



CONCEPTION ET REALISATION D'UNE MINI CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE DE 250 KWC CONNECTEE SUR LE RESEAU HTA 33 KV SONABEL A MATIACOALI

(BURKINA FASO)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER

GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 25 Janvier 2022 par

Stéphane Olivier W YANOGO (20140084)

Directeur de mémoire : Prof Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de conférence
(CAMES), Enseignant-chercheur en Génie Electrique Energétique. Institut 2iE

Maître de stage : Monsieur Daouda BARRO, Responsable des installations électriques,
Projet Production International (PPI)

Structure d'accueil du stage : Projet Production International (PPI)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prof Moussa SORO

Membres et correcteurs : Prof Daniel YAMEGUEU NGUWO
Ing Delbon NTUMBA

Promotion [2021/2022]

 Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille :

A mon père Laurent Désiré YANOGO et à mère Marie Joseph YANOGO pour leurs prières, leur accompagnement aussi bien social qu'académique, pour l'éducation qu'ils m'ont donnée pour faire de moi la personne que je suis aujourd'hui. Je leur dois ma réussite.

A mes sœurs qui m'ont toujours soutenu, conseillé et encouragé tout au long de ma formation.

 Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

CITATION

« J'ai remarqué que même les gens qui affirment que tout est prédestiné et que nous ne pouvons rien y changer regardent avant de traverser la rue »

Stephen HAWKING

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

REMERCIEMENTS

Je souhaite en ces quelques lignes témoigner de ma profonde gratitude et exprimer ma déférence, à toutes les personnes qui ont contribué à la qualité de ce document

Cette reconnaissance va tout particulièrement à :

Prof Daniel YAMEGUEU NGUEWO, enseignant-chercheur/Maître de Conférence à 2iE, pour ses conseils, sa disponibilité, et l'encadrement reçu ;

M. Patrice CHEVALIER, Administrateur Général de PPI.SA qui m'a accueilli au sein de son entreprise

M. Daouda BARRO Responsable des installations électriques à PPI Burkina, pour son suivi, ses conseils avisés et ses encouragements ;

M. Jean-Marie LOMPO technicien au SAV pour l'enseignement et les recommandations dont j'ai bénéficié à ses côtés ;

M. Ismaël KERE technicien supérieur pour l'accompagnement reçu sur le terrain ainsi ses conseils;

M. André GARANE technicien supérieur pour son encadrement et sa rigueur au cours nos travaux;

Aux départements énergie et solaire de PPI Burkina.

Mes remerciements s'adressent également :

Aux enseignants qui m'ont transmis leurs connaissances tout au long de mon cursus à 2iE ;

Et à mes camarades, amis qui m'ont soutenu, encouragé et aidé de près ou de loin durant tout le temps passé à 2iE.

RESUME

Le présent mémoire traite de l'étude de faisabilité et de la réalisation d'une centrale solaire photovoltaïque dans la commune rurale de Matiacoali située dans l'Est du Burkina Faso. Cette centrale est une initiative de l'Agence Burkinabé de l'Electrification Rural (ABER). Il s'agira de faire un dimensionnement de la centrale photovoltaïque d'une capacité de 250 kWc connectée sur le réseau HTA de la Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL) 33kV tel que demandé dans le cahier de charges du projet pour permettre l'électrification de 14 localités. Ce projet a pour objectif principal d'améliorer les conditions de vie des populations grâce à un service énergétique de qualité.

Le coût de production du kWh (LCOE) de la centrale PV est de 36,12 FCFA/kWh ; ce coût est plus bas que le coût de production du kWh par les centrales thermiques de la SONABEL qui est de 125,44 FCFA., La technologie de la production d'énergie électrique solaire photovoltaïque, est viable pour le Burkina Faso grâce à son ensoleillement élevé et quasi permanent sur toute l'année. Mais pour le moment, la mise en place d'unité de production de cette énergie reste couteuse comparativement à la production conventionnelle. Par ailleurs la réduction de la consommation de combustible, HFO et de DDO occasionnée par la centrale PV participe à diminuer les émissions des gaz à effet de serre.

Mots clés

1. Electrification
2. Photovoltaïque
3. Réseau
4. Levelized Cost of Energy (LCOE)
5. Plan national de développement économique et social (PNDES)

ABSTRACT

This report deals with the feasibility study and the implementation of a solar photovoltaic power plant in the rural commune of Matiacoali in eastern Burkina Faso. This plant is an initiative of Burkina Faso's rural electrification agency (ABER). The project will consist of the sizing of a 250 kWp photovoltaic power plant connected to the 33kV HTA network of Burkina Faso's national electricity company (SONABEL), as requested in the project's specifications, in order to allow the electrification of 14 localities. The main objective of this project is to improve the living conditions of the population through a quality energy service.

The production cost per kWh (LCOE) of the PV plant is 36.12 FCFA/kWh; this cost is lower than the production cost per kWh of SONABEL's thermal power plants, which is 125.44 FCFA. But for the moment, the installation of a production unit for this energy remains costly compared to conventional production. In addition, the reduction of fuel, HFO and DDO consumption caused by the PV plant contributes to the reduction of greenhouse gas emissions.

Key words

1. Electrification
2. Photovoltaic
3. Grid
4. Levelized Cost of Energy (LCOE)
5. PNDES

LISTE DES ABREVIATIONS

ABER	Agence burkinabé de l'électrification rurale
AC	Courant alternatif
AFD	Agence française de développement
AGCP	Appareil général de coupure et de protection
BAD	Banque africaine de développement
BJP	Boite de jonction Photovoltaïque
BM	Banque mondiale
BT	Basse tension
CC	Courant continu
DDO	Diesel Distillate Oil
EEEOA	Echange d'énergie électrique Ouest africain
ERI	Energie renouvelable intermittente
GSM	Global system for mobile
HFO	Heavy Fuel-Oil
HTA	Haute tension catégorie A
LCOE	Levelized Cost of Energy
MPPT	Maximum power point tracking
NF C 15-100	Norme Française indice de classe C pour installations électrique à basse tension
PASEL	le projet d'appui au secteur de l'électricité
PERREL	Projet d'extension et de renforcement du réseau électrique au Burkina Faso
PIB	Produit intérieur brut
PNDES	Plan national de développement économique et social
PPI	Projet production international
PV	Photovoltaïque
RNI	Réseau national interconnecté
SONABEL	Société nationale d'électricité du Burkina Faso

 Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau

HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

TGBT	Tableau Général basse tension
TIA	Transformations industrielles et artisanales
UE	Union européenne
UTE C 15-712-1	Union Technique de l'électricité classe C pour installations photovoltaïques sans stockage et raccordées au réseau public de distribution
WAPP	West africain power pool
ZIGO	Ziro-gourma

UNITES	Désignation
A	Ampère
Kw	Kilowatt
Kwc	Kilowatt-crête
KWh	Kilowattheure
mm²	Millimètre carrée
m	Mètre

SOMMAIRE

<i>Dédicace</i>	<i>ii</i>
<i>CITATION</i>	<i>iii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iv</i>
<i>RESUME</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vi</i>
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xi</i>
<i>Table des figures</i>	<i>xii</i>
<i>INTRODUCTION</i>	<i>1</i>
<i>I Situation énergétique au Burkina Faso</i>	<i>1</i>
I.1 Etats des lieux	1
I.2 PRESENTATION DE LA CENTRALE DE MATIACOALI	4
<i>II Méthodologie</i>	<i>7</i>
II. 1 Etude Technique	7
<i>II.1.1 Présentation de la méthode analytique</i>	<i>8</i>
II.1.2. PRESENTATION DU LOGICIEL	10
<i>II.1.3 Présentation de la méthode du LCOE</i>	<i>10</i>
<i>III Dimensionnement</i>	<i>11</i>
III.1 Dimensionnement par la méthode analytique	12
<i>III.2 Dimensionnement avec le logiciel Pvsyst</i>	<i>31</i>
<i>V Etude financière</i>	<i>37</i>
<i>VI Résultats et Analyse</i>	<i>39</i>
<i>Conclusion et Recommandations</i>	<i>44</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>45</i>
<i>Annexes</i>	<i>46</i>
Annexe 1: Projet de centrale photovoltaïque au Burkina Faso	46
Annexe 2 : Carte du projet ZIGO province du Gourma	49
Annexe 3: Données relatives à l'environnement	50
Annexe 4 : Schéma multifilaire de la boîte de jonction	51

 Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Annexe 5: Schéma multifilaire du TGBT AC.....	52
Annexe 6: Schéma multifilaire du l'AGCP.....	53
Annexe 7 Caractéristiques du système de monitoring	54
Annexe 8: Fiche technique du transformateur	59
Annexe 9: Bilans et résultats principaux	60
.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition des ménages dans la province du Gourma et dans la commune de Matiacoali [10].....	4
Tableau 2: Caractéristiques de la centrale de Matiacoali	7
Tableau 3: Section des câbles en fonction du courant admissible	18
Tableau 4: Récapitulatif des longueurs de câble entre les modules et les BJP	19
Tableau 5: Récapitulatif des longueurs de câble entre les bjp et les onduleurs	21
Tableau 6: Récapitulatif des longueurs de câble entre les onduleurs et LES TGBT AC	23
Tableau 7: récapitulatif des longueurs de câble entre les TGBT AC et l'AGCP	24
Tableau 8: récapitulatif des longueurs de câble entre l'AGCP et le coffret de protection BT	26
Tableau 9: Récapitulatif des longueurs de câble entre le coffret de protection BT et le transformateur	27
Tableau 10: Récapitulatif général pour la réalisation de la centrale	38
Tableau 11: Comparaison des résultats de la méthode analytique et ceux de la méthode logiciel	39
Tableau 12: Vérification des paramètres de l'onduleur	40
Tableau 13: Récapitulatif de l'analyse financière	42

Table des figures

Figure 1: Evolution de la demande totale d'énergie suivant 3 scénarios[2]	1
Figure 2: Organigramme PPI.....	4
Figure 3: Part des sources de production d'électricité en 2018 [4]	2
Figure 4: Les départements du Gourma	5
Figure 5: Répartition des infrastructures sur le site	6
Figure 6: Centrale Photovoltaïque de Matiacoali	6
Figure 7: Schéma du fonctionnement général d'une centrale PV connectée au réseau électrique ..	8
Figure 8: Les précisions sur le site.....	31
Figure 9: Les paramètres de température et d'influence de l'albédo	32
Figure 10: Paramétrage de l'albédo.....	33
Figure 11: La définition de l'orientation	34
Figure 12: La définition de la configuration du système	35
Figure 13: Les sections de câbles recommandées	36
Figure 14: Schéma simplifié d'un sous champ	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15: Schéma simplifié du système.....	37
Figure 16: Production mensuelle de la centrale de Matiacoali.....	41

INTRODUCTION

❖ Contexte et objectifs

L'accès à l'énergie est le pilier du développement socio-économique de toute société car il conditionne les besoins de base. Le système énergétique du Burkina évolue sous l'influence de facteurs politiques, socio-économiques et environnementaux. Ceux-ci ont leurs sources tant au niveau national, sous régional qu'international. [1]

Le Burkina Faso connaît ces dernières années une hausse des activités économiques Cette situation a provoqué une augmentation de la demande en énergie notamment en énergie électrique. [1]. C'est notamment ce que montre la figure1.il s'agit de l'évolution de la demande énergétique suivant 3 scénarii sur la période de 2016 à 2025

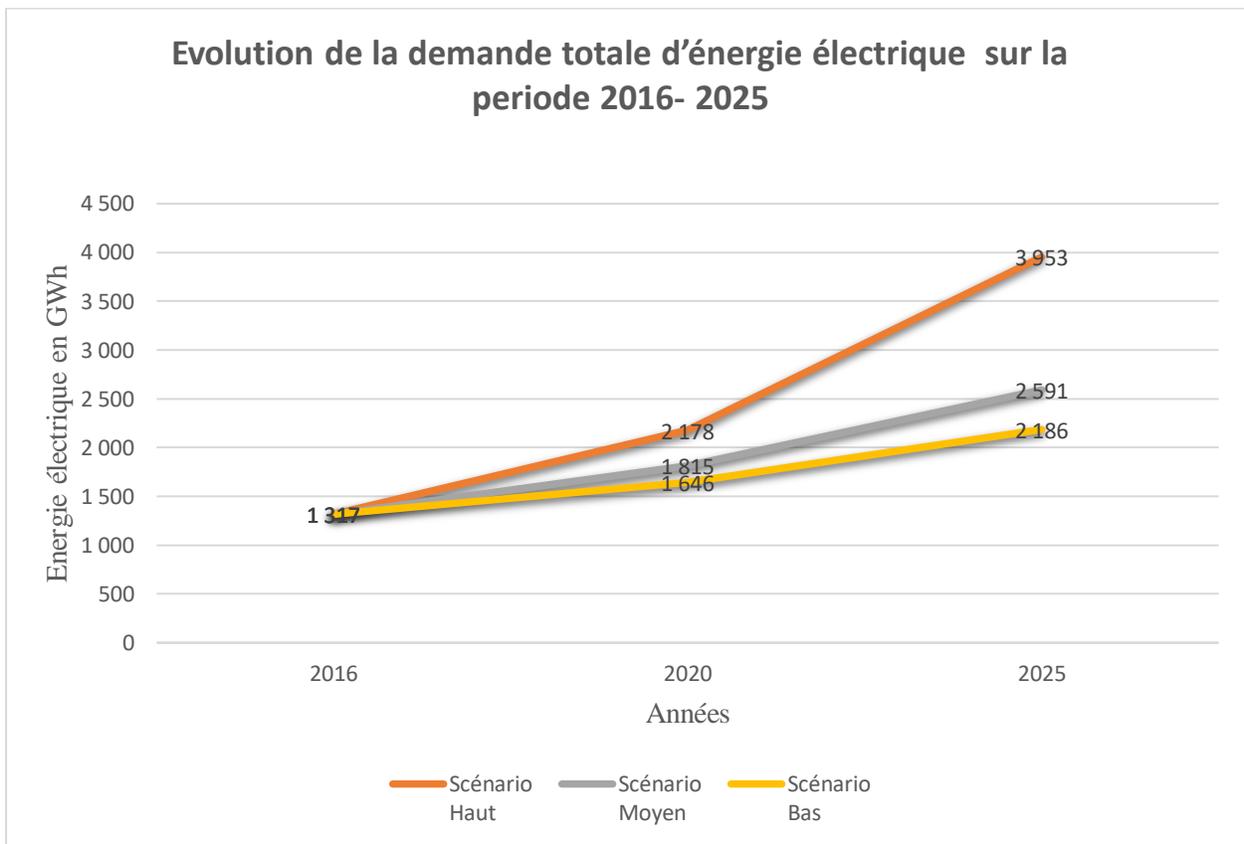


Figure 1: Evolution de la demande totale d'énergie suivant 3 scénarii[2]

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Malheureusement le Burkina fait face à un déficit global de l'offre d'électricité de l'ordre de 100MW, ce qui affecte les performances de l'économie et aussi la qualité de vie des populations.

[1]

La desserte d'électricité est soumise à des interruptions fréquentes sur le réseau de la Société National d'Electricité du Burkina Faso (SONABEL). Le temps moyen de coupure correspond à 172 heures en 2016 et à 152 heures en 2017 avec une quantité d'énergie non distribuée de 30 GWh pour chacune de ces années [1]. Pour les années 2018 et 2019 les nombres d'heures d'interruption sont respectivement de 176 et 149 heures.[3]

Les taux d'électrification rural, urbain et national sont respectivement de 3,16%, 68,69%, 21,44%. Le taux de couverture électrique national est de 38,56% [4]

Notre travail a pour but, d'étudier la faisabilité technique d'un projet d'électrification dans la province du Gourma au Burkina Faso, et faire des propositions en vue de son optimisation.

Conscient des insuffisances en matière d'accès à l'énergie de même que du coût élevé du kWh, le projet Ziro et Gourma (ZIGO) a pour but d'électrifier un certain nombre de localités dans les provinces du Gourma et du Ziro par l'intermédiaire de deux centrales solaires photovoltaïques connectées au réseau SONABEL. Notre mémoire porte sur la centrale dans le Gourma plus précisément dans la commune de Matiacoali.

Pour la réalisation de notre mémoire, nous avons suivi les étapes suivantes :

D'abord nous préciserons la situation énergétique au Burkina Faso, nous aborderons l'état des lieux du domaine de l'énergie solaire dans la sous-région et au Burkina Faso ainsi que le cadre du projet ZIGO, ensuite nous présenterons la méthodologie qui a été utilisée pour notre étude et nous ferons un dimensionnement de la centrale. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus aussi bien au niveau des aspects techniques qu'économiques.

