

# Etude et réalisation d'une installation PV-MT industrielle

Samir Arfa<sup>#1</sup>, Najeh Ben Abdall ALLAH<sup>\*2</sup>

<sup>#</sup> *Department genie électrique, ISET de KAIROUAN-DGET-TUNISIA  
Campus Universitaire Raccada – BP 3191 Raccada, KAIROAUN, TUNISIA*

<sup>1</sup>arfa.samir@gmail.com

**Abstract**— Dans le cadre de la recherche appliquée et l'ouverture de l'institut supérieurs des études technologique de Kairouan sur le milieu socio-économique, le présent travail consiste l'étude, la modélisation et le dimensionnement d'une installation photovoltaïque PV-MT d'une entreprise industrielle. Le dimensionnement permet de déterminer le nombre des panneaux PV nécessaires, les valeurs des grandeurs électriques caractérisent cette installation ainsi que le matériel et les composants électroniques nécessaires. Puis, la conception de l'installation à l'aide du logiciel PV SOL afin de concevoir l'architecture de placement 3D des panneaux et le montage des matériels utilisés. Enfin, la réalisation d'une étude techno-économique et la préparation du bilan énergétique entre la production et la consommation ainsi que l'étude économique et financière qui permet de savoir la durée de subvention du budget dépenser par l'entreprise. De plus, cette étape permette de déterminer l'économie de l'énergie réalisée grâce à l'utilisation de l'énergie renouvelable photovoltaïque PV. Et les avantages de l'utilisation des énergies renouvelables pour la protection de l'environnement et la réduction de l'émission du CO<sub>2</sub> qui provoque la pollution.

**Keywords**—Photovoltaïque; PV SOL; Dimensionnement; Installation industrielle MT, Etude technoeconomique;

## I. INTRODUCTION

Il est très clair que le danger majeur de la consommation excessive du stock de ressources naturelles(fossiles) réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. De plus, est face aux multiples crises économiques et pétrolières provoqués, la recherche scientifique s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de développement technologiques.

L'Etat tunisienne a été leader dans le secteur des énergies renouvelables par rapport aux pays arabes et africains. Elle est parmi les premières pays qui ont créés le cadre juridique pour l'utilisation de ce type des énergies (Loi N°2015-12 du 11 Mai 2015 [JORT Tunisienne]). Cette loi permet l'autorisation aux consommateurs de l'énergie électrique de produire l'énergie à partir des ressources renouvelables, et la vente d'électricité au réseau nationale en cas d'excès.

L'objet de ce travail de recherche appliquée est focalisé sur l'énergie photovoltaïque afin d'alimenter une charge industrielle. L'objectif est de dimensionner et concevoir le modèle de l'installation photovoltaïque. Ensuite, réalisée l'étude technoeconomique avec la rentabilité de cette installation charge, tel que le bilan de l'étude financière (coût de production PV, coût du matériels nécessaires, coût de consommation de l'énergie, cout de l'étude et du dimensionnement.

Le présent travail sera planifié sur six parties. En premier lieu présentation d'une idée sur le secteur de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque PV en Tunisie. Après, une présentation du principe de l'énergie PV. La partie suivante sera consacrée au dimensionnement d'une installation photovoltaïque industrielle. La partie quatrième planifiée pour le bilan énergétique annuel de la société. Ensuite, l'étude technoeconomique et financière de l'installation sera présentée dans la partie suivante. La dernière partie sera réservée aux résultats techniques et économiques.

## II. EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE EN TUNISIE

La source solaire en Tunisie est très favorable pour la production d'énergie photovoltaïque. Ce secteur est encore non développé et s'est limité uniquement sur le volet résidentiel domestique à petites échelles. En 2022 un million m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques ont été installés. Dans ce secteur d'énergie renouvelable, la Tunisie prévoit d'atteindre une puissance qui doit dépasser la valeur de 1500 MW en 2030 selon le projet de production de l'électricité de la Tunisie 2010-2030 [1].

