

# Modélisation de centrales solaires thermodynamiques Cas du projet PEGASE à THEMIS

Pierre GARCIA<sup>1\*</sup>, Alain FERRIERE<sup>1</sup>, Stéphane PLAYS<sup>1</sup>, Jean-Jacques BEZIAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire PROMES, UPR CNRS 8521, 7 rue du Four Solaire, 66 120 Font-Romeu

<sup>2</sup>LGPSD, Ecole des Mines d'Albi, Campus Jarlard, 81 013 Albi cedex 09

(\*auteur correspondant : [Pierre.Garcia@promes.cnrs.fr](mailto:Pierre.Garcia@promes.cnrs.fr))

**Résumé** - Le laboratoire PROMES est porteur d'un projet, baptisé PEGASE, d'installation d'un système hybride solaire/turbine à gaz au foyer de la tour de l'ancienne centrale Thémis. Le logiciel TRNSYS et sa bibliothèque STEC permettent de simuler la conduite de l'installation complète dans le but d'évaluer ses performances. Des sous modèles détaillés de composants spécifiques tels que le champ d'héliostats (représenté par des matrices d'efficacité calculées avec les codes WINDELSOL et SOLTRACE) et le récepteur ont été intégrés au modèle.

## Nomenclature

<i>S</i>	surface, $m^2$
<i>P</i>	puissance, $W$
<i>E</i>	énergie, $J$
<i>I</i>	ensoleillement normal direct, $W/m^2$
<i>FS</i>	fraction solaire du système
<i>r</i>	rendement
<i>a</i>	absorptivité du récepteur
<i>e</i>	émissivité du matériau absorbeur

## Indices

<i>ouv</i>	ouverture du récepteur
<i>SF</i>	solaire captée en haut de tour
<i>rec</i>	transmis à l'air dans le récepteur
<i>amb</i>	ambient
<i>gaz</i>	appoint en chambre de combustion
<i>el</i>	électrique
<i>hyb</i>	hybride
<i>sol-el</i>	solaire à électrique

## 1. Introduction

Le projet PEGASE [1] a pour but la mise en place et l'expérimentation d'un prototype de centrale solaire à haut rendement basé sur un cycle hybride à gaz haute température constitué d'un récepteur solaire à air pressurisé et d'une turbine à gaz (figure 1), sur le site de l'ancienne centrale THEMIS. Un appoint de chaleur par combustion permet de maintenir les conditions nominales de fonctionnement de la turbine quel que soit l'ensoleillement.

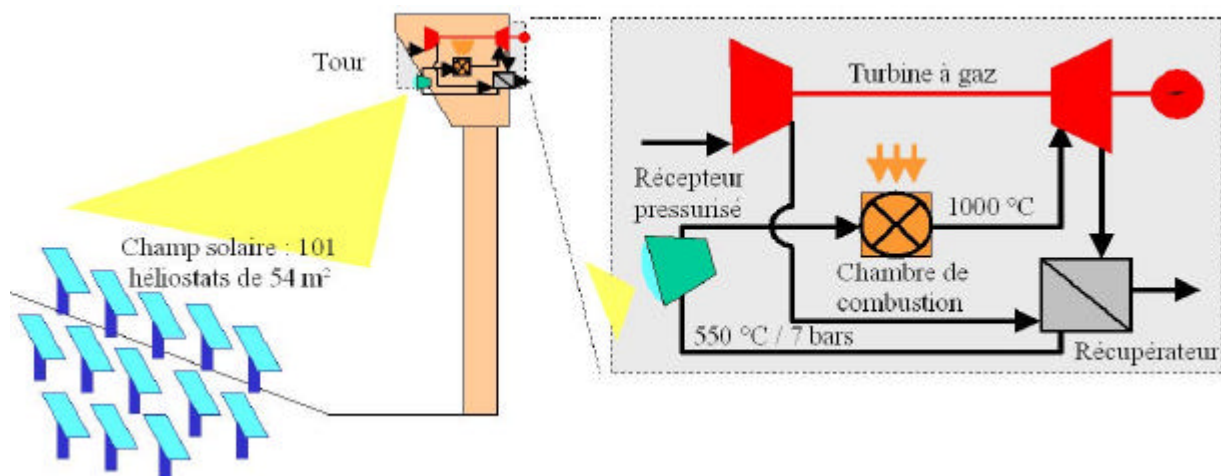


Figure 1. Schéma de l'installation PEGASE à THEMIS

Des logiciels spécifiques ont été mis en œuvre pour prévoir les performances du champ solaire ainsi que celles du système global.