❖ **Présentation de la structure d'accueil**

Notre stage de fin d'études s'est déroulé au sein de la société Projet Production international (PPI) qui a été créée en juin 1988. L'entreprise s'est spécialisée dans les domaines de

■ Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

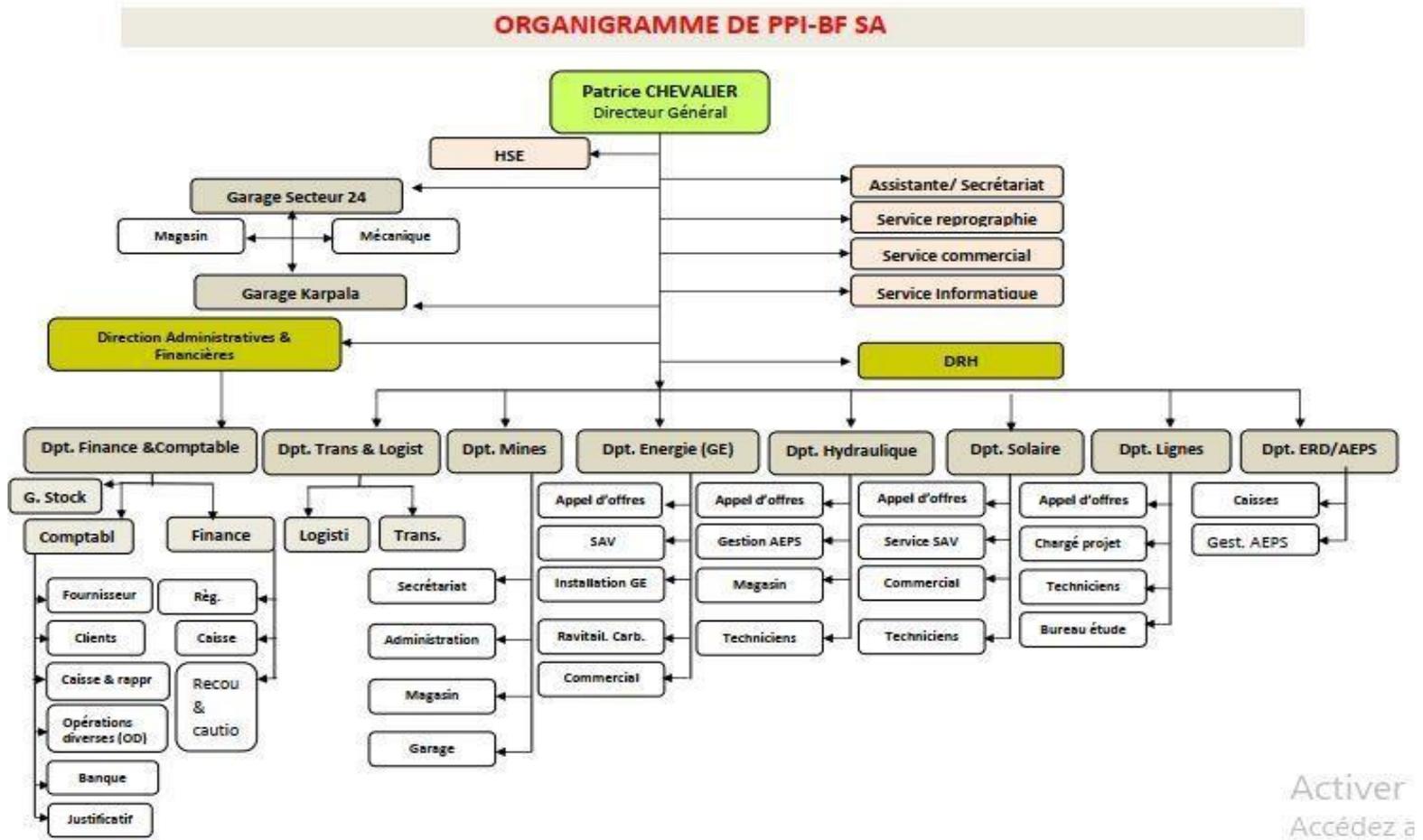
l'électromécanique, de l'hydraulique, de l'énergie solaire et dans les mines. Ainsi, PPI est présent dans les secteurs de la maintenance industrielle, de l'énergie, de l'eau et de l'assainissement.

La société s'est développée sur les marchés de l'accès à l'énergie et à l'eau, sur lesquels elle s'est imposée comme un acteur incontournable par la compétence et la rigueur de ses agents. Elle propose aujourd'hui un service intégré et cohérent autour des différents corps de métier et domaines d'activités que sont :

- La production d'énergie thermique diesel (Groupe électrogène) ;
- La production d'énergie solaire photovoltaïque ;
- Le transport et la distribution d'électricité (poste et ligne HT / BT) ;
- L'adduction d'eau potable et solution de pompage / stockage ;
- La maintenance industrielle et services ;

PPI a développé depuis quelques années une activité de services miniers (forage, carottage) en pleine expansion. La société s'est aussi implantée dans la sous-région notamment au Mali et au Niger.

L'organigramme de la société est détaillé dans la figure 2 ci-dessous



Activer
Accédez à

Figure 2: Organigramme PPI

I Situation énergétique au Burkina Faso

I.1 ETATS DES LIEUX

Depuis les 5 dernières années, la technologie et l'utilisation en matière du solaire photovoltaïque connaissent un grand engouement. Cet engouement est aussi bien partagé par l'Etat burkinabé que par les particuliers. Il ne fait plus aucun doute que l'énergie est la pierre angulaire pour un véritable développement durable.

Dans les années à venir, le nombre d'unités de production photovoltaïque sera plus important car le Burkina Faso par le ministère de l'énergie des mines et des carrières a prévu la réalisation de nombreux de projets de centrales. Après la mise en service des centrales de Ziga (1 MW) et de Zagtouli (33 MW), la politique du secteur énergétique burkinabé fait de la valorisation de la ressource solaire, une panacée pour augmenter l'offre énergétique. Selon les prévisions, avec les projets qui verront le jour, la capacité totale installée pourrait atteindre 500 MW en 2025 en incluant la centrale à vocation régionale de 150 MW prévue dans le cadre du système d'Echanges d'Energie Electrique Ouest Africain (EEEOA ou WAPP). [6]

L'Etat burkinabé ayant la conviction que l'énergie est au centre du processus de développement économique et social, a pris la résolution de réorienter sa politique énergétique vers une exploitation des énergies renouvelables. Toutes les activités liées aux énergies renouvelables ou à l'efficacité énergétique sont encadrées par Les l'articles 38 et 58 de la loi N°014-2017/AN portant sur la réglementation générale du secteur de l'énergie [11] et aussi par le décret N° 2019-0902 / PRES/PM/ME/MINEFID/MCIA portant modalités d'accès des auto producteurs d'énergies renouvelables au réseau électrique et conditions de rachat de leur excédent d'énergie. [7]

Cette nouvelle tendance a pour objectif d'accroître l'offre énergétique tout en corrigeant les disparités entre les milieux urbain et rural qui étaient respectivement de 74,7% et 32,2%. En fin

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

d'année 2018 le Burkina avait un taux d'électrification national de 38,56%. Cette couverture en électricité est très inégalement répartie sur les 13 régions du pays (annexe 1).[4]

La production en énergie solaire actuelle du Burkina provient des centrales de Zagtouli (33MWc) et de Ziga (1,1 MWc). Cela correspond sensiblement à 5% de la production totale d'énergie du Burkina Faso. [4]

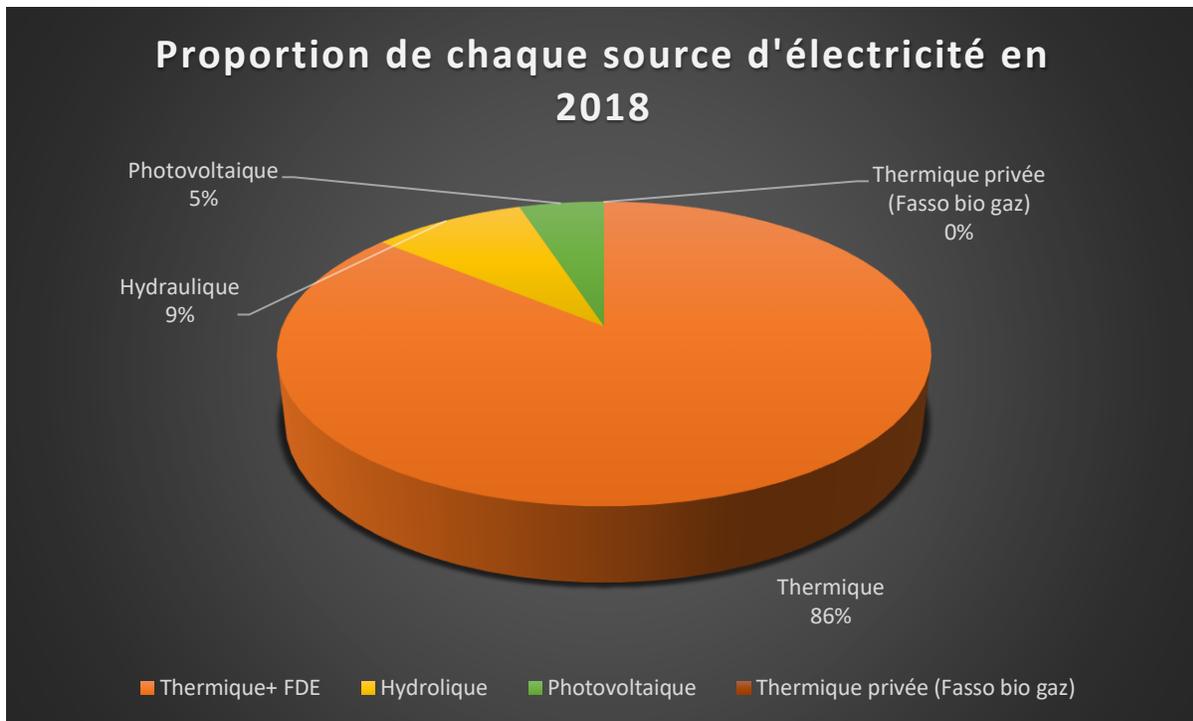


Figure 3: Part des sources de production d'électricité en 2018 [4]