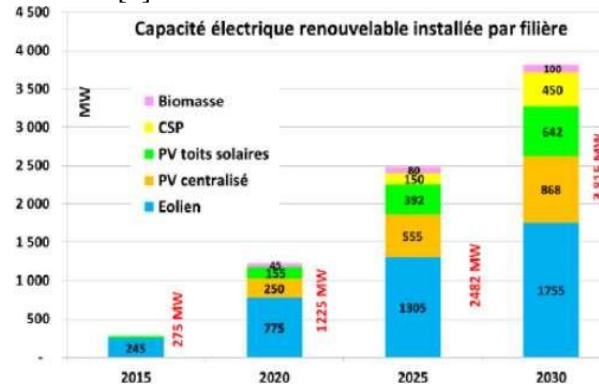


Fig. 1 Production de l'électricité issue des énergies renouvelables de la Tunisie sur la période 2010-2030

Par comparaison à ses premières expériences, la Tunisie est en cours de lancer une stratégie beaucoup plus prometteuse et ambitieuse dans le but de lever le taux d'intégration des installations PV dans la production nationale de l'électricité. Cette stratégie se concentre principalement sur la diversification et la promotion de l'utilisation des sources d'énergie renouvelable, notamment en augmentant la part des énergies renouvelables dans la production nationale d'électricité à 30 % d'ici 2030.

## III. ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion des rayonnements du soleil à l'aide d'un système photovoltaïque.

Une cellule individuelle produit généralement une tension d'environ 0,5 V et une puissance faible, variant de 1 à 3 W. L'assemblage de plusieurs cellules pour former un panneau permet une production électrique significative. En connectant les cellules en série, la tension totale augmente, tandis que la mise en parallèle augmente le courant pour une tension donnée. La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique suivant [2-3] :

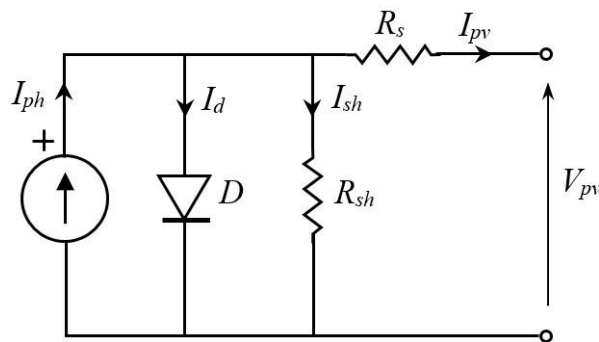


Fig. 2 Modèle électrique de la cellule PV.

L'équation mathématique du modèle électrique d'une cellule PV est présentée par l'équation suivante [4] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1)$$

Avec :  $V_T = \frac{N_s n k T}{q}$

- ✓ Le photo-courant  $I_{ph}$  est proportionnel à l'irradiation.
- ✓ La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité.

Les deux résistances sont sources des pertes internes:

- ✓  $R_s$  modélise les pertes ohmiques. Elle est normalement très petite.
  - ✓  $R_{sh}$  modélise les courants parasites. Elle est de l'ordre de quelques ohms ( $4 \Omega - 30 \Omega$ ).
- Noté bien que:
- ✓  $I_{ph}$  représente le courant généré par l'ensoleillement (A)
  - ✓  $I_0$  illustre le courant de saturation de D (A)
  - ✓  $k$  représente la constante de Boltzmann ( $K = 1,38.10^{-23}$ )
  - ✓  $q$  est la charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}$  C)
  - ✓  $T$  est la température de la cellule ( $^{\circ}K$ )

#### IV. ETUDE TECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV RACCORDÉ

##### A. Choix du panneau

Le choix du panneau photovoltaïque pour l'installation est très important car il est l'élément basique de l'installation puisque son rôle est la conversion des rayons solaire en électricité.

- ✓ Parmi les critères du choix du panneau solaire:
- ✓ La puissance maximale du panneau
- ✓ Le rendement énergétique du panneau
- ✓ La constante de la température
- ✓ La surface nécessaire pour l'emplacement

##### B. Choix de l'onduleur

L'onduleur permet de convertir l'intensité du courant continu produit par les modules PV en un courant alternatif.

