



**HAL**  
open science

## Un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé

Jean-Jacques Bézian, Arezki Bounaceur, Alain de Ryck, Mouna El-Hafi

### ► To cite this version:

Jean-Jacques Bézian, Arezki Bounaceur, Alain de Ryck, Mouna El-Hafi. Un nouveau concept de centrale solaire thermodynamique basé sur un récepteur à lit fluidisé. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00166316

**HAL Id: hal-00166316**

**<https://hal.science/hal-00166316>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UN NOUVEAU CONCEPT DE CENTRALE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE BASE SUR UN RECEPTEUR A LIT FLUIDISE

Jean Jacques BEZIAN, Arezki BOUNACEUR, Alain DE RYCK, Mouna EL HAFI  
Centre RAPSODEE – UMR CNRS 2392 Ecole des Mines d'Albi 81000 ALBI  
*bezian@enstimac.fr*

**Résumé :** La production d'électricité par voie solaire thermodynamique.

**Mots clés :** Energie solaire concentrée, centrales à tour, électricité solaire thermodynamique

## 1. INTRODUCTION

Pour produire de l'électricité en utilisant l'énergie solaire, les systèmes photovoltaïques ont de sérieux atouts, comme un rendement indépendant de la taille de l'installation, un entretien très faible, une bonne fiabilité. Par contre, seules quelques grandes entreprises mondiales ont la technologie nécessaire pour la fabrication des cellules, et les rendements atteints, en moyenne annuelle, sont rarement au-dessus des 10 %.

La voie thermodynamique utilise des cycles classiques basés sur des composants éprouvés, avec des rendements en électricité dépassant souvent les 25 % au point nominal et les 20 % en moyenne annuelle. Une première période intensive de recherche sur le domaine, entre 1975 et 1990, a permis de vérifier la pertinence des concepts, pour 3 types de procédés :

- Les centrales à capteurs cylindro paraboliques, avec des températures de source chaude limitées à 380 °C environ ;
- Les paraboles autonomes ayant un moteur STIRLING (10 à 25 kW) au foyer, avec des températures de source chaude dépassant les 500 °C ;
- Les centrales à tour, limitées elle aussi à environ 550 °C, pour des puissances unitaires supérieures à 10 MW.

Si l'on veut augmenter les rendements de ces systèmes, une solution prometteuse est d'utiliser, dans le cadre des centrales à tour, des cycles combinés (turbine à gaz et turbine à vapeur en série), l'air caloporteur étant chauffé à plus de 1000 °C dans un récepteur au foyer du concentrateur solaire. C'est ce composant qui demande actuellement le plus de développement technologique, tant au niveau de sa conception thermique que géométrique. Le choix des matériaux à utiliser est aussi très important, car il doit faire face aux cyclages thermiques engendrés par la discontinuité de la ressource solaire.

Notre laboratoire a entamé une étude sur un récepteur à lit fluidisé, directement insolé par le rayonnement solaire concentré. La configuration choisie est rendue possible par l'émergence de nouveaux concepts de collecteurs, plus précis pour de plus hautes densités de flux, et qui permettent une collecte verticale du flux solaire.

Dans cette communication, nous décrivons l'ensemble de la démarche (numérique et expérimentale) entreprise dans ce projet, les premiers résultats obtenus, ainsi que leur extrapolation au cas d'une centrale à tour commerciale basée sur un cycle combiné.

## 2. LE CYCLE THERMODYNAMIQUE

### 2.1. Les cycles de turbine à gaz

Les turbines à gaz modernes, dérivées des turboréacteurs de l'industrie aéronautique, ont des rendements mécaniques qui dépassent souvent les 40 %. Elles sont basées sur un cycle de BRAYTON (2 isentropiques et 2 isenthalpiques) et fonctionnent la plupart du temps en circuit ouvert. La source froide est l'air ambiant. Remplacer la chambre de combustion (figure 1) par un récepteur d'énergie solaire concentrée est l'idée de base de cette étude.