Pour remédier à ce déficit énergétique qui se fait plus sentir en zone rurale, Le Burkina Faso a opté pour l'exploitation solaire en plus de son parc de centrales thermiques et hydrauliques. Jouissant d'un ensoleillement quasi permanent tout au long de l'année, une moyenne de 2122 kWh/m² est disponible [9]. Par ailleurs le Burkina Faso a entrepris une augmentation conséquente de sa capacité de production pour répondre à une prévision de demande croissante en électricité. À cette fin, un développement massif de l'énergie solaire photovoltaïque a été engagé à travers plusieurs projets totalisant une capacité de 530 MWc supplémentaires prévue d'ici à 2025. L'injection massive d'énergie renouvelable intermittente (ERI) est susceptible d'affecter le réseau

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

en raison de sa petite taille ; le mix électrique pourrait être confronté à de nouveaux défis pour répondre à la pointe de la demande du soir. [6]

L'énergie joue un rôle moteur dans le développement socio-économique d'une nation. Elle est indispensable pour un développement durable. L'un des deux axes directeurs de la stratégie du ministère de tutelle est le renforcement de l'offre d'énergie.

Cela passe par :

- Le renforcement du parc de production d'énergie ;
- La valorisation des énergies renouvelables ainsi qu'une utilisation suffisante de la production ;
- La coopération régionale dynamique en matière d'énergie.

Le renforcement du réseau et les nouvelles interconnexions avec les pays voisins contribueront à faire face aux instabilités créées par la part croissante des énergies renouvelables intermittentes (jusqu'à 60% des capacités disponibles en 2025). Une étude sur la stabilité du réseau et l'intégration de l'énergie renouvelable intermittent (ERI) est actuellement menée par Tractebel Engineering¹. Les systèmes de stockage d'énergie sont également considérés comme une solution prometteuse pour fournir des services réseau et déplacer la production d'ERI. Par exemple, un parc solaire régional² sera hybridé avec des batteries.[6]

C'est dans cet élan que Agence Burkinabé de l'Electrification Rurale (ABER) a lancé le projet d'électrification des provinces du Ziro et du Gourma (Projet ZIGO). Il s'agit de la construction de deux centrales solaires connectées au réseau HTA SONABEL.

¹ Tractebel Engineering est une société française, d'origine belge, ayant une activité dans l'ingénierie, l'énergie, l'industrie et les infrastructures.

² Sera construit sur les sites de Koupéla et Kaya avec une capacité totale estimée à 120MWc pour la première phase

I.2 PRESENTATION DE LA CENTRALE DE MATIACOALI

Notre étude concerne la centrale du Gourma. Cette centrale a été construite à Matiacoali.

Matiacoali se situe dans la région de l'Est à 315 km de la capitale Ouagadougou et à 94 km de la ville de Fada N'Gourma. Les coordonnées géographiques de la localité sont les suivantes : longitude 12° 21' 26'' Nord et latitude 1° 01' 58'' Est.

La taille moyenne des ménages au Burkina est de 5,2 individus. Elle varie selon les régions ; la taille moyenne la plus élevée de ménage est enregistrée dans la région de l'Est avec 6,1 individus et la plus faible dans la région du centre avec seulement 4,2 individus par ménage.[10]

Le nombre moyen d'individus par ménage dans la région de l'Est est de 6,1 selon le dernier recensement 2020 de l'INSD. Le tableau 3 résume les données de la région de l'Est.

Tableau 1: Répartition des ménages dans la province du Gourma et dans la commune de Matiacoali[10]

GOURMA(Province)	Nombre de ménage	Population
Total	73.152	437.242
Zone urbaine	16.462	73.200
zone rurale	56.690	364.042
Matiacoali (Commune)		
Total	11.728	74.662

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

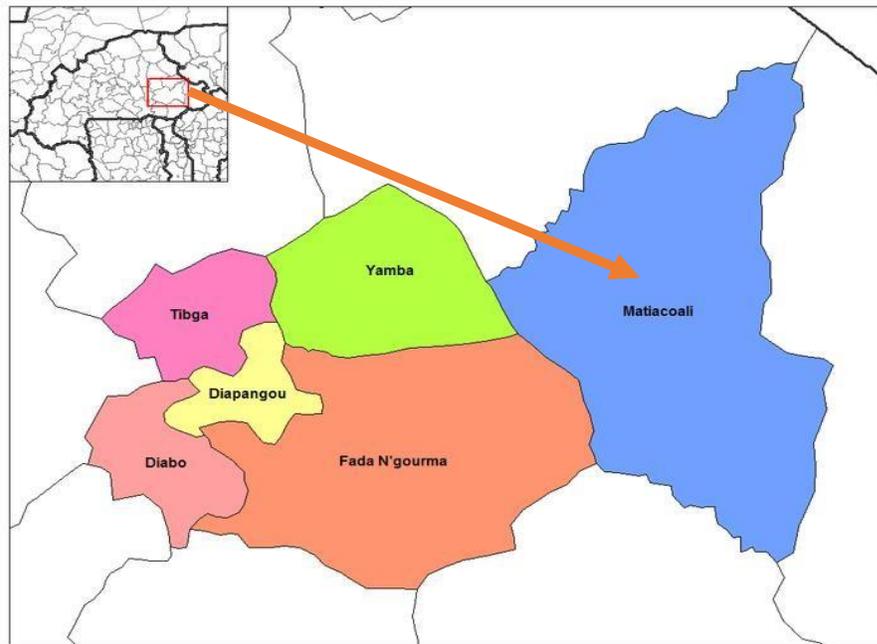


Figure 4: Les départements du Gourma

C'est dans cette localité que la centrale solaire de 250kWc du projet ZIGO (Ziro-Gourma) a été implantée. La centrale s'étend sur une superficie de 1,265 ha. Cette superficie est divisée en deux parties. La partie production qui comporte le champ solaire et le local technique (infrastructures de production), et la seconde partie réservée aux différents locaux (bâtiment administratif, bâtiment pour les agents de sécurité).

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

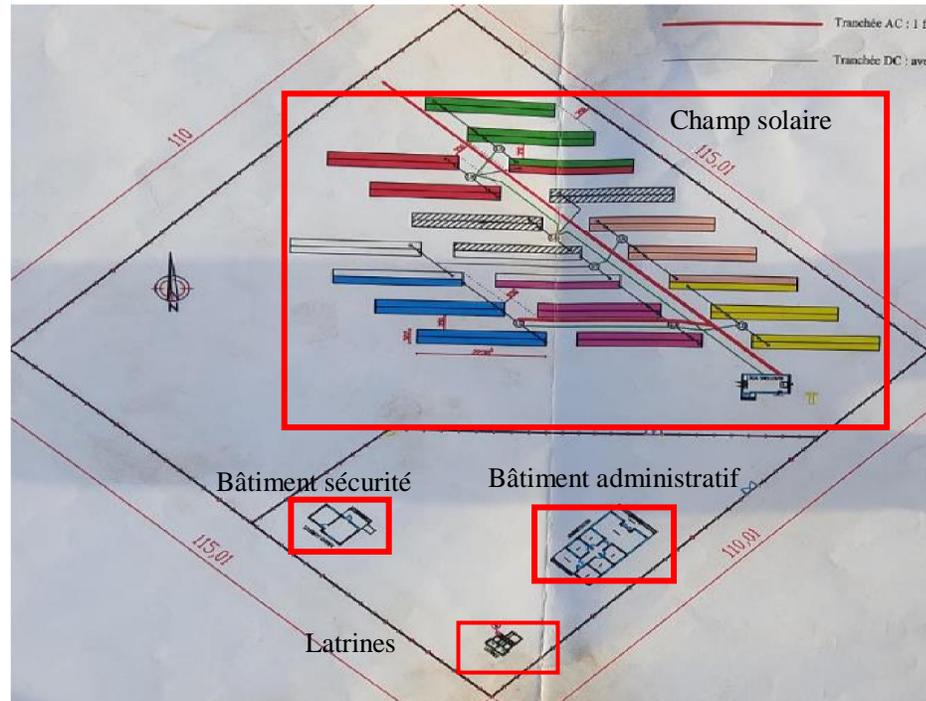


Figure 5: Vue d'ensemble des infrastructures sur le site



Figure 6: Centrale Photovoltaïque de Matiacoali

Les caractéristiques de la centrale photovoltaïque de Matiacoali sont synthétisées dans le tableau ci après.

