

Conception d'un système solaire photovoltaïque pour alimenter le laboratoire de physique de l'Université de Kara, Togo

Youmali SANWOGOU¹, Hoavo HOVA^{1*}, Jean Paul YEMBI², Hamet Yoro BA³ et Ibrahima LY³

¹ Université de Kara, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Physique, Laboratoire Matériaux, Energies Renouvelables et Environnement (LaMERE), BP 404 Kara, Togo

² Ecole Polytechnique de Musuku (EPM), Gabon

³ Ecole Polytechnique de Thiès, BP A10 Thiès, Sénégal

* Correspondance, courriel : hovhoav@gmail.com

Résumé

Dans cet article nous proposons un système solaire photovoltaïque pour alimenter le laboratoire de physique de l'Université de Kara au Togo afin de réduire sa facture d'électricité et de résoudre le problème de coupure intempestive du courant de la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET). Pour ce présent travail, avec le logiciel de gestion d'énergies propres RETScreen, il est mis en exergue un outil de dimensionnement du système photovoltaïque du laboratoire et un profil de charges adéquat en tenant compte des paramètres géographiques et climatologiques réels. Le besoin énergétique du laboratoire et les différents composants du système solaire ont été évalués tout en considérant les aspects économique et environnemental du projet. Les résultats ainsi obtenus montrent qu'avec le système photovoltaïque proposé, l'université gagnera 64,96 francs CFA / kWh de marge hors taxe par rapport à la CEET tout en évitant le rejet de 7 tonnes du dioxyde de carbone par an et il n'y aura donc pas d'effets négatifs sur l'environnement. Le projet permettra également à l'université de réaliser à long terme une économie de près de 5 144 985 francs CFA.

Mots-clés : *système photovoltaïque, énergie, dimensionnement, réduction, facture d'électricité, environnement.*

Abstract

A photovoltaic system to supply the physics laboratory of the University of Kara, Togo

In this article we propose a photovoltaic system to supply the physics laboratory of the University of Kara in Togo to reduce its electricity bill and solve the problem of untimely power cut of the Electric Power Company of Togo (CEET). For this work, with RETScreen Clean Energy Management Software, it is highlighted a tool for sizing the photovoltaic system of the laboratory and an adequate load profile taking into account the real geographical and climatological parameters. The energy requirement of the laboratory and the different components of the solar system were evaluated while considering the economic and environmental aspects of the project. The results obtained show that, with the proposed photovoltaic system, the university will earn 64.96 F CFA / kWh of tax free margin compared to CEET while avoiding the release of 7 tons of carbon dioxide per year and there will therefore be no negative effects on the environment. The project will also enable the university to achieve a long-term savings of nearly 5 144 985 F CFA.

Keywords : *photovoltaic system, energy, dimensioning, reduction, electricity bill, environment.*

1. Introduction

Le Togo est un pays sous-électrifié aussi bien en milieu rural qu'urbain avec un taux d'électrification de 35 % en 2013 [1, 2] malgré les efforts menés par le gouvernement durant ces dernières années. Sa capacité d'autoproduction en électricité est faible. En effet, l'énergie électrique que la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET) fournit à ses clients est achetée auprès des compagnies électriques comme la Communauté Electrique du Bénin (CEB) (soit à 98,31 %) et le Contour Global (1,68 %) [3, 4]. En voulant que sa production en énergie électrique soit 50 % énergies renouvelables d'ici 2030, le gouvernement a créé en 2016 l'Agence Togolaise d'Electrification Rurale et des Energies Renouvelables (AT2ER) pour permettre à chaque structure de l'Etat de produire ses propres énergies électriques selon ses besoins à base des énergies renouvelables. Contrairement aux sources d'énergie fossiles telles que : le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'énergie nucléaire, efficaces en termes de rendement mais émettant des gaz à effet de serre responsables de la pollution de l'environnement, les énergies renouvelables représentent une des solutions viables au problème global et mondial de l'énergie [5, 6]. Les sources fossiles s'épuiseront dans les décennies à venir [7, 8]. Parmi les énergies renouvelables (l'hydraulique, le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, etc.), l'énergie solaire, en particulier photovoltaïque (PV), représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités et possède un potentiel important [9, 10].

De plus, l'énergie solaire photovoltaïque ne libère aucun gaz à effet de serre sur sa phase d'exploitation, elle est inépuisable et géographiquement largement répartie [11 - 13]. Le générateur photovoltaïque ne produit pas de bruits lors de son fonctionnement, ne contient aucune pièce mobile et nécessite peu d'entretien. Le Togo bénéficie d'un ensoleillement important, spécialement dans sa partie septentrionale (régions de la Kara et des Savanes) qui reçoit en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [14]. Ceci est très intéressant pour l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque dans ces zones qui connaissent des problèmes d'énergie électrique. L'Université de Kara située dans la région de la Kara est confrontée au problème de coupure intempestive du courant du réseau électrique de la CEET, perturbant ainsi le temps réparti pour la réalisation des travaux pratiques. Disposant déjà certains matériels pour le système photovoltaïque (panneaux, batteries, régulateur, etc.), le département de physique de l'Université de Kara décide de concevoir un système photovoltaïque hybride (PV/CEET) pour alimenter son laboratoire en utilisant les données météorologiques fournies par la NASA du site d'implantation (la ville de Kara) et le logiciel RETScreen international V4 pour le dimensionnement, l'étude économique et environnementale du projet. L'objectif de ce travail est de concevoir un système pour alimenter le laboratoire de physique de l'Université de Kara en solaire photovoltaïque afin de réduire la facture d'électricité du laboratoire et résoudre le problème de coupure intermittente du courant de la CEET lors des activités des travaux pratiques tout en tenant compte de l'aspect économique et environnemental.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel de dimensionnement

Le matériel utilisé pour le dimensionnement et l'analyse économique dans le cadre de la présente étude est le RETScreen International V4. C'est un logiciel normalisé de gestion d'énergies propres, élaboré par le gouvernement du Canada pour l'analyse de faisabilité des projets des énergies renouvelables et l'analyse de la performance énergétique. Il contient plusieurs bases de données climatiques de la NASA et d'autres stations météo.

