



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).

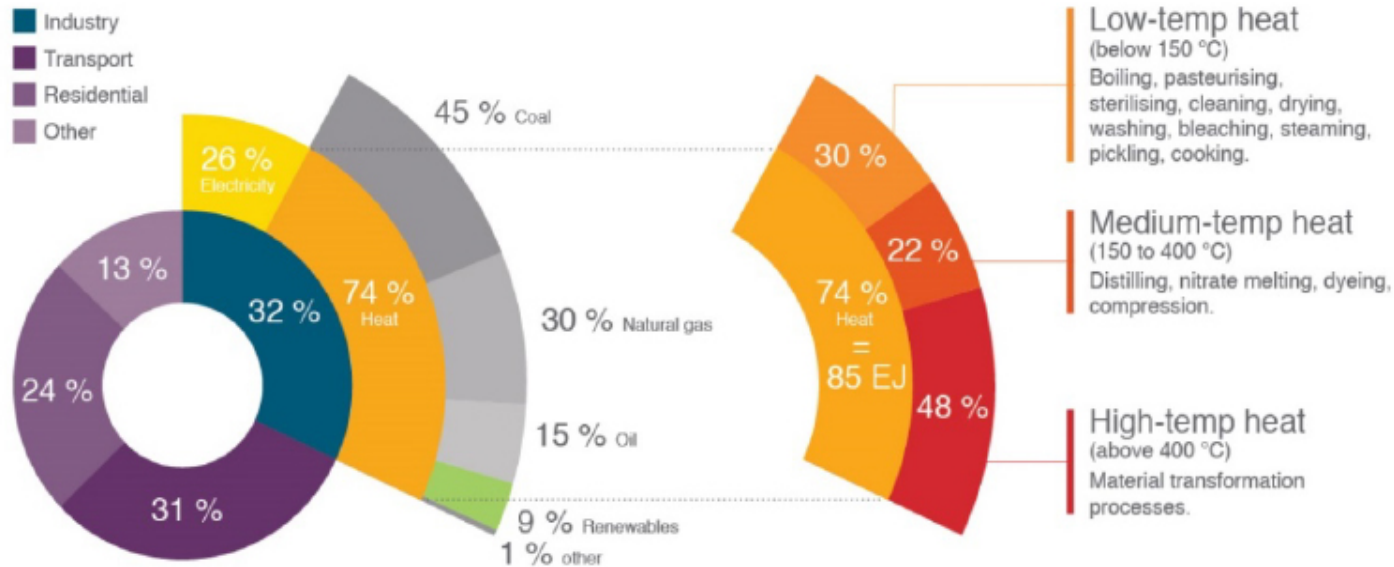
~90% de la chaleur industrielle sont fournis par combustion de combustibles fossiles (majoritairement le charbon).

L'industrie est responsable de 21% des émissions de CO₂

- 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?



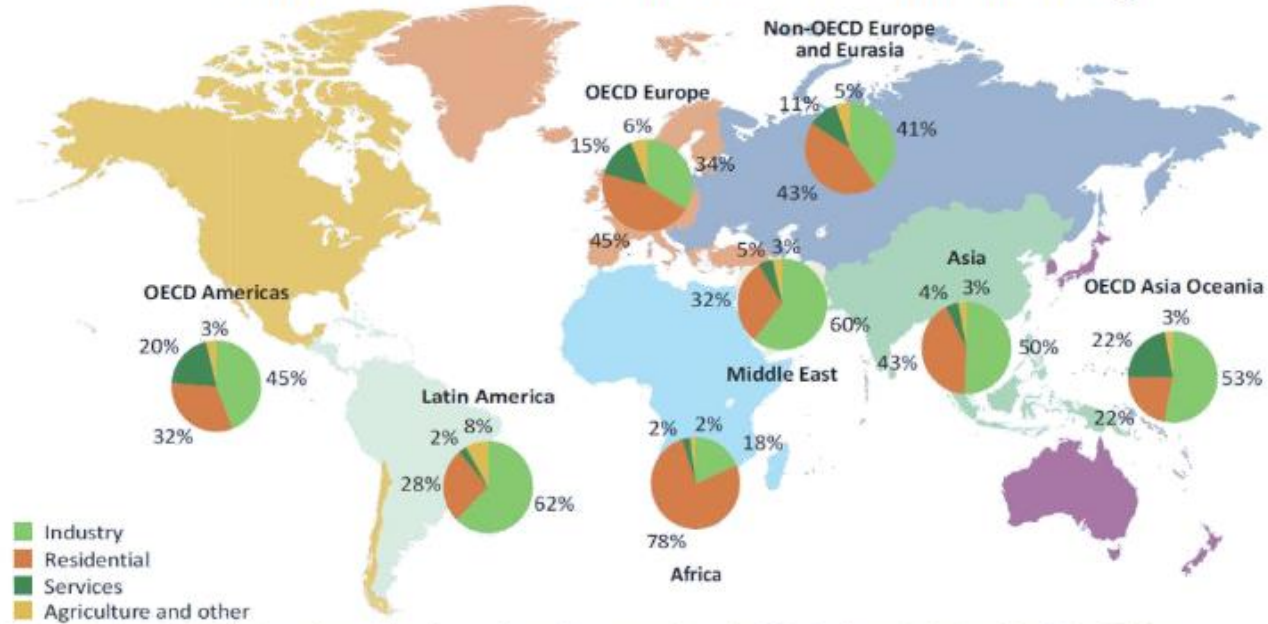
Consommation d'énergie de l'industrie : 360 EJ en 2014 (1EJ = 10¹⁸ Joule)

