

# Performances d'une centrale à concentrateur de Fresnel de moyenne puissance sur sites Algériens

H. Beltagy<sup>a</sup>, D. Semmar<sup>a</sup>, et N. Said<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institut de Mécanique, Université Saad Dahleb de Blida, B.P, 270, Blida

<sup>b</sup>Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P, 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

---

## Résumé

L'objectif du présent travail est de caractériser une centrale à concentrateur de Fresnel de moyenne puissance (5MWe) sur différents sites Algériens (Sahara), ces sites ont été choisis pour comparaison en déplaçant la centrale dans ces derniers, à savoir Hassi-R'mel, Tamanrasset, Béni-Abbes, et El Oued.

Une modélisation théorique a permis la détermination du nombre optimum des miroirs à ne pas dépasser pour éviter les effets d'ombre, blocage et l'effet cosinus. Le nombre optimum de miroirs a été estimé à 40 miroirs. Par ailleurs, une simulation a été réalisée à l'échelle horaire : elle concerne l'ensoleillement, le système 'champ', et le système 'récepteur'. Les résultats de la simulation sont représentés en moyenne annuels. Les rendements, la production énergétique annuelle, et le coût du kWh sont évalués. En effet, le calcul du rendement diffère d'un site à un autre avec des valeurs de 15.7%, 11.8%, 11.6%, et 10.4% respectivement pour les sites Tamanrasset, El Oued, Béni-Abbes, Hassi R'mel. Les performances thermiques et les résultats technico-économiques sont évalués aussi pour ces mêmes sites.

**Mots clés :** Énergie solaire, concentrateur solaire à miroirs de Fresnel, les centrales solaires thermiques, performance, les centrales thermoélectriques.

---

## 1. Introduction

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant aisément dépasser les 500 °C et le rendement de conversion est élevé généralement. On exploite seulement le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale.

Notre objectif principal, dans ce travail est de faire une modélisation théorique d'une centrale solaire à concentrateur de Fresnel, d'une façon à pouvoir la simuler dans différents sites Algériens pour l'adapter aux conditions climatiques de l'Algérie. Cette simulation va nous permettre de comparer la productibilité annuelle de la centrale dans les différents sites choisis et évaluer le cout du kWh produit (L.E.C) pour chaque situation ; HassiR'mel pour le centre, Béni-Abbes pour l'ouest, El oued pour l'est, et Tamanrasset pour le sud.

## 2. Modélisation théorique

Pour bien détailler la théorie de conception du concentrateur de Fresnel, nous avons utilisé les travaux réalisés par [1,2], qui ont développé des équations en considérant certaines hypothèses essentielles pour déterminer l'énergie solaire concentrée.

La figure 1 montre le schéma de principe en coupe linéaire d'un capteur de Fresnel avec un système réflecteur et absorbeur de forme cavité, dont la largeur ( $w$ ) est constante pour chaque miroir. L'inclinaison de chaque miroir a été calculée de telle sorte que le rayonnement solaire soit incident sur le plan d'ouverture. D'autre part, une distance appropriée a été maintenue entre deux miroirs consécutifs pour que chaque miroir ne fasse pas d'ombre par rapport au miroir adjacent [3,4].

