

Évaluation de la rentabilité technique et économique d'une installation PV-MT industrielle

Assessment of the technical and economic viability of industrial PV-MT installation

Samir Arfa ^{#1}, Najeh Ben Abdall ALLAH ^{*2}

[#] *Department genie électrique, ISET de KAIROUAN-DGET-TUNISIA
Campus Universitaire Raccada – BP 3191 Raccada, KAIROAUN, TUNISIA*

¹arfa.samir@gmail.com

Abstract— Dans le cadre de l'ouverture de l'université sur son environnement extérieur, dans ce contexte, s'inscrit ce travail qui consiste en la conception et l'étude d'une installation photovoltaïque moyenne tension PV-MT industrielle raccordée au réseau et dans ce but de réduire les dépenses de l'électricité de cette entreprise. Les atouts de ce travail mettent en évidence l'importance de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour alimenter une entreprise commerciale. Le majeur avantage pour l'industriel est d'optimiser les dépenses de la charge énergétique de la société. En outre, la tendance de l'économie mondiale vise à exiger la certification de l'empreinte carbonique pour les produits industriels lors de l'exportation et de l'importation. La présentation de ce travail commence par la détermination du profil de charge électrique de cette entreprise, à travers lequel on identifie l'évolution de la courbe de charge journalière, mensuelle et annuelle afin de bien déterminer le bilan de l'énergie de l'entreprise. En se basant sur ce bilan, nous procédons à l'étude technicoéconomique et financière requise pour démontrer l'optimisation réalisée au niveau du coût de l'énergie. Les résultats obtenus exposent de manière limpide l'optimisation réalisée grâce à cette installation. De plus, les résultats contestent la progression du remboursement du coût de cette installation.

Abstract— As part of the university's efforts to open up to its external environment, this project involves the design and study of an industrial medium-voltage PV-MT photovoltaic installation connected to the grid with the aim of reducing this company's electricity costs. The strengths of this work highlight the importance of using photovoltaic energy to power a commercial enterprise. The main advantage for manufacturers is that they can optimize the company's energy costs. In addition, the global economic trend is moving toward requiring carbon footprint certification for industrial products during export and import. The presentation of this work begins with determining the electrical load profile of this company, through which we identify the evolution of the daily, monthly, and annual load curve in order to accurately determine the company's energy balance. Based on this assessment, we carry out the necessary technical, economic, and financial studies to demonstrate the optimization achieved in terms of energy costs. The results obtained clearly demonstrate the optimization achieved thanks to this installation. Furthermore, the results challenge the progression of the reimbursement of the cost of this installation.

Keywords— Installation photovoltaïque IPV; conception 3D; bilan énergétique; rentabilité économique étude financière

I. INTRODUCTION

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ces réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste, principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. De plus et en raison de l'augmentation du coût des énergies fossiles, les experts du secteur recourent d'autres sources renouvelables et vertes.

Aujourd'hui, on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, à savoir l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote, qui sont responsables du réchauffement de la terre [5,6].

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Ce travail présente une étude qui permet de dimensionner une installation photovoltaïque moyenne tension PV-MT accompagnée par un bilan technicoéconomique qui présente la rentabilité de ce travail et l'impact économique de l'utilisation de l'énergie PV.

II. MARCHÉ DE LA PHOTOVOLTAÏQUE EN TUNISIE

Le marché de l'énergie solaire en Tunisie connaît une croissance annuelle grâce aux économies que les installations solaires procurent aux utilisateurs, et au soutien apporté par l'Etat tunisien aux clients raccordés aux réseaux MT et HT. Puisque la production de l'électricité à partir du solaire élimine l'émission du gaz CO₂ provenant de la production à partir des sources conventionnelles.

La subvention est de 20 % du coût de l'installation, ainsi l'élargissement du marché est dû grâce au service de la dette pour ce type de projet qui peut aller jusqu'à 70 % du coût de l'installation. Donc l'investissement dans un projet PV est plus favori à un autre investissement.

