

Production combinée électrique et agricole dans les champs solaires

Aurélien Cabarbaye, André Cabarbaye
CAB INNOVATION
3, rue de la Coquille
31500 Toulouse
contact@cabinnovation.com

Résumé - L'énergie photovoltaïque est-elle susceptible de répondre aux besoins énergétiques de demain sans mettre en péril la production alimentaire d'origine agricole ? Cherchant à répondre à cette problématique, cet article présente deux voies d'amélioration.

- l'augmentation de la production énergétique ramenée à la surface d'occupation au sol, apportée par l'exploitation de surfaces elliptiques inclinées asservies suivant l'axe vertical,
- la possibilité de combiner les productions électrique et agricole dans les champs solaires.

Abstract - Can solar energy meet future energy needs without compromising food production from agriculture? Seeking to address this issue, this paper presents two ways of improvement.

- The increase of photovoltaic energy production per unit area, resulting from the exploitation of elliptical inclined surfaces oriented towards the sun around the vertical axis,
- The ability to combine the power and agricultural production in solar fields.

Mots Clés : Moulin solaire, concentration, photovoltaïque

I. INTRODUCTION

A la suite d'une amélioration des technologies et d'une diminution significative des coûts, la production d'électricité photovoltaïque commence à décoller dans certaines régions du monde même si elle reste encore marginale dans notre pays.

Cette production concerne principalement des champs solaires qui occupent des surfaces de plus en plus vastes. En effet, l'énergie solaire est dispersée à la surface de la Terre et le rendement énergétique des installations reste limité. Les centrales photovoltaïques les plus productives en France présentent un ratio de puissance ramenée à la surface au sol d'environ 30 Wc/m², et cette efficacité relativement médiocre devrait conduire à une augmentation significative de la part du foncier dans le coût des installations futures tout en engendrant une pression sur les terres agricoles difficilement acceptable.

Ainsi en dehors des zones désertiques, la production énergétique s'effectue au détriment des terres agricoles, de la même manière que les biocarburants de première génération. Aussi est-on en droit de se poser la question suivante :

L'énergie photovoltaïque est-elle susceptible de répondre aux besoins énergétiques de demain sans mettre en péril la production alimentaire d'origine agricole ?

Cherchant à répondre à cette problématique, les travaux de la société CAB INNOVATION dans le domaine de l'énergie solaire s'orientent selon deux axes :

- l'augmentation de la production énergétique ramenée à la surface d'occupation au sol,
- la possibilité de combiner les productions électrique et agricole dans les champs solaires.

Cet article présente successivement ces deux voies d'amélioration.

II. EXPLOITATION OPTIMALE DES SURFACES

Outre la dispersion de la ressource énergétique et la faiblesse du rendement des panneaux photovoltaïques (de 15 % à 20 %), la piètre performance des installations actuelles est notamment liée aux phénomènes d'ombrage qui limitent à un tiers environ la surface des panneaux par rapport à celle de leur emprise au sol dans notre pays (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.

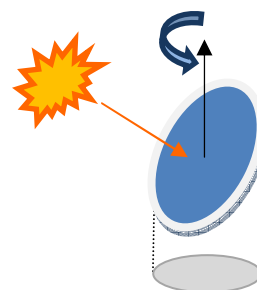


Figure 1 - Exploitation d'une surface elliptique inclinée

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, comme l'illustre la figure 1, permet de maximiser la production d'énergie solaire ramenée à la surface au sol [1]. 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 [2] de la communauté européenne (avec un coefficient de perte pris à 14 %). 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 installation afin d'en simplifier la réalisation ou modérer la prise au vent.

A partir des données de la table 1, la table 2 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 l'apport en surface apporté par l'incidence ($1/\cos(\theta)$). Cet apport est considéré nul dans une configuration 2 axes (ou 1 axe incliné) susceptible de s'orienter dans la direction du zénith.

