

Les récepteurs solaires surfaceutiques: état de l'art et applications

LABORATOIRE
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX
et ENERGIE SOLAIRE
UPR 8521 du CNRS,
conventionnée avec
l'université de Perpignan
PROCESSES, MATERIALS
and SOLAR ENERGY
LABORATORY

Alain
FERRIERE



Le récepteur solaire: un composant critique d'une centrale solaire

- Siège de la conversion du rayonnement solaire concentré en chaleur sensible à haute température
- Composant qui supporte les températures les plus élevées dans une centrale solaire
- Composant soumis à des régimes transitoires violents, liés aux variations d'ensoleillement



Objectifs de la conception d'un récepteur solaire

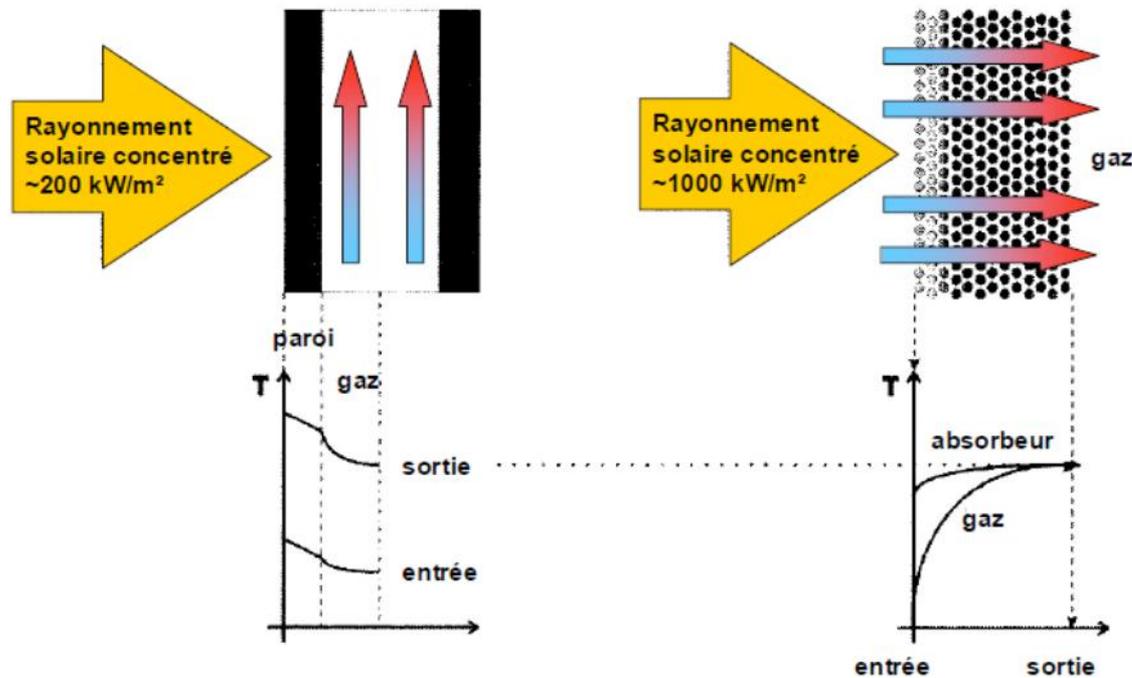
- Rendement de conversion élevé
- Fiabilité élevée
- Durée de vie longue
- Résistance aux hautes températures
- Tenue à la fatigue thermique
- Coût modéré
- Essais de qualification nécessaires

Les problématiques

- **Scientifiques:**
 - comportement et propriétés des matériaux HT
 - étude des écoulements fluides turbulents
 - intensification des transferts thermiques
- **Technologiques:**
 - sélection des matériaux
 - mise en forme des matériaux
 - assemblage des matériaux
- **Economiques:**
 - maîtrise des coûts de fabrication
 - maîtrise des coûts de maintenance

