

ANALYSE THERMODYNAMIQUE DE LA PREMIERE CENTRALE HYBRIDE SOLAIRE-GAZ EN ALGERIE

Adel MILES¹, Otmane KHEMIS²

Ce travail est une simulation d'une centrale thermique hybride gaz-solaire qui fonctionne selon un système de cycle combiné. Le champ solaire, constitué de capteurs cylindro-parabolique est intégré, comme appoint, au cycle de Rankine à une seule étape de pression. Cette intégration est bien adaptée pour garantir une disponibilité minimale de puissance quelles que soit les fluctuations du rayonnement solaire. On propose un modèle d'une centrale thermique hybride, composé d'un système de cycle combiné solaire intégré (ISCCS). L'étude énergétique est effectuée avec le simulateur Aspen plus (HYSYS). Les valeurs de l'énergie gagnée par le collecteur solaire sont déterminées en utilisant les données solaires du site algérien de Hassi R'mel. Les variations des principaux paramètres du cycle à vapeur, en fonction de l'apport solaire, sont données pour une centrale produisant environ 150 MW équipée de deux turbines à gaz et un train de turbine à vapeur. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer les conditions optimales pour une meilleure puissance de la turbine à vapeur, d'évaluer la contribution énergétique apporter par le solaire ainsi que la réduction de la pollution de l'air par le CO₂.

Mots clefs: Cycle combiné, turbine à Gaz, turbine à vapeur, collecteurs cylindro-parabolique, énergie solaire, cycle de Rankine.

This work is a simulation of a gas-solar hybrid power station which functions according to a system of combined cycle. The solar field, made up of sensors through parabolic collector is integrated, like supplement, with the cycle of Rankine with only one stage of pressure. This integration is well adapted to guarantee a minimal availability of power whatever the fluctuations of the solar radiation. We propose a model of a hybrid power station, composed of a system of combined cycle solar integrated (ISCCS). The energy study is carried out with the Aspen plus (HYSYS) simulator. The values of the energy gained by the solar heat collector are given by using the solar data of the Algerian site of Hassi R'mel. The variations of the principal parameters of the cycle with vapor, according to the solar contribution, are given for a power station producing approximately 150 MW equipped with two gas turbines and a train of stream turbine. The results obtained enabled us to determine the optimal conditions for better power of the steam, to evaluate the energy contribution provided by the solar as well as the reduction of the air pollution by CO₂.

¹ Doc., Laboratory of renewable energies and durable development (LERDD), Mechanical Department of Engineering, Constantine1 University, Algeria, e-mail: adelmiles25@gmail.com

² Mc Laboratory of renewable energies and durable development (LERDD), Mechanical Department of Engineering, Constantine1 University, Algeria, e-mail: jkhemis1@yahoo.fr

1. Introduction

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire a prouvé une certaine confiance pour une meilleure production de l'électricité et un potentiel élevé pour la réduction de CO₂. Cependant, les fluctuations saisonnières inhérentes et l'interrompu quotidien du rayonnement solaire sont des obstacles certains à sa plus large utilisation [1]. Néanmoins, les centrales solaires thermiques à grande échelle se sont avérées les plus économiques des technologies solaires en service aujourd'hui [2, 3, 4]. Les solutions pour compenser ces inconvénients dues à l'intermittence du rayonnement solaire sont l'utilisation étendue du stockage thermique qui peut être extrêmement cher, ou par son accouplement avec du combustible fossile (gaz naturel) comme proposé en cet article. Ce type de carburant est la meilleure forme de stockage au marché d'énergie connue aujourd'hui, néanmoins il doit être employé avec soin principalement dû à ses effets sur l'environnement associés. Une fois utilisé en liaison avec l'énergie solaire. Par conséquent, le concept du cycle combiné hybride intégré par gaz naturel-solaire (ISCCS) [5], garanti une disponibilité de puissance constante et allège certains des risques perçus liés à l'utilisation de grands champs de concentrateurs solaires.