## 2. Matrices d'efficacité du champ solaire

### 2.1. Définition

Cette matrice donne le rendement du couple champ solaire - ouverture du récepteur en fonction de la position du soleil dans le ciel, définie par son azimut et son site. Elle comprend donc la réflectivité des miroirs, l'effet cosinus dû à l'angle d'incidence du soleil sur les miroirs (le soleil ne voit pas la surface totale du miroir mais une projection de celle-ci, appelée surface efficace), les ombres (masques entre le soleil et l'héliostat) et blocages (masques entre l'héliostat et la tour), et le débordement de la tache focale hors de la surface d'ouverture du récepteur (figure 2).

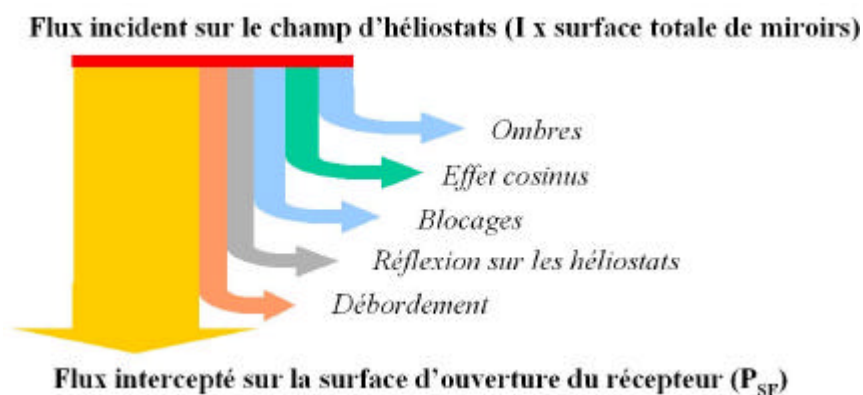


Figure 2. Pertes énergétiques d'un champ d'héliostats

Ces matrices peuvent être intégrées dans des outils d'évaluation des performances globales des systèmes, comme TRNSYS [2], SOLERGY [3] ou ECOSTAR [4].

### 2.2. Caractéristiques du champ d'héliostats de PEGASE à THEMIS

Pour PEGASE, la moitié des héliostats de THEMIS sera réutilisée. Plusieurs type d'erreurs causant un élargissement de la tache solaire sur l'ouverture du récepteur doivent être introduites dans la modélisation pour simuler les défauts optiques des héliostats :

- Les *erreurs de pointage* sont causées par les moteurs (site et azimut) et entraînent un décalage du centre de la tache par rapport à son point de visée théorique. Elles peuvent se décomposer en deux distributions gaussiennes, l'une pour le dépointage en site et l'autre pour le dépointage en azimut (tableau 1), qui s'appliquent au vecteur normal de chaque héliostat.

	Moyenne	Ecart type
	<i>mrad</i>	<i>mrad</i>
Dépointage en site	0,0	0,9
Dépointage en azimut	0,1	1,5

Tableau 1 : Valeur des dépointages en site et en azimut des héliostats de THEMIS [5]

- Les *erreurs de réglage* des miroirs sont commises au montage des neufs modules qui constituent la surface réflectrice de l'héliostat. A THEMIS, elles peuvent être déduites de relevés datant de 1982 [6] pour les parties haute (écart-type 0,3 mrad) et basse (écart-type 1,5 mrad) du champ d'héliostats.

- Les *erreurs de courbure* reflètent les approximations sur la focale des facettes des héliostats. La focale de réglage de chaque héliostat de THEMIS est ajustée pour s'approcher à moins de 3 m de la focale théorique (distance oblique héliostat-récepteur). Cette dernière sera donc retenue comme paramètre dans les modélisations du champ solaire. Les focales des modules prennent 4 valeurs différentes suivant la position de l'héliostat dans le champ.