Pour une même surface d'occupation au sol, le concept de « moulin solaire », à surface elliptique inclinée asservie à la direction du soleil suivant l'axe vertical, permet ainsi de produire plus de 170 % de l'énergie obtenue avec des panneaux fixes, à toutes les latitudes.

	Fixe		2 axes	1 axe vertical		1 axe incliné		1 axe vertical / 45°
	KWh	θ°		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 kWc

	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 ses performances intrinsèques, ce concept permet d'exploiter des terrains non utilisés (ronds-points par exemple comme l'illustre la figure 2) à proximité des usagers au sol ou sur des bâtiments sans être pénalisé par les phénomènes d'ombrages qui conduisent à doubler, voire tripler à nos latitudes, 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 champs solaires actuellement en exploitation.

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.

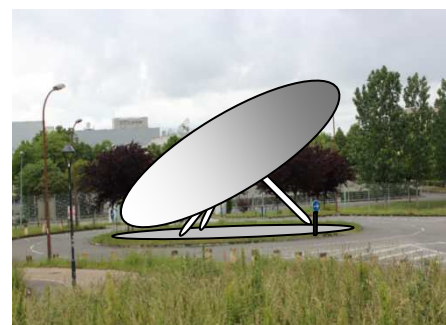


Figure 2 – Moulin solaire sur un rond-point

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.

III. 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 utilisée 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 [3]. 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).

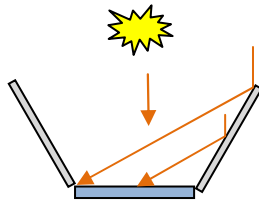


Figure 3 - V-trough concentrator (2 suns)

Cependant la concentration peut être également assurée au moyen de miroirs courbes comme le montrent les figures 4 et 5. 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.

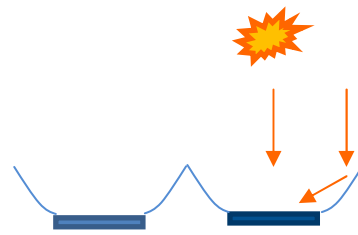


Figure 4 – Taux de concentration de 2

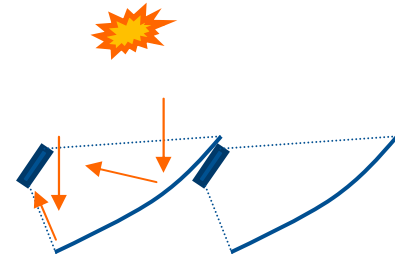


Figure 5 – Taux de concentration de 4

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.

IV. CHAMP DE MOULINS SOLAIRES

De même que les panneaux fixes ou ceux montés sur des héliostats, des moulins solaires peuvent être rassemblés sur un même terrain pour former un champ solaire ou pour recouvrir, par exemple, un parking de supermarché.

La question de leur disposition et éloignement respectif se pose alors pour maximiser la production énergétique et pallier les phénomènes d'ombrages. Deux configurations en damier sont alors envisageables. Celle de la figure 6 dont le taux d'occupation au sol est égal à $\Pi r^2 / l_1 l_2$ et celle de la figure 7 dont le taux est égal à $\Pi r^2 / 2 l_1 l_2$.

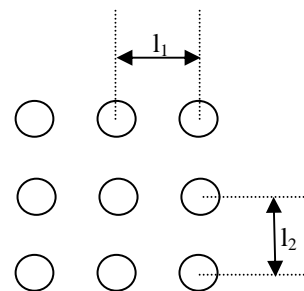


Figure 6 – Configuration en damier plein

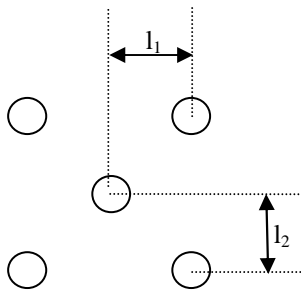


Figure 7 – Configuration en demi-damier

La configuration en damier plein présente des proximités en nord-sud et est-ouest pouvant conduire à des ombrages à midi ou en début et fin de journée. Celle en demi-damier présente des proximités dans une orientation intermédiaire.