250.10⁶ MWh_{th}

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%



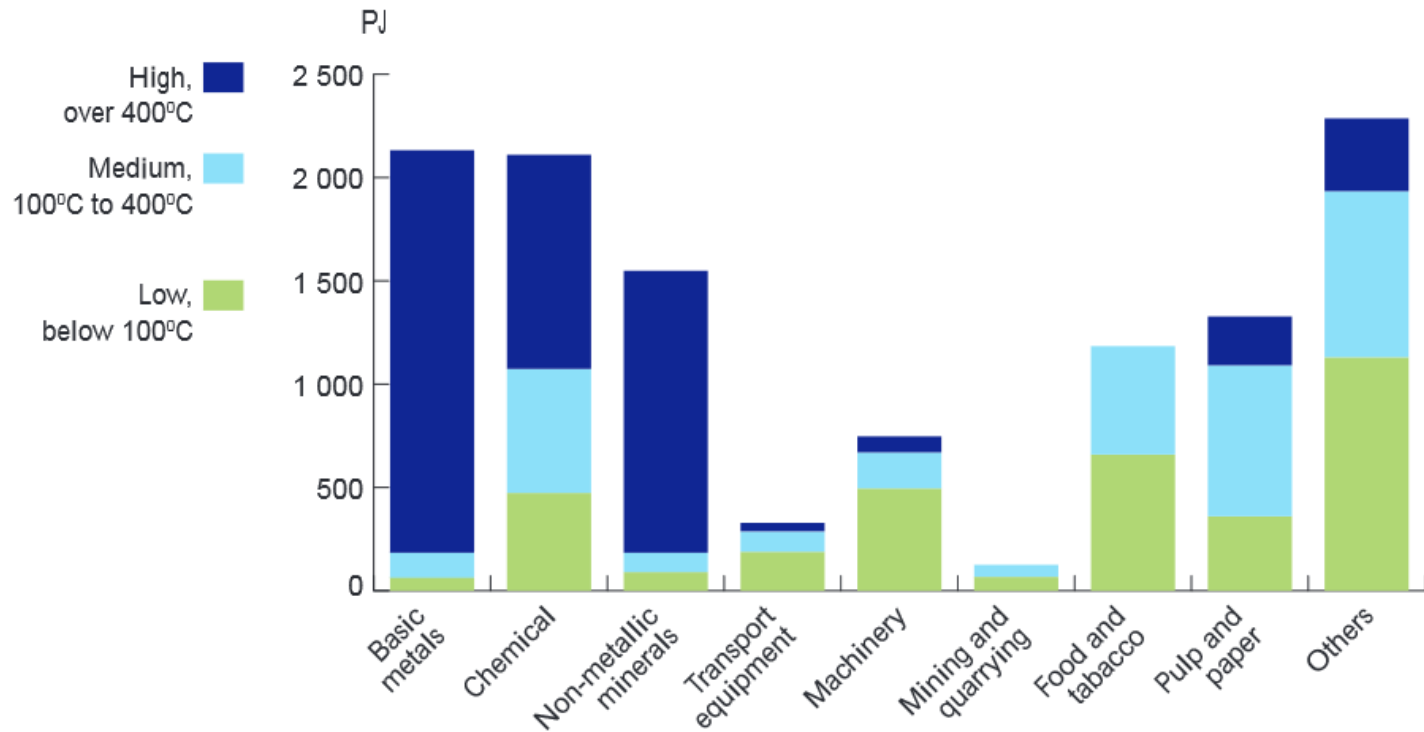
Solution 2 :

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 ...

