

Optimisation de la conception d'un concentrateur solaire linéique à miroirs de Fresnel

François VEYNANDT^{1*}, Jérémie DE LA TORRE¹, Jean-Jacques BEZIAN¹, Abhik GHATUARY²

¹Laboratoire RAPSODEE, Ecole des Mines d'Albi, Campus Jarlard – 81000 ALBI

²IIT Kharagpur, Kharagpur, West Bengal, India

*(auteur correspondant : veynandt@mines-albi.fr)

Résumé - La concentration solaire est une des voies les plus prometteuses pour la production d'électricité par énergies renouvelables. Nous développons un outil de conception spécifique pour les systèmes concentrateurs à miroirs linéaires de Fresnel. Tout le procédé est simulé : optique, thermique et thermodynamique. Les caractéristiques de l'optique peuvent ainsi être précisées. Nous montrons également que, pour une optique et un cycle thermodynamique donnés, il est possible de concevoir un récepteur qui offre l'efficacité énergétique optimale.

1.Introduction

A l'horizon 2020, il se construira plus de 12 GW de centrales solaires thermodynamiques par an, si on en croit le scénario modéré du rapport global publié en 2009 par SolarPACES, ESTELA et GreenPeace [1].

A l'heure actuelle, la plupart des centrales solaires en chantier sont basées sur des collecteurs à miroirs cylindro-paraboliques (figure 1). Un des concurrents innovants à fort potentiel est basé sur des concentrateurs à miroirs linéaires de Fresnel (figure 2). C'est cette technologie que nous étudions ici. Ce procédé s'applique à une large gamme de puissances, du kW au GW. Il est plus simple et plus robuste que le procédé basé sur l'utilisation de capteurs cylindro-paraboliques, ce qui permet des coûts réduits. Le terrain est aussi mieux mis en valeur grâce à une implantation plus compacte, malgré une efficacité optique plus faible [2].



Figure 1 : Collecteur à miroirs cylindro-paraboliques



Figure 2 : Collecteur à miroirs linéaires de Fresnel (source : Fraunhofer)

On appelle ici 'Concentrateur' le Système complet : (i) l'optique qui collecte l'énergie solaire, (ii) le récepteur qui transmet l'énergie thermique à un fluide caloporteur et (iii) le cycle thermodynamique qui produit l'énergie mécanique, transformée en électricité.

Le composant crucial de ces systèmes est le récepteur linéaire. Les solutions actuellement proposées sont dérivées des récepteurs pour les capteurs cylindro-paraboliques (tube sous vide), ou d'adaptation de solutions pour des capteurs sans concentration (tubes ailetés, CPC).

Il nous a semblé intéressant de développer un outil de conception spécifique pour ce type de récepteur, basé sur l'adaptation de simulateurs performants déjà développés au laboratoire.

Pour cela, nous développons un outil de simulation des transferts radiatifs (méthodes intégrales de Monte-Carlo), un code de résolution de la partie thermique (système d'équations algèbro-différentielles) et un outil de calculs de thermodynamique (logiciel Thermoptim).

Les principaux paramètres sont liés à la géométrie de l'optique (primaire et éventuellement secondaire), à la conception du récepteur (géométrie des écoulements, caractéristiques des matériaux) et au choix du cycle thermodynamique. A titre d'exemple, nous étudions dans la suite l'influence de l'orientation de l'optique, suivant la latitude. Nous présentons ensuite comment la conception du récepteur est influencée par le cycle thermodynamique.

2. Concentrateur optique

2.1. Présentation du modèle

2.1.1. Outil logiciel

Le modèle utilisé met en oeuvre une nouvelle méthode, basée sur des outils statistiques développés au sein de notre laboratoire. L'Equation des Transferts Radiatifs (ETR) est résolue par une méthode intégrale statistique de Monte-Carlo. L'approche intégrale permet de calculer rapidement la sensibilité de la solution aux paramètres. Le surcoût du calcul est très faible. Tous les paramètres, même géométriques, peuvent être ainsi étudiés [3].

