



Full Length Research Paper

Dimensionnement et étude financière d'une petite installation photovoltaïque pour plusieurs stations au Sahel

Serigne Abdoul Aziz Niang¹, Kharouna Talla¹, Dialo Diop^{1*}, Mamadou Simina Drame^{1,2}, Astou Sarr¹¹Faculté des Sciences et Techniques, Département de Physique, Université Cheikh Anta Diop – Dakar, Sénégal²Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang, Université Cheikh Anta Diop – Dakar, Sénégal.

Received March 2022 – Accepted June 2022

*Corresponding author. dialo.diop.ucad@gmail.com

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

L'objectif de cet article est d'une part de réaliser un dimensionnement d'une petite installation solaire autonome dans six stations au Sahel et d'autre part d'effectuer une étude financière pour ces différentes localités (Dakar, Niamey, Ouagadougou, Gaoua, Dori et N'Djamena). A partir des potentiels solaires mesurés sur ces stations, nous avons effectué un dimensionnement solaire appliqué à un unique besoin énergétique de 259,88 kWh/jour. Les résultats ont montré que le sud de la région (N'Djamena et Ouagadougou) nécessite plus éléments constitutifs (panneaux, régulateurs, batteries, onduleurs et câbles) que le nord (Niamey, Dori et Dakar), pour couvrir ce besoin énergétique. Ainsi, le nombre total de panneaux nécessaire est compris entre 65 au nord et 84 modules au sud de la région. Le nombre de régulateur varie de 10 et 12 selon la zone. Le nombre d'onduleurs nécessaire pour soutenir la puissance des appareils est de quatre pour chacune de ces stations de la région. On note également, un nombre de batteries similaires pour chacune des six stations. La deuxième partie consiste à estimer le coût d'investissement de chaque système. Les résultats ont montré que le montant de l'investissement total de l'installation solaire varie de 109 millions de francs FCFA au nord à 126 millions de francs FCFA au sud de la région pour une durée de vie de 35 ans à peu près. Un focus à Dakar a montré que la solution photovoltaïque est économiquement plus rentable que l'alimentation à partir du réseau public. En effet, le temps de retour sur investissement sera réalisé en 9 ans. Et enfin, l'analyse financière a montré également qu'au bout de 20 ans d'existence, le système solaire installé à Dakar permet d'économiser une somme de plus de 117 millions de francs FCFA.

Mots clés: Potentiel d'énergie solaire; Dimensionnement; Investissement; Sahel.

Cite this article:

Serigne Abdoul Aziz Niang, Kharouna Talla, Dialo Diop, Mamadou Simina Drame, Astou Sarr (2022). Dimensionnement et étude financière d'une petite installation photovoltaïque pour plusieurs stations au Sahel. *Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 4(1), pp. 17-26. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

Le Sahel (10°N et 18°N; -17,5°W et 20°E) est une région où le système climatique est très complexe [1, 2]. Cette région est aussi connue par son fort taux d'ensoleillement estimé à plus de 2000 kWh par an [3, 4, 5]. Les réserves totales d'énergie solaire théoriquement disponibles sur le continent africain sont estimées à près de 60 millions de TWh/an contre 37,5 millions de TWh/an pour l'Asie, le Moyen-Orient (hors Égypte) inclus et seulement trois millions de TWh/an pour l'Europe [6, 7]. Cela fait de ce continent comme l'un des plus grands gisements solaires au monde avec un ensoleillement maximal dans ses grands déserts qui sont sa partie Nord (Sahel et Sahara) et dans sa partie Sud (Kalahari) [8]. Malgré, ce fort taux

d'ensoleillement, la capacité en solaire installée en Afrique est assez faible [9]. Cependant, la capacité installée en Afrique pour les centrales solaires photovoltaïques n'a cessé de croître. Cette capacité a quadruplé en Afrique, par exemple, il était environ de 1330 MW en 2014 et a augmenté de 2100 MW en un an (fin 2015) [10]. Ces installations solaires totalisaient une capacité de production de 4,15 GWc (gigawatts-crête) sur toute l'Afrique en 2017, dont plus de la moitié en Afrique du sud [11]. Selon le rapport 2018 de l'Agence Internationale des Énergies Renouvelable (IRENA) [12], l'Afrique pourrait potentiellement atteindre plus de 70 GW de la capacité solaire photovoltaïque d'ici 2030. De plus, avec la raréfaction de ressources fossiles cumulée à un contexte de

réchauffement climatique global, ces énergies renouvelables (comme l'énergie solaire) deviennent de plus en plus incontournables. Ainsi, ces énergies propres pour l'environnement et durables constituent une alternative aux énergies fossiles trop polluantes pour le climat au niveau de la terre. Pour un meilleur dimensionnement d'une installation solaire, une bonne connaissance du potentiel d'énergie solaire est impérative. Une étude menée par la NASA entre 1983 et 2005 au Sahara classe la région Agadir au Niger comme la deuxième région la plus ensoleillée au monde avec une irradiation annuelle autour de 6,92 kWh/m²/jour [13]. De plus, des études menées à Dakar au Sénégal et à Nouakchott en Mauritanie ont montré des valeurs de potentiel solaire élevées entre 7 et 8,25 kWh/m²/jour [14, 15].

On peut citer également les travaux effectués entre 2015 et 2016 à Niamey qui ont montré une grande disponibilité d'ensoleillement associée à des valeurs moyennes comprises entre 5,1 kWh/m²/jour et 6,3 kWh/m²/jour [15].