En Algérie, la disponibilité de deux sources d'énergie importantes: rayonnement solaire (entre 1750 kWh/m² an et 2550 kWh/m² an) et un approvisionnement en gaz disponible [6]. Il convient donc d'adapter soigneusement l'une à l'autre par une technologie solaire adéquate pour assurer une énergie saine et moins couteuse. La méthode la plus efficace pour convertir l'énergie thermique solaire en énergie électrique est de soutirer l'eau d'alimentation du générateur de vapeur de rétablissement de la chaleur (HRSG) en aval de l'économiseur, produire la vapeur saturée à haute pression en utilisant l'énergie solaire, et de renvoyer la vapeur au HRSG pour la surchauffer par les gaz d'échappement de la turbine à gaz.

Le but de cette étude est de simuler l'exécution du premier ISCCS en Algérie, sous les conditions climatiques de Hassi R'mel. Dans ce travail, on propose une centrale thermique intégrée avec un seul niveau de pression. Pendant les périodes ensoleillées, la conversion d'énergie du gaz d'échappement dans la turbine à vapeur est améliorée en utilisant le générateur solaire de vapeur (SSG) parallèlement à HRSGs. Les avantages de cette usine avancée sont présentés ci-dessous.

2. Description du système hybride

Une centrale thermique (ISCCS) est à la base d'une centrale solaire conventionnelle, constituée d'un système solaire de production de vapeur qui alimente la turbine à vapeur, le fonctionnement de la centrale est assuré pendant la

nuit et dans les périodes où le rayonnement solaire est insuffisant (journées nuageuses) par un système à combustible fossile (gaz naturel), la centrale se convertie alors en cycle combiné (CC).

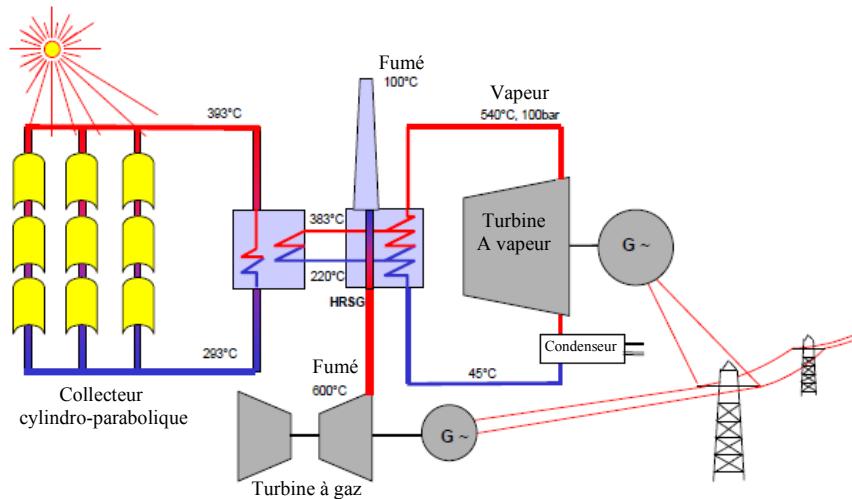


Fig. 1-a. Diagramme simplifié d'ISCCS

La centrale thermique (figure 1-a) comprend:

- Deux turbines à gaz à cycle ouvert de 47 MW, dont l'énergie thermique résiduelle des gaz d'échappement est récupérée par deux générateurs de vapeur (HRSG).
- Un cycle à vapeur, de type Rankine, (figure 1-b) comprend une turbine à vapeur d'une capacité maximum de 80 MW à un seul niveau de pression.