Les technologies d'absorbeur

- Absorption surfacique / absorption volumique



Paramètres déterminants

- **Quel fluide de transfert ?**
huile thermique, sels fondus
eau/vapeur
air, He, H₂, CO₂
suspension de particules
- **Quelle température de travail ?**
250°C - >1000°C
- **Quelle pression de travail ?**
1 bar - 140 bar
- **Quelle puissance ?**
50 kW_{th} - 200 MW_{th}

Fluides de transfert

	λ	ρ	C_p	μ	Pr	h
	W/m.K	Kg/m ³	kJ/kg.K	Kg/m.s		W/m ² .K
Huile thermique	0,1	870	2,6	$3 \cdot 10^{-4}$	7,4	2000
Sel fondu Hitec	0,3	1750	1,6	$1,5 \cdot 10^{-3}$	7,3	5000 8000
Eau liq. 100 bar	0,62	800	4,8	$1 \cdot 10^{-4}$	0,86	6000 7000
Vapeur saturée	0,018	55	1,8	$2 \cdot 10^{-5}$		2300 2900
Vapeur sèche						170 230
Air atm	0,05	1	1,1	$2 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-5}$	0,72	10 500
Air pressurisé	-	3 12	-	-	-	200 800

Hitec: 53% KNO₃ 7%NaNO₃ 40% NaNO₂

Absorbeur surfacique

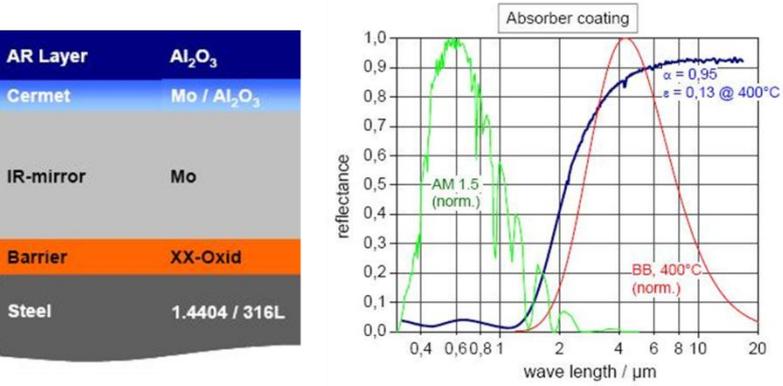
Objectif: augmenter le rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon}$

- Sélection des matériaux
- Revêtements, couches sélectives
- Cas des cavités: privilégier l'émission thermique vers les parois de la cavité
 - Indicatrice d'émission avec lobes latéraux
 - Micro-géométrie de surface (texturation)

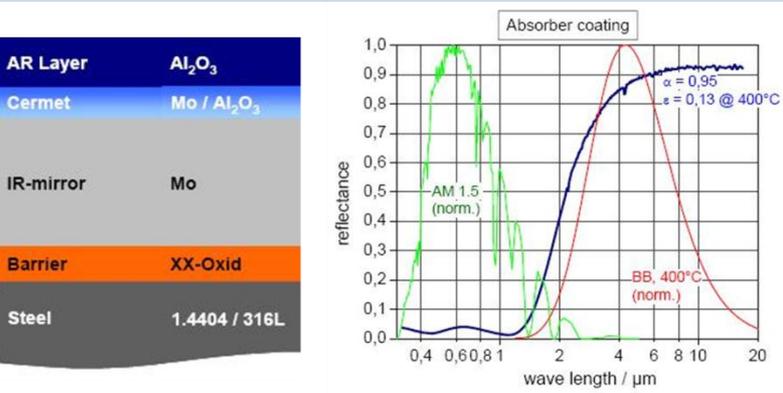
Objectif: uniformiser la distribution de flux solaire incident

- Géométrie optimale

Revêtements sélectifs

	α_{sol}	ε	α_{sol}/ε
Nickel noir (2 couches sur Ni et acier)	0,94	0,07	13,4
Al ₂ O ₃ /Mo/Al ₂ O ₃ /Mo/Al ₂ O ₃ Mo/Al ₂ O ₃	0,91	0,085	10,7
Chrome noir	0,95	0,09	10,5
CuO sur Al	0,93	0,11	8,5
CuO sur Ni	0,81	0,17	4,8
Nickel noir	0,8 – 0,9	0,16 – 0,18	4,4 - 5,6
	0,95	0,13	7,3
Peinture Pyromark®	0,95	0,95	1