A. Dimensionnement pire cas

Un premier dimensionnement a été effectué en pire cas hivers, en interdisant tout ombrage entre moulins adjacents durant la journée autre que celui résultant d'un ensoleillement orienté est-ouest. Ce type de dimensionnement est réalisé ci-après avec la configuration en damier plein et des panneaux inclinés à 45°, à proximité des villes de Toulouse et Dakar, en respectant les conditions d'ombrage indiqué en figure 8.

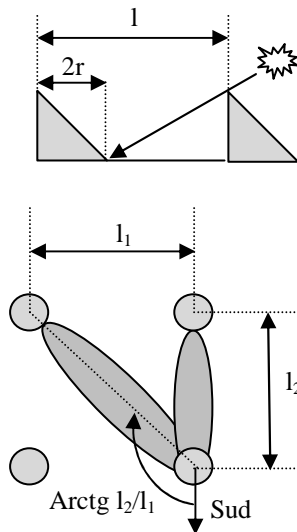


Figure 8 – Conditions d'ombrage

Ces conditions d'ombrage s'expriment par les deux inégalités suivantes :

$$\text{Élévation à midi : } h \geq \text{Arctg}(2r / l_2 - 2r)$$

$$\text{Élévation à azimut } \pm \text{arctg}(l_2/l_1) : h \geq \text{Arctg}(2r / \sqrt{(l_2^2 + l_1^2)} - 2r)$$

Soit $l_2/r \geq 2 + 2/\text{tg } h$ à midi et $\sqrt{(l_2^2 + l_1^2)}/r \geq 2 + 2/\text{tg } h$ quand l'azimut est égal à $\pm \text{arctg}(l_2/l_1)$ le 21 décembre.

La table 4 donne l'écartement entre les moulins dans le cas où leur écartement est identique en nord-sud et est-ouest ($l_1 = l_2 = l$) et la table 5 dans le cas où ces écartements sont dans un rapport $\sqrt{3}$ ($l_2/l_1 = \sqrt{3}$).

21-déc	latitude	Azimut = 0°		Azimut = 45°		l/r	Occupation au sol
		Elévation	l/r min	Elévation	l/r min		
Toulouse	43,6	22,95	6,72	9	10,34	10,34	2,94%
Dakar	14,4	52,15	3,55	37	3,29	3,55	24,87%

Table 4 – dimensionnement pire cas avec $l_2 = l_1$

21-déc	Azimut = 30°			Occupation au sol
	Elévation	l ₁ /r min	l ₂ /r min	
Toulouse	17	4,27	7,40	9,94%
Dakar	46	2,00	3,46	45,34%

Table 5 – dimensionnement pire cas avec $l_2 = l_1\sqrt{3}$

Les tables 6 et 7 correspondent à des dimensionnements sans ombrage durant les 6 meilleurs mois de l'année.

21-mars	latitude	Azimut = 0°		Azimut = 45°		l/r	Occupation au sol
		Elévation	l/r min	Elévation	l/r min		
Toulouse	43,6	45,99	3,93	36,14	3,35	3,93	20,32%
Dakar	14,4	75,19	2,53	69,48	1,94	2,53	49,13%

Table 6 – dimensionnement mi-année ($l_2 = l_1$)

21-mars	Azimut = 30°			Occupation au sol
	Elévation	l ₁ /r min	l ₂ /r min	
Toulouse	41,8	2,12	3,67	40,42%
Dakar	73,02	2,00	3,46	45,34%

Table 7 – dimensionnement mi-année ($l_2 = l_1\sqrt{3}$)

B. Dimensionnement avec ombrage maîtrisé

Le dimensionnement en pire cas est très dimensionnant car une ombre défilante peut n'affecter qu'une partie marginale de la surface utile, de manière transitoire durant la saison où la production d'électricité est la plus faible. Le câblage et la disposition des panneaux photovoltaïques sur la surface utile peuvent alors être conçus de manière à limiter les pertes engendrées par un ombrage partiel.

