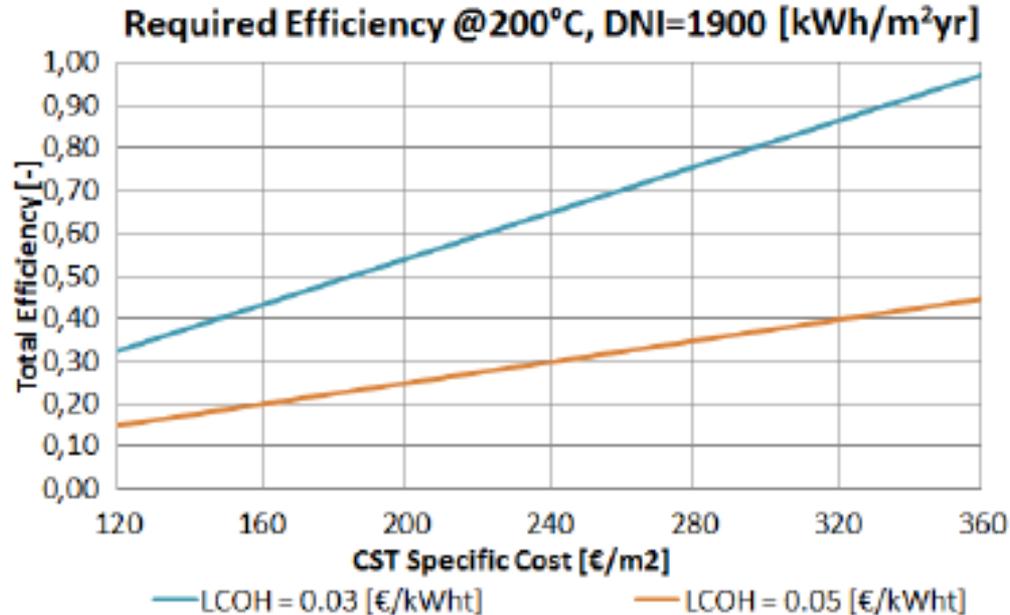
- Collecteurs : 50%
- Tuyauterie : 20%
- Echangeur et stockage tampon: 11%
- Contrôle : 5%
- Autres : 14%

## Coût de l'énergie thermique solaire (LCOH)

- ✓ Europe : coût moyen, 6,3 c€/kWh
- ✓ Avec concentration, pour un DNI cumulatifs annuels de plus de 1700 kWh/m<sup>2</sup>, le coût moyen de la chaleur solaire est de 2,5 c€/kWh (1,5 c€/kWh au Mexique pour un DNI >2000 kWh/m<sup>2</sup>)
- A titre de comparaison: la chaleur industrielle issue de la biomasse coute 2,6-7,6 c€/kWh et celle du gaz naturel 4,2-5,8 c€/kWh). Source : ADEME 2020.

