



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

MOULIN SOLAIRE ET CONCENTRATION PHOTOVOLTAÏQUE

André CABARBAYE, Aurélien CABARBAYE,

CAB INNOVATION, Toulouse

Contact e-mail : andre.cabarbaye@cabinnovation.com

RÉSUMÉ

En dépit de l'amélioration des technologies et de la diminution des coûts, la production d'électricité photovoltaïque reste encore marginale. Cependant, les installations pourraient être moins onéreuses et plus performantes.

Le concept de moulin solaire, consistant à exploiter une surface elliptique inclinée asservie suivant l'axe vertical, permet de maximiser la production d'énergie solaire ramenée à la surface au sol, et de réduire ainsi le coût du foncier tout en limitant la pression sur les terres agricoles. Il peut être associé à celui de la concentration photovoltaïque qui consiste à remplacer une partie de la surface de panneaux par de la surface de miroir.

Cette communication présente ces deux concepts ainsi que différentes applications dont un prototype de lampadaire solaire à concentration actuellement en expérimentation à Toulouse.

SUMMARY

Despite improved technology and reduced costs, photovoltaic electricity is still marginal. However, power generation facilities may be less expensive and more efficient.

The solar mill concept is to operate an inclined elliptical surface controlled by the direction of the sun along the vertical axis. It maximizes the solar energy compared to the ground surface and thus reduces the cost of land while reducing the pressure on farmland. It may be associated with that of the photovoltaic concentration which consists of replacing part of the surface of the panels by mirror surface.

This paper discusses these concepts and various applications including a solar lamppost prototype currently being tested in Toulouse.

Mots Clés : Moulin solaire, concentration, photovoltaïque

1 – Introduction

Initialement orienté vers l'électrification des sites isolés, le marché de l'électricité photovoltaïque a connu une croissance rapide en France depuis 2006 avec la mise en place de tarifs d'achat de l'électricité particulièrement attractifs.

La capacité totale cumulée du parc photovoltaïque opérationnel dépassait les 4 GW à la fin 2012, soit 0,7 % de la production globale d'énergie électrique du pays, couverte essentiellement par des applications raccordées au réseau.

En dépit des évolutions technologiques conduisant à une amélioration continue des rendements et de la baisse des prix des modules, la production d'électricité photovoltaïque reste cependant marginale et cette situation devrait peu évoluer dans l'avenir car les tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque ont fait l'objet d'une révision en 2011 et la production intermittente d'énergie sur le réseau électrique génère des contraintes encore mal maîtrisées.



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

La capacité de production installée au niveau mondial dépassait les 102 GW à la fin 2012, soit seulement 0,5 % de la production globale d'énergie électrique, mais les perspectives d'évolution semblent prometteuses dans les pays de faible latitude.

Par ailleurs, le coût de production de l'électricité solaire photovoltaïque, évalué dans un rapport de la Cour des Comptes en mai 2014, diffère énormément (72 à 279 € MWh) selon la taille (quelques KWc à plusieurs dizaines de MWc) et le type d'installation (intégrée au bâti ou au sol), et se rapproche progressivement de celui du nucléaire ancien et nouveau (60 et 81€ MWh).

Mais les fermes solaires, qui représentent les installations les plus productives, présentent un ratio de puissance ramenée à la surface au sol relativement médiocre (environ 30 Wc/m² dans notre pays), ce qui conduit à une part significative du foncier dans le coût des installations et engendre une pression sur les terres agricoles difficilement acceptable.

Outre la dispersion de la ressource inhérente à l'énergie solaire, cette piètre performance est due au type d'installation majoritairement choisi (panneaux fixes) et notamment aux phénomènes d'ombrage qui limitent à un tiers environ la surface des panneaux par rapport à celle de leur emprise au sol (la moitié dans la zone inter tropicale). Ainsi, la plus grande centrale française, construite par EDF Énergies Nouvelles à Toul-Rosières, a une puissance de 115 MWc générée par des panneaux photovoltaïques d'une surface globale d'environ 120 ha, pour une emprise au sol de 367 ha, soit un ratio de 31,5 Wc/m².