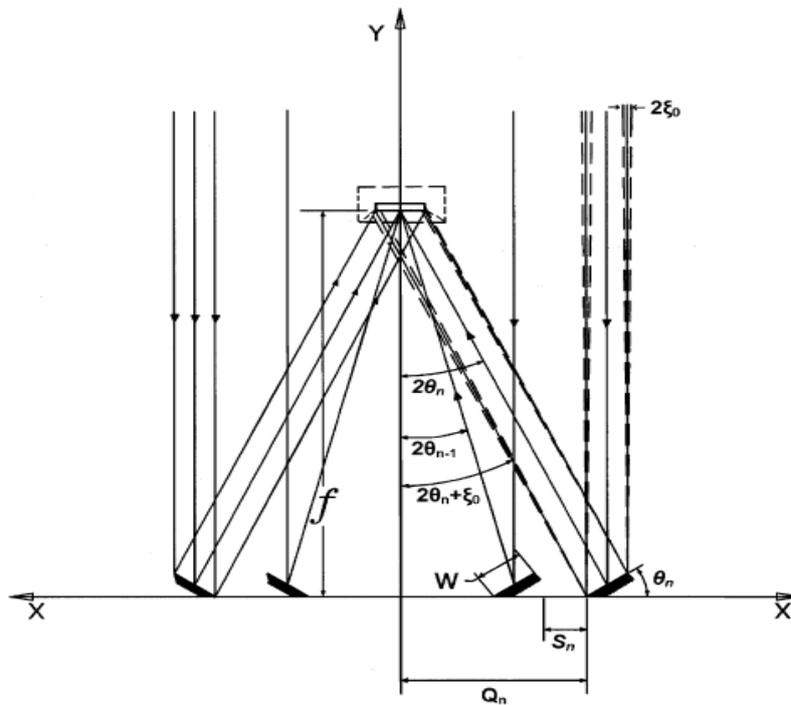


Figure 1. Concentrateur solaire de Fresnel. [3,4].

### 2.1. Les paramètres d'un miroir

Chaque miroir est caractérisé par trois paramètres qui sont :

- La position ( $Q_n$ ).
- L'angle d'inclinaison ( $\theta_n$ ).
- Le décalage ( $S_n$ ).

Les expressions suivantes ont été utilisées pour obtenir ces paramètres en utilisant de simples relations d'optiques géométriques [3].

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{Q_n + \left(\frac{W}{2}\right) \cos(\theta_n - 1)}{f + \left(\frac{W}{2}\right) \sin(\theta_n - 1)} \right] \quad (1)$$

$$S_n = W \sin \theta_{n-1} \tan(2\theta_n + \zeta_0) \quad (2)$$

$$Q_n = Q_{n-1} + W \cos \theta_{n-1} + S_n \quad (3)$$

$$CR = 2 \sum_{n=1}^{n=m} Cl_n \quad (4)$$

$$Cl_n = \frac{w \cos \theta_n}{U_n + D_n + l_n} \quad (5)$$

Où :  $U_n$ ,  $D_n$  et  $l_n$  sont les valeurs des rayons solaires réfléchis sur l'absorbeur et calculés par les expressions suivantes [3].

$$U_n = \frac{(f - W \sin \theta_n) \cdot \sec 2\theta \cdot \sin \zeta_0}{\cos(2\theta_n - \zeta_0)} \quad (6)$$

$$D_n = W \cos \theta_n \cdot \sec 2\theta \quad (7)$$

$$l_n = \frac{f \cdot \sec 2\theta \cdot \sin \zeta}{\cos 2\theta_0 + \zeta_0} \quad (8)$$

Avec :

$W$  est la largeur des miroirs.

$f$  est la distance focale.

D'où :

$W$  est la largeur de chaque miroirs plan,  $W = 100mm$ .

$\zeta_0$  est la moitié de la distance angulaire du soleil en un point quelconque sur terre. ( $\zeta_0 = 16' = 0.26^\circ$ ) [3].

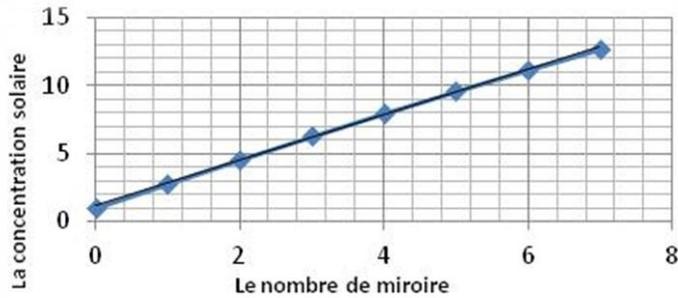
$f = 1300mm$  est la distance focale.

