

## UTILISATION DE L'ENERGIE GEOTHERMALE-SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE EN ALGERIE

A.DJEMAA<sup>1</sup>, A.MERABET<sup>2</sup>, O.KHEMIS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Énergies Renouvelables et Développement Durable, Département de Génie Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine1, Algérie, Djemaaabdelghani@gmail.com.

<sup>2</sup>Laboratoire de Mécanique, Département de Génie Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine1, Algérie, abderrezak\_67@yahoo.fr.

<sup>3</sup>Laboratoire des Énergies Renouvelables et Développement Durable, Département de Génie Mécanique, Université des Frères Mentouri Constantine1, Algérie, jkhemis1@yahoo.fr.

### RÉSUMÉ

Dans le présent travail, une modélisation et une étude paramétrique d'une centrale hybride solaire-géothermique avec une source géothermique à basse température ont été réalisées. Cette centrale utilise de l'eau-ammoniac comme fluide de travail. Nous avons étudié l'influence de quelques paramètres physiques sur la performance de la centrale notamment l'effet de la pression au niveau du séparateur, et l'effet de la concentration d'ammoniac dans le mélange sur la puissance et le rendement de la centrale étudiée. Pour la centrale proposée, la simulation avec l'Aspen plus (HYSYS) a permis de calculer le rendement pour des pressions et des concentrations de l' $\text{NH}_3$  variantes entre (1.7 - 3.5) et (0.15 - 0.25) respectivement, avec un débit et une température de la source géothermique de 100 [kg/s] et 98[°C] respectivement. Les caractéristiques de la nouvelle centrale choisie sont: une puissance net de 4.5 [MW], une pression à l'entrée du séparateur de 2 [bars], et une concentration d'ammoniac de 25%, ainsi que le rapport des chaleurs solaires/géothermales de  $R = 1.7$ , ce qui donne un rendement de 14.5%.

**Mots Clés:** *énergie solaire, géothermale, cycle de Kalina, centrale hybride.*

---

### NOMENCLATURE

#### Symboles :

h Enthalpie, kJ/kg  
s Entropie kJ/kg.°C  
T Température, K  
P Pression, Nm<sup>-2</sup>  
A Surface, m<sup>2</sup>  
 $\dot{W}$  Flux mécanique, kW  
 $\dot{Q}$  Flux thermique, kW  
 $\dot{m}$  Débit massique, kg/s

X Concentration massique d'ammoniac, %

#### Lettres grecques :

$\eta$  rendement

#### Indices / Exposants :

I reinjecte  
p produit  
Sol solaire  
Geo géothermale  
BP,HP Basse et haute pression

---

### 1. INTRODUCTION

L'épuisement des ressources d'énergies fossiles et les impacts de leur utilisation sur l'environnement (par exemple le changement climatique, la destruction ou l'appauvrissement de la couche d'ozone), encouragent fortement la recherche des nouveaux moyens pour produire de l'électricité à base de ressources renouvelables (géothermie, biomasse et solaire). L'Algérie dispose d'un potentiel géothermique non négligeable de type basse énergie. Ce type de ressources est principalement situé au Nord et au Sahara, avec plus de 200 principales sources thermales situées au nord. La température de l'eau varie entre 22 et 98 [°C] [1]. Cette source d'énergie peut être utilisée pour la production d'électricité. Mais le problème majeur de la réalisation d'une centrale de production de l'électricité c'est le rendement faible dû à la basse enthalpie de la source géothermale

disponible, pour remédier à cette situation on a proposé d'ajouter une source plus disponible en Algérie qui est l'énergie solaire pour augmenter le rendement et l'efficacité de la centrale.