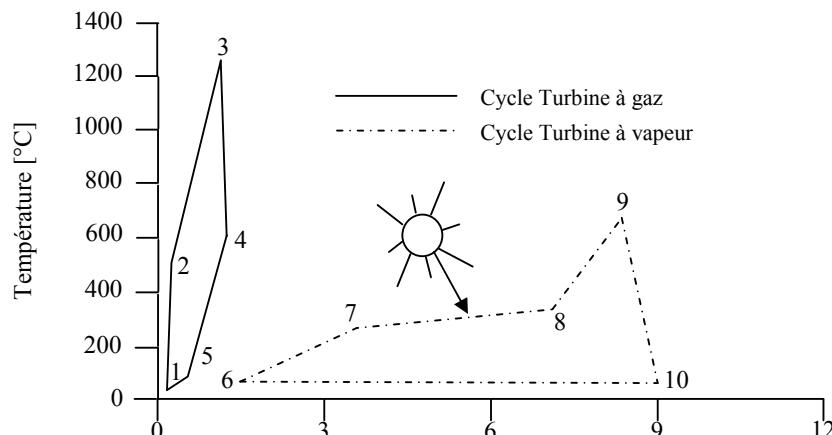


Fig. 1-b. diagramme T-S d'ISCCS

- Un cycle à l'huile thermique chauffée dans un champ de capteurs solaires cylindro-parabolique. L'énergie thermique de cette huile est récupérée par un autre générateur solaire à vapeur parallèle au précédent (HSSG).
- Un champ solaire d'une surface de captation égale à 183120 m².

Une température à la sortie des générateurs de vapeur de 100°C est choisie pour récupérer autant d'énergie des gaz d'échappement.

3. Analyse de la centrale solaire ISCCS

La turbine à gaz fonctionne avec un rapport de compression de 19.60 bars s'effectue avec une température d'admission et d'échappement de 515.50°C et 1295°C respectivement, le gaz naturel est employé comme carburant. Une turbine à vapeur à simple niveau de pression et le générateur de vapeur (HRSG) forme le cycle de Rankine, la vapeur à haute pression de 86.63 bars et 535.20°C fournie une énergie thermique à la turbine à vapeur, l'absorption de l'énergie solaire à un impact important sur l'exécution de la turbine à vapeur, par conséquent le changement des conditions atmosphérique influx sur le rendement de cette dernière, pour cela l'opération et l'analyse d'exécution quotidienne effectué sur une base de tranche horaire est nécessaire. Dans cette étude on assume que les deux turbines à gaz fonctionnent à charge complète et à plain temps, mais la turbine à vapeur est actionné avec un changement des valeurs de débit de vapeur, de pression et de température qui sont déterminés par le rendement thermique disponible à partir du champ solaire. Dans le bloc solaire, le modèle du capteur cylindro-parabolique choisi est LS-3 [10].

Les deux facteurs les plus importants pour évaluer les performances de l'ISCCS sont la production de l'électricité et le rendement du système. La puissance électrique produite par la centrale est déterminée en calculant les sorties des turbines à gaz, de la turbine à vapeur et celle du générateur à vapeur (HRSG). Les valeurs sont obtenues à partir de la différence entre la sortie et l'entrée des unités; le potentiel pour l'amélioration supplémentaire d'un système d'énergie en exprimant des informations sur la différence de niveau d'énergie entre le donneur et l'accepteur d'énergie.

L'énergie mécanique produite par la centrale

$$W_{ISCCS} = 2W_{GT} + W_{ST} \quad (1)$$

L'énergie mécanique produite par la turbine à gaz

$$W_{GT} = W_T - W_C \quad (2)$$

L'énergie reçue par le compresseur

$$W_C = (h_2 - h_1) \cdot \dot{m}_a \quad (3)$$

L'énergie produite par la turbine à Gaz

$$\dot{W}_T = (h_3 - h_4) \cdot \dot{m}_g \quad (4)$$

Chaleur reçue par la chambre de combustion

$$\dot{Q}_{GT} = (h_3 - h_2) \cdot \dot{m}_g \quad (5)$$

Le rendement du cycle de combustion

$$\eta_{GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{Q}_{GT}} \quad (6)$$

L'énergie produite par la turbine à vapeur

$$\dot{W}_{ST} = (h_9 - h_{10}) \cdot \dot{m}_s \quad (7)$$

Le rendement du cycle de vapeur est

$$\eta_{ST} = \frac{\dot{W}_{ST}}{\dot{Q}_{ST}} \quad (8)$$

Chaleur produite par la turbine à vapeur

$$\dot{Q}_{ST} = Q_R + Q_S \quad (9)$$

Q_S est la chaleur absorbé par le fluide caloporteur.