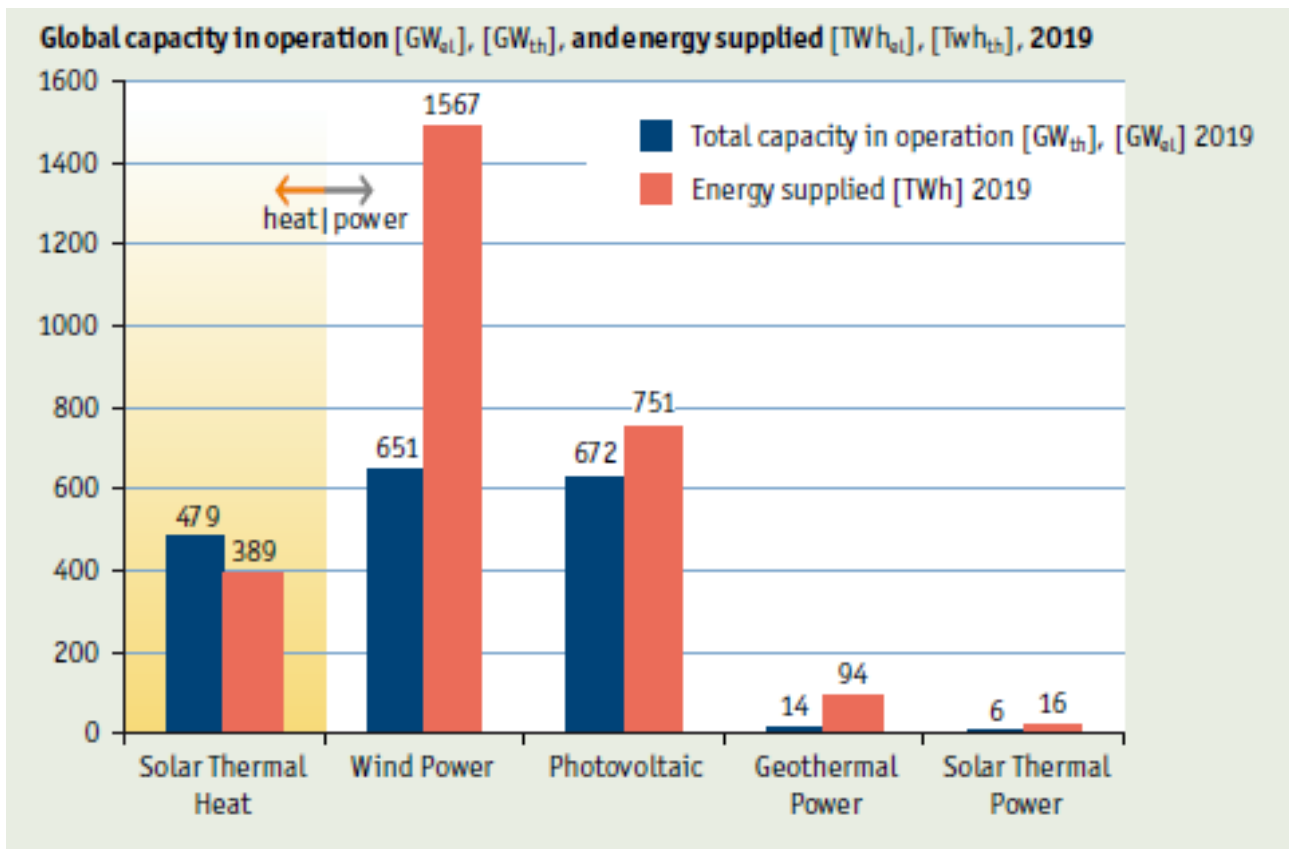
Solutions technologiques actuelles

PROMES



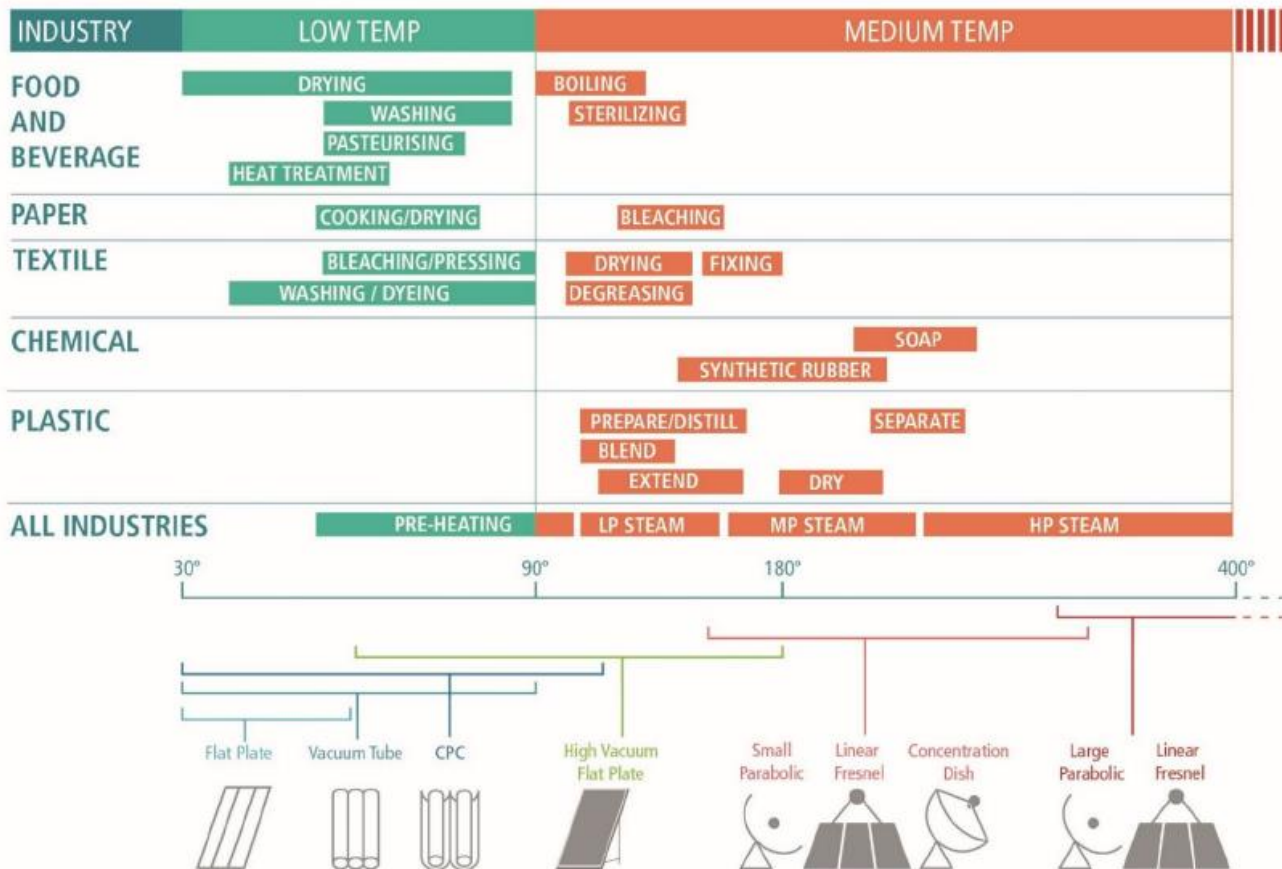
UNIVERSITE
PERPIGNAN
VIA
DOMITIA





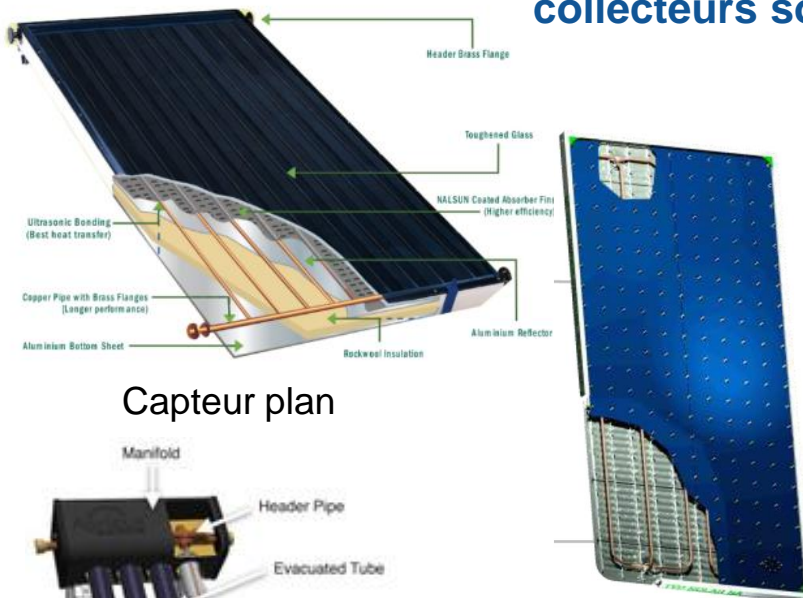
Solutions technologiques actuelles

Températures / collecteurs solaires



Solutions technologiques actuelles

collecteurs solaires



Capteur plan



Tube sous vide