Tableau 2:Caractéristiques de la centrale de Matiacoali

Composants	Caractéristiques		Quantité
	Descriptions	Puissance	
Puissance crête de la centrale	Centrale connectée au réseau 33kV SONABEL	250,8 kWc	1
Puissance des onduleurs	Fronius Eco 27 .0-3-S	27 kWc	8
Puissance des modules	modules de type poly-cristallins BMU-285	285 W	880
Nombre de string	2 série de 22 modules par structure		40
BJP	Modèle Coffret DC BOX-PVF5-1063s-MC4		8
TGBT	Marque NO ARK		3
AGCP	Marque NO ARK		1
Coffret de protection BT	Marque Schneider		1
Station météo	Fronius solar web, fronius sensor box		1

II Méthodologie

Les données de base font référence ici aux paramètres que nous allons considérer dans le cadre de notre étude. Il s'agit entre autres de la démographie, de l'environnement, des conditions climatiques et des hypothèses des besoins en énergie de la commune. Ces données sont résumées dans les tableaux au niveau des annexes (Annexe 3)

II. 1 ETUDE TECHNIQUE

La centrale est basée sur le principe de l'injection directe sur le réseau. Cela veut dire que la production de la centrale est entièrement transmise au réseau ; il n'y a donc pas de stockage. Le principe général de fonctionnement des centrales photovoltaïques (PV) est le suivant :

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

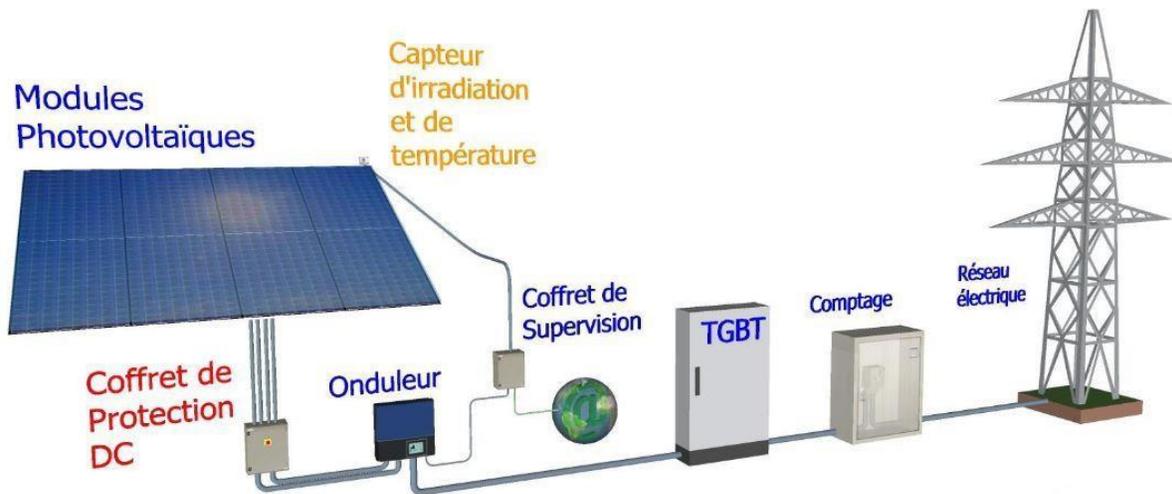


Figure 7: Schéma du fonctionnement général d'une centrale PV connectée au réseau électrique

La production des modules est centralisée dans une boîte de jonction puis passe par des onduleurs, le comptage avant de transiter par le transformateur et d'être injecté sur le réseau HTA [11].

Le dimensionnement que nous avons fait a suivi deux méthodes. Il s'agit de la méthode analytique de dimensionnement et de la méthode de dimensionnement par le logiciel PVsyst.

II.1.1 Présentation de la méthode analytique

Plusieurs facteurs entrent en ligne de compte pour ce qui concerne le dimensionnement. Il s'agit du budget disponible, du besoin énergétique et de l'espace disponible.

L'orientation des modules doit se faire plein sud avec une inclinaison de 15° idéal pour recevoir le plus de rayonnement et pour permettre aux poussières et à l'eau de s'écouler naturellement.

Le cahier de charge nous impose une puissance de 250 kWc pour notre centrale, sans stockage. La production est intégralement injectée sur le réseau de distribution de la SONABEL.

La puissance crête étant connue nous allons faire le choix de module et déterminer le nombre qu'il faut.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

➤ Le calcul permettant d'avoir le nombre de modules nécessaires à la production de 250 kWc se fait suivant la formule suivante :

$$N_m = \frac{\text{Puissance du champ } P_v}{\text{Puissance nominale d'un module}} \quad (\text{Eq 1})$$

Pour avoir le nombre d'onduleurs à installer nous appliquerons la formule suivante :

$$N_{\text{ond}} = \frac{\text{Puissance du champ } P_t}{\text{Puissance d'un sous champ}} \quad (\text{Eq 2})$$

Nous déterminons le nombre de modules pour chaque sous champ, à partir de la puissance d'un sous champ. Le choix de l'onduleur permettra par la suite de déterminer la configuration qui convient. Pour avoir le nombre de modules nous utiliserons la formule :

$$N_{\text{msc}} = \frac{\text{Puissance du sous champ } P_{sc}}{\text{Puissance du module } P_{\text{mod}}} \quad (\text{Eq 3})$$

Nombre de modules par string

$$N_{ms} = \frac{\text{Tension max admissible onduleur}}{\text{Voc module}} \quad (\text{Eq 4})$$

Nombre de strings à former

Pour avoir le nombre de strings à former par onduleur, nous procéderons comme suit :

$$N_{\text{stri}} = \frac{N_{\text{msc}}}{N_{ms}} \quad (\text{Eq 5})$$

Pour le bon fonctionnement de la centrale, le système électrique doit être aux normes en vigueur. Ce système électrique regroupe : la protection, la mise à la terre, le raccordement au réseau et les canalisations par lesquelles toute l'énergie sera acheminée.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Dans cette partie nous dimensionnerons les équipements de protection ainsi que les canalisations.

Nous nous baserons sur les références de la norme NFC 15-100, le guide UTC 15-712-1,[12], [13]

Il faut aussi ajouter que tous les équipements de la centrale, sont reliés à la terre. Les structures portant les modules sont toutes reliées par une liaison équipotentielle créée par un conducteur commun en cuivre qui relie l'ensemble des structures et des modules à la terre.

Le local technique ainsi que tous les équipements qu'il abrite (les onduleurs, TGBT, AGCP, et le monitoring) sont aussi reliés à une prise de terre suivant un régime TT.

La mise à la terre est une sécurité supplémentaire pour la protection des biens et des personnes contre les défauts d'isolement qui pourraient survenir

II.1.2. PRESENTATION DU LOGICIEL

Le logiciel que nous allons utiliser pour notre dimensionnement est le logiciel PVsyst la version 6.8.1. Comparativement à la méthode analytique, l'utilisation du logiciel nous permet de prendre en compte plus de variables. Ce qui a pour incidence directe un dimensionnement plus précis du projet. Parmi les variables à considérer, il s'agira entre autre :

De l'emplacement du site,

- ✚ Les paramètres du projet (l'albédo, les conditions climatiques),
- ✚ La valeur maximale de la tension à considérer ;
- ✚ L'orientation des modules,
- ✚ Les paramètres du système (la puissance du système le choix des équipements).

II.1.3 Présentation de la méthode du LCOE

Le LCOE (Levelized Cost of Energy) est utilisé pour évaluer la rentabilité de l'énergie électrique sur la durée de vie de l'ouvrage de production. Il a été introduit en 1995 par le Laboratoire des énergies renouvelables (NREL, USA)

■ Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Il faut intervenir les différents coûts qui ont été engendrée durant le projet. Il s'agit de la construction, l'exploitation mais aussi des taxes. Le coût total est divisé par l'énergie totale produite pendant le projet [14]

$$LCOE = \frac{\text{Coût total du système durant le projet (investissement + exploitation + maintenance + taxes)}}{\text{Énergie totale produite durant le projet}} \quad (\text{Eq 6})$$

Chacune de ces valeurs correspond à la VAN (valeur actuelle net) du coût ou de l'énergie

La formule détaillée du LCOE est présentée ci-dessous

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (\text{Eq 7})$$

Avec,

I_t : Investissement

M_t : Frais d'exploitation et de maintenance durant l'année t

F_t : Frais investis dans le carburant durant l'année t

E_t : Énergie produite à l'année t

r : Taux d'actualisation annuel

n : Durée de vie de l'ouvrage en années

III Dimensionnement

La puissance installée de la centrale est fixée à 250 kWc. Notre dimensionnement se fera sur la base de cette valeur.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

III.1 DIMENSIONNEMENT PAR LA METHODE ANALYTIQUE

Détermination du nombre de modules photovoltaïques

Le choix s'est porté sur les modules du fabricant Bisol type BMU 285 Wp. Ce Choix a été fait suivant les exigences du cahier de charges. La puissance nominale d'un module est de 285 W

Nous aurons donc

$$N_m = \frac{\text{Puissance total du champ Pv (W)}}{\text{Puissance nominale d'un module (W)}}$$

$$N_m = \frac{250 * 10^3}{285} = 877.2$$

Nous retiendrons un total de 873 modules qui est le nombre entier immédiatement supérieur.