Cependant, ce ratio peut être significativement amélioré afin de diminuer le coût de l'énergie photovoltaïque ou d'exploiter des surfaces réduites considérées actuellement comme non rentables.

2 – Concept du moulin solaire

L'exploitation d'une surface elliptique inclinée (dont la projection au sol est un disque) asservie à la direction du soleil suivant l'axe vertical permet de maximiser la production d'énergie solaire ramenée à la surface au sol (voir figure 1).

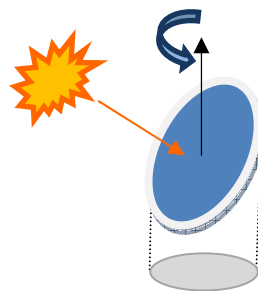


Figure 1 - Moulin solaire

En effet, si la production énergétique d'une telle surface, à l'incidence optimale, est légèrement inférieure à celle d'une surface de même dimension asservie suivant 2 axes, l'inclinaison de celle-ci conduit à une surface au sol sensiblement plus faible que celle d'un héliostat ou de panneaux fixes.

Ainsi, la table 1 donne la production journalière annuelle d'un panneau photovoltaïque de 1 KWc pour différentes configurations et localisations évaluée par l'outil PVGIS de la communauté européenne avec un coefficient de perte pris à 14 % (2).



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

Cette table donne également l'incidence optimale θ (en degré) de ce panneau dans la configuration 1 axe vertical, l'inclinaison optimale de la configuration 1 axe incliné, ainsi que les performances de la configuration 1 axe vertical avec un panneau à 45° car l'angle d'incidence peut être volontairement limité dans une application afin d'en simplifier la réalisation ou modérer la prise au vent.

	Fixe		1 axe vertical		1 axe incliné		1 axe vertical / 45°	
	KWh	θ°	2 axes	KWh	θ°	KWh	θ°	KWh
Paris	2,9	36	3,87	3,8	55	3,8	39	3,76
Toulouse	3,51	37	4,74	4,63	55	4,63	40	4,57
Madrid	4,24	36	5,84	5,67	55	5,68	38	5,6
Alger	4,22	33	5,72	5,54	53	5,56	35	5,5
Dakar	4,39	15	5,85	5,61	44	5,67	15	5,61
Libreville	3,68	1	4,81	4,63	43	4,67	1	4,63

Table 1 - Production journalière annuelle d'un panneau photovoltaïque de 1 KWe

A partir des données de la table 1, la table 2 donne le gain énergétique des solutions asservies 1 et 2 axes par rapport à celle à panneau fixe.

	2 axes	1 axe vertical	1 axe incliné	1 axe vertical / 45°
Paris	33,45%	31,03%	31,03%	29,66%
Toulouse	35,04%	31,91%	31,91%	30,20%
Madrid	37,74%	33,73%	33,96%	32,08%
Alger	35,55%	31,28%	31,75%	30,33%
Dakar	33,26%	27,79%	29,16%	27,79%
Libreville	30,71%	25,82%	26,90%	25,82%

Table 2 – Gain énergétique par rapport à un panneau fixe

La table 3 donne le gain énergétique des configurations 1 et 2 axes par rapport à celle à panneau fixe pour une même emprise au sol, en considérant le gain $1/\cos(\theta)$ en surface apporté par l'incidence. Ce gain est considéré nul dans une configuration 2 axes (ou 1 axe incliné) susceptible de s'orienter dans la direction du zénith.

	2 axes	1 axe vertical	1 axe incliné	1 axe vertical / 45°
Paris	7,96%	84,82%	6,01%	48,34%
Toulouse	7,85%	83,67%	5,35%	47,05%
Madrid	11,43%	88,62%	8,38%	51,11%
Alger	13,68%	82,95%	10,50%	54,58%
Dakar	28,72%	71,60%	24,76%	74,56%
Libreville	30,69%	72,00%	26,88%	77,90%

Table 3 – Gain énergétique par unité de surface d'emprise au sol

Outre cette comparaison des productions annuelles, une comparaison en pire cas hiver est à considérer en Europe et en Afrique du Nord si le but recherché est de rendre autonome un équipement électrique (un lampadaire solaire par exemple). La table 4 donne les résultats correspondants en décembre dans les quatre villes situées les plus au Nord.