Capteur plan sous ultra vide



Fresnel linéaire



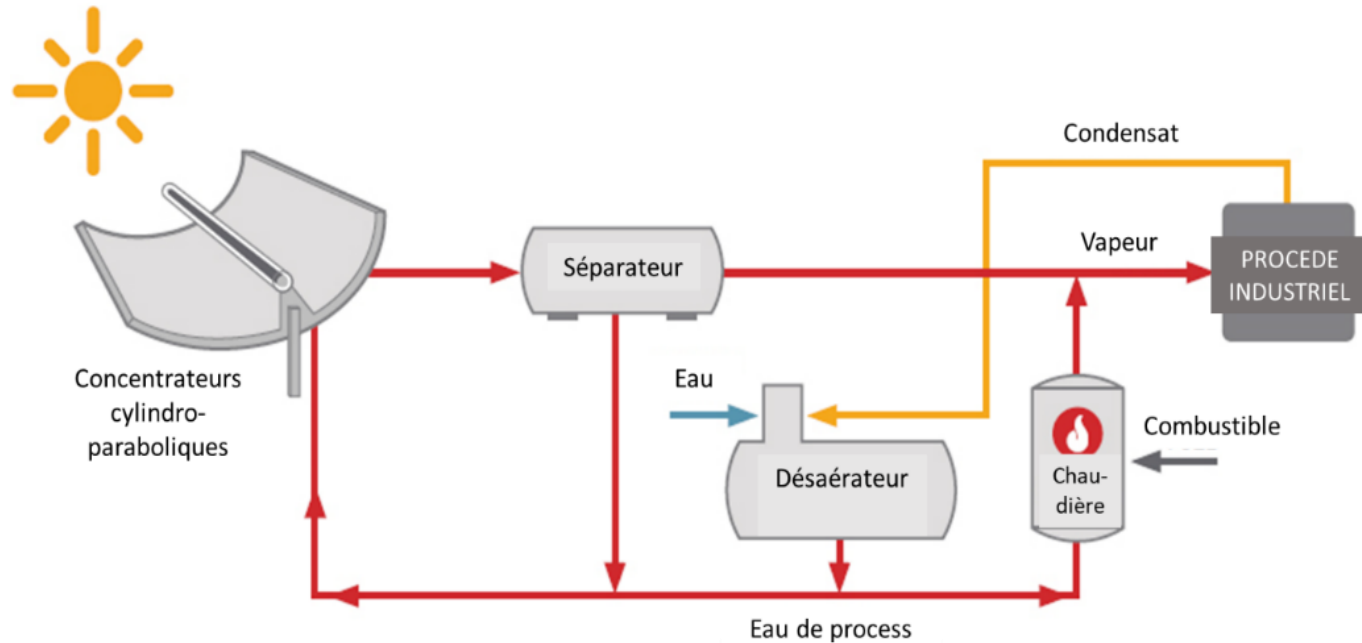
Paraboloïde



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 m²,
3,4 MW_{th} crête.
newheat, 2019

Exemples de réalisations



Fabrique de tabac, Jordanie. 1254 m² Fresnel linéaire.
Vapeur, 225°C, 25 bars, 705 kW_{th}

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_{th}, 100-120 kg/h vapeur.