Les conditions initiales sont les suivantes :  $\theta_0 = 0$ ,  $S_0 = 0$ ,  $Q_0 = -W/2$ ,  $Q_1 = W/2$ .

Pour positionner les miroirs dans la structure du concentrateur de Fresnel, il faut résoudre les équations (1, 2 et 3) et calculer les différents paramètres comme la position (Q), l'inclinaison ( $\theta$ ), et la distance entre les miroirs (S) du miroir primaire centrale jusqu'au dernier miroir.

Dans notre étude nous avons retenu 15 miroirs réflecteurs (le miroir centrale primaire +7 miroirs à droite et 7 à gauche).

Après résolution des équations (1, 2, et 3), et le calcul de la concentration solaire total en résolu l'équation (4) nous avons obtenu les résultats suivants :



**Figure 2.** La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur solaire de Fresnel pour  $n=7$

D’après la figure 2, on remarque que si on augmente le nombre de miroirs (surface collectrice) la concentration solaire augmente, donc la concentration solaire est proportionnelle aux nombres de miroirs, et cela est dû à la grande quantité de rayonnement solaire capté par les collecteurs.

D’une part la concentration solaire totale est la somme de toutes les concentrations solaires élémentaires de chaque miroir.

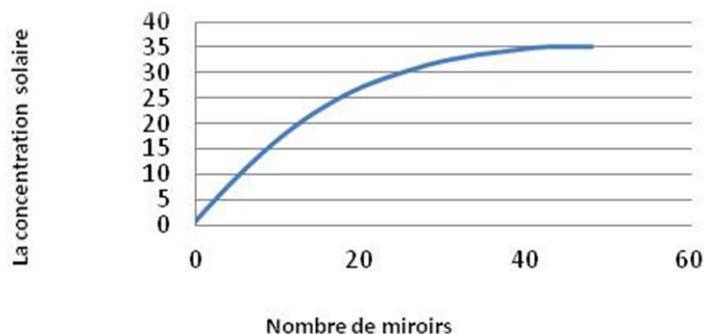
## 2.2. Calcul d’optimisation

Pour optimiser notre centrale et pour obtenir le nombre optimum de miroirs, nous proposons d’augmenter le nombre de miroir jusqu’à observation d’une stabilité de la concentration ou une diminution de cette dernière.

Alors à l’aide des équations (4) et (8) nous pouvons estimer la concentration (CR) du collecteur de Fresnel pour différents jeux des miroirs réfléchissants.

Les résultats trouvés sont illustrés dans la figure 3 qui montre la variation de la concentration solaire en fonction de nombre de miroirs.

Nous avons arrêté les calculs une fois avoir observé une stabilité de la concentration ou la diminution de cette dernière.



**Figure 3.** La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur de Fresnel  $n=48$

On remarque que si on augmente le nombre de miroirs (surface collectrice) la concentration solaire augmente, mais à un certain nombre de miroir appelé nombre optimum qui apparaît dans la figure 3, qui est estimé à 40 miroirs réflecteurs, la concentration solaire ne varie plus, c’est-à-dire qu’après cela le reste des miroirs qui ne contribuent plus dans la concentration.

### 3. Description de la centrale

La centrale étudiée est une centrale à concentrateurs de Fresnel de 5 MWe, elle est du type de la centrale Allemande Novatec solaire installée au site de Calasparra en Espagne. [5]

Toutes les caractéristiques de la centrale étudiée sont représentées dans le tableau suivant [5] :