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

	Fixe		1 axe vertical		1 axe incliné		1 axe vertical / 45°	
	KWh	θ°	2 axes	KWh	θ°	KWh	θ°	KWh
Paris	1,23	65	1,33	1,33	66	1,33	61	1,24
Toulouse	2,31	64	2,56	2,55	65	2,55	60	2,37
Madrid	3,23	63	3,64	3,62	64	3,63	58	3,37
Alger	3,33	62	3,74	3,72	64	3,73	57	3,53

Gain / fixe :	Paris	Toulouse	Madrid	Alger
	8,13%	10,82%	12,69%	12,31%
	8,13%	10,39%	12,07%	11,71%
	8,13%	10,39%	12,38%	12,01%
	0,81%	2,60%	4,33%	6,01%

Table 4 – Production d'électricité journalière en décembre d'un panneau photovoltaïque de 1 kWc

La durée des conditions hivernales est plus longue avec des panneaux fixes comme le montre la comparaison de deux configurations optimisées en pire cas à Toulouse (table 5). Par ailleurs, la configuration 1 axe vertical optimisée en pire cas (65°) n'est pas très éloignée de celle optimisée sur l'année (55°) et offre un surcroît d'énergie significatif en dehors de l'hiver qui peut être exploité pour d'autres applications, telle que la recharge de batterie de vélo électrique pour un lampadaire solaire par exemple.

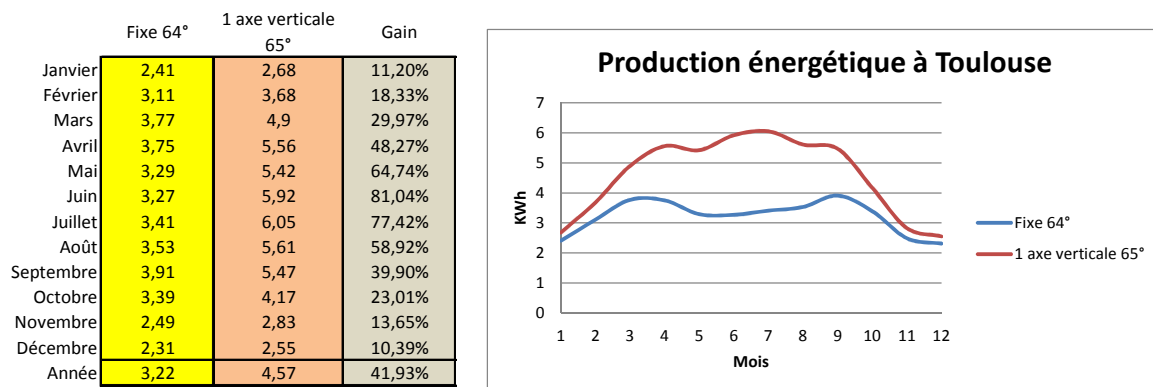


Table 5 – Production énergétique à Toulouse de configurations optimisées en pire cas

Bien qu'elle se révèle légèrement moins performante que la solution inclinée, pour une même puissance de panneau, la solution 1 axe vertical présente l'avantage d'être plus compacte et surtout d'avoir une incidence optimale qui varie peu avec le lieu d'installation. Elle accepte, par là même, des réglages identiques dans des zones étendues.

Outre ses performances intrinsèques ici présentées, le concept de « moulin solaire » permet d'exploiter des surfaces non utilisées (ronds-points par exemple) à proximité des usagers au sol ou sur des bâtiments sans être pénalisé par les phénomènes d'ombrages qui conduisent à doubler, voire tripler (en France), la surface des champs solaires par rapport à celle des panneaux qu'ils renferment. A titre indicatif, une surface utile d'environ 3000 m², soit une puissance équivalente à celle fournie par 0,5 MWc de panneaux fixes, peut être exploitée au-dessus d'un disque au sol de 50 m de diamètre (5 kWc sur un disque de 5 m de diamètre). Le ratio de puissance ramenée à la surface au sol est alors d'environ 255 Wc/m² soit près de 10 fois celui des fermes solaires actuellement en exploitation.