- ✓ Les critères du choix de l'onduleur les plus importants sont:
- ✓ La puissance de l'onduleur doit être comprise entre 0,8 et 1,2 de la puissance de champ
- ✓ La plage de tension électrique d'entrée.
- ✓ La tension et la fréquence nominale.
- ✓ Le rendement de l'onduleur.

##### C. Calcul de la tension et du courant du panneau

L'identification des paramètres caractéristiques électriques nominales du panneau est très important dans le cas du dimensionnement du l'onduleur et du câble électrique. Ci-dessous, nous présenterons les expressions de ces caractéristiques:

$$V_{oc_{min}} = (V_{oc} \times \alpha \times \Delta T) + V_{oc} \quad (2)$$

$$V_{oc_{max}} = (V_{oc} \times \alpha \times \Delta T) + V_{oc} \quad (3)$$

Tel que:

- ✓  $V_{oc}$  : Tension de sortie du panneau PV
- ✓  $\alpha$  : Coefficient de température ( $V_{oc}$ ) du panneau
- ✓  $\Delta T$  : Déphasage entre la valeur de la température du STC et la température maximale où minimale de la région ( $-10^{\circ}$  ou  $70^{\circ}$ ).

$$I_{cc_{min}} = (I_{cc} \times \beta \times \Delta T) + I_{cc} \quad (4)$$

$$I_{cc_{max}} = (I_{cc} \times \beta \times \Delta T) + I_{cc} \quad (5)$$

Sachant que:

- ✓  $I_{cc}$  : Courant de sortie du panneau
- ✓  $\beta$  : Coefficient de température ( $I_{cc}$ )

Définir les chaînes est obligatoire afin que l'onduleur fonctionne avec son rendement maximal.

##### D. Nombre des panneaux maximaux en série

$$Np_{max} = \frac{U_{max}}{V_{oc_{max}}} \quad (6)$$

- ✓  $Np_{max}$  : Nombre des panneaux maximaux montés en série pour chaque string.
- ✓  $U_{max}$  : Tension d'entrée maximale pour l'onduleur

E. Nombre des panneaux minimaux en série

$$Np_{min} = \frac{U_{min}}{Voc_{max}} \tag{7}$$

✓

$Np_{min}$  : Nombre des panneaux minimaux montés en série pour chaque string.

✓

$U_{min}$  : Tension d'entrée minimale pour l'onduleur

F. Nombre des panneaux maximale en parallèle

$$N_{ch_{max}} = \frac{I_{max}}{Icc_{max}} \tag{8}$$

✓

$N_{ch_{max}}$  : Nombre des chaînes maximales montées en parallèle

✓

$I_{max}$  : Courant maximal pour l'onduleur.

V. MÉTHODE ET OUTILS UTILISÉS

La conception de l'installation PV est réalisée à l'aide du logiciel PVSOL. C'est un outil très utilisé par les installateurs des installations PV.

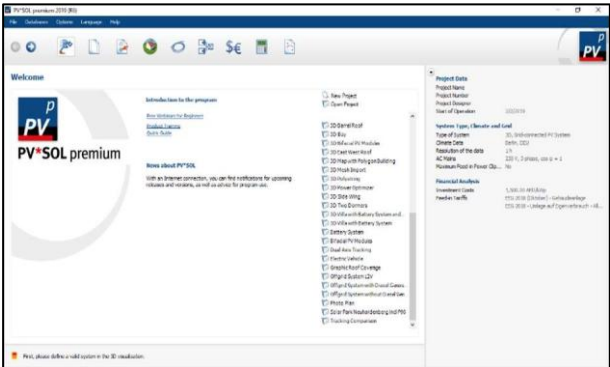


Fig. 3 PVSOL

La structure générale de l'installation des panneaux photovoltaïques de ce client est affichée par la figure ci-dessous:

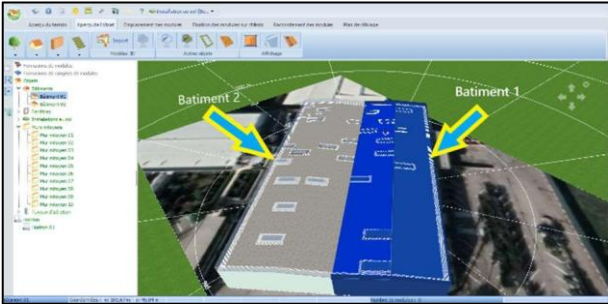


Fig. 4 Vue de dessus de l'installation PV du client



Fig. 5 Vue de dessus de l'installation PV du client

La figure suivante présente le schéma de câblage réel des panneaux solaires :

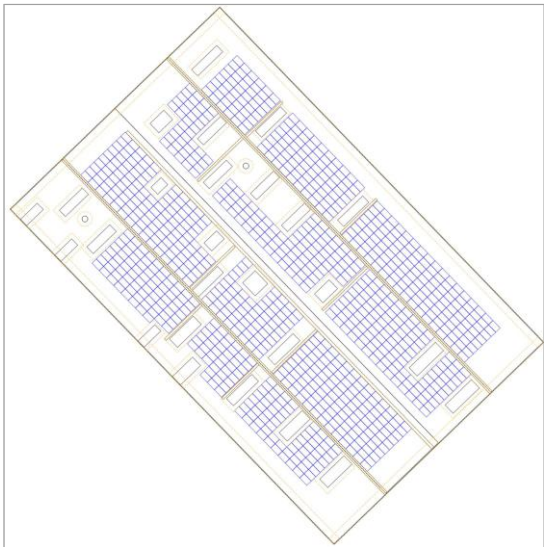


Fig. 6 Vue de dessus de l’installation PV du client

VI. SCHÉMA DE CÂBLAGES DES PANNEAUX PV

Le schéma de câblage des panneaux PV est indiqué par la figure suivante :

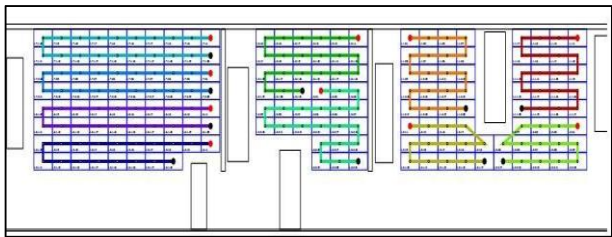


Fig. 7 Architecture de câblage des panneaux PV

VII. BILAN ÉNERGÉTIQUE ANNUELLE DE LA SOCIÉTÉ

Le bilan énergétique de ce client est identifié par les figures suivantes

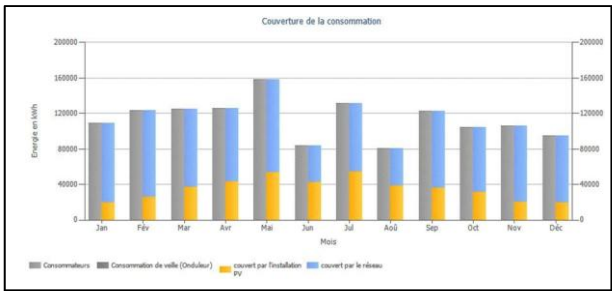


Fig. 8 Bilan de la consommation annuelle

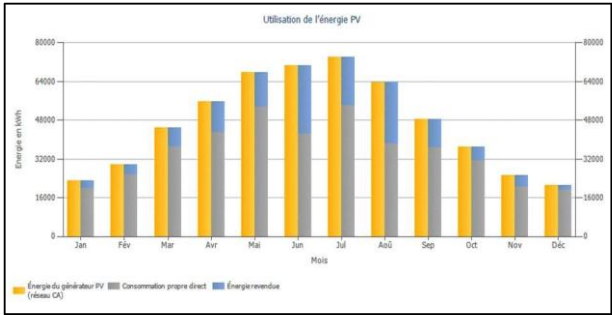


Fig. 9 Bilan de transfert et interchange photovoltaïque

VIII. FLUX DE TRÉSORERIE

À partir de la figure suivante on peut conclure que dans une durée de 20 ans notre client va payer un montant qui dépasse 1 413 280 DT au STEG pour couvrir ses besoins d’énergie mais grâce à cette installation ce montant sera annulé.