2-2. Généralités sur les composants photovoltaïques

2-2-1. Panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variables selon l'influence de l'éclairement du panneau solaire.

2-2-2. Régulateur

Il gère la charge et éventuellement la décharge des batteries pour assurer leur bon fonctionnement et optimiser leur durée de vie. Il est le cerveau d'une installation photovoltaïque, car c'est à travers lui que les demandes d'énergie arrivent [15].

2-2-3. Batteries

La batterie sert à stocker l'énergie électrique excédentaire produite par les panneaux solaires et la restituer lorsque l'ensoleillement est insuffisant ou totalement inexistant.

2-2-4. Onduleur

L'onduleur dont le rôle est d'assurer la conversion continu - alternatif permet d'alimenter les récepteurs en courant alternatif à partir du courant continu produit par les panneaux.

2-2-5. Conducteurs

Les câbles relient électriquement tous les composants du système photovoltaïque. Le câblage est un point critique de toute installation photovoltaïque. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter les chutes de tension et les surtensions dans les lignes [16].

2-3. Conception d'un système solaire photovoltaïque pour alimenter le laboratoire de physique

Les procédures de conception et de dimensionnement d'un générateur photovoltaïque sont complexes à cause des nombreux paramètres à prendre en compte [17]. Pour être précis, nous décrirons sept (07) étapes [18] et les grandes lignes de la démarche à suivre pour la conception d'un système PV.

2-3-1. Bilan des puissances et bilan énergétique global du laboratoire de physique

Le bilan des puissances est une étape indispensable dans la conception des installations électriques. Il permet de réaliser le besoin énergétique global de l'installation après avoir relevé les caractéristiques sur les charges : tension, puissance et durée d'utilisation. Pour le photovoltaïque, comme à l'image de toute installation électrique, le bilan des puissances est à la base du dimensionnement de l'ensemble de ses composants et se calcule suivant la **Formule (1)**:

$$B_j = \sum P_a \times \Delta t \quad (1)$$

B_j étant le besoin énergétique en kWh/j, P_a la puissance d'une charge en W et Δt sa durée d'utilisation en heures.

2-3-2. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur photovoltaïque

La ville de Kara est située à 9,3° Nord et 0,8° Est. L'ensoleillement moyen annuel de la ville de Kara est de 5,39 kWh/m²/j pour une température moyenne de 25,2 °C ; le mois d'août est le moins ensoleillé avec un ensoleillement de 4,33 kWh/m²/j [19]. Pour avoir une autonomie complète et éviter une variation saisonnière de la consommation, il faut prendre comme référence l'ensoleillement du mois le moins ensoleillé ou l'ensoleillement moyen annuel.

2-3-3. Dimensionnement des panneaux

Dans ce paragraphe, nous allons déterminer la puissance crête de l'installation (P_c en Wc) et le nombre de panneaux photovoltaïques (N_T) nécessaires pour couvrir les besoins du laboratoire, respectivement, par les **Équations (2) et (3)** :

$$P_c = \frac{B_j \times P_i}{R_b \times R_i \times E_j} \quad (2)$$

et

$$N_T = \frac{P_c}{P_{mod}} \quad (3)$$

R_b étant le rendement des batteries, R_i le rendement du régulateur et de l'onduleur, P_i la puissance d'éclairage en kW /m² dans les conditions standard de test (STC), E_j l'énergie solaire journalière du site en kWh/m² /j et P_{mod} la puissance crête d'un module en Wc.

2-3-4. Dimensionnement des batteries

Pour réduire le coût des batteries, nous avons choisi deux jours d'autonomie pour cette installation. En effet, ce choix dépend de l'usage de l'installation et des conditions météorologiques du site. La profondeur de décharge (DOD) des batteries utilisées pour l'installation photovoltaïque dudit laboratoire est fixée à 60 %.

- *Capacité de stockage du système*

La capacité de stockage des batteries d'un système photovoltaïque se déduit par la **Formule (4)** :

$$C = \frac{B_j \times n}{DOD \times U} \quad (4)$$

avec U la tension de service en V et n le nombre de jours d'autonomie. Pour assurer la protection et le bon fonctionnement des batteries et optimiser leur durée de vie, il nous faut un régulateur intercalé entre les panneaux solaires et les batteries. De plus, les charges du laboratoire de physique sont de type alternatif, d'où la nécessité d'un onduleur pour convertir le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif.

2-3-5. Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur

2-3-5-1. Régulateur

Le dimensionnement d'un régulateur pour une installation photovoltaïque se fait en choisissant un régulateur dont le courant I_{reg} et la puissance P_{reg} soient adaptés au système solaire. Les critères requis pour le choix du régulateur sont :

$$\begin{cases} U_{reg} = U; & P_{reg} > P_{c\text{ installée}} \\ I_{entré\ reg} \gg I_{ccT}; & I_{sorti\ reg} \gg I \\ I_{ccT} = N_p \times I_{cc} & \text{et} \quad I = \frac{P}{U} \end{cases} \quad (5)$$

avec P la puissance de pointe des récepteurs en W , I le courant de charge maximal des récepteurs en A , I_{ccT} le courant de court-circuit total (en A) des panneaux montés en parallèle et N_p le nombre de panneaux montés en parallèle.

