



DEVELOPPEMENT DES HELIOSTATS DANS LES CENTRALES SOLAIRES A TOUR AU COURS DES DERNIERES ANNEES

Merarda Hakim^{*1}, Mounir Aksas, T. Arrif¹, A. Belaid¹, R. Khelifi¹, B. BEZZA¹, A. Gama¹

¹Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie

*hmerarda@uraer.dz

Abstract— La demande mondiale de réduire la pollution provenant des combustibles fossiles a conduit les gouvernements du monde entier à soutenir les technologies d'énergie renouvelable (ER) et l'énergie écologique des sources renouvelables. Les centrales solaires à tour sont l'un des technologies d'énergie renouvelable qui basé sur les ressources solaires pour produire l'énergie électrique. Dans ces types des centrales, la production de l'énergie électrique basé sur la chaleur atteinte par la concentration des rayons solaires durant la journée sur un absorbeur thermique (récepteur) positionné au sommet de la tour. Cette concentration est assurée par un champ solaire constitué des systèmes mécaniques (héliostats) installés autour de la tour au sol dans des positions calculées d'une façon d'obtenir un rendement optimal.

Le champ solaire présente un coût d'investissement important d'environ 40% du coût total de la centrale solaire à tour. Pour cette raison et dans ces dernières années, plusieurs chercheurs ont travaillé sur le développement et la réduction de coût des héliostats. Par conséquent, dans ce papier nous allons présenter certains héliostats commerciaux et autres qui sont en cours de développement, notamment l'analyse de ses caractéristiques et les améliorations introduites par les chercheurs au cours dernières années.

Keywords—Central solaire à tour, Héliostats, Champ solaire

I. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la croissance moyenne de la consommation mondiale de l'énergie primaire a atteint 1,9% [1]. En raison de la demande mondiale pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles et réduire leur impact environnemental, ainsi que le coût le plus bas des technologies d'énergie renouvelable (ER) et l'énergie écologique des sources renouvelables, la consommation d'ER augmente en moyenne de 2,6% par année entre 2012 et 2040 [2]. En 2015, la capacité mondiale de production d'électricité d'énergie renouvelable a augmenté d'environ 147 GW [3].

La source d'énergie solaire peut être convertie en électricité qui est produite à partir de diverses technologies, comme les panneaux photovoltaïques (PV) et l'énergie solaire thermique à concentration (CSP) [4]. Les panneaux PV convertissent

l'irradiation solaire directement en électricité. Les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus demandés par des particuliers du monde entier, car ces systèmes peuvent être utilisés (par exemple par des applications montées sur le toit) pour réduire les factures de consommation d'électricité [5]. Les technologies CSP sont des systèmes qui génèrent l'électricité de l'énergie solaire en convertissant la chaleur produite par la lumière solaire concentrée sur une petite surface. Généralement, la concentration effectuée par des collecteurs (miroirs) qui ont une forme plane ou parabolique. CSP est une option de production d'énergie potentiellement compétitive, en particulier dans les régions arides où la lumière directe du soleil est abondante [6, 7].

La technologie CSP centrale solaire à tour est considérée comme une solution viable pour une énergie renouvelable et non polluante. Dans la centrale solaire à tour, Des miroirs mobiles appelés héliostats suivent le soleil sur deux axes et réfléchissent les rayons solaires sur un récepteur au sommet d'une tour (Fig. 1). Le récepteur absorbe les rayons solaires concentrés et générer des températures élevées, qui sont ensuite utilisés pour conduire un cycle d'énergie classique et produire de l'électricité.



Fig. 1 Solar One (Californie) utilise 1818 héliostats [8].



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018



Actuellement, les héliostats présentent entre 38-50% du coût total de réalisation de la centrale solaire à tour [9, 10, 11]. Par exemple, Honghang Sun et al présentent à travers [11] Fig. 2 le coût d'installation actuel des différents composants des centrales CSP de 100 MW en Afrique du Sud.

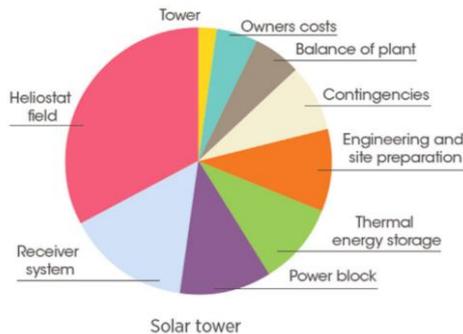


Fig. 2 Coût d'installation actuel des centrales CSP de 100 MW en Afrique du Sud [11].