### 2.3. Modèle WINDELSOL

WINDELSOL [7] est un logiciel qui permet de présenter de manière conviviale et de traiter les calculs du code DELSOL3. Pour reproduire les caractéristiques du champ d'héliostats de PEGASE en termes compréhensibles par WINDELSOL, quelques approximations ont dû être faites :

- L'emplacement des héliostats n'est pas défini par leurs coordonnées mais par une densité d'héliostats représentant le rapport entre la surface réfléchissante et la surface au sol.

- Seuls des terrains plats peuvent être modélisés, alors qu'à PEGASE les altitudes de la première et de la dernière rangée diffèrent de 24 mètres. A partir des coordonnées réelles des héliostats de THEMIS, nous avons donc calculé un champ plat fictif dont les coordonnées des héliostats sont déterminées par l'intersection des vecteurs héliostats-récepteur et d'un plan horizontal situé à une hauteur moyenne dans le champ. Cette méthode permet de conserver la même surface efficace du champ, puisque les vecteurs incidents et réfléchis restent identiques.

- La géométrie particulière des héliostats du champ de PEGASE ne pouvant pas être prise en compte, nous avons dû définir un héliostat équivalent de même encombrement, de même densité de miroirs, mais avec 8 modules identiques et composés chacun d'une seule facette au lieu de 9 modules composés de 2 ou 6 facettes.

### 2.4. Modèle SOLTRACE

SOLTRACE [8] est un code utilisant la méthode des lancers de rayons pour reproduire le trajet de la lumière au travers d'un système concentrateur dont chaque élément est défini par sa forme et sa position dans l'espace. Cette approche très détaillée de la géométrie du concentrateur nécessite un prétraitement lourd par tableur, incluant notamment le calcul de l'orientation de toutes les facettes et des erreurs de pointage des héliostats, qui n'est pas pris en compte par SOLTRACE. Pour éviter de recalculer le fichier géométrique définissant le système concentrateur et de relancer l'exécution à chaque position du soleil, un macro-programme a été développé (script réalisé avec AutoIt). Ainsi le calcul d'une matrice d'efficacité s'exécute automatiquement.

### 2.5. Résultats obtenus sur les champs d'héliostats

Le temps de calcul d'une matrice d'efficacité sur un PC classique est de quelques secondes avec WINDELSOL, quelques heures avec SOLTRACE. Les matrices d'efficacité obtenues permettent d'estimer les rendements du champ solaire de PEGASE à THEMIS au point nominal de dimensionnement (à midi solaire à l'équinoxe) et en moyenne annuelle (en calculant l'énergie interceptée par l'ouverture du récepteur à chaque heure de l'année). Pour cela on dispose de données météorologiques horaires issues de la station actinométrique du Four Solaire d'Odeillo et d'un programme de calcul de la position du soleil. Les rendements ainsi calculés sont comparés à ceux des champs solaires du programme ECOSTAR (modèles prédictifs) et de l'expérience THEMIS (spécifications d'avant-projet et mesures [9]) (figure 3).