L'objectif principal de cet article est d'effectuer un dimensionnement et une étude financière d'une petite installation photovoltaïque pour plusieurs stations au Sahel. Pour cela, nous allons utiliser les données in situ du potentiel d'énergie solaire pour un meilleur

dimensionnement dans ces différentes stations. Cet article est subdivisé en quatre parties. La première partie présente les six stations de mesure et les types de données et instruments utilisés. Ensuite, la deuxième partie présente les résultats du dimensionnement d'une installation solaire pour ces six stations. Après, la troisième partie est consacrée à une étude financière de l'installation proposée et la durée de vie pour le cas de Dakar. Enfin, la dernière partie tire les principales conclusions de ces travaux.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation des sites

Le village SOS des enfants de la région de Dakar (14.4° N, -16° W) au Sénégal constitue le site à dimensionner pouvant alimenter son besoin énergétique. En effet, ce même besoin énergétique servira de support pour le dimensionnement qui sera effectué dans les autres stations tels que : Niamey (13.3° N, -2.17° W) au Niger, Ouagadougou (12.20° N, -1.40° W), Dori (14.03°N, -0.02°W), Gaoua (10.29° N, -3.15 °W) au Burkina Faso et N'Djamena (12.1° N, 15.04° E) au Tchad. La figure 1 représente la carte de la zone d'étude avec la répartition des six stations.

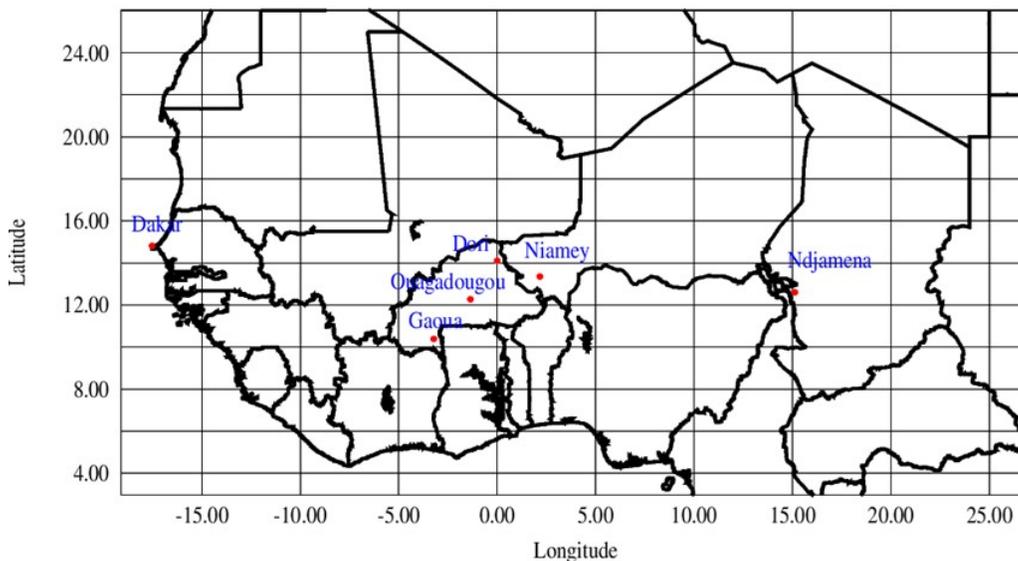


Figure 1 : Répartition des stations de mesures du rayonnement solaire au Sahel

2.2. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation.

Pour un meilleur dimensionnement, la bonne connaissance du potentiel d'énergie solaire est impérative.

Des études menées dans six localités de Dakar au Sénégal à N'Djamena, au Tchad ont montré des valeurs de potentiel solaire élevées entre 4,71 et 6,24 kWh/m²/jour [15]. Le tableau 1 résume le potentiel global disponible sur chacune des six stations

Tableau 1: Potentiel d'énergie solaire disponible de la région Sahel

Stations	Potentiel solaire (kWh/m ² /jour)
Dakar	5,94
Niamey	6,24
Dori	5,91
Gaoua	5,33
Ouagadougou	4,96
N'djamena	4,71

A partir du potentiel global mesuré nous allons effectuer un dimensionnement pour chacune de ces six stations.

2.3. Évaluation des besoins en énergie.

La méthode la plus utilisée pour l'estimation des besoins de puissance et d'énergie, consiste à recenser les différents appareils électriques et leur durée d'utilisation. C'est ainsi que, nous avons effectué, sous la conduite d'un personnel avec qui le directeur nous a mis en rapport, une visite guidée de l'établissement. Nous avons pu noter des similitudes, du point de vue architectural entre certains bâtiments mais aussi des équipements électriques qui s'y trouvent. Il s'agit

essentiellement de quinze (15) maisons servant d'abris aux cent cinquante (150) pensionnaires, de sept studios et de trois (03) bâtiments nouvellement construits. L'établissement est aussi composé d'une maison pour le directeur, d'une maison nommée Hermann, d'une administration, d'un atelier de bricolage, d'une infirmerie, d'une école maternelle, d'une lingerie et enfin d'une salle informatique. Ainsi, nous avons recensé l'ensemble des appareils électriques trouvés au niveau du site et l'estimation des durées de leur fonctionnement. A partir de ce matériel recensé, nous avons calculé les énergies consommées. Ces résultats sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2. – Besoin énergétique journalière du village SOS de Dakar

Pièces	Equipements	Puissance totales (Watt)	Durée utilisateur (heure/jour)	Consommation journalière (Wh/j)
7 studios	160	11909,5	33	24972
15 maisons	300	26527,5	51,43	82492,5
Directeur	27	2104,5	74	14824
Herman	17	5478,5	43	13242
Administration	37	13132	47	71534
Salle informatique	52	4798	12	19586
Lingerie	15	9308	36,4	8264
Atelier	6	9481	17,2	4408
Infirmerie	5	1436	27	8682
Maternelle	24	656	12	2624
3 nouveaux	60	1572	24	6660
Totaux		74 403		259 288,5

A partir de ce tableau, on note que la puissance totale de tous les récepteurs du village SOS est de 74 403 W et le besoin énergétique journalier du village est estimé à 259 880,5 Wh/j. Il convient alors de produire d'avantage d'énergie pour avoir une consommation suffisante. Cette énergie produite notée est fonction du besoin énergétique et d'un coefficient k prenant en compte l'incertitude météorologique, l'inclinaison non corrigée des modules et le non optimalité du point de fonctionnement des modules

3. Résultats

3.1. Dimensionnement des modules photovoltaïques

Le calcul du nombre de module (panneaux) N_p dépend de la puissance crête (P_c) du champ et des caractéristiques de fabrication du type de module utilisé.