2-3-5-2. Onduleur

Dimensionner un onduleur d'une installation photovoltaïque, revient à déterminer sa puissance apparente. Cette puissance s'obtient à partir de la puissance de pointe qui est la somme des puissances actives des besoins en courant alternatif :

$$P_{ond} = 1,3 \times P \quad (6)$$

Après le choix des composants pour le système, il nous faut choisir les câbles adaptés au système photovoltaïque afin d'éviter des chutes de tensions importantes dans ces conducteurs.

2-3-6. Dimensionnement des câbles DC

C'est sur la partie du courant continu (DC) de l'installation que les intensités, des pertes par effet Joule et des chutes de tensions sont plus importantes dans les câbles. Le choix des sections de ces câbles se fait en fonction de leurs longueurs et du courant qui les traverse. La **Figure 1** indique la longueur en courant continu des câbles entre les différents composants du système photovoltaïque du laboratoire de physique.

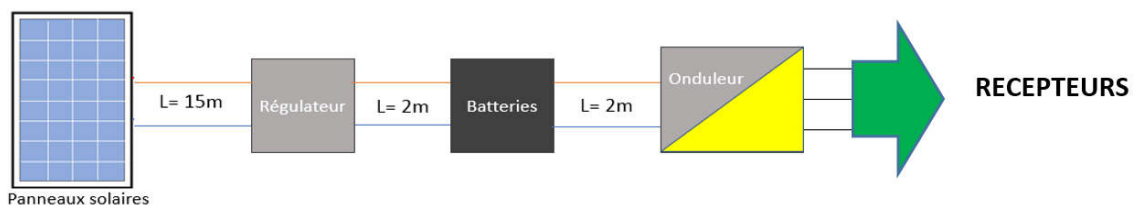


Figure 1 : Longueur des câbles entre les composants

Le courant I_{pv-reg} circulant entre les panneaux et le régulateur est le courant de court-circuit total des modules montés en parallèle du champ photovoltaïque. Pour déterminer la section des câbles entre le régulateur et le parc des batteries, nous considérons le courant du régulateur. Le courant $I_{reg-ond}$ entre le régulateur et l'onduleur se déduit en divisant la puissance active de l'onduleur par la tension du système suivant **l'Équation (7)**:

$$I_{reg-ond} = \frac{P_{ond}}{U} \quad (7)$$

Connaissant les longueurs des câbles (L en m) et la tension associée, l'intensité du courant (I en A) qui traverse ces câbles, la résistance maximale de la ligne, la chute de tension (ΔU en V) et la résistivité du cuivre ($\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega m$), la section des câbles se calcule par **l'Équation (8)**[20] :

$$S = \rho \frac{L \times I}{\Delta U} \quad (8)$$

2-3-7. Câblage normale / secours

Pour éviter que les charges ne soient pas alimentées en cas de défaillance du système solaire comme source principale, nous avons décidé de réaliser un système hybride dont la source secondaire est le réseau électrique de la CEET. Le réseau de la CEET ne fonctionnera que si le système solaire est défaillant. Il s'agit d'une alimentation normale (système solaire) / secours (CEET). Le basculement entre les deux sources se fait automatiquement. Le retour sur la source principale ne s'effectue qu'au bout d'un temps paramétrable (ce temps étant ajustable entre 10 secondes et 10 minutes) afin d'être sûr que la source principale est bien fiable et d'éviter des basculements répétitifs inutiles [21].

2-4. Étude économique et l'impact environnemental du système photovoltaïque proposé

2-4-1. Coût d'investissement initial total du système

Le coût total nécessaire pour la réalisation d'une installation photovoltaïque sera déterminé par la **Formule (9)**[22, 23] :

$$Ct_T = aN_T + bN_B + Ct_{T0} \quad (9)$$

a étant le prix du module en francs CFA et b celui de la batterie, Ct_{T0} le coût total des composants (le régulateur, l'onduleur, les câbles DC, les LED ainsi que la main d'œuvre) en francs CFA.

2-4-2. Coût d'exploitation du projet

C'est le coût sur la durée de vie (life cycle cost) du projet, il est déterminé par **l'Équation (10)** :

$$C_{dv} = A_{tot} + \mathcal{E}_{tot} \quad (10)$$

Le prix du kWh du projet se déduit par **l'Équation (11)** :

$$D = \frac{C_{dv}}{\text{Besoin énergétique annuel}} \quad (11)$$

avec A_{tot} le coût total d'amortissement et \mathcal{E}_{tot} le coût total de l'entretien et de la maintenance.

2-4-2-1. Coût d'amortissement annuel total du système

Pour calculer le coût de l'énergie en tenant compte de l'amortissement sur le temps, on prend en compte dans nos calculs, la durée de vie des composants ainsi que les profits réalisés sur toute la durée active du système [24, 25]. L'amortissement annuel total du système A_{tot} est donné par **l'Équation (12)** :

$$A_{tot} = \sum \frac{C_I}{N} \quad (12)$$

C_I est le coût d'investissement initial des composants du projet et N est la durée de vie active des composants du système photovoltaïque.