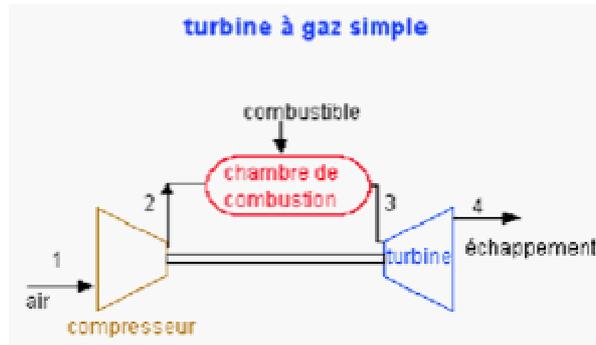


Figure 1 : schéma d'une turbine à gaz simple

Dans ces conditions, avec une entrée d'air atmosphérique à 300 K, et une entrée en turbine à 1000 K, le rapport de compression optimal est de 10. Avec un rendement de compression par rapport à l'isentropique de 0,9, la température de l'air sous 10 bars en entrée de récepteur solaire se situe aux alentours de 615 K. De même, avec un rendement de 0,9 par rapport à l'isentropique pour la turbine, les gaz d'échappement à l'atmosphère sortent à environ 585 K. En prenant les caractéristiques thermodynamiques réelles de l'air pour ce cycle, on obtient un rendement mécanique global de 27 %, soit un rendement électrique légèrement supérieur à 25 %.

Ce rendement électrique atteint près de 40 % si on arrive à chauffer l'air à 1500 K, sous 20 bars, ce qui est tout à fait compatible avec les meilleures turbines actuelles et les possibilités de la concentration solaire. Cependant, à ces niveaux de température et de pression, les problèmes technologiques et de tenue de matériaux, notamment au niveau du récepteur solaire, sont beaucoup plus difficiles à résoudre.

### 2.2. Les cycles combinés

Une des meilleures solutions pour améliorer ces performances consiste à récupérer la majeure partie de l'enthalpie contenue dans les gaz d'échappement qui servent alors de source chaude à un cycle à vapeur classique, comme indiqué sur la figure 2.

Dans ces conditions, la turbine à vapeur est dimensionnée à la moitié de la puissance de la turbine à gaz, et le rendement électrique, avec une source chaude à 1000 K, atteint environ 38 %. Pour une source chaude à 1500 K, on approche des rendements de 60 %.

La seule contrainte est de disposer, sur le site où on installe le cycle combiné, d'une source froide pour assurer la condensation totale de la vapeur en sortie de turbine. Cependant, si l'on ne dispose pas d'une quantité d'eau suffisante (rivière...), il y a souvent la possibilité de disposer d'un aérocondenseur sec, qui peut devenir très volumineux.

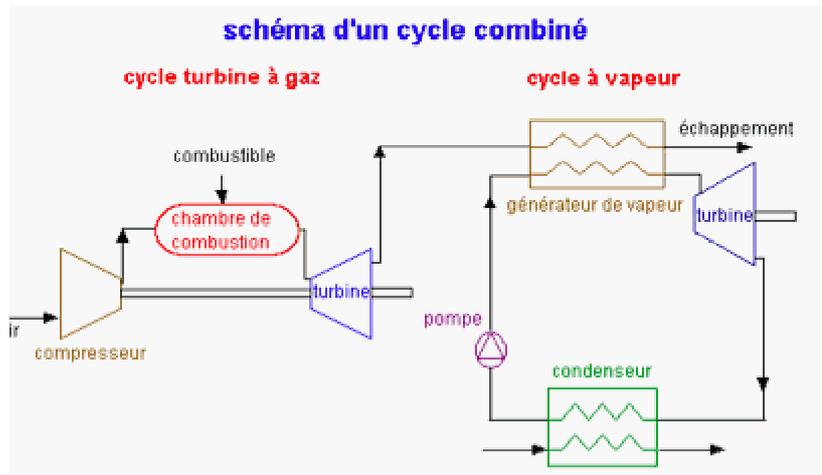


Figure 2 : schéma d'une cycle combiné

### 2.3. Le rendement global puissance électrique / puissance solaire d'une centrale à tour

Le rendement global de la centrale doit prendre en compte, en plus de l'efficacité du cycle thermodynamique, les pertes optiques du champ d'héliostats et les pertes thermiques du récepteur. On peut raisonnablement espérer une efficacité optique du champ d'héliostats, au point nominal de 95 % (90 % avec la présence d'un concentrateur secondaire). Quant au récepteur tel que nous l'avons conçu, ces pertes thermiques restent très faibles, de l'ordre de 15 %. Au total, en enlevant encore les consommations auxiliaires d'une telle centrale, on peut espérer des rendements nets globaux, au point nominal, de près de 28 %, avec de l'air collecté à 1000 K, et de 43 % à 1500 K.