# Coûts des solutions technologiques actuelles

## LCOH pour la technologie Fresnel linéaire



Source: Gabrielli et al. Energy Procedia, (2014), 49, 1340

# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

PROMES



UNIVERSITÉ  
PERPIGNAN  
VIA  
DOMITIA



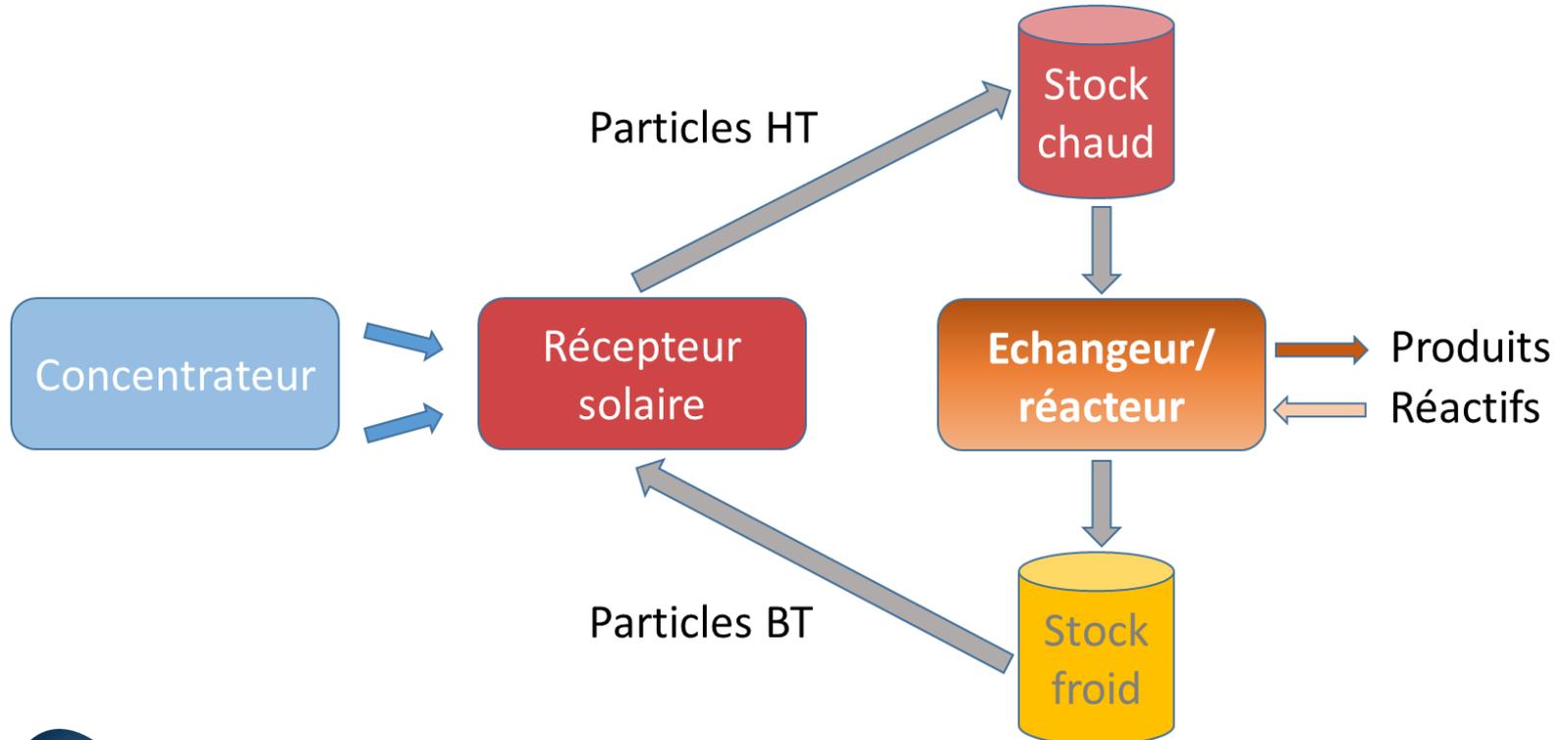
# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

Si on ajoute les concentrateurs à tour (récepteur central) les technologies commerciales actuelles permettent de produire de la chaleur solaire jusqu'à 550°C environ et après?

1. Il n'existe pas d'installations solaires industrielles à  $T > 550^\circ\text{C}$ .
2. Les concentrateurs à tour et le paraboloïdes permettent d'envisager des applications jusqu'à 1500°C.
3. En termes de structure de procédé, 2 options possibles : chauffage direct du produit ou indirect par un caloporteur. Seule la seconde solution permet l'intégration d'un stockage.
4. Les caloporteurs potentiels sont: les gaz, les métaux liquides, les sels à haute température (carbonates, chlorures) et les particules.
5. Les contraintes : assurer un fonctionnement continu et une qualité équivalent aux procédés classiques

# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

## 1-Particles comme caloporteur, concept



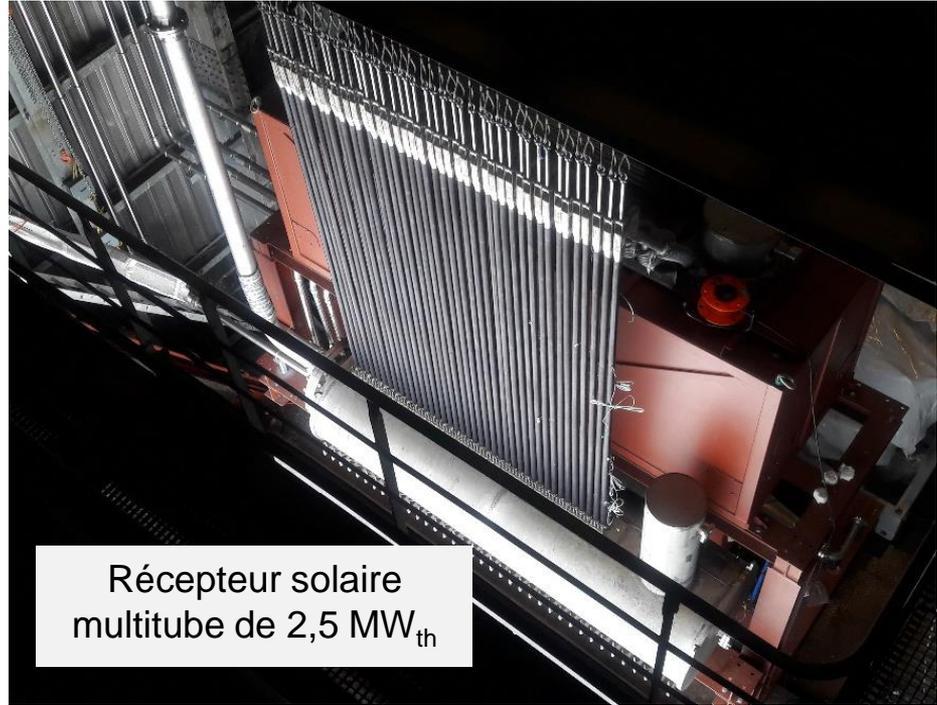
# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