Parmi les recherches où les centrales hybrides solaire-géothermique réalisées dans ce domaine. Spécifiquement, **Mathur [2]** a examiné un certain nombre de configurations des centrales hybrides géothermiques solaires basées sur le cycle binaire. **Lentz et al. [3,4]** ont discuté la réalisation d'une centrale hybride solaire-géothermique qui permet d'augmenter la production de la quantité de vapeurs et la puissance de la centrale géothermique en introduisant un champ solaire avec des concentrateurs cylindro-paraboliques. Plus récemment, **Greenhut [5]** a fait un effort significatif en examinant deux conceptions hybrides basées sur l'étude d'une centrale hypothétique et une autre existante. **Todorovic [6] et Todorovic et Licina [7]** ont discuté l'efficacité thermique maximale pour une centrale hybride solaire-géothermique basée sur le cycle de Kalina. Toutes les recherches mentionnées au-dessus ont montré l'intérêt de l'hybridation, bien qu'on n'ait pas évoqué la supériorité de la centrale hybride par rapport à deux centrales séparées. **Zhou et al. [8]** ont étudié une centrale hybride solaire-géothermique basée sur le cycle binaire ORC critique à condensation à air et ils ont discuté les conditions pour lesquels la centrale hybride peut être supérieur par rapport à deux centrales séparées. Autre recherche **[9]** conduit à une analyse compréhensive toujours sur une centrale hybride solaire-géothermique basée sur le cycle critique binaire ORC à condensation à air, qui étudie l'effet de l'emplacement géographique, la température du puits, la surface du champ solaire, et la température ambiante sur la faisabilité de la centrale.

Le but de ce travail prend place dans le cadre du projet d'implantation d'une centrale hybride solaire-géothermique dans le site de la wilaya du Guelma en Algérie qui possède des paramètres géothermaux les plus favorables en terme débit et température. L'objectif est de simuler une centrale produisant quelque mégawatt électrique, basée sur le cycle binaire de Kalina complété par une source d'énergie solaire. Après avoir établi les bilans d'énergie du système, nous effectuons une étude paramétrique de ce dernier et nous analysons particulièrement l'influence de la pression à l'entrée du séparateur et l'effet du pourcentage de la concentration d'ammoniac dans le mélange sur la puissance et le rendement, avec le simulateur Aspen plus (HYSYS).

## 2. DESCRIPTION DE LA CENTRALE HYBRIDE ETUDIEE

Pour la génération de l'électricité à partir d'une source géothermale à basse température, la configuration la plus simple utilisée c'est le cycle de Kalina intégré par un champ solaire avec des concentrateurs cylindro-parabolique. La centrale est composée de deux échangeurs, un séparateur et deux turbines à basse et haute pression, avec trois pompes à eau et une autre solaire, sans disque le fluide de travail est un mélange eau-ammoniac. Le schéma du procédé est présenté en figure 1.

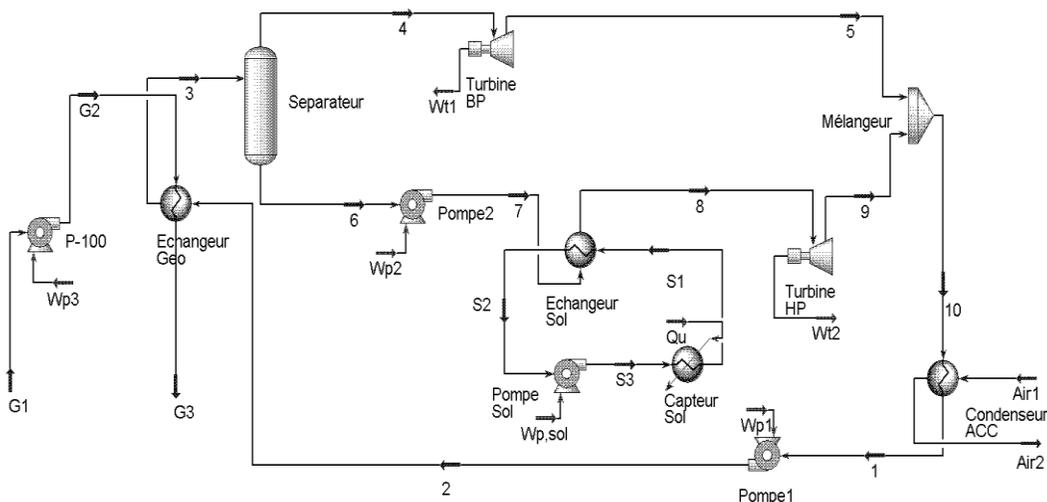


FIGURE 1. Schéma de la centrale hybride thermo-solaire

### 3. MODELE MATHEMATIQUE

Pour la modélisation les hypothèses du modèle mathématique sont :

- Le système fonctionne en régime stationnaire.
- Les variations de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle sont négligeables.
- Les pertes de charge et les pertes de chaleurs dans les conduites sont négligeables.