Ainsi, pour une centrale à tour à cycle combiné de 12 MW, avec source chaude à 1000 K, il faut environ 43 MW d'énergie solaire, soit une surface d'environ 43 000 m<sup>2</sup> de miroirs. A 1500 K, 28 000 m<sup>2</sup> suffisent.

## 3. LE RECEPTEUR A LIT FLUIDISE

### 3.1. Récepteurs à air

Pour chauffer de l'air à plus de 1000 K, il faut imaginer de nouveaux récepteurs solaires. Ceux ci doivent être à la fois performants en rendement de collecte, et prouver leur résistance à la fatigue thermique liée aux fortes discontinuités de la ressource solaire.

#### 3.1.1. Les premiers prototypes

Les premières expérimentations aux foyers de centrales à tour ont été menées sur la plate-forme solaire d'Almería. La plus récente, dans le cadre du projet SOLGATE (2000 – 2003) [1], utilisait un récepteur solaire à nid d'abeilles en carbure de silicium (SiC). Les performances mesurées correspondaient aux attentes des concepteurs, mais on a rapidement constaté des fissures dans le récepteur. Les parois en SiC, lieu des échanges thermiques avec l'air, restent très vulnérables à la fatigue thermique.

#### 3.1.2. Le projet PEGASE

Dans le cadre de la renaissance du Centre d'essais solaires sur le site de l'ancienne centrale solaire THEMIS, dans les Pyrénées, un récepteur à air est actuellement développé par le GRETH du CEA. Cet échangeur compact, de 5 MW de puissance nominale, basé aussi

sur l'utilisation de SiC, devrait être testé prochainement sous une concentration de 2000. Les expérimentations prévues (en 2008), devront prouver la durabilité du récepteur.

### 3.1.3. Les lits fluidisés

Pour éviter les problèmes de rupture thermique, et pour augmenter encore les surfaces d'échange entre le rayonnement solaire concentré et l'air caloporteur, notre laboratoire propose une nouvelle conception de récepteur basé sur l'utilisation d'un lit fluidisé de particules de SiC. Ce concept a déjà été utilisé dans des recherches menées dans les années 1980 [2], mais l'apparition de nouveaux concepts de champ d'héliostats permet maintenant d'envisager un contact direct entre le rayonnement solaire et les particules. Les figures 3 et 4 donnent un aperçu de l'architecture du projet. L'avantage de cette conception est de se passer de la construction d'une tour centrale, qui correspond au tiers de l'investissement de tels projets.

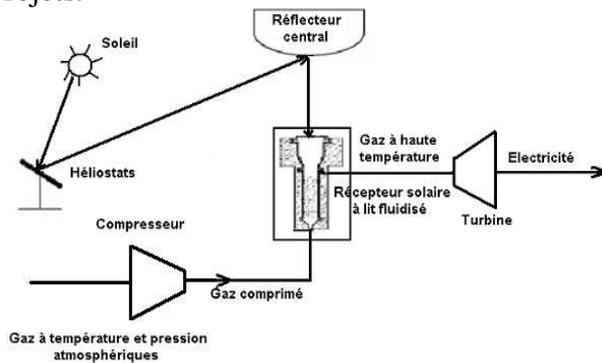


Figure 3 : schéma de principe

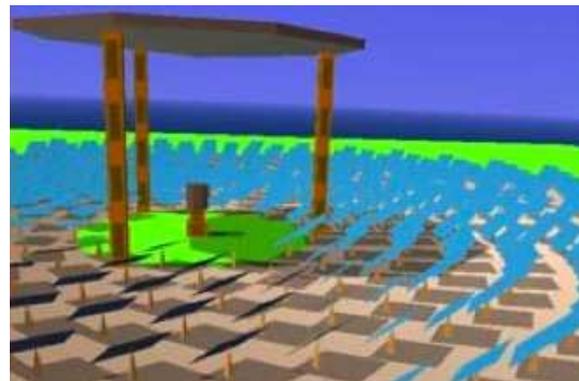


Figure 4 : champ « beam down »

Dans cette configuration, avec un surconcentrateur renvoyant le rayonnement solaire concentré vers le bas, il est donc possible d'avoir une irradiation directe du lit fluidisé.

