

Les récepteurs volumiques pour centrales solaires à concentration : état de l'art et perspectives

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

- Cyril Caliot





Plan

- Introduction
- Typologie de récepteurs volumiques
 - Récepteurs sélectifs
 - Récepteurs à air atmosphériques
 - Récepteurs à air pressurisés
 - Récepteurs à particules
 - Récepteurs-réacteurs
- Futures recherches (Optisol)
- Conclusion



Introduction

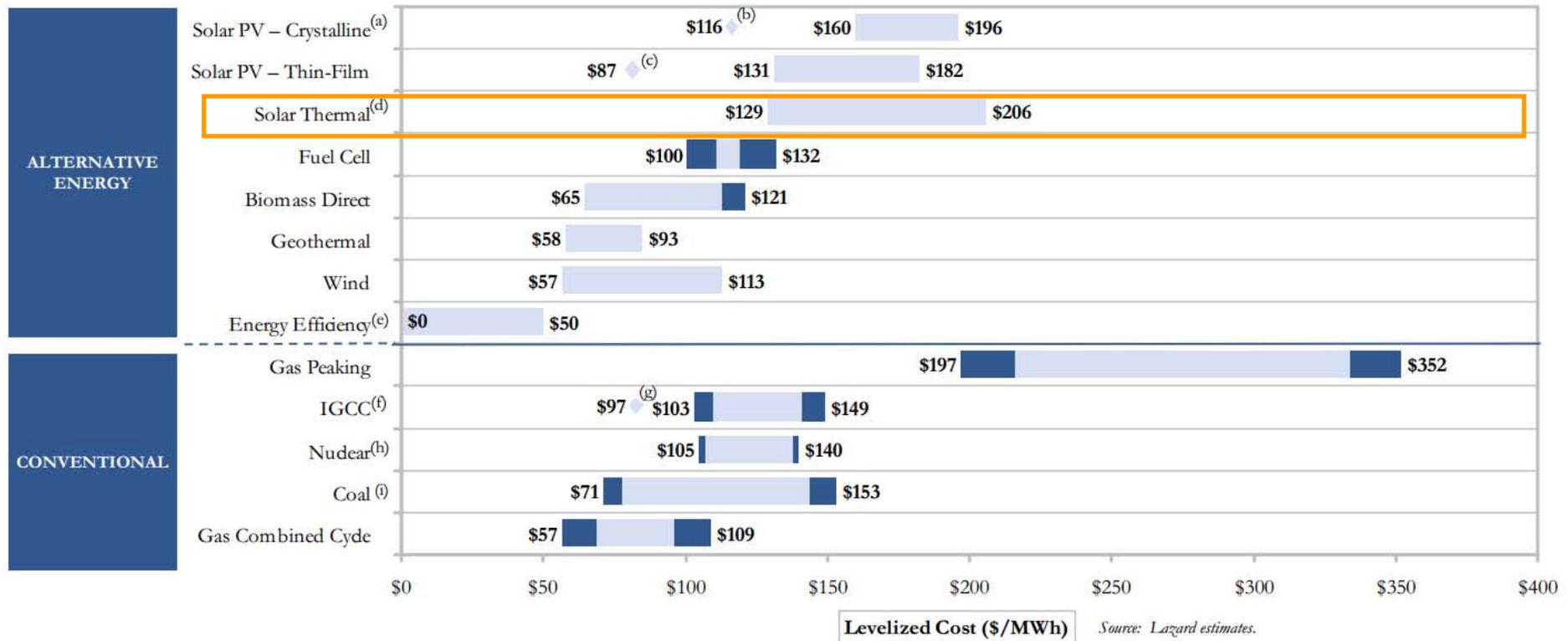
- Plus la température du fluide caloporteur est élevée plus le rendement du cycle thermodynamique sera élevé (Carnot).
- L'intérêt pour les *récepteurs volumiques* (RV) vient d'une limitation en température des récepteurs surfaciques.
- Pour diminuer le coût de production, une solution est d'*améliorer* le rendement thermique du récepteur et le rendement du cycle de conversion en électricité.

➔ Utilisation des récepteurs volumiques (RV) avec

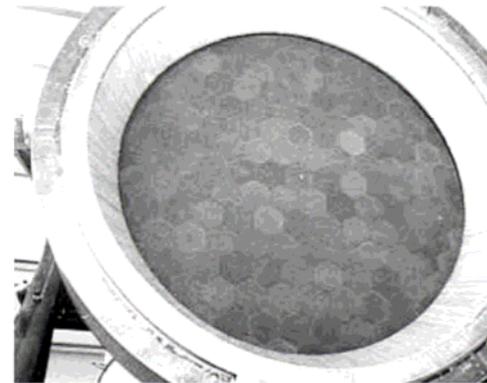
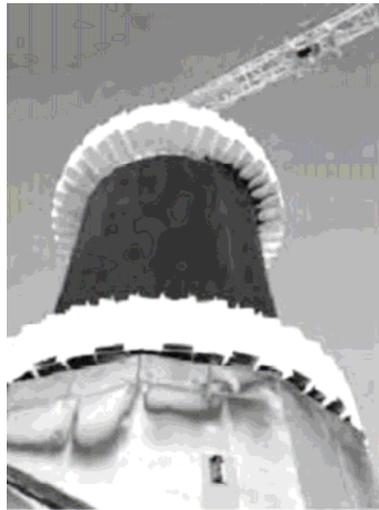
- L'effet volumique,
- La sélectivité spectrale

Introduction

- Comparaison des coûts de l'énergie (\$/MWh)