Pour accélérer les temps de calcul, nous avons intégré nos algorithmes à une bibliothèque logicielle d'outils de synthèse d'images[4]. La géométrie complexe d'un collecteur à miroirs de Fresnel peut ainsi être étudiée.

Les détails du modèle ont fait l'objet d'une communication au congrès SFT 2009 [5].

2.1.2. Géométrie de l'optique à miroirs linéaires de Fresnel

Les calculs sont effectués sur un mètre de longueur du collecteur. Les axes des miroirs sont horizontaux et parallèles, espacés de 1m. Le collecteur est constitué de 19 miroirs de 0,5m de large. Les miroirs sont considérés parfaits, avec une réflexion spéculaire de 100%. Ils sont légèrement paraboliques, avec une distance focale ajustée en fonction de leur distance au récepteur. Le système de suivi oriente les miroirs de sorte à toujours réfléchir la lumière du soleil sur le récepteur linéaire. Ce dernier est centré, parallèle aux axes des miroirs et placé à 5 mètres au dessus des miroirs. Il mesure 20 cm de large et on mesure sur 1,2 mètres de longueur. Le soleil est représenté par le modèle PillBox, avec 1000W/m² de puissance totale.

On obtient des cartes de flux, comme par exemple sur la figure 3, qui montre la puissance sur le récepteur à 12h l'équinoxe, sous 35° de latitude Nord.

2.2. Influence de la latitude sur l'orientation optimale du système

Ce modèle nous a permis de mettre en évidence la sensibilité de l'optique à ses principaux paramètres. Les résultats sur la latitude sont présentés.

2.2.1. Analyse des résultats de l'effet de la latitude

Les figures 4 à 7 présentent l'allure du flux disponible sur le récepteur pour quatre latitudes : 20°N, 35°N, 50°N et 65°N. Pour chaque orientation Nord-Sud (NS) ou Est-Ouest (EW), on peut comparer trois courbes : le solstice d'hiver (pointillés), l'équinoxe (tirets) et le solstice d'été (trait plein). La légende des courbes est donnée sur la figure 4-5.

La figure 8 synthétise les résultats en évaluant l'énergie annuellement disponible en fonction de la latitude. Les deux courbes correspondent aux deux orientations : NS (trait épais) et EW (trait fin).

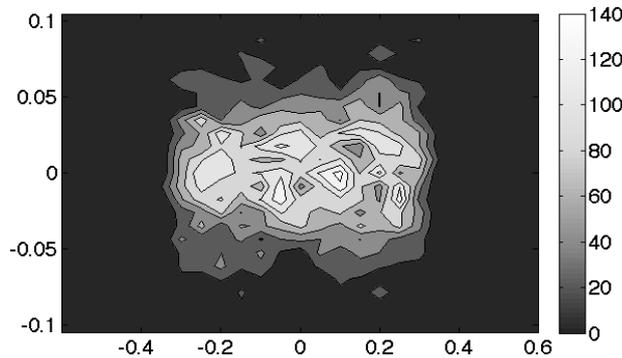


Figure 3 : Exemple de carte de flux (en kW) sur le récepteur (en mètres)

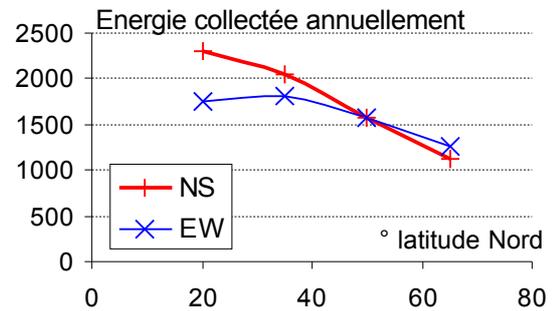


Figure 8 : Performances annuelles du collecteur en fonction de la latitude, suivant l'orientation