Le développement des héliostats aidera également à résoudre les problèmes existants tels que le coût élevé de l'installation et la résistance aux conditions météorologique du site. De nombreuses opportunités existent pour promouvoir le potentiel des héliostats, donc plusieurs tentatives de recherche ont été effectuées pour augmenter leur efficacité. Dans cet article, le développement technologique des héliostats sur différents aspect de conception et de fabrication sera discuté.

II. PRINCIPAUX COMPOSANTS DE L'HELIOSTAT

La Fig.3 présente les principaux composants des héliostats qui sont :

- Reflétant de la lumière du soleil (Miroirs).
- Structure de support de miroir.
- Mise à la terre (Pylône et Fondation).
- Détermination de l'orientation (Système de contrôle).
- Rotation du miroir (Système d'entraînement de mouvement).

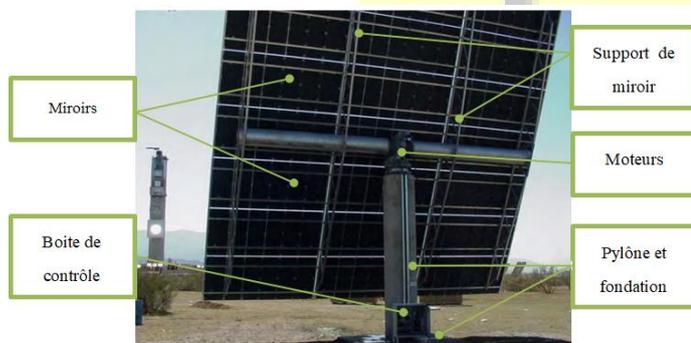


Fig. 3 Différent composants de l'héliostat.

A. Miroirs (Reflétant de la lumière du soleil)

La réflectivité des rayons solaire peut être effectuée par des miroirs en verre, films réfléchissants, miroirs en plastique et métaux polis. Quel que soit le type utilisé de ces réflecteurs le taux de la réflectivité (réflectance) inférieur à 100%, selon l'étude de Coventry et al. [12] les deux premiers types des miroirs sont les options actuelles les plus appropriées pour les réflecteurs des héliostats. Parce qu'ils possèdent actuellement de réflectance adéquate par rapport aux autres.

B. Structure de support de miroir

Les centrales solaires à tour utilisent principalement des héliostats de type T avec une structure métallique et des facettes en verre. La structure de support de miroir en acier est souvent constituée de plusieurs traverses qui sont montées sur un tube d'élévation horizontal. Le tube d'élévation et le pylône forment ensemble un «T» et sont reliés l'un à l'autre par le système d'entraînement pour le mouvement d'azimut et d'élévation (Fig. 3). La déformation de la structure de l'héliostat qui est dû par la gravité et les charges de vent a un impact important sur le rendement énergétique annuel de la centrale solaire à tour [13]. Pour cette raison, la structure des héliostats doit être suffisamment rigide.

C. Pylône et fondation

Le pylône est fabriqué en tube d'acier et fixé au sol par une fondation en béton. Cette solution de fixation est la plus répondu surtout pour les grands héliostats.

D. Systèmes de contrôle :

Systèmes de contrôle sont des caméras, des cartes électroniques et des algorithmes de contrôle qui sont utilisés pour fournir les signaux aux moteurs d'entraînement pour maintenir la position de concentration par rapport au soleil. Un système de réflexion des rayons solaire idéalement devrait faire le point de concentration sur la cible sans erreur. En réalité, les systèmes de réflexion ne sont pas parfaits, et ne pointeront pas toujours l'image solaire exactement au point désiré sur la cible. Cette erreur de concentration généralement et dû par plusieurs paramètres par exemple l'effet du vent et la température sur toute la structure d'héliostat et les jeux des articulations et des moteur et les calculs mathématiques. Cette erreur peut contrôler par des caméras. Ces caméras peuvent capter les erreurs ensuite les transformer à la carte de contrôle pour corriger la position finale.

