



**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HYBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2iE avec grade de Master - Spécialité
Génie Électrique et Énergétique.

Présenté et soutenu publiquement le 24 janvier 2025 par

AHMED ABDOU Adam 20180024

Encadrant 2iE : Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de Conférences CAMES,
enseignant-chercheur en Génie Énergétique, Institut 2iE

Maître de stage : Damipi KOMBATE, Ingénieur énergies renouvelables chez TECMON
ENERGY

Structure d'accueil du stage : TECMON ENERGY

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Prof Yrébégnan Moussa SORO

Membres et correcteurs : Ing Kodjo Sédi AGBOKOU
Ing Justin BASSOLE

Promotion [2024/2025]

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

DEDICACES

Je dédie ce présent travail :

À mon père, Ahmed Abdou MOULAYE, pour votre soutien indéfectible, votre amour constant et votre guidance empreinte de patience et de sagesse. Vous m'avez transmis bien plus que ce que les mots peuvent exprimer et votre présence a été une boussole précieuse à chaque étape de mon parcours. J'ai eu l'immense honneur de coécrire à vos côtés le chapitre

« *Multi-Use Water System Approach for Small Hydro Power Plants (SHPP) alongside Irrigation and Drinking Water Supply (DWS) Networks* », publié dans l'ouvrage collectif *Advances in Hydropower Technologies*, accessible via le lien suivant : <https://www.intechopen.com/books/1003210>.

À ma mère, MOULAYE Sahia, pour votre compréhension infinie, vos conseils avisés, et votre amour inconditionnel. Vous avez été une source constante de réconfort et de motivation, même dans les moments les plus difficiles. Merci pour tout ce que vous représentez dans ma vie.

À mes bien-aimés frères et sœurs,

MOULAYE AHMED Hachim, MOULAYE AHMED Chérifa, MOULAYE AHMED Lala Fatima, et ma sœur jumelle MOULAYE AHMED Haoua pour votre affection, votre soutien indéfectible, et pour les moments précieux partagés. Vous êtes ma force et ma motivation à toujours aller de l'avant.

À tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accompagné dans cette aventure, je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon affection.

Remerciements

- Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)** pour la qualité de la formation dispensée, qui m'a permis d'acquérir des compétences solides. Mes remerciements vont également à **mes enseignants de 2iE**, pour leur engagement et leurs précieux enseignements.
- Je remercie chaleureusement mon directeur de mémoire, **Dr. Daniel YAMEGUEU NGUEWO**, pour son accompagnement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce travail.
- Mes remerciements particuliers vont à mon maître de stage, **Ingénieur Damipi KOMBATE**, dont l'encadrement et la bienveillance ont grandement enrichi mon expérience. Sa simplicité, sa modestie et sa joie de vivre en ont fait bien plus qu'un mentor, un véritable grand frère.
- Je tiens à adresser ma reconnaissance à **TECMON ENERGY** et à tout son personnel pour leur accueil chaleureux et leur esprit d'équipe. J'y ai beaucoup appris, tant sur le plan technique qu'humain.
- Une mention spéciale va à mon père, **Ahmed ABDOU MOULAYE**, véritable modèle d'excellence et de courage, il a toujours été d'un amour inconditionnel envers tous ses enfants. Pilier indéfectible de ma vie, il a su guider mes premiers pas avec sagesse et bienveillance. Sa générosité, son soutien sans faille et son inspiration constante resteront à jamais gravés dans mon cœur.
- À ma mère, **MOULAYE Sahia**, je dédie ces lignes avec une immense gratitude. Ton amour, ta force et tes sacrifices m'ont soutenu à chaque étape de ma vie, et ta générosité reste une source constante d'inspiration.
- À mes frères et sœurs : **MOULAYE AHMED Hachim**, **MOULAYE AHMED Chérifa**, **MOULAYE AHMED Lala Fatima**, et ma sœur jumelle **MOULAYE AHMED Chérifatou**, merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements et l'amour qui m'a toujours porté.
- À Mlle FAYAMA Mariam Afida, merci d'avoir été là, surtout dans les moments de doutes.
- Enfin, mes pensées vont à mes compagnons de route, mes amis fidèles pour leur amitié sincère et leur présence dans les moments décisifs de ma vie. Je pense à MOUSSA I. Malam Hassane, SADAOU B. Mahamadou Bachar, IMOROU M. Mohamed, SANI L. Ismaël, YACOUBOU Adamou, MAHAMAN L. Djamilou

Merci à toutes et à tous pour votre bienveillance et votre soutien inestimable, qui ont été ma plus grande force tout au long de ce parcours.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Citation

*« L'accès à une énergie durable est un préalable au développement
économique et social »*

Kofi Annan

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

RESUME

Ce mémoire porte sur l'étude de faisabilité technico-économique d'un mini-réseau hybride pour électrifier les villages d'Atchinedji et Adjigo au Togo, où le taux d'électrification rurale reste limité à 35 %. Le projet propose une centrale solaire photovoltaïque de 178,2 kWc, un système de stockage de 261 kWh et deux groupes électrogènes de 20 kVA chacun, utilisés en appoint. Les besoins énergétiques journaliers des villages sont estimés à 734,434 kWh, répartis en une consommation diurne de 601,291 kWh (81,9 %) et une consommation nocturne de 133,143 kWh (18,1 %). Les 645 ménages ont été classés en trois catégories : 60 % à besoins limités (lampes, téléphones), 30 % avec appareils supplémentaires (ventilateurs, téléviseurs) et 10 % avec des équipements énergivores comme des réfrigérateurs.

Le système est dimensionné sur une base d'irradiation solaire moyenne annuelle de 5,709 kWh/m²/jour. La production photovoltaïque annuelle de 303,23 MWh est répartie ainsi : 59,08 % consommés directement en journée, 26,71 % pour la recharge des batteries et 14,21 % d'excédents non utilisés (non stockés). Durant les mois à faible irradiation (juin à septembre), les groupes électrogènes assurent 5,31 % des besoins énergétiques pour garantir une continuité d'alimentation.

Le réseau HTA/BT, conforme aux normes NFC 67-200, comprend une ligne HTA de 20 kV et deux transformateurs abaisseurs de 100 kVA pour la distribution en basse tension. Le Plan de Gestion Environnemental et Social (PGES) prévoit des mesures pour minimiser les impacts environnementaux et maximiser les bénéfices sociaux.

Le coût total du projet est de 404 260 580 francs CFA, avec un CAPEX de 219 781 742 francs CFA et un OPEX de 144 918 125 francs CFA sur 25 ans. Le LCOE de 45,36 francs CFA/kWh et un temps de retour sur investissement de 13,15 ans attestent de la viabilité économique et financière du projet.

Mots Clés :

- 1. Centrale solaire photovoltaïque**
- 2. Système hybride PV-diesel pour Atchinedji et Adjigo**
- 3. Mini-réseau hybride**
- 4. Électrification rurale au Togo**
- 5. Ligne HTA/BT en milieu rural au Togo**

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

ABSTRACT

This thesis focuses on a technical and economic feasibility study of a hybrid mini-grid to electrify the villages of Atchinedji and Adjigo in Togo, where the rural electrification rate remains limited to 35%. The project proposes a 178.2 kWp solar photovoltaic plant, a 261 kWh energy storage system, and two 20 kVA generators as backup. The villages' daily energy needs are estimated at 734.434 kWh, divided into a daytime consumption of 601.291 kWh (81.9%) and a nighttime consumption of 133.143 kWh (18.1%). The 645 households have been categorized into three groups: 60% with limited needs (lamps, phones), 30% with additional appliances (fans, televisions), and 10% with energy-intensive equipment like refrigerators.

The system is sized based on an average annual solar irradiation of 5.709 kWh/m²/day. The annual photovoltaic production of 303.23 MWh is distributed as follows: 68.21% consumed directly during the day, 26.47% for battery recharging, and 13.43% of unused surpluses. During months with low irradiation (June to September), generators provide 5.31% of energy needs to ensure continuous supply.

The MV/LV network, compliant with NFC 67-200 standards, includes a 20 kV MV line and two 100 kVA step-down transformers for low-voltage distribution. The Environmental and Social Management Plan (ESMP) includes measures to minimize environmental impacts and maximize social benefits.

The total project cost is 404,260,580 CFA francs, with a CAPEX of 219,781,742 CFA francs and an OPEX of 144,918,125 CFA francs over 25 years. The LCOE of 45.36 CFA francs/kWh and a payback period of 13.15 years attest to the project's economic and financial viability.

Keywords:

- 1- Photovoltaic solar power plant
- 2- PV-diesel hybrid system for Atchinedji and Adjigo
- 3- Hybrid mini-grid
- 4- Rural electrification in Togo
- 5- MV/LV line in rural areas of Togo

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

LISTE DES ABREVIATIONS :

DOD : profondeur de décharge ;

E_a : Besoins énergétiques diurnes (kWh) ;

E_n : Besoins énergétiques nocturnes (kWh) ; E_{xT} : le productible du champ PV ;

γ_{en} : facteur de qualité de la demande énergétique ;

AT2ER : Agence Togolaise d'Electrification Rurale et des Energies Renouvelables

LCOE : le coût actualisé de l'électricité ;

B_j : besoin énergétique total journalier (kWh/jour) ;

R_p : ratio de performance global du système ;

I_r : irradiation solaire moyenne journalière (kWh/m²/j) ;

η_{ond} : rendement onduleur (92%) ;

η_{temp} : rendement dû à la température (90%) ;

$\eta_{câbles}$: rendement dû aux câbles et connexions (98%) ;

η_G : rendement global du système ou (R_p) ;

SOC : état de charge du stockage ;

STC : Conditions standards de test ;

$P_{c\ nom}$: puissance du module aux conditions STC ;

NOCT : température nominale de fonctionnement de cellule ;

$Rend_{STC}$: rendement du module aux conditions STC ;

V_{mp} : tension au point de puissance maximal du module ;

V_{oc} : tension de court-circuit ;

I_{mp} : courant au point de puissance maximal du module ;

V_{mpp_min} : tension minimale au point de puissance maximal de l'onduleur ;

V_{mpp_max} : tension maximale au point de puissance maximal de l'onduleur ;

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

V_{max_ond} : tension maximale de l'onduleur ;

$I_{max/entree}$: coutant maximal par entrée DC de l'onduleur ;

C : Capacité nécessaire de la batterie [Ah] ;

B_n : Besoins énergétiques à stocker ;

V_{syst} : tension nominale du système ;

N_{aut} : Nombre de jour d'autonomie ;

P_c : puissance crête du champ solaire ;

H_{cs} : nombre d'heures solaires crêtes.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
I.1. Contexte de l'étude	1
I.2. Problématique	2
II. Objectifs du travail et justification du projet.....	2
II.1. Objectifs du travail	2
II.2. État des lieux et justification du projet	3
III. Présentation de la zone d'étude et de l'entreprise.....	4
III.1. Présentation de la zone d'étude	4
III.2. Présentation de l'entreprise	6
IV. Généralité sur les mini réseaux hybrides	6
IV.1. Les objectifs des systèmes hybrides.....	7
IV.2. Classification des systèmes hybrides	7
IV.2.1. Mode de fonctionnement.....	7
IV.2.2. Structure technique	8
IV.3. Etude sur les configurations des systèmes hybrides.....	9
IV.3.1. Configurations selon le type de bus.....	9
IV.3.2. Configurations selon le mode de contrôle.....	10
IV.3.3. Configurations selon le montage électrique des composants	11
IV.4. Avantages des systèmes hybrides.....	14
V. Analyse des données	14
V.1. Obtention des données	14
V.2. Limites des données disponibles	15
V.3. Problèmes rencontrés et solutions adoptées	16
V.4. Catégorisation des consommateurs	17
V.4.1. Charges communautaires	17
V.4.2. Charges commerciales.....	18
V.4.3. Charges résidentielles pour les ménages :	20

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VI.	<i>Dimensionnement du système hybride</i>	25
VI.1.	Évaluation des besoins énergétiques	25
VI.2.	Analyse du facteur de qualité de la demande énergétique γ_{en}	26
VI.3.	Méthodologies de dimensionnement	27
VI.4.	Analyse de l'irradiation solaire	28
VI.5.	Calcul de la puissance crête du champ solaire (Pc)	28
VI.5.1.	Configuration du champ PV et dimensionnement des composants du champ PV	29
VI.6.	Dimensionnement du Stockage	32
VI.6.1.	Objectif de stockage	32
VI.6.2.	Résultats et justification du choix	34
VI.6.3.	Comparaison avec d'autres configurations	34
VI.7.	Dimensionnement du Groupe Électrogène Diesel	34
VI.7.1.	Calcul de la Puissance Corrigée	35
VI.7.2.	Mode de Fonctionnement et Gestion des Charges	36
VI.7.3.	Choix de configuration	36
VII.	<i>Discussion et Analyses des résultats des simulations du dimensionnement du système hybride</i>	37
VII.1.	Méthodologie de simulation	37
VII.2.	Résultats principaux sur le fonctionnement global du système hybride	38
VII.2.1.	Mois à forte irradiation (janvier à mai et octobre à décembre)	38
VII.2.2.	Mois à faible irradiation (juin à septembre)	41
VII.3.	Dimensionnement de la ligne HTA et choix du transformateur	41
VII.3.1.	Calcul du nombre de cantons	42
VII.3.2.	Calcul du nombre de poteaux	43
VII.3.3.	Le type de support	43
VII.3.4.	Types d'armements	44
VII.3.5.	Analyse détaillée des mois à faible irradiation :	44
VII.4.	Simulations et répartition de la production du champ solaire photovoltaïque	47
VII.5.	Comparaison entre les résultats de simulation annuelle obtenus sur PVsyst et Excel	48
VII.6.	Conclusion partielle	49
VIII.	<i>Dimensionnement de la ligne HTA/BT</i>	50

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VIII.1.	Description de la configuration du réseau.....	50
VIII.2.	Dimensionnement de la ligne HTA et choix du transformateur	50
VIII.2.1.	Calcul du nombre de cantons	52
VIII.2.2.	Calcul du nombre de poteaux.....	52
VIII.2.3.	Le type de support.....	53
VIII.2.4.	Types d'armements	53
VIII.3.	Calcul de la ligne BT	53
VIII.3.1.	Hypothèses de dimensionnement	54
VIII.4.	Dispositifs de protection	55
VIII.4.1.	Choix et Configuration des Cellules de Protection	56
VIII.4.2.	Conclusion partielle.....	59
IX.	<i>Calculs économiques du Mini-Réseau Hybride</i>	59
IX.1.	Estimations des Coûts.....	59
IX.2.	Indicateurs Financiers Clés.....	60
IX.3.	Interprétation des Résultats.....	60
X.	<i>NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL.....</i>	61
X.1.	Rappel du cadre législatif régissant le projet	61
X.2.	Rappel des composantes et phases du projet.....	61
X.3.	Identification et évaluation des impacts.....	62
X.4.	Plan de Gestion Environnemental et Social (PGES).....	63
	<i>Conclusion</i>	65
XI.	<i>Bibliographie</i>	67
XII.	<i>Annexes.....</i>	69

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Recensement des différents points de consommation électrique dans les deux localités</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2 : Equipements électriques et habitudes de consommation des charges communautaires</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 3 : Equipements électriques et habitudes de consommation des charges commerciales</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 4 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 1</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 2</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 3</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 7 : facteur de qualité de la demande énergétique γ_{en}.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 8 : Caractéristiques principales du module PV</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 9 : Caractéristiques principales de l'onduleur</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 10 : Expressions et calculs pour la configuration du champ PV</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 11 : Configuration retenue du champ PV</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 12 : Caractéristiques techniques des batteries retenues</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 13 : Récapitulatif des résultats du dimensionnement du stockage</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 14 : contribution énergétique mensuelle, annuelle ainsi que le taux de pénétration des trois sources de production</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 15 : Répartition mensuel de la production énergétique du champ PV</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 16: catégorisation des supports en BT et HTA selon la norme NFC 67-200</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 17 : Nombre et type de support HTA</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 18: Calcul des courants nominaux des départs BT des deux Zones</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 19 : CONFIGURATION DU CHAMP PV</i>	<i>71</i>

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Configuration série d'un système hybride PV/Diesel[7]	11
Figure 2 : configuration parallèle d'un système hybride PV/Diesel[7]	12
Figure 3 : configuration commutée d'un système hybride PV/Diesel[7].....	13
<i>Figure 4 : Profil de consommation des charges Communautaires.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 5 : Profil de consommation des charges Industrielles</i>	<i>20</i>
<i>Figure 6 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 1</i>	<i>22</i>
<i>Figure 7 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 2</i>	<i>23</i>
<i>Figure 8 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 3</i>	<i>24</i>
<i>Figure 9 : profil de consommation global des deux villages</i>	<i>25</i>
<i>Figure 10 : facteur de qualité de la demande énergétique (γ_n)</i>	<i>26</i>
Figure 11 : Fonctionnement du système en Janvier	39
Figure 12 : Fonctionnement du système en Février	39
Figure 13 : Fonctionnement du système en Mars	39
Figure 14 : Fonctionnement du système en Avril	39
Figure 15 : Fonctionnement du système en Avril	40
Figure 16 : Fonctionnement du système en Octobre.....	40
Figure 17 : Fonctionnement du système en Novembre.....	40
Figure 18 : Fonctionnement du système en Décembre	40
Figure 19 : Fonctionnement du système en Juin	45
Figure 20 : Fonctionnement du système en Juillet.....	45
Figure 21 : Fonctionnement du système en Aout.....	45
Figure 22 : Fonctionnement du système en Aout.....	45
<i>Figure 23 : taux de pénétration des trois sources de production</i>	<i>46</i>
<i>Figure 24 : Répartition de la production annuelle du champ PV.....</i>	<i>48</i>
Figure 25 : Energie annuelle produite par le PV par rapport aux besoins énergétiques des deux villages sur Excel	48
Figure 26 : Production annuelle du PV sur la consommation avec le dimensionnement optimisé sur PVsyst.....	49
<i>Figure 27 : Tracé de l'extension de la ligne HTA.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 28: Réseaux BT alimentant les deux villages</i>	<i>55</i>

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Figure 29 : Données d'entrées et autres informations	70
Figure 30 : production par rapport aux besoins énergétiques du village avec irradiation minimale.....	71
Figure 31 : Données d'irradiation des villages sur 5 ans	72

INTRODUCTION

I.1. Contexte de l'étude

L'accès à l'électricité est une condition essentielle pour le développement socio-économique, en particulier dans les pays en développement où les disparités énergétiques freinent considérablement l'amélioration des conditions de vie. En Afrique subsaharienne, environ 600 millions de personnes, soit près de 60 % de la population, n'ont toujours pas accès à l'électricité, une réalité qui touche principalement les zones rurales isolées des réseaux nationaux de distribution[1]. Cette situation entraîne des conséquences négatives sur des secteurs clés tels que l'éducation, la santé, l'approvisionnement en eau potable et les activités économiques.

Pour relever ce défi, les mini-réseaux électriques (ou mini-grids) sont désormais considérés comme une alternative pragmatique à l'extension des réseaux électriques traditionnels, notamment pour les zones rurales. Ces solutions décentralisées, basées sur des technologies renouvelables comme le photovoltaïque (PV), se sont révélées économiquement viables et adaptées aux contextes géographiques et socio-économiques des communautés isolées.

Le Togo, comme plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, se trouve confronté à des défis similaires en matière d'accès à l'énergie. Malgré les efforts des autorités togolaises, le taux d'électrification national reste limité, atteignant 60 % en 2021. Ce chiffre masque toutefois des disparités importantes entre les zones urbaines, où environ 80 % des ménages sont électrifiés contre 10% pour les zones rurales qui demeurent nettement en retard[2]. Les contraintes financières et logistiques rendent l'extension des réseaux conventionnels peu réaliste pour desservir des localités éloignées, d'où l'orientation vers des solutions innovantes comme les mini-réseaux hybrides.

Face à ces défis, le projet d'électrification rurale des localités d'Atchinedji et Adjigo, dans la région des plateaux au TOGO, représente une initiative stratégique. Ce projet, porté par le gouvernement togolais par le biais de l'AT2ER (Agence Togolaise d'Electrification Rurale et des Energies Renouvelable) et financé par l'UEMOA (Union Economique et Monétaire Ouest Africaine), s'inscrit dans une approche de développement durable visant à améliorer l'accès à l'énergie dans les zones rurales. La solution proposée repose sur un mini-réseau hybride combinant des panneaux solaires photovoltaïques, un système de stockage d'énergie (BESS) et

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

un groupe électrogène. Cette configuration permet de répondre efficacement aux besoins énergétiques des deux localités tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.

I.2. Problématique

La problématique principale de cette étude réside dans la conception d'un mini-réseau capable de répondre de manière fiable et durable aux besoins énergétiques des communautés rurales d'Atchinedji et Adjigo. En effet, les défis spécifiques incluent :

- La satisfaction de besoins énergétiques diversifiés (ménages, infrastructures publiques et activités économiques) avec des profils de charge variables.
- La minimisation de la dépendance au diesel tout en garantissant une continuité de service, même en période de faible ensoleillement.
- L'intégration de solutions économiquement viables et techniquement optimales pour maximiser l'impact socio-économique tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, des études similaires menées dans d'autres régions d'Afrique subsaharienne ont démontré l'efficacité des mini-réseaux solaires hybrides dans l'électrification rurale. Par exemple, le projet "Nouna Solar Hybrid Mini-grid" au Burkina Faso et celui de "Kitonyoni" au Kenya ont permis d'alimenter des localités éloignées tout en stimulant les activités économiques locales[3]. Ces projets, bien qu'efficaces, ont également souligné l'importance d'un dimensionnement précis pour éviter les surcoûts ou les défaillances du système.

Au Togo, peu d'études approfondies ont été menées sur les solutions hybrides dans le cadre des mini-réseaux. Ce mémoire apporte un plus dans les études de mini-réseau hybride en proposant un dimensionnement optimisé et en explorant les impacts économiques, sociaux et environnementaux d'une telle initiative.

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL ET JUSTIFICATION DU PROJET

II.1. Objectifs du travail

L'objectif principal de cette étude est donc de réaliser une étude de faisabilité technique et économique pour le mini-réseau hybride d'Atchinedji et Adjigo.

Pour cela, la démarche méthodologique comprend :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

- **Analyse des besoins énergétiques** : Collecte et analyse des profils de charge pour les ménages, les infrastructures publiques et les activités économiques locales ;
- **Conception technique** : dimensionnement des composants du mini-réseau (panneaux solaires, stockage, générateur, réseau électrique HTA/BT) à l'aide de logiciels tels que : Excel et PVsyst ;
- **Optimisation économique** : évaluation des coûts initiaux, des coûts d'exploitation & maintenance et du tarif de l'électricité pour garantir la viabilité économique ;
- **Analyse environnementale** : Evaluation des impacts positifs et négatifs du projet.

Le mémoire est donc structuré en plusieurs étapes de l'étude :

- **Section 1** : contexte général et revue de la littérature, qui présente les enjeux énergétiques au Togo ;
- **Section 2** : méthodologie, où sont détaillées les approches utilisées pour la collecte des données et le dimensionnement du système ;
- **Section 3** : résultats et analyses, incluant les simulations techniques et les évaluations économiques ;
- **Section 4** : discussion des résultats en lien avec les objectifs de développement durable et recommandations pour des projets similaires ;
- **Conclusion et perspectives** : Synthèse des résultats, limites de l'étude et orientations pour les recherches futures.

En s'appuyant sur les retours d'expérience de projets similaires et en intégrant des outils de simulation avancés, cette étude se positionne comme une contribution essentielle pour l'électrification rurale au Togo. Elle vise non seulement à proposer une solution technique et économique viable, mais aussi à démontrer que les mini-réseaux solaires hybrides peuvent servir de modèle pour la transition énergétique et le développement inclusif en Afrique subsaharienne et en Afrique de l'Ouest.

II.2. État des lieux et justification du projet

La région des Plateaux, bien qu'étant une des plus peuplées du Togo avec une population en 2022 estimée à 1 635 946 d'habitants[4], demeure en retard en matière d'électrification rurale. Les villages d'Atchinedji et Adjigo ne sont pas raccordés au réseau national, et leur éloignement des lignes électriques existantes rend une extension du réseau conventionnel peu rentable. Cela

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

prive les communautés de bénéficier d'une énergie fiable et accessible, entravant leur développement socio-économique.

Pour pallier ces insuffisances, ce projet AT2ER/UEMOA, dont l'attributaire est TECMON ENERGY a pour mission de concevoir et de réaliser un mini-réseau hybride. Ce projet constitue une opportunité de développer un modèle énergétique durable et répliquable dans d'autres régions rurales du Togo.

Ainsi, il vise à :

- Répondre aux besoins énergétiques des infrastructures clés (santé, éducation, commerce, artisanat) ;
- Offrir une énergie fiable et abordable pour les ménages, améliorant ainsi leur qualité de vie ;
- Promouvoir les activités économiques locales en réduisant les coûts énergétiques et en augmentant la productivité.

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DE L'ENTREPRISE

III.1. Présentation de la zone d'étude

Les localités d'Atchinedji et Adjigo, situées dans la préfecture d'Ogou, région des Plateaux au Togo, sont des villages ruraux typiques, caractérisés par une faible densité d'infrastructures électriques et une dépendance à l'agriculture de subsistance. Ces villages se trouvent à environ 174 km de Lomé, la capitale du Togo, et sont proches de la ville d'Atakpamé, un carrefour stratégique pour les échanges commerciaux et logistiques. Malgré leur potentiel économique lié à leur proximité avec Atakpamé, ses deux localités distantes à des kilomètres du réseau électrique national, freinant ainsi leur développement socio-économique.

a. Infrastructures et activité socio-économique :

Les données collectées lors de l'enquête montrent une diversité d'infrastructures et d'activités dans les deux localités, reflétant un dynamisme économique latent mais limité par l'absence d'électricité fiable. Les principales infrastructures sont recensées dans le tableau plus bas. (Voir **Obtention des données**).

Les deux villages comptent environ **645 ménages**, majoritairement engagés dans l'agriculture de subsistance. Les cultures principales incluent le maïs, le manioc, l'igname et les légumes locaux. Cependant, l'absence d'énergie abordable limite l'accès à des services modernes tels que l'éclairage, la réfrigération, et les équipements de confort. Les ménages utilisent des

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

moyens alternatifs coûteux comme les lampes à pétrole et les groupes électrogènes, ce qui alourdit leurs dépenses énergétiques.

b. Contraintes géographiques et climatiques

D'un point de vue géographique, les villages sont situés dans une région bénéficiant d'un climat tropical, caractérisé par deux saisons distinctes :

- Une saison pluvieuse (avril à octobre), favorable aux cultures agricoles mais nécessitant des infrastructures pour gérer l'irrigation et la conservation des produits ;
- Une saison sèche, durant laquelle l'eau devient une ressource critique pour l'agriculture et les ménages.

La topographie légèrement vallonnée et les sols fertiles de la région favorisent les activités agricoles, mais les défis liés à l'éloignement des infrastructures électriques, à la logistique et à la maintenance des équipements freinent l'exploitation optimale de ce potentiel.

En conclusion, ces villages représentent une opportunité stratégique pour démontrer l'efficacité et la durabilité des solutions de mini-réseaux hybrides dans des zones rurales isolées, tout en contribuant aux objectifs d'électrification nationale du Togo.

La figure 1 illustre la carte du Togo, permettant de situer la région des Plateaux et la localisation des villages d'Atchinedji et Adjigo.