Revêtements sélectifs

	α_{sol}	ε	α_{sol}/ε
Nickel noir (2 couches sur Ni et acier)	0,94	0,07	13,4
$Al_2O_3/Mo/Al_2O_3/Mo/Al_2O_3Mo/Al_2O_3$	0,91	0,085	10,7
Chrome noir	0,85	0,09	10,5
CuO sur Al	0,9	0,11	8,5
CuO sur Ni	0,81	0,17	4,8
Nickel noir	0,8 – 0,9	0,16 – 0,18	4,4 - 5,6
	0,95	0,13	7,3
Peinture Pyromark®	0,95	0,95	1

Problème de tenue à haute température / sous air lié à la nature du revêtement et au procédé de dépôt

Intensification des transferts

Objectif: transférer le flux de chaleur généré à la surface (absorption) vers le fluide en écoulement

Contraintes:

- Pertes de charge limitées
 - Coût énergétique de pompage/compression
 - Perte de rendement de la centrale
- Distribution fluide optimale
 - Une maldistribution entraîne des points chauds
 - Complexité et coût de fabrication des distributeurs

Matériaux

- Compatibilité avec le fluide
- Température d'utilisation
- Propriétés thermiques
 - Conductivité thermique élevée
 - Chaleur massique élevée
- Propriétés mécaniques
 - Elasticité
 - Tenue à la fatigue
- Coût
- Disponibilité

Matériaux



		Cuivre	Inox	Inconel	SiC (*)
Densité	g/cm ³	8,92	8,02	8,25	2,7 – 3,1
Conductivité thermique	W/m.K	393	16 35	19 27	13 130
Chaleur spécifique	kJ/kg.K	0,385	0,453	0,435	1,13
Module d'Young	GPa	100	220	206	280 420
Coeff. de Poisson		0,34	0,30	0,38	0,16
Coeff. dilatation	10 ⁻⁶ /°C	16,5	15	17	4,3 5,2
Température maxi d'utilisation	°C		500 850	700 900	1350 1600
Mise en forme		++	++	+	-
Assemblage		+	++	+	--
Prix		x5 x30	x1	x10 x50	x100 x500

(*) Pour le SiC: très forte influence du mode d'élaboration et de la température

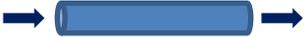
Un problème multi-échelle

- **Coefficient local d'échange fluide-paroi**

- Propriétés du fluide: μ , λ , ρ , C_p

- Régime d'écoulement fluide

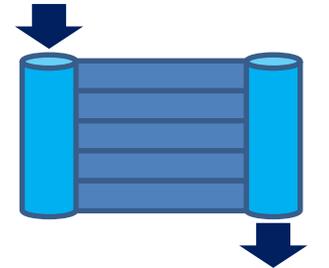
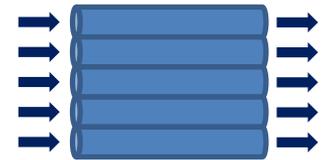
$$Nu = \frac{h_{ech} D}{\lambda} \quad Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad Nu = X Re^m Pr^n$$


$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

- **Absorbeur:**

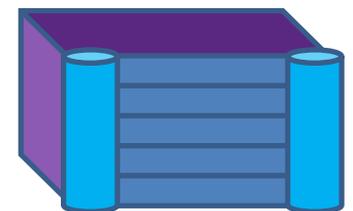
- Combinaison d'échangeurs locaux pour constituer une surface « active »

- Distributeur & collecteur



- **Récepteur:**

Association d'absorbeur(s) surfacique(s) avec éventuellement une optique d'entrée (cavité ou concentrateur secondaire)