III. INSTALLATION PV-MT RACCORDÉ

Pour dimensionner l'installation, nous avons utilisé le logiciel PV SOL. Pour réaliser cette étape, nous devons avoir besoin du profil de charge et de l'évolution de la consommation journalière, mensuelle, saisonnière et même annuelle de la société, afin de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, le matériel correspondant. La consommation énergétique est identifiée à partir de l'historique le plus récent de la facture énergétique du fournisseur de l'énergie électrique.

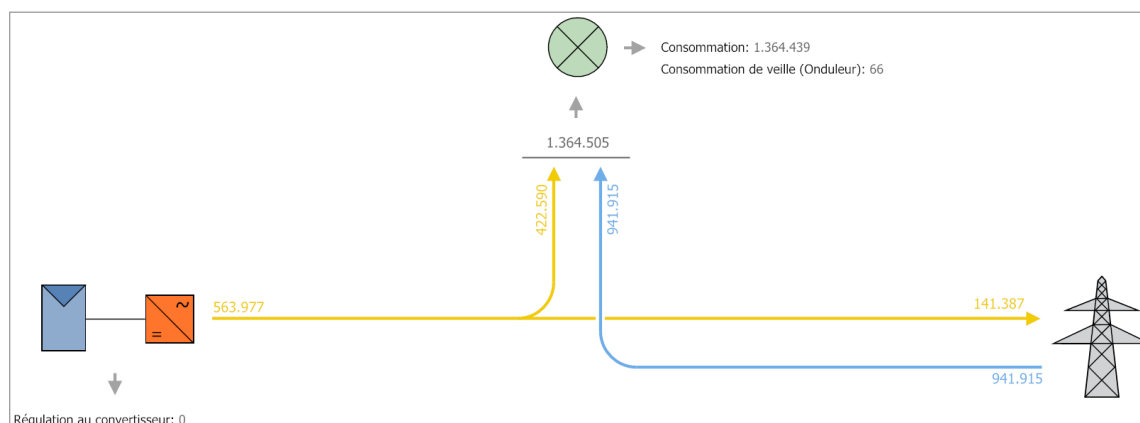


Fig. 1 Installation photovoltaïque MT raccordée

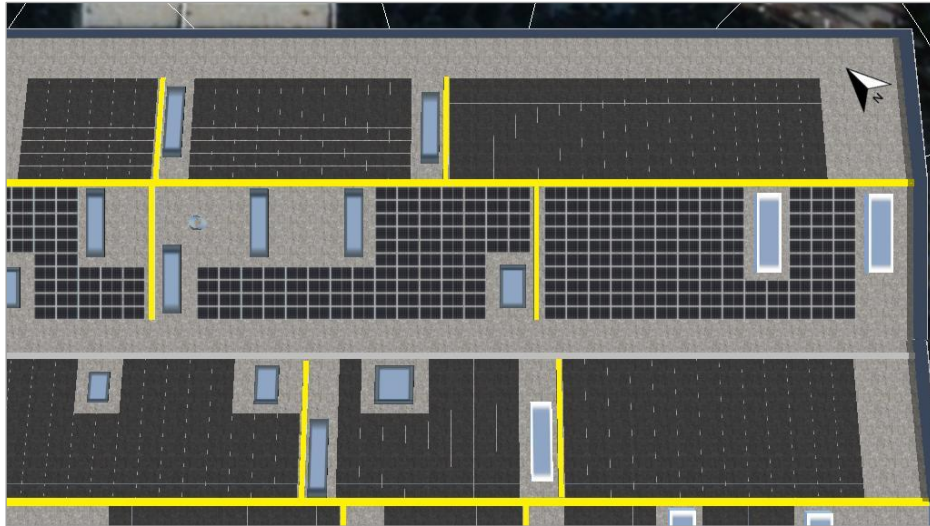


Fig. 2 Aperçu de dessus de l'installation PV

IV. BILAN ÉNERGÉTIQUE ANNUEL DE LA SOCIÉTÉ

L'étude technique et économique de l'installation, ici, a pour objectif de déterminer, en premier lieu, le coût du matériel nécessaire ainsi que le coût de la main d'œuvre. De plus, elle permet de déterminer la rentabilité de cette installation ainsi que l'optimisation budgétaire au niveau de la charge énergétique. On note aussi que l'objectif de l'étude permet de présenter le bénéfice financier et l'impact de l'utilisation de ce type d'énergie sur l'environnement et la pollution.

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide Rechercher des outils adaptés Partager											
<div> <div>Calibri 11 A</div> <div> <div>Standard</div> <div>Mise en forme conditionnelle</div> <div>Mettre sous forme de tableau</div> <div>Styles de cellules</div> </div> <div> <div>Insérer</div> <div>Supprimer</div> <div>Format</div> </div> <div> <div>Σ</div> <div>Rechercher et sélectionner</div> </div> </div>											
<div> <div>Presse-papiers</div> <div>Police</div> <div>Alignement</div> <div>Nombre</div> </div>											