En général, le bilan de masse et d'enthalpie est obtenu par l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert qui s'écrit sous la forme :

$$\sum \dot{m}_{entrée} = \sum \dot{m}_{sortie} \quad (1)$$

Le bilan de masse pour L'NH<sub>3</sub>

$$\sum_j \dot{m}_{entrée} \cdot X_{entrée} - \sum_j \dot{m}_{sortie} \cdot X_{sortie} = 0 \quad (2)$$

Avec X la fraction ou la concentration massique de L'ammoniac

$$\sum_j \dot{Q}_j - \dot{W} = (\sum_i \dot{m}_i \cdot h_i)_{entrée} - (\sum_i \dot{m}_i \cdot h_i)_{sortie} \quad (3)$$

La chaleur totale reçue par la centrale solaire-géothermique ( $\dot{Q}_{recue}$ ) est la somme de la quantité de chaleur solaire ( $\dot{Q}_{sol}$ ) et géothermale ( $\dot{Q}_{geo}$ ) introduits dans la centrale [10].

$$\dot{Q}_{recue} = \dot{Q}_{geo} + \dot{Q}_{sol} = A_{sol} \cdot DNI \cdot \eta_{optique} \cdot \eta_{thermique} + \dot{m}_{geo} \cdot (h_{geo,P} - h_{geo,I}) \quad (4)$$

DNI : l'ensoleillement direct incident

Le travail net produit par la centrale est égal.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{TurbineHP} + \dot{W}_{TurbineBP} - \dot{W}_{pomp,HP} - \dot{W}_{pomp,BP} - \dot{W}_{pomp,geo} \quad (5)$$

$$\text{Le rendement thermique est donné par la relation } \eta_{thermique} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{recue}} \quad (6)$$

$$\text{Le rapport de chaleur } R = \frac{\dot{Q}_{sol}}{\dot{Q}_{geo}} \quad (7)$$

L'application du bilan d'énergie pour chaque composant de la centrale est détaillé dans le tableau 1.

Composants	Relations énergétiques
Pompe 1	$\dot{W}_{p1} = v_2(h_2 - h_1); \eta_{p1} \frac{h_2 - h_{1s}}{h_2 - h_1}$ (8)
Echangeur Géothermale	$\dot{m}_2(h_3 - h_2) = \dot{m}_{Geo}(h_{G2} - h_{G3})$ (9)
Séparateur	$h_3x_3 = h_4x_4 + h_6x_6$ (10)
Turbine BP	$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_4(h_4 - h_5); \eta_{T1} \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}}$ (11)
Turbine HP	$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_8(h_8 - h_9); \eta_{T1} \frac{h_8 - h_9}{h_8 - h_9}$ (12)
Condenseur ACC	$\dot{Q}_{Con} = \dot{m}_1(h_1 - h_{10})$ (13)
Pompe 2	$\dot{W}_{p2} = v_7(h_7 - h_6)$ (14)
Mélangeur	$h_{10}x_{10} = h_5x_5 + h_9x_9$ (15)
Echangeur Solaire	$\dot{m}_7(h_8 - h_7) = \dot{m}_{Sol}(h_{S1} - h_{S2})$ (16)
Champ Solaire	$\dot{Q}_u = \dot{m}C_{p,sol}(T_{S3} - T_{S1})$ (17)
Pompe Solaire	$\dot{W}_{p,sol} = \dot{m}_{Sol}(h_{S3} - h_{S2})$ (18)

Tableau 1. Equations des bilans d'énergie de chaque composant de la centrale

L'analyse thermodynamique du cycle a été réalisée en utilisant le logiciel Aspen plus (HYSYS). C'est un simulateur très efficace pour l'analyse thermodynamique en particulier à l'état stationnaire.

## 4. RESULTATS

Les différents résultats présentés dans cette étude sont obtenus à partir de la résolution des équations du modèle développé ci-dessus. Nous avons utilisé le logiciel Aspen plus (HYSYS) pour résoudre ces équations. Notre modèle permet d'analyser et d'étudier l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de chaque composant de notre centrale. Pour étudier l'influence d'un paramètre, nous allons varier ce paramètre à partir d'un état de référence et nous maintenons les autres paramètres constants. Les paramètres d'entrées de la simulation de la centrale par Aspen plus (HYSYS) sont listés sur le tableau 2.