2-4-2-2. Coût d'entretien et de maintenance annuel total du système

Il est indispensable de veiller au bon fonctionnement des modules solaires et aux autres composants du système par un entretien, au moins quatre fois par an. Le coût de l'entretien est très difficile à évaluer dans

le temps. Pour calculer un coût moyen annuel, l'approche la plus raisonnable est basée sur une expérience vécue sur le terrain qui, aussi théorique qu'elle soit, donnerait un ordre de grandeur réaliste suivant la **Formule (13)**[26] :

$$\mathcal{E}_{tot} = \sum r \times C_I \tag{13}$$

avec r le coefficient d'estimation du coût de l'entretien par rapport à l'investissement initial des composants.

2-5. Impact environnemental du projet

Une installation photovoltaïque n'a pas assez d'impact négatif sur l'environnement. En effet, le soleil est une source d'énergie renouvelable et ne pollue pas l'environnement. L'impact positif de ce projet sera prouvé par la détermination de la quantité de CO₂ évitée.

3. Résultats et discussion

3-1. Bilan de puissances et bilan énergétique global du laboratoire de physique

L'évaluation des besoins électriques est une étape primordiale pour dimensionner au plus juste la puissance du champ photovoltaïque et la capacité du parc de batteries sans oublier son profil de charges. La consommation maximale journalière du laboratoire de physique de l'Université de Kara s'élève à 16 638 Wh/j aux environs de 15 heures. En effet, durant cette période de la journée la charge est maximale car l'essentiel des travaux pratiques se fait pendant ce temps (**Figure 2**).

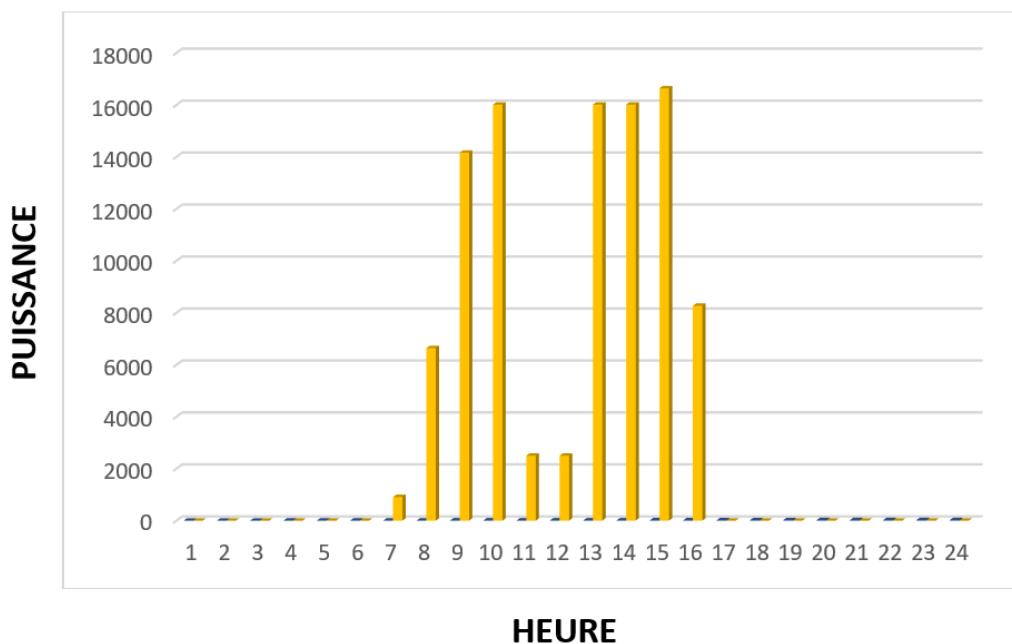


Figure 2 : Profil de consommation journalière du laboratoire de physique

Ce profil de charges nous permettra d'estimer le besoin énergétique journalier du laboratoire et aussi le choix du nombre de jours d'autonomie du parc de batteries. Le **Tableau 1** résume les puissances des différents récepteurs présents au laboratoire ainsi que leur temps d'utilisation.

Tableau 1 : Bilan des puissances et le besoin énergétique journalier du laboratoire

Désignation appareil installé	Quantité	Puissance unitaire (W)	Puissance totale (W)	Durée d'utilisation quotidienne (h)	Energie journalière (Wh/j)
Oscilloscope type 1	05	70	350	06	2100
Oscilloscope type 2	04	35	140	06	840
GBF type 1	06	11	66	06	396
GBF type 2	04	15	60	06	360
Lampes fluorescentes type 1	22	35	770	05	3850
Lampes fluorescentes type 2	04	35	140	02	280
Lampes fluorescentes type 3	06	20	120	01	120
Light box	05	20	100	06	600
Transformateurs de sécurité	14	72	1008	06	6048
Générateur alimentation type 1	03	1200	3600	06	21600
Générateur alimentation type 2	10	54,4	544	06	3264
Climatiseur	04	2 500	10 00	06	60 000
TOTAL			16 898		99 458

En tenant compte des puissances des composants et du temps d'utilisation, nous obtenons une consommation journalière de $B_j = 99,458$ kWh/j. On en déduira la puissance crête et la capacité de stockage des batteries à installer.