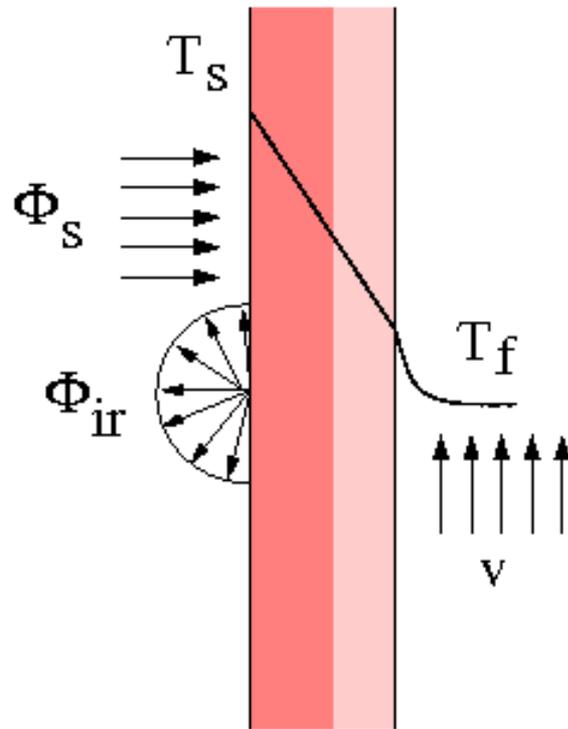


Exemples de récepteurs

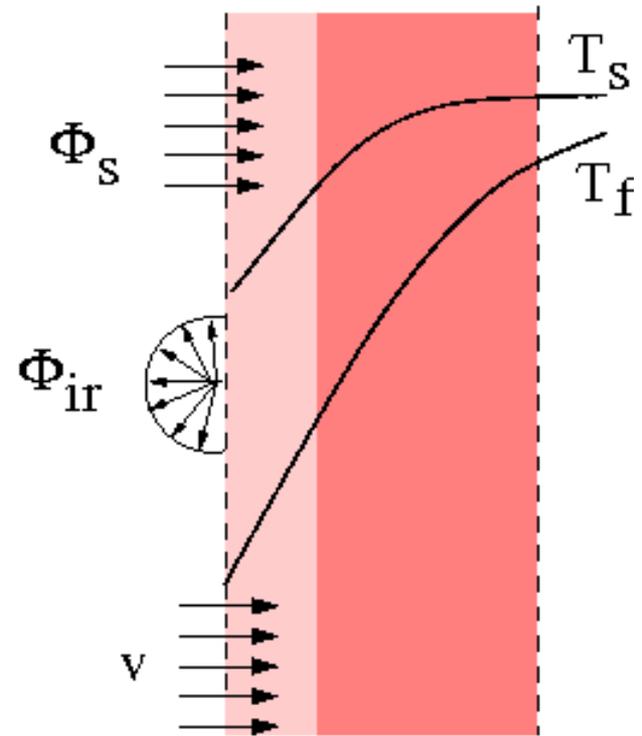


Principe des récepteurs

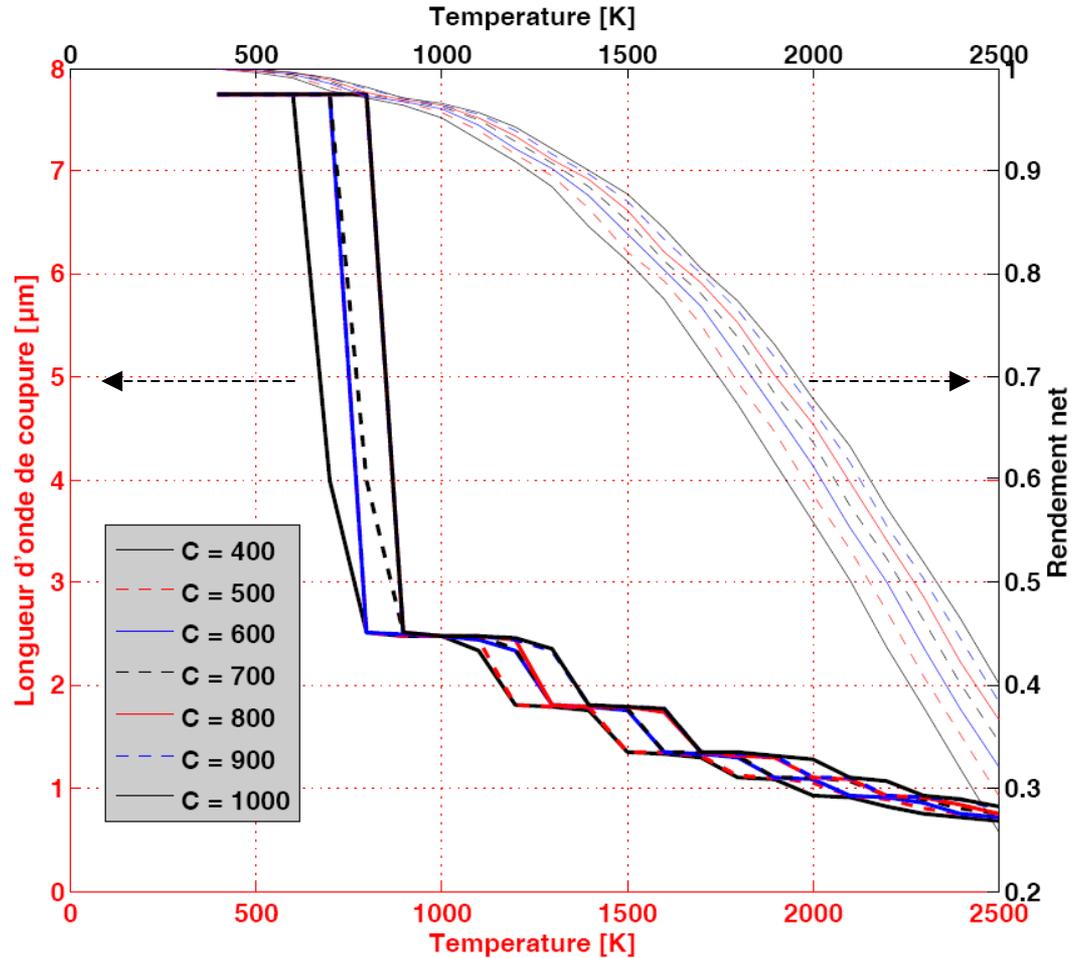
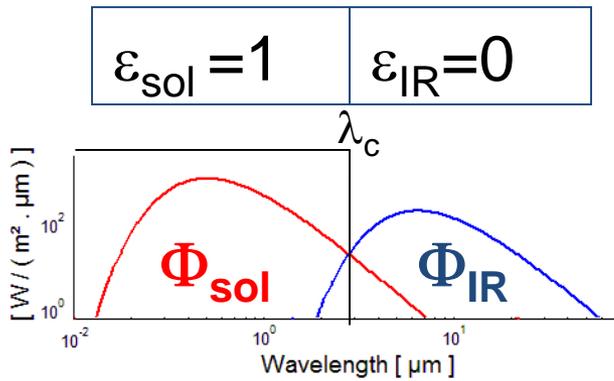
Récepteur surfacique



Récepteur volumique (effet volumique)



Sélectivité spectrale d'une surface



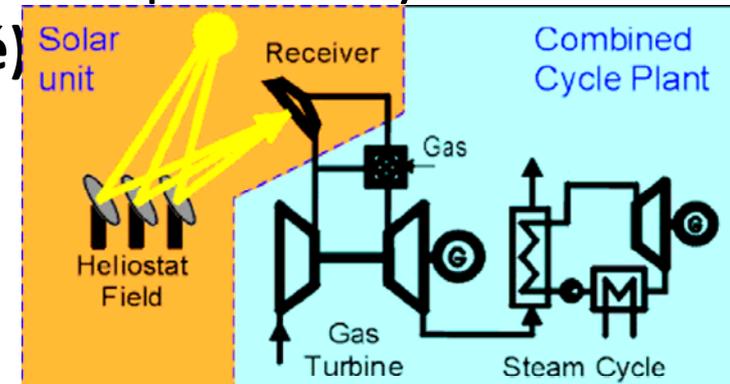
Typologie des récepteurs volumiques

- Récepteur métallique (fils, canaux)
- Récepteur céramique (canaux, mousse, tiges, fibres)
- Récepteur à particules (entraînées, lits)



Utilisations des récepteurs volumiques

- Thermo-électricité solaire
 - $T < 800^{\circ}\text{C}$: récepteurs à air atmosphérique pour la génération de vapeur (**cycle Rankine indirect**)
 - $T > 800^{\circ}\text{C}$: récepteurs à air atmosphérique pour un **cycle de Brayton indirect**
 - $T > 800^{\circ}\text{C}$: récepteur à air pressurisé pour un cycle de **Brayton direct (Cycle Combiné)**
- Carburant solaire
 - $T > 800^{\circ}\text{C}$: Gaz de synthèse, H_2 , etc.



RV sélectifs

Olalde et al, Solar Energy Materials, 1985 :

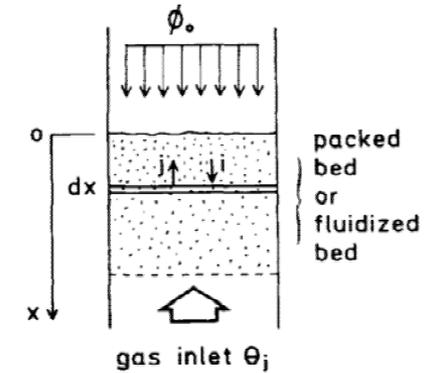
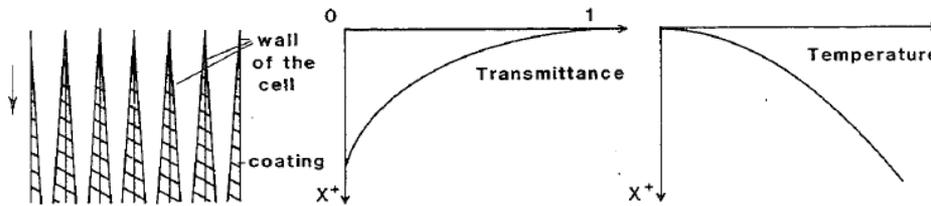
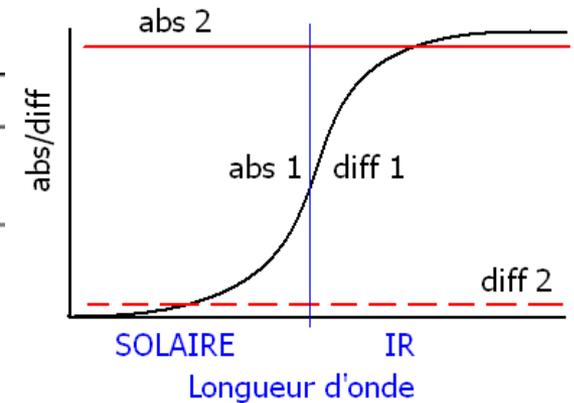


Fig. 1. Porous beds configuration, notation of theoretical analysis.