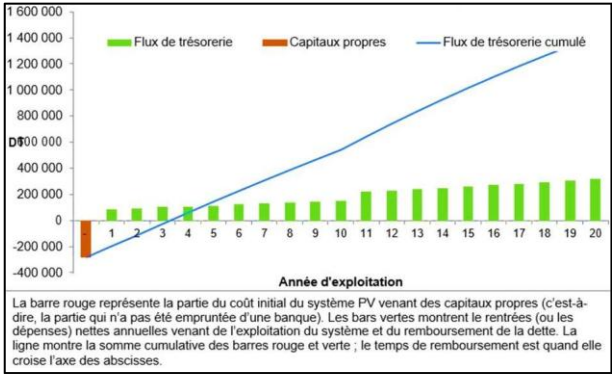


Fig. 10 Evolution du flux trésorerie

IX. PAYEMENT DE DE LA DETTE

Comme nous avons dit dans le but de payer le coût de l’installation le client va bénéficie d’une subvention de l’état de 20% et d’un service de dette de 70% du cout totale de l’installation ce montant de dette sera payer par facilité sur 10 ans grâce à la réduction de la facture d’électricité suite à cette installation.

A partir de ce graphe on peut conclure que dans 20 ans la cumulation de la réduction de la facture va jusqu’à 4 736 177 DT sans compter le montant reçu suite à la vente de l’excédent, seulement 14.6% de ce montant vont couvrir le service de la dette et 5.9% seront payer au service de la maintenance.

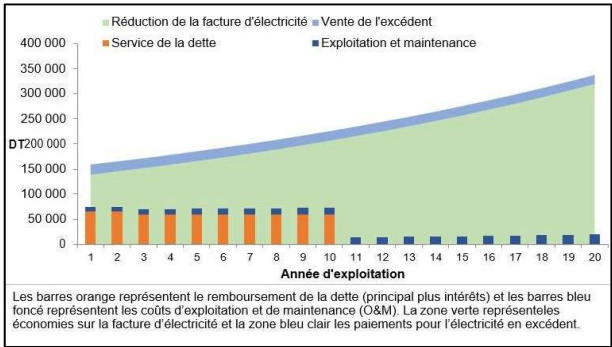


Fig. 11 Rentabilité de l’installation PV


X. RÉSULTATS DE L’INSTALLATION PV

L’étude techno-économique et le bilan énergétique de la production et de la consommation annuelle de ce projet à la fois ainsi que la rentabilité financière pour cette installation sont donnés par les tableaux suivants:

TABLE 1 INSTALLATIONS PV

Puissance du générateur PV	390,00	kWc
Rendement annuel spéc.	1.445,93	kWh/kWc
Coefficient de performance de l'installation (PR)	87,21	%
Baisse de rendement due à l'ombrage	4,3	%/Année
Énergie du générateur PV (réseau CA)	563.977	kWh/Année
Consommation propre	422.590	kWh/Année
Régulation au point d'alimentation	0	kWh/Année
Énergie revendue	141.387	kWh/Année
Part de consommation propre	74,9	%
Emissions CO2 évitées	265.038	kg / année

Énergie du générateur PV (réseau CA)




Consommation propre  
Régulation au point d'alimentation  
Énergie revendue

Fig. 12 Coût de la facture en DT

TABLE 2 CONSOMMATEURS

Consommateurs	1.364.439	kWh/Année
Consommation de veille (Onduleur)	66	kWh/Année
Consommation totale	1.364.505	kWh/Année
couvert par l'installation PV	422.590	kWh/Année
couvert par le réseau	941.915	kWh/Année
Taux de couverture solaire	31,0	%