Exemples de réalisations

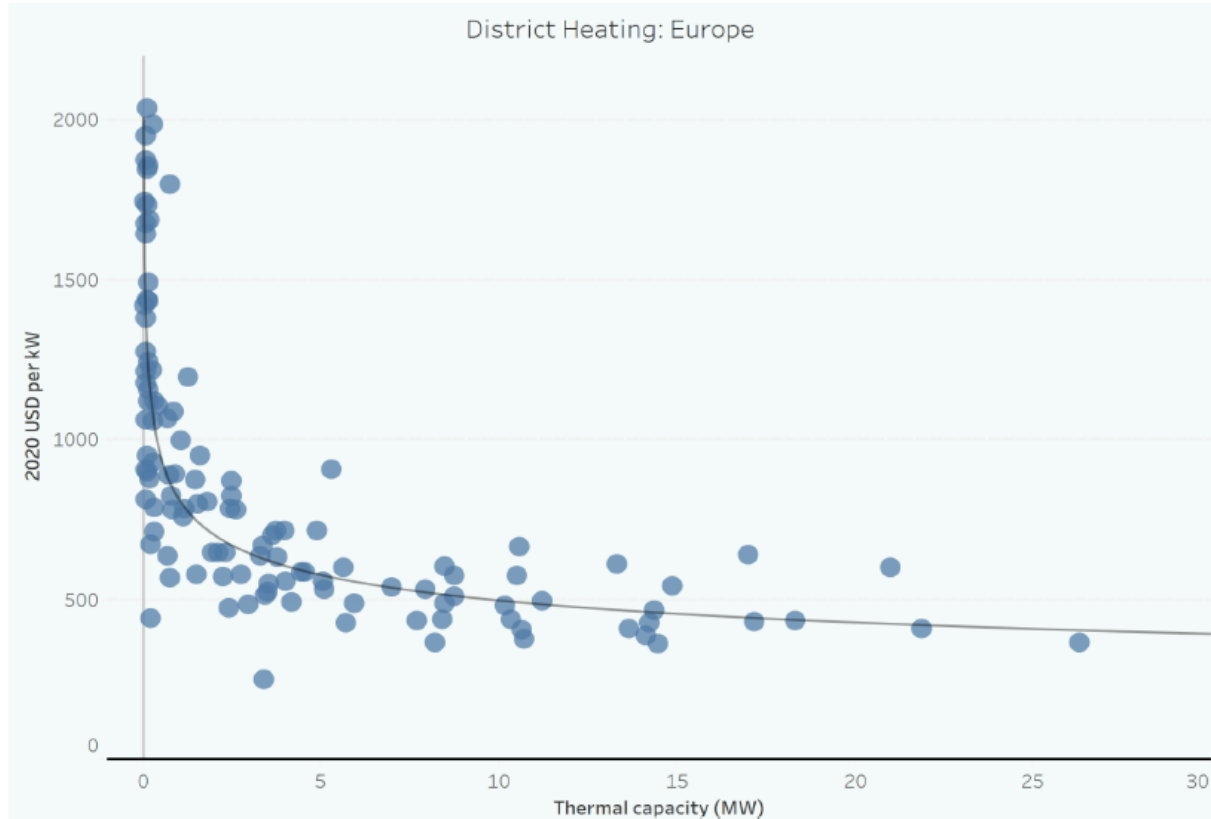
Nouvelles installations multi-MW en 2020

Installation site	Size of solar field	Technology provider	Type of collector	Application	Commissioning date
Nibbixwoud, Netherlands	15,000 m ² 10.5 MW	G2 Energy, Netherlands	Flat plate	Heating Freesia farm greenhouses	April 2020
Sanya, Hainan, China	6,645 m ² 4.6 MW	Linuo Paradigma, China	Vacuum tube	Process heat	July 2020
Ganzhou, Tibet, China	5,500 m ² 3.9 MW	Vicot, China	Parabolic trough	Preheat for agricultural drying	May 2020
Lhasa, Tibet, China	5,000 m ² 3.5 MW	Sunrain, China	Vacuum tube	Heating agricultural greenhouses	September 2020
Izmir, Turkey	5,000 m ² 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 ²)	Location	Cost (USD/m ²)	Cost (USD/kW)
CPC vacuum tube	0.60-0.65	China	130	200-220
		Europe	450-900	690-1500
	0.3	India ^a	333	1133
Parabolic dish fixed	0.21-0.31	India	113-300	365-1430
Parabolic dish tracking	0.34-0.74	India ^{b,c}	300-600	600-1760
Parabolic trough	0.50-0.56	Europe	650	1160-1300
	0.22- 0.28	India ^d	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)

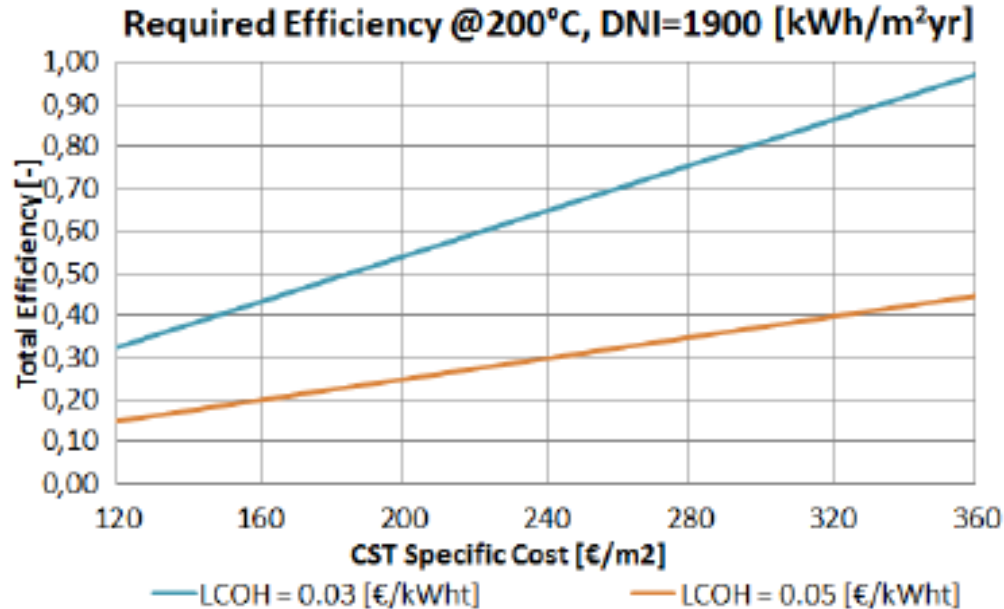
- Collecteurs : 50%
- Tuyauterie : 20%
- Echangeur et stockage tampon: 11%
- Contrôle : 5%
- Autres : 14%