3.2. Puissance crête totale du champ photovoltaïque dans les six stations

La puissance crête totale du champ photovoltaïque dépend de l'ensoleillement (E_{ns}) quotidienne du lieu d'utilisation. Pour notre étude, le potentiel solaire annuel dans les six stations a été obtenu grâce aux mesures du rayonnement dans chacune de ces stations. La formule de base pour la détermination de la puissance crête (P_c) nécessaire pour un système photovoltaïque est donnée comme suit :

$$P_c = \frac{E_j \text{ (en Wh/j)} \times (1 \text{ kW/m}^2)}{E_{ns} \text{ (en kWh/m}^2) \times K} \quad [\text{Eq 1}]$$

Avec E_j la consommation journalière et E_{ns} l'ensoleillement du site d'installation.

K : facteur de conversion appliqué pour tenir compte de différentes pertes (modules, batteries, convertisseur). Déterminé expérimentalement, ce

facteur de conversion a en général pour valeur $K=0,6$ [16].

Les résultats du calcul de la puissance crête de l'installation photovoltaïque pour les six stations de la région sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. Puissance crête calculée pour les six stations

Stations	Puissance crête (W _c)
Dakar	67 309
Niamey	64 073
Dori	67 651
Ouagadougou	80 609
Gaoua	75 012
Ndjamena	99 210

Cette puissance crête dépend de la consommation journalière (259 880,5 Wh/j) et de l'irradiation solaire dans chacune de ces stations. Ce tableau 3 montre que ces puissances crêtes varient de 64 073 W_c à 99 210 W_c. On note le maximum de puissance crête dans la station du sud de la région en l'occurrence N'Djamena avec une valeur de 99 210 W_c. Cependant, les stations du nord comme Niamey, Dakar et Dori enregistrent les valeurs minimales et cela est dû au maxima en l'irradiation dans ces trois stations.

3.3. Choix de la tension de fonctionnement

La tension du champ photovoltaïque dépend du type d'application, de la puissance photovoltaïque du système de la disponibilité des matériels (modules et récepteur). Elle est choisie généralement en fonction de la puissance crête du système.

Le tableau 4 indique les valeurs de tension recommandées en fonction de la puissance crête de chaque installation.

Le tableau 4 indique les valeurs de tension recommandées en fonction de la puissance crête de chaque installation.

Tableau 4. Les tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques à chaque intervalle de puissance crête [17]

Tension recommandé Volt (DC)	Puissance crête (W _c)
12	< 500 W _c
24	500W _c - 2KW _c
48	>2KW _c

Les résultats obtenus sur le tableau 4 montrent que la puissance crête de chacune de nos stations est supérieure à 2 KW_c. En tenant compte des seuils recommandés, nous choisissons une tension fixée à 48 V (DC) pour notre installation solaire et cela pour toutes les stations.

3.4. Détermination du nombre de modules à installer dans les six stations sahéniennes.

Le nombre de panneaux photovoltaïques est calculé en fonction des caractéristiques du module choisi et de la puissance crête (P_c) du générateur. Ainsi, pour calculer le nombre de panneaux (N_p) nécessaire, il suffit de faire le rapport entre la puissance du champ requis (puissance crête) et la puissance unitaire (P_u) indiquée sur la fiche technique du module.

$$N_p = \frac{P_c}{P_u} \quad [\text{Eq 2}]$$

Pour notre installation, nous choisissons des panneaux solaires de type poly-cristallin avec une puissance nominale 260 W_c et une tension 24 V [18] pour toutes les stations. Ce choix est motivé par le fait que c'est le type le plus accessible du marché et aussi sa résistance aux températures élevées du Sahel (entre 25 et 40°C).

Le tableau 5 résume le nombre total de panneaux à installer dans chaque station ainsi que ceux connectés en séries et en parallèles à partir des besoins énergétiques du village SOS de Dakar.

Tableau 5. Dimensionnement et choix des panneaux dans chaque station

Stations	Gaoua	Ndjamena	Ouaga	Niamey	Dori	Dakar	Désignation
Nombre de panneaux	260	382	310	250	260	260	Panneaux Solaire Polycristallin (260 W _c /24V)
Connexion en série	2	2	2	2	2	2	
Connexion en parallèle	130	191	155	125	130	130	

De manière globale, on constate que pour toutes ces stations sahéniennes, le nombre de panneaux nécessaire

pour couvrir les besoins énergétiques comme celui du village SOS de Dakar varie entre 260 et 382.

Pour mettre en évidence la position géographique (latitude) de chaque station, nous représentons sur la figure 2, le nombre de panneaux nécessaire en fonction de la latitude de chaque station.

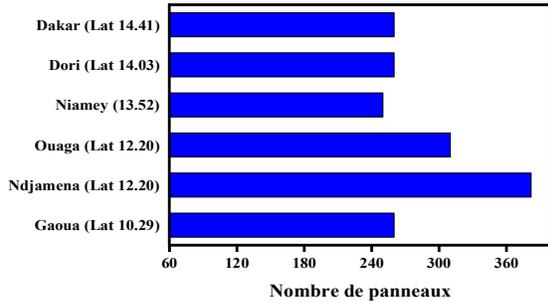


Figure 2 : Nombre de panneaux des six stations en fonction de la latitude de la localité

L'analyse de la figure, montre que plus on se décale vers le Nord de la région (si la latitude augmente), plus le nombre total de modules à installer diminue.