Flamant & Olalde, Solar Energy J., 1983

Optimum properties of a two layers selective solar absorber (S: small, L: Large)

	A_S	A_{ir}	B_S	B_{ir}
1	S	L	S	L
2	L	S or L	S	S or L

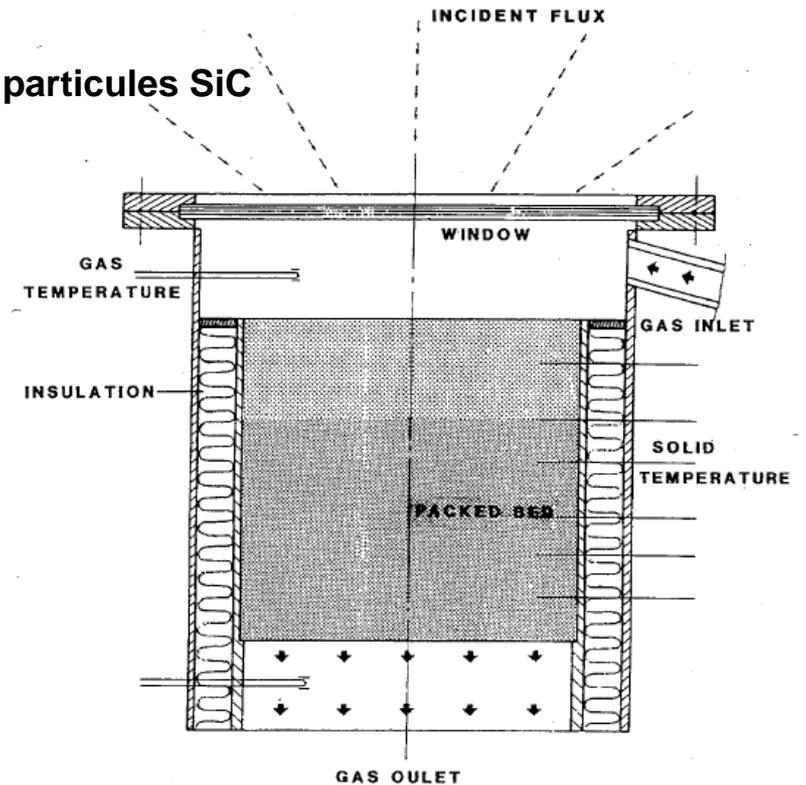
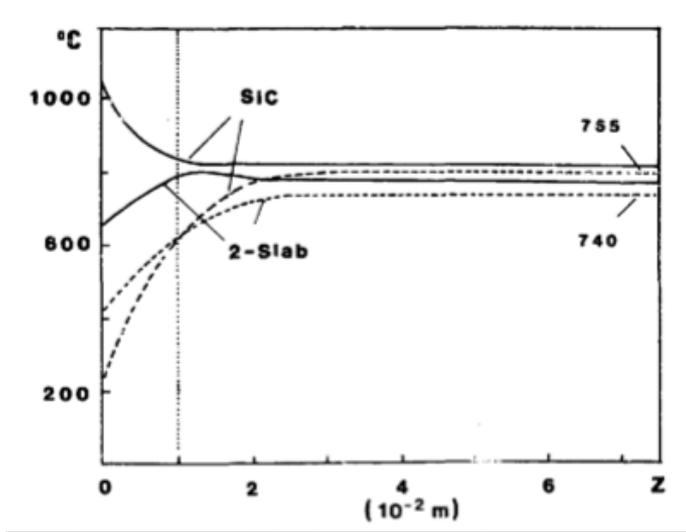


RV sélectifs

Menigault et al, Sol Energ Mat, 1991 :

RV bi-couche : nid d'abeille en Si et lit de particules SiC

72% @ 800°C

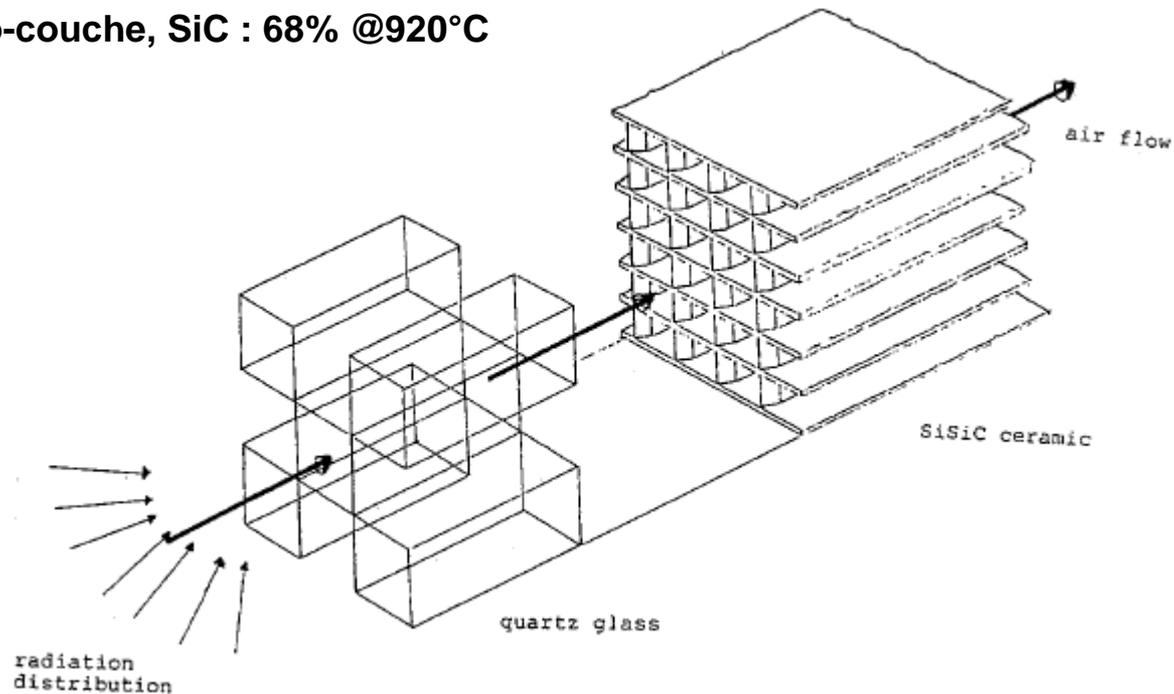


RV sélectifs

Pitz-Paal et al, Sol Energ Mat, 1991 :

RV bi-couche, nid d'abeille en Si et SiSiC : 75% @ 1000°C

Mono-couche, SiC : 68% @ 920°C





Etat de l'art des RV

- 
- Fin 1970 : les récepteurs métalliques (fils) et en céramiques (nid d'abeilles)
 - 1985-1991 : la sélectivité spectrale des récepteurs
 - Fin 1980- début 1990, les récepteurs à air atmosphérique
 - Fin 1990- début 2000, les récepteurs à air pressurisés
 - Depuis le début des années 80, quelques récepteurs à particules ont été étudiés (petites puissances).