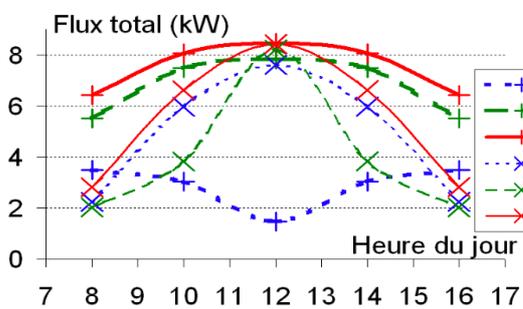


Figure 4 : Flux sur le récepteur à 20°N

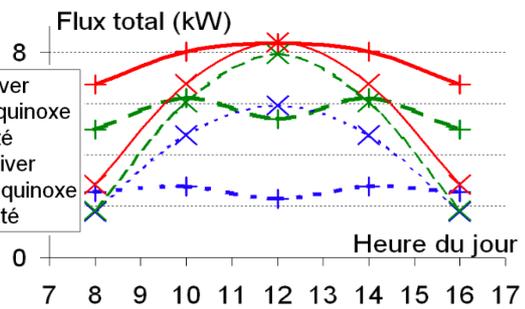


Figure 5 : Flux sur le récepteur à 35°N

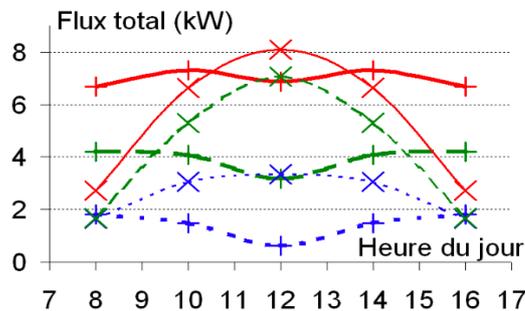


Figure 6 : Flux sur le récepteur à 50°N

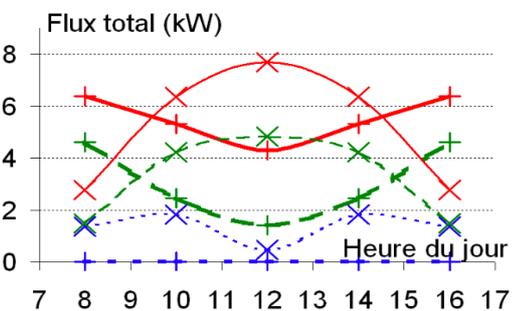


Figure 7 : Flux sur le récepteur à 65°N

Le flux récupéré par l'orientation Est-Ouest (EW) est plus sensible à l'heure du jour qu'avec l'orientation Nord-Sud (NS). L'orientation NS permet une collecte d'énergie plus constante au cours de la journée. Le résultat surprenant d'un flux plus faible à midi en NS s'explique par un décalage (parfois plus de 10 m) et un éparpillement dans la longueur dus à l'inclinaison du soleil par rapport à l'axe des miroirs. Comme les miroirs n'ont que 1 m de longueur, même en déplaçant le récepteur sur son axe, une fraction parfois faible du rayonnement est interceptée. En pratique cet effet est atténué car le récepteur mesure plusieurs dizaines de mètres de long.

Sauf aux très fortes latitudes (65°N), la configuration NS est meilleure en été. A partir de 35°N, les courbes NS et EW à l'équinoxe ont la même moyenne. La quantité d'énergie disponible est donc similaire. En hiver, la configuration EW est meilleure pour toute latitude.

La figure 8 montre que jusqu'à 50°N, l'orientation NS permet de collecter davantage d'énergie tout au long de l'année. Pour de plus hautes latitudes, la configuration NS est légèrement moins performante que la configuration EW. A 50°N la courbe NS reste supérieure en été, mais elle est nettement inférieure aux équinoxes (figure 6).