Le rendement du générateur de vapeur de rétablissement de la chaleur (HRSG)

$$\varepsilon_{HRSG} = \eta_R = \frac{\dot{Q}_{ST}}{\dot{Q}_R} \quad (10)$$

La chaleur donnée par les fumés.

$$\dot{Q}_R = (h_4 - h_5) \cdot \dot{m}_g \quad (11)$$

Le rendement du champ solaire est

$$\eta_s = \frac{Q_s}{I_C \cdot A} \quad (12)$$

Ainsi, le rendement global de la centrale solaire est

$$\eta_{ISCCS} = \eta_{GT} + (1 - \eta_{GT}) \cdot \eta_R \cdot \eta_{ST} \quad (13)$$

4. Simulation du système

La simulation de l'installation de la centrale solaire hybride montrée dans fig. (1-a) a été effectué en utilisant le simulateur Aspen plus HYSYS [9], les composants du modèle sont basés sur les bilans d'énergie, de masse et d'équations d'équilibre, l'équation d'état de Peng Robinson (PR) est le modèle choisi pour calculer les propriétés thermodynamique.

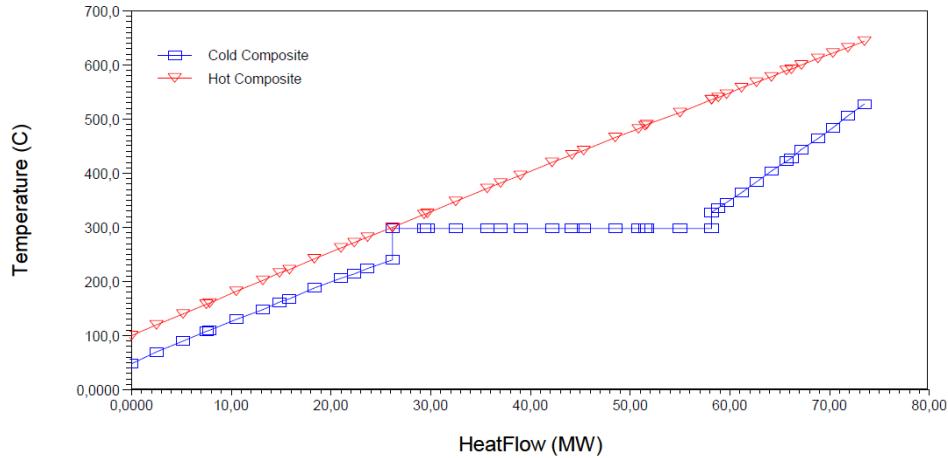


Fig. 2. T-Q diagramme de HRSG

Pour simplifier la simulation, on a supposé que le système fonctionne en mode statique et au gaz naturel. Les conditions de fonctionnement les plus appropriées sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1

Conditions de fonctionnement du centrale ISCCS

Paramètres	Valeurs
Irradiation normale directe (W/m ²)	750
Rapport de compression	18.58
Rendement Polytropique de Compresseur (%)	84
Rendement Polytropique de turbine (%)	83
Rendement Polytropique de turbine à vapeur (%)	86
Température d'entrée de turbine à gaz (°C)	1295
Température d'entrée de turbine à vapeur (°C)	625

Le rendement et les coefficients de transfert thermique dans les échangeurs de chaleur sont des fonctions du taux d'écoulement de la masse de vapeur/eau. Les paramètres typiques calculés présentés dans fig. (1-a) sont montrés dans le tableau 2, y compris la température, la pression, le débit, la composition, et l'énergie.

Tableau 2
Données technique de la centrale ISCCS

Point d'état	T (°C)	P (bar)	m (kg/s)	Enthalpie (kJ/kg)
1	25	1.013	112	0.28
2	515.50	19.60	112	510.50
3	1295	19.60	116.4	1402
4	656	1.20	116.4	562.80
5	100	1.20	116.4	73.20
6	50	94	60	15770
7	240	94	30	14900
8	329	86.83	30	13030
9	625	86.83	60	12280
10	49.60	0.12	60	13560
11	48.86	0.12	60	15780

5. Résultats et discussion

Les figures suivantes illustrent l'exécution de la centrale thermique des jours de deux mois à différents saisons de l'année. Les jours choisis sont une journée du mois de mars et l'autre du mois de juin. La figure (2) montre le procédé d'échange thermique entre les fumés sortants de la turbine à Gaz et la vapeur d'eau qui alimente la turbine à vapeur, les changements de la pente de la courbe représentent le changement d'état de la vapeur en trois parties qui sont respectivement :

La première partie au niveau de l'économiseur ou l'eau se réchauffe jusqu'à 240°C avec une énergie d'échange de 52.40 MW, la deuxième partie au niveau de l'évaporateur où s'effectue le changement d'état avec une énergie d'échange de 64 MW, la troisième partie au niveau du surchauffeur avec une énergie d'échange de 30.60 MW. Soit une énergie d'échange globale au niveau de HRSG et de 147 MW.