E. Système d'entraînement de mouvement :

Selon l'aperçu de Coventry et al. [12] sur les principaux systèmes d'entraînement de mouvement de l'héliostat, les systèmes d'actionnement ont longtemps été l'un des principaux facteurs de coût des héliostats. Le système d'entraînement



azimutal (Fig. 4) monté sur piédestal a été l'un des principaux moteurs des héliostats de plus grande taille. Cependant, certains développeurs de technologie pensent que les systèmes linéaires (Fig. 5) sont moins chers et peuvent remplacer complètement les actionneurs azimutaux. Des systèmes d'entraînement alternatifs, tels que des actionneurs de jante (Fig. 6) avec des câbles, ont été proposés pour éviter le coût des systèmes montés sur des socles. Les systèmes d'entraînement hydrauliques ont été utilisés de manière rentable sur les grands héliostats.

taille de 1 à plus que 200 m², des héliostats de différents forme de la zone réfléchive (carré, rectangle, cercle ...) et des héliostats de différents système de d'entraînement de mouvement (moteur avec réducteur vis sans fin, vérins, moteur avec réducteur en chaine, système de jante...). Dans cette partie de ce papier nous avons classé les héliostats trouvés en littérature en deux parties : les héliostats commerciaux et les héliostats de prochaine génération.

A. Héliostats commerciaux :

Les héliostats commerciaux sont les héliostats des centrales solaires à tour commerciales qui sont en cours de produire de l'électricité. La plupart de ces héliostats sont de type T et de forme carré ou rectangulaire.

1) Héliostat ASUP 140

En raison de la tendance actuelle à réduire les coûts de production d'électricité, Abengoa a Développé en 2012 le nouvel héliostat ASUP 140 de 138,7 m² avec des facettes combinées en une feuille de verre de 2 mm avec un support en panneaux sandwich (Fig. 6). Grâce au mécanisme d'entraînement hydraulique breveté, une rotation azimutale complète est possible. Les paliers de l'axe d'élévation sont en dessous du tube de torsion continu pour éviter les grandes dimensions des paliers. L'ASUP 140 a été validée grâce à un processus exhaustif qui comprenait des essais en soufflerie, des essais structurels et optiques et un fonctionnement sur le terrain des prototypes à la Solúcar Solar Platform. Le nouvel héliostat est installé à centrale solaire à tour commerciale Khi Solar 1, Afrique du Sud [15,16].

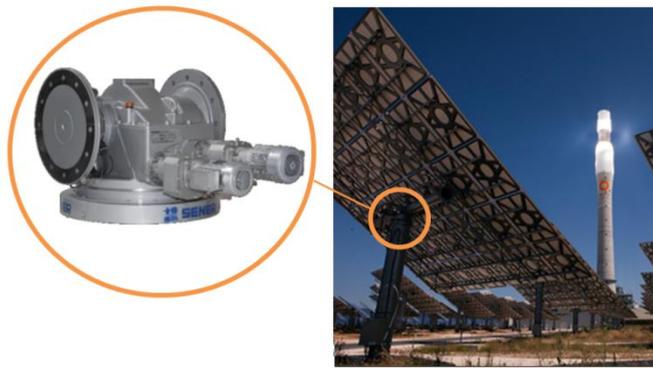


Fig. 4 Mécanisme d'entraînement SENER pour l'héliostat Gemasolar.

III. COUT DE L'HELIOSTAT

Le coût de réalisation de l'héliostat est en varié selon sa taille en m². Fig. 5 de Cordes et al. [14] montre que la taille optimale des héliostats qui nous donne le coût le plus bas est d'environ 50 m². Les héliostats plus grands entraînent des investissements importants dans la structure de support, tandis que pour les petits héliostats, les actionneurs de mouvement, le câblage et la commande deviennent importants.

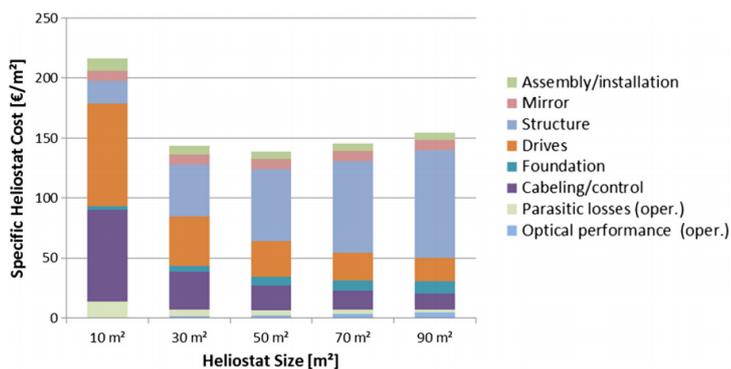


Fig. 5 Impact de la taille de l'héliostat sur le coût d'investissement [14].