Aussi pour dimensionner des installations tolérant la perte de quelques pour cent de leur production d'énergie annuelle, un simulateur d'ombrage est actuellement en cours de développement. S'appuyant sur l'outil générique de simulation de Monte-Carlo, SIMCAB de CAB INNOVATION, celui-ci procédera de la manière suivante :

- Tirage aléatoire d'un point de la surface utile elliptique d'un moulin solaire (ou d'un panneau fixe),
- Tirage d'un jour dans l'année et d'une heure dans la journée,
- Calcul de l'azimut et de l'élévation solaire au lieu d'installation,
- Test d'occultation éventuelle par un autre moulin solaire (ou un autre panneau),

- Pondération de la puissance reçue selon le lieu d'installation, le jour dans l'année et l'heure de la journée (avec prise en compte de l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser).

Couplé à l'outil d'optimisation GEN CAB, ce simulateur permettra d'optimiser globalement la configuration des paramètres de dimensionnement de l'installation en considérant une pente éventuelle du terrain.

V. PRODUCTION COMBINÉE ÉLECTRIQUE ET AGRICOLE

Une production combinée électrique et agricole peut s'effectuer sur un même terrain afin de répondre conjointement aux besoins énergétiques et alimentaires. La production électrique pourrait être du même ordre que celle des champs solaires actuellement en exploitation car la surface utile de ces derniers est limitée par les phénomènes d'ombrage et parce que le concept de moulin solaire apporte un gain énergétique significatif (de 70% environ) pour une même surface d'occupation au sol.

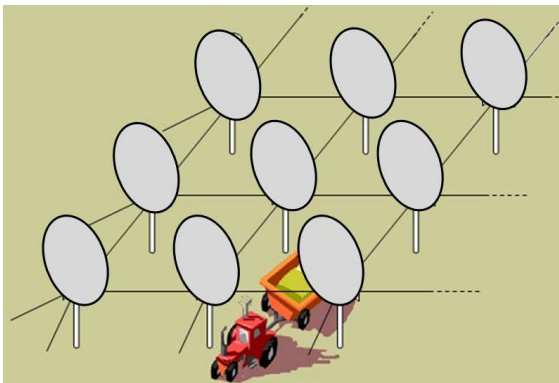


Figure 9 – Production combinée électrique et agricole

De plus, le maillage d'un grand nombre de dispositifs de production électrique installés sur des mâts, comme l'illustre la figure 9, permettrait non seulement d'assurer une production conjointe électrique et agricole, mais pourrait être aussi bénéfique à cette dernière. En effet, les mâts peuvent servir de support de serres, de moyens d'arrosage ou de protection divers (contre la grêle, les oiseaux, les sauterelles...), tout en étant reliés par des câbles pour répartir les efforts mécaniques de l'installation.

Selon le lieu considéré, l'ombrage défilant généré par les dispositifs doit conduire à une diminution d'ensoleillement

compatible avec les cultures envisagées. Cette contrainte ne concerne évidemment que la période entre les semis et les moissons et exclue donc la saison d'hiver à nos latitudes. Dans les zones arides de l'ombrage peut être relativement élevé, afin de limiter les effets d'un soleil trop ardent, et les dispositifs peuvent retenir l'humidité de la même manière que les palmiers, en constituant ainsi de véritables oasis artificiels.

VI. CONCLUSION

Permettant d'augmenter la production électrique des panneaux photovoltaïques et de réduire leur emprise au sol, le concept de moulin solaire est susceptible de réduire 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 offre également la possibilité d'exploiter conjointement sur un même terrain une production électrique et agricole de manière efficiente.

Il peut être associé à la concentration, consistant à remplacer des panneaux photovoltaïques par des miroirs afin de diminuer le coût des installations.

REFERENCES :

1 - André CABARBAYE, Aurélien CABARBAYE, Moulin solaire et concentration photovoltaïque, journées Nationales sur l'Énergie Solaire, 8-10/7/2014, Perpignan

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>

3 - 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.