Choix de l'onduleur et configuration du champ solaire

La configuration du champ sera définie par le choix de l'onduleur. Nous avons choisi le **Fronius Eco 27 .0-3-S** qui fournit une puissance de 27 kWc

La configuration du champ solaire et le choix des onduleurs doivent suivre les règles suivantes[13] :

- La tension MPP du générateur PV (V_{mpp}) doit être supérieur à la tension minimale admise à l'entrée de l'onduleur. Il est important de tenir compte de l'effet de la température en exploitation
- La tension en circuit ouvert du générateur PV (V_{oc}) doit être inférieur à la tension maximum admise à l'entrée de l'onduleur. Il faut toujours tenir compte de l'effet de la température en exploitation.
- Préférer la tension nominale à l'entrée de l'onduleur car elle donne le meilleur rendement
- Le ratio de puissance doit être compris entre 90% et 110%
- Tous les strings connectés à un même onduleur doivent avoir la même tension continue.

Nous avons alors

$$N_{ond} = \frac{\text{Puissance total du champ Pv}}{\text{Puissance d'un sous champ}}$$

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Ici la puissance d'un sous champ correspond à la puissance générée par les 110 modules qui compose le sous champ. Cette puissance est de 31,35 kW.

$$N_{\text{ond}} = \frac{250}{31,35} = 7,97$$

Nous retiendrons 8 comme nombre d'onduleurs. C'est la valeur entière immédiatement supérieur.

Configuration des sous-champs

Nous allons déterminer le nombre de modules pour chaque sous champ. La puissance d'un sous champ étant de 31,35 kWc au maximum, pour avoir le nombre de modules.

Nous avons:

$$N_{\text{msc}} = \frac{\text{Puissance du sous champ } P_{\text{sc}} (W)}{\text{Puissance du module } P_{\text{mod}} (W)}$$

$$N_{\text{msc}} = \frac{31350}{285} = 110$$

Le nombre de modules est de 110

Nombres de modules par string

$$N_{\text{ms}} = \frac{\text{Tension max admissible onduleur } (V)}{\text{Voc module } (V)}$$

Après calcul :

$$N_{\text{ms}} = \frac{850}{39,9} = 21,3$$

Nous retiendrons 22 comme nombre de modules par string. C'est la valeur entière immédiatement supérieur à 21,3.

Nombre de strings à former par sous champ

$$N_{\text{stri}} = \frac{N_{\text{msc}}}{N_{\text{ms}}}$$

Cette valeur est le quotient du nombre total de module par sous champ, par le nombre de module sur un string.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Nous avons

$$N_{\text{stri}} = \frac{110}{22} = 5$$

Nous aurons alors un nombre de 5 strings par sous-champ

Tableau 3: Caractéristiques du module BMU-285

Puissance nominale Pn (Wc)	285
Tension en circuit ouvert Voc (V)	39,9
Courant de court-circuit Isc (A)	9,60
Tension maximal Vmpp (V)	31
Courant maximal Impp (A)	9,20
Rendement η (%)	17,4

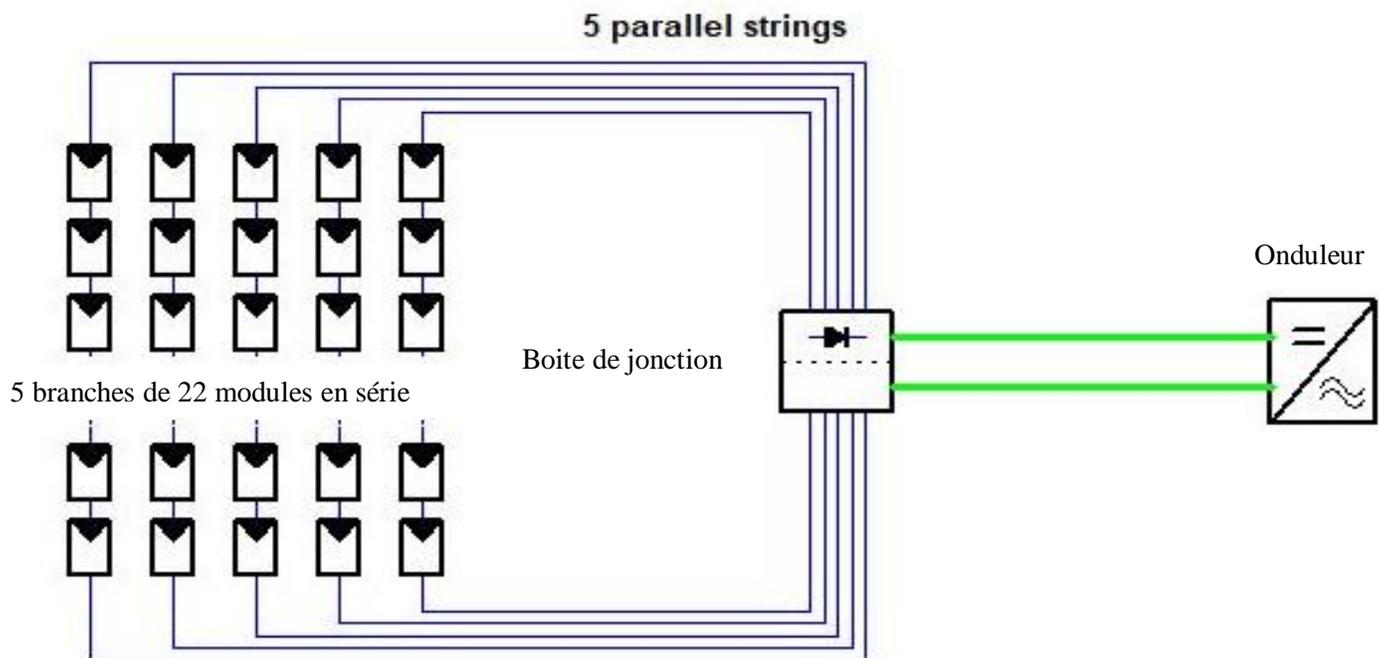


Figure 8: Schéma synoptique d'un sous champ

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Dimensionnement des équipements de protection

- Le coté continu (CC)

Les équipements nécessaires à ce niveau sont les suivants : les fusibles ultra rapides, les disjoncteurs cc, les interrupteurs sectionneurs et les parafoudres.

Le fait de mettre en plus des fusibles dans les boites de jonctions malgré la présence de fusibles au niveau des onduleurs est pour apporter une protection supplémentaire à la partie en amont (modules, boites de raccordements).

Les Fusibles

Les fusibles assurent la protection contre les surintensités ; les paramètres qui suivent doivent conditionner leur choix :

- Tension de fonctionnement du fusible $U_{fusible} \geq 1.15V_{oc\ string}$
- Le calibre du fusible $1.5I_{SC} \leq I_{CAL} \leq 2I_{SC}$
- Les valeurs suivant chaque string sont : $V_{OC\ string} = 682V$; $I_{SC} = 9,6A$.

$$U_{fusible} \geq 1,15 * 682 = 784,3V$$

$$14,4A \leq I_{CAL} \leq 19,2A$$

En considérant les paramètres, le choix des fusibles s'est porté sur ceux du fabricant NO ARK modèle 10*38 (avec témoin de fusion) Ve 1000V

L'Interrupteur-sectionneur

Il s'agit d'un dispositif permettant d'isoler la source et l'onduleur. Les interrupteurs sectionneurs protègent aussi contre les surintensités. Ce dispositif prend son importance lorsqu'il y'a intervention sur le champ. C'est à ce moment qu'il est vraiment important d'isoler l'onduleur du champ.

Il se trouve que les onduleurs Fronius Eco 27 .0-3-S que nous avons choisis, ont un sectionneur intégré. Mais pour se conformer au cahier de charge, un second interrupteur sectionneur a été aussi installé au niveau des boites de jonction. Il s'agit de l'interrupteur sectionneur de la marque NO ARK, modèle 1000 V 63A. Ve 1000 V, Ie 63 A

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Les parafoudres

La protection contre les surtensions est indispensable au même titre que les dispositifs de protection contre les surintensités ainsi que la séparation. Les parafoudres assurent la protection contre les perturbations atmosphériques. Ils sont disposés dans les deux parties du système.