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/m², le coût moyen de la chaleur solaire est de 2,5 c€/kWh (1,5 c€/kWh au Mexique pour un DNI >2000 kWh/m²)
- 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

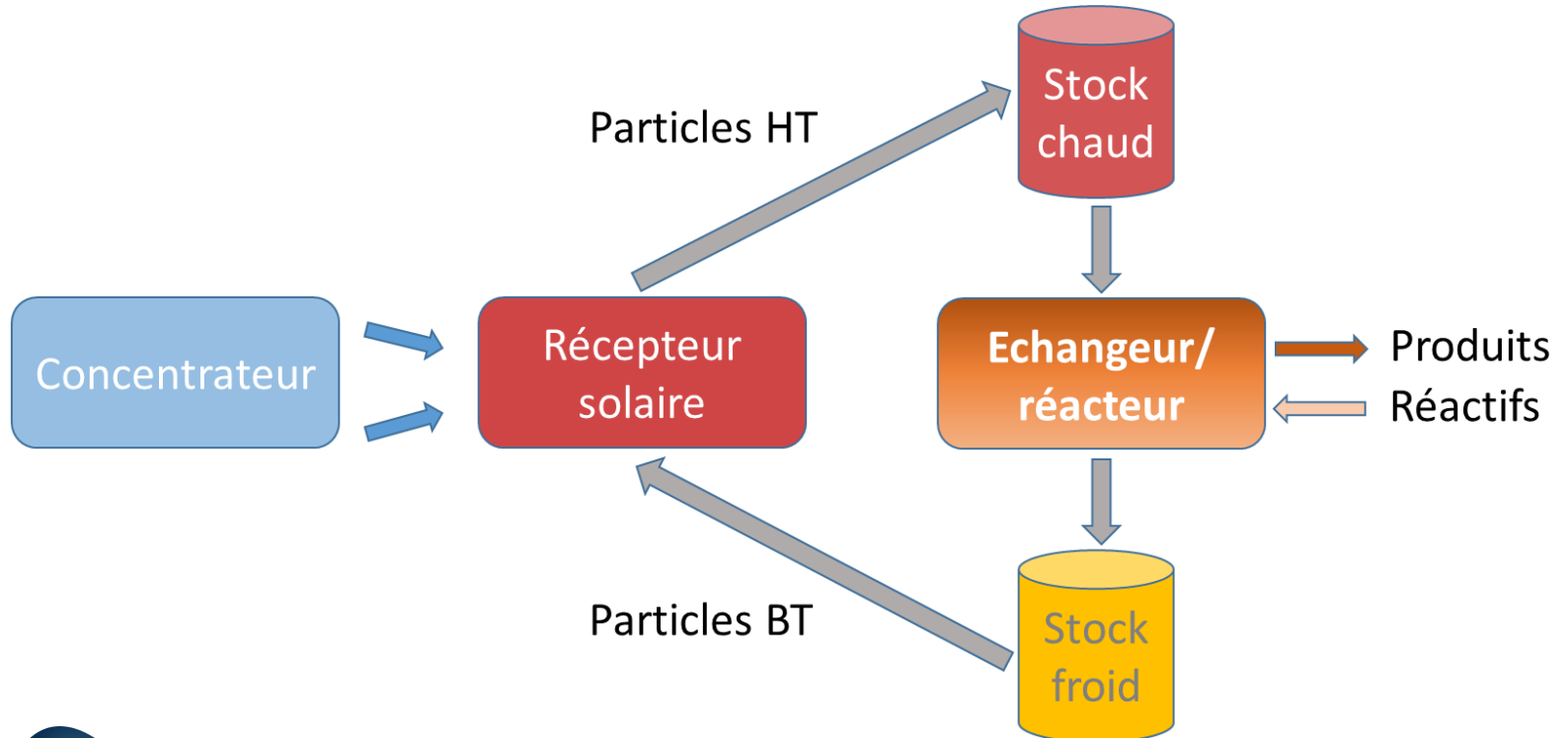
Si on ajoute les concentrateurs à tour (récepteur central) les technologies commerciales actuelles permettent de produire de la chaleur solaire jusqu'à 550°C environ et après?

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



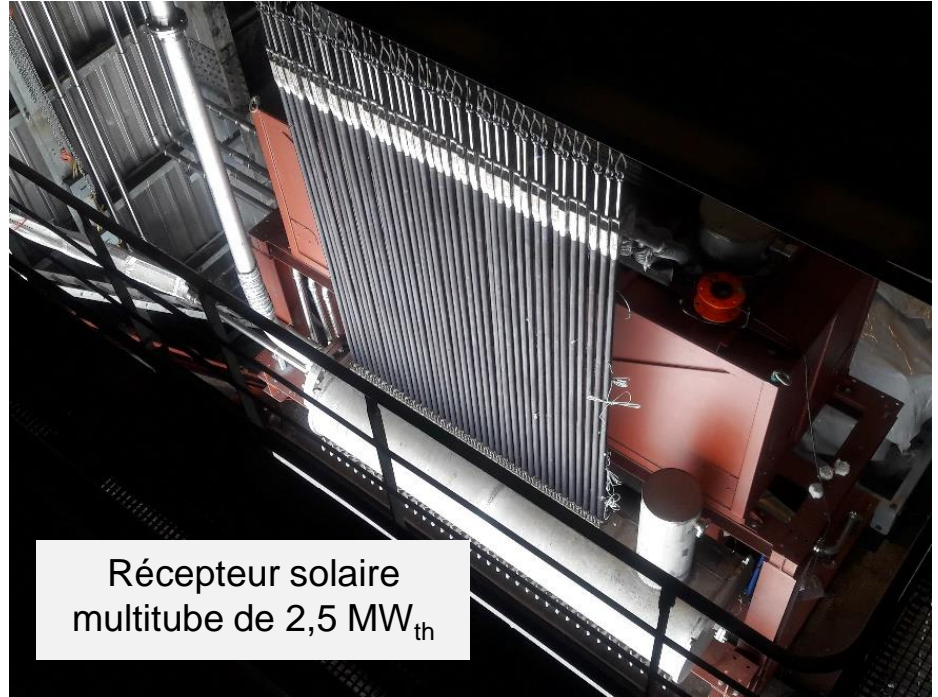
Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