3-2. Dimensionnement du système solaire photovoltaïque du laboratoire de physique

Les caractéristiques des composants de base utilisés pour la conception des systèmes photovoltaïques sont présentées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des composants de base utilisés pour le dimensionnement du système photovoltaïque

Désignation du composant	Caractéristiques techniques
Module	Module polycristallin, $P_c = 240$ Wc, $V_{CO} = 36$ V ; $I_{CC} = 8,96$ A, $U_{module} = 24$ V car (24 V pour $24 \text{ V} < V_{CO} < 48 \text{ V}$), rendement = 14 % à 25 °C
Onduleur	Type monophasé ; tension d'entrée 24 V ; tension de sortie 220 V ; rendement = 0,95. Puissance à déterminer.
Batterie	Type GEL solaire VICTRON 12V @ 200Ah, DOD = 60 %, rendement = 0,85
Régulateur	Régulateur de charge ; Rendement = 0,98 ; P_{reg} et I_{reg} à déterminer

Les résultats de dimensionnement manuel et par RETScreen sont donnés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Comparaisons entre les dimensionnements manuel et par le logiciel RETScreen

Méthode de dimensionnement	Manuelle	RETScreen
Besoin énergétique journalier du laboratoire (kWh/j)	99,458	69,64
Puissance crête calculée (kWc)	24,145	15,84
Tension d'un panneau (V)	24	24
Tension d'utilisation du système U (V)	48	48
Nombre total de panneaux (N_T)	102	66

D'après le **Tableau 3**, le système solaire est surdimensionné pour le dimensionnement manuel parce qu'il ne tient pas compte de certains paramètres comme les jours, les mois où les charges ne fonctionnent pas. Avec la méthode de dimensionnement manuel, nous aurons besoin de 102 panneaux photovoltaïques pour couvrir les 99,458 kWh/j, mais avec les mêmes charges, le logiciel RETScreen nous donne 66 panneaux photovoltaïques pour alimenter un besoin énergétique de 69,64 kWh/j. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé le logiciel RETScreen international V4 contenant les données météorologiques de la ville de Kara pour la suite du dimensionnement. Le laboratoire de physique de l'Université de Kara ne possède que quatre panneaux solaires pour le moment, dont la puissance d'installation totale est de 960 Wc. Cette puissance ne pourra pas couvrir tous les besoins énergétiques de ce laboratoire estimés à 69,64 kWh/j. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi d'alimenter les charges de fortes puissances par le réseau électrique de la CEET et le reste par le système solaire des quatre panneaux photovoltaïques. Pour raison d'efficacité énergétique du laboratoire, les ampoules fluorescentes de 35 W et 20 W devront être remplacées par les LED respectivement de 10 W (810 lm) et de 8 W (500 lm) afin de pouvoir utiliser les quatre panneaux. Avec le logiciel RETScreen, le besoin énergétique journalier des charges retenues est 4,44 kWh/j. La tension de fonctionnement d'un panneau est 24 V car la tension à circuit ouvert (V_{CO}) est 36 V ($24 V < V_{CO} < 48 V$) et celle de la tension de service (U) est aussi 24 V parce que la puissance d'installation P_C est 0,96 Wc ($24 V$ pour $600 Wc < P_C < 1500 Wc$). Ces quatre panneaux sont montés en parallèle. La surface d'installation pour le système proposé est de 7 m².

3-2-1. Dimensionnement des batteries

Les résultats du dimensionnement des batteries avec le logiciel RETScreen International du laboratoire de physique de l'université de Kara sont résumés dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Dimensionnement des batteries du laboratoire de physique

Capacité suggérée (Ah)	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle	Nombre total de batteries	Capacité totale installée (Ah)
687	2	4	8	800

Les huit batteries sont nécessaires pour couvrir les 4,44 kWh/j lorsque l'ensoleillement est insuffisant ou totalement inexistant. Deux batteries sont montées en série avec une tension de sortie de 24 V et formant quatre rangées montées en parallèle afin d'avoir la capacité de 800 Ah.

3-2-2. Choix du régulateur

Les quatre panneaux solaires étant montés en parallèle, le courant de court-circuit total à la sortie des modules est $I_{CCT} = 35,84 A$, le courant de charge maximal des récepteurs est 60 A, la tension nominale est 24 V et le rendement du régulateur vaut 0,98. Ces informations nous ont permis de choisir un régulateur de type MPPT de 60 A /24 V avec une puissance de 1 kW.

3-2-3. Choix de l'onduleur

Après avoir majoré de 30 % la puissance de pointe, la puissance de l'onduleur est de 1882,4 W, mais pour la raison de sécurité, nous avons choisi un onduleur de 2 kW/24 V.

3-2-4. Choix des câbles DC

La chute de tension dans les câbles du système solaire proposé est de 3 % au maximum de la tension départ, soit de 0,72 V pour 24 V.

Tableau 5 : Intensité du courant et la section des câbles entre les composants

Paramètres du câble	Générateur-Régulateur	Régulateur-Batterie	Régulateur-Onduleur
Intensité du courant (A)	35,84	60	83,33
Section des câbles (mm ²)	2 × 25	2 × 6	2 × 10

3-2-5. Schémas de câblage normale / secours

Le circuit de puissance du schéma de câblage normale / secours et le circuit de puissance du schéma de câblage multifilaire du système photovoltaïque sont représentés respectivement par les **Figures 3 et 4**. La **Figure 5** représente le circuit de commande du système photovoltaïque proposé.