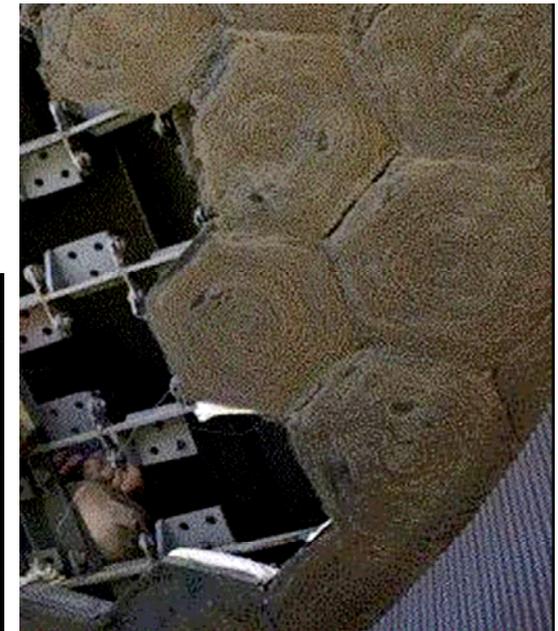
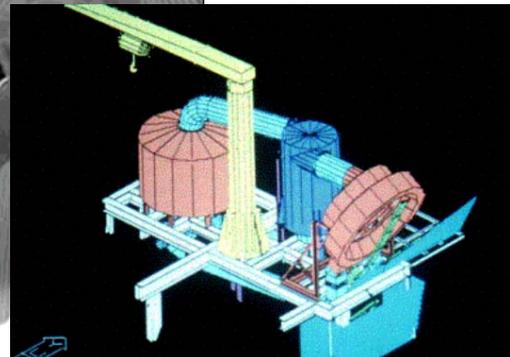
Etat de l'art des RV atm.

Cycle à boucle ouverte : air à pression atmosphérique

- 1983-86 Mk-1 (3 kWth) maillage de fils fins (Suisse) : 70-90%, $T < 842^{\circ}\text{C}$
- 1986-87 Mk-2 ou Sulzer-1 (200 kWth) tests à PSA : 68% @ 550°C (calc 80%)
- 1988 Sulzer 2 (200 kWth) fils enroulés : 79% @ 550°C (points chauds, pas d'effet volumique, distorsion de la structure) ; formation du consortium PHOEBUS
- 1992-94 TSA (2.5 MWth, PHOEBUS-TSA project) production de vapeur ($480-540^{\circ}\text{C}$ @ 35-150b), régulation : 85% @ 700°C (succès, mais projet de 115MWth en Jordanie avorté par manque d'investissement)



TSA à PSA
(CESA-1)



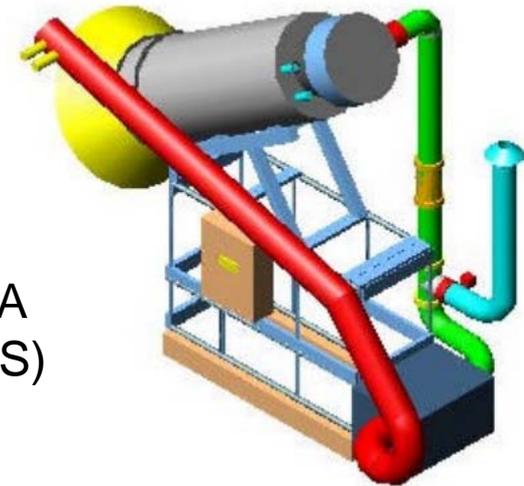
Etat de l'art des RV atm.

Cycle à boucle ouverte : air à pression atmosphérique

- 1988-89 Catrec 1 (200 kWth) nid d'abeilles : 80% @570°C (déformation des structures)
- 1993 Bechtel 1 (2.3 kWth) fils tressés (110 et 210µm) : 69% @820°C
- 1993 Bechtel 2 (200 kWth) 3 maillages (110 et 200µm) : 66% @563°C (calc 90% @700°C) ; sensible au vent et mauvaise distribution des débits (arrêt des recherches par Sandia mais poursuivies par CIEMAT-PSA)
- 1994-95 Catrec 2 (200 kWth) améliorations de la structure (éléments hexagonaux, jointure) : T<460°C ;
détection d'instabilités de l'écoulement
- 2001 Sirec (250 kWth) fils tressés (Bechtel 2) : 48% @710°C ; régulation et contrôle du débit air rendus difficiles par de forts gradients dans l'absorbeur (600-760°C)



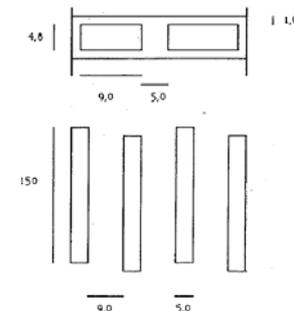
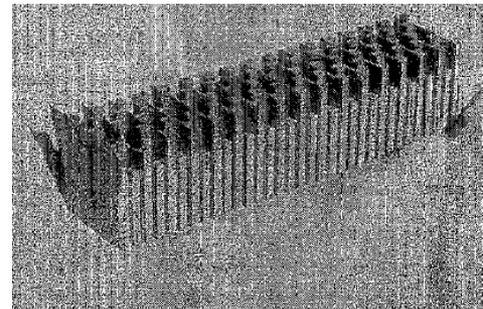
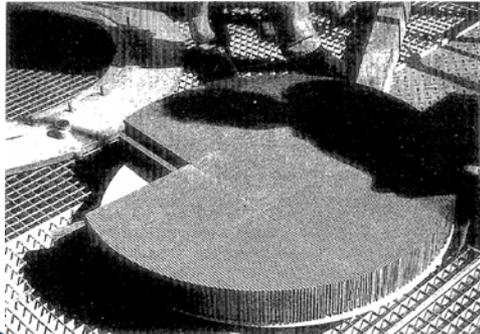
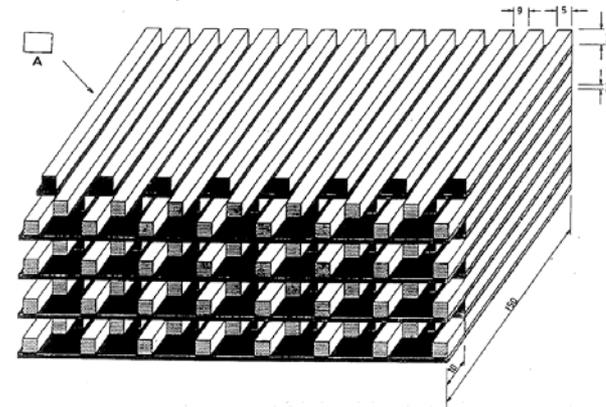
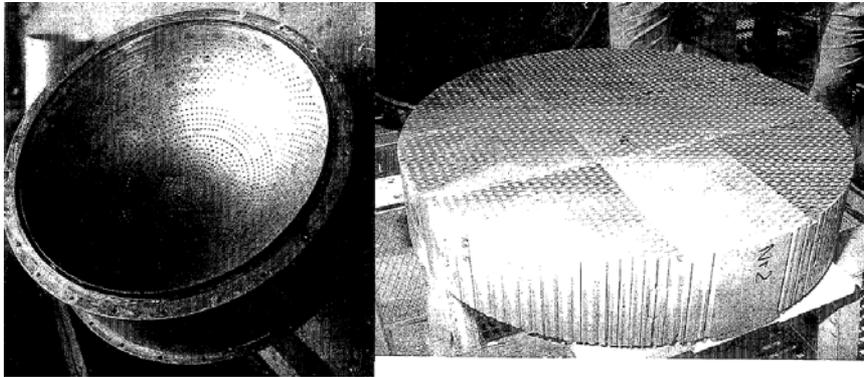
Sirec à PSA
(SSPS-CRS)



Etat de l'art des RV atm.