Dans la partie DC ils sont au sein des BJP et dans la partie AC ils sont localisés au niveau des onduleurs, dans les TGBT AC 1 et 2 ainsi que dans le coffret AGCP. Annexes (7 ;8)

- **Coté alternatif**

De même que pour le coté CC les mêmes équipements sont importants pour une protection efficace contre les surtensions, les surintensités. Sans les organes d'isolation.

Les onduleurs Fronius Eco 27 .0-3-s que nous utilisons disposent en leur sein de disjoncteurs, d'interrupteur-sectionneurs et de parafoudres. En plus de ces équipements nous avons après les onduleurs les TGBT AC ainsi que l'AGCP et le coffret de protection BT.

Les Fusibles

Les fusibles coté AC doivent remplir les critères suivants :

$$U_{fus} \geq 1.15 * U_{oc.sting}$$

$$k * I_{s_{ond}} \leq cal_{pro}$$

Avec

Pour les fusibles gl

$I_n = 10 A$ correspond à $k=1,31$;

$10 A \leq I_n < 25 A$ correspond à $k= 1,21$ et

Si $I_n > 25 A$ alors $k=1,10$.

Pour les disjoncteurs

$k=1$

Le coefficient k est donné en fonction du calibre.

Le courant maximal à la sortie de l'onduleur est de $37,9 A$ ce qui correspond à $k= 1,10$.

$V_{oc.sting} = 887,8 V$. Les caractéristiques des fusibles seront :

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

$$U_{fus} \geq 1009,47 V$$

$$I_{cal} \geq 41,69 A$$

L'électricité produite depuis les modules doit être envoyée vers les onduleurs, et les différents équipements avant d'être envoyée sur le réseau. Cela se fera par des conduites. Aussi bien du côté CC que AC. Ce dimensionnement se fait suivant plusieurs paramètres tels que l'intensité du courant qui circulera ainsi que le mode de pose. Ce travail a pour but principal de déterminer les différentes sections de câble pour un bon transport de l'électricité.

Côté courant continu (CC)

Les caractéristiques suivantes doivent être respectées :

$$S \geq S_c = \frac{2\rho LI}{\Delta V_{adm}}$$

$$I_{adm} \geq I_{cal}$$

Avec

ρ = la résistivité, ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$). Pour notre cas il est question du cuivre $\rho = 0,0171 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ et de l'aluminium $\rho = 0,0278 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

L = la longueur du câble, (m)

S = la section du câble, (mm^2)

I = le courant de service, (A)

ΔV_{adm} = la chute de tension admissible

Nous considérons comme résistivité, celle du cuivre. La chute de tension admise sera de 2% (cette valeur a été fixée par le cahier de charge)

Le calibre du dispositif de protection doit être pris en compte pour le choix de la section en plus des conditions qui précèdent. Le tableau ci-après donne les sections en fonction du courant admissible pour les conducteurs en cuivre.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Tableau 4: Section des câbles en fonction du courant admissible

Section des câbles en cuivre (mm ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
Courant admissible (A)	13	21	28	36	46	61	81	99	125	160	195	220	250	285	340	395

Pour la détermination de la chute de tension ainsi que de la section de câble appropriée, il est important de connaître les longueurs des câbles.

$$\Delta V_{adm} = \frac{2\rho LI}{S_c} \text{ Avec}$$

ρ = la résistivité, ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$). Pour notre cas il est question de l'aluminium $\rho = 0,0278 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

L = la longueur du câble, (m)

S = la section du câble, (mm^2)

I = le courant de service, (A)

ΔV_{adm} = la chute de tension admissible (Elle sera au maximum de 3% comme le recommande la norme UTE C15-712-1).

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Tableau 5:Récapitulatif des longueurs de câble entre les modules et les BJP

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
Strings	BJP1	30
Strings	BJP2	30
Strings	BJP3	60
Strings	BJP4	60
Strings	BJP5	30
Strings	BJP6	30
Strings	BJP7	60
Strings	BJP8	60

Les câbles utilisés des modules aux BJP sont en aluminium.

Calcul de la chute de tension entre les modules et les boîtiers et choix de la section des câbles

- Pour les longueurs de 30 m

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 30 \cdot 9,60}{2,5} = 6,41 \text{ V}$$

Vérifions si cette chute de tension est acceptable

$$\Delta V_{adm} = 0,03 \cdot 682 = 20,46 \text{ V}$$

La chute de tension est inférieure à la chute tension admissible.

Déterminons la section de câble

$$S_c = \frac{2 \cdot 0,0278 \cdot 9,6 \cdot 30}{13,64} = 1,2 \text{ mm}^2$$

Vérification des conditions :

$$S = 2,5 \text{ mm}^2 \geq S_c$$

$$I_{cal} = 15 \text{ A} \leq I_{adm} = 21 \text{ A}$$

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Nous retiendrons la section de $2,5 \text{ mm}^2$ pour les câbles quittant des modules pour les boitiers.

- Pour les longueurs de 60 m

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 0,0278 \cdot 60 \cdot 9,60}{2,5} = 12,81 \text{ V}$$

Vérifions si cette chute de tension est acceptable

$$\Delta V_{adm} = 0,03 \cdot 682 = 20,46 \text{ V}$$

La chute de tension est inférieure à la chute tension admissible.

Déterminons la section de câble

$$S_c = \frac{2 \cdot 0,0278 \cdot 9,6 \cdot 60}{13,64} = 2,35 \text{ mm}^2$$

Vérification des conditions :

$$S = 2,5 \text{ mm}^2 \geq S_c.$$

$$I_{cal} = 15 \text{ A} \leq I_{adm} = 21 \text{ A}$$

Nous retiendrons la section de $2,5 \text{ mm}^2$ pour les câbles quittant des modules pour les boitiers

Pour ces deux cas de figure nous avons eu à utiliser une section de câble de 6 mm^2 . Câble de type solaire.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Calcul de la chute de tension entre les boites de jonction et les onduleurs, choix de la section des câbles.

Tableau 6: Récapitulatif des longueurs de câble entre les bjp et les onduleurs

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
BJP1	Onduleur 1	80
BJP2	Onduleur 2	80
BJP3	Onduleur 3	80
BJP4	Onduleur 4	80
BJP5	Onduleur 5	160
BJP6	Onduleur 6	160
BJP7	Onduleur 7	160
BJP8	Onduleur 8	160

Le courant de sortie au niveau des boitiers est de 46 A. En nous référant au tableau qui attribue la section en fonction du courant, nous prendrons une section de 16 mm² pour les câbles allant des boites de jonction aux onduleurs. La tension entre les BJP et les onduleurs est toujours de 682 V.

La chute de tension $\Delta V \leq 20,46 V$

Pour une section 16 mm² la chute de tension sera de :

Pour la longueur de 80 m

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 0,0171 \cdot 80 \cdot 46}{16} = 7,87 V$$

Pour la longueur de 160 m

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 0,0171 \cdot 160 \cdot 46}{16} = 15,73 V$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 0,0171 \cdot 160 \cdot 46}{25} = 10,10 V$$

Ces chutes de tension sont inférieures à la chute de tension admissible qui est de 20,46 V.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Cette section de 16 mm² sera donc retenue pour les câbles des BJP 1,2,3 et 4. Pour les BJP 5,6,7 et 8 nous prendrons une section de 25 mm².

Sur le site les sections utilisées étaient de 35 et 25 mm².

Type de câble :

- 2x35mm² U1000 R2V
- 2x25mm² U1000 R2V

Côté courant alternatif (AC)

Le dimensionnement du côté alternatif se fait suivant une procédure différente de celle du côté CC. Aussi, il faut tenir compte du mode de pose des câbles, du nombre de circuits adjacents, de la température, la nature du sol et bien d'autres variables qui sont dans la norme NFC 15-100. Nous ferons notre dimensionnement par tronçon.

Pour le calcul de la section des câbles ainsi que de la chute de tension nous utiliserons les formules suivantes :

$$I_z = \frac{In}{K}$$

$$\Delta V = \sqrt{3} * I * \left(\rho * \frac{L}{S} * \cos\varphi + XL \sin\varphi \right)$$

I_z : courant admissible dans la canalisation (A) ;

ΔV : chute de tension (V);

I_b : courant d'emploi (A);

I_n : le calibre de la protection (A) ;

K : produit des coefficients de correction.

I : courant de service (A) ;

L : longueur du câble (m) ;

R : Résistance (Ω) ;

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Calcul de la section des câbles et de la chute de tension entre les onduleurs et les TGBT.