Si la demande en énergie n'est pas uniforme sur l'année, la figure 8 doit être modifiée. Avec une demande située principalement en été, l'orientation NS garde l'avantage même sous des hautes latitudes. Si les besoins énergétiques sont plus importants aux équinoxes et en hiver, l'orientation EW n'est pas à écarter, dès 35°N. Les conditions climatiques peuvent aussi jouer un rôle sur la décision. Un climat plutôt nuageux en début et en fin de journée poussera à choisir l'orientation EW.

2.2.2. Conclusion

Aux latitudes où le solaire thermodynamique est le plus susceptible d'être implanté, l'orientation NS est la plus adaptée, dans la plupart des cas. La configuration EW peut être intéressante dans certaines situations, notamment à des latitudes élevées. Mais du fait du plus faible ensoleillement, ces zones ne sont pas actuellement assez rentables pour exploiter une centrale solaire thermodynamique.

3. Cycle thermodynamique et récepteur

3.1. Présentation du modèle

Le modèle du collecteur fournit une carte des flux énergétiques sur le récepteur. Cette carte de flux sert d'entrée au modèle analytique des échanges thermiques. Ce modèle, codé dans un tableur, est lui-même chaîné au modèle thermodynamique, au sein du logiciel Thermoptim. Ce logiciel est particulièrement adapté à la simulation de cycles thermodynamiques en régime permanent. Il permet d'optimiser un système et de dimensionner et choisir une technologie.

Le modèle complet du concentrateur peut ainsi être représenté comme sur la figure 9.

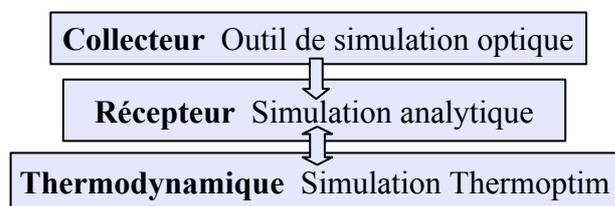


Figure 9 : Schéma de principe du chaînage des modèles de l'ensemble du collecteur

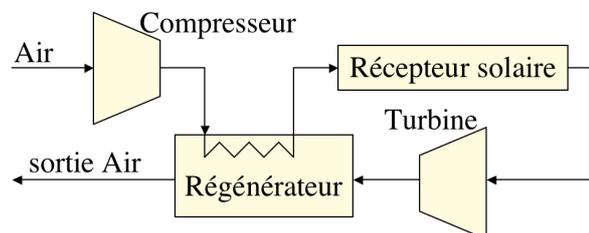


Figure 10 : Cycle thermodynamique

Le modèle du récepteur prend en compte les pertes radiatives et convectives, du tube. La température de la surface absorbante est calculée. Le coefficient d'échange à l'intérieur du tube est évalué par la relation de Mc Adams. Par suite, on détermine l'efficacité de l'échangeur et son nombre d'unité de transfert. Les pertes de charge linéaires sont également évaluées.

3.2. Optimisation du récepteur en fonction du cycle thermodynamique

3.2.1. Méthode et paramètres du modèle

Nous nous proposons d'illustrer les possibilités offertes par le modèle en déterminant la taille optimale du système pour différents types de récepteur. Nous analysons les résultats pour quatre géométries décrites dans le tableau 2, qui rassemble les résultats. Les récepteurs à 1, 2 ou 3 tubes en parallèle ont une largeur de 200 mm. L'optique a donc des géométries identiques. Le récepteur avec un tube plus petit a la même section que celui à 2 tubes, mais la largeur est réduite $L_r' = L_r / \sqrt{2}$. Les performances de l'optique sont cependant les mêmes.

Le tableau 1 liste les paramètres communs aux quatre cas étudiés.