Cycle à boucle ouverte : air à pression atmosphérique

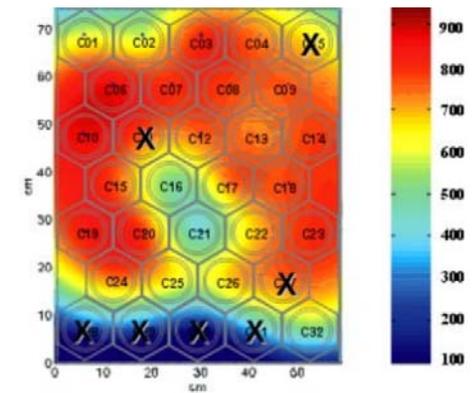
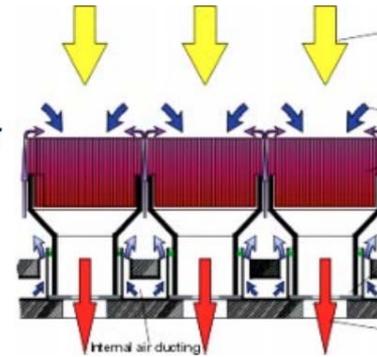
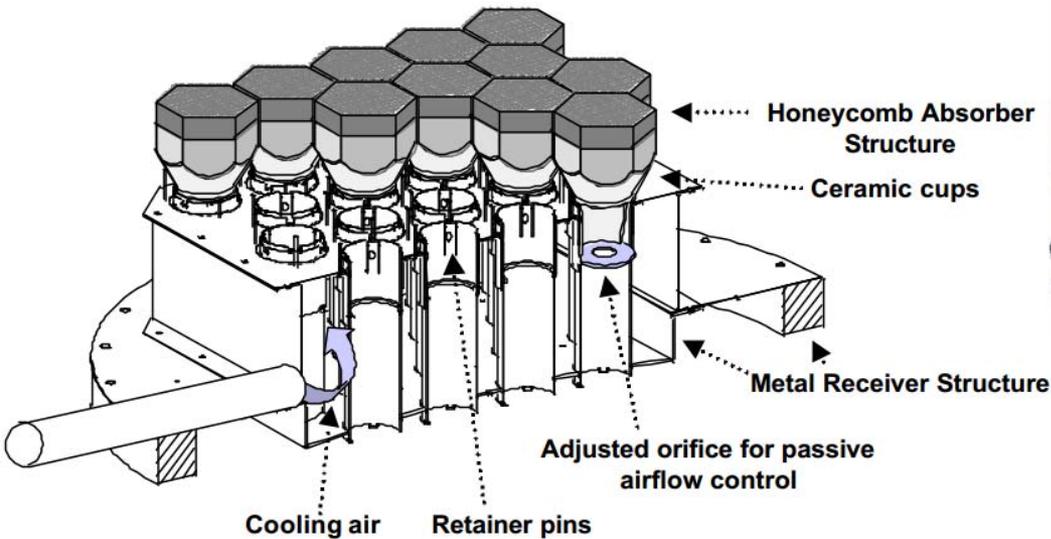
- 1988 Sandia foam (200 kWth) mousse, 20 ppi, porosité 80%, Al₂O₃ et peinture Pyromark : 65% @550°C (calcul 85%) ; pores bouchés par les dépôts de peinture
- 1989-90 CeramTec (200 kWth) SiSiC canaux (3*3mm, L=10mm) macrostructure en créneau : 59% @782°C
- 1990 Conphoebus-Naples (200 kWth) SiSiC canaux en cavités multiples avec des créneaux : 60% @788°C



Etat de l'art des RV atm.

Cycle à boucle ouverte : air à pression atmosphérique

- 1995 Hitrec 1 (200 kWth) R-SiC nid d'abeilles : 75% @800°C (régulation simple, démarrage rapide, homogénéité des températures, déformation de la structure)
- 1995 Hitrec 2 (200 kWth) R-SiC nid d'abeilles : 72% @800°C ; bon comportement de la structure



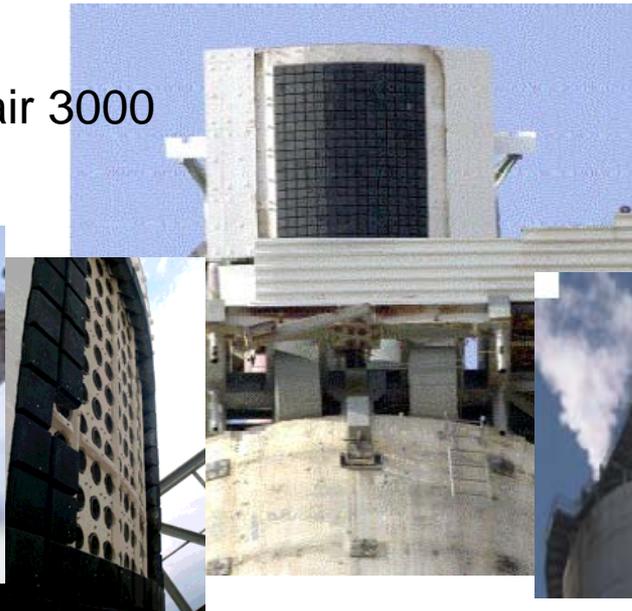
Etat de l'art des RV atm.

Cycle à boucle ouverte : air à pression atmosphérique

- 2001-02 Solair 200 (200 kWth) Test de 3 RV (modules carrés):
- 1 36 re-SiC, nid d'abeilles (81% @700°C, 75% @800°C)
 - 2 18 re-SiC et 18 SiSiC, nid d'abeilles (83% @700°C, 74% @800°C)
 - 3 fibres poreuses en face avant : $T < 800$ °C
- 2003 Solair 3000 (3 MWth) 270 R-SiC : 70-75% @750°C (2006, décision pour une centrale semi-commerciale)
- 2009 Centrale solaire de Julich (1.5 MWe) 1000 re-SiC ; cycle Rankine, vapeur surchauffée, 485°C et 25b



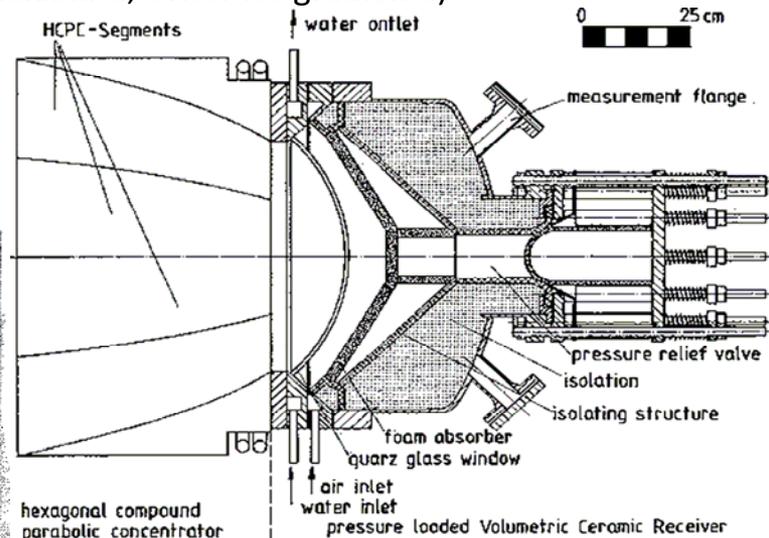
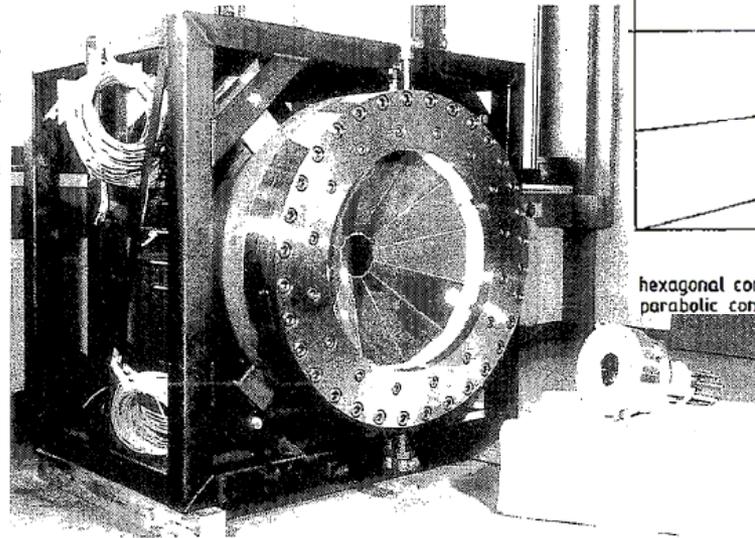
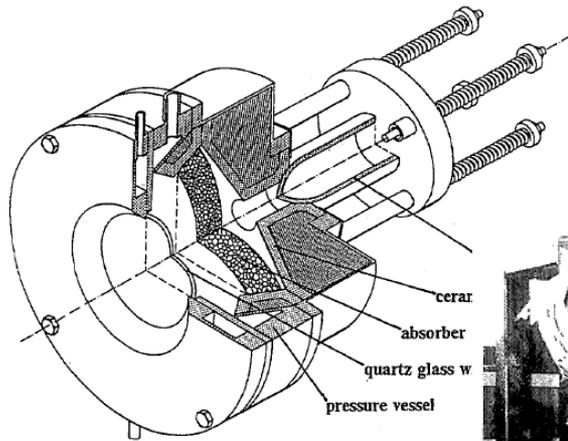
Solair 3000