Paramètre partie géothermale	valeur	Paramètre partie solaire	valeur
Température ambiante de référence	25 [°C]	DNI	450[W/m <sup>2</sup> ]
Pression ambiante de référence	1.013[bar]	Surface du champ solaire	76760[m <sup>2</sup> ]
Température et débit de la source Géo.	98[°C] ; 100[kg/s]	Fluide solaire (travail)	Therminol, VP-1
Température de réinjection	70 [°C]	Rendement optique	75%
Fluide caloporteur (travail)	Mélange NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	Rendement thermique	75%
Débit massique du fluide Mélange NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	12[kg/s]	Rendement isentropique de la turbine HP	85%
Rendement isentropique de la turbine BP	85%	Rendement isentropique de la pompe 2	80%
Rendement isentropique de la pompe 1	80%	Température Max du fluide solaire	393[°C]
Fraction massique d'ammoniac	25%	Therminol, VP-1	

TABLEAU 2. Paramètres d'entrée de la centrale de référence.

Les résultats numériques de la simulation de la centrale schématisée dans la figure 1, sont mentionnés sur le tableau 3, et pour les paramètres de performance sur tableau 4.

Etat	Fluide	$\dot{m}$ [kg/s]	T [°C]	P [bar]	x%	Qualité	h[kj/kg]	s [kj/kg.C]
G1	H <sub>2</sub> O	100	98	5	-	liquide	15415.26	3.965
G2	H <sub>2</sub> O	100	98.07	10	-	liquide	15415.26	3.965
G3	H <sub>2</sub> O	100	70	5	-	liquide	15612.30	3.965
1	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	12	26	0.9	0.25	0	13071.28	3.5128
2	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	12	26.1	2	0.25	-	13070.86	3.5141
3	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	12	93	2	0.25	0.3563	12119.50	6.2723
4	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	4.203	93	2	0.5730	1	7252.3	10.279
5	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	4.203	71.72	0.9	0.5730	0.9751	7352.62	10.37
6	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	7.871	93	2	0.0712	0	14739.51	4.1155
7	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	7.871	93.8	55	0.0712	-	14731.57	4.1182
8	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	7.871	266	55	0.0712	1	12231.1	9.053
9	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	7.871	93.91	0.9	0.0712	0.8888	12768.23	9.5407
10	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	12	88.38	0.9	0.25	0.9187	10873.01	9.9004
S1	Therminol, VP-1	84.5	393	14	-	-	625.74	0.9494
S2	Therminol, VP-1	84.5	293	10	-	-	394.67	0.5746
S3	Therminol, VP-1	84.5	293.1	17	-	-	396.01	0.5752
Air1	Air	4441	20	1	-	-	6.65	4.0691
Air2	Air	4441	26	1	-	-	0.71	4.0892

TABLEAU 3. Résultats de la simulation

Terme	valeur	unité	Terme	valeur	unité
Turbine BP à vapeur riche d'NH <sub>3</sub>	417.7	[kW]	Travail net	4372	[kW]
Turbine HP à vapeur pauvre d'NH <sub>3</sub>	4198	[kW]	Quantité de chaleur géothermale	11440	[kW]
Pompe2 à haute pression	60,65	[kW]	Quantité de chaleur solaire	19430	[kW]
Pompe1 à basse pression	2	[kW]	Rendement thermique	14,5	%
Pompe géothermale	70,19	[kW]	Le rapport R	1,7	
Pompe solaire	110,6	[kW]			

TABLEAU 4. Paramètres de performance

4.1. EFFET DE LA PRESSION DU SEPARATEUR SUR LA PERFORMANCE DE LA CENTRALE

La figure 2 (a) représente l'évolution conjointe de la puissance et de la chaleur reçue par la centrale en fonction de la pression à l'entrée du séparateur les valeurs prises entre 1.7 et 3.5 [bar], l'augmentation de la pression du séparateur suivi par une évolution de la puissance entre 3.3 et 9.2 [MW]. Pour une concentration de l'NH<sub>3</sub> fixée à 25% et une température d'évaporation constante à 98[°C], même si la fraction de vapeur diminue, la chute d'enthalpie augmente à travers la turbine BP. Donc la puissance produite augmente, par contre la puissance  $\dot{W}_{12}$  de la turbine à haute pression augmente suite à l'augmentation de la partie liquide dans le séparateur, cette augmentation est accompagnée par un plus d'énergie solaire pour évaporer le surplus du liquide.