Particules comme caloporteur, preuve de concept

Particules fluidisées  
à 750°C chauffées  
par énergie solaire



Récepteur solaire  
multitube de 2,5 MW<sub>th</sub>



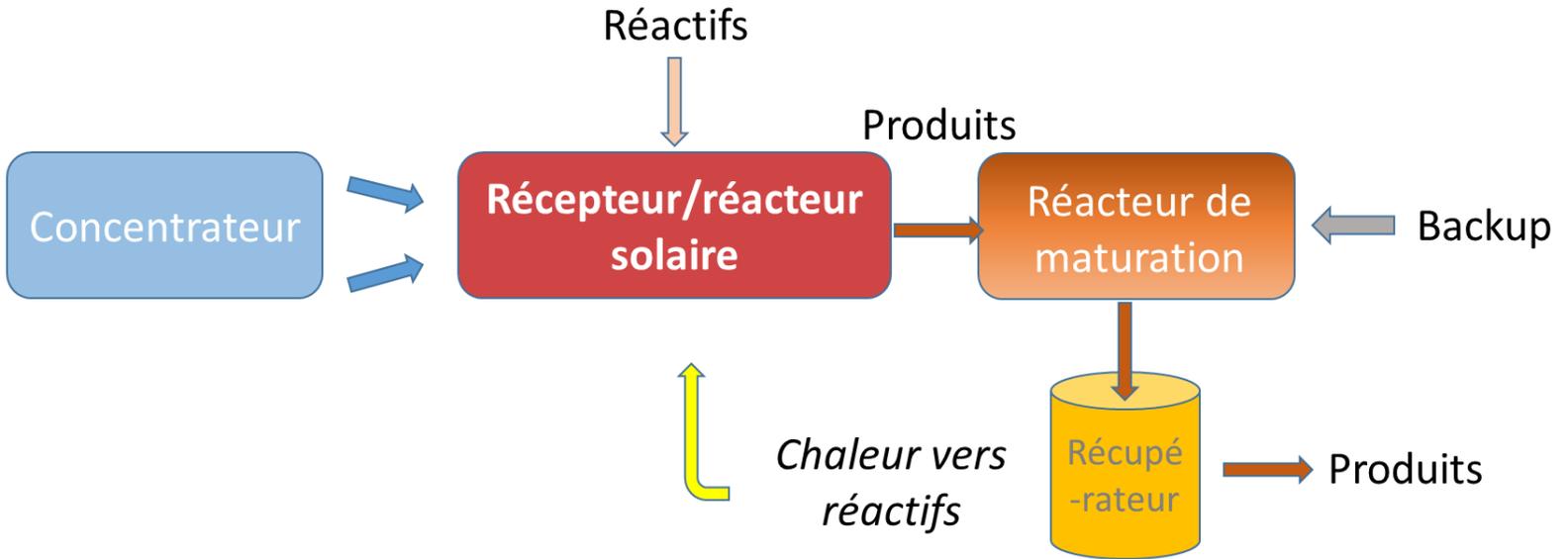
# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

## Particles comme caloporteur, quelques défis

- ✓ Optique de concentration à faible dispersion (erreurs optiques)
- ✓ Répartition et contrôle de la densité de flux solaire sur les tubes absorbeurs
- ✓ Modification des écoulements solide-gaz avec la température
- ✓ Matériaux : céramiques pour les  $T > 750^{\circ}\text{C}$
- ✓ Transport des particules chaudes
- ✓ Design de l'échangeur/réacteur