La surface soumise au rayonnement concentré est $S_{abs} = L_r \times L$, avec L la longueur du récepteur. Plus le récepteur sera long, plus la surface d'échange sera importante et plus la température obtenue sera élevée. On déterminera donc la longueur nécessaire pour obtenir une certaine température, selon le récepteur et le cycle thermodynamique choisis.

Le tube (ou les tubes) du récepteur n'est éclairé que sur sa partie inférieure. Le récepteur est isolé, pour minimiser les pertes par convection. Pour augmenter l'échange dans le tube, un système d'ailettes permet d'en augmenter la surface d'échange. Ainsi, la surface d'échange est quatre fois supérieure à la surface éclairée : $S_{ech} = 4 \times S_{abs}$.

L'air est utilisé comme fluide caloporteur et fluide de travail. Le cycle thermodynamique est un cycle de Joule ouvert à régénération. Le cycle peut être schématisé par la figure 10. Les taux de compression étudiés sont faibles : $1,5 < r < 3$. Les paramètres du cycle communs aux cas d'étude sont également dans le tableau 1.

Pour une température donnée en sortie de récepteur solaire (entrée détente), nous choisissons le taux de compression optimal en terme de rendement du cycle. Alors, la température en entrée du récepteur est déterminée. Compte tenu des caractéristiques géométriques du récepteur, sa longueur peut être calculée.

Flux solaire	800 W/m ²
Taux de concentration de l'optique	50
Rendement de l'optique	70%
Absorptivité du récepteur (absorbeur)	90%
Emissivité du récepteur (absorbeur)	15%
Coefficient de pertes par convection	10 J/m ² .K
Température ambiante	300 K
Pression ambiante	1 bar
Débit d'air	0,5 kg/s
Rendement polytropique de compression	85%
Rendement polytropique de détente	87%
Efficacité du régénérateur	80%

Tableau 1 : Paramètres communs aux cas étudiés

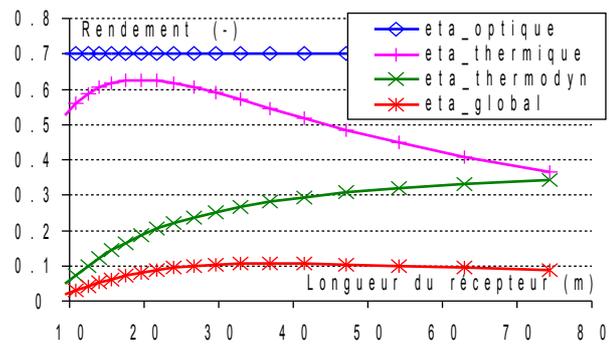


Figure 11 : Courbes des rendements pour le récepteur à 2 tubes de Ø 100 mm

3.2.2. Comparaison de différents récepteurs

Le rendement global η_{global} est calculé pour différentes longueurs et donc températures de sortie du récepteur. La figure 11 donne l'exemple du récepteur à 2 tubes. On voit que η_{global} est décomposé en trois rendements : (i) le rendement optique, fixe : $\eta_{optique} = 0,70$. (ii) le rendement $\eta_{thermique}$ du récepteur, qui collecte le rayonnement et l'évacue sous forme d'énergie thermique : calculé. On constate que le rendement passe par un maximum. Pour de faibles longueurs du récepteur, le coefficient d'échange reste faible. A l'inverse, lorsque le récepteur devient plus long, les pertes thermiques deviennent prédominantes. (iii) le rendement thermodynamique, du cycle thermodynamique : $\eta_{thermodynamique}$ calculé optimal