Particules comme caloporteur, preuve de concept

Particules fluidisées
à 750°C chauffées
par énergie solaire



Récepteur solaire
multitube de 2,5 MW_{th}



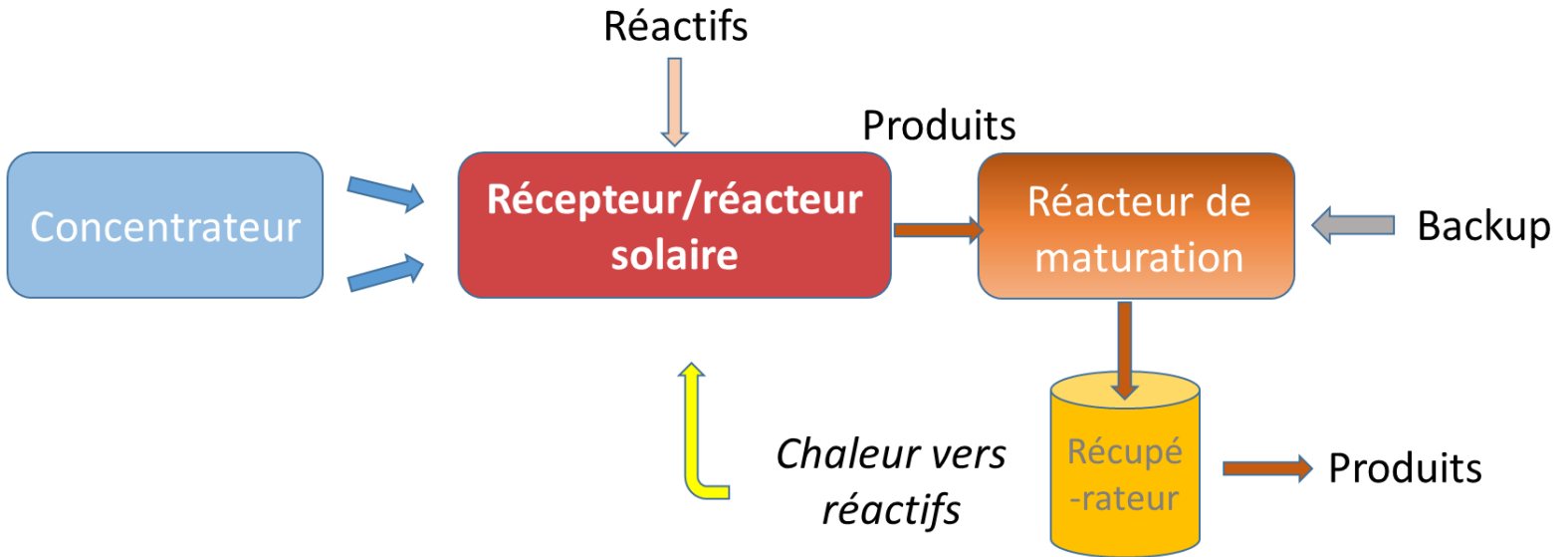
Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

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

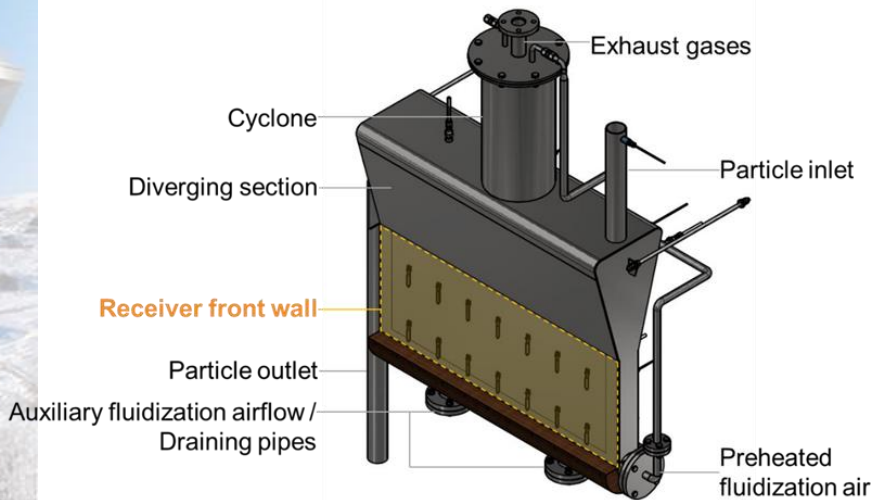
Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