De plus, on constate que pour la plupart des stations du sud de la région (N'Djamena et Ouagadougou), le nombre de panneaux total nécessaire est supérieur à 300 modules. Cependant, pour les stations du nord de la région (Niamey, Dori et Dakar) caractérisées par un fort potentiel solaire, l'installation solaire nécessite un nombre minimum de panneaux comprise entre 250 et 260 modules. Paradoxalement, on note que la station la plus au sud de la région (Gaoua) ne représente pas le maximum de panneaux nécessaire. En effet, malgré sa position géographique, la station de Gaoua avec une latitude de 10.29°N enregistre un fort potentiel solaire (5,33 kWh/m²/jour). Cela peut s'expliquer par le fait que l'atmosphère de cette ville située au Sud-Ouest au Burkina Faso est marqué par un climat tropical humide où l'activité solaire semble moins importante et pouvant être caractérisée par une atmosphère plus dégagée notamment en période sèche pendant automne, l'hiver et le printemps [19, 20]. L'analyse de la figure 2 indique également que le nombre maximum de panneaux est obtenu à N'Djamena (Latitude 12.11°N) avec 382 modules et que le minimum de modules est noté à Niamey (Lat 14.03°N) avec 250 panneaux (voir tableau 5). Les stations qui sont à peu près sur la même ligne de latitude (Dakar et Dori) possèdent le même nombre de panneaux (260 modules). Une fois le nombre de panneaux connu, on s'intéressera à l'architecture du générateur PV. Les panneaux sont montés en série ou en parallèle selon le besoin énergétique de l'installation. En effet, pour notre cas (village SOS), le système doit fournir une tension de 48 V et un courant produit supérieur ou égal à 1 208 A au nord de la région et 1 796 A au sud. D'une part, une association de plusieurs modules en série permet d'augmenter la tension du générateur tout en gardant la même intensité de courant. Ainsi, on obtient le nombre de modules en série grâce à la tension du fonctionnement du système (48 V) et la tension du panneau (24 V). Ces deux paramètres restent fixes pour ce calcul. Après calcul, on retrouve le même nombre de

panneaux en série (2 panneaux) pour chacune des six stations. D'autre part, une connexion en parallèle des panneaux solaire permet d'accroître le courant de sortie du générateur et alors les panneaux sont soumis à la même tension. En effet, le nombre de panneaux en parallèles est différent d'une station à l'autre, il est fonction du nombre de modules total et du nombre de panneaux en série. Le maximum de nombre de panneaux en parallèle est observé à N'Djamena avec 191 panneaux parallèles et le minimum à Niamey 125 modules en parallèle. Pour les stations de Gaoua, Dori et Dakar, on retrouve le même le nombre de panneaux en parallèle par station avec environ 130 modules.

3.5. Dimensionnement des batteries de stockages.

Les batteries servent à stocker le surplus d'énergie produite en journée par l'installation PV pour le réutiliser lorsque le soleil est voilé. Le système de charge mis en place permet de recharger les batteries à partir de l'énergie produite par les PV si celle-ci est suffisante ou à partir de l'énergie provenant du réseau public. Une batterie est caractérisée par deux grandeurs que sont sa tension (en Volt) et sa capacité (en Ampère heure). Le dimensionnement se déroule généralement en quatre étapes.

D'abord, il faut déterminer le nombre de jour (N_j) d'autonomie. Le chiffre retenu dépend des conditions météorologiques de chaque région. Dans notre zone d'étude (Sahel), le nombre de jour d'autonomie varie entre 3 à 5 jours [21].

Ensuite, la profondeur de décharge (D_p) maximale des batteries doit être prise en compte. En effet, pour une meilleure durée de vie des batteries, elles ne doivent pas se décharger complètement. Pour cela, un seuil fixé de profondeur maximal de décharge est nécessaire. En générale cette profondeur varie de 60% à 70% [22].

Après, il y a l'étape de la détermination de la capacité de stockage C_s (Ah) de la batterie qui se calcule selon la formule suivante:

$$C_s = \frac{E_j \times N_j}{U_s \times D_p} \quad [\text{Eq 3}]$$

E_j : Consommation journalière ;

U_s représente la tension (en volts) du système aux bornes du générateur

Après calcul, nous avons obtenu une capacité de stockage estimée à 20 303 Ah, avec une autonomie de trois jours de stockage. En générale, dans notre région on estime à 3 jours le nombre maximal d'autonomie successive sans soleil [23].

Ainsi, le nombre de batterie par branche (connexion en série) est fonction de la tension (U_b) du système et de la tension aux bornes de la rame de la batterie U_b selon la formule ci-dessous :

$$N_{bs} = \frac{U_s}{U_b} \quad [\text{Eq 4}]$$

Le nombre de batteries en parallèle (N_{pb}) se calcule par le rapport entre la capacité de stockage (C_s) de la batterie et la capacité nominale (C_b) indiquée sur la fiche technique de la rame d'une batterie. Il se calcule selon la formule suivante:

$$N_{bp} = \frac{C_s}{C_b} \quad [\text{Eq 5}]$$

En résumé, le nombre total des batteries (N_b) pour chacune des six stations est calculé de la manière suivante :

$$N_b = N_{bs} \times N_{sp} \quad [\text{Eq 6}]$$

Les accumulateurs choisis sont des batteries de type tubular plate GEL de tension 2 V avec une capacité de 2000 Ah [24]. Le tableau 6 résume le calcul du dimensionnement des batteries, pour chacune des six stations de la région. Sur ce même tableau nous rappelons la capacité de stockage des batteries (20 303 Ah) et la désignation du type de batterie choisi.