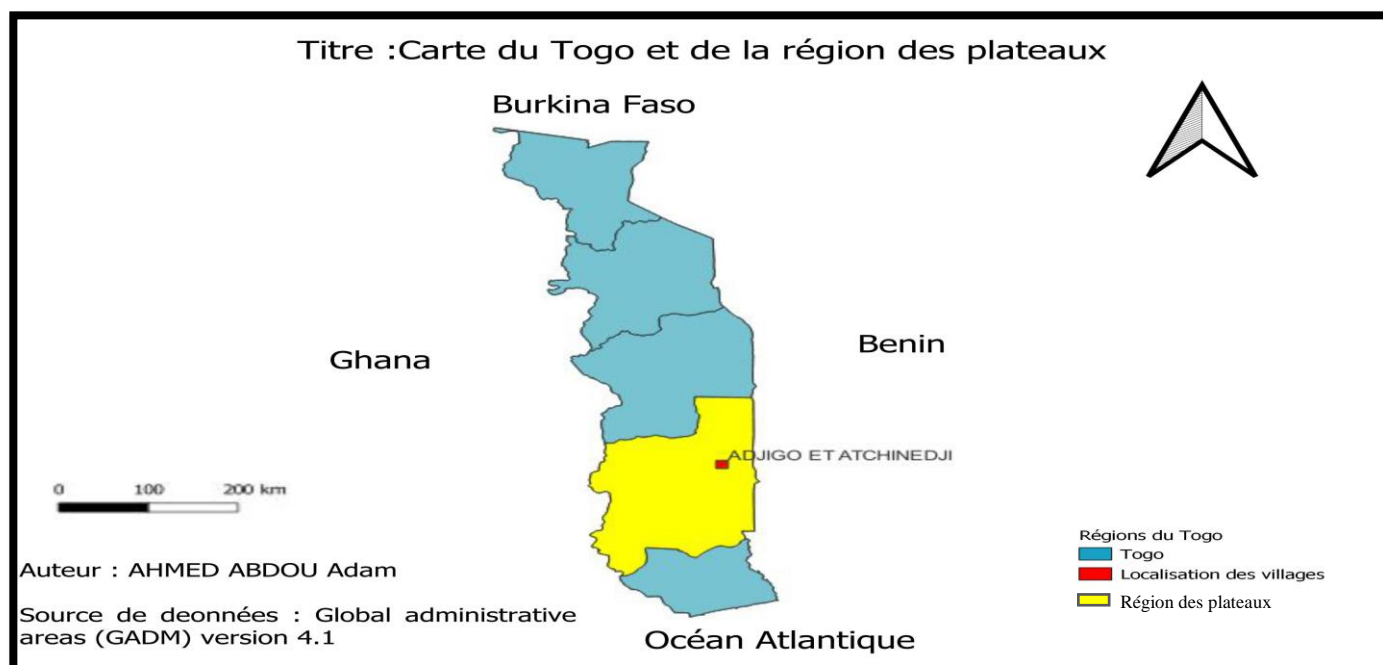


Figure 1 : Carte du Togo

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

III.2. Présentation de l'entreprise

TECMON ENERGY, filiale du groupe TECMON, joue un rôle de premier plan dans la conception, la réalisation et l'exploitation de projets d'infrastructure énergétique à travers le monde. Créée en 2018, cette société basée à Ouagadougou est spécialisée dans la construction de centrales électriques de tout genre (solaires, thermiques et hydroélectriques). TECMON ENERGY bénéficie de l'expertise de sa maison mère, TECMON Montagens Técnicas Industriais Ltd, basée au Brésil, ainsi que de ses autres filiales implantées en Afrique, en Europe, au Moyen-Orient et en Amérique Latine.

Fort de plus de 23 ans d'expérience, le groupe TECMON emploie plus de 300 ingénieurs, techniciens et ouvriers spécialisés. Sa diversité d'expertise couvre des domaines variés tels que la construction de routes, de ponts, de barrages, l'électrification rurale, la logistique et la fabrication d'équipements industriels. Avec une solide expérience dans des projets complexes, TECMON ENERGY s'inscrit comme un acteur clé dans le développement de solutions énergétiques durables et adaptées aux besoins des communautés. (Voir Annexe 12 : Organigramme de TECMON ENERGY).

IV. GENERALITE SUR LES MINI RESEAUX HYBRIDES

Les mini-réseaux hybrides intègrent différentes sources d'énergie afin d'offrir une alternative énergétique adaptable, fiable et durable, particulièrement dans les régions éloignées ou insuffisamment couvertes par les infrastructures électriques conventionnelles. Ces systèmes combinent les énergies renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque, l'éolien ou encore l'hydraulique, avec des sources traditionnelles comme les groupes électrogènes diesel. Selon les besoins énergétiques spécifiques et les conditions locales, la configuration d'un système hybride peut être ajustée, permettant ainsi d'optimiser la production et la consommation d'électricité tout en assurant une gestion énergétique efficace et diversifiée.

Par rapport à la dimension des systèmes hybrides, il n'existe pas de définition unique de la taille des mini-réseaux. Certaines organisations définissent les mini-réseaux en termes de capacité de production, c'est-à-dire entre 10 kW et 10 MW. D'autres les définissent en termes de clients atteints, c'est-à-dire que les mini-réseaux atteignant 20 à 100 clients sont appelés micro-mini-réseaux et les mini-réseaux atteignant plus de 500 clients sont appelés mini-réseaux complets. Un consensus général est que les mini-réseaux devraient fournir plus de quelques kW d'électricité à plusieurs consommateurs tels que la communauté, les hôpitaux ou les écoles[5] .

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

En effet, les systèmes hybrides sont particulièrement pertinents pour des applications où une seule source d'énergie ne suffirait pas à répondre aux besoins énergétiques, ou pour des situations où une production d'énergie constante est nécessaire mais où les conditions locales rendent difficile l'utilisation d'une source d'énergie unique. Ces systèmes permettent d'optimiser la gestion des ressources énergétiques en s'adaptant aux variations de la production d'énergie renouvelable et de la demande.

IV.1. Les objectifs des systèmes hybrides

Les principaux objectifs des systèmes hybrides sont :

- **Fiabilité technique** : La combinaison de sources d'énergie garantit que le système est toujours capable de répondre à la demande, même si une source d'énergie subit une défaillance.
- **Réduction des coûts énergétiques** : En tirant parti des énergies renouvelables, ces systèmes permettent de réduire les coûts d'exploitation par rapport à une dépendance exclusive aux combustibles fossiles.
- **Réduction de l'empreinte carbone** : L'intégration d'énergies renouvelables dans les systèmes hybrides aide à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans les zones éloignées où les générateurs diesel sont souvent utilisés.
- **Autonomie énergétique** : Les systèmes hybrides permettent d'assurer l'autosuffisance énergétique dans des endroits sans accès au réseau électrique principal, ce qui est essentiel pour les communautés rurales ou isolées.

IV.2. Classification des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être classés de différentes manières selon leur mode de fonctionnement, leur structure technique, et les technologies qu'ils intègrent.

IV.2.1.Mode de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être classés selon qu'ils soient connectés au réseau ou autonomes :

- **Systèmes hybrides connectés au réseau** :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

- Ces systèmes sont reliés à un réseau électrique central, souvent national ou régional. Ils permettent d'injecter de l'énergie excédentaire dans le réseau ou d'acheter de l'énergie lorsque les sources locales ne suffisent pas ;
- Avantages : Ils bénéficient de la stabilité d'un réseau plus large et offrent la possibilité de vendre de l'énergie excédentaire, générant ainsi des revenus.
- **Systèmes hybrides autonomes :**
 - Ces systèmes sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau principal, dans des zones non électrifiées. Ils génèrent et consomment l'énergie localement, souvent à l'aide de batteries pour stocker l'énergie excédentaire ;
 - Avantages : Ils sont particulièrement adaptés pour les communautés éloignées, réduisant ainsi la dépendance aux générateurs diesel ou autres sources non renouvelables.
- **Micro-réseaux hybrides :**
 - Un micro-réseau est un petit réseau autonome capable de fonctionner indépendamment ou en connexion avec le réseau principal. Ces systèmes offrent une grande flexibilité et peuvent être utilisés dans des environnements variés, allant des villages ruraux aux installations industrielles ;
 - Avantages : Les micro-réseaux hybrides permettent une gestion plus souple de la production et de la consommation d'énergie, avec la possibilité de s'adapter aux fluctuations des besoins.

IV.2.2. Structure technique

Les systèmes hybrides varient également en fonction de la technologie utilisée et de la manière dont les différentes sources d'énergie sont intégrées :

- **Systèmes avec sources d'énergie classiques :**
 - Un générateur diesel ou une turbine à gaz peut être utilisé en complément des énergies renouvelables pour assurer une production d'énergie constante, particulièrement lorsque la production d'énergie renouvelable est insuffisante ;
 - Ces sources classiques assurent la stabilité du système, mais elles sont généralement plus coûteuses et polluantes que les sources renouvelables.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

- **Systèmes avec stockage d'énergie :**

- L'intégration de dispositifs de stockage d'énergie, comme des batteries lithium-ion ou des systèmes de stockage à air comprimé, permet de stocker l'excédent d'énergie produit pendant les périodes de forte production. Ces systèmes peuvent être utilisés pour alimenter les consommateurs pendant les périodes où la production d'énergie renouvelable est faible, comme la nuit pour le solaire ;
- Le stockage améliore la flexibilité et la fiabilité du système, permettant une gestion plus efficace de la demande.

- **Systèmes avec sources d'énergie renouvelables :**

- Ces systèmes intègrent principalement des sources d'énergie renouvelables, telles que des panneaux photovoltaïques, des éoliennes ou des turbines hydrauliques. La combinaison de ces technologies permet de tirer parti de différentes ressources naturelles en fonction des conditions locales.
- Par exemple, dans une région ensoleillée, un système hybride peut être principalement basé sur l'énergie solaire, avec un générateur diesel utilisé comme solution de secours pour les jours nuageux ou la nuit.

IV.3. Etude sur les configurations des systèmes hybrides

Les configurations des systèmes hybrides varient en fonction des besoins énergétiques et des ressources disponibles. Trois principaux critères permettent de distinguer les configurations de ces systèmes [6] : le type de bus, le mode de contrôle et le montage électrique des composants. Chaque configuration offre des avantages et des inconvénients spécifiques en fonction des besoins énergétiques et des conditions d'application.

IV.3.1. Configurations selon le type de bus

Les configurations des systèmes hybrides peuvent être classées en fonction du type de bus utilisé pour relier les différents composants du système. Les trois principales configurations sont basées sur les types de bus : courant continu (DC), courant alternatif (AC), et une combinaison des deux (AC/DC).

➤ Configuration à bus DC

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Les systèmes hybrides à bus DC centralisent toutes les sources de production sur un bus DC. Les sources de courant alternatif, comme les générateurs Diesel et certaines technologies d'énergie renouvelable, nécessitent des redresseurs pour convertir le courant AC en DC avant de se connecter au bus. Cette configuration permet une gestion centralisée de l'énergie mais peut entraîner d'importantes pertes de conversion.

➤ **Configuration à bus AC**

Dans les systèmes à bus AC, toutes les sources de production sont connectées à un bus AC. Chaque source peut alimenter la charge indépendamment ou simultanément. Cette configuration est avantageuse pour des charges variables et permet une flexibilité opérationnelle accrue. Cependant, la nécessité de synchroniser les sources peut complexifier le contrôle du système.

➤ **Configuration à bus mixte AC/DC**

Les configurations hybrides AC/DC intègrent des composants AC et DC de part et d'autre d'onduleurs bidirectionnels. Cela permet de connecter des sources AC à un bus DC ou vice versa, bien que cela puisse réduire le rendement global en raison des conversions multiples. Cette configuration est particulièrement utile lorsque les charges AC et DC doivent être alimentées simultanément.

IV.3.2. Configurations selon le mode de contrôle

Suivant le mode de contrôle du système, trois configurations peuvent être envisagées.

➤ **Configuration maître/esclave**

Cette configuration repose sur le contrôle centralisé de la fréquence et de la tension du réseau par une source principale (maître), tandis que les autres sources (esclaves) suivent les paramètres imposés. Ce mode est efficace pour maintenir la stabilité du réseau, particulièrement lorsque plusieurs sources doivent alimenter simultanément une même charge.

➤ **Configuration multi-master**

Dans cette variante, plusieurs sources régulent simultanément la tension et la fréquence du réseau. Cela permet une redondance et une flexibilité accrues, car le système n'est pas dépendant d'une seule source de contrôle.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

➤ **Configuration single-master**

Une seule source contrôle la tension et la fréquence, simplifiant ainsi la gestion mais réduisant la redondance. Cette configuration est plus adaptée aux systèmes où une source fiable et dominante est disponible

IV.3.3. Configurations selon le montage électrique des composants

La littérature identifie trois configurations selon le mode de connexion des composants des systèmes hybrides en général qui sont les configurations série, parallèle et commutée. Cependant une configuration additionnelle est prise en compte pour les systèmes hybrides PV/Diesel : la configuration Flexy Energy[7].

➤ **Configuration série**

Dans une configuration série, toute l'énergie produite par les sources est d'abord dirigée vers un bus DC avant d'être convertie en courant alternatif (AC) pour alimenter les charges. Cette méthode centralisée offre un contrôle précis de l'alimentation, mais elle dépend fortement de la capacité de stockage et de la gestion efficace des cycles de charge et décharge des batteries. Prenons l'exemple des systèmes hybrides PV/Diesel : l'unité de production principale, souvent composée de modules photovoltaïques, fournit initialement l'électricité. L'énergie produite est acheminée vers les charges électriques via un onduleur, tandis que le surplus est utilisé pour recharger les batteries. En complément, lorsqu'une augmentation de la demande est détectée ou en cas de faible production solaire, le générateur Diesel est activé. Ce dernier peut transmettre son énergie soit directement aux charges électriques, après un processus de conversion via un redresseur puis un onduleur, soit simultanément aux charges et aux batteries. Cette architecture, assurant une alimentation continue et fiable, est illustrée par la figure 1.

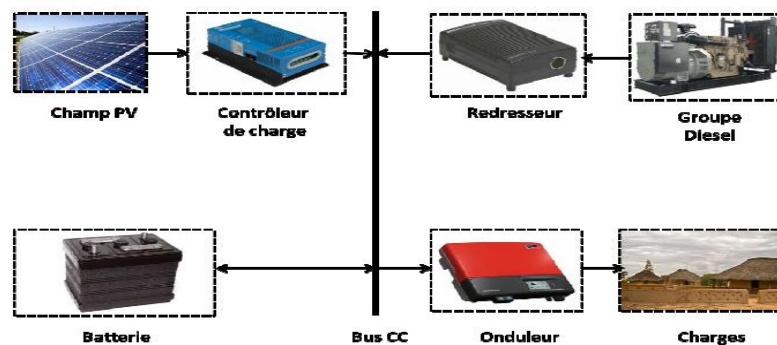


Figure 1 : Configuration série d'un système hybride PV/Diesel[7]

➤ **Configuration parallèle**

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Cette configuration permet à toutes les sources de production de fonctionner simultanément pour alimenter la charge. Cette configuration offre une grande flexibilité et une résilience, permettant d'éteindre certaines unités en cas de faible demande sans compromettre l'alimentation globale.

Dans le cadre des systèmes hybrides PV/Diesel, les modules photovoltaïques et le générateur Diesel peuvent produire de l'énergie simultanément pour alimenter la charge, augmentant ainsi la flexibilité et la capacité de production d'électricité. Cette configuration présente aussi la possibilité de recharger les batteries à travers un onduleur bidirectionnel comme l'illustre la figure 2.

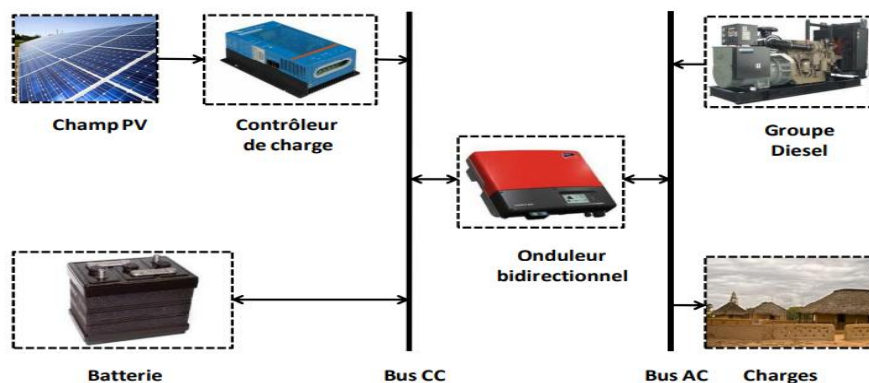


Figure 2 : configuration parallèle d'un système hybride PV/Diesel[7]

➤ Configuration commutée

Les charges électriques sont alimentées alternativement par les modules photovoltaïques via un onduleur ou par le générateur Diesel, en fonction de leur disponibilité. Un commutateur automatique bascule entre ces sources, assurant une alimentation énergétique continue en fonction de leurs performances respectives.

Dans cette configuration, le générateur Diesel alimente directement les charges électriques sans nécessiter de convertisseurs intermédiaires. De plus, il est en mesure de recharger les batteries via un redresseur tout en fournissant de l'électricité aux charges électriques. L'architecture de cette configuration est illustrée par la figure 3.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

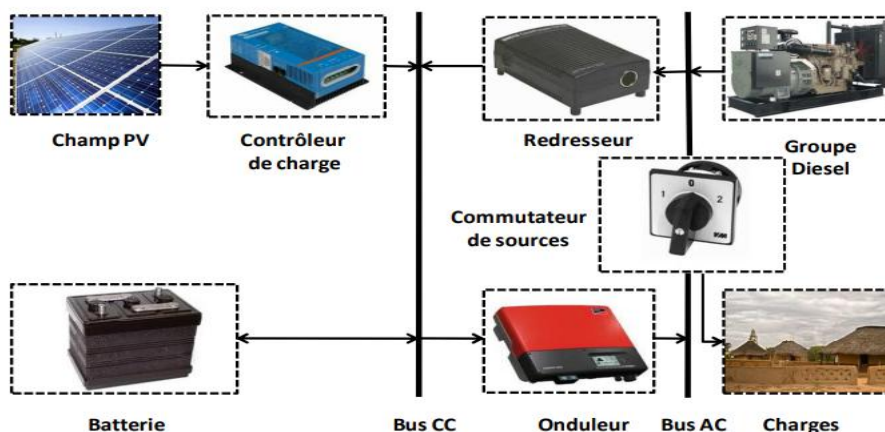


Figure 3 : configuration commutée d'un système hybride PV/Diesel[7]

Le tableau 1 donne un récapitulatif des avantages et inconvénients des différentes configurations de systèmes hybrides PV/Diesel.

*Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différentes configurations de systèmes hybrides
PV/Diesel*

Configuration	Avantages	Inconvénients
Série	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation séquentielle efficace, Contrôle simplifié et basse fréquence de maintenance du générateur Diesel. 	<ul style="list-style-type: none"> Espérance de vie réduite des batteries ; Faible rendement global ; Arrêt complet du système en cas de détérioration de l'onduleur.
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation simultanée des sources pour une meilleure réponse à la charge ; Maintenance sans interruption de l'alimentation. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'un contrôle automatique des sources ; Déconnexion fréquente en cas de creux de tension.
Commutée	<ul style="list-style-type: none"> Adaptabilité dynamique avec optimisation énergétique ; Répartition flexible de la charge. 	<ul style="list-style-type: none"> Complexité de mise en œuvre, nécessité d'un contrôle sophistiqué ; Sensibilité aux défaillances du basculement avec interruption lors de la commutation entre sources.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

IV.4. Avantages des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides présentent plusieurs avantages, particulièrement dans des contextes où les ressources en énergie renouvelable sont variables et où l'accès au réseau est limité :

- **Flexibilité et fiabilité** : Les systèmes hybrides permettent une gestion flexible de la production et de la consommation d'énergie, assurant un approvisionnement constant même lorsque l'une des sources d'énergie rencontre des difficultés.
- **Durabilité** : En combinant des sources renouvelables avec des technologies de stockage, ces systèmes permettent de réduire les dépendances aux combustibles fossiles, ce qui contribue à la transition énergétique et à la réduction de l'empreinte carbone.
- **Réduction des coûts à long terme** : Bien que l'investissement initial puisse être élevé, les coûts opérationnels sont souvent plus bas en raison de l'utilisation d'énergies renouvelables gratuites et du potentiel de stockage d'énergie.

Conclusion Partielle

Les systèmes hybrides sont des solutions particulièrement adaptées pour répondre aux défis énergétiques dans les régions isolées, en garantissant à la fois la fiabilité, la durabilité, et la rentabilité. En combinant différentes sources d'énergie renouvelable avec des systèmes de stockage et des générateurs de secours, ces systèmes permettent une gestion optimale de la production et de la consommation d'énergie. Bien que leur mise en place demande une évaluation rigoureuse des ressources locales et des besoins énergétiques, les systèmes hybrides offrent des avantages considérables pour l'électrification des zones non connectées aux réseaux électriques traditionnels.

V. ANALYSE DES DONNEES

V.1. Obtention des données

Pour la réalisation de ce projet d'électrification des localités d'Atchinedji et Adjigo, les données utilisées proviennent d'une enquête de terrain menée par l'**AT2ER (Agence Togolaise d'Électrification Rurale et des Énergies Renouvelables)**. Cette enquête a permis de recenser les différents types de consommateurs dans les deux villages, incluant des infrastructures, des commerces, des institutions publiques et des ménages. Le tableau précédent illustre cette

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

diversité, avec un total de **761 entités recensées**, dont **645 ménages**, qui représentent la majorité des consommateurs.

Le tableau 1 nous donne le recensement des différents points de consommation électrique.

Tableau 1 : recensement des différents points de consommation électrique dans les deux localités

Étiquettes de lignes	Nombre d'éléments
Atelier de coiffure	4
Atelier de couture	11
Atelier de mécanicien	2
Atelier de menuiserie	1
Atelier de soudure	1
Bar	4
Boutique	39
CEG	1
Ecole	2
Ecole primaire	2
Forage	6
Gendarmerie	1
Lieu De Culte	9
Ménages	645
Magasin	5
Marché	1
Mosquée	2
Moulin	14
Pharmacie	1
Restaurant	1
Eglise Témoins De Jehova	1
Unité de santé périphérique	1
Vidéo Club	1

V.2. Limites des données disponibles

Bien que cette enquête ait fourni un aperçu global, certaines limites importantes ont été identifiées :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

- **Absence de détails sur les équipements électriques utilisés** Les informations recueillies se limitaient à un recensement des types de consommateurs, sans mention des équipements spécifiques ni des habitudes de consommation énergétique (durée et fréquence d'utilisation).

- **Caractéristiques particulières des moulins**

L'enquête initiale a recensée 14 moulins, mais des informations complémentaires, obtenues auprès des habitants des villages, ont révélées que la plupart de ces moulins fonctionnent soit manuellement, soit avec des moteurs à essence ou diesel. Seuls cinq propriétaires de moulins se sont montrés intéressés par une conversion vers des moulins électriques. Ces cinq moulins électriques ont donc été intégrés dans nos calculs.

Ces lacunes dans les données initiales représentent un défi majeur pour une étude technique précise, nécessitant l'émission d'hypothèses pour élaborer des profils de charge détaillés.

V.3. Problèmes rencontrés et solutions adoptées

Insuffisance des données détaillées

- **Problème 1 :** L'absence d'informations précises sur les équipements électriques et leurs modes d'utilisation complique l'élaboration de profils de charge précis.

Solution adoptée : Nous avons donc mené une enquête complémentaire à travers des questions posées directement auprès des certaines entités fréquentes des villages (boutiques, écoles, marché, gendarmerie, marché) ainsi qu'à certains acteurs économiques et habitants des villages afin de trouver les renseignements manquants sur les appareils électriques et les heures d'utilisation.

Hétérogénéité des consommateurs

- **Problème 2 :** la diversité des consommateurs (moulins, lieux de culte, écoles, etc.) implique des besoins variés et une répartition complexe de la charge. De plus, certains équipements, comme les moulins, nécessitent une forte puissance au démarrage, augmentant les contraintes de dimensionnement du système.
- **Solution adoptée :** chaque catégorie de consommateur a été analysée séparément. Nous avons attribué à chaque type des hypothèses spécifiques concernant :
 - Les équipements typiques ;
 - Les plages horaires d'utilisation. Ces hypothèses tiennent compte de l'importance économique et sociale de chaque infrastructure dans les villages.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Ces hypothèses nous permettent de compenser les limites des données disponibles tout en minimisant les incertitudes. Elles fournissent une base solide pour :

- Le dimensionnement du système hybride PV diesel ;
- La conception du mini-réseau électrique adapté aux besoins spécifiques d'Atchinedji et Adjigo.

V.4. Catégorisation des consommateurs

Le recensement des consommateurs a permis de différencier les besoins énergétiques selon la nature des activités. En effet, nous avons définis les charges industrielles comme étant celles qui se concentrent sur la productivité économique, tandis que les charges communautaires répondent aux besoins sociaux et en fin les charges résidentielles sur les ménages.

V.4.1. Charges communautaires

Les infrastructures communautaires (écoles, centres médicaux, lieux de culte, etc.) sont essentielles au développement socio-économique des zones rurales. Ces charges sont cruciales pour le bien-être collectif et reflètent des besoins spécifiques identifiés lors des enquêtes de terrain.

Hypothèses et justifications :

Le tableau 2 renseigne sur les informations prises en compte pour la réalisation du profil de consommation des charges communautaires :

Tableau 2 : Equipements électriques et habitudes de consommation des charges communautaires

Charges communautaires					
Charges communautaires	Nombres de charges	Équipement électrique	Puissance par équipement (W)	Nombre d'équipements	Nombre d'heures d'utilisation
CEG	1	Réglette	18	30	3
		Imprimante	75	1	1
		Ordinateurs	150	1	4
ECOLE	2	Imprimante	75	1	1
		Réglette	18	30	3
EPP	2	Lampes rechargeables	10	3	2
GENDARMERIE	6	Ordinateurs	50	1	5
		Imprimante	75	1	3

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

		Wi-Fi	15	1	17
		Réglette	36	4	4
LIEU DE CULTE	9	Ventilateur	75	2	11
		Réglette	18	2	11
		Sonorisation	50	1	11
MOSQUE	2	Sonorisation	50	1	4
		Réglette	18	2	5
TEMOINS DE JEHOVA	1	Réglette	18	2	5
USP	1	Réfrigérateur médical	80	1	24
		Ventilateur	75	2	3

La figure 4 montre le profil de consommation des charges communautaires.

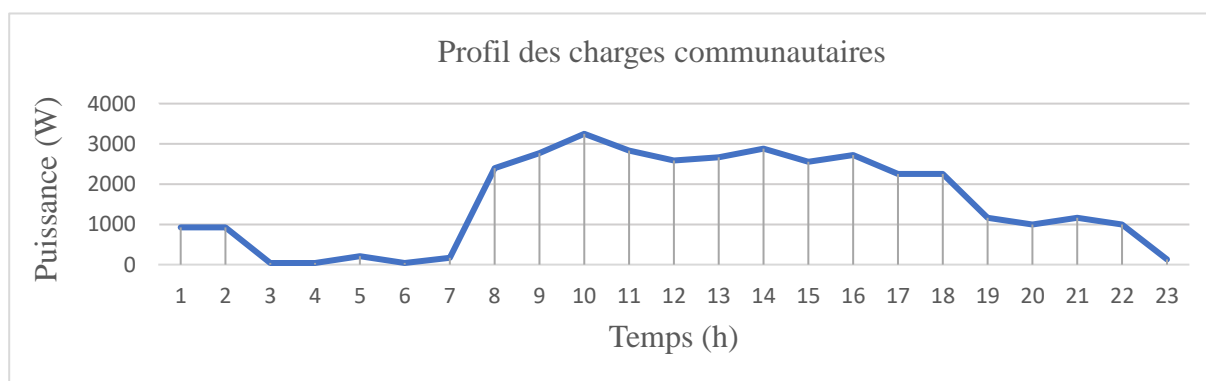


Figure 4 : Profil de consommation des charges Communautaires

La puissance consommée varie au cours de la journée avec un pic à environ 3500 W entre 10h et 11h. Les charges restent élevées jusqu'à 17h avant de redescendre progressivement.