2-Particles comme réactif, concept

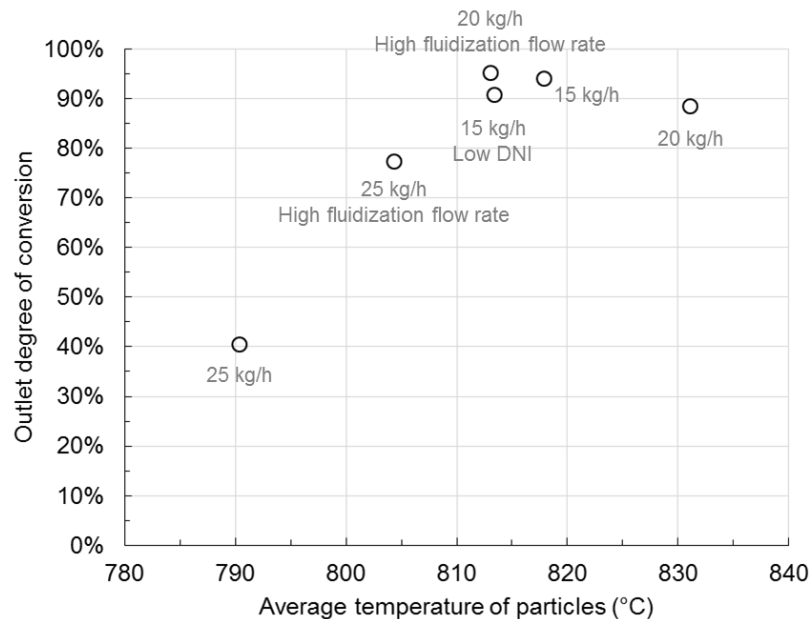


Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

2-Particles comme réactif, preuve de concept : Calcination de CaCO_3



Pilote solaire 50 kW_{th}



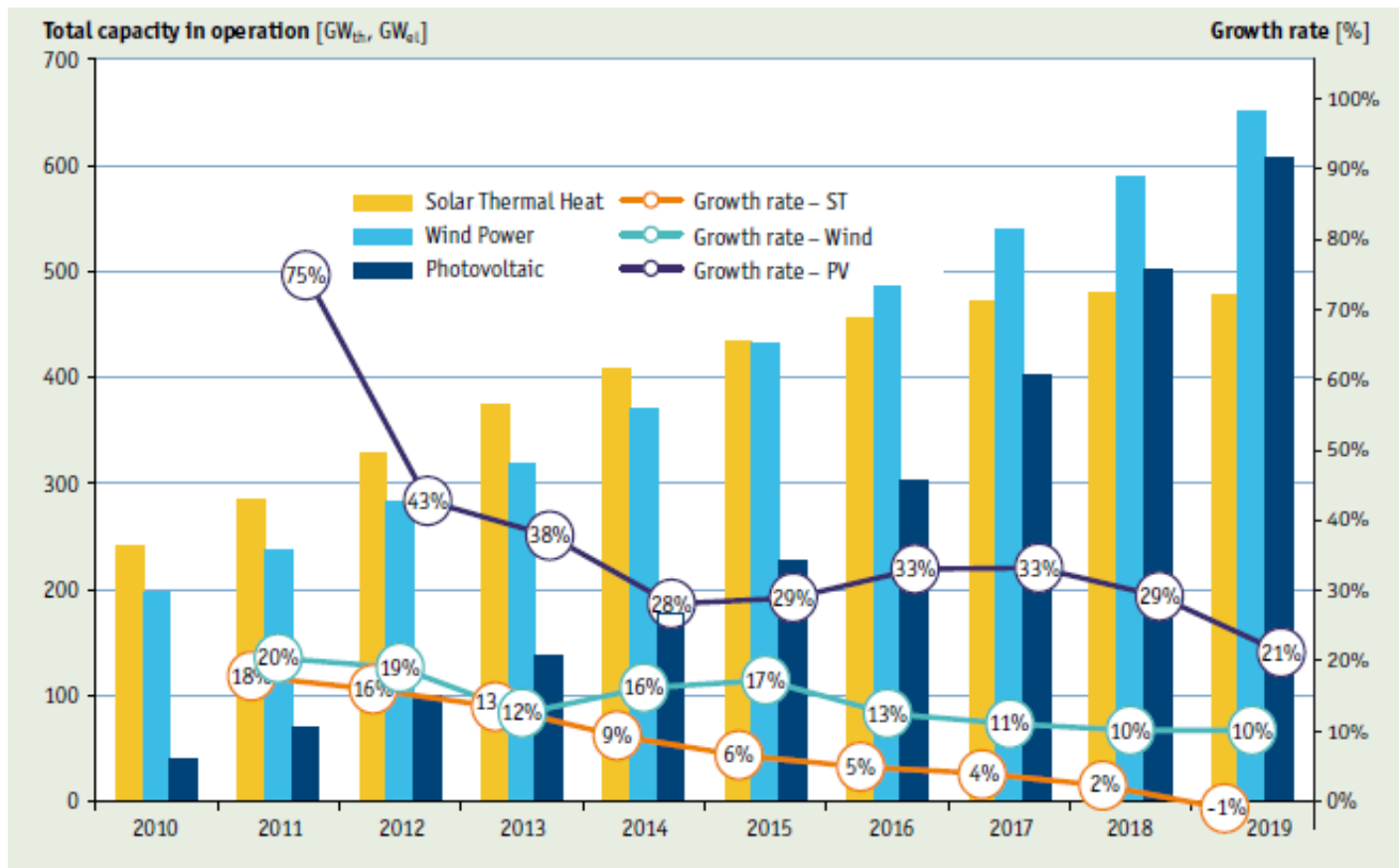
Défis scientifiques et technologiques dans le domaine des hautes températures

2-Particles 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 CO₂ 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