Tableau 6. – Dimensionnement des batteries dans les six stations

Stations	Dakar	Niamey	Dori	Ouaga	Gaoua	Ndjamena	Désignation
Capacité de stockage (Ah)	20 303	20 303	20 303	20 303	20 303	20 303	Batterie Tubular plate GEL 2 V/ 2000 Ah
Nombre de batteries total	264	264	264	264	264	264	
Connexion en série	24	24	24	24	24	24	
Connexion en parallèle	11	11	11	11	11	11	

L'analyse du tableau montre qu'il faut 264 batteries de capacité 2 000 Ah avec une tension de 2 V pour l'installation d'un système de type village SOS dans chacune des six stations. Ceci est dû au fait, que le nombre de batteries est déterminé en fonction de leur capacité de stockage (20 303 Ah) et la capacité nominale de la batterie (2 000 Ah). Tout comme les panneaux, les batteries peuvent être câblées en série ou en parallèle en fonction des résultats attendus. Une partie des batteries est connectée en série pour obtenir une tension supérieure ou égale à la tension de fonctionnement du système. Une autre partie des batteries est câblées en parallèle pour supporter l'intensité du courant de fonctionnement du système. Le nombre de batteries en série dépend de la tension du système et la tension aux bornes de la batterie. Tandis que le nombre de batteries en parallèle est fonction du nombre de batteries totale à installer et des accumulateurs en série. Après calcul, le tableau 6 indique un nombre de 24 batteries en série et de 11 batteries en parallèle pour chacune des six stations. Ceci est dû au fait que les paramètres permettant de déterminer le nombre de batteries (série et parallèle) sont fixés pour chacune des six stations. Les batteries restent les éléments les plus fragiles du dispositif, du coup la qualité de leur contrôle et de leur entretien influence en grande partie la durée de vie du système. En résumé, pour les six stations on aura un système PV

composé de 264 batteries dont 24 connectées en série et 11 en parallèle.

3.6. Dimensionnement du régulateur.

La fonction principale du régulateur est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge en arrêtant l'alimentation, si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti-décharge profonde. Le dimensionnement d'un régulateur de charge dépend de sa capacité d'adaptation au courant d'entrée maximal (venant des panneaux vers le régulateur) et au courant de sorti (quittant le régulateur pour les charges à alimenter).

Dans la pratique, il est recommandé de choisir un régulateur dont le courant d'entrée maximal (I_{emax}) admissible est égal à 1,25 fois le courant maximal (I_{max}) de charge du panneau photovoltaïque. C'est une marge de sécurité adoptée pour le régulateur [25]. Le courant d'entrée maximale est calculé selon la formule suivante :

$$I_{emax} = 1,25 \times I_{max} \quad [\text{Eq 7}]$$

Avec I_{max} l'intensité maximale d'un module

L'intensité de sortie (I_s) du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale consommée par les

récepteurs. Elle peut être déterminée par la formule ci-dessous :

$$I_s = \frac{P_T}{U_s} \quad [\text{Eq 8}]$$

P_T puissance totale en (watt) du récepteur et U_s la tension aux bornes du générateur

Ainsi, pour déterminer le nombre de régulateur (N_r), on calcule le rapport entre le courant d'entrée maximal (I_{emax}) et le courant du régulateur (I_{reg}) indiqué sur la fiche technique du régulateur choisi.

$$N_r = \frac{I_{emax}}{I_{reg}} \quad [\text{Eq 9}]$$

Avec N_r le nombre de régulateur, I_{emax} l'intensité maximale du champ PV et I_{reg} l'intensité maximale du régulateur.

Les résultats de dimensionnement du régulateur pour les six stations sont consignés dans le tableau 7.

Tableau 7. – Dimensionnement et choix du régulateur dans les six stations

Station	Courant entré (A)	Courant sortie (A)	Nombre régulateurs
Dakar	1208	813	12
Niamey	1105	417	11
Dori	1208	813	12
Ouaga	1475	840	15
Gaoua	1208	813	12
Ndjamena	1796	1035	18
Désignations	Régulateur MPPT 100A/150V		

Pour notre dimensionnement, nous adopterons un régulateur de type MPPT (point de puissance maximale) avec une intensité de 100 A et une tension de 150 V [26]. En effet, ce régulateur utilise un circuit électronique spécial lui permettant de surveiller en permanence la charge et la décharge de la batterie. En effet, on doit s'assurer que le courant reçu par le régulateur (courant d'entrée) soit inférieur ou égale à celui produit par les panneaux. De même que, celui qui sort du régulateur doit être supérieur ou égale au courant des différents les appareils à alimenter. Le tableau 7 montre que le maximum de régulateur nécessaire est noté à N'Djamena avec un nombre de 18. Cette station du sud de la région se caractérise par un courant d'entrée très élevé autour de 1 796 A. Le plus petit nombre de régulateur nécessaire au système solaire de type village SOS est enregistré sur la station de Niamey au Niger qui est caractérisé par le courant d'entrée le plus faible (1105 A) comparé à celui des cinq autres stations. Et enfin, notons que les autres stations (Dakar, Dori, Gaoua et Ouagadougou)

nécessitent à peu près un même nombre de régulateur compris entre 11 et 15.

3.7. Dimensionnement de l'onduleur.

L'onduleur est un dispositif électronique permettant la conversion du courant continu du générateur ou des batteries en courant alternatif avec un choix bien précis de la fréquence. Le dimensionnement d'un onduleur se base sur la somme des puissances maximales de chaque équipement à alimenter dite puissance active, la tension de sortie des panneaux solaires en DC (Courant continue) et la tension d'utilisation des récepteurs en AC (Courant alternatif) sont souvent alimentés en 230 V. La puissance nominale de l'onduleur (P_{ond}) est calculée ainsi [27] :

$$P_{ond} = \frac{P_{ch} + P_{pertes}}{\eta_{ond}} \quad [\text{Eq 10}]$$

P_{ch} : puissance de charge

η_{ond} : rendement de l'onduleur indiqué sur la fiche technique de l'onduleur choisi (90% - 98%)

P_{pertes} : perte dans les câbles

Ainsi, à partir de la puissance de l'onduleur, on détermine la Puissance maximale pouvant être délivrée en transitoire pour permettre le démarrage de certains équipements.

$$P_{max} = k_s \times P_{ond} \quad [\text{Eq 11}]$$

k_s est un coefficient de sécurité imposé, variant de 1,1 à 1,4 [28]

C'est à partir de la puissance de l'onduleur calculée, qu'on détermine le nombre d'onduleur. Un onduleur de type Fronius-Symo de puissance de 15 kVA [29] est utilisé pour le cas de notre installation. Le tableau ci-dessous indique le nombre d'onduleurs nécessaire, la puissance maximale des récepteurs et la puissance de l'onduleur pour chacune de ces stations.