Consommation totale



couvert par l'installation PV  
couvert par le réseau

Fig. 13 Consommation totale

TABLE 3 BILAN ENERGITIQUE

Variable	Valeur	Unité
Consommation brute annuelle	1 364 439	kWh
Production annuelle	563 977	kWh
Energie autoconsommée annuelle, tous sites	422 590	kWh
Transport d'énergie PV annuelle	0	kWh
Energie cédée annuelle (excédent)	141 387	kWh
Taux de couverture totale (Ratio Production PV: Consommation)	31%	-
Pourcentage de la production cédée (excédent)	25%	-
Pourcentage de la production transportée	0%	-
Montant à rembourser à la fin de l'année	0	DT/an
Coût Moyen Actualisé de l'Énergie (LCOE) avec subvention	0,144	DT/kWh
Facture annuelle sans PV	319 629	DT/an
Facture annuelle avec PV	187 153	DT/an
Vente annuelle de l'excédent à la STEG	20 119	DT/an
Temps de retour sur investissement	3,3053	années



TABLE 4 BILAN TECHNOECONOMIQUE

Variable	Valeur	Unite
Coût de l'installation Hors Taxes, Hors Subvention	997 406	DT
Subvention	199 481	DT
	20%	%
Coût net total de l'installation TTC, Subvention comprise)	917 613	DT
Taille de l'installation PV	390	kWc
Région (site PV)	Tunis	
Orientation des panneaux	Sud-ouest	
Site 1 (avec système PV)		
Courbe de charge	Saisie Manuelle	
Consommation annuelle moyenne	0	kWh
Tarif Souscrit STEG	Tarif à Poste Horaire	
Site 2 (à distance)		
Courbe de charge	Aucun	
Consommation annuelle moyenne	0	
Tarif Souscrit STEG	Tarif à Poste Horaire	
Site 3 (à distance)		
Courbe de charge	Aucun	
Consommation annuelle moyenne	0	
Tarif Souscrit STEG	Tarif à Poste Horaire	
Site 4 (à distance)		
Courbe de charge	Aucun	
Consommation annuelle moyenne	150 000	
Tarif Souscrit STEG	Tarif à Poste Horaire	

XI. CONCLUSION

Le travail présenté dans ce papier consiste à dimensionner une installation photovoltaïque raccordée au réseau MT avec autoconsommation au sein de l’entreprise du client énergie solaire, au début nous avons présenté l’entreprise avec une petite description, ensuite nous avons donnés quelque notion de base sur le domaine de l’énergie photovoltaïque et nous avons fini par un dimensionnement d’une installation PV

L’énergie photovoltaïque en Tunisie est une bonne solution pour produire de l’électricité et pour aussi réaliser des bénéfices économiques face à l’augmentation successive du cout de l’électricité de plus une autre point fort pour l’investissement dans ce type de projet c’est que en Tunisie nous profitons d’un taux de production un peux élever grâce à la durée de l’ensoleillement annuelle par rapport au pays européens, malgré ces avantages l’investissement dans ce domaine en Tunisie est faible par rapport à les autres pays.



Dans ce travail nous avons réalisé une étude d’une installation PV raccordée au réseau MT en Tunisie en commençant par une étude technique et en terminant par une étude de rentabilité.

ABREVIATIONS UTILISEES

Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
STEG	Société Tunisien d’Electricité et de Gaz	DT	Dinar Tunisien
PV +IPV	Photovoltaïque+installation photovoltaïque	TVA	Taux de la Taxe à la valeur Ajouté
kW.h	kilo Watt heure	CA	Courant Alternatif
TTC	Toute Taxes comprises	LCOE	Coût Moyen Actualisé de l’Énergie

REFERENCES

[1] Christopher Gross, ‘Projet « Promotion des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique en Tunisie’, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH’, Le marché photovoltaïque en Tunisie, Juillet 2013.

[2] Bensaci Wafa, ‘Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT’, Mémoire master, université kasdi Marbah Ouargla, 2012.

[3] A. Benayad, ‘Modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing’, mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Université de Béjaia 2011.

[4] Fatima Zohra Tayaoui, ‘Utilisation de composites à base de polymères conjugués dans les cellules photovoltaïques pour la conversion du rayonnement solaire’, Mémoire de mastère, Soutenue publiquement le 29- 06 -2013