En outre, la figure 2.(b) montre qu'il ya une réciprocité entre la variation de la pression à l'entrée du séparateur et la variation du rapport des chaleurs R et du rendement, comme mentionné précédemment, l'augmentation de la chaleur du champ solaire entraîne une augmentation du rapport R entre 1.2 et 3.44 parce que la quantité d'énergie géothermale reste inchangée, par contre l'augmentation du rendement de 0.13% à 0.18% et dû principalement à l'augmentation considérable du travail net par rapport à la quantité de chaleur reçue par la centrale.

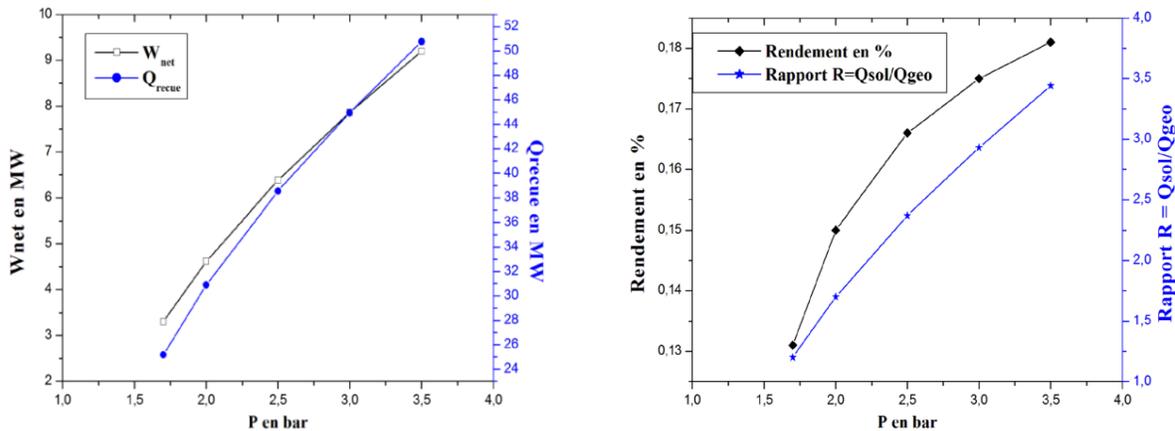


FIGURE 2. Effet de la pression du séparateur à température constante (a) sur le  $\dot{W}_{net}$  et la Chaleur  $\dot{Q}_{recue}$ , (b) sur le rapport R et le rendement de la centrale.

4.2. EFFET DE LA CONCENTRATION D'AMMONIAC SUR LA PERFORMANCE DE LA CENTRALE

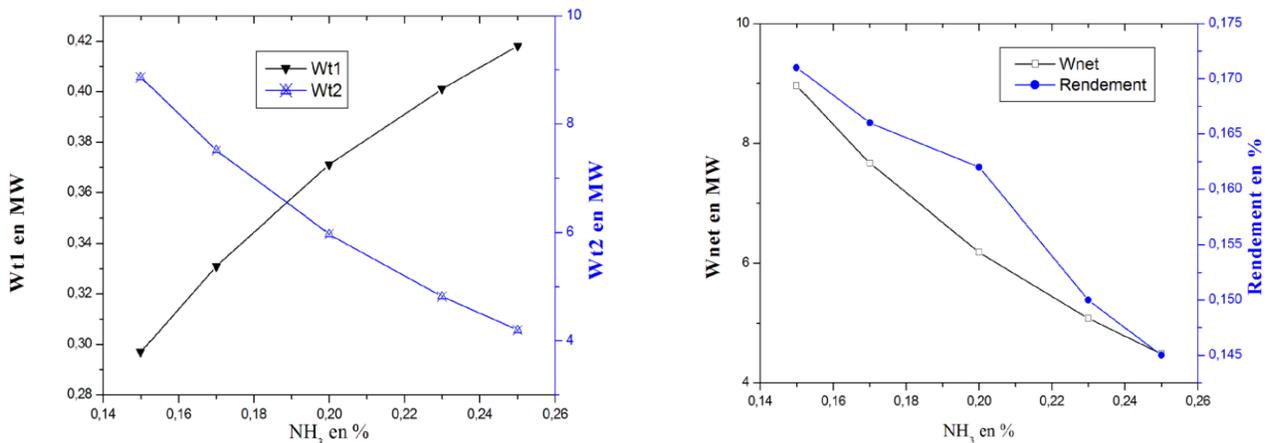


FIGURE 3. Effet de la concentration d'ammoniac à pression constante (a) sur la puissance de la turbine BP et HP, (b) sur  $\dot{W}_{net}$  et le rendement de la centrale.