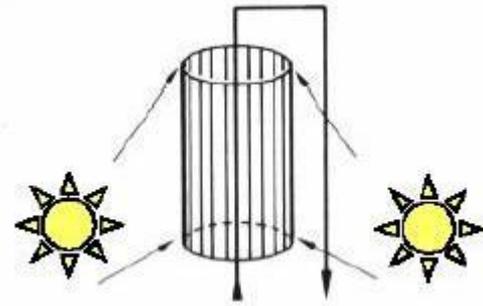


Exemples de performances de centrales avec récepteurs tubulaires à eau/vapeur

Centrale	Développeur	Puissance [MW _{él}]	Température Vapeur [°C]	Pression Vapeur [bar]	Rendement récepteur [%]	Rendement turbine [%]	Rendement global [%]
PS10	Abengoa	11	250	40	90	27	14
PS20	Abengoa	20	257	45	89	29	15
Sierra Sun	eSolar	5	440	60	89	21	14
Unité commerciale	eSolar	46	440	60	89	33	23
SEDC	Brightsource	5	530	130	-	-	-



Récepteurs tubulaires



Récepteurs à paroi externe

- Adaptés à la configuration de champ circulaire (récepteur cylindrique)
- Construction aisée
- Pertes thermiques mal combattues



E-Solar
Récepteur à
vapeur
surchauffée
55 bar, 420°C



Gemasolar
Récepteur à sels fondus
120 MW_{th}, 560°C

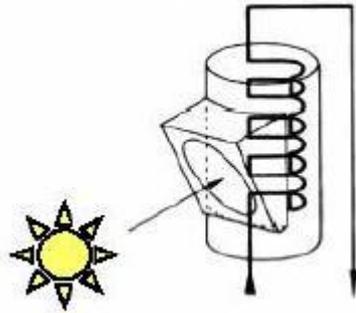


Solar Two
Récepteur à sels fondus
80 MW_{th}, 560°C
H ~ 8 m & D ~ 4,5 m

Récepteurs tubulaires

Récepteurs à cavité

- Adaptés à la configuration de champ semi-circulaire
- Faibles pertes thermiques



Récepteur à sels fondus, **Thémis**, 8 MW_{th}, 450°C
Tubes acier inox revêtus Pyromark
4 m x 4 m x 3 m

Récepteur à génération directe de vapeur
PS10 (260 m², 50 MW_{th}) & **PS20** (90 MW_{th})
250°C, 40 bar