Tableau 8. – Dimensionnement de l'onduleur dans les six stations

Station	Puissance maximale (kW)	Nombre d'onduleurs	Puissance onduleur (kW)
Dakar	74,403	5	75
Niamey	74,403	5	75
Dori	74,403	5	75
7Ouaga	74,403	5	75
Gaoua	74,403	5	75
Ndjamena	74,403	5	75
Désignation	Onduleur Fronius-Symo (15 kVA/ 48 V) s		

Conformément aux prévisions, le tableau 8 montre que la puissance de l'onduleur est partout supérieure à la puissance d'utilisation des récepteurs. On constate qu'il y'a 5 onduleurs de 15 kVA avec une tension de 48 V et une puissance maximale de l'onduleur de 75 kW pour chacune des six stations. Ceci est dû par le fait que la puissance totale des récepteurs est la même pour toutes ces six localités.

4. Etude financière de l'installation proposée

Les différentes composantes de notre installation PV connectée au réseau ont été estimées pour déterminer l'investissement que le village SOS devra effectuer. À partir d'une facture proforma fournie par Énergie Solaire Sénégal, une entreprise sénégalaise située à Castor dans la région de Dakar, nous avons calculé le coût initial de l'investissement. Le devis estimatif de l'installation proposée est consigné dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9. – Coût initial de l'installation solaire proposée pour chacune des six stations (en CFA).

Sations	Montant initial (CFA)
Dakar	77 247 000
Niamey	66 847 000
Dori	77 247 000
Ouaga	84 247 000
Gaoua	77 247 000
Ndjamena	96 407 000

Le tableau 9 indique le coût initial de l'installation solaire (prix des éléments qui composent le système) pour chacune des six stations. Les montants sont obtenus en faisant la somme de chaque élément constitutif de l'installation solaire proposée.

Pour mieux voir la différence en termes d'investissement, nous représentons sur la figure 3 le coût initial du système photovoltaïque pour chacune des localités sahéliennes que sont Dakar (Sénégal), Dori (Burkina Faso), Niamey (Niger), Ouagadougou (Burkina Faso), N'Djamena (Tchad) et Gaoua (Burkina Faso).

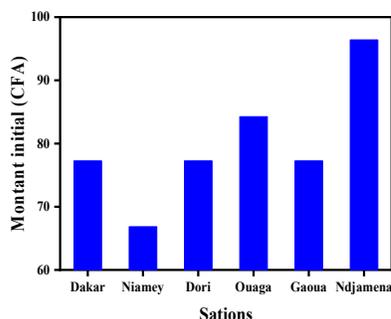


Figure 3 : Coût initial (en CFA) de l'installation solaire proposée pour chacune des six stations du Sahel.

D'abord, on note que (tableau 9 et figure 3) le coût initial d'une installation solaire de type village SOS pour les six stations du Sahel varie entre 66 847 000 et 96 407 000 CFA. Ensuite, la figure 3 indique que le montant nécessaire pour l'installation PV du village SOS pour les stations du sud de la région (Ouagadougou et N'Djamena) varie de 84 247 000 à 96 407 000 CFA. Cependant, pour les stations du nord de la région (Dakar, Dori et Niamey) le coût de l'installation est moins élevé comparé aux ceux du sud et il est estimé entre 66 847 000 et 77 247 000 FCFA. La station de Niamey est caractérisée par le plus faible taux d'investissement avec un montant évalué à 66 847 000 CFA. Et enfin, on retrouve le coût d'installation le plus élevé au sud à N'Djamena avec un prix estimatif de 96 407 000 CFA. A partir du coût initial, le coût total de l'installation pour chacune des six stations du Sahel est calculé sur la base des hypothèses suivantes :

- Le coût de maintenance et d'exploitation est estimé égal à 5% de l'investissement initial,
- La main d'œuvre est estimée égale à 10% de l'investissement initial,
- Le coût de remplacement des équipements (onduleurs, batteries),
- Le coût d'investissement initial.

À partir des hypothèses citées ci-dessus, le montant total de l'installation solaire de type village SOS est constitué de la somme du montant initial, du coût de main d'œuvre et d'exploitation et du prix de remplacement des équipements. Après calcul, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 10.

Tableau 10. – Coût total de l'installation solaire proposée pour chacune des six stations (en CFA).

Stations	Coût total (CFA)
Dakar	134 400 000
Niamey	125 847 000
Dori	134 400 000
Ouagadougou	154 185 750
Gaoua	134 400 000
Ndjamena	159 868 050

On remarque que le coût total de l'investissement pour le système solaire de type village SOS est estimé entre 125 847 000 et 159 868 050 CFA pour les stations du sud. Par contre, pour les localités du nord de la région, le montant global de l'installation PV varie de 125 847 050 à 134 400 000 CFA.

4.1. Durée de vie moyenne de l'installation solaire : Cas de Dakar

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont conformes aux normes françaises et européennes, ils ont environ une durée de vie de 25 à 40 ans en moyenne [30]. Leur utilisateur est assuré de bénéficier de la totalité de leur énergie pendant les dix premières années qui suivent l'installation. Au cours des 10 années suivantes, ils

fournissent 90 % de cette énergie. Entre la 21^{ème} et la 30^{ème} année, ils peuvent fournir les quatre cinquièmes (80%) l'énergie produite. Cependant, l'onduleur qui sert à transformer le courant continu qui est fourni par les panneaux est plus fragile que les autres pièces et il dure en moyenne entre dix et quatorze ans [29]. Il convient donc de choisir un onduleur performant. De même les batteries solaires ont une durée de vie limitée (7 à 10 ans) [31] et dépendent de la technologie utilisée. De ce fait, on peut estimer la durée de vie moyenne de notre installation de type village SOS à Dakar en fonction de l'énergie produite par le système. La figure 4 illustre l'énergie produite (courbe bleu) par l'installation photovoltaïque en fonction des années. Le trait rouge sur cette figure représente l'énergie nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques du village chaque année.