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

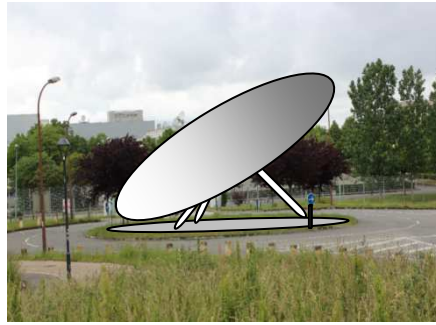


Figure 2 - Moulin solaire sur un rond-point

De plus, la forte inclinaison de la surface exploitée limite sa pollution et facilite son lessivage par l'eau de pluie, notamment dans les zones intertropicales où une incidence minimale de 15° est préconisée pour pallier ce problème qui conduit à dé optimiser les installations.

Le moulin solaire peut s'intégrer à des bâtiments tout en leur assurant une fonction pare-soleil et de climatisation naturelle en été dans le cône libre, toujours à l'ombre, situé sous la surface de récupération d'énergie.

Par ailleurs, l'asservissement solaire permet de mieux répartir la production d'énergie tout au long de la journée et diminue, de ce fait, les besoins en stockage. Il offre également la possibilité de bénéficier de la concentration qui consiste à remplacer une partie de la surface de panneaux photovoltaïques par de la surface de miroir.

2 – Concentration photovoltaïque

Basée sur l'utilisation de loupe ou de miroir, la concentration solaire est utilisée dans certaines cellules photovoltaïques pour focaliser la lumière sur une surface active de très faible dimension. Ainsi les modules CPV de la société Soitec se composent de lentilles de Fresnel pour concentrer 500 fois la lumière du soleil sur de petites cellules solaires multi-jonctions à haut rendement.

Le coût de la cellule est ainsi diminué mais cette dernière présente alors l'inconvénient de ne pouvoir être utilisé que sur un héliostat asservi suivant 2 axes.

Or la concentration photovoltaïque est également compatible d'un asservissement suivant 1 axe. Elle consiste à focaliser de manière homogène à la surface de panneaux photovoltaïques ordinaires de la lumière réfléchiée par des miroirs ; le but étant de remplacer de la surface de panneaux par de la surface de miroir dans un souci d'économie.

Ce principe est notamment appliqué dans le concept du « V-trough concentrator » décrit à la figure 3 qui associe deux miroirs plans à un panneau (1). Mais le taux de concentration géométrique du « V-trough concentrator » est théoriquement limité à 3, avec des miroirs de longueur infinie, et est généralement utilisé avec un taux de 2 comme sur la figure 3 (la longueur des deux miroirs est alors égale à celle du panneau).

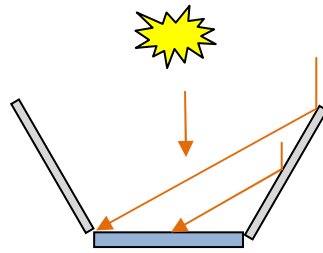


Figure 3 - V-trough concentrator (2 suns)

Cependant la concentration peut être également assurée au moyen de miroirs courbes comme le montre la figure 4.

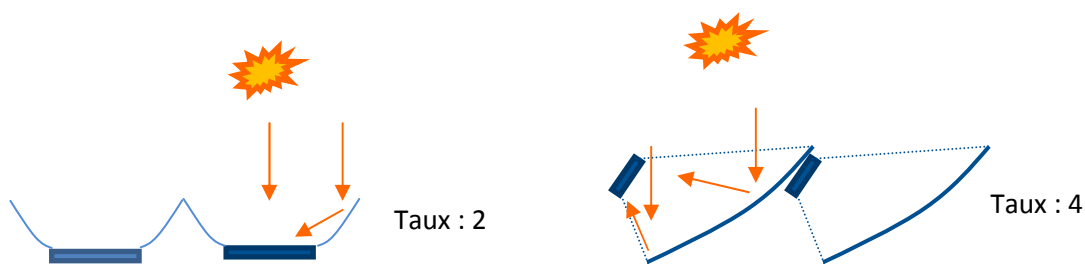


Figure 4 – Concentration par des miroirs courbes

La forme de tels miroirs a fait l'objet d'un brevet d'invention, déposé par la société CAB INNOVATION, qui permet d'assurer une homogénéité de l'ensoleillement à la surface des panneaux quel que soit le taux de concentration choisi. Cette forme diffère de la parabole qui n'offre pas cette caractéristique recherchée.