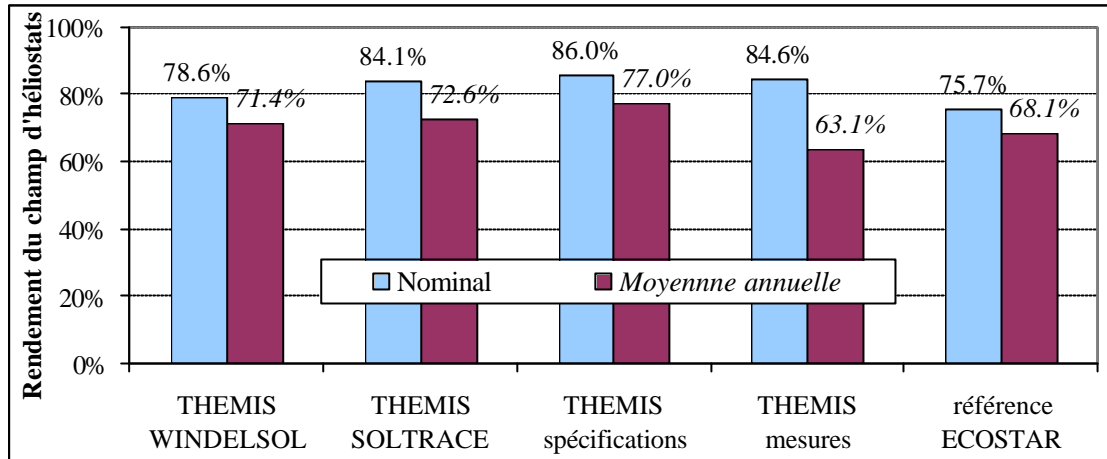


Figure 3. Comparaison des matrices d'efficacité issues de modèles ou de mesures

Au point nominal, les performances du champ solaire calculé par SOLTRACE sont très proches de celles de THEMIS. La matrice d'efficacité WINDELSOL donne des valeurs plus faibles, qui peuvent s'expliquer par les approximations concédées sur les caractéristiques géométriques des héliostats et de leur implantation. De même les moins bonnes performances des installations de référence d'ECOSTAR sont sûrement dues à leur taille plus conséquente (environ 10 MWe). En moyenne annuelle les performances du champ solaire de PEGASE estimées par WINDELSOL et SOLTRACE sont proches, et là encore supérieures à celles prévues par ECOSTAR. Si les spécifications attendues pour le système collecteur de THEMIS semblent aujourd'hui optimistes, son rendement moyen mesuré est lui plus faible que l'annoncent nos modèles. Ceci s'explique par le fait que ces derniers ne prennent pas en compte la disponibilité des héliostats (proche de 91 % lors de l'expérience THEMIS), ni la salissure des miroirs, qui fait baisser la réflectivité de 90 à 84 %.

### 3. Simulation des performances de l'installation complète

#### 3.1. Modèle TRNSYS

Le système PEGASE a été modélisé à l'aide de la bibliothèque STEC de TRNSYS [2]. La simulation est effectuée sur deux jours (l'un très ensoleillé, l'autre perturbé par des passages nuageux), avec une contrainte de production à pleine charge de 8 heures à 22 heures. Les données météorologiques horaires sont issues de la station actinométrie du Four Solaire d'Odeillo pour les 1 et 2 juillet 2003, mises en forme de manière à pouvoir être lues par TRNSYS. Le champ d'héliostats est représenté par sa matrice d'efficacité calculée par SOLTRACE. Les rendements des composants du cycle thermodynamique sont ajustés pour correspondre aux performances de la turbine envisagée pour PEGASE. Le modèle de récepteur prend en compte les pertes par réflexion et rayonnement infrarouge du récepteur, l'ouverture de la cavité réceptrice étant représentée par un corps gris diffusant d'émissivité  $e$  :

$$r_{rec} = a - e \cdot S \frac{S_{ouv}}{P_{SF}} \left( T_{rec}^{-4} - T_{amb}^{-4} \right) \quad \text{avec } a=95\%, e=95\%, S_{ouv}=12,5 \text{ m}^2 \quad (1)$$

La température du matériau absorbeur ( $T_{rec}$ ) est supposée être la température moyenne de l'air au passage du récepteur. Le cycle à gaz fonctionne toujours à pleine charge, avec une injection de combustible dans la chambre de combustion régulée de manière à conserver la température nominale en entrée de turbine (1000 °C).

La figure 4 présente l'interface graphique de TRNSYS. Les modules correspondant aux composants et aux consignes d'entrées sont reliés entre eux par des flèches correspondant à leurs entrées-sorties.