Les figures (3 et 4) montrent respectivement la puissance thermique produite et le rendement thermique de la centrale.

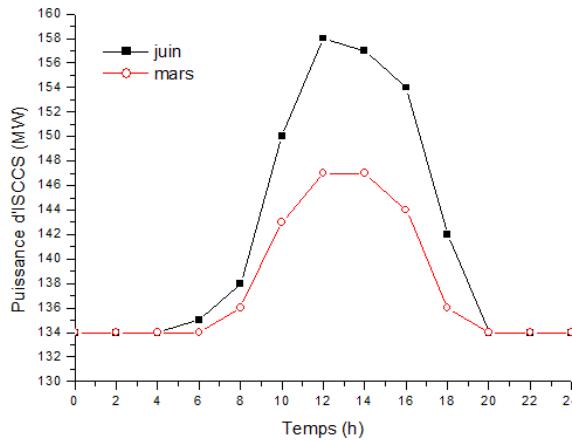


Fig. 3 Puissance thermique produite d'ISCCS

La puissance thermique en mode nuit ou la centrale travaille en cycle combiné CC est de 134 MW. Du lever jusqu'au coucher du soleil la puissance thermique change selon la variation de l'intensité solaire du rayonnement.

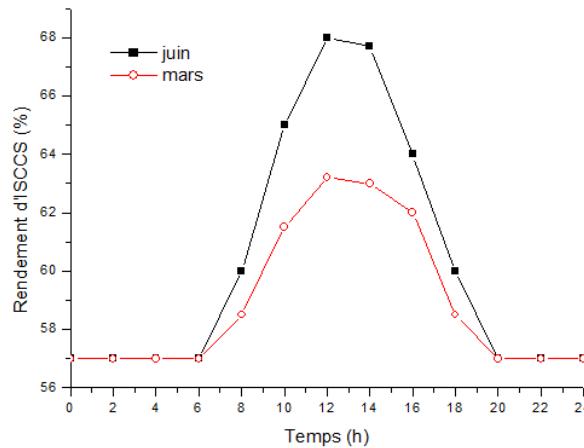


Fig. 4 .Rendement thermique d'ISCCS

Le rendement thermique d'ISCCS est le meilleur facteur pour évaluer les performances de l'installation. Dans la figure (4), on peut observer que le rendement thermique en mode nuit est égale à 57%. Ceci confirme l'optimisation du cycle combiné. Le rendement thermique de la centrale en mode jour sera plus élevé qu'en mode nuit. La valeur la plus élevée atteinte et de 68% en été où l'Irradiation normale directe est à son maximum. Par conséquent, la capacité d'ISCCS peut atteindre le point de 158 MW. L'augmentation du champ solaire

améliore le rendement thermique de la turbine à vapeur où la consommation de carburant de turbine à gaz demeure constante. En raison de cette amélioration, le rendement de l'opération d'ISCCS est amélioré.

La centrale thermique solaire (ISCCS) représentée sur le schéma (2) produit 158 MW d'énergie électrique. 24 MW produits à partir de l'usine solaire, figures (5 et 6) et 134 MW produits à partir du cycle combiné.