<div> <div>C8</div> <div>A B C D E F G H I J K L</div> </div>											
1	Démarrer l'extrapolation										
2											
3	factures mensuel	consommation (kWh/mois)		fin de période	consommation (kW)	fin de période	consommation (kW)	fin de période	consommation (kW)	fin de période	consommation (kW)
4	janvier			mer 1/1/20 0:10		sam 1/2/20 0:10		dim 1/3/20 0:10		mer 1/4/20 0:10	
5	février			mer 1/1/20 0:30		sam 1/2/20 0:30		dim 1/3/20 0:30		mer 1/4/20 0:30	
6	mars			mer 1/1/20 0:40		sam 1/2/20 0:40		dim 1/3/20 0:40		mer 1/4/20 0:40	
7	avril			mer 1/1/20 0:50		sam 1/2/20 0:50		dim 1/3/20 0:50		mer 1/4/20 0:50	
8	mai			mer 1/1/20 1:00		sam 1/2/20 1:00		dim 1/3/20 1:00		mer 1/4/20 1:00	
9	juin			mer 1/1/20 1:10		sam 1/2/20 1:10		dim 1/3/20 1:10		mer 1/4/20 1:10	
10	juillet			mer 1/1/20 1:20		sam 1/2/20 1:20		dim 1/3/20 1:20		mer 1/4/20 1:20	
11	août			mer 1/1/20 1:30		sam 1/2/20 1:30		dim 1/3/20 1:30		mer 1/4/20 1:30	
12	septembre			mer 1/1/20 1:40		sam 1/2/20 1:40		dim 1/3/20 1:40		mer 1/4/20 1:40	
13	octobre			mer 1/1/20 1:50		sam 1/2/20 1:50		dim 1/3/20 1:50		mer 1/4/20 1:50	
14	novembre			mer 1/1/20 2:00		sam 1/2/20 2:00		dim 1/3/20 2:00		mer 1/4/20 2:00	
15	décembre			mer 1/1/20 2:10		sam 1/2/20 2:10		dim 1/3/20 2:10		mer 1/4/20 2:10	
16				mer 1/1/20 2:20		sam 1/2/20 2:20		dim 1/3/20 2:20		mer 1/4/20 2:20	
17	Année	2020		mer 1/1/20 2:30		sam 1/2/20 2:30		dim 1/3/20 2:30		mer 1/4/20 2:30	
18				mer 1/1/20 2:40		sam 1/2/20 2:40		dim 1/3/20 2:40		mer 1/4/20 2:40	
19	Notes d'utilisation			mer 1/1/20 2:50		sam 1/2/20 2:50		dim 1/3/20 2:50		mer 1/4/20 2:50	
20	1) Entrer la consommation totale de chaque mois			mer 1/1/20 3:00		sam 1/2/20 3:00		dim 1/3/20 3:00		mer 1/4/20 3:00	
21	entrées	extrapolation		mer 1/1/20 3:10		sam 1/2/20 3:10		dim 1/3/20 3:10		mer 1/4/20 3:10	