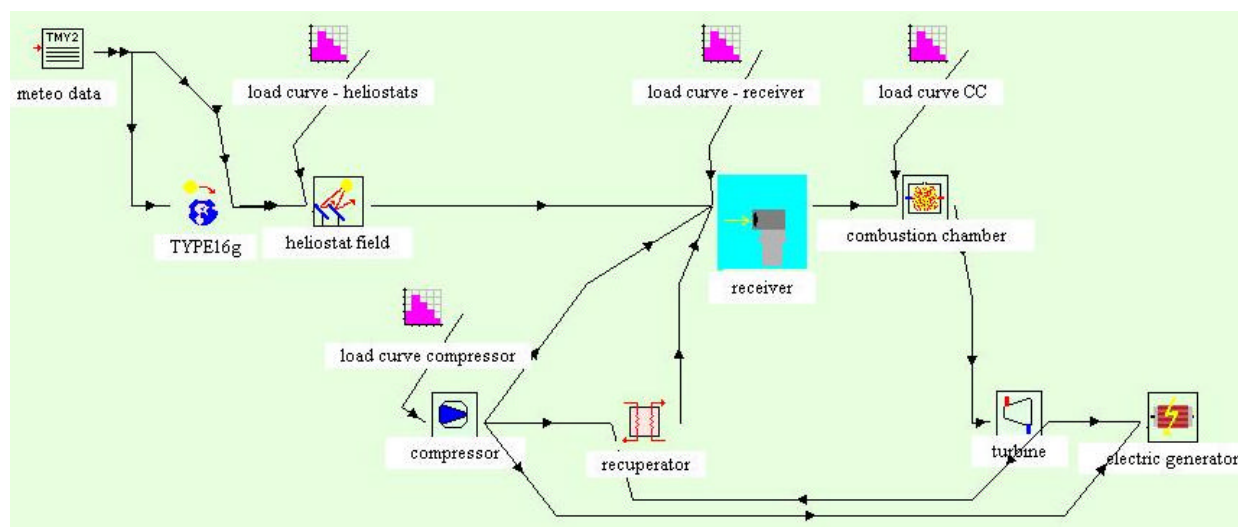


Figure 4. Interface graphique de TRNSYS pour la modélisation de Pégase (par soucis de clarté les modules correspondant aux sorties (traceur, enregistrement) ne sont pas représentés)

### 3.2. Résultats de la simulation du système

Les résultats du modèle TRNSYS ont été comparés avec ceux d'un modèle Excel issu du programme européen ECOSTAR [4], adapté à l'installation PEGASE à THEMIS avec notamment la modification des caractéristiques du récepteur.

Nominal	ECOSTAR	TRNSYS	Journalier	ECOSTAR	TRNSYS
$P_{SF}$	4,47 MW	4,51 MW	$E_{SF}$	40,2 MWh	41,1 MWh
$P_{rec}$	3,43 MW <sub>th</sub>	3,50 MW <sub>th</sub>	$E_{rec}$	30,2 MWh <sub>th</sub>	31,5 MWh <sub>th</sub>
$P_{gaz}$	0,59 MW <sub>th</sub>	0,37 MW <sub>th</sub>	$E_{gaz}$	26,1 MWh <sub>th</sub>	23,7 MWh <sub>th</sub>
$P_{el}$	1,41 MW <sub>e</sub>	1,34 MW <sub>e</sub>	$E_{el}$	19,8 MWh <sub>e</sub>	19,1 MWh <sub>e</sub>
$r_{hyb}$	23,5 %	23,1 %	$r_{hyb}$	23,6 %	23,4 %
$r_{sol-el}$	22,2 %	22,3 %	$r_{sol-el}$	18,3 %	18,9 %
$FS$	85,3 %	90,4 %	$FS$	53,6 %	57,1 %

Tableau 2. Performances nominales (ensoleillement normal direct de 1000 W/m<sup>2</sup>) et journalières (journée d'été ensoleillée, turbine à pleine charge de 8 h à 22 h) de l'installation PEGASE selon les modèles ECOSTAR et TRNSYS,

Les tableau 2 montre que les simulations du fonctionnement du système PEGASE par les modèles ECOSTAR et TRNSYS donnent des résultats similaires. Sur une belle journée, la production électrique avoisine 20 MWh<sub>e</sub>, pour une fraction solaire (rapport de l'énergie thermique d'origine solaire sur l'énergie thermique totale fournie à la turbine) journalière supérieure à 50 %. La principale incertitude réside dans le calcul de la quantité de l'appoint en chambre de combustion, qui se répercute sur les fractions solaires.

La figure 5 permet de suivre l'évolution des puissances transitant dans le système PEGASE au cours de deux jours consécutifs, l'un ensoleillé, l'autre perturbé par des passages nuageux. Elle confirme le très bon accord entre les deux modèles, quelle que soit la ressource.