**Tableau 1.** Caractéristiques de la centrale étudiée

Champ de miroir	Taille du champ solaire	21571m <sup>2</sup>
	Longueur du champ solaire	806m
	Surface net d'ouverture	18489m <sup>2</sup>
	La largeur du champ	16.56m <sup>2</sup>
	Surface du réflecteur	513.6m <sup>2</sup>
	La longueur du module	44.8m <sup>2</sup>
	La longueur du réflecteur	0.75m
Le récepteur	Diamètre du tube	0.07m
	Diamètre du récepteur	0.07m
	Diamètre du récepteur	0.6m
	Longueur entre le réflecteur et l'absorbeur	7m
Le bloc de puissance	Rendement du bloc	35%
	Température d'entrée	140°C
	Température de sortie	270°C
	Puissance à la sortie de la génératrice	5MWe

### 4. Résultats de la simulation

#### 4.1. Analyse thermique

A l'aide du logiciel SAM [6], nous avons déterminé les différentes caractéristiques de la centrale, les différents résultats sont présentés sous forme de graphes et à une échelle horaire (heure par heure), et cela pour les quatre sites considérés. Nous avons présenté en premier lieu les profils annuels des différentes puissances (la puissance incidente au champ solaire, la puissance incidente au récepteur et la puissance des pertes thermiques dans le récepteur), et en deuxième lieu nous avons présenté les différents rendement de la centrale (rendement optique, rendement thermique du récepteur, le rendement global solaire représente le rendement avant la conversion donc avant le bloc de puissance, également le rendement du bloc de puissance, et à la fin le produit du rendement global solaire et celui du bloc de puissance donne le rendement global de la centrale). Les profils présentés montrent la moyenne annuelle du paramètre considéré.