Etat de l'art des RV pressurisés

Cycle à boucle fermée : air pressurisé

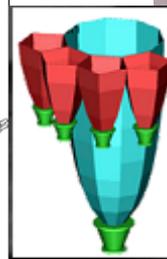
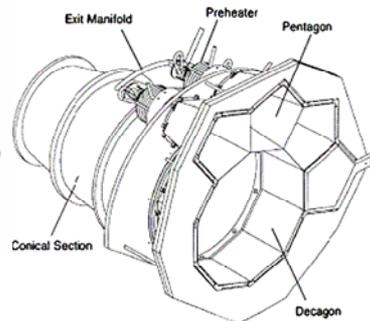
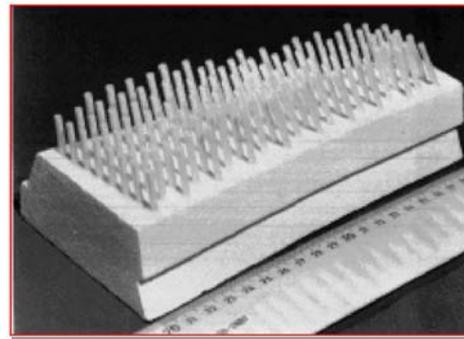
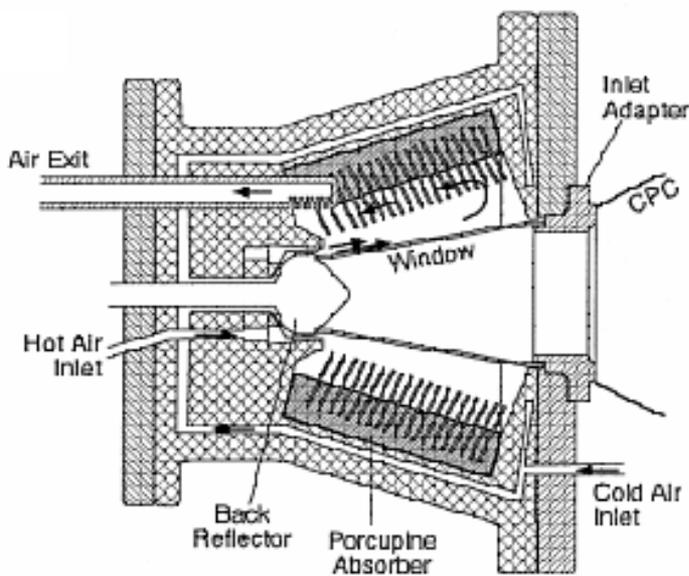
- 1989 PLVCR-5 (5 kWth) mousse Si₃N₄ revêtu de Pyromark, hublot en dôme elliptique : 4.2b, 71% @1050°C
- 1993 PLVCR-500 (500 kWth) mousse Si₃N₄ revêtu de SiC, pyramide tronquée, dôme sphérique en quartz : 4.15b, 57% @960°C ; la tenue mécanique du hublot reste un problème (flexibilité, éviter les gradients)



Etat de l'art des RV pressurisés

Cycle à boucle fermée : air pressurisé

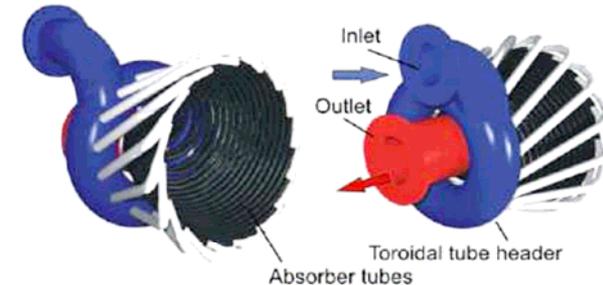
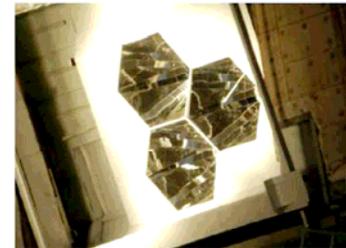
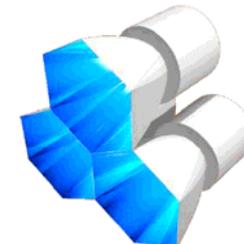
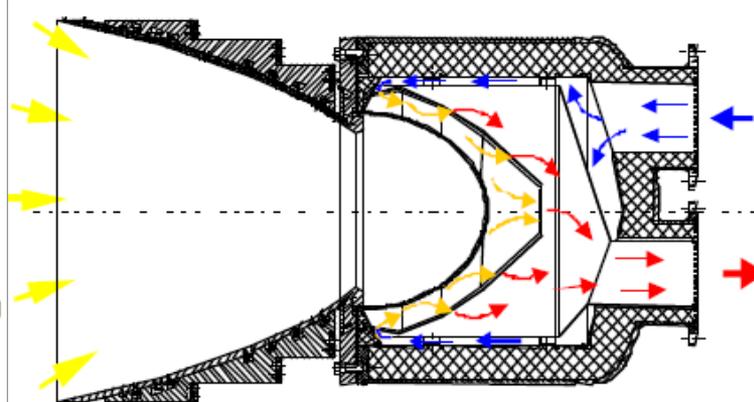
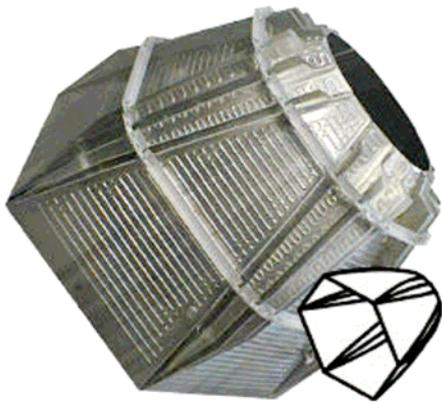
- 1992-97 DIAPR (28-40 kWth) récepteur Porcupine (porc-épic, 60% Al₂O₃ 40%SiO₂), hublot conique (2.25mm) : 20b, 75% @1200°C ; production de haute température à haute pression (Weizmann Institute)
- 1996-99 DIAPR multi-étage (30-60 kWth) 4 étages de préchauffage (récepteurs tubulaires) : T<1000°C
- 2009 Tulipe d'Aora (100 kWe + 170 kWth) cycle Brayton hybride, 1100 °C et 20b



Etat de l'art des RV pressurisés

Cycle à boucle fermée : air pressurisé

- 1996-01 REFOS (350 kWth) maillage de fils (Inconel 600), hublot elliptique (8mm, 19.5b), CPC : 15b, 67% @800°C ; conception d'un CPC performant et léger, mauvaise isolation du récepteur, dégradation du hublot (DLR-CIEMAT à PSA)
- 2001-06 SOLGATE multi-étage (400 kWth) 3 étages, (1^{er} récepteur tubulaire, 2^{ème} REFOS, 3^{ème} REFOS avec une mousse SiC 20ppi), 3 CPC : 15b, 70% @960°C ; augmentation de température d'air par étage, 200 à 250°C