## 3.2. Les premiers essais en laboratoire

Nous avons tout d'abord conçu un premier prototype de laboratoire, capable d'extraire environ 6 kW de rayonnement solaire simulé par un banc de lampes. Après avoir déterminé les débits d'air nécessaires aux conditions de fluidisation, nous avons effectué un certain nombre d'expérimentation afin de mieux comprendre l'évolution du comportement du récepteur en fonction d'un certain nombre de paramètres (taille et nature des particules, hauteur du lit fluidisé, débit d'air...). La figure 5 montre les premiers résultats obtenus en fonction de la variation du débit d'air, qui a une grosse importance sur le régime de fluidisation, et sur l'efficacité globale du procédé.

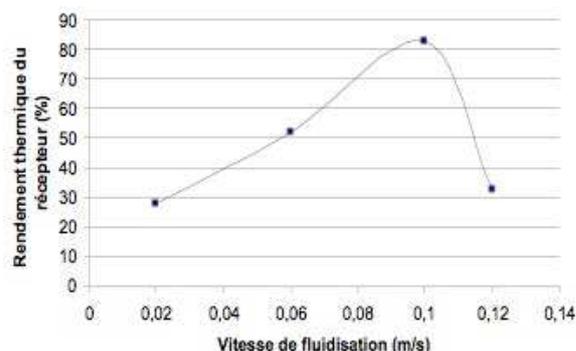


Figure 5 : premiers résultats obtenus

Bien que ces résultats soient très partiels, on peut déjà constater que, dans les conditions optimales de fluidisation, il est sans doute possible d'obtenir de très bons rendements de captation. Un nouveau prototype est en phase de conception pour être testé au foyer d'un four solaire de 6 kW du laboratoire PROMES à Odeillo.

### 3.3. La simulation des transferts radiatifs

Des travaux antérieurs ont démontré l'importance de la pénétration du rayonnement solaire dans le lit fluidisé sur la performance du récepteur. En effet :

- si le rayonnement solaire est absorbé dans les premières couches de surface, celles-ci vont surchauffer, augmenter les pertes par émission, et la hauteur utile pour l'échange avec l'air sera réduite ;
- si le rayonnement atteint le bas de la colonne, la fluidisation homogénéisera la température des particules, et l'efficacité de l'échangeur sera moindre.

Pour mieux comprendre les phénomènes de transfert régnant dans le récepteur, nous avons donc développé un code de calculs statistiques basé sur des algorithmes de Monte Carlo. Ce code nécessite la connaissance des caractéristiques optiques des particules ainsi que la porosité moyenne du lit en fonction de la hauteur. Les premiers résultats obtenus montrent que la diffusion du rayonnement par les particules peut être optimisée pour un obtenir des profils de température dans le récepteur permettant une meilleure efficacité de l'échange air – particules.

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Produire de l'électricité solaire par voie thermodynamique en profitant des excellents rendements des cycles combinés est un des thèmes de recherche les plus actuels pour les laboratoires impliqués dans ce domaine d'activité.

Pour obtenir de bons rendements, il faut donc concevoir des récepteurs capables de porter de l'air sous pression à plus de 1000 K, voire plus de 1500 K. L'utilisation de lits fluidisés directement éclairés par le rayonnement solaire concentré est une solution parmi les plus prometteuses. Nous avons donc construit un prototype de laboratoire dont les premiers résultats sont encourageants. Un code de calcul a été développé pour permettre d'optimiser la conception de tels récepteurs.

Il reste maintenant à tester la validité du concept en situation réelle au foyer d'un concentrateur solaire.

### Références

[1] P. SCHWARZBOZL, M SCHMITZ M, R. PITZ-PAAL, R. BUCK : Analysis of Solar Gas Turbine Systems with Pressurized Air Receivers (REFOS), *Proc. 11th SolarPACES Int. Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, September 4-6, 2002, Zürich, Switzerland*

[2] G. FLAMANT, D. GAUTHIER, A. VIALARON : Development of gas-solid high temperature solar receivers. The fluidised concept. *8<sup>th</sup> Solar World Cong. Int. Sol. Energy Soc. Perth No. 3, pp 1937-1942; Stokolay S. V. Ed., Pergamon, Oxford U K - 1983*