Fig. 3 Outil d'extrapolation de courbe de charge

L'évolution de la courbe de charge de cette entreprise est illustrée par la figure suivante:



Fig. 4 Courbe de la charge électrique annuelle de l'entreprise

On obtient cette consommation détaillée en se basant sur l'historique de consommation le plus récent, en évaluant légèrement la variation de charge. Cette estimation nous aidera à dimensionner cette installation photovoltaïque et à établir le bilan énergétique.

On peut voir dans la figure suivante la couverture de la consommation entre le réseau et l'installation photovoltaïque PV. L'installation PV raccordée est cruciale pour assurer l'autonomie.

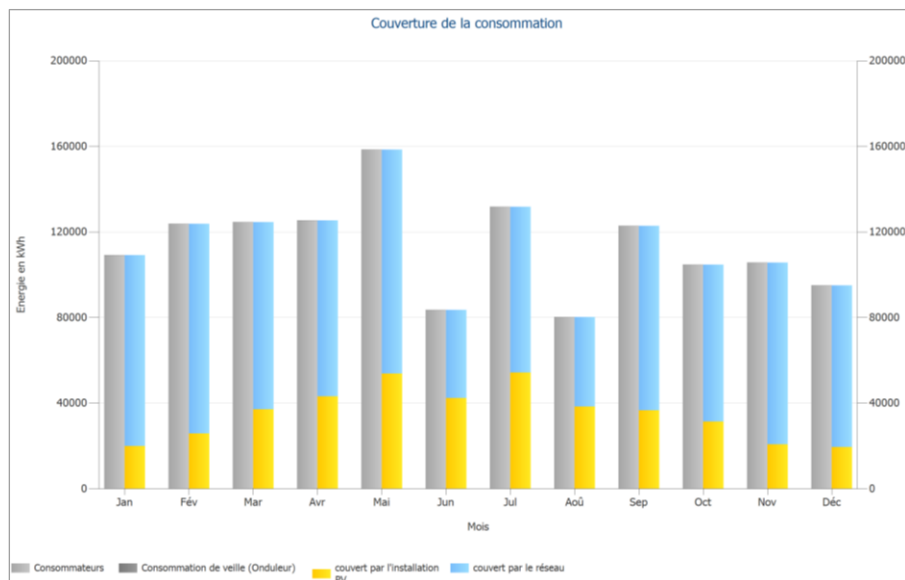


Fig. 5 Couverture de la consommation de la charge électrique de la société

La grille tarifaire de l'électricité en Tunisie pour les clients raccordés au réseau MT pour l'année 2022 est donnée dans le tableau suivant :

TABLE 1 GRILLE TARIFAIRE DE L'ÉLECTRICITÉ EN TUNISIE RÉSEAU MT POUR L'ANNÉE 2022

POSTE HORAIRE	Du 01/09 au 31/05	DU 01/06 au 31/08	Tarif de vente	Tarif d'achat de l'excédent
Jour	De 7h à 18h	De 6h30 à 8h30 Et de 13h30 à 19h	0.240 DT/kWh	0.115 DT/kWh
Pointe matin été	-	De 8h30 à 13h30	0.366 DT/kWh	0.182 DT/kWh
Pointe soir	De 18h à 22h	De 19h à 22h	0.329 DT/kWh	0.168 DT/kWh
Nuit	De 21h à 7h	De 22h à 6h30	0.188 DT/kWh	0.087 DT/kWh
Uniforme	-	-	-	0.251 DT/kWh

V. ÉTUDE FINANCIÈRE

Une des principales motivations à l'investissement dans une station PV est d'avoir une installation rentable, les paramètres suite à eux, on peut dire qu'une installation photovoltaïque PV est rentable (le temps de retour sur investissement, le taux de rentabilité interne).