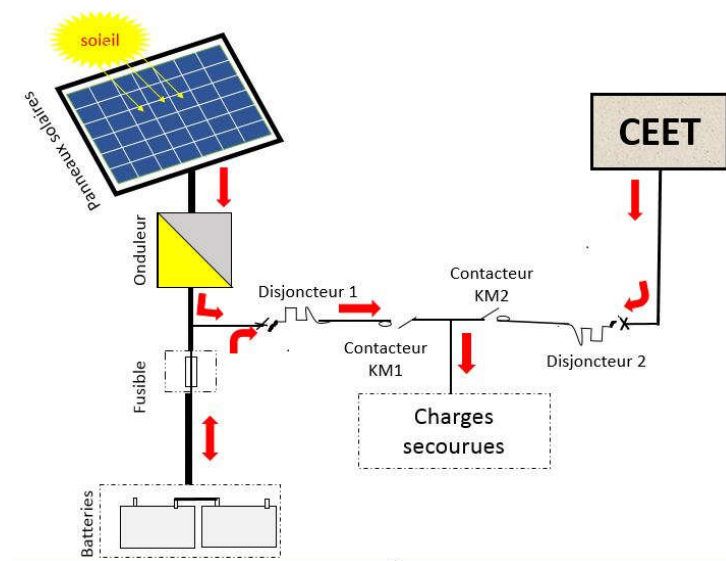


Figure 3 : Circuit de puissance du schéma de câblage normale / secours

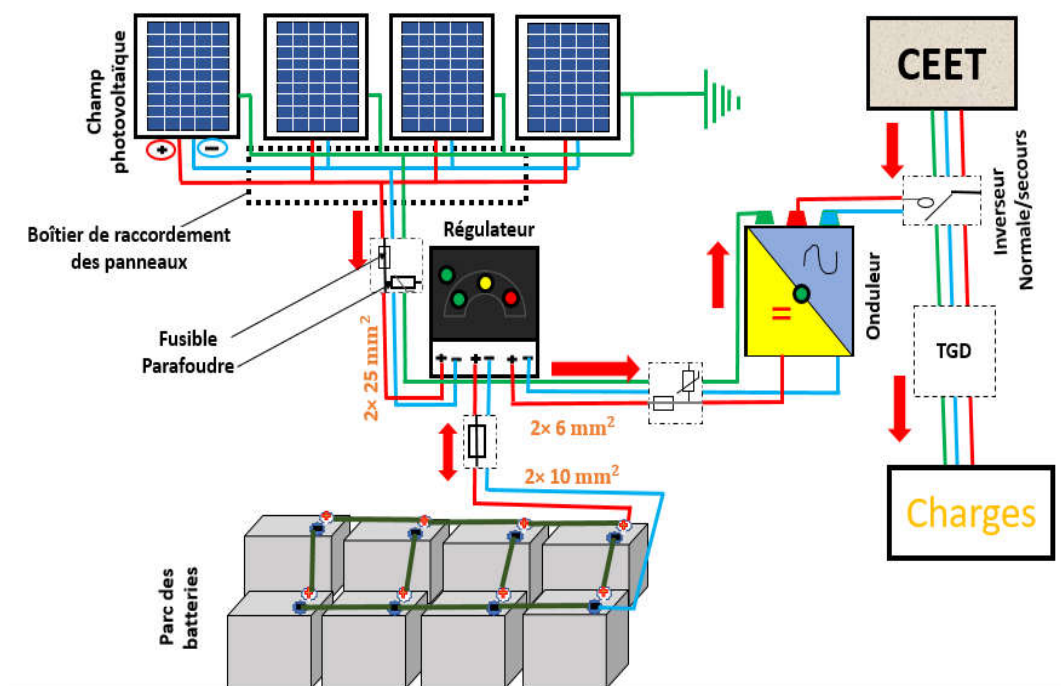


Figure 4 : Circuit de puissance du schéma de câblage multifilaire du système photovoltaïque

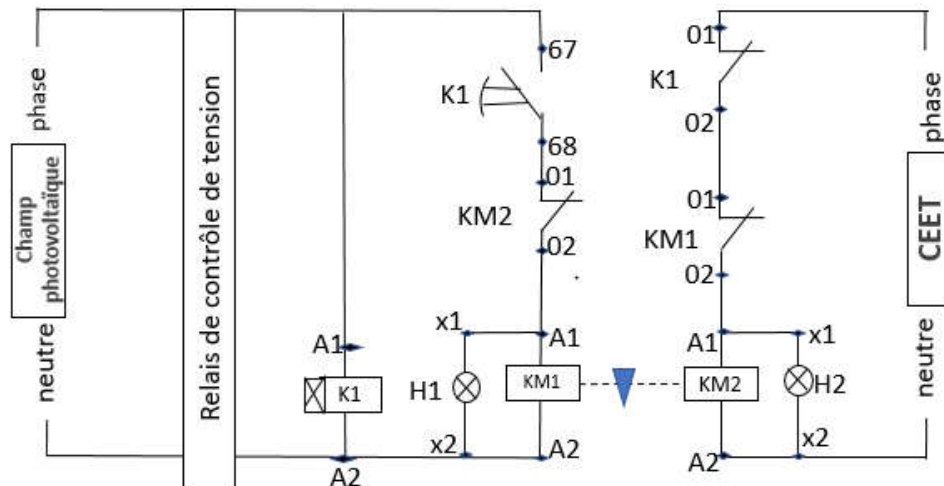


Figure 5 : Circuit de commande du schéma de câblage multifilaire du système photovoltaïque