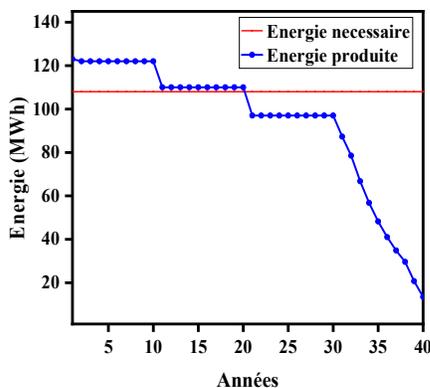


Figure 4 : La production d'énergie solaire (bleu) par le système photovoltaïque comparé au besoin énergétique (rouge) pendant 40 ans : Cas de Dakar.

L'analyse de la figure montre que le système solaire produit en moyenne de l'énergie (116 MWh) suffisante pour couvrir le besoin énergétique (108 MWh) du village SOS pendant une vingtaine d'années. Durant cette période, il fournit la même quantité d'énergie au cours des dix premières années avec une capacité de production avoisinant 122 MWh par an. Au-delà de cette durée (10 ans), la production est estimée à 110 MWh par an (soit 90%) entraînant une légère diminution. À partir de la 21^{ème} d'année, le système fournit 97 MWh par an (soit 80%) comparé au besoin énergétique du village qui est estimé à 108 MWh par an. Ainsi, de ce fait il est donc impératif de souscrire au réseau de distribution d'électricité public pour assurer toutes ces besoins en énergie. Cependant, il est recommandé de faire une installation solaire connectée au réseau public. La figure 4 indique qu'à partir de 30 ans, la performance des panneaux commence à diminuer d'année en année de façon progressive jusqu'à 40 ans. Plusieurs facteurs influent sur la durée de vie des panneaux, leur type (monocristallin, polycristallin, silicium amorphe), les conditions météorologiques auxquelles ils sont soumis (poussières, neiges, nuages, orages etc.) et surtout la qualité du matériel. La question relative à la performance des modules photovoltaïques reste une

préoccupation majeure pour la maîtrise et le développement de la filière photovoltaïque, en particulier dans les régions aux conditions climatiques contraignantes tels que le sahel. Au Sénégal, situé en région sahélienne, les températures varient entre 16°C et 38°C [32]. En effet, les régions sahéliennes sont caractérisées par des températures très élevées supérieures à 30°C pendant toute l'année et nettement au-dessus de 40°C en période de grande chaleur [32]. Ces températures élevées combinées d'une part à une humidité relative très variable durant l'année et comprise entre 30% et 90% selon la saison et la forte irradiation UV constituent des conditions de fonctionnement contraignantes pour les modules PV. Cependant, les conditions de caractérisation des modules sur lesquelles les fabricants s'appuient pour avancer les durées de vie et de garantie des modules sont très différentes des conditions de fonctionnement en milieu sahélien. De plus une étude expérimentale en zone sahélienne a mis en évidence l'impact des dépôts de la poussière sur les caractéristiques de performance des modules PV. Les résultats ont montré une dégradation de la puissance maximale de plus de 70% observée sur des modules après une année d'exposition sans nettoyage [33, 34].

5. Conclusion

L'objectif de ce travail a été d'une part d'effectuer un dimensionnement photovoltaïque pour six stations différentes au Sahel et d'autre part de réaliser une étude financière nécessaire pour ces différentes localités (Dakar, Niamey, Ouagadougou, Gaoua, Dori et N'djamena). A partir du potentiel global mesuré sur ces six stations, nous avons effectué un dimensionnement solaire appliqué à un besoin énergétique unique estimé à 259,88 kWh/jour. Les résultats montrent que le sud (N'Djamena et Ouagadougou) de la région nécessite plus éléments constitutifs (panneaux, batteries, régulateurs et onduleurs) que le nord (Niamey, Dori et Dakar) pour couvrir ce besoin énergétique. Ainsi, pour ces six stations, le nombre total de panneaux nécessaire est compris entre 250 au nord et 382 modules au sud de la région. Le nombre de régulateur varie de 11 et 18 selon la zone dans cette région. De même que, le nombre d'onduleurs nécessaire pour soutenir la puissance des appareils est de 5 pour chacune de ces stations de la région. Cependant, on note que pour chacune des six stations 264 batteries sont nécessaires pour stocker l'énergie pour les périodes non ensoleillées. Le dimensionnement du système nous a permis d'avoir l'ensemble des éléments qui composent l'installation pour chacune des six stations. A partir de ces derniers, nous avons effectué une étude sur le coût d'investissement. Les résultats montrent que le montant de l'investissement total de l'installation solaire varie de 125 millions FCFA au nord à 159 millions CFA au sud de la région pour une durée de vie environ 35 ans. En effet, la station de Niamey située au nord de la région est caractérisée par le plus faible taux d'investissement avec un montant évalué à 125 847 050 CFA. En effet, le coût de la réalisation du système photovoltaïque le plus élevé est noté au sud à N'Djamena avec une somme estimée à 159 868 050

CFA. L'étude de cas sur la station de Dakar a montré que la solution photovoltaïque est économiquement plus rentable que l'alimentation à partir du réseau public seul. Et enfin, l'analyse financière montre également qu'au bout de 20 ans d'existence, le système solaire installé à Dakar permet d'économiser plus de 153 millions FCFA.