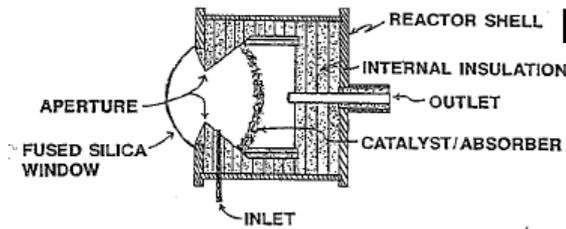


Avantages/ Inconvénients

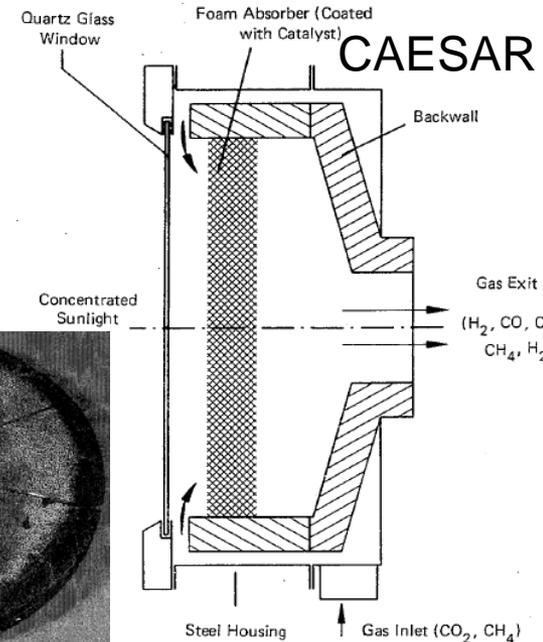
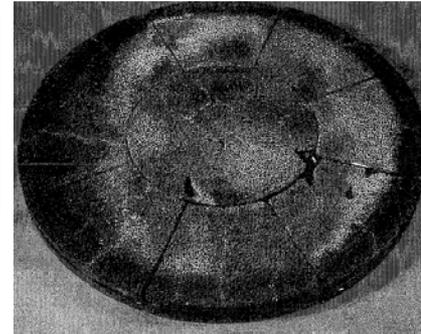
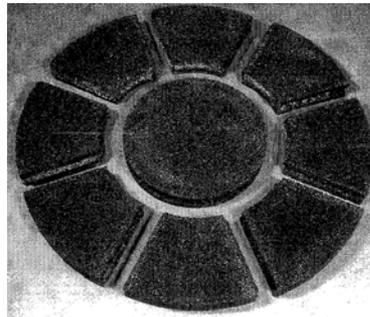
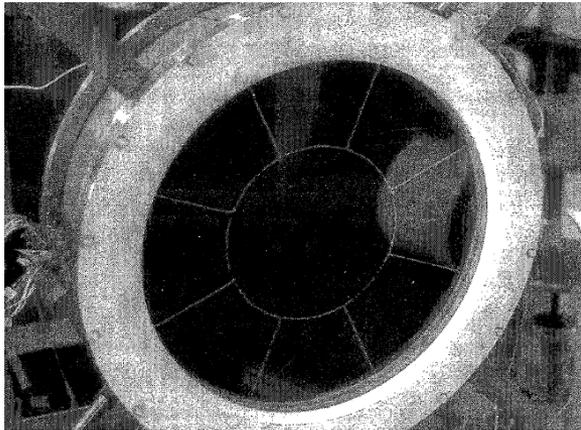
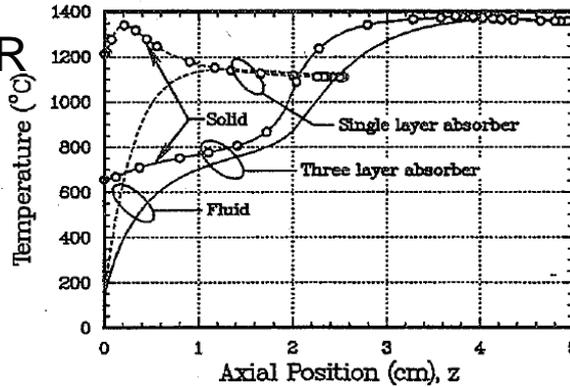
- Avantages
 - Haute température
 - Haut rendement (R&D effet volumique, sélectivité)
 - Modulaire (pas de partie mobile)
 - Peu de contraintes sur les absorbeurs
- Inconvénients
 - Hublot (forme, refroidissement)
 - Déformation de la structure porteuse (refroidissement)
 - Mauvaise distribution du débit d'air (point chaud, instabilités, flux incident variable, le vent dans le cas des RV atm.)
 - R&D pour les chambres de combustion /turbines (cycle hybrides)
 - Coût de l'investissement

Réacteurs Volumiques

- 1990 DCAR (3.5 kWth) mousse Al₂O₃ (5ppi, 10ppi, 20ppi) avec un dépôt de Rhodium (catalyseur), tests à SNL, reformage de CH₄ à base de CO₂ (production de gaz de synthèse)
- 1991 CAESAR (3.5 kWth) mousse Al₂O₃ avec un dépôt de Rhodium (catalyseur), (SNL/DLR) reformage de CH₄ à base de CO₂, $\eta_{CH_4} = 66\%$, $T > 1200^\circ C$, dislocation de l'absorbeur, désactivation du catalyseur



DCAR

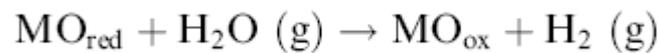
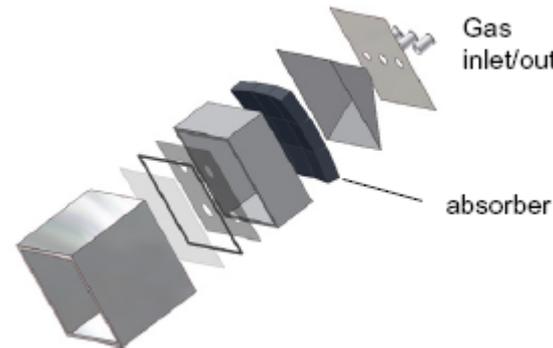
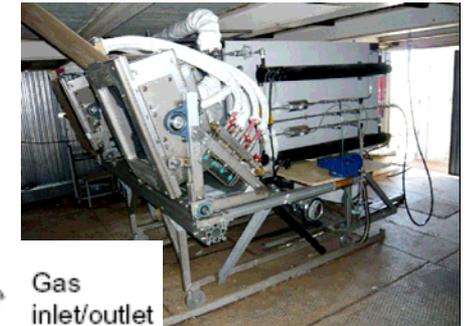
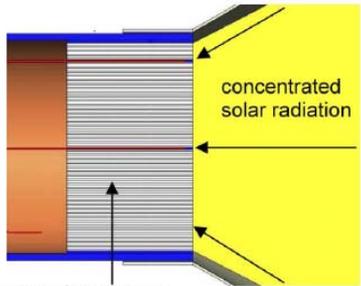


CAESAR

Réacteurs Volumiques

1998-02 HYDROSOL (10 kWth) R-SiC canaux (2*2mm), tests à DLR Cologne, cycles à base de ferrites déposés, $800 < T < 1300^{\circ}\text{C}$, $\eta_{\text{H}_2} = 90\%$; difficulté de régénération des matériaux

2002-06 HYDROSOL 2 (100 kWth) tests à SSPS PSA, 2 modules pour réaliser les deux étapes (réduction/oxydation) ; température de dégradation du matériau proche (1250°C) de la température de réduction (1150°C)





Avantages/ Inconvénients

- Avantages (idem RV)
 - Grandes surfaces spécifiques pour les réactions
- Inconvénients (idem RV)
 - Réalisation du matériau (dépôt, dopage, etc.)
 - Dégradation du matériau
 - Comportement au cyclage en température (régénération)