Le rendement global est proche de 10% et varie en fait peu avec la longueur du récepteur. Ce paramètre ne semble donc pas être le plus sensible. Cependant la courbe passe par un maximum, qui diffère suivant la géométrie du récepteur. Le tableau 2 présente les résultats obtenus qui permettent de dégager certaines tendances. On constate que le récepteur à un tube est le moins performant. Mais il offre les pertes de charge les plus faibles et le coefficient d'échange est plus facile à obtenir. En revanche, la température de l'absorbeur est très élevée, ce qui peut poser des problèmes de tenue en température. Avec deux tubes, l'amélioration est très nette. Mais ajouter un troisième tube n'améliore pas les performances. En effet, les pertes

de charge deviennent non négligeables. Le coefficient d'échange du récepteur n'est probablement pas accessible en réalité. Avec le tube plus petit, la section et donc les vitesses du fluide sont similaires au cas à double tube. On constate que les résultats sont comparables. On donne à titre indicatif la surface nécessaire à produire 1 kW électrique dans les conditions de l'étude. Avec le cas 2 tubes ou 1 petit tube, il faut environ 17 m²/kWél.

Type de récepteur	1 tube 200 mm	2 tubes 100 mm	3 tubes 66,7 mm	1 tube 141 mm
Longueur unitaire optimale du récepteur (m)	5.1	3.7	3.2	5.2
Rendement optique (%)	70.0	70.0	70.0	70.0
Rendement thermique (%)	44.5	54.6	58.6	54.2
Rendement thermodynamique (%)	30.7	28.2	24.9	28.2
Rendement global (%)	9.6	10.8	10.2	10.7
Surface au sol pour produire 1kWél (m ² /kW)	18.7	16.6	17.5	16.7
Rapport de pression (-)	2.7	2.5	2.4	2.5
Température entrée récepteur (°C)	37.3	34.4	32.9	34.4
Température sortie récepteur (°C)	62.7	56.7	53.7	56.7
Température absorbeur (°C)	64.1	57.0	53.8	57.1
Coefficient d'échange récepteur (W/(m ² .K))	3.6	7.1	10.7	6.7
Pertes de charge dans le récepteur (bar)	0.00413	0.02368	0.06945	0.02384

Tableau 2 : Comparaison des résultats pour les différents récepteurs étudiés

4. Conclusion

Nous avons donc la possibilité d'étudier les paramètres de l'optique à miroirs de Fresnel, grâce aux outils développés au laboratoire. L'influence de la latitude est mise en évidence : l'orientation NS de l'axe des miroirs est préférable sauf aux très hautes latitudes et cas climatique particulier.

Nous montrons également, les possibilités du modèle de simulation thermique et thermodynamique. L'analyse des résultats permet de s'orienter vers la géométrie d'un récepteur aux performances optimales. Mais le paramètre étudié ici (longueur du récepteur) ne permet pas à lui seul de prendre une décision.

Références

- [1] Concentrating solar power Global outlook 2009. Editor: Greenpeace, SolarPaces, ESTELA (<http://www.solarpaces.org/Library/docs/concentrating-solar-power-2009.pdf>), 2009.
- [2] Jürgen Dersch et al., Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector systems - system analysis to determine break even costs of linear Fresnel collectors, SolarPaces, Berlin, 2009, 8 p.
- [3] J. De la Torre, J.-J. Bezián, M. El Hafi et R. Fournier. Optimisation de la conception de collecteurs d'énergie solaire concentrée par méthodes de Monte-Carlo intégrées à un outil de synthèse d'image Congrès *SFT*, Vannes 2009, p283-288.
- [4] M. Roger, S. Blanco, M. El Hafi et R. Fournier. Monte-Carlo estimates of domain-deformation sensitivities. *Physical Review Letters*, vol. 95, n° 18, (2005), 180601.1-180601.4
- [5] M. Pharr and G. Humphreys, PBRT : Physically Based Rendering from theory to implementation, Elsevier, 2004.
- [6] R. Gicquel. Systèmes énergétiques, Tome 3. Cycles avancés, Systèmes innovants à faible impact environnemental. Ed. Presse des Mines, 2009. ISBN : 978-2-35671-013-0

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un projet en collaboration et grâce au financement de EDF R&D.