3-3. Étude économique du système photovoltaïque proposé

En se basant sur le prix des composants photovoltaïques dans la ville de Kara, les résultats obtenus sont consignés dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Le coût d'investissement total et le coût sur la durée de vie

coût d'investissement total, coût sur la durée de vie du système photovoltaïque du laboratoire de physique de l'université de Kara						
		Invest (FCFA)	Durée de vie(an)	Amort (FCFA)	Ratio (%)	Coût d'entr/an(FCFA)
Besoins(kWh/j)	4,44	Générateur PV 480000	25	19200	2	9600
Besoins annuels (kWh/an)	1620,6	Régulateur 45 000	12	3750	1,5	675
		Onduleur 94 050	12	7837,5	1,5	1410,75
		Batteries 1600000	6	266667	2	32000
Prix de module	120 000 FCFA	LED 127000	25	5080	0,5	635
Nombre de modules	4	Accessoires 383212	25	15328,5	0,5	1916,06
Nombre de batteries	8	Main d'œuvre 96000	25	3840		
COÛT D'INVESTISSEMENT TOTAL		2825262				
Coût d'amortissement total annuel selon le taux d'actualisation 10%				32171		
Coût d'entretien et de maintenance total annuel						46237
COÛT ANNUEL TOTAL (FCFA)		78408		PRIX DU kWh (FCFA)	49	

D'après le **Tableau 6**, le coût de revient de l'installation de puissance crête 960 Wc est de 2 825 262 francs CFA. Ce coût est beaucoup plus élevé (presque 3 fois plus) que pour une même installation avec le réseau électrique de la CEET. En assumant une durée de vie de 6 ans pour les batteries, 12 ans pour le régulateur et l'onduleur et 25 ans pour les autres éléments et en prenant 10 % pour le taux d'actualisation du prix des composants solaires sur 25 ans, le coût d'amortissement annuel total du projet est estimé à 32 171 francs CFA. Le coût d'entretien et de maintenance annuel du système est majoré de 2 % du prix initial des composants, ceci revient à 46 237 francs CFA. Le coût d'exploitation (coût annuel total) du projet s'élève à 78 408 francs CFA par an et l'énergie consommée par an est de 1620,6 kWh/j ($365 \times 4,44$ kWh/j). Par conséquent, le prix du kWh produit est de 49 francs CFA, moins élevé que celui de cession par le réseau électrique de basse tension de la CEET s'élevant à 113,96 francs CFA hors TVA. Suite à cette analyse le projet est économiquement rentable par rapport au réseau électrique de la CEET avec 64, 69 francs CFA de marge.

3-4. Economies sur la durée de vie du projet

A l'aide du logiciel RETScreen international, nous déduisons le nombre d'années sur le retour d'investissement et les économies dont bénéficiera l'université. Le coût d'investissement d'une installation solaire photovoltaïque est généralement élevé. L'évolution du bilan cumulé des coûts et les bénéfices de l'investissement du projet sur 25 ans sont illustrés sur la **Figure 6**. Le digramme est en dent de scie dû au coût périodique des batteries, du régulateur et de l'onduleur. On observe qu'après 5 ans quelques mois, l'université va retrouver les 2 825 262 francs CFA investis dans le projet, mais à la septième année l'université dépensera encore 819 333 francs CFA pour remplacer les batteries défectueuses. On observe également qu'après 8 ans et 6 mois, le projet va commencer par engendrer 43 792 francs CFA de bénéfice par an. La Valeur Actualisée Nette (VAN) du projet est de 397 503 francs CFA sur les 25 ans. La positivité de la VAN prouve que le projet est rentable avec un Taux de Rendement Interne (TRI) égal à 12,2 %. Ainsi, en 25 ans l'université réalisera une économie de 5 144 985 francs CFA.

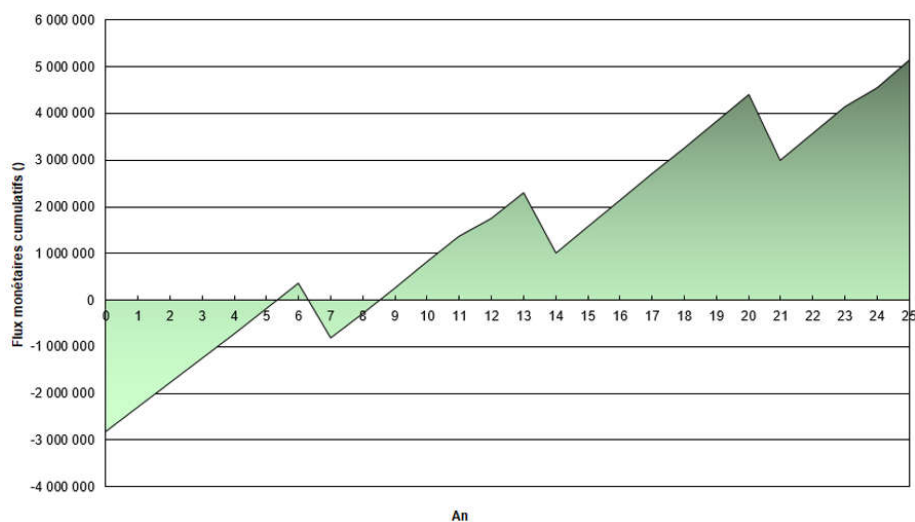


Figure 6 : Diagramme des flux monétaires cumulatifs du projet

3-5. Impact environnemental du projet

Le projet n'a pas assez d'impact négatif sur l'environnement. En effet, les panneaux solaires utilisent l'énergie solaire qui est une source d'énergie renouvelable et ne pollue pas l'environnement. De plus, le projet évitera 7 tonnes du CO₂ par an et le coût de réduction du CO₂ s'élève à 159 549 francs CFA par tonne. Il est bien vrai que le recyclage des batteries solaires PV pose de problème après leur fin de vie, cependant ce projet est rentable du point de vue environnemental. En effet, le système d'alimentation du laboratoire projeté permet une réduction considérable de gaz à effet de serre.