- Les pics observés en matinée (10h à 11h) et en après-midi (14h à 16h) peuvent être liés à l'utilisation d'équipements communautaires comme des écoles, centres de santé ou infrastructures publiques nécessitant de l'électricité comme les gendarmeries.
- Les basses consommations nocturnes et tôt le matin indiquent une utilisation limitée, dus à l'éclairage.

V.4.2. Charges commerciales

Les charges Industrielles ou commerciales soutiennent les activités génératrices de revenus, essentielles à l'économie locale. Ces charges nécessitent une puissance élevée et un fonctionnement adapté aux besoins économiques.

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

Le tableau 3 renseigne sur les informations prises en compte pour la réalisation du profil de consommation des charges communautaires :

*Tableau 3 : Equipements électriques et habitudes de consommation des charges
commerciales*

Charges Industrielles					
Charges communautaires	Nombres de charges	Équipement électrique	Puissance par équipement (W)	Nombre d'équipements	Nombre d'heures d'utilisation
Atelier de coiffure	4	Tondeuses électrique	15	3	12
		Ventilateur	75	1	
		Réglettes	18	2	
Atelier de couture	11	Ventilateur	75	1	14
		Machine à coudre	35	1	
		Réglettes	18	2	
Atelier de mécanicien	2	Réglettes	18	2	13
		Poste à souder	750	1	
Atelier de menuiserie	1	Réglettes	18	2	13
Atelier de soudure	1	Poste à souder	500	1	12
		Réglettes	18	2	
Bar	4	Sonorisation	50	1	8
		Lampes rechargeables	3	4	
		Réfrigérateur	200	1	
		Réglettes	18	3	
Boutique	40	Réglettes	18	1	16
Magasin	5	Réglettes	36	5	2
Marche	1	Réfrigérateur	200	2	24
	1	Congélateur	250	2	
	1	Réglettes	18	22	
Moulin	5	Moulin électrique	5200	1	10
Pharmacie	1	Réfrigérateur	200	1	15
		Réglettes	36	4	
		Ordinateur	75	2	
		Imprimante	75	1	

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

		Ventilateur	75	2	
Restaurant	1	Réglettes	18	2	12
Vidéo club	1	Lecteur DVD	25	5	6
		Téléviseur	75	1	
		Sonorisation	50	1	
		Réglettes	18	2	

La figure 5 montre le profil de consommation des charges commerciales ou industrielles.

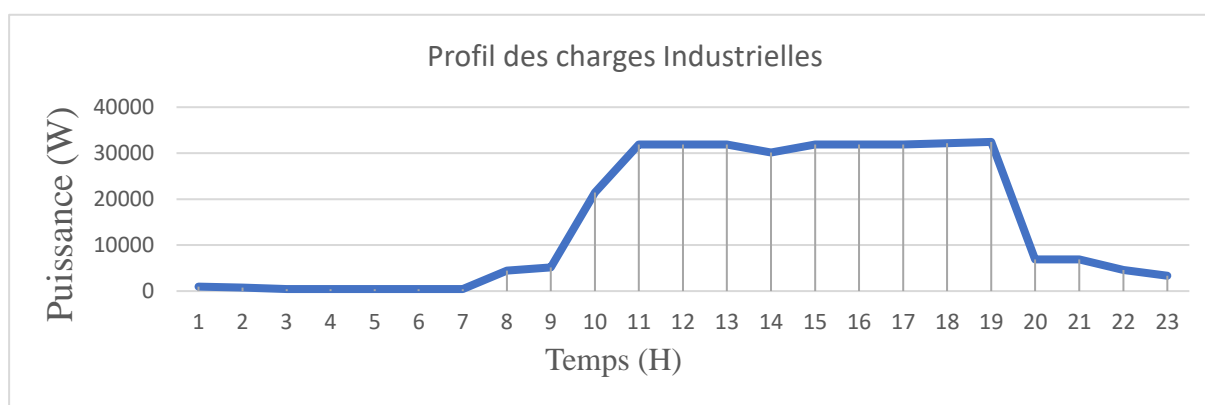


Figure 5 : Profil de consommation des charges Industrielles

Ce profil montre une consommation très faible de minuit à 8h, suivie d'une augmentation rapide à partir de 8h pour atteindre un plateau constant de 30 000 à 35 000 W entre 9h et 18h. La consommation redescend ensuite.

- Les charges élevées durant les heures de travail (9h à 18h) sont typiques d'activités industrielles telles que les boutiques, ateliers, etc.
- La réduction rapide après 18h indique que ces activités s'arrêtent, probablement en raison de l'absence d'opérations nocturnes ou de limites d'éclairage.

V.4.3. Charges résidentielles pour les ménages :

Afin de dimensionner un système de production et de distribution électrique adapté aux besoins des ménages, une analyse détaillée des charges résidentielles a été réalisée sur les 645 ménages étudiés. Ils ont été classés en trois catégories principales selon leurs besoins énergétiques, une démarche appuyée par deux éléments clés. Tout d'abord, l'étude intitulée « **Déterminants de la dépense domestique de la consommation d'électricité des ménages au Togo** »[8], basée sur les données de l'enquête QUIBB 2015, met en évidence une relation en U inversé entre le revenu et la dépense en électricité. Elle montre que les ménages à faibles revenus se limitent aux besoins essentiels, tels que l'éclairage et la recharge de téléphones, tandis que ceux à

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

revenus moyens diversifient leurs équipements énergivores. Quant aux ménages à revenus élevés, leur consommation électrique tend à se stabiliser malgré des ressources importantes. Cette dynamique illustre le lien étroit entre le revenu et la structure des charges énergétiques domestiques. Par ailleurs, le rapport du **PNUD sur le Profil de pauvreté au Togo (2011)**[9] révèle que 78 % des pauvres résident en milieu rural, où le taux de pauvreté atteint 73,4 %. Cette répartition souligne la prédominance des ménages à faibles revenus dans ces zones, limitant souvent leurs équipements énergétiques à des appareils de base. Aussi, les heures d'utilisation sont basées sur des modèles comportementaux similaires dans des villages ruraux électrifiés. Les lampes sont utilisées en soirée, tandis que les ventilateurs fonctionnent principalement durant les heures chaudes[10], [11].

Ces constats renforcent la pertinence de la catégorisation retenue pour analyser les besoins énergétiques des ménages.

Ainsi, nous avons :

- **Catégorie 1** : 60 % des ménages (387) représentent les foyers ayant des besoins énergétiques limités. Ils utilisent principalement des appareils de faible puissance comme des lampes rechargeables, des radios et des téléphones ;
- **Catégorie 2** : 30 % des ménages (194) incluent des foyers équipés d'appareils supplémentaires tels que ventilateurs et téléviseurs ;
- **Catégorie 3** : 10 % des ménages (64) possèdent des équipements de confort comme des réfrigérateurs et des téléviseurs multiples.

Les tableaux 4, 5, 6 et graphiques 6, 7, 8 suivants donnent des informations sur les équipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 1, 2 et 3.

➤ **Catégorie 1 :**

Tableau 4 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 1

Catégorie 1				
Nombre total de ménages	Équipements	Nombre par équipement	Puissance par équipement (W)	Nombre d'heures d'utilisation
387	Radio rechargeable	1	6	4
	Lampe rechargeable	1	5	5
	Réglette	2	36	5
	Téléphone	2	5	7

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

La figure 6 montre le profil de consommation des ménages de la catégorie 1.

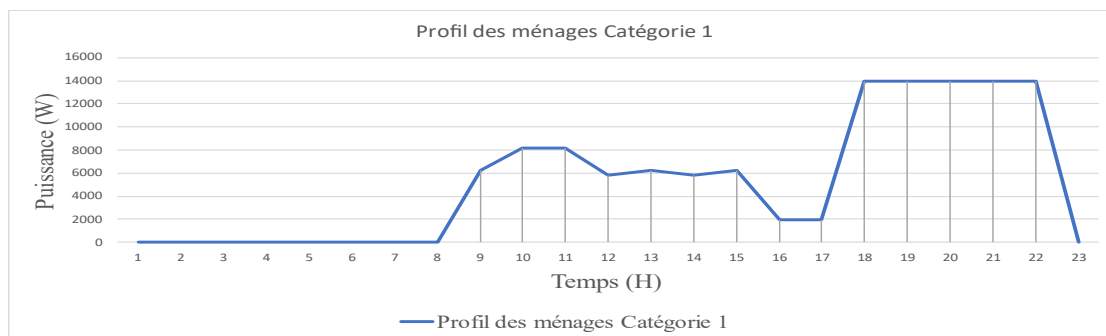


Figure 6 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 1

La consommation est nulle ou négligeable jusqu'à 8h, où un premier pic se forme (7000-8000 W). La consommation diminue ensuite avant un deuxième pic significatif à 18h (14 000 W) qui reste constant jusqu'à 22h.

- Le pic matinal (8h) correspond probablement aux activités quotidiennes comme la préparation des repas ou l'utilisation d'appareils électroménagers.
- Le pic du soir (18h-22h) reflète les besoins en éclairage.

➤ **Catégorie 2 :**

Tableau 5 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 2

Catégorie 2				
Nombre total de ménage	Équipements	Nombre par équipement	Puissance par équipement	Nombre d'heures d'utilisation
194	Radio rechargeable	2	10	2
	Lampes rechargeables	3	10	3
	Réglette	3	36	5
	Téléphone	4	5	2
	Ventilateur	1	75	4
	Téléviseur	1	25	9

La figure 7 montre le profil de consommation des ménages de la catégorie 2.

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

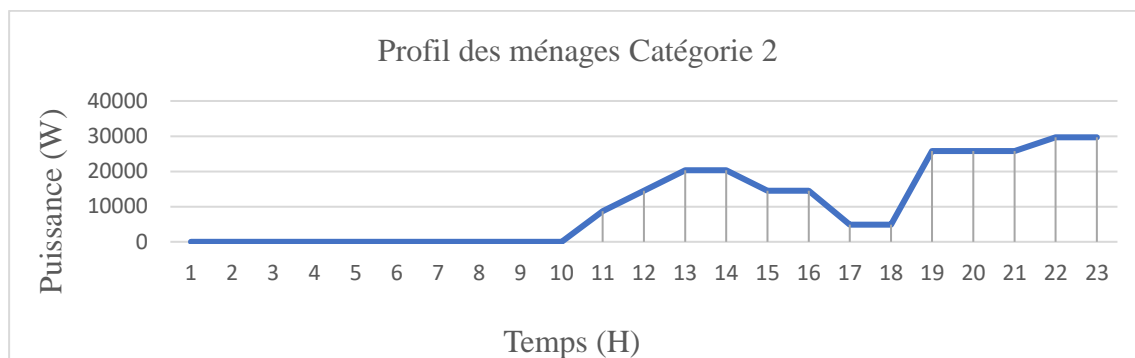


Figure 7 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 2

La consommation est nulle ou négligeable jusqu'à 10h, où un premier pic se forme (20 kWh).

La consommation diminue ensuite avant un deuxième pic significatif à 18h (30 kWh).

- Le pic matinal (10h) correspond aux activités quotidiennes comme la ventilation ou la télévision.
- Le pic du soir (18h-23h) reflète les besoins en éclairage, divertissements (téléviseurs, radios).

➤ **Catégorie 3 :**

Tableau 6 : Equipements électriques et habitudes de consommation des ménages de catégorie 3

Catégorie 3				
Nombre total de ménage	Équipements	Nombre équipement par ménage	Puissance par équipement (W)	Nombre d'heures d'utilisation
64	Radio rechargeable	2	10	7
	Lampes rechargeables	3	10	6
	Réglette	4	36	5
	Téléphone	6	5	7
	Ventilateur	2	75	3
	Réfrigérateur	1	150	3
	Téléviseur	2	25	3

La figure 8 montre le profil de consommation des ménages de la catégorie 1.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

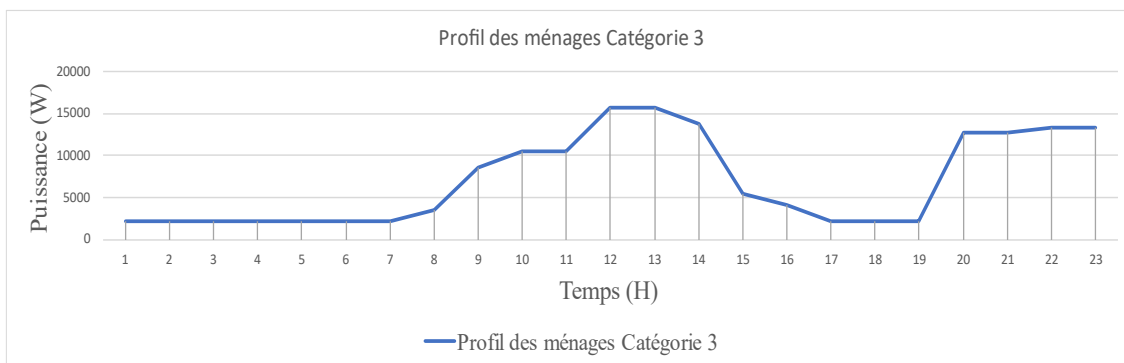


Figure 8 : Profil de consommation des charges des ménages de catégorie 3

La consommation de cette catégorie reflète les habitudes des ménages avec de plus grands revenus.

La consommation est plutôt faible et stable jusqu'à 08h, où un premier pic se forme (10 kWh) à cause de l'éclairage extérieur. La consommation diminue ensuite avant un deuxième pic significatif à 13h (15 kWh) avant de redescendre vers 19h (4 kWh) et remonte jusqu'à 14 kWh.

- Les premiers pics (10h-13h) correspondent aux activités quotidiennes comme la ventilation ou la télévision et la recharge des appareils électriques.
- Le pic du soir (19h-23h) reflète les besoins en éclairage, divertissements (téléviseurs, radios) et de réfrigération.

Cette analyse permet de calibrer la capacité de production énergétique nécessaire pour répondre aux besoins de toutes les catégories de ménages tout en assurant la pérennité du système. Elle garantit également que les ménages les plus modestes aient accès à une électricité de qualité, tout en anticipant la montée en puissance des besoins énergétiques dans les catégories supérieures.

La figure 9 illustre le profil de consommation global des deux villages obtenus en faisant la sommation des profils des trois catégories (communautaires, industrielles et résidentielles).

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

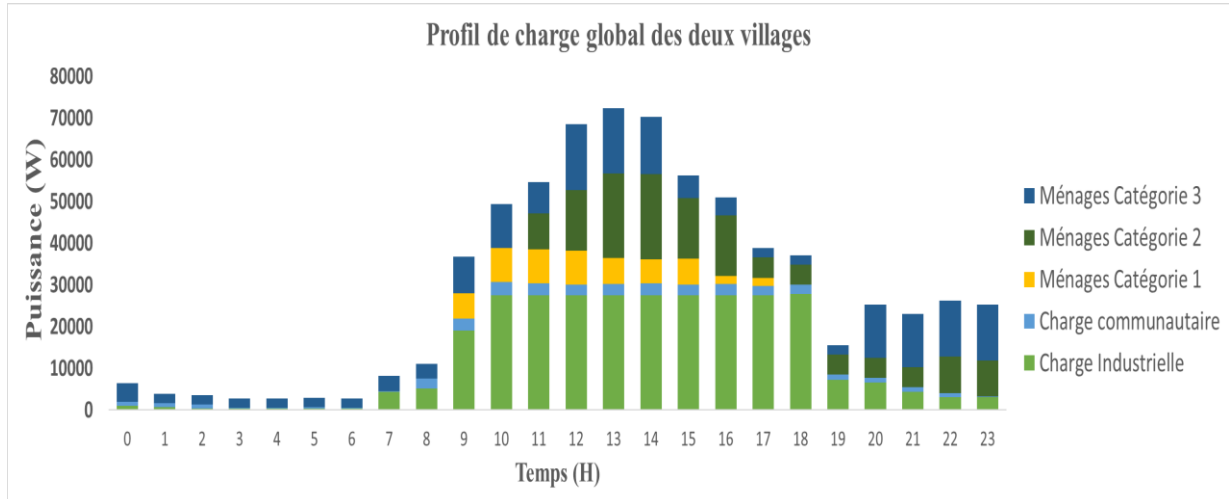


Figure 9 : profil de consommation global des deux villages

Conclusion partielle

Les hypothèses formulées et les choix méthodologiques s'inscrivent dans une démarche scientifique rigoureuse, appuyée par des études et des données fiables. Elles permettent d'établir un dimensionnement précis et efficace du mini-réseau permettant de répondre t aux besoins des consommateurs identifiés.

Les projets menés dans d'autres pays africains confirment la pertinence de ces choix pour améliorer l'accès à l'électricité, favoriser le développement économique et assurer la pérennité des infrastructures rurales.

VI. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE

Le dimensionnement de la centrale solaire pour ces villages repose sur une méthodologie rigoureuse, prenant en compte les besoins énergétiques, les caractéristiques de la ressource solaire et les performances du système. L'objectif est d'assurer un équilibre optimal entre la production et la consommation d'énergie tout en minimisant les pertes et en optimisant les coûts.

VI.1. Évaluation des besoins énergétiques

Les besoins journaliers des villages d'Atchinedji et Adjigo ont été évalués à **734,434 kWh/jour**, sur la base des profils de charge communautaires, industriels et résidentiels.

Afin d'apprécier la répartition dans le temps de cette demande énergétique, nous avons analysé le facteur de qualité de la demande énergétique γ_{en} .

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

VI.2. Analyse du facteur de qualité de la demande énergétique γ_{en}

Le facteur de qualité de la demande énergétique évalue l'adéquation entre la production solaire et la demande énergétique[12]. Ce paramètre nous permettra d'estimer quelle proportion de la demande il faudra stocker. La figure 10 présente schématiquement ce paramètre.

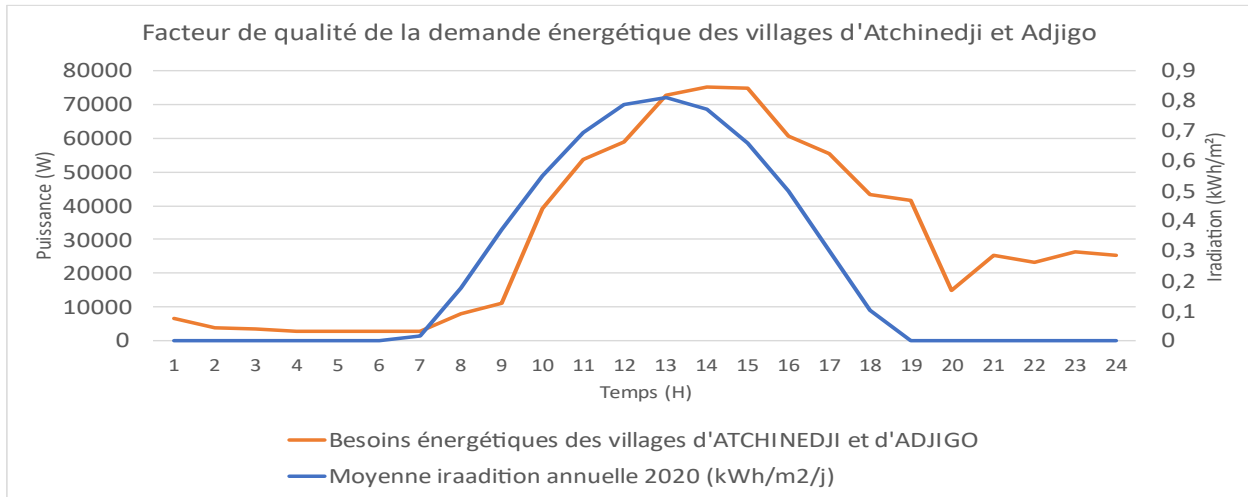


Figure 10 : facteur de qualité de la demande énergétique (γ_{en})

Le facteur de qualité de la demande énergétique (γ_{en}) a pour formule :

$$\gamma_{en} = \frac{E_a}{E_t} \quad (1)$$

$$\gamma_{en} = \frac{601,291}{734,434}$$

$$\gamma_{en} = 0,819$$

- E_a : énergie demandée en phase avec la production solaire ;
- E_n : énergie demandée hors phase nécessitant des solutions d'appoint (batteries et/ou générateurs) pour couvrir la demande ;
- E_t : besoin énergétique total des villages (734,434 kWh).

Résultats calculés :

Tableau 7 : facteur de qualité de la demande énergétique γ_{en}

Besoins énergétiques des villages (kWh)	734,434
E_a (kWh)	601,291
E_n (kWh)	133,143
γ_{en}	0,819

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

- **Au fil du soleil** ($\gamma_{en} = 0,819$) montre une très bonne correspondance entre production solaire et besoins et signifie qu'environ **81,9 %** des besoins peuvent être couverts directement par la production solaire, réduisant les besoins en stockage.
- **Proportion nécessitant du stockage** ($En = 133,143$ kWh) :
Les 18,1 % de besoins hors phase nécessitent un dimensionnement adapté des batteries ou l'intégration d'un groupe électrogène.

VI.3. Méthodologies de dimensionnement

Deux approches ont été adoptées pour le dimensionnement de la puissance crête :

- **La première : Approche utilisée habituellement :**

Basée sur l'irradiation minimale (4,015 kWh/m²/j), cette approche garantit une production suffisante même durant les mois les moins favorables. Elle donne une puissance crête de **237,6 kWc**. Cependant, elle entraîne des surproductions considérables et des pertes durant les mois de forte irradiation. Les détails des calculs sont présentés en Annexe 1 : Dimensionnement et simulation sur PVsyst avec l'irradiation moyenne mensuelle minimale (4.015 kWh/m²/jr).

- **La deuxième : Approche optimisée :**

Utilisant l'irradiation moyenne annuelle (5,709 kWh/m²/j), cette méthode réduit la puissance crête à **178,2 kWc**. Cette configuration optimise l'utilisation des ressources, réduit les pertes et améliore le ratio de performance.

Les simulations sur PVsyst et Excel confirment que l'approche optimisée répond adéquatement aux besoins tout en minimisant les pertes énergétiques, dans la suite du document, nous continuerons donc avec l'approche optimisée.

Conclusion partielle

Avec une valeur de $\gamma_{en} = 0,819$, le dimensionnement optimisé du champ solaire répond efficacement aux besoins énergétiques des villages. La configuration adoptée intègre un système de stockage adapté pour couvrir les besoins nocturnes, tout en minimisant les pertes et en maximisant l'efficacité. Cette approche garantit une solution durable, économique et fiable pour l'électrification des villages d'Atchinedji et Adjigo.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VI.4. Analyse de l'irradiation solaire

Suite à l'indisponibilité de données récentes, les données d'irradiation du site, extraites de PVGIS pour une période de 5 ans (2015-2020), montrent une faible variation annuelle. Alors, nous avons considéré les données de l'année 2020 pour nos simulations. (Voir les données Annexe 2 : Données d'irradiation des villages sur 5 ans)

Les valeurs caractéristiques pour l'année 2020 sont :

- Minimale (juillet) : 4,015 [kWh/m²/j] ;
- Maximale (février) : 7,128 [kWh/m²/j] ;
- Moyenne annuelle : 5,709 [kWh/m²/j].

VI.5. Calcul de la puissance crête du champ solaire (P_c)

La puissance crête du champ solaire a été calculée selon la formule suivante :

$$P_c = \frac{B_j}{PR * I_r} \quad (2)$$

Avec :

- B_j : *besoin énergétique total journalier [kWh/jour]*
- R_p : *ratio de performance global du système*
- I_r : *irradiation solaire moyenne journalière [kWh/m²/j]*

Ratio de performance (R_p)

Il est défini comme le produit des rendements des sous-systèmes[13] : onduleur, câbles, température, etc. Pour ce projet, nous avons considéré :

Avec :

η_{ond} : *rendement onduleur (92%)*

η_{temp} : *rendement dû à la température (90%)*

$\eta_{câbles}$: *rendement dû aux câbles et connexions (98%)*

Ainsi, nous avons considéré :

$$\eta_G = \eta_{ond} * \eta_{temp} * \eta_{câbles} \quad (3)$$

$$\eta_G = 0,92 * 0,90 * 0,98$$

$$\eta_G = 81,14 \%$$

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Cette valeur est conforme aux standards des systèmes photovoltaïques pour des conditions similaires.

$$P_c = \frac{734\,434}{0,81 * 5,709}$$

$$P_c = 158\,534,6 [W]$$

Nous avons donc une puissance estimée de 158,535 [kW].

VI.5.1. Configuration du champ PV et dimensionnement des composants du champ PV

Dimensionnement de l'onduleur

Afin de déterminer le nombre d'onduleur, nous avons calculé la puissance minimale et maximale de l'onduleur en fixant un ratio AC/DC minimal de 0,95 et maximal de 1,05. Ce qui nous permettra donc de déterminer le nombre d'onduleurs minimal et maximal pour la puissance du champ PV estimée.

Tableau : Expressions et calculs du nombre d'onduleur

Désignations	Formules	Numéros	Calculs	Résultats
Nombre onduleur minimal	$\frac{P_c \text{ estimée}}{P_{ond} * Ratio(\frac{AC}{DC})_{min}}$	(4)	$\frac{158\,835}{60\,000 * 0,95}$	2,51
Nombre onduleur Maximal	$\frac{P_c \text{ estimée}}{P_{ond} * Ratio(\frac{AC}{DC})_{max}}$	(5)	$\frac{158\,835}{60\,000 * 1,05}$	2,71

Nous avons donc 3 onduleurs au minimum et 3 au maximum. Par la suite nous avons retenu 3 onduleurs de 60 kW de la marque DEYE.

(Voir Annexe 3 : Fiches techniques des éléments composants du champ PV)

➤ Détermination de la taille finale du champ PV

Pour configurer le champ photovoltaïque, nous avons défini les modules à connecter en série et en parallèle en tenant compte des contraintes de l'onduleur et des caractéristiques du module PV.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

➤ **Détermination du nombre de modules en série et le nombre de parallèles.**

Tableau 8 : Caractéristiques principales du module PV

Modules PV	NOCT	°C	45
	Pc nom	Wc	550
	Kt_Pmp	%/°C	-0,4
	Kt_Voc	%/°C	-0,275
	NOCT	°C	45,0
	rend_STC	---	0,213
	Surface	m²	2,524
	Rp	---	0,811
	Vmp	V	42,57
	Voc	V	51,44
	Imp	A	12,92

Tableau 9 : Caractéristiques principales de l'onduleur

Onduleur	Puissance nominale	W	60 000
	Nombre d'entrées MPPT	---	6
	Nombre d'entrées/MPPT	---	2
	Vmpp_min	V	150
	Vmpp_max	V	850
	Vmax_ond	V	1 000
	Imax/entrée	A	18
	Ratio AC/DC min	---	0,950
	Ratio AC/DC max	---	1,050

Le nombre de modules en série est limité par la plage de fonctionnement MPPT de l'onduleur. En utilisant les tensions maximales et minimales. Le tableau 10 donne les résultats obtenus :

Tableau 10 : Expressions et calculs pour la configuration du champ PV

Désignations	Formules	Numéros	Calculs	Résultats
Nombre de module en série minimal	$\frac{V_{mppt\ min\ ond}}{V_{mpp\ mod}}$	(6)	$\frac{850}{42,7}$	4
Nombre maximal de module en série	$\frac{V_{mppt\ max\ ond}}{V_{mpp\ mod}}$	(7)	$\frac{150}{42,2}$	19
Nombre de parallèle maximal par entrée DC	$\frac{I_{max\ entrée}}{I_{mp}}$	(8)	$\frac{18}{12,92}$	1

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Ainsi, chaque string peut comporter **4 à 19 modules en série** et chaque entrée MPPT peut donc supporter **un seul string**.