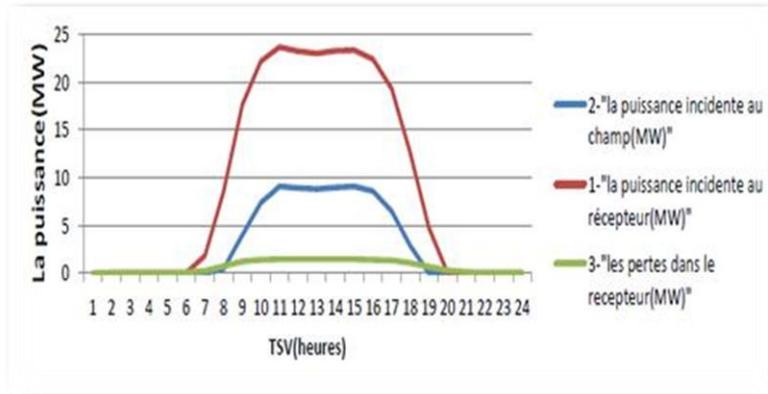


Figure 4. Les différentes puissances pour le site de HassiR'mel

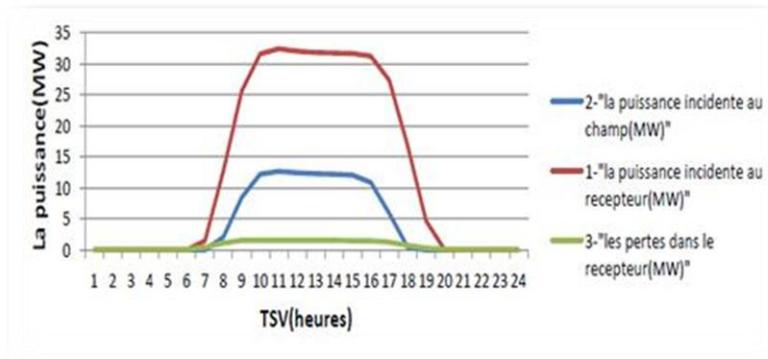


Figure 5. Les différentes puissances pour le site de Tamanrasset

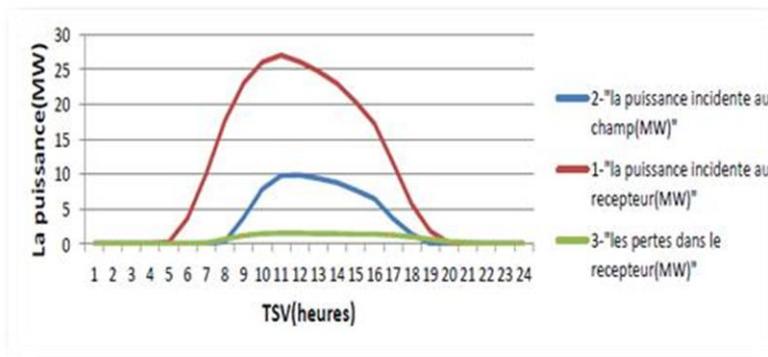


Figure 6. Les différentes puissances pour le site de Béni-Abbes

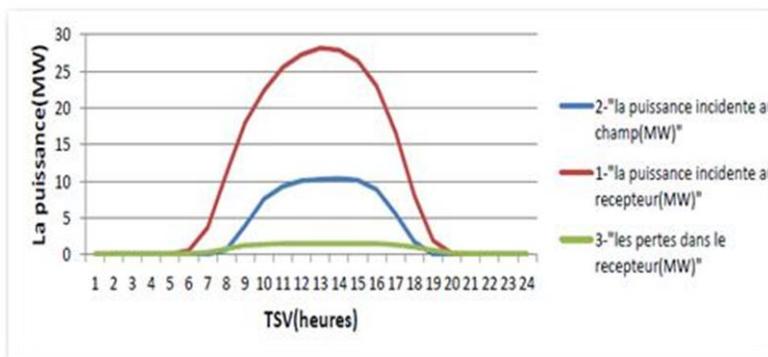


Figure 7. Les différentes puissances pour le site d'EL Oued

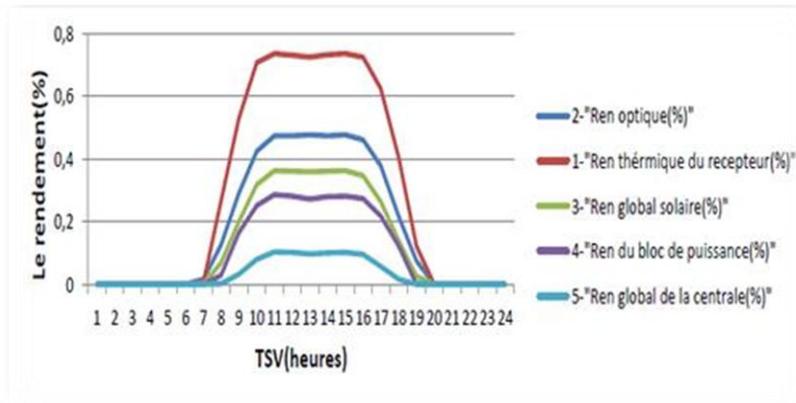


Figure 8. Les différents rendements pour le site de Hassi R'mel

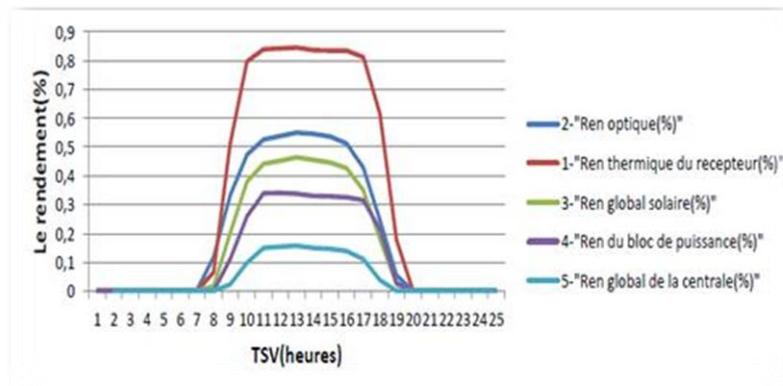


Figure 9. Les différents rendements pour le site de Tamanrasset

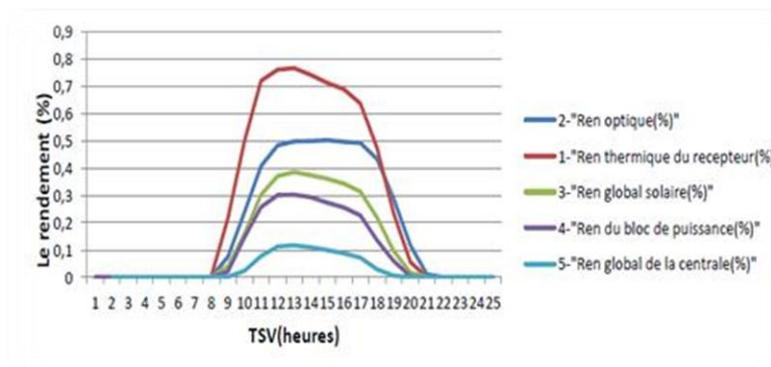


Figure 10. Les différents rendements pour le site de Béni-Abbes

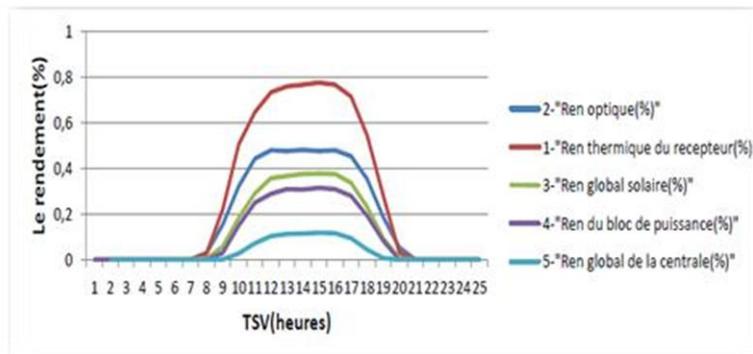


Figure 11. Les différents rendements pour le site d'El Oued

## 4.2. Analyse économique

Dans cette partie nous avons représenté les résultats de l'analyse économique de la simulation. Cette dernière nous a permis d'avoir : l'énergie annuelle produite ainsi que le coût actualisé de l'électricité pour chaque site.

## 4.3. Evaluation du coût actualisé de l'électricité

Le coût actualisé de l'électricité, Levelized electricity cost 'L.E.C', est l'indicateur principal pour l'analyse économique des systèmes à concentration solaire, il représente la valeur actualisée des coûts convertis en un courant de paiements annuels égaux, et divisés par la production électrique annuelle.

## 4.4. Résultats de l'analyse économique

Les résultats de l'analyse financière regroupent : l'énergie annuelle produite par an, le LEC en DA/kWh, l'irradiation directe annuelle, le chiffre d'affaire pour 4 DA le kWh et le chiffre d'affaire pour le kWh vendu à 12 DA (trois fois le coût du kWh en appliquant le décret du ministère de l'énergie relatif au tarif d'achat) [7]. On présente aussi le gain par rapport à un site de référence (le site le moins bon), pour les deux coûts de 4 et 12DA, et enfin nous représenterons le nombre d'années de fonctionnement pour rentabiliser la centrale pour chaque site, c'est-à-dire le nombre d'années pour que la centrale récupère son investissement.