4. Conclusion

Dans cet article, après avoir dimensionné les différents composants du système solaire photovoltaïque alimentant le laboratoire de physique de l'Université de Kara, nous avons montré sa rentabilité à long terme malgré son coût d'installation élevé. Le prix du kWh ainsi projeté est estimé à 49 francs CFA, ce qui est relativement bas par rapport à la CEET. Le système ainsi obtenu ne compense pas seulement la consommation du département en résolvant le problème de coupure intempestive du courant de la CEET lors des séances des travaux pratiques mais évite également l'émission de 7 tonnes du dioxyde de carbone par an que la CEB et/ou

le Contour global émettraient en voulant produire cette énergie pour injecter dans le réseau électrique de la CEET. Le projet permettra ainsi à l'université de réaliser à long terme une bonne économie de près de 5 144 985 francs CFA sur les 25 ans.

Références

- [1] - Le ministère des mines et l'énergie, Energie durable pour tous (SE4ALL), programme d'action national, Togo, (octobre 2015)
- [2] - Rapport d'observations définitives de la mission de contrôle de la gestion de la Compagnie Energie Electrique du Togo (CEET), (décembre 2016)
- [3] - Rapport annuel de la Compagnie Energie Electrique du Togo - Communauté Electrique du Bénin, (2015)
- [4] - A. JOSEP, "Problématique de l'accès à l'électricité au Togo, Group de la banque Africaine de Développement", Abidjan, Côte d'Ivoire, (septembre 2015)
- [5] - G. BOUALEM, G. JEAN-PAUL, C. ABDELMADJID et H. MABROUK, "Générateur photovoltaïque avec une commande directe de puissance connecte et avec adjonction services au réseau de distribution", EF-EPF-MGE, (2016) 7 - 9
- [6] - D. M. AMINE, H. AHMED et M. KAMAL, "Analyse des performances d'un système photovoltaïque installé dans le réseau électrique de sud algérien", National Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bouira, Alegria, (Novembre 2016)
- [7] - S. MENHOUDJ, D. SIFODIL et A. MOKHTARI, "Etude expérimentale d'un système solaire actif-PSD", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°3 (2012) 479 - 488
- [8] - S. MAKHLOUFI, "Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes", Thèse, Université de Batna, (2013)
- [9] - A. O. M. YAHYA, A. O. MAHMOUD et I. YOUM, "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°3 (2008) 473 - 483
- [10] - S. AOUIFI, "Modélisation commande d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire, Algérie, (2014)
- [11] - M. SINGH, V. KHADKIKAR, A. CHANDRA and R. K. VARMA, "Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 26, N° 1 (2011) 307 - 315 p.
- [12] - F. MULOLANI, M. ARMSTRONG and B. ZAHAWI, "Modeling and Simulation of a Grid-connected Photovoltaic Converter with Reactive Power Compensation", *9th Int. Symp. on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing*, (2014) 888 - 893
- [13] - A. BOUHARCHOUCHE, A. BOUABDALLAH, E. M. BERKOUK, S. DIAF et H. BELMILI, "Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien photovoltaïque", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 17, N°3 (2014) 359 - 376
- [14] - A. EL FADILI, G. FOUAD and E. M. ABDELMOUNIME, "Reference voltage optimizer for maximum power point tracking in triphase grid-connected photovoltaic systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 60, (2014) 293 - 301
- [15] - A. GHAMRAWI, J-P GAUBERT et D. MEHDI, "Contrôleur stabilisant incluant un nouvel algorithme MPPT pour un convertisseur DC-DC quadratique dédié aux systèmes solaires photovoltaïques", Symposium de génie électrique, Nancy, France, (2018)
- [16] - C. H. S. YOTTO, "Etude et conception d'un mini central photovoltaïque pour l'alimentation d'une partie de l'installation électrique de la présidence de la république du Benin", Mémoire, Ouagadougou, Burkina Faso, (2011)
- [17] - M. BELHADJ, T. BENOUAZ, A. CHEKNANE et S. M. A. BEKKOUCHE, "Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13, N°2 (2010) 257 - 264

- [18] - S. MANSOURB, "Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé", Mémoire, Université Abou Bekr Belkaid, Algérie, (2013-2014)
- [19] - <https://www.power.larc.nasa.gov>, (juillet 2018)
- [20] - P. HOUÉE, Une installation photovoltaïque en site isolé, Forum des technologies : Ressources pour les STI2D, (septembre-octobre 2011)
- [21] - A. EL FADILI, F. GIRI et A. EL MAGRI, "Reference voltage optimizer for maximum power point tracking in triphase grid-connected photovoltaic systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 60, (2014) 293 - 301
- [22] - B. HAMZA, "Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300 kW", Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, Algérie, (Juin 2017)
- [23] - "NOOR", *Revue trimestrielle du Groupe Sonelgaz*, N°10 (Juillet 2010)
- [24] - R. MHAMED, Etude technicoéconomique d'un système hybride photovoltaïque diesel, <https://www.researchgate.net/publication/334067417>, (23 août 2019)
- [25] - D. ZEBBAR, S. KHERRIS, N. MOHAMED CHÉRIF et B. GHABI, "Etude technico-économique d'un champ solaire de type Stiring Dish à Tissemsilt", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 18, N°2 (2015) 315 - 327
- [26] - B. BOUZIDI, "Analyse de la faisabilité et la rentabilité économique de systèmes de pompage d'eau par énergie solaire photovoltaïque", mémoire, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, (2008)