REFERENCES

- [1] Leroux, M. Editorial : The Great Sahelian Drought. In: *Rev of geography of Lyon*, 70 (34), 179 -180, 1995. <https://doi.org/10.3406/geoca.1995.4209>
- [2] Nicholson, S.E., Grist, J.P. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. *International Journal of Climatol* 221, 1733-1757, 2001. <https://doi.org/10.1002/joc.648>
- [3] Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.L., Sighomnou, D., Vauclin, M. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global Planetary Change* 99: 18-30, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009>
- [4] Musa, B., Zangina, U., & Aminu, M. Estimation of global solar radiation in Maiduguri, Nigeria using Angstrom model. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(12) :1623-1627, 2012.
- [5] Aamaas, B., Berntsen, T.K., Fuglestedt, J.S., Shine, K.P., Bellouin, N. Regional emission metrics for short-lived climate forcers from multiple models. *Atmos Chem Phys*, 16(11): 7451-7468, 2016. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7451-2016>
- [6] Dramé, M.S., Camara, M., and Gaye, A.T. Simulation of the impact of aerosols on daytime solar radiation Mbour. *Meteorology*, 51-57, 2012. <https://doi.org/10.4267/2042/48513>
- [7] Bonkaney, A., Madougou, S., Adamou, R. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey. *Journal of Renewable Energy*, Article ID 9107502, 8,2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>
- [8] Marticorena, B., Haywood, J., Coe, H., Formenti, P., Liousse, C., Mallet, M., and Pelon, J. Tropospheric aerosols over west africa: highlights from the amma international program. *Atmospheric Science Letters*. 12:19-23, 2011. <https://doi.org/10.1002/asl.322>
- [9] Lui, Z. *Global Energy Interconnection*. Academic Press, 2015.
- [10] Redelsperger, J.L., Thorncroft, C.D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D.J., Polcher, J. African monsoon multidisciplinary analysis: An international research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12) :1739-1746, 2006. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-12-1739>
- [11] Derimian, E., Leon, J.F, Dubovik, O., Chiapello, I., Tanre, D., Sinyuk, A., Auriol, F., Podvin, T., Brogniez, G., and Holben, B.N. Radiative properties of aerosol mixture observed during the dry season 2006 novermbour, senegal. *Journal of Geophysical Research* 113, D00C09, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JD009904>
- [12] <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/lafrique-na-pas-reussi-sa-revolution-solaire-964341>
- [13] Camara, M., Drame, M., and Bilal, B.O. Intra-seasonal aerosol variability in relation to solar energy potential in Mbour, Senegal. *Science Lib Editions Mersenne* 4, 2012. 4120113 ISSN 2111-4706
- [14] Ould, B., Sambou, V., Kébé, C.M.F., Ndong, M., Ndiaye, P.A. Study and modeling of the solar potential of the Nouakchott and Dakar sites. *Journal Sciences* 7: 57-66, 2007.
- [15] Drame, M., Jenkins, G., Camara, M., Robjhon, M. Observations and Simulation of a Saharan Air Layer Event with a Mid-Tropospheric Dust Layer at Dakar, Senegal, 6-7 July 2010. *J Geophys Res* 116, D21204, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JD016368>
- [16] *Projet rapport final. Développer le Bénin à partir des sources renouvelables*. Technical report, PNUD, Ministère de l'énergie et d'eau Bénin., 2010.
- [17] Oudrane, A. Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel. Thèse, Ecole nationale polytechnique d'Oran-Maurice Audin, P.1-195, 2018.
- [18] Labouret, A., Viloz, M. *Energie Solaire Photovoltaïque*. (DUNOD), 2006.
- [19] Nebon, B., Drame, M.S, Bruno, K., Hassime, G., Niang, D.N., Sall, S.M., Kiéno, P.F., and Joseph, B.D. Study of Aerosol Impact on the Solar Potential Available in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2019. <https://doi.org/10.9734/ijec/2019/v9i530116>
- [20] Haroun, A.A., Goni, S., Mahamat, B., A., Khayal, M., Y., Khamis, A.A., Aidara, M., Talla, K., Beye, A.C. Influence of climate temperature on the valorization of agricultural wastewater slaughterhouse biogas in two regions : In Chad and Senegal. *Natural Resources*, 10, 2019. DOI: 10.4236/nr.2019.104006
- [21] Diop, S.M., Proposition technique et financière un système éclairage public solaire sur l'avenue (tronc abass ndao- mamelle). Master's thesis, Université Cheikh Anta Diop, 2011.
- [22] Ndong. Modélisation du potentiel solaire par temps clair kar. *Mémoire de dea, ESP, UCAD*, 55p, 2003.
- [23] Dendib, B. Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque, étude comparative. *phdthesis, Université Ferhat Abbas-Sf*, 2017.
- [24] <https://www.google.com/searchsa=x&q=batterie+solaire+48v+200ah&tbm=isch&source=univ&ved=2ahu>
- [25] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/maison-photovoltaïque-autonome/choix-regulateur.php
- [26] <https://www.solaris-store.com/1433-regulateur-victron-smartsolar-mppt-150100-tr-.html>
- [27] <https://www.wattuned.com/fr/victron-energy/543-convertisseur-victron-quattro-0712971126893.html>
- [28] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/dimensionnement-photovoltaïque-continu/exemple-dimensionnement-onduleur.php
- [29] <http://www.photovoltaique.info/-onduleurs-.html>
- [30] <https://www.quelleenergie.fr/questions/duree-vie-panneaux-solaire>
- [31] <http://www.photovoltaique.info/site-isole.htm>
- [32] Bilal, B.O. Mise en œuvre de nouvelles approches d'optimisation multi-objectif de systèmes hybrides éolien-solaire-batterie-groupe électrogène. *Sciences de l'ingénierie*, Phd thesis, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) UCAD, 2012. tel-01436230
- [33] Ndiaye, A., Etude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques - impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance. *Sciences de l'ingénieur*, phd thesis, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP)-UCAD, 2013. doi : tel01250271.
- [34] Diop, D., Diagne, M., Sambou, A., Bassene, P.D., Niang, S. A. A., & Sarr, A. Influence of Dust Deposition on the Electrical Parameters of Silicon-Based Solar Panels Installed in Senegal (Dakar Region). *Energy and Power Engineering*, 13(5), 174-189, 2021. <https://doi.org/10.4236/epe.2021.135012>