- **Configuration finale du champ PV**

Pour définir la configuration finale du champ PV, des simulations ont été effectuées en variant le nombre de modules en série et en parallèle. Les paramètres évalués incluent la puissance totale, le ratio AC/DC, la tension maximale, et la surface occupée. Le tableau 11 résume les différentes configurations testées.

Tableau 11 : Configuration retenue du champ PV

Nombre d'onduleur	--	3	3	3	3	3	3
Nombre de module en série par entrée	--	7	8	9	10	11	12
Nombre de parallèle par entrée	--	1	1	1	1	1	1
Nombre total module par entrée	--	7	8	9	10	11	12
Nombre total module par onduleur	--	84	96	108	120	132	144
Nombre total module sur les 3 onduleurs	--	252	288	324	360	396	432
Puissance champ par entrée	W	3 850	4 400	4 950	5 500	6 050	6 600
Puissance champ par onduleur	W	46 200	52 800	59 400	66 000	72 600	79 200
Puissance champ totale pour les 3 onduleurs	W	138 600	158 400	178 200	198 000	217 800	237 600
Ratio DC/AC	--	0,77	0,88	0,99	1,10	1,21	1,32
Vmp champ max par entrée	V	297,99	340,56	383,13	425,70	468,27	510,84
Surface du champ m ²	m ²	636,13	727,01	817,88	908,76	999,63	1 090,51

Nous avons retenu la configuration avec 9 modules en série et 1 string par entrée, correspondant à un total de 36 strings pour les 3 onduleurs. Cette configuration a été privilégiée pour les raisons suivantes :

- **Ratio AC/DC optimal :**

Le ratio AC/DC obtenu est de **0,99**, ce qui se rapproche idéalement de la valeur recommandée (proche de 1). Ce choix garantit une utilisation efficace des onduleurs en limitant les pertes. Un ratio proche de 1 maximise la performance du système en équilibrant la capacité des onduleurs avec la puissance disponible des modules PV, tout en évitant les problèmes de sous-utilisation ou de surcharge.

- **Compatibilité en tension :**

La tension maximale de (383,13 V) reste largement inférieure à la limite admissible par les onduleurs ($V_{max} = 850 \text{ V}$), garantissant un fonctionnement sûr et conforme aux spécifications

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

techniques. Cette compatibilité élimine les risques de défaillance liés à une surtension, tout en assurant une marge de sécurité pour les variations de température ou d'irradiation.

- **Puissance totale adaptée :**

La puissance totale générée par cette configuration est de **178,2 kW**, ce qui est proche de la puissance crête estimée de **158,535 kW**. Cette proximité permet de répondre efficacement à la demande énergétique tout en maintenant une légère réserve pour compenser les pertes éventuelles dues à l'installation ou aux conditions environnementales.

Le choix retenu présente des avantages techniques par rapport aux autres configurations pour plusieurs raisons :

- **Configurations avec 7 ou 8 modules en série :** Ces configurations présentent des ratios AC/DC de 0,77 et 0,88, respectivement. Ces valeurs faibles traduisent une sous-utilisation des onduleurs, réduisant l'efficacité globale du système. De plus, la puissance totale générée est inférieure à la puissance crête estimée, ce qui peut conduire à un déficit énergétique lors des périodes de forte demande ;
- **Configurations avec plus de 9 modules en série (10 à 12) :** Bien que ces configurations augmentent la puissance totale et le ratio DC/AC (jusqu'à 1,32), elles présentent des inconvénients importants comme **le risque de surcharge** car les ratios supérieurs à 1 indiquent une surcharge potentielle des onduleurs, ce qui pourrait entraîner des pertes énergétiques et un vieillissement prématuré des composants.

VI.6. Dimensionnement du Stockage

VI.6.1. Objectif de stockage

Pour garantir un dimensionnement optimisé et éviter un surdimensionnement, nous avons décidé de stocker uniquement l'énergie nécessaire pour couvrir les besoins nocturnes, correspondant à deux plages horaires principales : **de 00h à 6h** et **de 17h à 23h**, soit un total de **181,488 kWh**. Cela permet de répondre aux besoins énergétiques critiques tout en limitant les coûts et la surcapacité inutile. Comme technologie de batterie, nous avons les BESS. Un BESS (**Battery Energy Storage System**) est un système de stockage énergétique basé sur des

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

batteries. Il permet de stocker l'énergie excédentaire produite par la centrale solaire en journée et de la redistribuer lorsque la production solaire est absente ou insuffisante.

Les BESS sont conçus pour garantir une autonomie énergétique, améliorer la stabilité du réseau et assurer un approvisionnement énergétique fiable.

Pour ce projet, nous avons choisi la marque **DEYE**, réputée pour ses solutions de stockage fiables, efficaces et durables. Le modèle sélectionné, **BOS-G 85 Pro**, utilise la technologie **Lithium Fer Phosphate (LiFePO4)**, offrant une excellente sécurité, une grande stabilité chimique et une longue durée de vie. (Voir Annexe 4 : Fiche technique BESS).

Le tableau 12 donne les informations importantes pour nos calculs.

Tableau 12 : Caractéristiques techniques des batteries retenues

Paramètre	Valeurs
Énergie par module	5,12 kWh
Tension nominale par module	51 V
Capacité par module	100 Ah
Nombre de modules en série	17
Énergie totale du système	87 kWh
Énergie utilisable	78,33 kWh
Tension nominale du système	870 V
Profondeur de décharge (DoD)	90%

Capacité nécessaire [Ah] :

La capacité de stockage est calculée à partir de l'énergie et de la tension nominale du système :

$$C = \frac{Bn * Naut}{DOD * Vsyst} \quad (9)$$

$$C = \frac{181\,488 * 1}{0,9 * 870}$$

$$C = 231,68 \text{ Ah}$$

Avec :

- *C* : Capacité nécessaire de la batterie
- *DOD* : Profondeur de décharge de la batterie
- *Bn* : Besoins énergétiques à stocker
- *Vsyst* : tension nominale du système
- *Naut* : Nombre de jour d'autonomie

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Nous avons considéré une journée d'autonomie pour augmenter la rentabilité du système en limitant le nombre de batteries car ces dernières sont très coûteuses avec une durée de vie limitée 10, 15 ans pour celles au lithium[14]. De plus, le site Goensol indique qu'une batterie au lithium coûte entre 800 et 1000 € par kWh stocké. Bien qu'il s'agisse du type de batterie le plus cher du marché, ce sont les plus performantes et les plus répandues[14].

Le tableau 13 donne les résultats du dimensionnement du stockage :

Tableau 13 : Récapitulatif des résultats du dimensionnement du stockage

Paramètre	Unités	Valeurs
Capacité	Ah	231,68
Energie	Wh	201 653,33
Nombre de BESS retenu	--	3
Énergie utilisable	kWh	78,33
Energie totale stockée	Wh	234 990
Energie à prévoir pour la recharge	Wh	261 100

Nous avons donc retenu 3 BESS, ce qui nous donne une énergie totale stockée de 235 kWh.

VI.6.2.Résultats et justification du choix

- Énergie totale stockée : 234,99 kWh, couvrant largement les besoins nocturnes (181,488 kWh).
- Énergie à prévoir pour la recharge : 261,1 kWh, intégrant les pertes du système.
- Système modulaire : Le choix de 3 BESS assure une flexibilité d'expansion future si les besoins augmentent.

VI.6.3.Comparaison avec d'autres configurations

- Technologie retenue (LiFePO4) : Elle offre une meilleure sécurité et une durée de vie accrue par rapport aux batteries plomb-acide ou d'autres solutions lithium-ion.
- Optimisation des besoins : En se concentrant sur l'énergie nocturne uniquement, nous avons évité un surdimensionnement coûteux tout en répondant aux besoins spécifiques du projet.

VI.7. Dimensionnement du Groupe Électrogène Diesel

Dans le cadre de notre projet d'électrification des villages d'Atchinedji et Adjigo par un mini-réseau, le dimensionnement d'un groupe électrogène Diesel représente une étape cruciale pour assurer une alimentation électrique fiable et économique. Le groupe Diesel est prévu comme une **source de secours** pour couvrir les besoins énergétiques en cas de défaillance ou

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

d'indisponibilité de la production photovoltaïque, ou encore pour faire face à des charges de pointe inattendues. Suite à nos simulations, nous prévoyons un fonctionnement d'environ **830 heures par an**, principalement pour alimenter des charges nocturnes pendant les mois de faibles irradiations dans lesquels les batteries ne seront pas suffisamment chargées. La puissance maximale attendue de ce système est de **26 kW** qui correspond à la puissance de pointe de nuit (du principalement à l'éclairage des ménages).

Compte tenu des conditions climatiques locales, avec une température ambiante maximale de **31°C** et une **altitude de 192 mètres**, nous avons intégré les corrections nécessaires pour ajuster la puissance disponible du groupe électrogène afin de garantir son bon fonctionnement.

Les facteurs climatiques, tels que la température élevée et l'altitude, influencent directement la performance des groupes électrogènes. Ces facteurs réduisent la puissance nominale des moteurs Diesel, ils ont donc été pris en compte dans le dimensionnement.

VI.7.1. Calcul de la Puissance Corrigée

Correction de la Température

La puissance des moteurs Diesel diminue au-delà de **25°C**, à raison de **1% par degré supplémentaire**. Pour une température ambiante de **31°C**, la correction liée à la température est calculée comme suit :

$$\text{Déclassement température} = (31 - 25) * 1 = 6\% \quad (10)$$

➤ Correction de l'Altitude

La diminution de la densité de l'air à des altitudes élevées affecte également la puissance des moteurs Diesel. Une perte typique de 1 % par tranche de 100 m d'altitude est appliquée au-delà des 150 premiers mètres au-dessus du niveau de la mer. Pour une altitude de **192 m**, la réduction est donc négligeable.

➤ Calcul de la Puissance Corrigée

En intégrant les deux facteurs de déclassement (température et altitude), la puissance corrigée est donnée par la relation suivante :

$$\text{Déclassement total} = 1 - (0,06) = 0,94$$

La puissance corrigée nécessaire est alors calculée comme suit :

$$\text{Scorrigé} = 0,94 * 26,22 \approx 24,65 \text{ [kW]}$$

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

➤ **Marges et sélection du Groupe Électrogène**

Pour garantir une fiabilité optimale et respecter les normes industrielles, nous recommandons d'ajouter une marge de sécurité de 15%. Ainsi, nous avons choisi un groupe électrogène avec une puissance nominale de **40 kVA (soit environ 32 kW)**, capable de couvrir les charges maximales tout en évitant le sous-dimensionnement ou les surcharges prolongées.

VI.7.2. Mode de Fonctionnement et Gestion des Charges

Nous savons que les groupes électrogènes Diesel fonctionnent de manière optimale lorsqu'ils sont chargés entre **30 % et 80 %** de leur capacité nominale. Une charge inférieure à **30 %** peut entraîner une mauvaise combustion, provoquant un encrassement du moteur et une réduction de sa durée de vie.

- Charge minimale recommandée (30 % de 40 kVA) :

$$30\% * 40\text{kVA} = 12 \text{ kVA}$$

- Charge maximale (80 % de 40 kVA) :

$$80\% * 40\text{kVA} = 32 \text{ kVA}$$

Pour des charges inférieures à **12 kVA**, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes de compensation, tels que l'utilisation de résistances artificielles pour éviter les problèmes liés aux faibles charges.

VI.7.3. Choix de configuration

Afin d'assurer une flexibilité et une meilleure gestion des charges faibles ou variables, nous proposons d'envisager une configuration à deux groupes Diesel de 20 kVA chacun. Ce choix permet une plus grande modularité :

- Charges inférieures à 6 kW : Un seul groupe de 20 kVA peut fonctionner.
- Charges entre 6 et 18 kW : Un groupe est utilisé.
- Charges supérieures à 18 kW : Les deux groupes fonctionnent en parallèle pour couvrir les besoins.

Cette configuration réduit les coûts d'entretien, optimise la consommation de carburant et prolonge la durée de vie des équipements en évitant le fonctionnement prolongé en faible charge.

Le dimensionnement de notre groupe électrogène Diesel a permis de déterminer une puissance nominale optimale de 40 kVA (ou deux groupes de 20 kVA en parallèle), capable de couvrir les charges maximales corrigées de 28,5 kW avec une marge de sécurité. Cette solution tient

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

compte des spécificités climatiques et altimétriques du site et garantit une alimentation électrique fiable tout en optimisant les performances opérationnelles du groupe.

(Voir fiche technique en **Annexe 6 : Groupe DIESEL PERKINS 20 kVA**).

(Voir aussi les éléments suivant en :

Annexe 7 : Configuration générale du système hybride (synoptique) ;

Annexe 8 : Schéma électrique du système hybride : Câblage du champ solaire photovoltaïque ;

Annexe 9 : Dimensionnement des câbles et des équipements de protection dans le système hybride.)

VII. DISCUSSION ET ANALYSES DES RESULTATS DES SIMULATIONS DU DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE

VII.1. Méthodologie de simulation

Les simulations visent à définir les proportions optimales du système hybride photovoltaïque, incluant un champ solaire, des batteries et un groupe électrogène. L'objectif principal est de répondre aux besoins énergétiques des villages tout en assurant une gestion optimale des ressources disponibles. Les résultats mettent en lumière des périodes critiques justifiant l'utilisation du groupe électrogène en appoint.

Les simulations ont été faites sur les principes suivants :

- Utilisation de l'énergie produite
 - L'énergie produite par le champ photovoltaïque est utilisée en priorité pour couvrir les besoins diurnes des villages.
 - Le surplus de production est stocké dans les batteries pour couvrir les besoins nocturnes.
- Simulation des besoins énergétiques sur 24 heures
- Production du champ solaire photovoltaïque
- Les simulations ont été réalisées en utilisant les données d'irradiation journalière moyenne des 12 mois de l'année 2020.
- Cette simulation a permis de déterminer la production du champ solaire sur un jour moyen, mois par mois.
- La production énergétique a été calculée à l'aide de la formule suivante :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

$$E = P_c * H_{cs} * R_G \quad (11)$$

Avec :

- P_c : Puissance crête du champ solaire,
- H_{cs} : Nombre d'heures solaires crêtes,
- R_G : Représente le rendement global du système (évalué à 0,81).

VII.2. Résultats principaux sur le fonctionnement global du système hybride

Cette section présente une synthèse des performances du système hybride en fonction des variations saisonnières d'irradiation solaire, mettant en évidence les différences notables entre les périodes à forte et à faible irradiation. A partir des irradiations mensuelles et des résultats des résultats de nos simulations, on peut diviser l'année en deux grandes catégories à savoir : les mois à forte irradiation (janvier à mai et octobre à décembre) et VII.2.2. Mois à faible irradiation (juin à septembre).

Pour chaque catégorie de mois, on observe un comportement particulier du système hybride.

VII.2.1. Mois à forte irradiation (janvier à mai et octobre à décembre)

Pour cette catégorie, l'irradiation moyenne journalière est supérieure à la moyenne annuelle (5,709 kWh/m²/jour).

- La production du champ photovoltaïque permet :
 - De satisfaire les besoins diurnes ;
 - De recharger les batteries à 100 % ;
 - Le groupe électrogène n'est pas sollicité.

Les figures 11 à 18 illustrent le fonctionnement du système hybride pendant ces mois :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

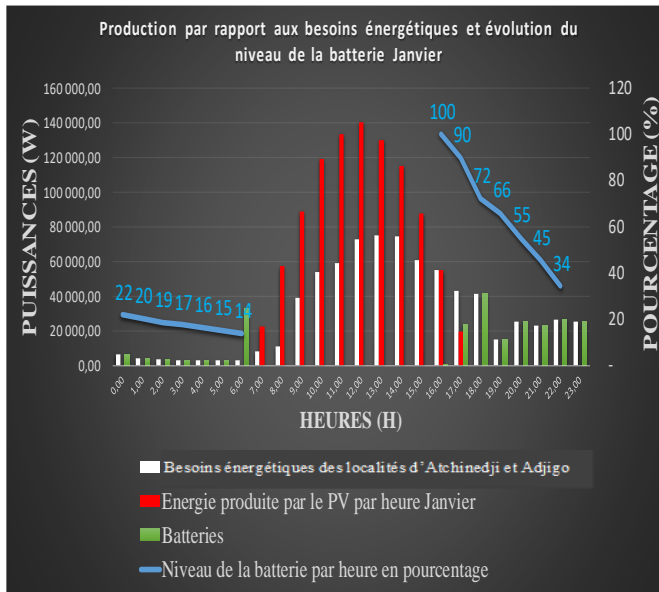


Figure 11 : Fonctionnement du système en Janvier

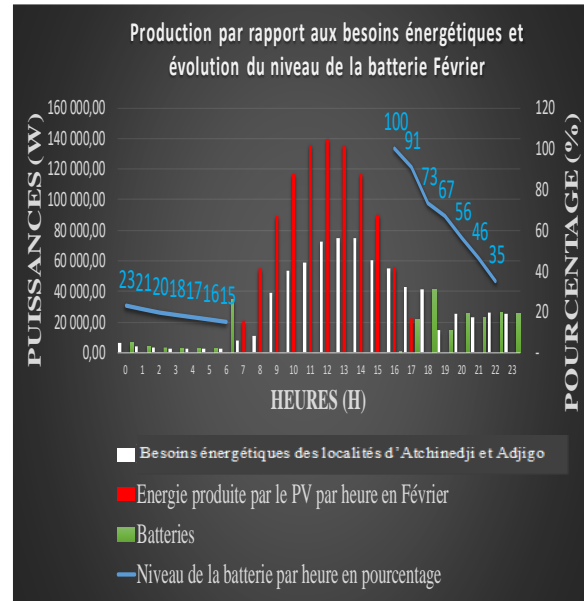


Figure 12 : Fonctionnement du système en Février

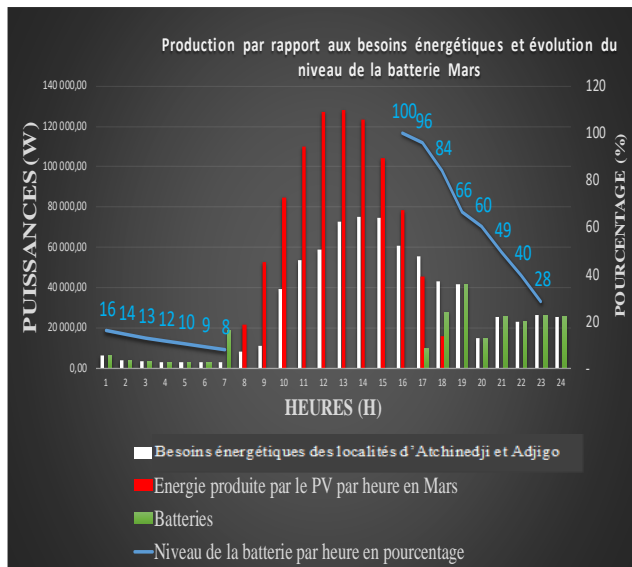


Figure 13 : Fonctionnement du système en Mars

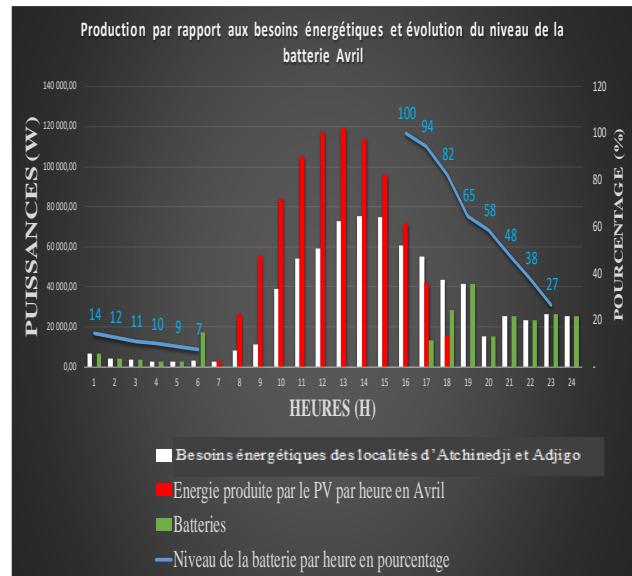


Figure 14 : Fonctionnement du système en Avril

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

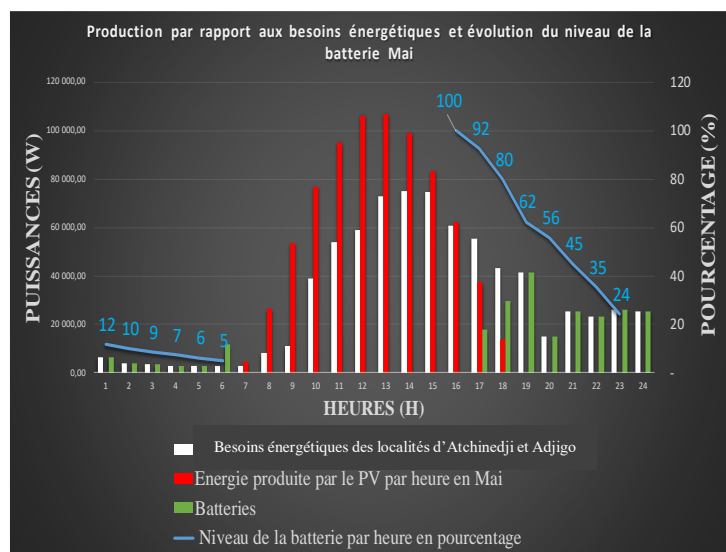


Figure 15 : Fonctionnement du système en Avril

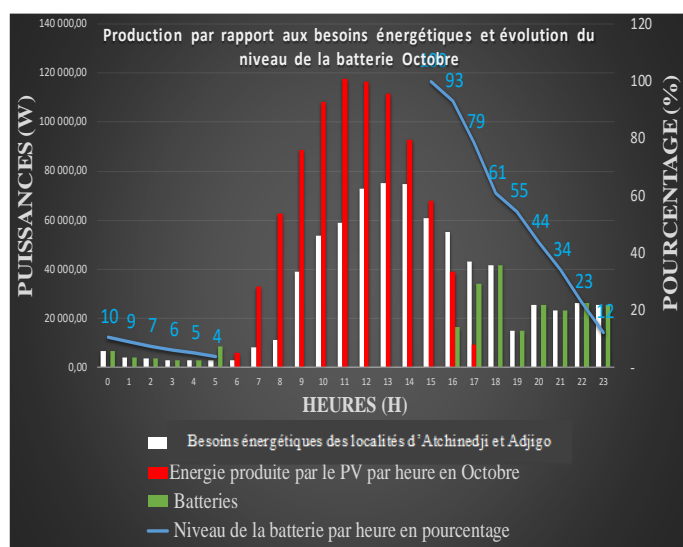


Figure 16 : Fonctionnement du système en Octobre

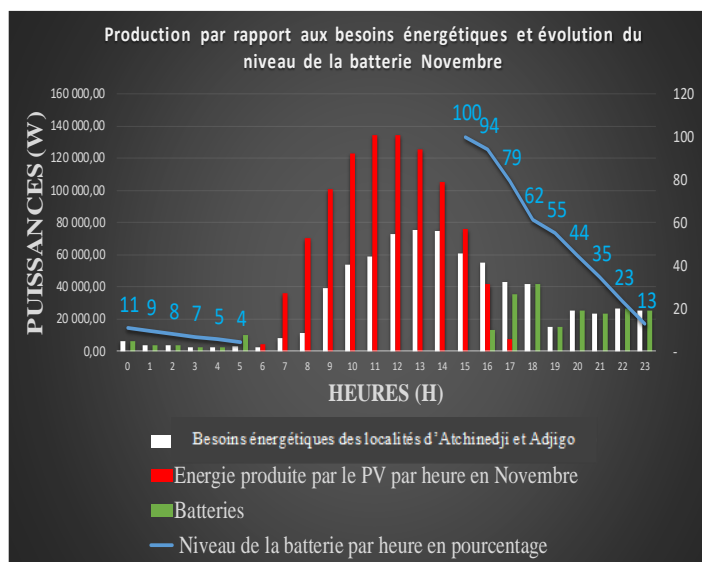


Figure 17 : Fonctionnement du système en Novembre

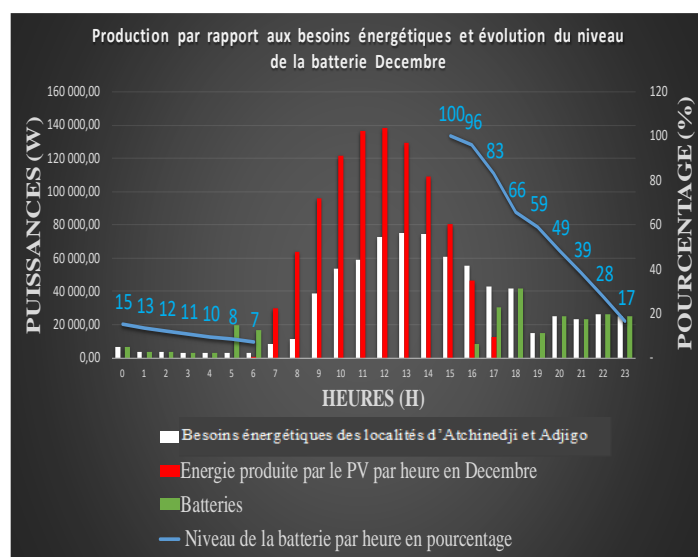


Figure 18 : Fonctionnement du système en Décembre

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VII.2.2. Mois à faible irradiation (juin à septembre)

- L'irradiation moyenne journalière est inférieure à la moyenne annuelle.
- La production solaire ne suffit pas pour :
 - Satisfaire les besoins diurnes ;
 - Recharger complètement les batteries.
- Le groupe électrogène est donc utilisé pour combler les besoins nocturnes.

VII.3. Dimensionnement de la ligne HTA et choix du transformateur

Deux approches ont été étudiées pour le dimensionnement de la ligne HTA et le choix du transformateur dans le cadre de la ligne HTA pour la distribution de l'énergie à partir du mini-réseau alimentant les villages d'Atchinedji et Adjigo :

➤ **Approche basée sur la demande réelle du village**

Cette première méthode considère uniquement la puissance demandée par les villages, avec une estimation initiale de 76 kW étant le pic de puissance qui est atteint à 13h et une croissance démographique annuelle de **2,61 %**. Dans 10 ans, la charge projetée atteint environ **110 kVA**, nécessitant un transformateur de 100 kVA pour couvrir les besoins locaux. Cette approche minimise les coûts d'investissement, mais elle limite la flexibilité du système, notamment pour gérer des excédents de production en sachant que le pic de production AC sortie onduleur est de 180 kW.

➤ **Approche basée sur la production maximale de la centrale solaire PV**

La seconde approche dimensionne la ligne HTA et le transformateur en fonction de la capacité maximale de production du champ solaire, soit **180 kW** (puissance de sortie des onduleurs). Avec un facteur de puissance de 0,9, cela correspond à une puissance apparente de **200 kVA** et un courant nominal de **6,415 A**. Un transformateur de **250 kVA [04-20kV]** a été retenu pour garantir l'évacuation de l'ensemble de la production solaire, même pendant les périodes de pic d'ensoleillement. Bien que ce choix implique un surdimensionnement pour la plupart du temps, il offre une flexibilité optimale et va pouvoir supporter une future augmentation de la charge. En effet, le choix d'un transformateur de 250 kVA s'appuie sur plusieurs arguments techniques et stratégiques :

- **Optimisation de la production solaire** : cette capacité permet d'évacuer tout excédent de production, notamment pendant les heures de forte irradiation

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

solaire. Cela maximise l'utilisation du champ solaire et évite les pertes par limitation de puissance ;

- **Anticipation des extensions futures** : avec la puissance projetée du village atteignant environ 110 kVA dans 10 ans, le transformateur de 250kVA offre une large marge pour répondre à toute augmentation de la demande locale, même si elle dépasse les prévisions initiales ;
- **Intégration au réseau national** : le gouvernement togolais prévoit l'extension du réseau électrique national. En installant une cellule réseau en réserve, le système pourra facilement injecter les surplus de production sur le réseau national à l'avenir, améliorant ainsi la rentabilité de la centrale solaire.