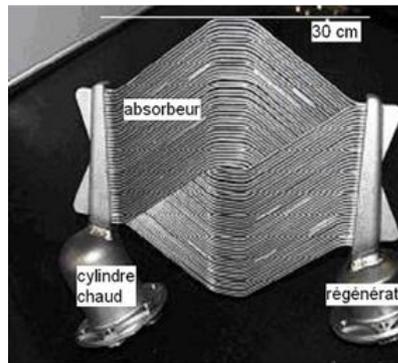
Récepteurs tubulaires

THEMIS/THEK (1982)
Géotherm
50 kW – 320°C



Récepteurs de faible puissance

- Adaptés aux concentrateurs paraboliques

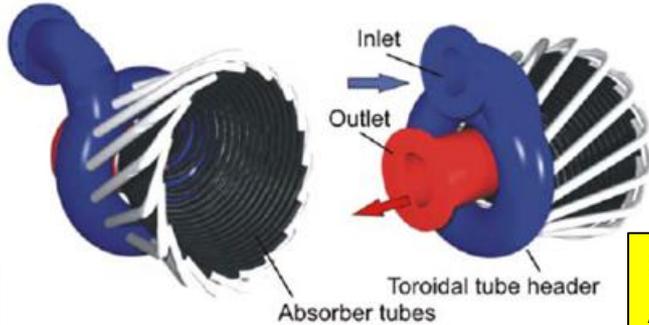


Parabole-Stirling EURODISH
(2008)
He / H₂
40 kW - 650°C - 140 bar

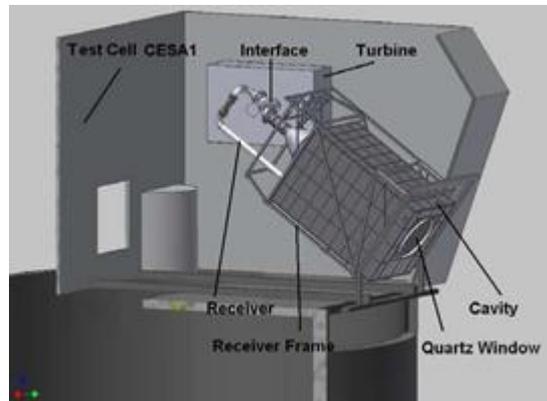
Récepteurs tubulaires

Récepteurs prototypes à air pressurisé

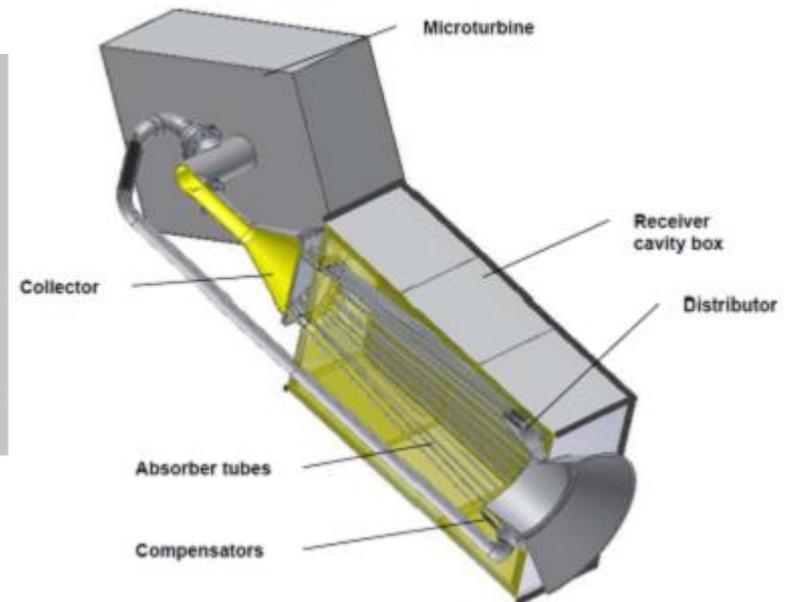
- Application aux centrales à turbine à gaz hybride