TABLE 2 RENTABILITÉ DE L'INSTALLATION

Variable	Valeur	Unité	Description
Coût Moyen Actualisé de l'Énergie (LCOE) avec subvention	0,144	DT/kWh	Le coût actualisé de l'énergie, qui correspond au prix moyen de l'électricité générée par le système sur la vie du projet prenant en compte la subvention
Facture annuelle sans PV (tous les sites de consommation)	319 629	DT/an	La facture d'électricité totale sur la première année sans système PV
Facture annuelle avec PV (tous les sites de consommation)	187 153	DT/an	La facture d'électricité totale sur la première année avec système PV
Vente annuelle de l'excédent à la STEG	20 119	DT/an	Le montant facturé à la STEG pour l'électricité en excédent, prenant en compte la limite de l'excédent.
Temps de retour sur investissement	3,3	Années	Le nombre d'années nécessaires pour que le client rembourse son investissement initial
Taux de rentabilité interne du projet	19,1%		Le taux d'actualisation nécessaire pour que la valeur actuelle nette du projet soit égale à zéro. Le TRI est utilisé pour comparer l'investissement à d'autres investissements de risques similaires.
Réduction d'émissions de gaz à effet de serre sur la vie du système PV	6 429	Tonnes équivalent CO2	En produisant de l'électricité à partir du solaire, la production d'électricité de sources conventionnelles est évitée ainsi que ses émissions CO2. La production de 1 MWh d'électricité solaire en Tunisie déplace en moyenne 0,57 tonnes équivalent de CO2.

La rentabilité des installations PV raccordées au réseau MT en Tunisie repose principalement sur l'autoproduction de l'électricité qui sera ensuite soit consommée directement ou bien vendue au réseau, permettant de réaliser d'importantes économies sur la facture d'électricité.

Le coût de l'installation est fixé à une valeur unitaire de 2557.45 DT/KWc, ce qui donne un coût total hors taxe de 997 406 DT, mais grâce à la subvention de l'État tunisien, ce montant sera diminué à 797 925 DT. Cette subvention n'empêche pas qu'il y ait une TVA de 12 % appliquée à ce type de projets, ce qui donne un coût total de 917 613 DT, mais cela reste motivant à investir dans ce projet puisque le coût unitaire va diminuer jusqu'à 2 353 DT/KWc comme le montre le tableau suivant (les coûts fixes sont les coûts de maintenance de l'installation) .

TABLE 3 COÛT DE L'INSTALLATION

Taille de l'installation	KWc	390
Coût d'investissement spécifique	DT/kWc	2 353
Coût d'investissement total	DT	917 613
Coût d'investissement sans subvention	DT	718 132
Dégradation des performances	% p.a	0,50%
Coûts fixes	DT/a	9 176

TABLE 4 EXPLOITATION DU SERVICE DE DETTE

Investissement		
Durée du projet		20
Subventions		199 481
Capitaux propres		281 878
Montant de la dette	70%	642 329
Coût total du projet		924 207
Durée du crédit		10
Taux d'intérêt		7.75%
Min DSCR		2,30 x
Min LLCR		2,88 x

VI. FLUX DE TRÉSORERIE

La barre rouge représente la partie du coût initial de l'installation PV venant des capitaux propres (c.à.d, la partie qui n'a pas été empruntée d'une banque). Les barres vertes montrent les rentrées (ou les dépenses) nettes annuelles venant de l'exploitation du système et du remboursement de la dette. La ligne bleu montre la somme cumulative des barres rouge et verte ; le temps de remboursement est quand elle croise l'axe des abscisses.