Ce concept de concentration photovoltaïque permet de remplacer des panneaux par des miroirs afin de diminuer le coût des installations et d'utiliser notamment des panneaux performants mais onéreux en moins grand nombre ; le taux de concentration choisi pouvant être éventuellement très élevé.

Il peut également être utilisé pour alléger la génération électrique d'un système aérospatial tel qu'un dirigeable stratosphérique à enveloppe transparente doté de miroirs de quelques dizaines de microns d'épaisseur, par exemple (figure 5).

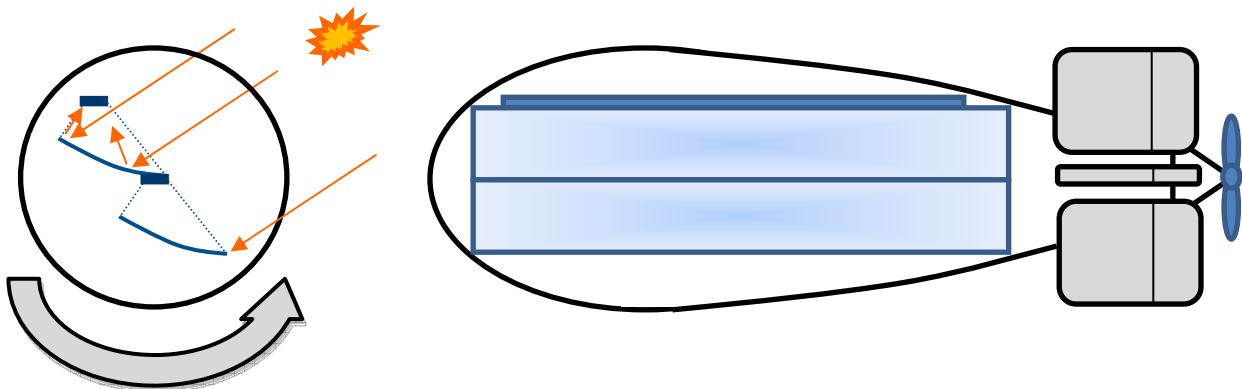


Figure 5 – Génération électrique d'un dirigeable stratosphérique

3 – Applications

Le concept de moulin solaire à concentration photovoltaïque à fait l'objet d'une première application (à 90° d'incidence) sous la forme d'un lampadaire solaire autonome (Figure 6) qui est actuellement en expérimentation à Toulouse pour le compte de la Mairie et d'EDF.



Figure 6 – Lampadaire « Tournesol »

Cette première application sera bientôt suivie de deux autres. L'une porte sur un lampadaire de nouvelle génération modulable en puissance et optimisé pour toutes les latitudes, dont une description est fournie à la figure 7.