Dans la figure 3(a). On remarque pour des valeurs entre 15% et 25% de la concentration du l'NH<sub>3</sub>, plus on augmente la concentration de l'NH<sub>3</sub>, plus la puissance  $\dot{W}_{t1}$  de la turbine BP augmente par contre la puissance  $\dot{W}_{t2}$  de la turbine HP diminue, pour une pression et une température fixe du séparateur, la fraction vapeur

augmente donc la quantité évaporée du mélange riche d' $\text{NH}_3$  qui traverse la turbine BP augmente ce qui permettra ainsi une augmentation de la puissance  $\dot{W}_{t1}$ . L'inverse ce produit pour la turbine HP où la quantité en  $\text{NH}_3$  diminue donc moins de puissances  $\dot{W}_{t2}$  et d'énergie solaire dépensé.

Pour la figure 3(b). On voit bien qu'il y a diminution simultanée des deux courbes du travail net ( $\dot{W}_{\text{net}}$ ) produit et du rendement, le travail net diminue suite à la diminution du travail  $\dot{W}_{t2}$  puisque ce dernier constitue la majorité par rapport au travail  $\dot{W}_{t1}$  qui augmente. Par contre la diminution du rendement de 17% à 14%, suite à la diminution significative du travail par rapport à la diminution de la chaleur reçue.

## 5. CONCLUSION

Basé sur le logiciel Aspen plus (HYSYS), l'effet de quelques paramètres sur la performance de la centrale hybride solaire-géothermale basée sur le cycle binaire de Kalina a été étudié. Le fluide de travail est un mélange eau-ammoniac avec un débit massique de 12[kg/s] chauffé en premier lieu par une source géothermale de température 98[°C] (température du site choisie pour l'étude) à basse pression, après la partie liquide non évaporée va être chauffé par un champ solaire avec des concentrateurs cylindro-paraboliques. Une analyse systématique a été faite pour déterminer les performances de la centrale en faisant varier la pression au niveau du séparateur ainsi que la concentration massique d'ammoniac. La puissance et le rendement augmentent en parallèle avec l'augmentation de la pression dans le séparateur, par contre, le rapport R augmente considérablement ce qui est défavorable pour notre centrale. Mais pour des concentrations plus élevées, les trois critères: puissance, rendement, et rapport R diminuent.

Pour les deux paramètres étudiés précédemment à savoir la pression à l'entrée du séparateur et la concentration d' $\text{NH}_3$ , on adopte pour notre centrale une pression de 2[bars] et une concentration de 25% afin d'avoir un rapport R = 1.7 recherché. Ce qui nous donnera une centrale de référence d'une puissance optimale de 4.5 [MW] et un rendement critique de 14.5%.

## REFERENCES

- [1] [F.Z. Kedaïd et al., 'Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie au 1/1000.000', Rapport Interne, CDER, p.35, 1988.
- [2] Mathur PN. Assessment of solar-geothermal hybrid system concepts. 1979.p. Medium: ED;Size:Pages:47.
- [3] Lentz A, Almanza R. Parabolic troughs to increase the geothermal wells flow enthalpy. Sol Energy2006; 80:1290-5.
- [4] Lentz A,Almanza R.Solar-geothermal hybrid system. Appl Thermal Eng 2006; 26:1537-44.
- [5] Greenhut AD. Modeling and analysis of hybrid geothermal-solarthermal energy conversion systems.USA: Massachusetts Institute of Technology Dept of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; 2010.
- [6] Todorovic MS. Successful composition of the geo co-and tri-generation projects .In: Proceedings of the international conference on national development of geothermal energy use, Slovakia; 2009
- [7] Todorovic MS, Licina DZ. Parametric analysis and thermodynamic limits of solar assisted geothermal co-and tri-generation systems.ASHRAE Trans 2011; 117:22.
- [8] Zhou C,Doroodchi E,Moghtaderi B.Figure of merit analysis of a hybrid solar- geothermal power plant .Engineering 2013; 5:26.
- [9] Zhou C,Doroodchi E,Moghtaderi B. An in-depth assessment of hybrid solar- geothermal power generation. Energy Convers Manage 2013; 74:81-101.
- [10] Boghossian JG. Dual-temperature Kalina cycle for geothermal-solar hybrid power systems. USA: Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology; 2011.