SOLGATE (2003)
Air 10 bar
300 kW – 500°C

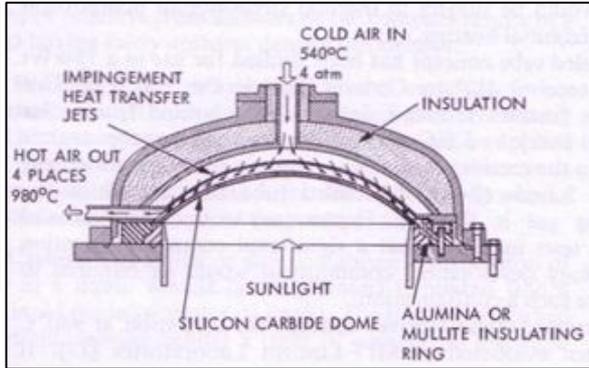


SOLHYCO (2006)
Air 10 bar
300 kW – 900°C



Récepteurs pionniers

Concept MIT Lincoln (1975) à jets d'air à 4 bar - 980°C



Récepteurs prototypes à air pressurisé

- Application aux centrales à turbine à gaz hybride

Module alvéolaire
Thèse F. Ortiz
Campagnes d'essais : 1979

Photo du module expérimental

Schéma du module expérimental

Module alvéolaire équipé de jets
Campagnes d'essais : février 1980 & mai 1980

Schémas du panneau alvéolaire expérimental équipé d'éjecteurs

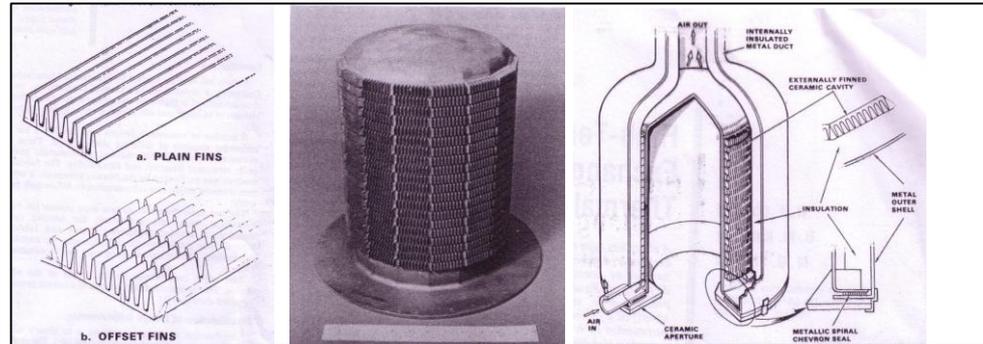
Chaudière Sirocco finale
Campagnes d'essais : septembre 1982

Vue d'ensemble de la chaudière Sirocco

Schéma du panneau Sirocco et emplacement des jets

Ø	débit max par tuyau
4p5	4,6 %
5p6	7,7 %
6p8	8,1 %
7p6	11,2 %
8p7	16,7 %
9p5	18,0 %
10p9	32,7 %

Schéma de distribution de l'air dans un panneau Sirocco



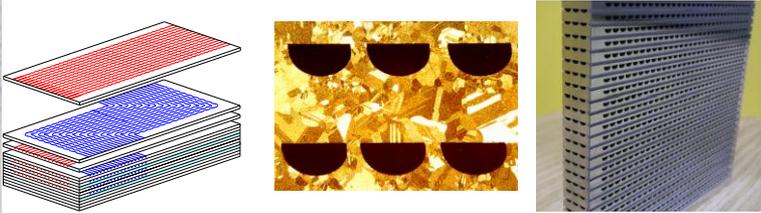
Proto en SiC à ailettes
Air Research (1975)
Air 3 bar - 1170°C

SIROCCO (1982) à jets d'air à 10 bar
500 kW – 840°C

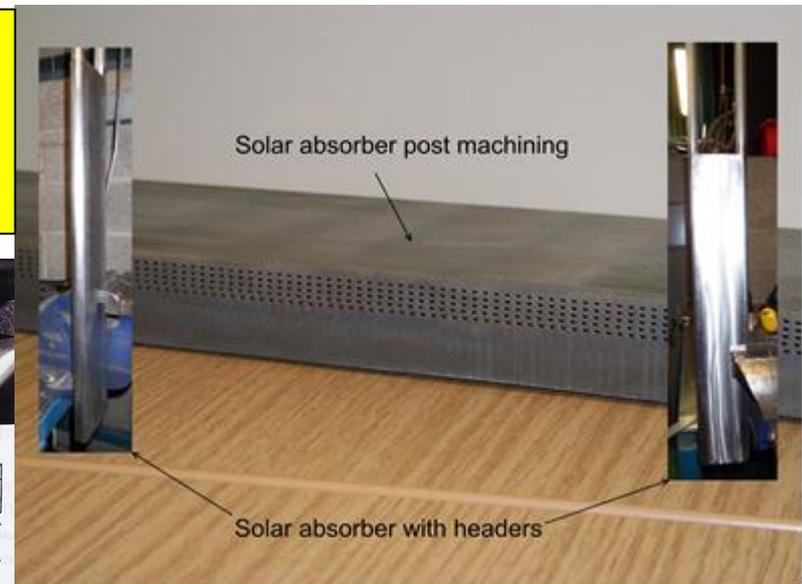
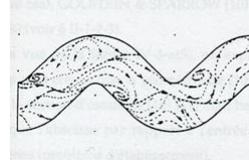
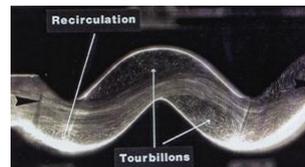
Récepteurs à plaques