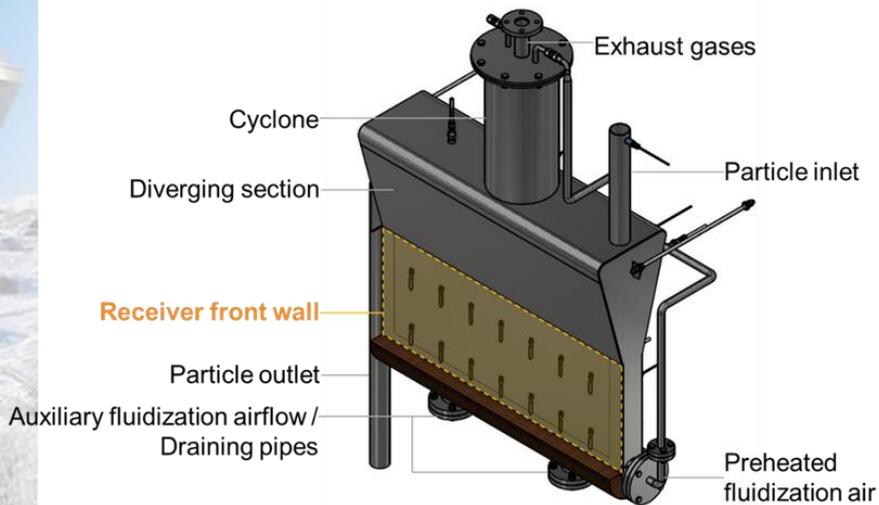
# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