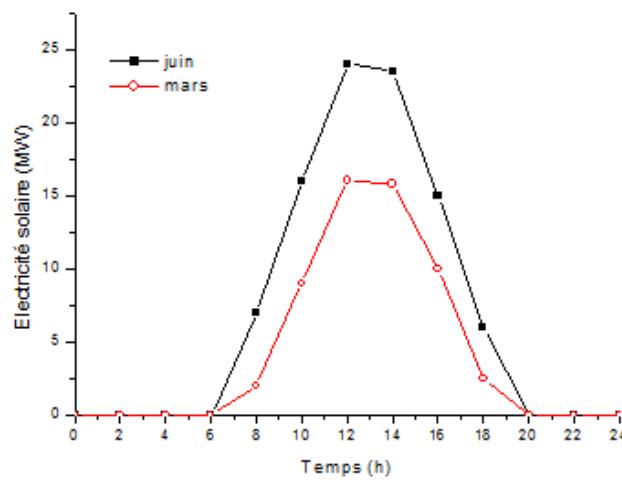


Fig. 5 Puissance électrique solaire d'ISCCS

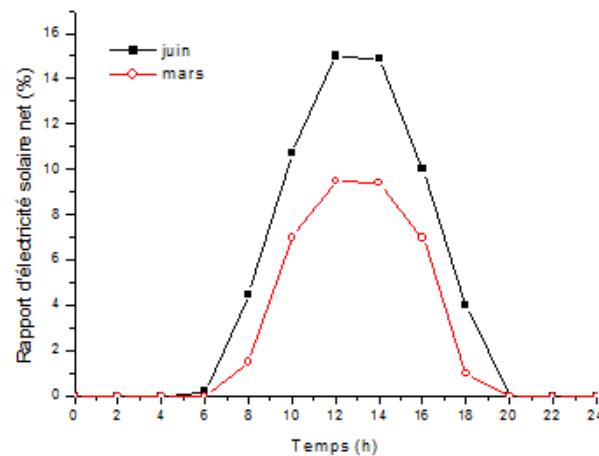


Fig. 6 Rapport d'électricité solaire net d'ISCCS

Le tableau 3 montre l'exécution d'ISCCS.

Table 3

Performances d'ISCCS

Sortie	Valeur
Puissance de Compresseur (MW)	114.42
Puissance de Turbine (MW)	195.42
Puissance de turbine à Gaz (MW)	81
LV (MW)	147
Puissance de cycle combiné (MW)	134
Puissance Solaire (MW)	24
Rendement de cycle combiné (%)	57
Rendement d'ISCCS (%)	68

Les propriétés de la simulation de chaque composant d'ISCCS sont montrées dans le tableau 4.

Table 4

ISCCS propriétés de simulation

Vapeur	Températur	Pression	Débit
Sortie de Compresseur	515.50	19,60	112
Sortie Chambre de combustion	1295	19,60	116.40
Sortie de turbine à gaz	656	1,20	116.40
sortie de surchauffeur cotée chaud	656	1,20	116.40
sortie d'évaporateur cotée chaud	302	1,20	116.40
sortie d'économiseur cotée chaud	100	1,20	116.40
sortie d'économiseur cotée froid	240	94	30
sortie d'évaporateur cotée froid	329	86.63	30
sortie de surchauffeur cotée froid	529	86.63	30
Sortie Turbine à vapeur	49.60	0.12	60
Sortie de Condenseur	48.86	0.12	60

6. Conclusions

Plusieurs travaux théoriques et expérimentaux, sont reliés à la recherche d'ISCCS, ont été présentés. La plupart d'entre eux analyse des divers composants de mécanismes de centrale, y compris les systèmes de capteur cylindro-parabolique et de cycle combinés. Le travail décrit en cet article concerne les modèles mathématiques des composants de base principaux dans ISCCS et des résultats de simulation pendant des jours de référence.

Un programme de simulation de HYSYS est employé pour déterminer l'exécution des paramètres thermodynamiques de la centrale électrique dans le cas des conditions algériennes à la région de Hassi R'mel.

Les valeurs obtenues dans deux jours typiques, sont très favorables pour placer une centrale électrique hybride dans ce secteur. Les résultats de simulation sont des réponses raisonnables par rapport à l'énergie solaire, où le rendement de l'électricité augmente en harmonie avec le rayonnement solaire. Le rendement solaire net de l'électricité peut être très intéressant et atteindre la limite de 15%. L'avantage de ces résultats avancés de la centrale électrique est d'avoir une augmentation de l'électricité sans consommation supplémentaire de combustible fossile du HRSG même dans les turbines à gaz. L'opération de régime de (CC) fournit une puissance de 134MW au mode nuit avec un rendement de 57%. Dans la journée, de l'énergie solaire peut être convertie en électricité avec l'efficacité plus haute qu'au mode de cycle combiné en raison de la méthode la plus efficace pour convertir l'énergie thermique solaire en énergie électrique qui est proposée dans cette étude. En conséquence, le mode d'opération d'ISCCS soulève la capacité de l'installation à 158 MW et l'efficacité à 68%. L'augmentation de la capacité de turbine à vapeur de cycle combiné conventionnel est autre avantage de l'usine intégrée. La simulation prouve que l'énergie électrique de cycle combiné demeure constante. L'énergie électrique solaire de l'usine augmente pour atteindre 24 MW et puis diminue.