IV. DESIGN DE L'HELIOSTAT

Plusieurs héliostats de différent design sont réalisés dans le monde. Par exemple, On trouve des héliostats de différentes



Fig. 6 Gauche : héliostat ASUP 140 (Abengoa) ; Droite : vue de face, Vue Arrière [15,16].



2) Héliostat LH 2.2 de BrightSource

En 2013, BrightSource a finalisé l'installation des héliostats LH 2.2 (Fig. 7, gauche) pour Ivanpah centrale solaire à tour [17]. La zone réfléchissante de LH 2.2 est en deux facettes de surface totale 15,2 m². Ses facettes sont attachées à la structure de support miroir par des contacts linéaire. Le pylône est fixé directement au sol sans coulage de la fondation en béton. Le support de palier est en fonte (Fig. 7, droite). Il est formé de manière à ce que le palier soit au-dessus du tube de torsion pour un meilleur équilibrage de poids [15].



Fig. 7 Gauche : héliostat LH 2.2 de BrightSource ; Droite : support de palier [18,15].

3) Héliostat de SENER

En 2015, SENER a commencé d'installer des héliostats de nouvel design dans le central solaire à tour NOORO III, Ouarzazate, Morocco. Héliostat de SENER a 54 facettes réfléchissantes de surface totale d'environ 175,7 m² (Fig. 8) [19]. Les facettes réfléchissantes sont des miroirs de 3 mm d'épaisseur renforcé d'un support en acier embouti, galvanisé et collé à la face arrière du miroir [12]. Le pylône des héliostats est en béton. Les mouvements Azimute et Elévation sont actionnés par des actionneurs hydrauliques Les actionneurs hydrauliques

sont précis et rentables, en particulier pour les charges élevées et donc pour les gros héliostats.



Fig. 8 Héliostat de SENER de 175.7 m² [19].

4) Héliostat de CSIRO

L'héliostat du CSIRO est basé sur une seule facette et deux actionneurs linéaires (Fig. 9). La taille originale de l'héliostat CSIRO était de 4,5m² mais peut aujourd'hui atteindre 7,22 m², représentant la plus grande feuille de verre encore transportable par conteneur d'expédition, mais flexible aux options du fournisseur. Le premier axe de rotation est horizontal pour obtenir une plage d'angle requise inférieure à 120 °. Par conséquent, pour ce type héliostat, des entraînements linéaires de faible coût peuvent être utilisés pour les deux axes [20].



Fig. 9 Entraînement linéaire pour l'héliostat de CSIRO [20].

5) Héliostat d'esolar

Les détails de l'héliostat eSolar (Fig. 10) ont été présentés par Ricklin et al. [21]. La partie réfléchissante est un miroir de surface 2 m². Le design héliostatique est le plus petit disponible dans le marché. Les miroirs plats sont suivis individuellement à l'aide d'un système de moteur pas à pas hybride, et montés sur un support fabriqué en tube d'acier. Les héliostats sont



supportés sur une structure en treillis, lestés et partagés avec d'autres héliostats. Le poids (à l'exclusion de la fondation) est de 20 kg/m². La vitesse maximale du vent est de 49 m/s. La structure rigide du trépied réduit les charges sur les pylônes et les fondations. Les héliostats eSolar n'ont pas été installés entièrement dans une centrale solaire commerciale, mais eSolar a démontré sa technologie à la Sierra Sun Tower de 5 MWe, qui est opérationnelle depuis 2009.



Fig. 10 Héliostats d'esolar de 2 m² [21].

6) Héliostat Stellio

Stellio (Fig. 11) est la dernière conception d'héliostat développée par schlaich bergemann partner (sbp) [22]. Le nouvel héliostat « Stellio » de 48 m² a été présentée par Balz et al. [23].

La forme de la zone réfléchissante est pentagonale, ce qu'elle permet de réduire l'ombrage et le blocage, et permet une disposition de champ compacte. Une haute précision optique à faible coût est obtenue par une méthode d'assemblage facile à base de gabarit. Les mesures ont confirmé la haute précision optique des miroirs. Stellio est conçu pour réduire les coûts et améliorer les performances des grandes centrales.



Fig. 11 Héliostats Sellio [22].