Récepteurs prototypes à air pressurisé

- Dérivés des échangeurs de chaleur compacts

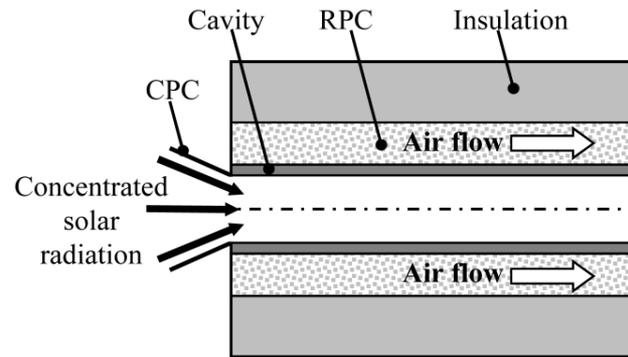


Récepteur en Inconel à mini-canaux
CEA/LITEN - CNRS/PROMES - Heatic
Air 8 bar
30 kW – 700°C

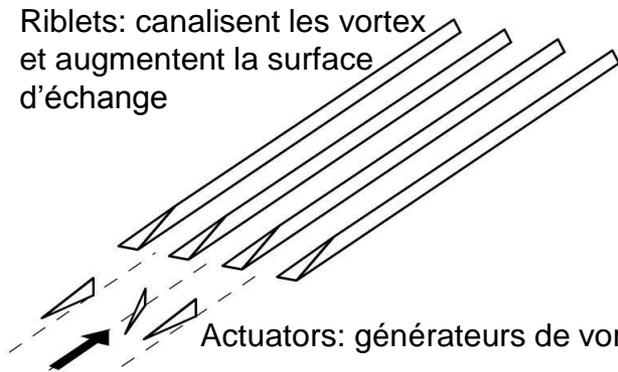
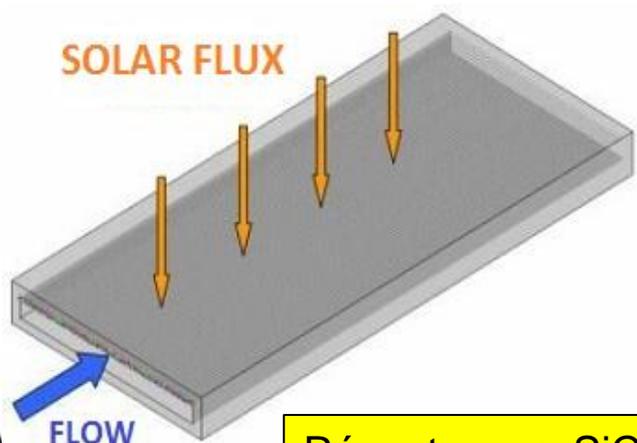


Nouveaux concepts de récepteurs surfaciques

Récepteurs à air pressurisé

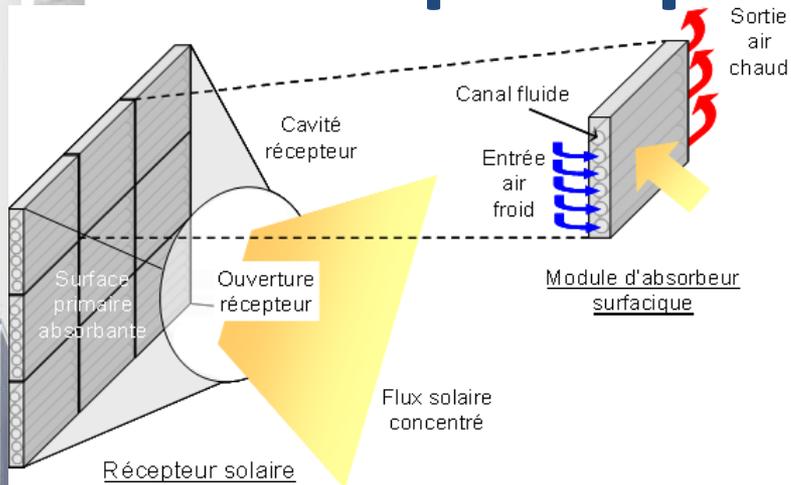


Récepteur en SiC
ETH/PSI (2010)
Air 5 bar
1 kW – 1060°C



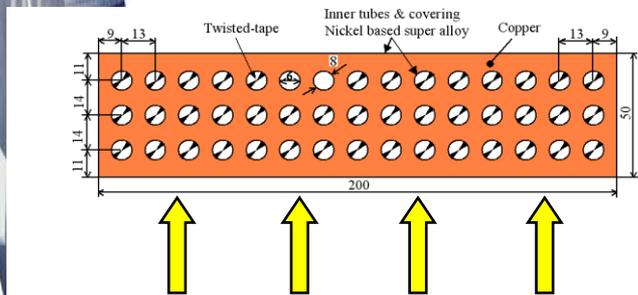
Récepteur en SiC
CNRS/PROMES - Boostec - Total
Air 8 bar
30 kW – 1000°C