En somme, le choix d'un transformateur de 250 kVA permet non seulement de répondre aux besoins futurs du village mais aussi d'évacuer toute la production solaire de manière efficace, tout en anticipant une connexion au réseau national. Ce dimensionnement optimise ainsi la flexibilité, la durabilité et la rentabilité du système, tout en restant compatible avec les perspectives de croissance de la consommation locale et les politiques énergétiques du pays.

La figure 27 montre le tracé la ligne HTA et le choix de l'emplacement de la mini centrale PV (178,2 kWc).



Figure 19 : Tracé de l'extension de la ligne HTA

VII.3.1. Calcul du nombre de cantons

Le dimensionnement des cantons a été réalisé en tenant compte de la longueur totale de la ligne et de l'intervalle recommandé entre les équipements (5 km en HTA). Aussi, la ligne HTA est

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

équipée d'interrupteurs automatiques de coupure en charge (IACM) afin d'assurer la protection et la flexibilité du réseau.

Longueur de la ligne HTA : 865 m ; Intervalle standard entre IACM : 5000 m [15]

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{\text{Longueur totale de la ligne (m)}}{\text{Intervalle entre équipements (m)}} \quad (12)$$

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{865}{5000} = 0.17 \approx 1 \text{ canton}$$

La ligne HTA ne nécessite qu'un seul canton étant donné la faible longueur de la ligne.

VII.3.2. Calcul du nombre de poteaux

Les poteaux servent à supporter les câbles HTA et BT, leur espacement dépend des conditions mécaniques et du type de terrain. Pour la ligne HTA, nous avons considéré une portée moyenne de 50 m entre deux poteaux, adaptée à un terrain rural relativement plat. En BT, les portées ont été ajustées selon les longueurs mesurées des départs.

Longueur totale HTA : 865 m

Portée moyenne HTA : 50 m

$$\text{Nombre de poteaux} = \frac{\text{Longueur totale HTA (m)}}{\text{Portée moyenne (m)}} + 1 \quad (13)$$

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{865}{50} + 1 = 17,3 \approx 18 \text{ Poteaux}$$

VII.3.3. Le type de support

Les supports choisis seront en Béton. Ils répondront aux spécifications techniques prévues par la norme NFC 67-200. En effet, selon celle-ci, on peut catégoriser les supports BT et HTA de la façon suivante.

Tableau 14: catégorisation des supports en BT et HTA selon la norme NFC 67-200

Catégorie	BT	HTA	HTA
Classe	A	A	B
Hauteur (m)	9 et 10	12,13,14	12,13,14
Effort en tête (daN)	150-300-400-650	400-650	1250-1600-2000

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Pour cette étude nous opterons pour des supports de 12 m et d'effort de tête de 650 pour les supports de Fixation et 1250 pour les autres. Enfin, le support qui portera l'IACM sera de 1600 daN [16].

Le tableau suivant résume les informations sur les différents types de poteau sur la ligne HTA avec leur nombre.

Tableau 15 : Nombre et type de support HTA

Type de poteau	Nombre	Classe	Hauteur (m)	Effort en tête (daN)
Poteaux d'alignement	14	A	12	400
Poteaux d'effort (avec IACM)	2	B	12	800
Poteaux de départ (avec transfo élévateur)	1	B	12	1250
Poteaux de fin de ligne (avec transfo abaisseur)	1	B	12	1250

VII.3.4. Types d'armements

Nous optons pour les nappes horizontales car elles permettent un accès facile aux conducteurs pour l'installation et la maintenance. Ce type d'armement est plus simple et moins coûteux à installer.

VII.3.5. Analyse détaillée des mois à faible irradiation :

• Juin et septembre

- Production photovoltaïque : environ 20,97 MWh (juin) et 21,6 MWh (septembre).
- Production du groupe électrogène : environ 3,6 [MWh] en (juin) et 4 [MWh] en (septembre).
- Niveau de charge des batteries : en Juin, 56 %, correspondant à une énergie stockée de 4,376 [MWh] et en Septembre, 63 %, correspondant à une énergie stockée de 4,971 [MWh].

• Juillet et août

- Production photovoltaïque : environ 20,16 [MWh] pour les deux mois.
- Production du groupe électrogène : environ 4 [MWh] pour les deux mois.
- Niveau de charge des batteries : en Juillet : 37 %, soit une énergie stockée de 3,016 [MWh] et en Août : 38 %, soit une énergie stockée de 3,06 [MWh].

Les figures 19 à 22 illustrent le fonctionnement du système hybride pendant ces mois :

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

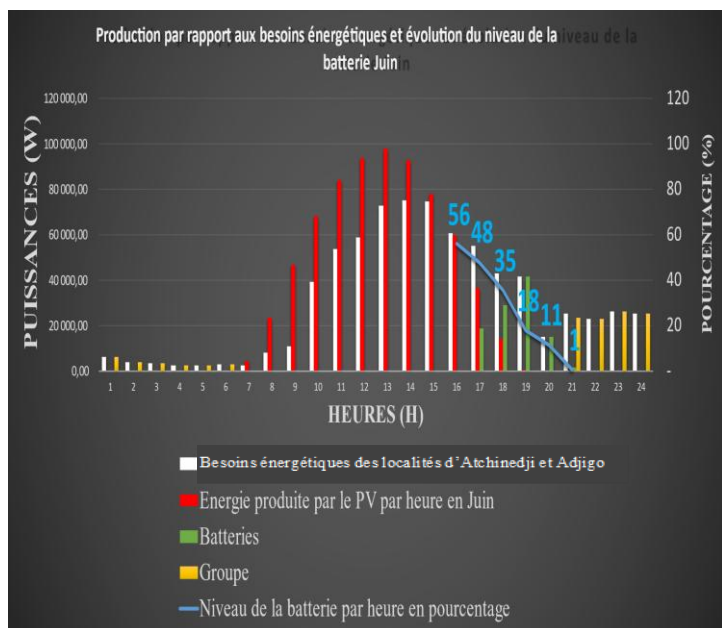


Figure 20 : Fonctionnement du système en Juin

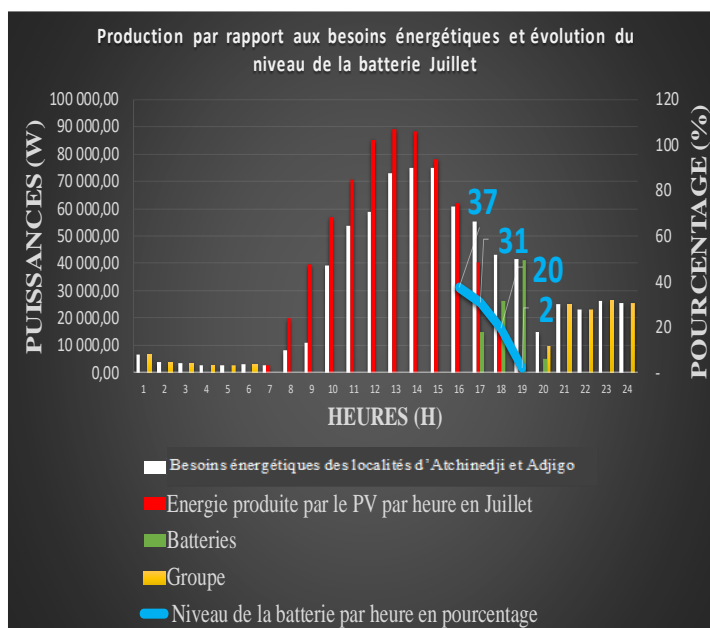


Figure 21 : Fonctionnement du système en Juillet

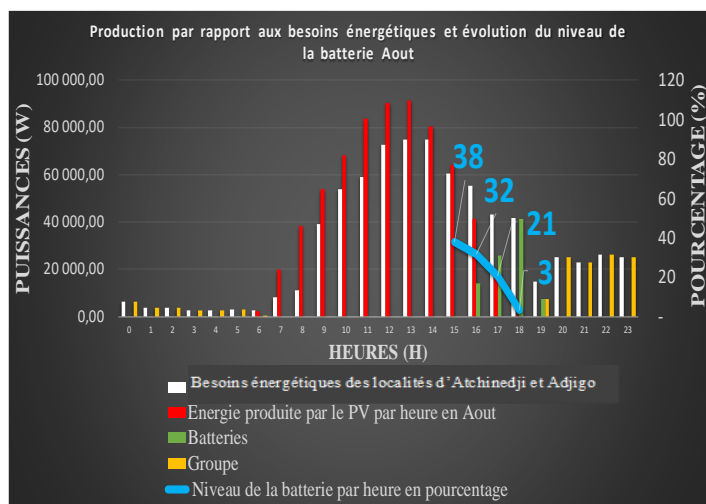


Figure 22 : Fonctionnement du système en Aout

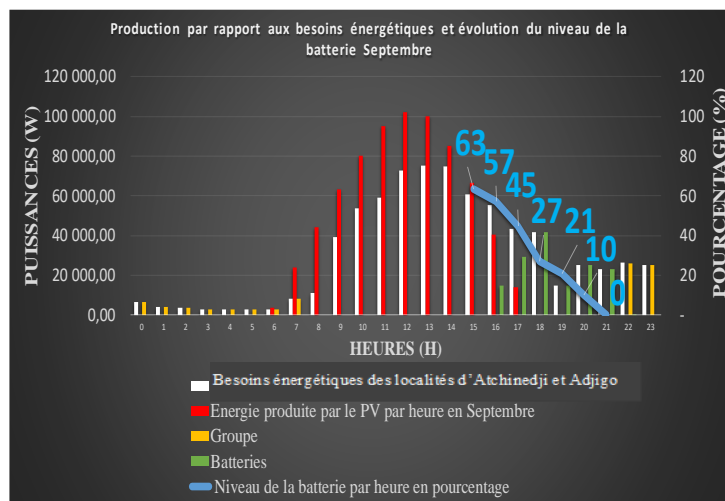


Figure 23 : Fonctionnement du système en Septembre

Les figurent ci-dessus viennent confirmer le fonctionnement du système hybride qui est clairement dépendant des réalités climatiques de la zone du projet. Il démontre la pertinence de

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

nos simulations ayant été faites sur la base de la répartition des mois en deux catégories principales qui sont les mois de forte irradiation et ceux de faible irradiation.

Suite aux résultats obtenus, nous avons déterminé la contribution énergétique mensuelle, annuelle ainsi que le taux de pénétration des trois sources de production à savoir : le champ PV, le Groupe Diesel et les batteries. Le tableau 14 donne les valeurs obtenues.

Tableau 16 : contribution énergétique mensuelle, annuelle ainsi que le taux de pénétration des trois sources de production

Mois	Part des batteries (kWh)	Part du GE (kWh)	Part du PV (kWh)	Production du PV mensuelle consommée
Janvier	7 284 690,00	0,00	15 482 764,00	22 767 454,00
Février	6 814 710,00	0,00	14 483 876,00	21 298 586,00
Mars	7 278 862,00	0,00	15 488 592,00	22 767 454,00
Avril	7 038 900,00	0,00	14 994 120,00	22 033 020,00
Mai	7 273 530,00	0,00	15 493 924,00	22 767 454,00
Juin	3 939 274,96	3 617 319,66	14 476 425,38	22 033 020,00
Juillet	2 715 058,93	4 095 509,44	15 956 885,63	22 767 454,00
Aout	2 755 401,94	4 032 525,07	15 979 526,99	22 767 454,00
Septembre	4 474 145,21	2 534 074,54	15 024 800,26	22 033 020,00
Octobre	7 273 530,00	0,00	15 493 924,00	22 767 454,00
Novembre	7 038 900,00	0,00	14 994 120,00	22 033 020,00
Décembre	7 273 530,00	0,00	15 493 924,00	22 767 454,00
Production totale annuelle	71 160 533,04	14 279 428,71	183 362 882,26	268 802 844,00
Taux de pénétration en (%)	26,47%	5,31%	68,21%	100%

La figure 23 illustre les taux de pénétration des trois sources de production sur une année.

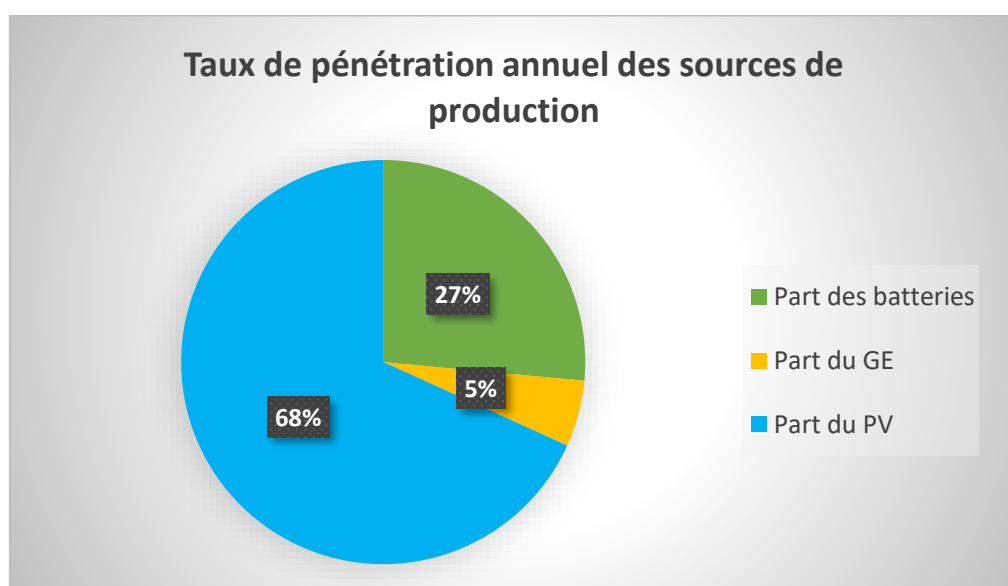


Figure 24 : taux de pénétration des trois sources de production

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

La figure 23 met en relief la performance du système hybride, notamment le faible taux de contribution du groupe Diesel dans le mix énergétique.

VII.4. Simulations et répartition de la production du champ solaire photovoltaïque

Les simulations ont permis de quantifier la répartition de l'énergie produite par le champ PV de façon isolé. En effet, les résultats montrent que 27 % de cette énergie est utilisée pour recharger les batteries, 59 % est directement consommée pour satisfaire les besoins diurnes des villages, et 14 % est perdue ou inutilisée. Cette perte énergétique est principalement due à des périodes de forte irradiation où la production excède la demande, particulièrement pendant les mois à irradiation élevée. Le tableau 15 illustre cette répartition.

Tableau 17 : Répartition mensuel de la production énergétique du champ PV

Mois	Energie produite par le PV (kWh)	Energie pour la recharge des batteries par le PV (kWh)	Energie du PV réellement consommée par les villages (kWh)	Energie excédentaire du PV non inutilisée (kWh)
Janvier	30 055 544	8 094 100	15 471 852	6 489 592
Février	28 317 758	7 571 900	14 473 668	6 272 190
Mars	27 617 033	8 094 100	15 477 680	4 045 253
Avril	25 476 829	7 833 000	14 983 560	2 660 269
Mai	25 427 233	8 094 100	15 483 012	1 850 121
Juin	20 965 352	4 941 932	13 051 185	2 972 235
Juillet	20 158 058	3 600 524	15 373 094	1 184 440
Aout	20 202 884	3 645 350	15 395 735	1 161 799
Septembre	21 559 652	5 536 232	14 498 240	1 525 180
Octobre	26 433 638	8 094 100	15 483 012	2 856 526
Novembre	28 778 015	7 833 000	14 983 560	5 961 455
Décembre	29 930 032	8 094 100	15 483 012	6 352 920
Répartition annuelle de la production du champ PV	304 922 027,44	81 432 438,49	180 157 610,26	43 331 978,70
Répartition de la production énergétique du champ PV (%)	100%	26,71%	59,08%	14,21%

En appui au tableau 15 ci haut, la figure 24 donne de façon graphique la répartition de la production annuelle du champ PV.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

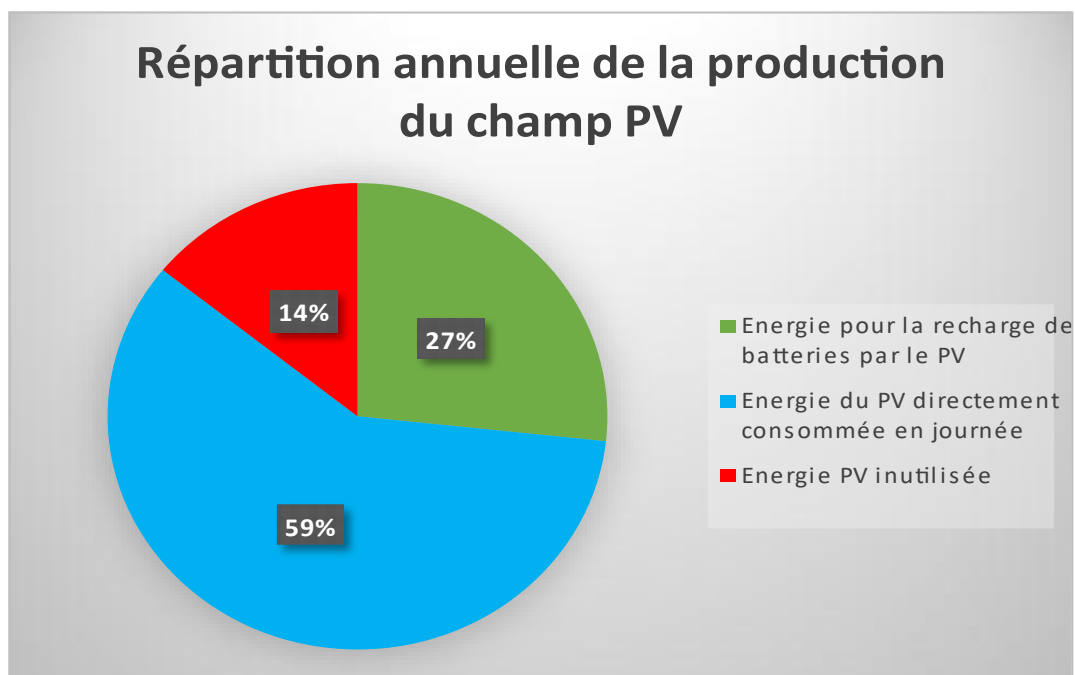


Figure 25 : Répartition de la production annuelle du champ PV

VII.5. Comparaison entre les résultats de simulation annuelle obtenus sur PVsyst et Excel

Les figures qui suivent donnent une vue d'ensemble et une comparaison entre les résultats de simulation obtenus sur PVsyst et Excel sur la production du champ PV par rapport à la consommation énergétique.

➤ Résultats obtenus sur Excel

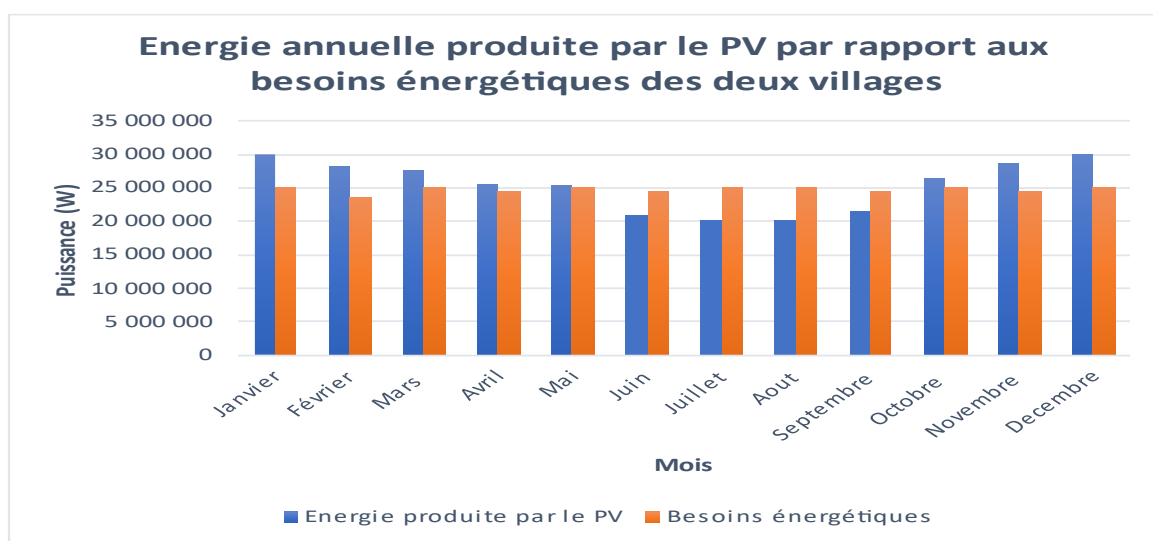


Figure 26 : Energie annuelle produite par le PV par rapport aux besoins énergétiques des deux villages sur Excel

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

➤ **Résultats obtenus sur PVsyst**

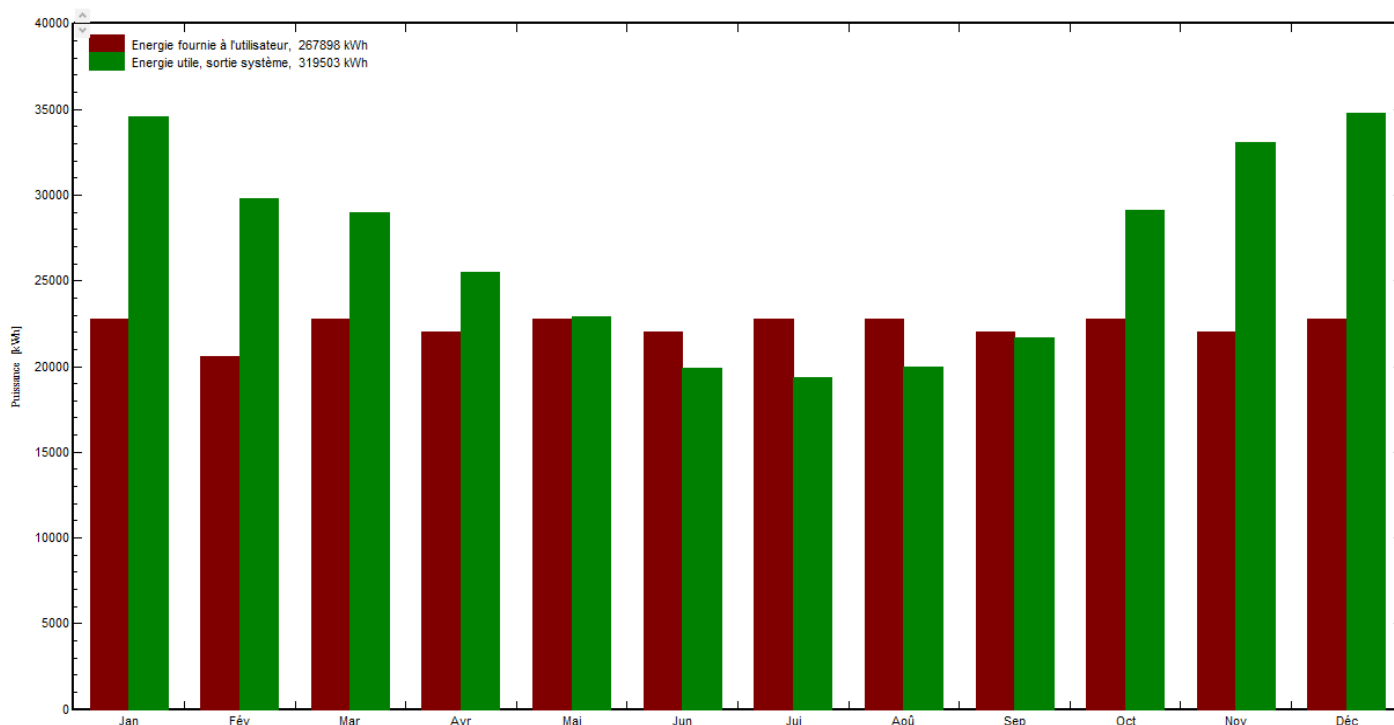


Figure 27 : Production annuelle du PV sur la consommation avec le dimensionnement optimisé sur PVsyst

Les résultats de simulation sur PVsyst corroborent nos scénarios par rapport à la production du champ PV comme présenté plus haut (Page 38) par rapport à la répartition des mois selon l'irradiation et nos résultats obtenus sur Excel. Ainsi, nous avons obtenus une production annuelle de 305 MWh sur Excel contre 319 MWh sur PVsyst. Bien que proches, la différence entre ces résultats est dû au fait que nous avons considéré un rendement du système (R_p) légèrement supérieur à celui de PVsyst.

VII.6. Conclusion partielle

L'optimisation a guidée nos choix de dimensionnement. Un compromis a été trouvé pour maximiser l'utilisation de l'énergie produite, tout en limitant les pertes et le recours au groupe électrogène. En conséquence, le champ photovoltaïque a été dimensionné pour répondre aux besoins annuels moyens, avec des ajustements pour les périodes de faible irradiation (quatre mois de l'année). Durant ces périodes, le groupe électrogène sera utilisé en appoint pour compenser l'insuffisance de production.

Le champ photovoltaïque produit suffisamment pour couvrir les besoins des villages et recharger les batteries, sauf durant les mois à irradiation faible.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Pour les périodes de faible irradiation, deux groupes électrogènes de 20 kVA ont été choisis pour assurer la redondance et répondre à la puissance maximale appelée (26 kW). Cette configuration garantit une alimentation fiable et minimise les pertes énergétiques.

L'approche adoptée prend en compte les réalités climatiques locales, évitant ainsi un surdimensionnement des équipements et une surproduction inutile. En résumé, cette méthodologie offre un équilibre entre performance, fiabilité et coût.

VIII. DIMENSIONNEMENT DE LA LIGNE HTA/BT

VIII.1. Description de la configuration du réseau

Dans le cadre de notre projet de mini-réseau électrique pour les villages d'Atchinedji et Adjigo, la ligne HTA/BT a été conçue pour transporter l'énergie produite par une mini-centrale photovoltaïque équipée d'un transformateur élévateur de 250 [kVA] (400 V/20 kV). Ce transformateur élévateur alimente une ligne HTA de 865 m qui dessert deux transformateurs abaisseurs de 100 kVA (20 kV/400 V) chacun, répartis dans les deux villages. Ces transformateurs seront installés pour alimenter les charges en basse tension (BT) dans chaque zone.

VIII.2. Dimensionnement de la ligne HTA et choix du transformateur

Deux approches ont été étudiées pour le dimensionnement de la ligne HTA et le choix du transformateur dans le cadre de la ligne HTA pour la distribution de l'énergie à partir du mini-réseau alimentant les villages d'Atchinedji et Adjigo :

➤ Approche basée sur la demande réelle du village

Cette première méthode considère uniquement la puissance demandée par les villages, avec une estimation initiale de 76 kW étant le pic de puissance qui est atteint à 13h et une croissance démographique annuelle de **2,61 %**. Dans 10 ans, la charge projetée atteint environ **110 kVA**, nécessitant un transformateur de 100 kVA pour couvrir les besoins locaux. Cette approche minimise les coûts d'investissement, mais elle limite la flexibilité du système, notamment pour gérer des excédents de production en sachant que le pic de production AC sortie onduleur est de 180 kW.