B. Héliostats en cours de développement

Il existe un nombre important des héliostats de différentes tailles, forme et système d'entraînement de mouvement qui sont à l'échelle expérimentale et en cours de développement. Par cette partie de notre papier, nous allons essayer de présenter certain nombre d'héliostats en cours de développement et de différents types.

1) Héliostat Pitch/Roll de l'Université Amrita

L'héliostat Pitch/Roll de l'Université Amrita (Fig. 12) est un prototype d'un héliostat de double actionneur linéaire modélisé et développé par Freeman et al. [24]. Les héliostats Pitch/Roll présentent de nombreux avantages, notamment un potentiel de coût réduit et une densité de champ héliostatiques plus élevées à cause de la liaison ponctuel entre le miroir et le pylône qui permet aux héliostats positionnés plus près les uns des autres.



Fig. 12 Héliostat Pitch/Roll de l'Université Amrita.

2) Héliostat de DLR (héliostat de jante)

Pfah et al. [25] ont installé un nouveau prototype d'héliostat à jante dans le champ héliostatique de la centrale à tour de Jülich, Allemagne de DLR, Centre Aérospatial Allemand (Fig. 13), pour l'étudier expérimentalement, ensuite le développer. Le nouveau prototype d'héliostat d'un coût cible de 100 USD/m² et de miroir 9 m² de surface. Concernant les jantes, les charges sur les actionneurs sont faibles et le jeu des moteurs peut être relativement élevé à cause des bras de levier longs (distance entre les entraînements et le centre de rotation), ce qui permet d'utiliser des moteurs à faible coût.



Fig. 13 Actionneurs de jante de l'héliostat DLR [25].



Fig. 15 Solaflect héliostat [27].

3) Héliostat de laboratoire national des énergies renouvelables (USA)

L'héliostat Pitch/Roll de l'Université Amrita (Fig. 12) est un prototype d'un héliostat de double actionneur linéaire modélisé et développé par Freeman et al. [24]. Les héliostats Pitch/Roll présentent de nombreux avantages, notamment un potentiel de coût réduit et une densité de champ héliostatiques plus élevées à cause de la liaison ponctuel entre le miroir et le pylône qui permet aux héliostats positionnés plus près les uns des autres.

5) HelioTower

HelioTower (Fig. 16) est un héliostat développé par société holding IP issue de Solar Millenium et de surface 36 m². Les principales caractéristiques sont un mode de poursuite d'axe primaire horizontal avec les deux axes actionnés par des actionneurs linéaires, un pylône fabriqué en tôle qui est décentré pour permettre la plage de poursuite nécessaire et un miroir de forme octogonale pour permettre un espacement plus dense pour une perte minimal de la surface réfléchive [28].

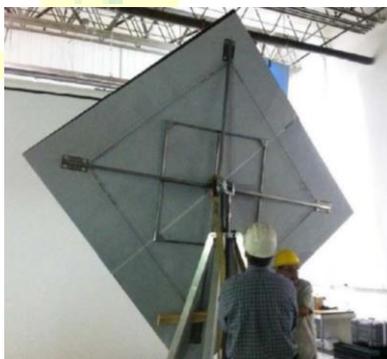


Fig. 14 Héliostat de NREL (USA) [26].



Fig. 16 Solaflect héliostat [30].

4) Héliostat de suspension (Solaflect Energy)

Solaflect héliostat est composé de 16 facettes de verre de 1 m² maintenues en position par des câbles tendus à partir d'un poteau perpendiculaire et central aux miroirs (Fig. 15). L'absence de traverses (poutrelles) et le tube d'élévation horizontal entraîne la réduction du poids et les charges sur le pylône et les actionneurs de mouvement [27]. La tension du câble est ajustée via des tiges filetées. L'inconvénient de la conception est que le nettoyage conventionnel des miroirs n'est pas possible les robots de nettoyage pourraient être une solution.

6) Héliostat de l'URAER (Algérie)

L'Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa en Algérie a conçu et fabriqué pour son installation d'essai de mini centrale solaire à tours des héliostats de 1.44 m² de surface de miroir (Fig. 17). L'héliostat est principalement caractérisé par son faible coût qui est moins de 200 USD/m² compris tous ses composants sans la fondation. Aussi bien que la facilité et la rapidité de sa fabrication. La structure de support est composée d'un tube de torsion, d'un socle et d'un cadre supportant le miroir en PVC. Le pylône et le tube de torsion sont en tube d'acier. Deux actionneurs linéaires utilisés pour le mouvement horizontal et vertical de l'héliostat.