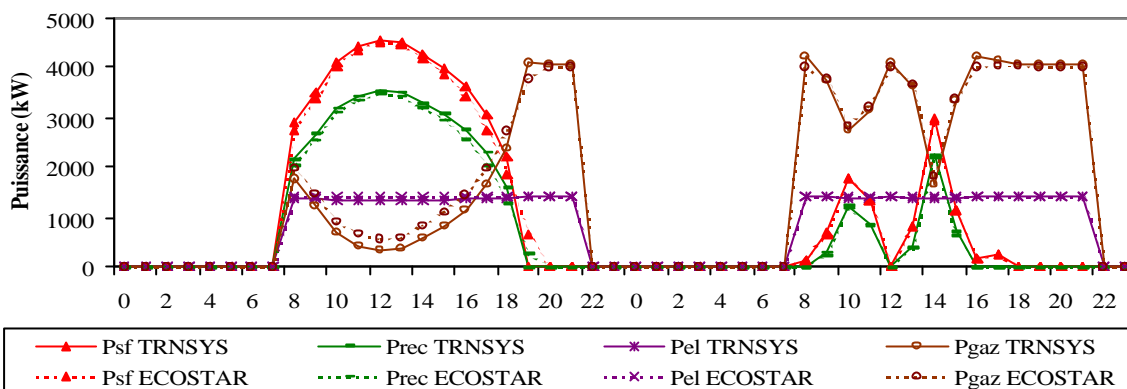


Figure 5. Evolution des puissances traversant le système Pégase (modèles TRNSYS et ECOSTAR)

#### 4. Discussion et perspectives

SOLTRACE se montre capable de représenter avec précision le champ solaire de PEGASE à THEMIS. WINDELSOL, destiné avant tout à l'optimisation de projets de centrales solaires de grande taille, paraît moins performant pour l'analyse détaillée d'installations existantes.

Concernant l'étude du système complet, si un modèle par bilans de puissance comme ECOSTAR présente l'avantage de la simplicité, TRNSYS possède de nombreux autres atouts. Premièrement une analyse thermodynamique plus fine permet à l'utilisateur de connaître les températures, pressions, débits et enthalpies en tout point du cycle, et de définir le système selon ses choix de conception (matériaux, géométries, performances...). Deuxièmement, TRNSYS est capable de prendre en compte l'inertie des systèmes et pourrait donc estimer le comportement de l'installation à des pas de temps plus faibles à partir de nouveaux modèles dynamiques de composants. Néanmoins aucune limite sur la tenue des matériaux n'est ici prise en compte, or selon TRNSYS la température du récepteur pourrait dépasser 950 °C : si le récepteur n'est pas conçu pour résister à de telles contraintes, il faudrait diminuer la puissance réfléchiée par le champ, ce qui grèverait les performances du système.

#### Références

- [1] P. Garcia, A. Ferriere, G. Flamant, P. Costerg, R. Soler, B. Gagnepain, The PEGASE project: design and performance evaluation of a hybrid solar/fossil gas-turbine system for electricity generation, *Proc. 13<sup>th</sup> SolarPACES Int. Symp.* (Seville, Espagne, 20-23 juin 2006).
- [2] P. Schwarzbözl, U. Eiden, R. Pitz-Paal, A TRNSYS model library for Solar Thermal Electric Components (STEC), A reference manual Release 2.2, (2002).
- [3] M. C. Stoddard, S. E. Faas, C. J. Chiang, J. A. Dirks, SOLERGY: A computer code for calculating the annual energy from central receiver power plants, *NTIS*, (Springfield, USA, 1987).
- [4] R. Pitz-Paal et al, ECOSTAR Road Map Document, <ftp://ftp.dlr.de/ecostar/> (2005).
- [5] B. Bonduelle, Etude statistique des dépointages des héliostats THEMIS, Rapport GEST 11 (1984).
- [6] Y. Denayrolles, C. Mersier, Centrale THEMIS, réception individuelle des héliostats, fiche de résultats, HP/136/82-03 (1982).
- [7] WINDELSOL 1.0 Users Guide, AICIA-CIEMAT-SOLUCAR Central Receiver Tech. (2002).
- [8] T. Wendelin, SOLTRACE User Manual, 2003 ASME ISEC (Kohala, Hawaii, 15-18 Mars 2003).
- [9] A. Amri, M. Izygon, B. Tedjiza, C. Etievant, Central Receiver Plant Evaluation II) Themis Collector Subsystem Evaluation, SANDIA contractor report SAND87-8182 (1987).

#### Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME et TOTAL qui cofinancent la thèse de P.Garcia dans le domaine de la modélisation des centrales solaires thermodynamiques.