➤ Approche basée sur la production maximale de la centrale solaire PV

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

La seconde approche dimensionne la ligne HTA et le transformateur en fonction de la capacité maximale de production du champ solaire, soit **180 kW** (puissance de sortie des onduleurs). Avec un facteur de puissance de 0,9, cela correspond à une puissance apparente de **200 kVA** et un courant nominal de **6,415 A**. Un transformateur de **250 kVA [04-20kV]** a été retenu pour garantir l'évacuation de l'ensemble de la production solaire, même pendant les périodes de pic d'ensoleillement. Bien que ce choix implique un surdimensionnement pour la plupart du temps, il offre une flexibilité optimale et va pouvoir supporter une future augmentation de la charge. En effet, le choix d'un transformateur de 250 kVA s'appuie sur plusieurs arguments techniques et stratégiques :

- **Optimisation de la production solaire** : cette capacité permet d'évacuer tout excédent de production, notamment pendant les heures de forte irradiation solaire. Cela maximise l'utilisation du champ solaire et évite les pertes par limitation de puissance ;
- **Anticipation des extensions futures** : suite à nos calculs, la puissance projetée du village atteindra environ 110 kVA dans 10 ans, le transformateur de 250kVA offre une large marge pour répondre à toute augmentation de la demande locale, même si elle dépasse les prévisions initiales ;
- **Intégration au réseau national** : le gouvernement togolais prévoit l'extension du réseau électrique national. En installant une cellule réseau en réserve, le système pourra facilement injecter les surplus de production sur le réseau national à l'avenir, améliorant ainsi la rentabilité de la centrale solaire.

En somme, le choix d'un transformateur de 250 kVA permet non seulement de répondre aux besoins futurs du village mais aussi d'évacuer toute la production solaire de manière efficace, tout en anticipant une connexion au réseau national. Ce dimensionnement optimise ainsi la flexibilité, la durabilité et la rentabilité du système, tout en restant compatible avec les perspectives de croissance de la consommation locale et les politiques énergétiques du pays. La figure 27 montre le tracé la ligne HTA et le choix de l'emplacement de la mini centrale PV (178,2 kWc).

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO



Figure 28 : Tracé de l'extension de la ligne HTA

VIII.2.1. Calcul du nombre de cantons

Le dimensionnement des cantons a été réalisé en tenant compte de la longueur totale de la ligne et de l'intervalle recommandé entre les équipements (5 km en HTA). Aussi, la ligne HTA est équipée d'interrupteurs automatiques de coupure en charge (IACM) afin d'assurer la protection et la flexibilité du réseau.

Longueur de la ligne HTA : 865 m ; Intervalle standard entre IACM : 5000 m [15]

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{\text{Longueur totale de la ligne (m)}}{\text{Intervalle entre équipements (m)}} \quad (14)$$

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{865}{5000} = 0.17 \approx 1 \text{ canton}$$

La ligne HTA ne nécessite qu'un seul canton étant donné la faible longueur de la ligne.

VIII.2.2. Calcul du nombre de poteaux

Les poteaux servent à supporter les câbles HTA et BT, leur espacement dépend des conditions mécaniques et du type de terrain. Pour la ligne HTA, nous avons considéré une portée moyenne de 50 m entre deux poteaux, adaptée à un terrain rural relativement plat. En BT, les portées ont été ajustées selon les longueurs mesurées des départs.

Longueur totale HTA : 865 m

Portée moyenne HTA : 50 m

$$\text{Nombre de poteaux} = \frac{\text{Longueur totale HTA (m)}}{\text{Portée moyenne (m)}} + 1 \quad (15)$$

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

$$\text{Nombre de cantons} = \frac{865}{50} + 1 = 17,3 \approx 18 \text{ Poteaux}$$

VIII.2.3. Le type de support

Les supports choisis seront en Béton. Ils répondront aux spécifications techniques prévues par la norme NFC 67-200. En effet, selon celle-ci, on peut catégoriser les supports BT et HTA de la façon suivante.

Tableau 18: catégorisation des supports en BT et HTA selon la norme NFC 67-200

Catégorie	BT	HTA	HTA
Classe	A	A	B
Hauteur (m)	9 et 10	12,13,14	12,13,14
Effort en tête (daN)	150-300-400-650	400-650	1250-1600-2000 &

Pour cette étude nous opterons pour des supports de 12 m et d'effort de tête de 650 pour les supports de Fixation et 1250 pour les autres. Enfin, le support qui portera l'IACM sera de 1600 daN [16].

Le tableau suivant résume les informations sur les différents types de poteau sur la ligne HTA avec leur nombre.

Tableau 19 : Nombre et type de support HTA

Type de poteau	Nombre	Classe	Hauteur (m)	Effort en tête (daN)
Poteaux d'alignement	14	A	12	400
Poteaux d'effort (avec IACM)	2	B	12	800
Poteaux de départ (avec transfo élévateur)	1	B	12	1250
Poteaux de fin de ligne (avec transfo abaisseur)	1	B	12	1250

VIII.2.4. Types d'armements

Nous optons pour les nappes horizontales car elles permettent un accès facile aux conducteurs pour l'installation et la maintenance. Ce type d'armement est plus simple et moins coûteux à installer.

VIII.3. Calcul de la ligne BT

Pour la partie BT, nous avons opté pour une configuration de distribution divisée en deux zones distinctes. Chaque transformateur abaisseur dessert une zone spécifique, avec trois départs principaux par transformateur. Les deux transformateurs sont identiques de types abaisseurs

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

20kV/400V 100 kVA. Ce choix technique, bien que nécessitant l'installation de trois transformateurs, s'avère avantageux en termes de performance du réseau.

Initialement, nous avons envisagé de n'utiliser que deux transformateurs pour couvrir l'ensemble des villages, mais les calculs ont révélé des chutes de tension trop élevées dans cette configuration, rendant cette solution non conforme aux exigences techniques et normatives. La configuration choisie permet ainsi de garantir une meilleure qualité de distribution, malgré un coût d'investissement légèrement plus élevé.

VIII.3.1. Hypothèses de dimensionnement

En l'absence de données précises issues de l'enquête menée par l'AT2ER concernant la délimitation des deux villages ainsi que les niveaux de puissance spécifiques pour chaque localité, le dimensionnement des départs BT a été réalisé sur la base de certaines hypothèses. Ces dernières tiennent compte de la configuration spatiale et de la répartition des ménages dans chaque zone (voir **Figure 29: Réseaux BT alimentant les deux villages**).

Pour la zone alimentée par le premier transformateur abaisseur (Transfo 1), la puissance disponible a été répartie comme suit : 40 % pour le départ Transfo 1 – support P2, soit 40 kW ; 40 % pour le départ Transfo 1 - support P1, soit également 40 kW ; et 20 % pour le départ Transfo 1 - support P3, soit 20 kW. Une répartition identique a été appliquée pour la zone alimentée par le deuxième transformateur abaisseur (Transfo 2), avec 40 % pour le départ Transfo 2 - support P2 (40 kW), 40 % pour le départ Transfo 2 - support P1 (40 kW) et 20 % pour le départ Transfo 2 - support P3 (20 kW).

Ces pourcentages (40 %, 40 %, 20 %) ont été établis sur la base de la configuration géographique et de la distribution des ménages, afin d'assurer une couverture équilibrée des besoins énergétiques dans chaque zone. Cette approche garantit un réseau BT robuste et flexible, tout en respectant les contraintes techniques des transformateurs et des départs. Elle offre également une marge d'adaptabilité lors de la mise en œuvre ou de futures extensions, permettant ainsi une alimentation fiable et durable pour toutes les localités concernées.

La figure 28 montre les lignes BT qui desservent les deux zones.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

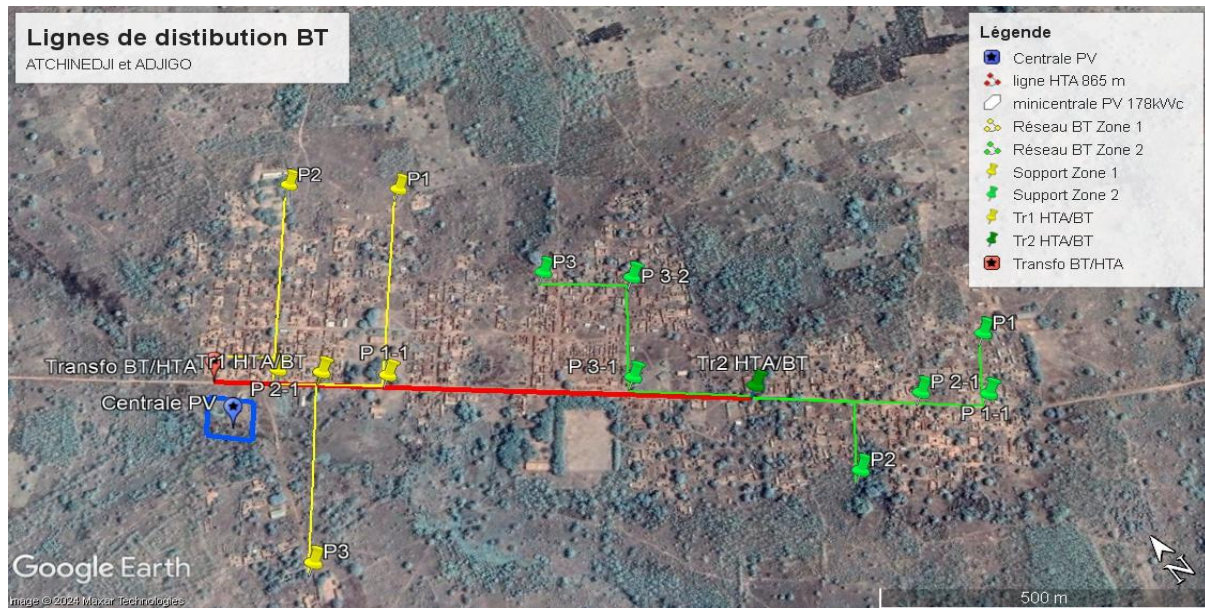


Figure 29: Réseaux BT alimentant les deux villages

VIII.4. Dispositifs de protection

➤ IACM

Pour notre réseau HTA, nous aurons besoin de **3 interrupteurs automatiques de court-circuit et de charge (IACM)** pour protéger chaque phase de notre système. Chacun de ces IACM devra être dimensionné pour supporter un courant nominal de **6,415 A** et être capable de couper un courant de court-circuit de **144,338 kA**. Nous avons choisi des **IACM de type I**, qui possèdent un pouvoir de coupure en charge de **50 A** et un courant nominal de **100 A**, pour garantir une protection optimale et une manœuvre facile dans notre réseau.

➤ Parafoudre

Pour la protection de notre réseau HTA contre les surtensions, nous avons choisi d'installer **trois jeux de parafoudres**. Ces parafoudres seront spécifiquement destinés à protéger les **trois transformateurs** de notre système. Chaque jeu se composera de **trois parafoudres de calibre 20 kA**, chacun conçu pour supporter des courants de court-circuit importants et dissiper efficacement les surtensions.

Le choix de ces parafoudres se base sur le **niveau kéraunique** de la zone, situé entre **60 et 100**. Ce niveau indique un risque élevé de foudroiement, ce qui justifie l'installation de parafoudres de haute capacité. Ces dispositifs permettront d'assurer une protection optimale des équipements et de maintenir la sécurité et la performance de notre réseau.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VIII.4.1. Choix et Configuration des Cellules de Protection

Les cellules de protection sont essentielles pour garantir la sécurité des équipements et des usagers, en permettant de localiser rapidement les défauts et en assurant la continuité du service tout en protégeant le réseau et les installations contre les risques électriques. Ces cellules sont intégrées tant au niveau du poste HTA que des transformateurs HTA/BT, selon une configuration bien définie pour chaque étape de la distribution de l'énergie.

a. Poste HTA

Le poste HTA joue un rôle clé dans la protection globale du système de distribution. Il est équipé des cellules suivantes :

- **Cellule d'arrivée HTA :**

Cette cellule reçoit l'énergie produite par la centrale PV ou, dans le futur, l'énergie provenant du réseau national. Elle permet d'isoler le poste de livraison en cas de maintenance ou de défaut, garantissant ainsi une gestion optimale du réseau.

- **Modèle retenu :** Cellule **Schneider Electric RM6** avec disjoncteur à huile ou SF6. Ce modèle est adapté aux réseaux HTA, offrant une protection contre les courts-circuits et surcharges. Il dispose également d'un dispositif de coupure à distance pour les maintenances.

- **Cellule départ HTA :**

Cette cellule protège la ligne HTA alimentant les transformateurs HTA/BT contre les risques de surcharges et de courts-circuits.

- **Modèle retenu :** **ABB SAFE 36** : Ce disjoncteur à gaz SF6 est conçu pour les protections HTA et est capable de gérer les courants de court-circuit élevés avec une grande fiabilité. Il est également équipé d'un système de contrôle de protection et de mesure à distance.
- **Cellule de mesure :** La cellule de mesure assure la surveillance en temps réel des grandeurs électriques telles que les tensions, les courants et la puissance active et réactive. Elle permet une gestion proactive du réseau et une détection rapide des anomalies.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

- **Modèle retenu : Schneider Electric CM2000** : Il offre des mesures en temps réel des tensions, courants et puissances dans un format numérique. Il est également compatible avec les systèmes SCADA pour le suivi à distance.
- **Cellule de réserve :**

Une cellule de réserve est prévue pour l'extension future du réseau. Cette cellule permettra la connexion éventuelle au réseau national ou l'ajout de nouveaux départs dans le futur, en fonction des besoins d'extension du réseau d'alimentation des villages.

- **Modèle retenu : Siemens 8DJH 12.** Ce modèle est conçu pour des applications de réserve et peut facilement être intégré dans un réseau existant avec une option de câblage flexible pour une extension rapide.

b. Transformateurs HTA/BT

Les transformateurs HTA/BT, qui assurent l'abaissement de la tension de la HTA vers la BT pour alimenter les consommateurs, sont également protégés par des cellules de protection, tant du côté HTA que BT.

- **Cellule HTA en amont du transformateur :**

Chaque transformateur est équipé d'une cellule de protection HTA située en amont. Elle protège le transformateur contre les surcharges et les défauts provenant de la ligne HTA.

- **Modèle retenu : Schneider Electric Masterpact MTZ.** Ce modèle est un disjoncteur à haute capacité, adapté à la protection de transformateurs HTA contre les défauts et courts-circuits. Il offre des réglages de protection avancés et une surveillance à distance pour une gestion proactive.
- **Cellules départ BT (P1, P2, P3) :**

Côté BT, chaque transformateur est équipé de cellules départ pour les différentes lignes de distribution (P1, P2, P3) alimentant les consommateurs. Ces cellules protègent les départs contre les courts-circuits et les surcharges, selon les puissances des lignes. Le dimensionnement des disjoncteurs de ces cellules dépend des puissances des lignes de distribution pour chaque départ. Le tableau 18 résume les résultats obtenus.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Tableau 20: Calcul des courants nominaux des départs BT des deux Zones

Zone 1			
Départs	Cos phi	Puissance W	I (A)
Tr1-P1	0,8	40000	72,17
Tr1-P2	0,8	40000	72,17
Tr1-P3	0,8	20000	35,99
Zone 2			
Tr2-P1	0,8	40000	72,17
Tr2-P2	0,8	40000	72,17
Tr2-P3	0,8	20000	36,08

- Modèles retenus :
 - Pour les départs Tr1-P1, Tr1-P2, Tr2-P1 et Tr2-P2 (72,17 A) : **Disjoncteurs Schneider Electric Compact NSX 100 A**. Ces modèles sont adaptés aux départs BT de forte puissance, avec un réglage du seuil de déclenchement en fonction des courants de court-circuit et des courants de surcharge.
 - Pour les départs Tr1-P3 et Tr2-P3 (35,99 A et 36,08 A) : **Disjoncteurs Schneider Electric Compact NSX 50 A**. Ces disjoncteurs sont adaptés pour les départs de plus faible puissance, offrant une protection contre les courts-circuits et les surcharges tout en permettant une utilisation optimale de la capacité du transformateur.

c. Normes et Sélection des Equipements

Le choix des équipements de protection (cellules, disjoncteurs, etc.) suit les normes en vigueur, en particulier la **NF C 15-100**, qui régit les installations électriques en basse tension (BT). Cette norme assure la sécurité des installations, en spécifiant les critères de protection contre les courts-circuits et les surcharges, ainsi que les exigences de raccordement et de gestion des courants de défaut.

La norme **IEC 60947** relative aux disjoncteurs est également respectée pour garantir la fiabilité des équipements dans les environnements industriels et résidentiels. Elle prend en compte les courants de court-circuit, les caractéristiques de déclenchement et la capacité des disjoncteurs à protéger efficacement les installations contre les risques électriques.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

VIII.4.2. Conclusion partielle

Les cellules de protection dans le poste HTA et au niveau des transformateurs HTA/BT sont cruciales pour assurer la sécurité et la fiabilité du système d'alimentation des villages d'Atchinedji et Adjigo. Ces cellules permettent non seulement de protéger les équipements électriques contre les défauts et surcharges, mais aussi de garantir une gestion optimisée de l'énergie distribuée. L'intégration de cellules de mesure pour le suivi en temps réel des grandeurs électriques complète cette protection, tout en offrant la possibilité d'adapter l'installation aux besoins futurs d'extension ou de raccordement au réseau national.

IX. CALCULS ECONOMIQUES DU MINI-RESEAU HIBRIDE

L'étude économique permet d'évaluer la viabilité financière et la rentabilité du mini-réseau hybride prévu pour l'électrification des localités concernées. Cette analyse prend en compte les coûts d'investissement initiaux (CAPEX), les frais d'exploitation et de maintenance (OPEX), ainsi que les principaux indicateurs financiers tels que le LCOE (*Levelized Cost of Energy*) et le temps de retour sur investissement (TRI).

IX.1. Estimations des Coûts

Le coût total du projet s'élève à **404 260 580 francs CFA (avec la TVA)**. Ce montant est réparti comme suit :

- **Coût d'Investissement Initial (CAPEX) :** :

Le **CAPEX** correspond à la construction de la centrale solaire photovoltaïque et de la ligne HTA/BT (ne prend pas en compte la TVA). Il est estimé à :

- 100 510 630 francs CFA pour la centrale photovoltaïque,
- 119 271 112 francs CFA pour la ligne HTA/BT.
- Total CAPEX : 219 781 742 francs CFA.

- **Frais d'Exploitation et de Maintenance (OPEX) :**

Les charges d'exploitation et de maintenance sont calculées sur une **durée de vie du projet estimée à 25 ans** et s'élèvent à : 144 918 125 francs CFA. (Voir les détails en Annexe 11 : Calculs économiques et détails de l'OPEX).

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

IX.2. Indicateurs Financiers Clés

Les calculs économiques réalisés permettent d'évaluer la rentabilité et la performance du projet.

Les principaux résultats obtenus sont :

- **LCOE (Coût actualisé de l'énergie) :**

Le LCOE a été calculé avec la formule suivante :

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (16)$$

Avec :

- C_t : Les coûts totaux
- E_t : Production annuelle totale
- r : Taux d'actualisation
- n : la durée de vie du système

Le **LCOE** est de **45,36 francs CFA/kWh**, calculé avec un **taux d'actualisation de 6 %**.

Ce paramètre représente le coût moyen de production d'un kWh d'électricité sur la durée de vie du projet (25 ans).

- **Temps de Retour sur Investissement (TRI) :**

Le **TRI** correspond à la période nécessaire pour amortir les investissements réalisés.

Après calcul, il est déterminé à 13,15 ans, soit : **13 ans, 1 mois et 24 jours**.

IX.3. Interprétation des Résultats

Les résultats obtenus permettent de tirer plusieurs conclusions :

- **LCOE compétitif** : Avec un coût moyen de **45,36 francs CFA/kWh**, le projet assure une production d'énergie économique et accessible.
- **Retour sur investissement raisonnable** : Une période d'amortissement de **13 ans et 2 mois approximativement** démontre que le projet est rentable à moyen terme, tout en tenant compte des charges d'exploitation.

Ces indicateurs attestent de la faisabilité économique et de la durabilité financière du mini-réseau hybride, ce qui en fait une solution viable pour l'électrification des localités concernées.

Conclusion partielle

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

L'analyse économique du projet de mini-réseau hybride révèle une structure financière équilibrée et adaptée aux besoins locaux. Le LCOE et le TRI obtenus montrent que l'investissement réalisé offre une solution énergétique rentable, durable et adaptée aux contraintes financières des zones rurales.

Ce projet répond ainsi aux objectifs d'électrification tout en optimisant les coûts d'investissement et de fonctionnement sur le long terme.

X. NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL

L'intégration des dimensions environnementales et sociales est un enjeu crucial pour assurer la durabilité et l'acceptabilité du projet d'électrification des localités d'Atchinedji et Adjigo. Cette section présente une étude succincte des impacts environnementaux et sociaux, ainsi que les mesures envisagées pour minimiser ces impacts tout en optimisant les retombées positives. L'objectif est de s'assurer que le projet respecte les normes environnementales et sociales en vigueur au Togo, tout en garantissant la sécurité des populations et des travailleurs.

X.1. Rappel du cadre législatif régissant le projet

Le projet est régi par un ensemble de textes législatifs et réglementaires nationaux et internationaux, notamment :

Texte ou norme	Description
Loi n°2018-010	Promotion de la production d'électricité à partir de sources renouvelables.
Décret n°2008-082/PR	Normes environnementales pour les projets d'infrastructure.
Conventions internationales	Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants.
Cadre de gestion UEMOA	CGES applicable aux projets financés par l'UEMOA.

Ces textes fixent les obligations liées à l'évaluation des impacts, à la protection des ressources naturelles et à la prévention des risques environnementaux.

X.2. Rappel des composantes et phases du projet

Le projet comporte plusieurs composantes, déployées en trois grandes phases :

Phase	Activités principales
-------	-----------------------

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

Phase de préparation	Délimitation des sites, nettoyage, et terrassement.
Phase de construction	Installation des panneaux PV, réseau HTA/BT, postes de distribution.
Phase d'exploitation	Suivi, entretien des équipements, et formation des agents locaux.

X.3. Identification et évaluation des impacts

Les impacts liés à la mise en œuvre du projet peuvent être classés en trois catégories : environnementaux, sociaux et sanitaires.

➤ Impacts environnementaux

Phase	Impact	Description	Mesures proposées
Préparation	Perturbation des sols et de la végétation	Déboisement et nivellement des sites.	Reboisement post-projet et stabilisation des sols.
Construction	Production de déchets solides (emballages, résidus) et liquides (huiles usagées).	Accumulation de déchets non biodégradables et risques de pollution des sols et nappes phréatiques.	Mise en place de zones de tri et élimination conforme des déchets.
Exploitation	Risque de contamination des sols par les fuites d'huile des équipements.	Fuites possibles des groupes électrogènes ou batteries.	Entretien régulier et gestion des huiles usagées.
Construction et exploitation	Pollution sonore et atmosphérique.	Générée par les machines de construction, véhicules et équipements diesel.	Limitation des travaux à des horaires spécifiques ; entretien des équipements pour réduire les émissions.

➤ Impacts sociaux

Phase	Impact	Description	Mesures proposées
Préparation	Déplacements temporaires ou permanents.	Libération des zones d'installation, affectant potentiellement les habitations ou activités agricoles.	Compensation financière ou relocalisation des personnes impactées.
Construction	Opportunités d'emploi local.	Création d'emplois temporaires pour la main-d'œuvre locale, notamment non qualifiée.	Priorité donnée aux habitants des localités concernées.

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

Exploitation	Amélioration des conditions de vie grâce à l'accès à une électricité fiable.	Soutien à l'éducation, la santé, les activités économiques, et la réduction des inégalités énergétiques.	Formation pour maximiser les retombées socio-économiques.
--------------	------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------

➤ **Impacts sanitaires**

Phase	Impact	Description	Mesures proposées
Construction	Risques d'accidents sur le chantier.	Liés à l'utilisation de machines lourdes et à la circulation sur les sites.	Mise à disposition des équipements de protection individuelle (EPI) ; sensibilisation des travailleurs.
Construction et exploitation	Maladies respiratoires dues à la poussière et aux fumées.	Générées par les travaux de terrassement et les machines thermiques.	Arrosage des sols pour limiter la poussière ; entretien des machines pour réduire les émissions.

X.4. Plan de Gestion Environnemental et Social (PGES)

Le PGES propose des mesures concrètes pour prévenir, atténuer ou compenser les impacts identifiés. Les principaux plans inclus sont :

Volet	Objectifs	Actions
Plan de gestion des déchets	Minimiser les déchets produits, promouvoir le recyclage et éliminer correctement les substances dangereuses.	<ul style="list-style-type: none"> - Installation de bacs de tri (déchets recyclables, biodégradables, non recyclables). - Collecte périodique des déchets et élimination dans des centres agréés. - Gestion spécifique des huiles usagées pour éviter toute contamination des sols.
Plan d'hygiène, santé et sécurité (PHSS)	Garantir la sécurité des travailleurs et prévenir les accidents et maladies professionnelles.	<ul style="list-style-type: none"> - Formation des travailleurs sur les bonnes pratiques de sécurité. - Distribution des EPI (casques, gants, masques, chaussures de sécurité). - Mise en place d'une infirmerie mobile sur le chantier, équipée pour les premiers secours.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Plan de gestion des relations communautaires	Favoriser l'acceptation sociale du projet et renforcer les relations avec les communautés locales.	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation de réunions d'information pour expliquer les objectifs et impacts du projet. - Création d'un comité de suivi communautaire pour gérer les doléances et les attentes. - Mise en place d'une ligne téléphonique dédiée pour recevoir et traiter les plaintes.
Plan de restauration des sites	Réhabiliter les zones perturbées par les activités du projet.	<ul style="list-style-type: none"> - Reboisement des zones déboisées avec des espèces locales. - Stabilisation des sols affectés par les travaux pour prévenir l'érosion. - Démantèlement des installations temporaires et nettoyage des sites après la phase de construction.

Conclusion partielle

L'étude d'impact environnemental et social, ainsi que la mise en place du PGES, démontrent la volonté du projet d'électrification de répondre aux besoins énergétiques des localités tout en préservant l'environnement et en favorisant le développement socio-économique local. Les mesures prévues garantissent une réduction significative des impacts négatifs et une maximisation des bénéfices pour les populations concernées.

CONCLUSION

Les simulations réalisées dans cette étude ont permis de valider le dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque conçu pour répondre aux besoins énergétiques des villages d'Atchinedji et d'Adjigo, tout en garantissant un équilibre optimal entre production et consommation énergétique. Elles ont également mis en lumière des périodes critiques de fonctionnement, qui justifient l'intégration d'un groupe électrogène en tant que source d'appoint pour maintenir une alimentation continue, particulièrement pendant les mois de faible irradiation.

Afin de déterminer la puissance optimale du champ photovoltaïque (PV) à installer, une approche itérative a été adoptée. Une première simulation a été réalisée en se basant sur l'irradiation mensuelle la plus faible de l'année. Cette hypothèse de départ a conduit à la sélection d'un champ PV d'une puissance de 237,6 kWc. Cependant, les simulations ont révélé que cette configuration générerait une production énergétique nettement excédentaire par rapport à la demande réelle, notamment pendant les huit mois de forte irradiation. Ces excédents, bien qu'indicateurs de la capacité du système à répondre aux besoins, ont également entraîné des pertes énergétiques significatives, rendant cette configuration sous-optimale.

En analysant la répartition des irradiances mensuelles sur une période de sept ans, deux catégories de mois ont été identifiées :

- une première catégorie constituée de huit mois, caractérisés par une irradiation nettement supérieure à la moyenne annuelle, avec des pics de production ;
- une deuxième catégorie regroupant quatre mois d'irradiation inférieure à la moyenne, correspondant à des périodes de déficit énergétique.