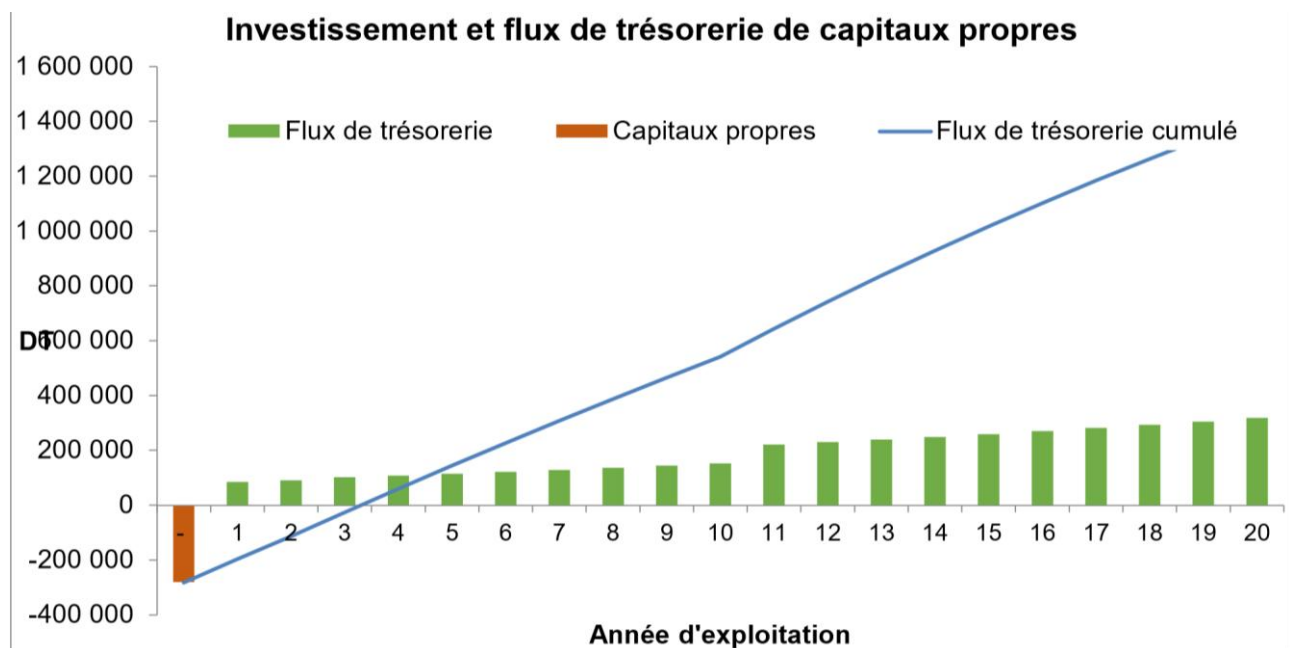


Fig. 6 Flux de trésorerie

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

VII. PAYEMENT DE LA DETTE

On effectue l'étude de rentabilité du projet en utilisant l'outil PROFI-PV.