## 2-Particles comme réactif, concept

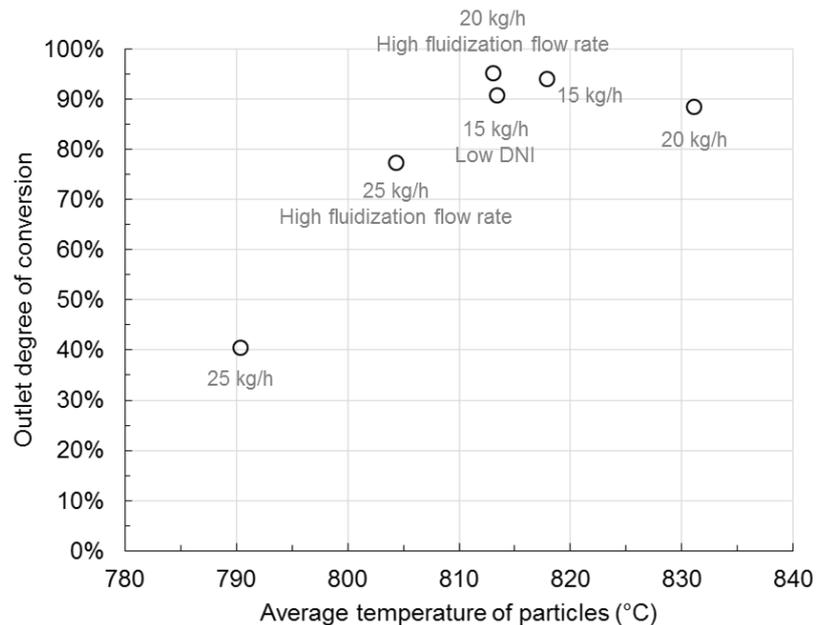


# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

## 2-Particles comme réactif, preuve de concept : Calcination de $\text{CaCO}_3$



Pilote solaire 50 kW<sub>th</sub>



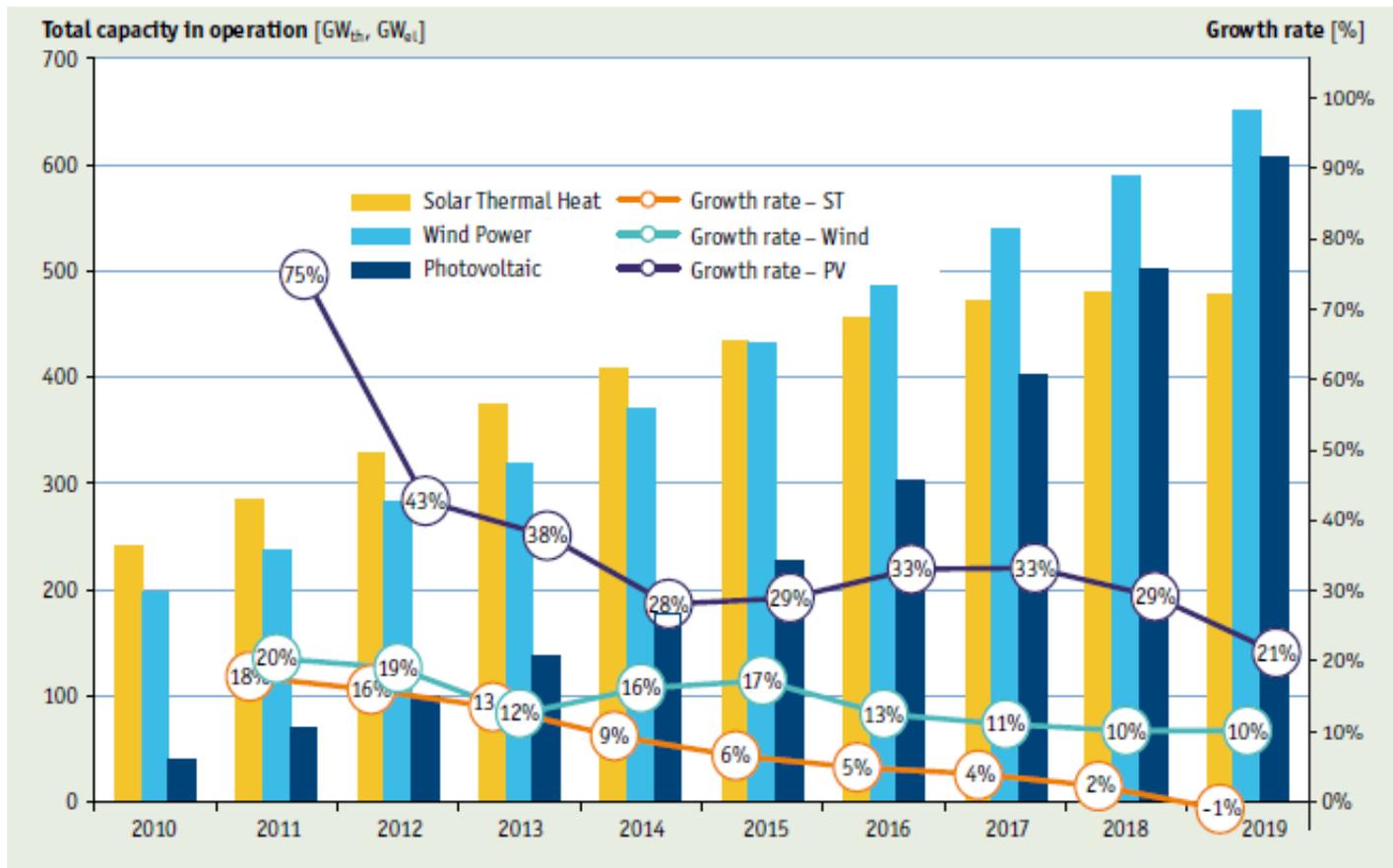
# Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

## 2-Particules comme réactif, quelques défis

- ✓ Optique de concentration à faible dispersion (erreurs optiques)
- ✓ Fonctionnement transitoire (au fil du soleil)
- ✓ Contrôle de la température de réaction et du temps de séjour des particules
- ✓ Réacteur de maturation nécessaire pour maintenir la qualité des produits
- ✓ Matériaux : céramiques pour les  $T > 800^{\circ}\text{C}$
- ✓ Design du récupérateur

# Conclusion

# Conclusion



Source : Solar heat worldwide, SHC-IEA



# Conclusion

- ✓ **Malgré les enjeux énergétiques, la dynamique de développement des applications de l'énergie solaire pour la chaleur industrielle est lente.**
- ✓ **Le coût de l'investissement est certainement un frein au développement mais les défis en termes de procédés (fonctionnement quasi continu, intégration à l'existant, transitoires) sont importants et contribuent à l'atonie du secteur.**
- ✓ **Dans les prochaines années, les contraintes concernant la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> devraient permettre de relancer le secteur.**
- ✓ **En termes de recherche et développement, le domaine de la production de chaleur solaire à haute température (>400°C) et l'intégration aux procédés industriels constitue un champ pluridisciplinaire très ouvert.**
- ✓ **Les procédés hybrides (PV-CSP, solaire-biomasse, solaire-géothermie ...) offrent un spectre d'options très riche dans le contexte européen et français.**



# Conclusion

## Quelques actions structurantes

- Projets européens :  
INSHIP, SHIP2FAIR
- Réseaux :  
IEA SHC Task 64 – Solar Process Heat  
ESTIF
- Initiatives :  
Solar-payback  
Solar thermal world
- Fond Chaleur de l'ADEME



**Merci de votre attention**

Gilles.flamant@promes.cnrs.fr

www.promes.cnrs.fr

www.cnrs.fr