Fig. 17 Héliostat d'URAER (Algérie).

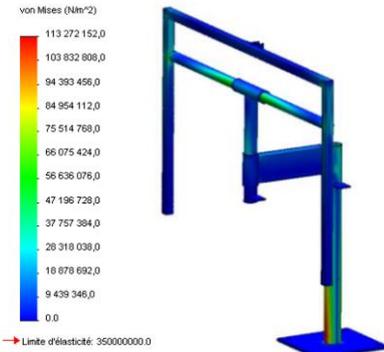


Fig. 18 Distribution de la contrainte sur la structure de l'héliostat d'URAER (Algérie).

La conception des actionneurs linéaires et la petite taille de la surface réfléchive permettent de réduire les charges de vent sur différent composants, ainsi que la réduction des coûts.

Naturellement, l'optimisation de l'héliostat d'URAER a débuté par une analyse statistique détaillée de toutes les conditions de charge environnementale pour les sites typiques de Ghardaïa. Une partie de ces études consistait en des analyses des conditions de charge du vent pour les vents extrêmes, des vitesses de vent opérationnelles. Utilisant le logiciel SolidWorks et la vitesse max enregistré par la station météorologique de l'URAER, une simulation numérique de fluide de vent sur l'héliostat a été effectué. Parmi les résultats obtenus, on trouve la contrainte de la charge de vent sur la structure de l'héliostat, la force du vent et l'inclinaison maximale de la structure de l'héliostat. La fig. 18 montre que les parties de la structure les plus sensibles à la contrainte sont le pylône et tube horizontal de l'axe d'élévation. Après l'analyse des résultats de la simulation numérique nous avons conclu que cette conception de l'héliostat peut résister les conditions météorologiques du site de Ghardaïa. Le tableau. 1 résume les caractéristiques mécaniques de l'héliostat.

Tableau. 1 Paramètres mécanique de l'héliostat de l'URAER.

Pour une vitesse du vent $V_{max} = 22$ m/s		
Contrainte max	Force max	Inclinaison max
[N/m]	[N]	[°]
1050	730	2.4

V. CONCLUSION

Le présent papier a exploré les progrès récents dans la technologie des héliostats ont été effectués dans dernières années. Basé sur des recherches menées dans le monde entier, diverses réalisations de type héliostat et leur performance mécanique et optique sont présentées. La quantité et l'originalité des concepts d'héliostat qui ont été trouvés jusqu'à présent sont impressionnantes.

On conclut que le design et les solutions technique obtenus par les chercheur (l'actionnement par câble, entraînements hydrauliques pour les grands héliostats, optimisation de la taille héliostat, entraînement des jantes avec axe principal horizontal, facettes en sandwich, réflecteurs minces en verre), pourraient conduire à une réduction significative des coûts.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] British Petroleum. Statistical review of world energy 2016, <<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>> (accessed 13/ 02/2017).
- [2] U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016, <<http://www.eia.gov/outlooks/ieo/>> (accessed 13/02/2017).
- [3] Suojanen S, Hakkarainen E, Tähtinen M, Sihvonen T. Modeling and analysis of process configurations for hybrid concentrated solar power and conventional steam power plants. Energy Conversion and Management 2017; 134: 327-339.
- [4] Devabhaktuni V, Alam M, Reddy DS, Green RC, Nims D, Near C. Solar energy: trends and enabling technologies. Renew Sustain Energy Rev 2013, 19: 555-564.
- [5] Palm A. Peer effects in residential solar photovoltaics adoption—A mixed methods study of Swedish users. Energy Research & Social Science 2017; 26: 1-10.
- [6] Zhang Yabei, Smith Steven J, Page Kyle G, Stackhouse Jr Paul W. Modeling the potential for thermal concentrating solar power technologies. Energy policy 2010; 38: 7884-7897
- [7] Bendjebbas H, Abdellah-ElHadj A, Abbas M. Full-scale, wind tunnel and CFD analysis methods of wind loads on heliostats: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016; 54: 452-472.



**Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 5th International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2018**



- [8] Gregory J. Kolb, Scott A. Jones, Matthew W. Donnelly, David Gorman, Robert Thomas, Roger Davenport, RonLumia. Heliostat cost reduction study. Sandia National Laboratory. USA. 2007.
- [9] Kolb, G. J., Ho, C. H., Mancini, T. R., and Gary, J. A., 2011, "Power Tower Technology Roadmap and Cost Reduction Plan", Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Report No. SAND2011-2419.
- [10] Mancini, T. R., 2000, "Catalog of Solar Heliostats", SolarPACES Technical Report No. III-1/00.
- [11] [11] Honghang S, Bo G, Qiang Y. A review of wind loads on heliostats and trough collectors. *Renew Sustain Energy Rev* 2014, 32: 206–221.
- [12] Coventry, J., Campbell, J., Xue, Y.P., Hall, C., Kim, J.S., Pye, J., Burgess, G., Lewis, D., Nathan, G., Arjomandi, M., Stein, W., Blanco, M., Barry, J., Doolan, M., Lipinski, W., Beath, A., 2016, Heliostat Cost Down Scoping Study – Final Report. ANU Document Reference: STG-3261 Rev 01, ASTRI, Australia.
- [13] Teufel, E., Buck, R., Pfahl, A., Böing, G., Kunert, J., 2008. Dimensioning of heliostat components under wind and gravity load: the map approach. In: *Proc. SolarPACES 2008 Conference, Las Vegas, Nevada*.
- [14] Cordes, S., Prosinec`ki, T.C., Wieghardt, K., 2012. An approach to competitive heliostat fields. In: *18th Annual SolarPACES Symposium, Marrakesh*.
- [15] Pfahl A, Joe C, Marc R, Fabian W, Juan F. V., Fabian G, Maziar A, Peter S, Mark G, Phillip L., 2017, "Progress in heliostat development", *Solar Energy*. 152, 2017, 3-37.
- [16] Industrial production Annual Report 2012_ABENGOA <http://www.abengoa.com/export/sites/abengoa_corp/resources/pdf/en/gobierno_corporativo/informes_anuales/2012/2012_Volume1_AR_8.pdf> (accessed January 2018).
- [17] Ivanpah Solar Electric Generating System - A Timeline <<http://www.brightsourceenergy.com/stuff/contentmgr/files/0/8a69e55a233e0b7edfe14b9f77f5eb8d/folder/timeline.png>> (accessed February 2018).
- [18] BrightSource Limitless, 2012, "Image Downloads," accessed June 28, 2012, <http://www.brightsourceenergy.com/image-downloads>
- [19] SENER, Central receiver plant NOORo III <<http://www.poweroilandgas.sener/projects/central-receiver-plant-nooro-iii>> (accessed February 2018).
- [20] CST CSIRO, Chine 2017: <<https://www.csiro.au/en/Research/EF/Areas/Solar/Solar-thermal/China-solar>> (accessed January 2018).
- [21] Ricklin, P., Slack, M., Rogers, D., Huibregtse, R., 2014. Commercial readiness of esolar next generation heliostat. *Energy Procedia*, 49
- [22] schlaich bergemann partner, 2015. <<https://www.sbp.de/en/themes/stellio-heliostat-the-state-of-the-art-concentrating-solar-power-csp/>>, (accessed February 2018).
- [23] Balz, M., Göcke, V., Keck, T., von Reeken, F., Weinrebe, G., Wöhrbach, M. Stellio – Development, Construction and Testing of a Smart Heliostat. *AIP Conf. Proc.* 2016. 1734, 020002-1–020002-8.
- [24] Freeman, J., Shankar, B., Sundaram, G., 2016. Inverse Kinematics of a Dual Linear Actuator Pitch/Roll Heliostat. *AIP Conf. Proc.* 2017. 1850, 030018-1–030018-8.
- [25] Pfahl, A., Survey of heliostat concepts for cost reduction. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2014, vol. 136.
- [26] Kutscher C. Low-cost heliostat for modular systems. In: *Sunshot CSP program review*. 2013. Phoenix, Arizona.
- [27] Bender W, Chalifoux B, Schneider D. Suspension heliostat material efficiency. In: *2011 annual SolarPACES symposium*. 2011. Granada
- [28] Cordes, S., Prosinec`ki, T.C., Wieghardt, K., 2012. An approach to competitive heliostat fields. In: *18th Annual SolarPACES Symposium, Marrakesh*.
- [29] HelioTower. 2017. <<http://heliotower.com/heliostat.html>> (accessed February 2018).