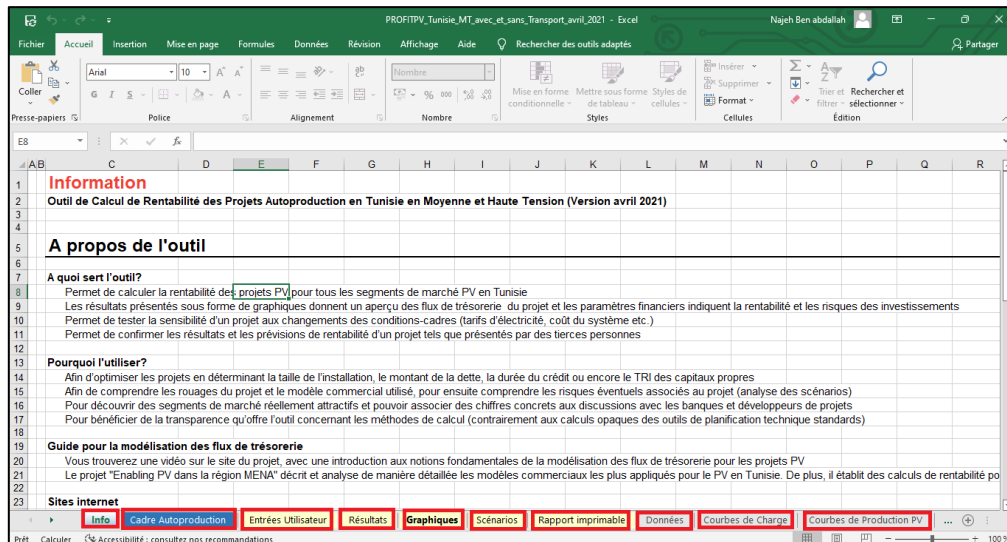


Fig. 7 L'outil PROFITPV

Cet outil permet également de tester la sensibilité des paramètres financiers aux évolutions des conditions cadres du projet, comme l'augmentation des tarifs d'électricité, la baisse du coût de l'installation ou encore la baisse de performance de l'installation.

Les barres orange représentent le remboursement de la dette (principaux intérêts) et les barres bleu foncé indiquent les coûts d'exploitation et de maintenance. La zone verte représente l'économie sur la facture d'électricité, sachant que la zone bleu clair trace les paiements pour l'électricité en excédent.

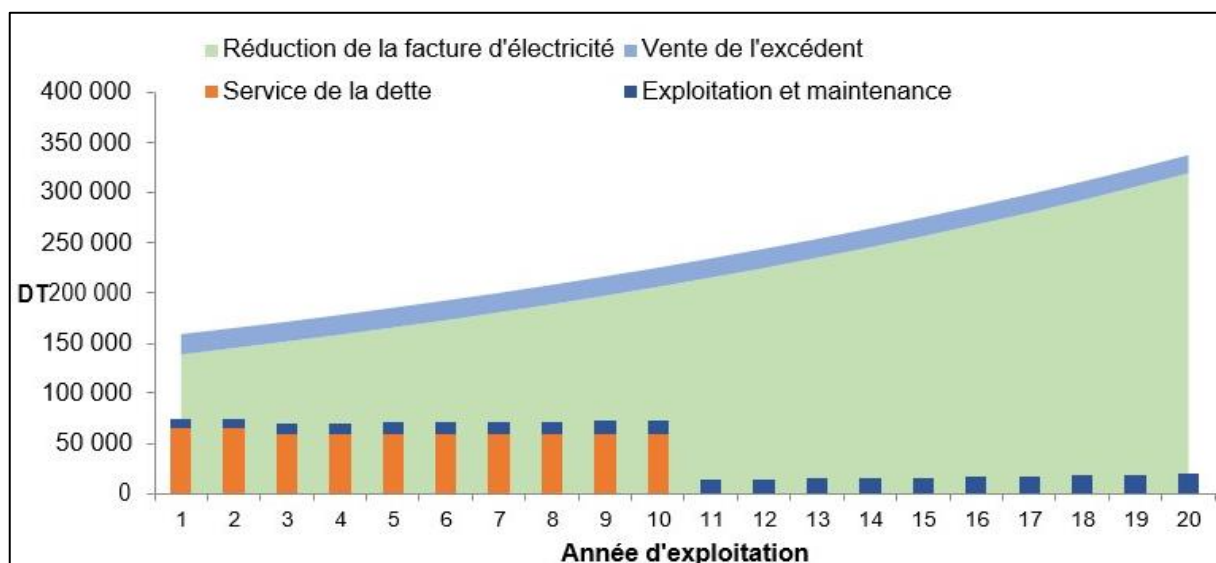


Fig. 8 Rentabilité de l'installation PV

Dans le but de payer le coût de l'installation, cette société va bénéficier d'une subvention de l'État de 20 % et d'un service de dette de 70 % du coût total de l'installation. Ce montant de dette sera payé par facilité sur 10 ans grâce à la réduction de la facture d'électricité suite à cette installation.