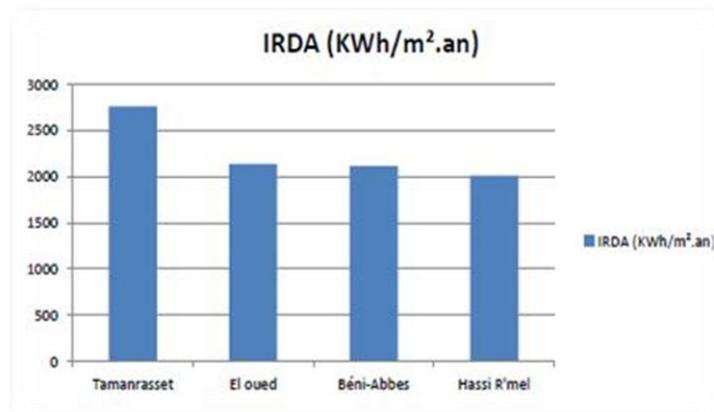


Figure 12. L'irradiation annuelle directe pour les quatre sites

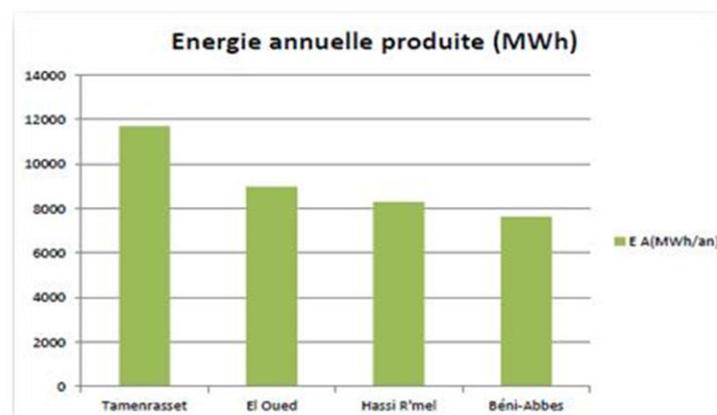
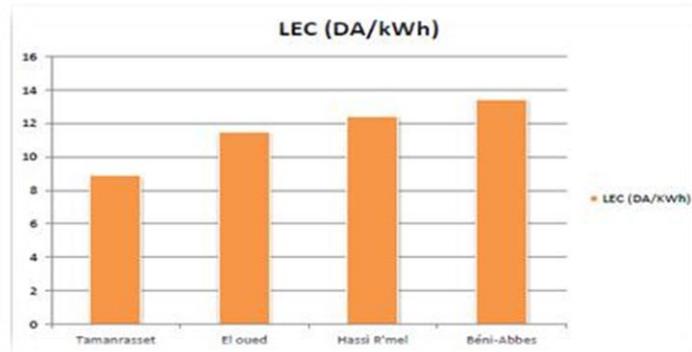
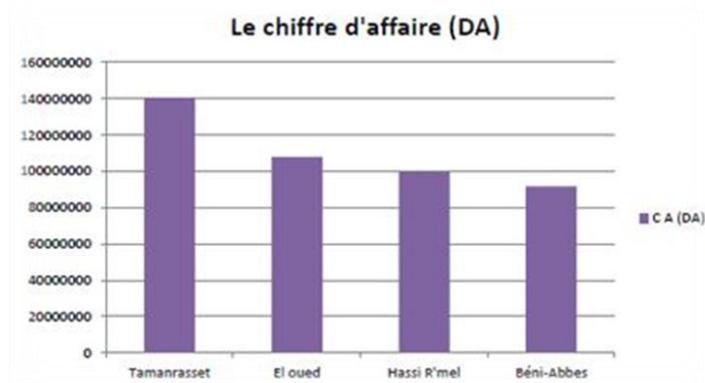


Figure 13. L'énergie annuelle produite pour les quatre sites



**Figure 14.** Le LEC (le cout actualise du KWh) pour les quatre sites



**Figure 15.** Le chiffre d'affaire pour les quatre sites

Tous les résultats de l'analyse économiques sont regroupés dans le tableau II ci-dessous :