Recherches futures

- Maîtriser les propriétés des matériaux :
 - Sélectivité spectrale (rayonnement)
 - Échange de chaleur (convection/conduction)
 - Vieillessement (cyclage en T, réactions chimiques)
- Caractérisation physico-chimique des matériaux développés
- Modélisation/simulation des récepteurs et réacteurs
- Réalisation de prototypes (changement d'échelle)
- Amélioration des composants (structure, hublot)



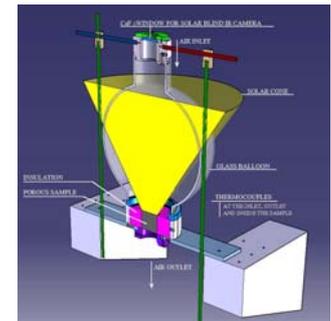
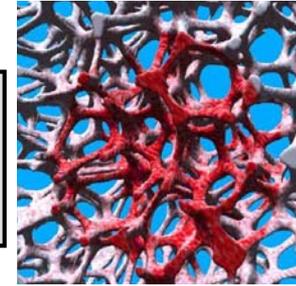
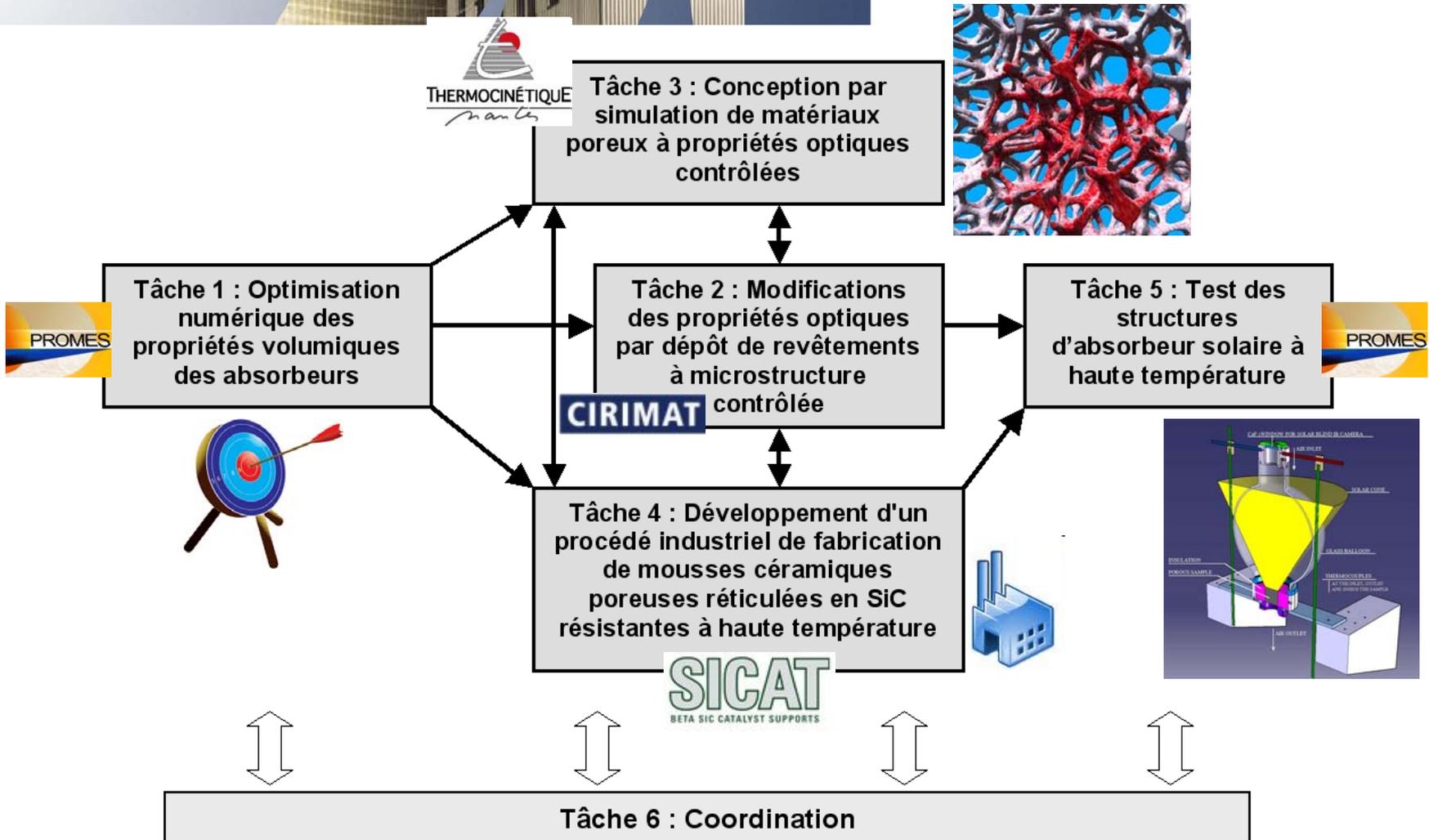
Optisol (2012-2016)

Absorbeurs volumiques solaires haute température à propriétés optiques contrôlées

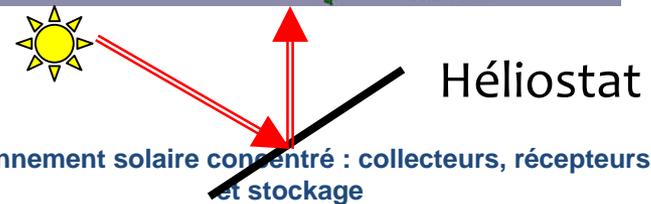
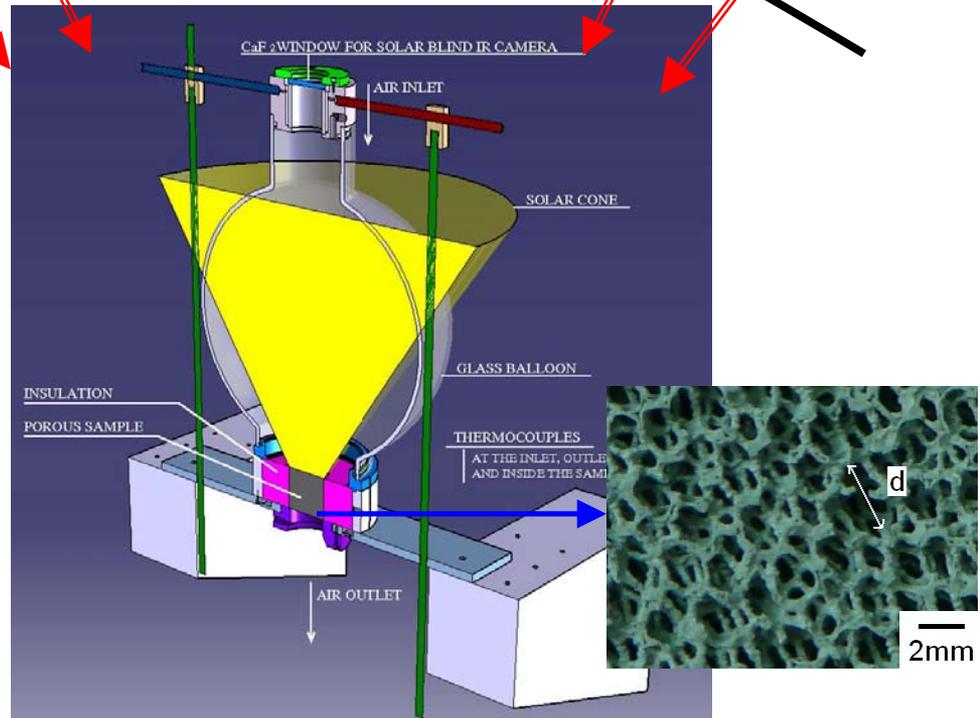
- Objectif : rendement thermique $> 85\%$ @1000°C (RV atm.)
 - Financé par ANR SEED 2011

Agence Nationale de la Recherche
ANR

Optisol



Mesure d'efficacité de mousse RPC



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