Nomenclature

A	Zone d'ouverture de collecteur (m^2)
I_c	Irradiation directe normale au plan de l'ouverture (W/m^2)
DNI	Irradiation normale directe, (W/m^2)
Q_{GT}	La chaleur récupérée par la turbine à gaz (MW)
Q_{ST}	La chaleur produite par la turbine à vapeur (MW)
Q_p	Perte thermique (MW)
Q_r	la chaleur récupérée par le générateur de vapeur (MW)
Q_s	chaleur reçue par le champ solaire cylindro-parabolique (MW)
W_{GT}	L'énergie mécanique produite par la turbine à gaz (MW)
W_{ST}	l'énergie mécanique produite par la turbine à vapeur (MW)
W_C	Puissance du compresseur
W_T	Puissance de la turbine
ε_{HRSG}	l'efficacité du générateur de vapeur à récupération de chaleur
η_{GT}	l'efficacité du cycle de combustion,
η_{ST}	l'efficacité du cycle de vapeur
h	Enthalpie (kJ/kg)

M	Le débit massique (kg/s)
LHV	le pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg)
GT	Turbine à gaz
ST	Turbine à vapeur
HRSG	Générateur de vapeur à récupération de chaleur
HTF	Fluide de transfert de chaleur
ISCCS	Système à cycle combiné solaire intégré
SSG	Générateur de vapeur solaire
Su scripts	
A	Air
G	Gaz
S	Vapeur

R E F E R E N C E S

- [1] *Y. Allan., D. Favrat, M. von Spakovsky*, CO2 mitigation through the use of hybrid solar combined cycles. Third Int. Conf. On Carbon Dioxide Removal Technologies (ICCDR-3), MIT, Cambridge, USA, 1996.
- [2] *G. Cohen, D.W. Kearney, R.G. Gable*, Recent Improvements and Performance Experience at the Kramer Junction SEGS Plants, Symposium: Solar thermischeKraftwerk 11 (VDI), 9 - 12 OCL, Stuttgart, 1995.
- [3] *M. Mtiller, K. Hermecke*. Solare Farmkraftwerke und Dimktverdampfung in ParabolinenKollektoren, ForschungsverbundSonnenergie, pp 57-64, Themen 93/94, 1993.
- [4] , H. Klaiss, F. Stalss, Solar thermischeKraftwerkejar den Mittelmeerraum, Bd. 2, DLR, Springer-Veflag, 1992.
- [5] *T.C .Ktinstle, A.I. ezuo, K. Reiter*, Solar Powered Combined Cycle Plant, Power Gen Europ '94, Cologne, 17-19 Mai, 1994
- [6] *M. Geyer*, Solar PACES, Report on the Solar PACES START Mission to Algeria, September 14-18, 2003.
- [7] *M. Kane, D. Favrat*, Approche de conception et d'optimisation de centrale solaire intégrée à cycle combiné inspirée de la méthode du pincement (partie I: paliers de récupération). Int. J. Therm., Vol 38, 1999, No 6: pp. 501-511.
- [8] *M. Kane, D. Favrat*, Approche de conception et d'optimisation de centrale solaire intégrée à Cycle combiné inspirée de la méthode de pincement (partie II réseaux d'échangeurs de chaleur).Int.J.Therm. Sci., Vol 38, 1999, No 6: pp 501-511.
- [9] Aspen plus, Copyright (c) 1981-2009 by Aspen Technology, Inc.
- [10] *G.E. Cohen, D.W. Kearny, J.K. Gregory*, Final report on the operation and maintenance improvement program for Concentrating solar power plants; 1999, SAND 99-1290.