**Tableau 2.** Caractéristiques de la centrale étudiée

Les sites retenus	Hassi R'mel	Tamanrasset	Béni-abbés	El Oued
Irradiations annuelles (KWh/m <sup>2</sup> .an)	2008,4	2759,4	2114	2137
Energie annuelle produite (MWh)	8280	11704	7631	8981
Le LEC (DA/KWh)	12,42	8,86	13,45	11,47
Chiffre d'affaire pour 4DA le KWh	33.121.300	46.816.608	30.526.400	35.926.780
Chiffre d'affaire pour 12DA le KWh	99.363.900	140.449.824	91.579.200	107.780.340
Le gain pour 4DA le KWh	2.594.900	16.290.208	0	5.400.380
Le gain pour 12 DA le KWh	7.784.700	48.870.624	0	16.201.140
Le gain en pourcentage	7.83%	34.7%	0	15%
Nbre d'année de rentabilité (4DA)	38 ans	27ans	42 ans	35 ans
Nbre d'année de rentabilité (12DA)	13 ans	9 ans	14 ans	12 ans

## 5. Conclusion

L'étude que nous avons réalisée sur les centrales solaires à concentrateur linéaire de Fresnel nous a permis de connaître le fonctionnement de ce type de centrale, ainsi que les paramètres qui influent sur son fonctionnement.

A un certain nombre de miroir la concentration solaire ne varie plus proportionnellement, il y aura certainement des miroirs qui ne contribuent pas dans la concentration, et cela est dû principalement à l'effet d'ombre entre les miroirs, l'effet cosinus et aussi au système de poursuite (la poursuite n'est pas intégrale).

La valeur optimale des miroirs qu'on ne doit pas dépasser est de 40 miroirs réflecteurs (20 miroirs dans le demi-plan droit et 20 dans le demi-plan gauche).

Donc notre centrale contient un nombre optimum de 41 miroirs (le miroir centrale primaire +20 miroirs dans le demi-plan droit et 20 dans le demi-plan gauche).

Nous avons constaté également que les effets de blocage, d'ombrage entre les miroirs et l'effet cosinus représentent un grand obstacle pour une bonne rentabilité et la productibilité de la centrale.

D'après l'étude effectuée, nous avons pu constater l'importance du bon choix du site de la centrale, car chaque site est caractérisé par son éclairage direct, la température ambiante, la vitesse du vent, la latitude, l'élévation par rapport au niveau de la mer et bien d'autres facteurs qui jouent un rôle significatif sur la rentabilité et la productibilité de la centrale, et cela est bien apparent dans les résultats obtenus où la production énergétique et le cout du kWh, varient lorsqu'on déplace la centrale dans les différents sites.

D'après les résultats obtenus à partir des bilans énergétiques établis en moyenne annuelle à l'échelle horaire, pour les différentes caractéristiques de la centrale, et l'étude technico-économique pour évaluer le coût du kWh pour les quatre sites choisis, on peut constater que l'Algérie a de très grandes opportunités d'opter pour l'installation des centrales solaires à concentrateur de Fresnel. Enfin, pour les sites étudiés, le meilleur site à choisir pour installer une centrale de ce type sera le site de Tamanrasset suivi d'El oued, de Hassi R'mel, et enfin celui de Béni –Abbes.

## 6. Références

- [1] Negi B S, Mathur S S, et Kandpal T C. 1989 "Optical and thermal performance evaluation of linear Fresnel reflector solar concentrator". Solar and Wind Technology, Volume 6, page 589-593
- [2] Bliss R et Whillier. 1959 "The derivation of several, plate efficiency factors, useful in the design of the flat plat solar heat collector". Solar Energy. Vol 4. Pages 55-64
- [3] Panna L S, Sarvia R M et Bhagoria J L 2009. "Thermal perofance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers". Applied Energy, Volum 87, Pages 541-550
- [4] S. Flores Larsen, M. Altamirano, A. Hernández 2011 "Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator", Volum 39, Pages 198 -206
- [5] Site web [http //www.Novatec.solaire.com](http://www.Novatec.solaire.com). Consulté en Juin 2012
- [6] Site web [http //www.Nrel.Gov/Analysis/Sam](http://www.Nrel.Gov/Analysis/Sam). Consulté en Juin 2012
- [7] Décret exécutif n° 04-92 du 4 Safar 1425 correspondant au 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité. Ministère de l'énergie et des mines, mars 2004