Sur cette base, un second dimensionnement a été réalisé, cette fois en s'appuyant sur l'irradiation moyenne annuelle. Cette méthodologie a permis d'obtenir une configuration plus équilibrée, réduisant significativement les pertes énergétiques tout en répondant aux besoins des deux catégories de mois.

La configuration finale offre une répartition optimisée de l'énergie produite :

- 59 % de la production totale est directement utilisée pour satisfaire les besoins diurnes ;
- 27 % servent à recharger les batteries pour la consommation nocturne ;
- 14 % de l'énergie produite restent encore inutilisées, principalement pendant les mois de forte irradiation.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

L'intervention du groupe électrogène est limitée à seulement 5 % sur l'année, correspondant aux quatre mois de faible irradiation. Ce faible taux de pénétration réduit considérablement les coûts opérationnels liés au carburant, tout en minimisant l'impact environnemental des émissions associées.

La méthodologie adoptée, combinant des simulations sur PVsyst et une analyse statistique des données climatiques sur sept ans, démontre l'efficacité d'un dimensionnement basé sur l'irradiation moyenne annuelle. Ce choix permet d'optimiser à la fois la production et la consommation, en limitant les pertes énergétiques et en garantissant une alimentation continue. Ce compromis entre performance technique, économique et environnementale offre une solution durable et adaptée aux contextes ruraux des pays africains. Par ailleurs, l'analyse met en évidence la nécessité de valoriser les excédents énergétiques produits durant les mois de forte irradiation, notamment par l'intégration de charges additionnelles (comme le pompage d'eau ou la création de micro-industries locales) ou par la mise en œuvre de dispositifs de stockage de nouvelle génération.

Enfin, ce mémoire constitue une base méthodologique solide pour le dimensionnement des mini-réseaux hybrides en milieu rural, en tenant compte des particularités climatiques et des besoins spécifiques des populations. Il ouvre également la voie à des études futures visant à améliorer la gestion des surplus énergétiques et à maximiser l'impact socio-économique des systèmes solaires photovoltaïques dans les zones rurales.

XI. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages, articles et sites Web :

- [1] IEA, 2021 « People without access to electricity in sub-Saharan Africa, 2000-2021 – Charts – Data & Statistics » Consulté le : 14 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/people-without-access-to-electricity-in-sub-saharan-africa-2000-2021>
- [2] giz, 2024 « Electrification Rurale au Togo (ProEnergie) Appui à l'électrification adaptée au climat en tenant compte des aspects sociaux et économiques ». Consulté le : 5 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://www.giz.de/en/downloads/giz2024-fr-factsheet-proenergie-eu.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [3] Sustainable Energy Research Group (SERG), University of Southampton « 1. Kitonyoni, Kenya - Energy for Development Network ». Consulté le : 14 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://energyfordevelopment.net/current-projects/kitonyoni/>
- [4] Wikipedia. 24 octobre 2024, « Plateaux Region, Togo ». Consulté le : 23 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plateaux_Region,_Togo&oldid=1253167560
- [5] energypedia, 2014 « Mini-réseaux - energypedia ». Consulté le : 16 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : [https://energypedia-info.translate.google/wiki/Mini_Grids?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=rq#cite_note-Franz_et_al.2C_2014-5](https://energypedia.info.translate.google/wiki/Mini_Grids?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=rq#cite_note-Franz_et_al.2C_2014-5)
- [6] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », phdthesis, Université Pascal Paoli, 2011. Consulté le : 9 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00653412>
- [7] D. YAMEGUEU NGUEWO, « EXPERIMENTATION ET OPTIMISATION D'UN PROTOTYPE DE CENTRALE HYBRIDE SOLAIRE PV/DIESEL SANS BATTERIES DE STOCKAGE : VALIDATION DU CONCEPT « FLEXY ENERGY » ». Consulté le : 1 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1991
- [8] Abdou-Fataou TCHAGNAO, Université de Kara, Togo, Nimonka BAYALE, Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique, et (CEA), Ethiopie, 2021 « Déterminants de la dépense domestique de la consommation d'électricité des ménages au Togo ». 29 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/350471492_Determinants_de_la_depense_domestique_de_la_consommation_d%27electricite_des_menages_au_Togo?enrichId=rgreq-20f90295eb90a5fd44292f6f2cbce1a6-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM1MDQ3MTQ5MjtBUzoxMTQwODAxMjg3NTI0MzU0QDE2NDg5OTk2MzA4ODQ%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- [9] Harold COULOMBE, Chata MALE, avec la contribution de, et Akoly GENTRY et Kokou AMOUZOUVI, « PROFIL DE PAUVRETE 2006-2011 ». BEYOND PRODUCTIONS. [En ligne]. Disponible sur : https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/tg/3d6a1a698ab51f1472b807af44dad31b1560b02be5fe42d152ee872629caa064.pdf?utm_source=chatgpt.com

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

- [10] Giz, 2023 « RAPPORT D'ÉVALUATION 2022 LE NUMÉRIQUE AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.giz.de/en/downloads/giz2023-fr-rapport-%C3%A9valuation-2022.pdf>
- [11] AFREC, 2023 « UTILISATION DE L'ÉNERGIE PAR LES MÉNAGES EN AFRIQUE ». Juillet 2023. Consulté le : 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://au-afrec.org/sites/default/files/2023-10/Household%20energy%20use%20in%20Africa%20FR_0.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [12] M. D. P. PODA, 2024 « Nouvelle approche de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel ». 2iE.
- [13] MDPI, 2021 « Quantification of Losses in a Photovoltaic System: A Review ». Consulté le : 7 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2673-4591/11/1/35>
- [14] Goensol, 2024 « Coût et rentabilité d'une batterie de stockage solaire [2024] ». Consulté le : 5 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.goensol.com/installation-panneau-solaire/batterie-stockage-solaire/prix-batterie-photovoltaique>
- [15] Norme française 1996 « NF C 11-201 Réseaux électriques de distribution publique (2) », studylibfr.com. Consulté le : 25 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://studylibfr.com/doc/10025247/nf-c-11-201-reseaux-electriques-de-distribution-publique--2->
- [16] D. de la D. D. G. T. S. N. et C. T. SENELEC, 2024 « DOCTRINE DE CONSTRUCTION DES RESEAUX HTA ET BT ». Consulté le : 11 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.tesoro.es/sites/default/files/noticias-programa-conversion/201130_doctrinedeconstructiondesreseauxhtaetbt.pdf

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

XII. ANNEXES

Annexe 1 : Dimensionnement et simulation sur PVsyst avec l'irradiation moyenne mensuelle minimale (4.015 kWh/m2/jr).....	70
Annexe 2 : Données d'irradiation des villages sur 5 ans	72
Annexe 3 : Fiches techniques des éléments composants du champ PV	74
Annexe 4 : Fiche technique BESS	76
Annexe 5 : Fiche technique des transformateurs	77
Annexe 6 : Groupe DIESEL PERKINS 20 kVA	79
Annexe 7 : Configuration générale du système hybride (synoptique)	80
Annexe 8 : Schéma électrique du système hybride : Câblage du champ solaire photovoltaïque	81
Annexe 9 : Dimensionnement des câbles et des équipements de protection dans le système hybride.....	82
Annexe 10 : Devis de l'installation	84
Annexe 11 : Calculs économiques et détails de l'OPEX	91
Annexe 12 : Organigramme de TECMON ENERGY	92

**ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO**

Annexe 1 : Dimensionnement et simulation sur PVsyst avec l'irradiation moyenne mensuelle minimale (4.015 kWh/m²/jr)

Figure 30 : Données d'entrées et autres informations

Données d'entrées			
Environnement	Irradiation min	kWh/m ² /jr	4,015
	Température max	°C	29,5
	Température min	°C	24,5
Modules PV	NOCT	°C	45
	Pc nom	Wc	550
	Kt_Pmp	%/°C	-0,35
	Kt_Voc	%/°C	-0,275
	NOCT	°C	45
	rend_STC	---	0,213
	Surface	m ²	2,524
	Rp	---	0,811
	Vmp	V	42,570
	Voc	V	51,440
	Imp	A	12,920
	Nombre		1,0
	Pnom	W	60000
	Pdc_max	W	---
	nbre MPPT	---	6
Onduleur	nbre entrées/MPPT	---	2
	Vmpp_min	V	150
	Vmpp_max	V	850
	Vmax_ond	V	1000
	I _{max} /entrée	A	18,00
	Ratio AC/DC min	---	0,95
	Ratio AC/DC max	---	1,05

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Tableau 21 : CONFIGURATION DU CHAMP PV

CONFIGURATION DU CHAMP PV							
Nombre ond choisi	--	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Choix module en série	--	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00
Choix module en parallèle	--	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nbre tot_mod/entrée	--	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00
Nbre tot_mod/ond	--	84,00	96,00	108,00	120,00	132,00	144,00
Nbre tot_mod total	--	336,00	384,00	432,00	480,00	528,00	576,00
Puissance champ PV/entrée	W	3 850,00	4 400,00	4 950,00	5 500,00	6 050,00	6 600,00
Puissance champ PV/ond	W	46 200,00	52 800,00	59 400,00	66 000,00	72 600,00	79 200,00
Puissance champ PV totale	W	184 800,00	211 200,00	237 600,00	264 000,00	290 400,00	316 800,00
Ratio DC/AC	--	0,77	0,88	0,99	1,10	1,21	1,32
Vmp_champ PV max/entrée	V	297,99	340,56	383,13	425,70	468,27	510,84
Surface du champ m ²	22,72	848,17	969,34	1 090,51	1 211,68	1 332,84	1 454,01

La Puissance finale du champ PV retenue est de 237,6 kWc.

La figure qui suit donne les résultats de simulation obtenus sur PVsyst.

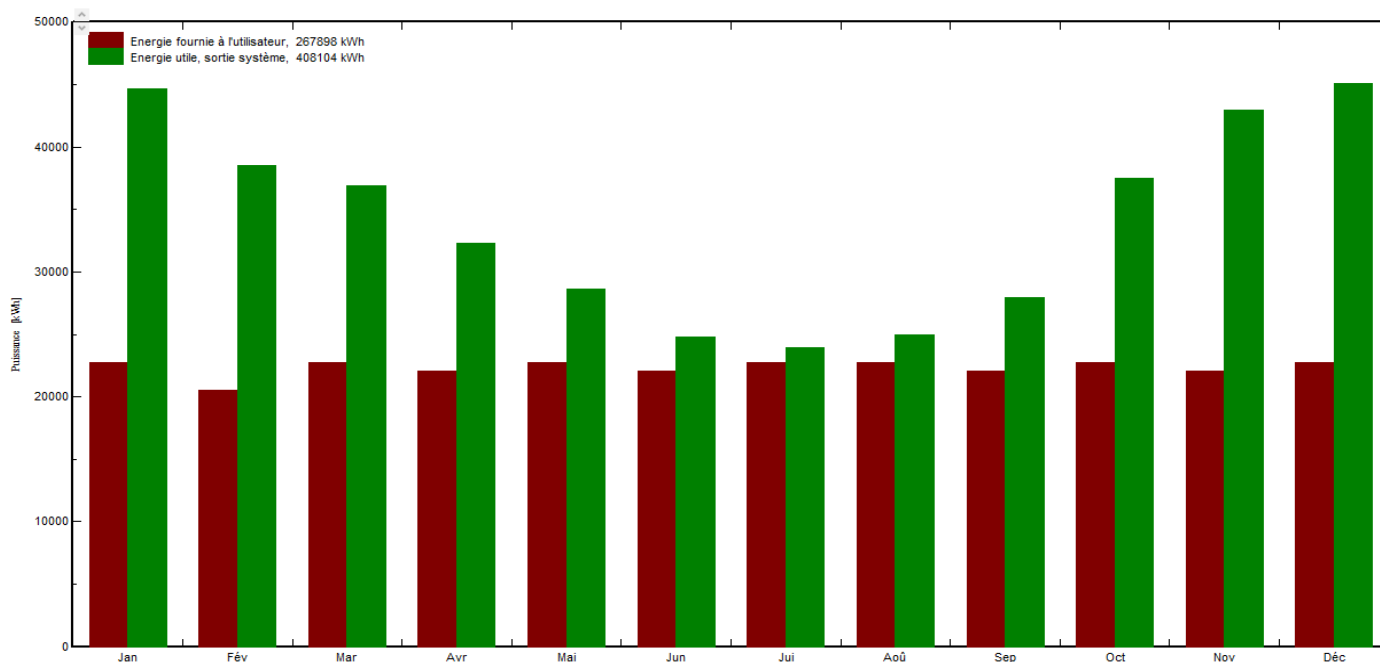


Figure 31 : production par rapport aux besoins énergétiques du village avec irradiation minimale

Avec une telle puissance, le système arrive largement à couvrir tous les besoins énergétiques des villages meme dans les quatre mois de faible irradiation. Par contre, cela pose un problème d'optimisation car il y a beaucoup de pertes de production sur les huit autres mois de l'année.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 2 : Données d'irradiation des villages sur 5 ans

Figure 32 : Données d'irradiation des villages sur 5 ans

Années	Mois	H(i) (kWh/m ² /mois)	Température	Irradiation (Kwh/m ² jour)
2015	Janvier	212,8	27,7	6,865
	Février	181,24	29	6,250
	Mars	187,36	28,5	6,044
	Avril	182	28,5	6,067
	Mai	171,29	27,6	5,525
	Juin	144,82	25,8	4,827
	Juillet	150,24	25,4	4,846
	Aout	136,24	24,9	4,395
	Septembre	153,68	25,3	5,123
	Octobre	184,79	25,9	5,961
	Novembre	203,73	27,3	6,791
	Décembre	214,08	26,4	6,906
2016	Janvier	210,44	27,8	6,788
	Février	201,29	29,6	6,941
	Mars	191,66	28,6	6,183
	Avril	182,08	28,5	6,069
	Mai	158,86	27,1	5,125
	Juin	131,09	25,4	4,370
	Juillet	141,65	24,8	4,569
	Aout	142,93	24,6	4,611
	Septembre	157,04	24,9	5,235
	Octobre	176,3	26,3	5,687
	Novembre	203,32	27,9	6,777
	Décembre	205,22	28,2	6,620
2017	Janvier	209,23	28,5	6,749
	Février	193,53	29,2	6,673
	Mars	202,72	29,6	6,539
	Avril	177,17	28,2	5,906
	Mai	166,54	27,3	5,372
	Juin	139,27	25,8	4,642
	Juillet	137,59	24,9	4,438
	Aout	133,6	24,6	4,310
	Septembre	134,09	25,3	4,470
	Octobre	199,93	26,4	6,449
	Novembre	199,09	27,2	6,636
	Décembre	199,09	27,8	6,422
2018	Janvier	214,08	27,9	6,906
	Février	182,64	29,2	6,298
	Mars	195,73	28,5	6,314

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

	Avril	181,47	27,8	6,049
	Mai	168,33	26,7	5,430
	Juin	148,97	25,4	4,966
	Juillet	140,15	24,9	4,521
	Aout	146,17	24,4	4,715
	Septembre	157,61	24,8	5,254
	Octobre	185,99	26	6,000
	Novembre	200,93	27,5	6,698
	Décembre	209,66	28	6,763
2019	Janvier	211,09	29	6,809
	Février	187,19	29,3	6,455
	Mars	197,27	29,3	6,364
	Avril	178,93	28,5	5,964
	Mai	159,53	27,4	5,146
	Juin	143,16	25,9	4,772
	Juillet	142,13	25,1	4,585
	Aout	156,12	25	5,036
	Septembre	147,13	25,2	4,904
	Octobre	150,77	24,9	4,864
	Novembre	195,08	27,5	6,503
	Décembre	209,46	28	6,757
2020	Janvier	211,45	27,9	6,821
	Février	206,71	29,5	7,128
	Mars	187,2	29,2	6,039
	Avril	180,23	28,5	6,008
	Mai	172,34	27,8	5,559
	Juin	146,31	25,9	4,877
	Juillet	124,46	24,5	4,015
	Aout	153,8	25	4,961
	Septembre	138,7	25	4,623
	Octobre	193,75	26,1	6,250
	Novembre	205,02	27,9	6,834
	Décembre	203,12	27,4	6,552

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 3 : Fiches techniques des éléments composants du champ PV

➤ Fiche technique onduleur

Technical Data

www.deyeinverter.com

Model	SUN-60K-SC02HP3 -EU-EM6		SUN-75K-SC02HP3 -EU-EM6		SUN-80K-SC02HP3 -EU-EM6	
Battery Input Data						
Battery Type	Lithium-ion					
Battery Voltage Range (V)	160-1000					
Max. Charging Current (A)	80+80					
Max. Discharging Current (A)	80+80					
Charging Strategy for Li-ion Battery	Self-adaption to BMS					
Number of Battery Input	2					
PV String Input Data						
Max. PV Access Power (W)	120000		150000		160000	
Max. PV Input Power (W)	96000		120000		128000	
Max. PV Input Voltage (V)	1000					
Start-up Voltage (V)	180					
MPPT Voltage Range (V)	150-850					
Rated PV Input Voltage (V)	650					
Max. Operating PV Input Current (A)	36+36+36+36+36					
Max. Input Short-Circuit Current (A)	54+54+54+54+54					
No. of MPP Trackers/ No. of Strings MPP Tracker	6/2+2+2+2+2					
AC Input/Output Data						
Rated AC Input/Output Active Power (W)	60000		75000		80000	
Max. AC Input/Output Apparent Power (VA)	66000		82500		88000	
Rated AC Input/Output Current (A)	91/87		113.7/108.7		121.3/115.9	
Max. AC Input/Output Current (A)	100/95.7		125/119.6		133.4/127.6	
Max. Continuous AC Passthrough (grid to load) (A)	200					
Peak Power (off-grid) (W)	1.5 times of rated power, 10s					
Power Factor Adjustment Range	0.8 leading to 0.8 lagging					
Rated Input/Output Voltage/Range (V)	220/380V, 230/400V 0.85Un-1.1Un					
Rated Input/Output Grid Frequency/Range(Hz)	50/45-55, 60/55-65					
Grid Connection Form	3L+N+PE					
Total Current Harmonic Distortion THDi	<3% (of nominal power)					
DC Injection Current	<0.5% In					
Efficiency						
Max. Efficiency	97.60%					
Euro Efficiency	97.0%					
MPPT Efficiency	>99%					
Equipment Protection						
Integrated	DC Polarity Reverse Connection Protection, AC Output Overcurrent Protection, Thermal Protection, AC Output Overvoltage Protection, AC Output Short Circuit Protection, DC Component Monitoring, Overvoltage Load Drop Protection, Ground Fault Current Monitoring, Arc Fault Circuit Interrupter (optional), Power Network Monitoring, Island Protection Monitoring, Earth Fault Detection, DC Input Switch, DC Terminal Insulation Impedance Monitoring, Residual Current (RCD) Detection, Surge protection level					
Surge Protection Level	TYPE II(DC), TYPE II(AC)					
Interface						
Communication Interface	RS485/RS232/CAN					
Monitor Mode	GPRS/WIFI/Bluetooth/4G/LAN(optional)					
General Data						
Operating Temperature Range (°C)	-40 to +60°C, >45°C Derating					
Permissible Ambient Humidity	0-100%					
Permissible Altitude	3000m					
Noise (dB)	≤65					
Ingress Protection(IP) Rating	IP 65					
Inverter Topology	Non-Isolated					
Over Voltage Category	OVC II(DC), OVC III(AC)					
Cabinet Size (WxHxD mm)	606×927×314 (Excluding Connectors and Brackets)					
Weight (kg)	97.5					
Type of Cooling	Intelligent Air Cooling					
Warranty	5 Years/10 Years the Warranty Period Depends the Final Installation Site of Inverter, More Info Please Refer to Warranty Policy					
Grid Regulation	IEC 61727, IEC 62116, CEI 0-21, EN 50549, NRS 097, RD 140, UNE 217002, OVE-Richtlinie R25, G99, VDE-AR-N 4105					
Safety / EMC Standard	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2					

Deye

Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd.

Address: No. 26 South Yong Jiang Road, Daqi, Beilun, NingBo, Zhejiang, China. | Tel: +86 (0)574 86228841 | E-mail: market@deye.com.cn

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

➤ Module PV

AE MD-144 Series 530W-550W

MONO-CRYSTALLINE PV MODULES
HALF-CUT CELLS • MONO-FACIAL



Mechanical and design specification

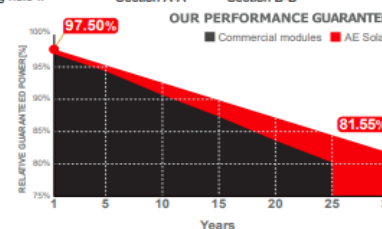
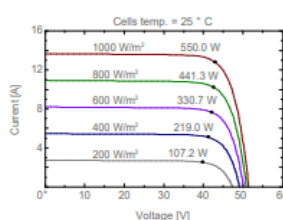
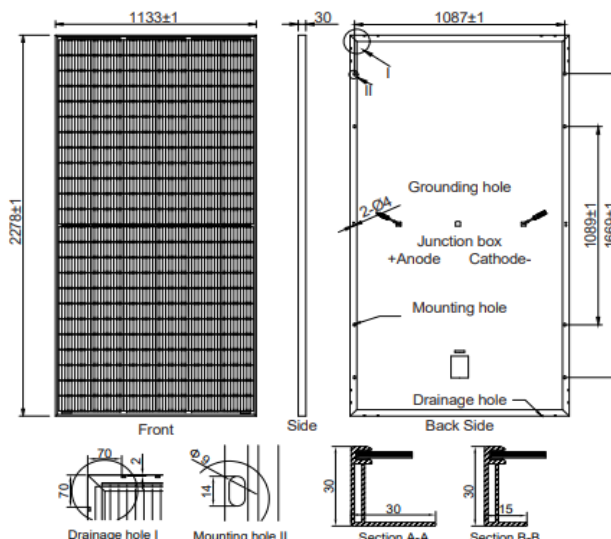
Cell type	Gallium-doped Mono c-Si PERC, Half-cut cells, 182 mm
No. of cells	144
Glass	3.2 mm, high transmission, AR coated, tempered
Encapsulation	EVA
Back cover	White backsheet
Junction box	IP68 rated, 3 Bypass Diodes
Frame	30 mm anodized Aluminium alloy
Cable	1 x 4 mm², 350 mm length or customized
Connectors	MC 4 / MC 4 compatible
Dimension	2278 mm x 1133 mm x 30 mm
Weight	26.5 kg
Hail resistance	Max. Ø 25 mm at 23 m/s
Wind load	2400 Pa/ 244 kg/ m²
Mechanical load	5400 Pa/ 550 kg/ m²

Packaging information

Packaging configuration	72 pcs / double pallet
Loading capacity	720 pcs / 40 HQ
Size / Pallet	2310 mm x 1140 mm x 2490 mm
Weight	1996 kg / double pallets

Temperature ratings

Operating temperature	(°C)	-40 to +85
Temp.coefficient of P_{max}	(%/°C)	-0.35
Temp.coefficient of V_{oc}	(%/°C)	-0.275
Temp.coefficient of I_{sc}	(%/°C)	0.045
Nom. operating temp. NOCT	(°C)	45 ± 2



Electrical specifications (STC*):		AE530MD-144	AE535MD-144	AE540MD-144	AE545MD-144	AE550MD-144
Nominal Max. Power	P_{max} (Wp)	530	535	540	545	550
Maximum operating voltage	V_{MPP} (V)	41.70	41.93	42.15	42.38	42.57
Maximum operating current	I_{MPP} (A)	12.71	12.76	12.81	12.86	12.92
Open-circuit voltage	V_{oc} (V)	49.65	49.78	49.90	50.01	51.44
Short-circuit current	I_{sc} (A)	13.47	13.52	13.57	13.62	13.67
Module efficiency	η (%)	20.53	20.73	20.92	21.12	21.31
Power tolerance	(W)	0~+5				
Maximum system Voltage	(V)	1500				
Maximum series fuse rating	(A)	25				

*STC: Standard test conditions (Irradiance 1000 W/m², Cell temperature 25°C and air mass of AM1.5)

Electrical specifications (NMOT*):		AE530MD-144	AE535MD-144	AE540MD-144	AE545MD-144	AE550MD-144
Nominal Max. Power	P_{max} (Wp)	400	403	407	410	414
Maximum operating voltage	V_{MPP} (V)	39.30	39.50	39.70	39.90	40.10
Maximum operating current	I_{MPP} (A)	10.17	10.21	10.25	10.29	10.34
Open-circuit voltage	V_{oc} (V)	47.00	47.20	47.40	47.60	47.80
Short-circuit current	I_{sc} (A)	10.78	10.82	10.86	10.90	10.94

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 4 : Fiche technique BESS

Model		BOS-G PRO			
Main Parameter					
Cell Chemistry		LiFePO ₄			
Module Energy (kWh)		5.12			
Module Nominal Voltage (V)		51.2			
Module Capacity (Ah)		100			
Battery Module Number		BOS-G25 PRO	BOS-G40 PRO	BOS-G60 PRO	BOS-G85 PRO
Battery Module Qty In Series (Optional)		5 (Min)	8	12	17 (Max)
System Nominal Voltage (V)		256	409.6	614.4	870.4
System Operating Voltage (V)		220~292	352~467.2	528~700.8	748~992.8
System Energy (kWh)		25.6	40.96	61.44	87.04
System Usable Energy (kWh) ¹		23.04	36.86	55.3	78.33
Rated DC Power		25.6	40.96	55.3	87.04
Charge/Discharge Current (A)	Recommend	50			
	Nominal	100			
	Peak Discharge (2 mins, 25°C)	125			
Working Temperature (°C)		Charge: 0~55/Discharge: -20~55			
Status Indicator		Yellow: Battery High Voltage Power On Red: Battery System Alarm			
Communication Port		CAN2.0/ RS485			
Humidity		5%~85%RH			
Altitude		≤3500m			
IP Rating of Enclosure		IP20			
Dimension (W/D/H,mm)		530*602*1629		530*602*2219	1060*602*1629
Weight Approximate (kg)		285	420	610	866
Installation Location		Rack Mounting			
Storage Temperature (°C)		0~35			
Recommend Depth of Discharge		90%			
Cycle Life		25±2°C,0.5C/0.5C, EOL70%≥6000			
Warranty ³		10 years			
Certification		CE/IEC62619 /VDE2510-50/ UN38.3			

1. DC Usable Energy, test conditions: 90% DOD, 0.3C charge & discharge at 25°C. System usable energy may vary due to system configuration parameters.
2. The current is affected by temperature and SOC.
3. The warranty is due whichever reached first of warranty period or life cycle power.
4. Made in China.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 5 : Fiche technique des transformateurs