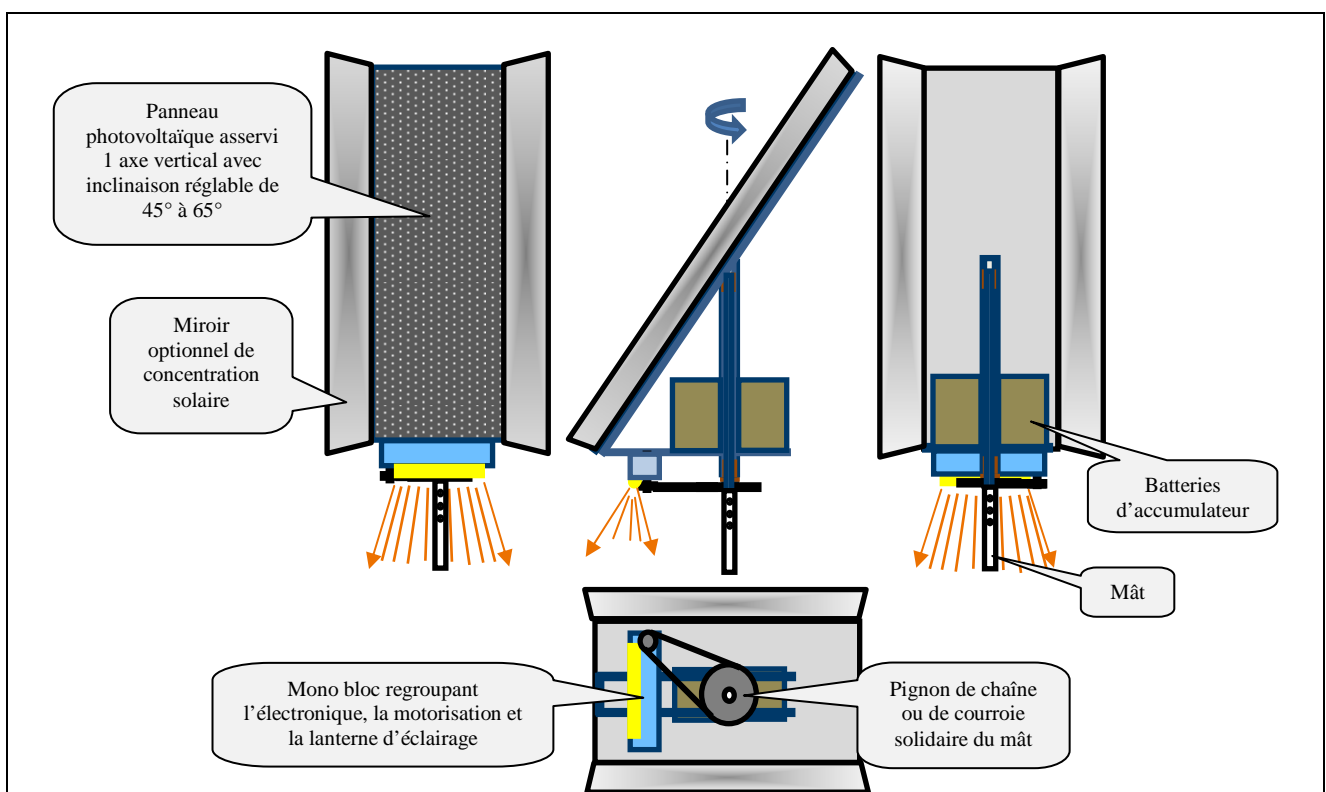


Figure 7 – Lampadaire « Tournesol NG » (modèle déposé à l'INPI)



Journées Nationales sur l'Énergie Solaire

8 au 10 juillet 2014 Campus université Perpignan

L'autre concerne des générateurs de moyenne énergie (1 à 5 KWc) occupant une surface circulaire de 1,5 à 5 m de diamètre, dont un prototype d'évaluation est présenté en figure 8.



Figure 8 – Prototype d'évaluation d'un générateur (250 Wc)

4 – Conclusion

Permettant d'augmenter la production électrique des panneaux photovoltaïques et de réduire leur emprise au sol, le concept de moulin solaire à concentration est susceptible de réduire significativement le coût de l'électricité photovoltaïque.

Il permet d'exploiter des surfaces non utilisées à proximité des usagers au sol ou sur des bâtiments, de réduire le coût du foncier et de limiter la pression sur les terres agricoles.

Il permet, par ailleurs, de rendre autonomes certains équipements électriques montés sur des mâts (lampadaire, vidéo surveillance, relais de télécommunication, etc.) et peut s'intégrer à des bâtiments tout en leur assurant une fonction pare-soleil et de climatisation naturelle en été.

Outre le photovoltaïque, il est également applicable au solaire thermique et est susceptible de favoriser la diffusion de cellules photovoltaïques très performantes mais onéreuses utilisées en moindre quantité grâce à la concentration.

Références :

1 - Sangani C.S., Solanki C.S., Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier 2006.

2 – Outil PVGIS d'estimation du gisement solaire développé par le centre de recherche de l'institut pour l'environnement et le développement durable de la commission européenne :

Europe : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=fr&map=europe>

Afrique : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=africa>