Récepteur à air pressurisé pour prototype PEGASE

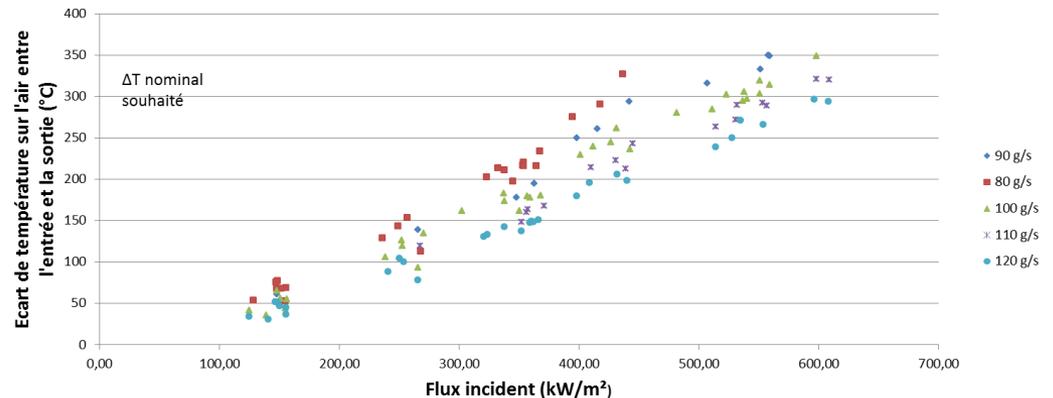
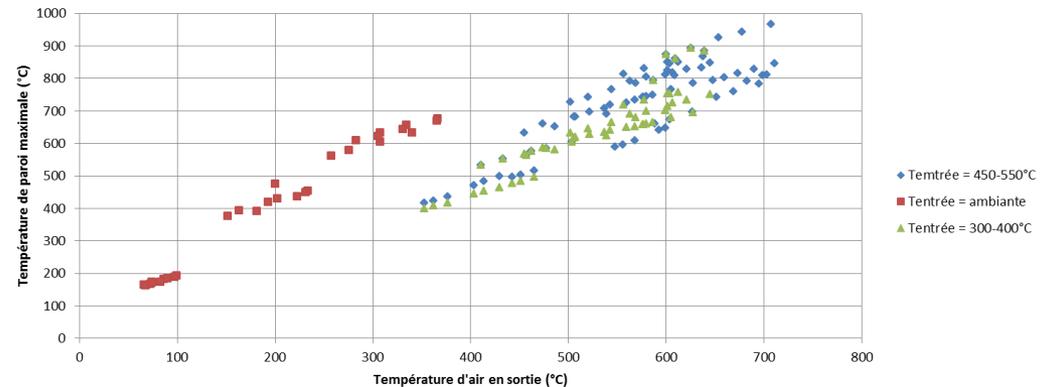


Concept original de récepteur métallique à cavité et à paroi absorbante plane modulaire et multi-étagée (brevets CNRS/CEA)

- Absence de vitre en quartz
- Absorbeur métallique (900°C)



**Module absorbeur en Cuivre/Inconel
CEA/LITEN - CNRS/PROMES
Air 8 bar
30 kW – 750°C**



An aerial photograph of a large-scale solar farm. The image shows a dense grid of solar panels, with several rows of panels being replaced or under construction, indicated by the presence of metal support structures and mounting hardware. The panels are a dark, monochromatic color, likely monocrystalline or polycrystalline silicon. The text "Merci de votre attention" is superimposed in the center of the image in a white, bold, italicized font with a black outline.

Merci de votre attention