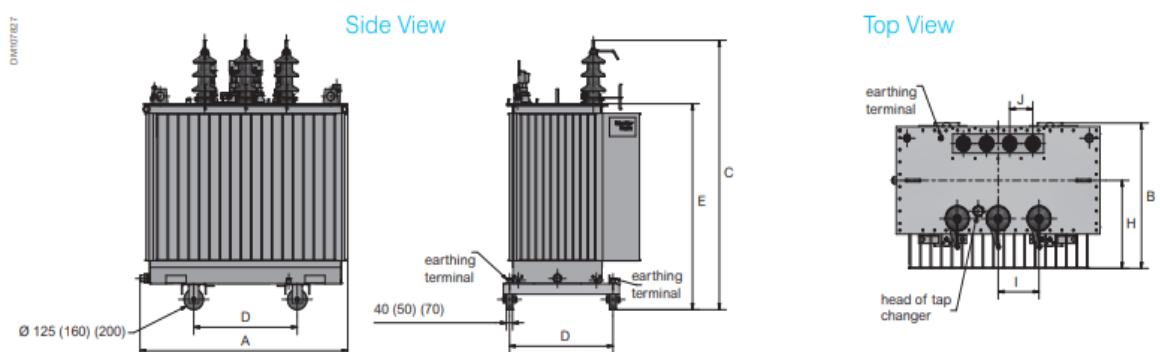
➤ Transformateur élévateur

Minera - Oil Distribution Transformer Up to 3150 kVA - 24 kV - 400V

Main electrical characteristics

Power kVA	50	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Primary voltage	20 kV														
Secondary voltage	400 V between phases (at no load)														
HV insulation level	24kV (125 / 50 kV)														
HV tapping range	+/- 2.5% and/or +/- 5%														
Temperature	Temperature rise 65 / 60 k														
Vector group	Dyn 11 (other vector groups upon request)														
No-load losses (Watts)	81	130	189	225	270	324	387	459	540	585	693	855	1080	1305	1575
Load Losses at 75°C (Watts)	750	1250	1750	2017	2350	2800	3250	3900	4600	6000	7600	9500	12000	15000	18500
Impedance voltage (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
Altitude maximum	1000 m														
Acoustic Level dB(A):															
Power L _{pa} (1m)	38	40	43	44	46	48	49	50	51	52	54	55	57	59	62

Dimensions and weights*



Rated power (kVA)		50	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Without enclosure IP00																
Length	A mm	880	960	1010	1060	1060	1165	1165	1261	1261	1390	1552	1517	1736	1936	2096
Width	B mm	638	711	707	750	750	800	800	867	867	955	1114	1102	1104	1234	1244
Height to bushings	C mm	1236	1353	1375	1430	1430	1537	1537	1667	1667	1730	1776	1885	1852	2050	2325
Roller distance	D mm	520	520	520	520	520	670	670	670	670	670	820	820	820	1070	1070
Height to cover	E mm	849	966	988	1044	1044	1150	1150	1280	1280	1343	1389	1498	1465	1663	1801
Distance between HV bushings	I mm	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265	265
Distance between LV bushings	J mm	105	105	105	105	150	150	150	150	150	150	150	150	155	155	220
Distance to middle of cover	H mm	388	438	437	440	440	482	482	527	527	577	557	551	552	617	622
Total weight	kg	580	870	960	1120	1260	1570	1790	2160	2420	3150	3810	4030	4440	5210	6480
Oil weight	kg	126	176	185	253	232	349	315	471	419	583	699	778	860	996	1159
Roller Dimension	mm	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 125	Fi 160	Fi 200	Fi 200
HV Bushings Type	Porcelain bushing															
LV Bushings Type	Porcelain bushing															

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

➤ Transformateur abaisseur

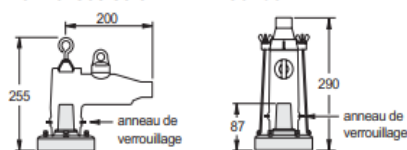
Transformateurs Minera abaisseurs • 15-15,5-17,5-20 kV • 400-410-690 V • EcoD

Caractéristiques techniques au 1 juillet 2015 selon EU 548/2014

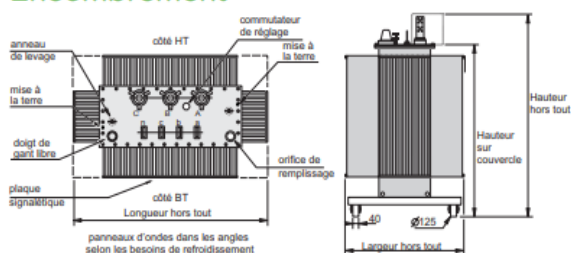
Puissance	kVA	100	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	
Type de pertes		A0Ak											
Pertes à vide	W	145	210	300	430	600	650	770	950	1 200	1 450	1 750	
Pertes en charge à 75°C	W	1 250	1 750	2 350	3 250	4 600	6 000	7 600	9 500	12 000	15 000	18 500	
Tension C/C	%	4					6						
Tolérance sur les pertes		Sans dépassement de pertes											
Type de fonctionnement		Abaisseur											
Type d'installation		Intérieure											
Traitement de surface		Anti corrosion de classe C3 durabilité moyenne, selon ISO 12944-2-6											
Tension Primaire	kV	15 - 15,5 - 17,5 - 20											
Tension Secondaire à vide	V	400 - 410 - 690											
Niveau d'isolement	kV	17,5 - 24											
Fréquence	Hz	50											
Prises de réglages	%	± 2,5 ; ± 5											
Couplage		Dyn11											
Altitude maxi	m	1 000											
Température ambiante maxi	°C	40											
Connexion HT		EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	EMB-250	
Connexion BT		Porce- laine	Porce- laine	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	Passe- Barres	
Puissance acoustique	dB(A)	41	44	47	50	52	53	55	56	58	60	63	
Pression acoustique à 1 m	dB(A)	33	36	37	39	42	43	45	45	46	48	51	
Courant à vide (valeur indicative)	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Courant d'enclenchement (valeurs indicatives)	le / In crête (HT)	9,0	8,5	9,5	9,5	9,0	6,5	6,5	7,0	7,5	7,0	7,0	
	constante de temps	sec	0,25	0,20	0,25	0,35	0,35	0,50	0,50	0,60	0,55	0,50	0,55
Rendement cosφ = 1	charge à 100 %	%	98,620	98,790	98,950	99,090	99,180	99,180	99,170	99,170	99,180	99,180	99,200
	charge à 75 %	%	98,290	98,490	98,690	98,860	98,980	98,970	98,960	98,970	98,980	98,980	99,000
Rendement cosφ = 0,8	charge à 100 %	%	98,880	99,010	99,140	99,250	99,330	99,330	99,330	99,330	99,340	99,350	99,360
	charge à 75 %	%	98,610	98,770	98,930	99,070	99,160	99,170	99,170	99,170	99,180	99,180	99,200
Dimensions hors tout (± 200 mm)	longueur	mm	1 040	1 120	1 230	1 320	1 390	1 530	1 770	1 790	1 920	2 090	2 170
	largeur	mm	630	750	820	860	920	990	920	980	990	1 000	1 170
	hauteur	mm	1 340	1 400	1 520	1 690	1 730	1 790	1 880	1 870	1 920	2 150	2 070
Hauteur sur couvercle (± 200 mm)	mm	950	1 010	1 130	1 300	1 340	1 400	1 490	1 480	1 530	1 760	1 680	
Masses (± 20 %)	totale	Kg	780	1 045	1 390	1 900	2 430	2 940	3 550	3 820	4 080	5 310	5 990
	huile	Kg	140	205	280	335	425	530	600	640	695	870	890
Volume du diélectrique	l	157	230	315	376	478	596	674	719	781	978	1 000	

Raccordements HTA

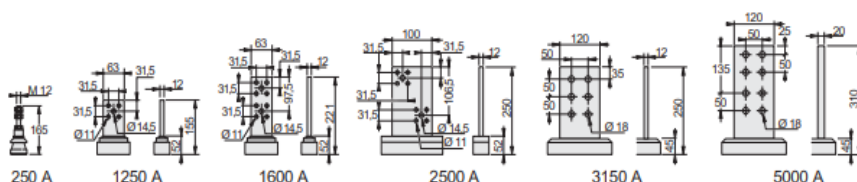
normalisés selon NF EN 50180



Encombrement



Raccordements BT



ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 6 : Groupe DIESEL PERKINS 20 kVA



GROUPE ELECTROGENE PERKINS 20KVA

Moteur : Perkins
Alternateur : Leroy Somer
Panneau de contrôle : DSE
Disjoncteur : ABB

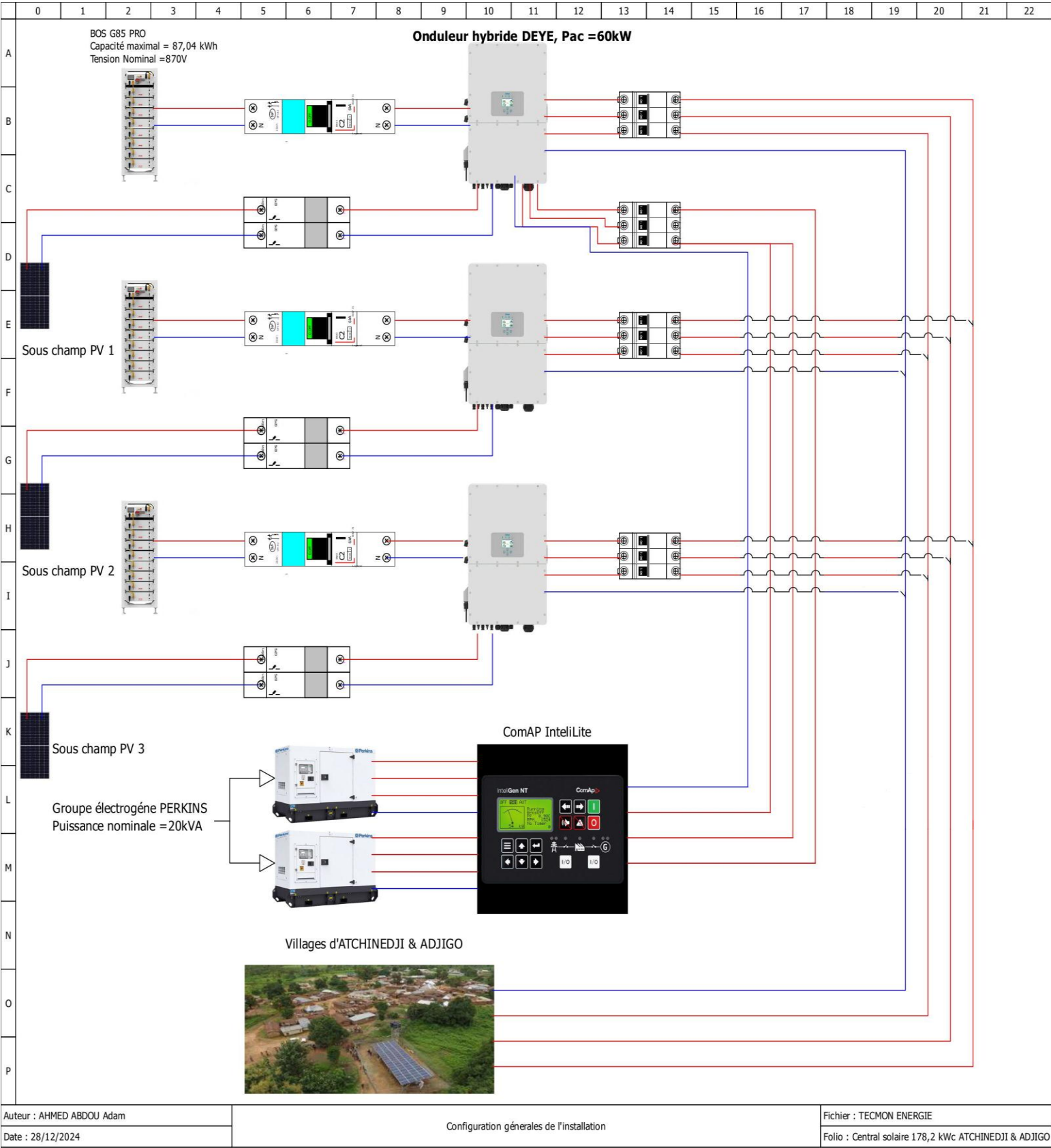
Modèle de groupe électrogène : JP20
– Puissance de sortie : 380-415 V, 3 ph, 50 Hz, 1500 rpm
– Prime : 20.0 kVA / 22.0 kW
– Standby : 16.0 kVA / 17.6 kW

Données techniques

- Marque et modèle du moteur : Perkins 404A-22G1
- Type de régulateur : Mécanique
- Nombre de cylindres et disposition des cylindres : 4 Vertical en ligne
- Alésage et course (mm) : 84 × 100
- Déplacement / Capacité cubique (litres) : 2.216
- Système d'induction : Aspiré naturellement
- cycle : 4 temps
- Système de combustion : Injection indirecte
- Rapport de compression : 23.3:1
- Rotation : Sens inverse des aiguilles d'une montre (vu du volant)
- Système de refroidissement : Refroidissement à l'eau
- Fréquence et vitesse du moteur : 50Hz & 1500rpm
- Prime / Standby
- Puissance brute du moteur kW (hp) : 18.7 (25.1) / 20.6 (27.6)
- Consommation de carburant @ 50% de charge (L/hr) : 2.9 / – @ 75% de charge (L/hr) : 4.0 / – @ 100% de charge (L/hr) : 5.3 / 6.1
- Capacité totale du système de lubrification (litres) : 10.6 / 10.6
- Capacité totale du liquide de refroidissement (radiateur compris) (litres) : 7.0 / 7.0
- Température d'échappement (°C) : 445 / 505
- Débit d'air de refroidissement du radiateur (Min) (m3/sec) : 0.49 / 0.49
- Débit d'air de combustion (m3/min) : 1.45 / 1.45
- Débit des gaz d'échappement (m3/min) : 3.64 / 3.94
- Capacité du réservoir de carburant (litres) : 51 / 51
- Longueur (cm) : 149
- Largeur (cm) : 52
- Hauteur (cm) : 118
- Poids (kg) (humide) : 533

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 7 : Configuration générale du système hybride (synoptique)



Annexe 8 : Schéma électrique du système hybride : Câblage du champ solaire photovoltaïque

Annexe 8 : Schéma électrique du système hybride : Câblage du champ solaire photovoltaïque



ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 9 : Dimensionnement des câbles et des équipements de protection dans le système hybride

Dimensionnement des câbles et des équipements de protection :

1. Sélection des câbles électriques

Deux catégories principales de câbles sont utilisées pour transporter l'énergie dans le système :

- Câbles en courant continu (DC), connectant les panneaux solaires à l'onduleur.
- Câbles en courant alternatif (AC), utilisés pour le transfert d'énergie en aval de l'onduleur, jusqu'au point d'injection.

1.1. Câblage en courant continu (DC)

Les sections de câbles DC ont été calculées en suivant les critères de chute de tension recommandés par la norme NF C 15-100. Pour garantir le respect de ces limites, la section minimale obtenue a été arrondie à la première section standard supérieure disponible sur le marché. Ainsi, une section de 6 mm² a été retenue pour cette partie du circuit.

Cette section garantit une chute de tension inférieure à 3 %, conformément aux exigences normatives.

1.2. Câblage en courant alternatif (AC)

1.2.1. Entre l'onduleur et le jeu de barre AC

- Courant en sortie d'onduleur : 100 A.
- Disjoncteur en protection : calibre 125 A.
- Section de câble nécessaire : 25 mm².

1.2.2. Entre le jeu de barre AC et le point d'injection

- Courant issu du coffret AC : 300 A.
- Disjoncteur requis : calibre 400 A.
- Section de câble adaptée : 150 mm².

2. Dispositifs de protection et de coupure

2.1. Protection en courant continu (DC)

2.1.1. Contre les surintensités

Pour chaque chaîne photovoltaïque, des fusibles ultra-rapides de type gPV ont été choisis en raison de leur faible coût et de leur capacité à limiter les pertes de tension, contrairement aux disjoncteurs en courant continu.

2.1.2. Contre les surtensions

Des parafoudres adaptés aux conditions locales protègent les équipements contre les surtensions transitoires. Étant donné le niveau élevé d'exposition aux impacts de foudre dans la région des

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE
DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET
D'ADJIGO AU TOGO

Plateaux (supérieur à 80 coups/km²/an), un parafoudre type II avec un courant nominal de décharge de 20 kA a été retenu.

2.2. Protection en courant alternatif (AC)

2.2.1. Contre les surtensions

Pour la partie AC, le parafoudre utilisé est également de type II, calibré pour une tension nominale de 400 V (tension de sortie de l'onduleur) et capable de supporter un courant de décharge de 20 kA.

2.2.2. Interrupteur sectionneur général

L'interrupteur sectionneur principal est dimensionné pour protéger les onduleurs lorsqu'ils fonctionnent en parallèle. Avec un courant maximal de 300 A en sortie, un interrupteur de calibre normalisé 400 A a été sélectionné pour fournir une marge de sécurité adéquate.

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 10 : Devis de l'installation

PROJET D'INSTALLATION DE LA MINI CENTRALE SOLAIRE							
No	Désignation des Prestations	Unité	Quantité	Prix Unitaire fournisseur	Marge	Prix Unitaire avec marge	Prix Total
A	Équipement Solaire						
1	Panneaux photovoltaïque AE MD 550Wc monocristallin - Garantie 25 ans	u	324	97 000	15%	111 550	36 142 200
2	Onduleur solaire hybrid Haute tension DEYE 60 kWh	u	3	3 200 000		3 680 000	11 040 000
3	Support de montage pour panneaux solaires	u	16	20 000		23 000	368 000
4	Batterie BESS DEYE OS-G85 PRO 87 kWh/870Vdc - >=6000cycles - Garantie 5ans	u	3	3 400 000		3 910 000	11 730 000
5	Câble H07V-K 10mm² noire	m	100	1 300		1 495	149 500
6	Câble H07V-K 10mm² rouge	m	100	1 300		1 495	149 500
7	Câble H07V-K 60mm² bleu	m	20	6 800		7 820	156 400
8	Câble H07V-K 60mm² rouge	m	20	6 800		7 820	156 400
9	Câble H07V-K 10mm² jaune-vert	m	30	1 300		1 495	44 850
10	Câble R2OV 2*6mm² rigide	m	30	2 250		2 588	77 625
11	Goulotte 100x45 INGELEC	u	4	9 000		10 350	41 400
12	Goulotte 60x45 INGELEC	u	5	5 000		5 750	28 750
13	Tube PVC 50	u	2	3 500		4 025	8 050
14	Coudes PVC 50	u	4	700		805	3 220
15	Collier colson	u	4	3 000		3 450	13 800
16	Cheville à vis	pqt	3	4 000		4 600	13 800
Total équipement solaire							60 123 495

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

B Équipement de Protection DC							
1	Parafoudre photovoltaïque DC 2P1000V/20-40KA	u	2	15 000	15%	17 250	34 500
2	Disjoncteur miniature 2 pôles 32A DC MCB	u	2	10 000		11 500	23 000
3	Sectionneur DC 32A/1000V IP65 étanche de déconnexion	u	2	40 000		46 000	92 000
4	Porte fusible et fusible 1000VDC, 20A, 33kA, 10*38	u	6	11 000		12 650	75 900
5	Protecteur de batterie type B,MCCB 150A-550 VDC	u	2	25 000		28 750	57 500
6	Connecteur MC4	Paires	16	2 000		2 300	36 800
7	Embouts de câble	u	3	12 000		13 800	41 400
8	Cosse de câble 35 mm²	u	16	1 000		1 150	18 400
9	Jeu de barre	u	2	15 000		17 250	34 500
10	Méga fuse 2 voies/58V 300A	u	2	75 000		86 250	172 500
11	Coffret électrique étanche pour extérieur IP656-08modules	u	3	3 500		4 025	12 075
Total équipement de protection DC							598 575
C Équipement de Protection AC							
1	Parafoudre photovoltaïque AC 2P/1000V/20-40KA	u	2	50 000	15%	57 500	115 000
2	Disjoncteur courbe C-1P+N 2x125A 400A AC MCB	u	2	8 000		9 200	18 400
3	Porte fusible et fusibles 1000Vdc - 40A	u	2	8 000		9 200	18 400
4	Inter différentiel 300mA/40A -1P+N 6KA	u	1	17 500		20 125	20 125
5	Stabilisateur de tension 40A-230V	u	1	80 000		92 000	92 000
6	Coffret métallique de 24 modules	u	1	7 500		8 625	8 625
7	Disjoncteur moteur 40A/230V GV2	u	1	50 000		57 500	57 500
8	Relais temporisé modulaire 240V	u	1	22 500		25 875	25 875
9	Relais de control de tension 200-240V	u	1	45 000		51 750	51 750
10	Contacteur modulaire magnétique 2P63	u	1	30 000		34 500	34 500
11	Voyant lumineux numérique	u	3	2 500		2 875	8 625
12	Bornier de raccordement	u	20	500		575	11 500
Total équipement de protection AC							462 300

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

D	Mise à la Terre et Protection						
1	Piquet de terre	u	2	4 000	15%	4 600	9 200
2	Barrette de coupure	u	1	2 000		2 300	2 300
3	Câble nu de 35mm² en cuivre	m	6	4 000		4 600	27 600
4	Fosse 1m² sur 1,5m de profondeur	u	1	15 000		17 250	17 250
5	Charbon	sac	2	6 000		6 900	13 800
6	Sel	sac	2	6 500		7 475	14 950
6	Support métallique de plaque	u	1	15 000		17 250	17 250
Total Mise à la Terre et Protection							102 350
F	Système de Secours						
1	Groupe électrogène diesel SDMO Kohler 20 kVA régulation automatique (AVR)	u	2	4 250 000	15%	4 887 500	9 775 000
2	Controleur CompAp InteliLite	u	1	850 000		977 500	977 500
3	Réservoir de carburant auxiliaire 500 L	u	2	300 000		345 000	690 000
4	Câblage et accessoires pour intégration du groupe électrogène	lot	1	500 000		575 000	575 000
Total Système de Secours							12 017 500
G	Installation et Main d'Œuvre						
2	Installation des panneaux solaires	u	324	5 000	15%	5 750	1 863 000
3	Installation des batteries et de l'onduleur	u	1	100 000		115 000	115 000
4	Installation du groupe électrogène et ATS	u	1	80 000		92 000	92 000
5	Câblage et raccordements électriques	lot	1	800 000		920 000	920 000
6	Mise en service et tests	u	1	-		-	-
7	Formation du personnel	session	1	-		-	-
Total Installation et Main d'Œuvre							5 500 000

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

RRCAPITULATIF		
A	Équipement solaire	60 123 495
B	Équipement de protection DC	598 575
C	Équipement de protection AC	462 300
D	Mise à la terre et protection	102 350
F	Système de secours	12 017 500
G	Installation et main d'œuvre	5 500 000
	Total Général HTVA	76 294 220
	TVA 18%	13 732 960
	Total Général	95 527 180

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Devis de la ligne HTA/BT					
N°	Désignation	Qté	Unité	PU(FCFA)	PT(FCFA)
I	Ligne HTA 20 kV et CONSTRUCTION POSTE H61 20/0,40				
I.1	CONSTRUCTION POSTE H61 20/0,4 - 200 kVA				
I.1.1	Transformateur H61 20/0,4kV - 250kVA type B2	1	U	4 500 000	4 500 000
I.1.2	Potence	1	U	20 000	20 000
I.1.4	Disjoncteur Haut de Poteau (DHP) type 6 avec tringlerie complète	1	U	400 000	400 000
I.1.5	Liaison transformateur - DHP par câble U1000R2V 70mm² CU	100	m	1 975	197 500
I.1.6	Cosse 70	10	U	1 500	15 000
I.1.7	MALT, numérotation support et divers	1	Ens	300 000	300 000
I.1.9	Plateforme de manœuvre	1	U	120 000	120 000
	TOTAL I.2				5 402 500
I.1.10	Cellule de protection HTA				
	Cellule Schneider Electric RM6 avec disjoncteur à huile ou SF6	1	U	15 000 000	15 000 000
	ABB SAFE 36 (Disjoncteur à gaz SF6)	1	U	12 000 000	12 000 000
	Schneider Electric CM2000	1	U	3 000 000	3 000 000
	Siemens 8DJH 12	1	U	4 000 000	4 000 000
	TOTAL I.2				34 000 000
I.2	Supports				
I.2.1	12SF650 équipé d'une chaine de trois isolateurs composites, d'une nappe horizontale, de 3 pinces d'alignement, d'accessoires de fixation et de fondation	14	U	455 000	6 370 000
I.2.2	12AD1250 équipé d'une chaine de trois isolateurs composites, d'une nappe-voute, de 3 pinces d'ancrage, d'accessoires de fixation et de fondation	2	U	522 000	1 044 000

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

I.2.4	12AS1600 équipé d'une chaine de trois isolateurs composites, d'une nappe-voute, de 3 pinces d'ancrage, d'accessoires de fixation et de fondation	2	U	1 200 000	2 400 000
	TOTAL I.2	9 814 000			
I.3	Conducteur Almélec 54,6 mm2				
	Tourée de 1000 m	4	m	1 100	4 400 000
	TOTAL I.3	4 400 000			
I.4	Accessoires de lignes				
I.4.1	IACM type I	2	Ens	1 093 000	2 186 000
I.4.2	MALT, numéotation support et divers				700 000
I.4.3	Kit Parafoudre H24 Ref ENONX7280061	6	jeu	70 000	420 000
I.4.4	Dispositif d'allongement contrôle	3	jeu	150 000	450 000
	TOTAL I.4	3 756 000			
	TOTAL I	57 372 500			
II	CONSTRUCTION LIGNE BT				
II.1	Supports				
II.1.1	5B 200 daN supports équipé, de pinces d'alignement, d'accessoires de fixation et de fondation	48	u	120 000	5 760 000
II.1.2	4A 400 daN supports équipé, de pinces d'alignement, d'accessoires de fixation et de fondation	12	u	175 000	2 100 000
	TOTAL II.1	7 860 000			
II.2	Câbles				
	Cables 3x70mm²+54,6mm²+16mm²	3000	m	2 600	7 800 000
	TOTAL II.2	7 800 000			
II.3	Accessoires de raccordement				
	Cosse 35	Lot de 100		87 000	87 000

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

II.4	Transfo BT				
	Transformateur H61 20/0,4kV - 100kVA	2	U	4 500 000	9 000 000
II.4	Cellule de protection HTA et BT				
	Disjoncteurs Schneider Electric Compact NSX 100 A (pour départs à 72,17 A), NSX 50 A (pour départs à 35,99 A et 36,08 A)	6	U	500 000	3 000 000
	Schneider Electric Masterpact MTZ	2	U	5 500 000	11 000 000
	TOTAL II.4				14 000 000
	TOTAL II.3				87 000
	TOTAL II				29 747 000
	TOTAL I+II				87 119 500
	TVA				15 681 510
	TOTAL TTC				102 888 010
	Main d'œuvre				15 433 202
	TOTAL FINAL				118 321 212
	Total1 PV + HTA/BT				213 848 391

ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION
DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 11 : Calculs économiques et détails de l'OPEX

Calcul du temps de retour sur investissement avec différents taux d'actualisation			
Taux de d'actualisation de 6%			
Val_sup	214 057 617,54	Temps_sup	14,00
Capital	208 348 391,10	Temps_retour	13,47
val_inf	203 333 234,82	TEMPS INF	13,00
Taux de d'actualisation de 8%			
Val_sup	212 128 248,35	Temps_sup	17,00
Capital	208 348 391,10	Temps_retour	16,42
val_inf	205 575 091,32	Temps inf	16,00

LCOE			
Taux d'actualisation	6%	8%	12%
Capex + Opex	325 654 544,30	305 951 151,38	279 365 671,59
Chiffre d'affaire	7 160 860,60	7 160 860,60	7 160 860,60
LCOE	45,48	42,73	39,01

OPEX Champ pv /Groupe Diesel		
Champ PV		
Catégorie de coûts	Unités	Montant estimé (F CFA)
Onduleur	F CFA	9 600 000
BESS	F CFA	10 200 000
Nettoyage des panneaux	750 F CFA/m²/an	15 337 500
Salaire		
Directeur Technique	F CFA/25 ans	90 000 000
Technicien		45 000 000
Gardien		15 000 000
Groupe Diesel		
Gasoil	F CFA	39 830 625
Maintenance		5 000 000
TOTAL estimé sur les 25 ans	-	139 968 125

ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE-ECONOMIQUE D'UN MINI-RESEAU HIBRIDE DANS LE CADRE DE L'ELECTRIFICATION DES LOCALITES D'ATCHINEDJI ET D'ADJIGO AU TOGO

Annexe 12 : Organigramme de TECMON ENERGY