À partir du graphe ci-dessus, 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 payés au service de la maintenance.

VIII. RÉSULTATS ÉNERGÉTIQUES ET ÉCONOMIQUES

Les résultats présentés sous forme de graphiques donnent un aperçu des flux de trésorerie du projet. L'outil permet aux banquiers et aux investisseurs de comprendre les rouages du projet ainsi que le modèle commercial utilisé.

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

TABLE 5 DEGRÉ D'AUTOSUFFISANCE

Consommation totale	1.364.505	kWh/Année
couvert par le réseau	941.915	kWh/Année
Degré d'autosuffisance	31,0	%

TABLE 6 INSTALLATIONS PV


Puissance du générateur PV	390,00	kWc	<p>Énergie du générateur PV (réseau CA)</p>  <p> ■ Consommation propre ■ Régulation au point d'alimentation ■ Énergie revendue </p>
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 CO ₂ évitées	265.038	kg / année	

Fig. 9 Coût de la facture en DT

TABLE 7 DONNÉES ÉNERGÉTIQUES

Variable	Valeur	Unité
Consommation brute annuelle	1 364 439	kWh
Production annuelle	563 977	kWh
Énergie autoconsommée annuelle, tous sites	422 590	kWh
Transport d'énergie PV annuelle	0	kWh
Énergie 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

Le bilan énergétique de l'entreprise annuel nous indique l'énergie générée par l'installation photovoltaïque, l'énergie demandée et l'énergie fournie par le distributeur d'énergie en cas d'insuffisance du générateur PV. Ici, se montre l'importance de l'utilisation des installations photovoltaïques moyenne tension raccordées.

VIII. CONCLUSION

L'énergie photovoltaïque présente une bonne solution pour produire de l'électricité et pour aussi réaliser des bénéfices économiques face à l'augmentation successive du coût de l'électricité de plus, un autre point fort pour l'investissement dans ce type de d'énergie c'est qu'en Tunisie nous profitons d'un taux de production un peu élevé grâce à la durée de l'ensoleillement.

Ce travail montre bien plusieurs avantages de la réalisation des installations photovoltaïques moyenne et basse tension, que ce soient raccordées ou non, malgré le prix élevé du matériel utilisé. On peut conclure que

l'énergie photovoltaïque moyenne tension peut être une meilleure solution pour le secteur industriel qui impose des charges énergivores. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque est un potentiel énergétique, une promesse économique et écologique pour le développement durable[8,7].

ABRÉVIATIONS

Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
STEG	Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz	DT	Dinar Tunisien
MT	Moyenne tension	TRI	Taux de rentabilité interne
IPV	Installation photovoltaïque	TVA	Taux de la Taxe à la valeur Ajouté
kW.h	kilo Watt heure	CA	Courant Alternatif
TTC	Toutes Taxes comprises	LCOE	Coût Moyen Actualisé de l'Énergie
DSCR	Ratio de couverture du service de la dette	LLCR	Ratio de couverture de la durée du prêt

RÉFÉRENCES

- [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.
- [5] https://energypedia.info/images/c/c1/Le_Gisement_Solaire.pdf [consulté le : 16/04/2022]
- [6] https://environnement.brussels/sites/default/files/pres-181108-pv-1-3_4-aaz-fr.pdf [consulté le : 21/04/2022]
- [7] <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/> [consulté le : 02/04/2022]
- [8] <https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire/#:~:text=La%20composition%20du%20panneau%20solaire,panneau%20solaire%20%C3%A0%20l'installation.> [Consulté le : 08/05/2022]