Tableau 7: Récapitulatif des longueurs de câble entre les onduleurs et LES TGBT AC

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
Onduleur 1	TGBT AC1	5
Onduleur 2		5
Onduleur 3		5
Onduleur 4		5
Onduleur 5	TGBT AC2	5
Onduleur 6		5
Onduleur 7		5
Onduleur 8		5

Type d'isolant polyéthylène : réticulé, âme cuivre

Mode de pose : câble posé sur un chemin de câbles perforés ; cela correspond à la méthode de référence 13 E avec $k_1 = 1$

Température du sol : 40°C avec $k_2 = 0,91$

Correction en fonction du groupement des circuits et du nombre de couches :

Nombre de groupements de circuit = 8 $k_a = 0,72$

Nombre de couches = 2 $k_b = 0,80$

Le facteur de correction de ces deux paramètres correspond au produit de k_a par k_b

$0,72 * 0,80$

$k_3 = 0,58$

Le facteur de correction globale k_g sera alors : $k_g = k_1 * k_2 * k_3$.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

$$k_g = 1 * 0,91 * 0,58 \quad k_g = 0,53$$

Le courant à la sortie des onduleurs est de 38,97 A, le calibre qui est immédiatement supérieur est celui de 40 A au niveau du disjoncteur.

$$I_z = \frac{40}{0,91 * 0,58}, I_z = 75,8 \text{ A}$$

La section correspondante à cette intensité est de 25 mm²

Vérification de la chute de tension :

$$\Delta V = \sqrt{3} * 38,97 * (0,0171 * \frac{5}{25} * 0,8)$$

$$\Delta V = 0,18 \text{ V (0,29V pour 16)}$$

La chute de tension admise étant inférieure à 1%, nous aurons

$$\Delta V \text{ admissible} = 0,01 * 400$$

$$\Delta V \text{ admissible} = 4 \text{ V}$$

Notre section de 25 mm² convient car la chute de tension est inférieure à admissible.

Type de câble :

5G16mm² U1000 R2V

Calcul de la section des câbles et de la chute de tension entre les TGBT et AGCP.

Tableau 8: récapitulatif des longueurs de câble entre les TGBT AC et l'AGCP

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
TGBT AC1	AGCP	5
TGBT AC2		5

Type d'isolant polyéthylène : réticulé, âme cuivre

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Mode de pose : câble posé sur un chemin de câbles perforés ; cela correspond à la méthode de référence 13 E avec $k_1 = 1$

Température du sol : 40°C avec $k_2 = 0,91$

Correction en fonction du groupement des circuits et du nombre de couches :

Nombre de groupements de circuit = 3 $k_a = 0,82$

Nombre de couches = 1 $k_b = 1$

Le facteur de correction de ces deux paramètres correspond au produit de k_a par k_b

$1 * 0,82$ $k_3 = 0,82$

Le facteur de correction globale k_g sera alors : $k_g = k_1 * k_2 * k_3$.

$k_g = 1 * 0,91 * 0,82$

$k_g = 0,75$

Le courant à la sortie des TGBT est de 200 A, le calibre qui est immédiatement supérieur est celui de 225 A au niveau du disjoncteur.

$$I_z = \frac{225}{0,91 * 0,82}, I_z = 301,5 \text{ A}$$

La section correspondante à cette intensité est un câble de 185 mm²

Vérification de la chute de tension :

$$\Delta V = \sqrt{3} * 200 * (0,0171 * \frac{5}{185} * 0,8)$$

$\Delta V = 0,13 \text{ V}$ (0,25V pour 95)

La chute de tension admise étant inférieure à 1%, nous aurons

ΔV admissible = 0,01 * 400

ΔV admissible = 4 V

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Notre section de 185 mm² convient car la chute de tension est inférieure à la chute de tension admissible. Sur le site nous avons eu à utiliser un câble de type 5G95mm² U1000 R2V

Calcul de la section des câbles et de la chute de tension entre l'AGCP et le coffret de protection BT.

Il est important de préciser que c'est en enterré.

Tableau 9: récapitulatif des longueurs de câble entre l'AGCP et le coffret de protection BT

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
AGCP	Protection BT	10

Type d'isolant polyéthylène : réticulé, âme cuivre câble mono- conducteur dans des conduits enterrés ; cela correspond à la méthode de référence 61D avec $k_1 = 0,8$

Température du sol : 50°C avec $k_2 = 0,63$

Correction en fonction du groupement des circuits et du nombre de couches :

Nombre de groupement de circuit = 4 $k_3 = 0,72$

Type de sol : sol sec $k_4 = 1$

Facteur de correction dû à la résistivité thermique du sol (un terrain sec correspond à une résistivité de $k = 1.13$

Le facteur de correction globale k_g sera alors : $k_g = k_1 * k_2 * k_3$.

$k_g = 0,8 * 0,63 * 0,72 * 1$ $k_g = 0,36$

Le courant à la sortie des TGBT est de 400 A, le calibre qui est immédiatement supérieur est celui de 425 A au niveau du disjoncteur.

$$I_z = \frac{425}{0,36}, I_z = 1180,56 \text{ A}$$

La section correspondante à cette intensité est un câble de 240 mm²

Vérification de la chute de tension :

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

$$\Delta V = \sqrt{3} * 400 * (0,0171 * \frac{10}{240} * 0,8)$$

$$\Delta V = 0,39 \text{ V}$$

La chute de tension admise étant inférieure à 1%, nous aurons

$$\Delta V \text{ admissible} = 0,01 * 400$$

$$\Delta V \text{ admissible} = 4 \text{ V}$$

Notre section de 240 mm² convient car la chute de tension est inférieure à l'admissible.

Sur le site la même section a été utilisée 240 mm² de type 5G95mm² U1000 R2V ou H07 RN-F

Calcul de la chute de tension entre le coffret de protection BT et le transformateur, choix de la section des câbles.

Tableau 10: Récapitulatif des longueurs de câble entre le coffret de protection BT et le transformateur

Tenant	Aboutissant	Longueurs (m)
Protection BT	Transformateur	5

Type d'isolant polyéthylène : réticulé, âme cuivre

Mode de pose : câble fixé sur un support ; cela correspond à la méthode de référence 16F avec $k_1 = 0,75$

Température du sol : 40°C avec $k_2 = 0,87$

Correction en fonction du groupement des circuits et du nombre de couches :

Nombre de groupement de circuit = 4 $k_a = 0,75$

Nombre de couche = 1 $k_b = 1$

Le facteur de correction de ces deux paramètres correspond au produit de k_a par k_b

$$1 * 0,75 \quad k_3 = 0,75$$

Le facteur de correction globale k_g sera alors : $k_g = k_1 * k_2 * k_3$.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

$$k_g = 0,75 * 0,87 * 0,75 \quad k_g = 0,49$$

$$I_z = \frac{225}{0,91 * 0,82}, \quad I_z = 301,5 \text{ A}$$

Déterminons le courant qui circule dans nos conducteurs :

$$I_n = \frac{250000}{400 * \sqrt{3}}$$

$$I_n = 360,8 \text{ A}$$

Le courant qui circule dans notre conducteur est de 360,5 A ce qui correspond à une intensité immédiatement supérieure de 400 A.

La section correspondante à cette intensité est un câble de 185 mm²

Sur le site la même section a été utilisé 240 mm² de type 5G95mm² U1000 R2V

Vérification de la chute de tension :

$$\Delta V = \sqrt{3} * 200 * (0,0171 * \frac{5}{185} * 0,8)$$

$$\Delta V = 0.13 \text{ V (0,1V pour 240)}$$

La chute de tension admise étant inférieure à 1%, nous aurons

$$\Delta V \text{ admissible} = 0,01 * 400$$

$$\Delta V \text{ admissible} = 4 \text{ V}$$

Notre section de 185 mm² convient car la chute de tension est inférieure à l'admissible. Sur le site la section qui a été utilisé était de 240 mm² de type 5G95mm² U1000 R2V

Choix du transformateur

Le transformateur que nous avons utilisé est un transformateur de 250Kva. 400 V/ 33kV.

Pour le bon fonctionnement d'un transformateur ainsi que pour lui permettre d'avoir une bonne durée de vie, il est recommandé qu'il fonctionne au maximum à une valeur comprise entre 50 et 80% de sa capacité

■ Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

La puissance de notre centrale est de 250kWc. A partir de cette puissance nous allons déterminer la puissance du transformateur qu'il nous faut.

Puissance du transformateur= Puissance total *1,2

$250*1.2= 300 \text{ kVA}$

Le transformateur recommander est de 300 kVA. Les puissances immédiatement supérieures à cette valeur sont celle de 315 et de 400 Kva.

Vérification

$$\frac{250*100}{315} = 79,4 \%$$

$$\frac{250*100}{400} = 62,5 \%$$

79,4 et 62,5 % sont inférieur à 80%.

Nous décidons de prendre le transformateur de 400 Kva, qui répond au critère de puissance mais aussi qui serait intéressant pour faire une extension sans être contraint de changer le transformateur.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

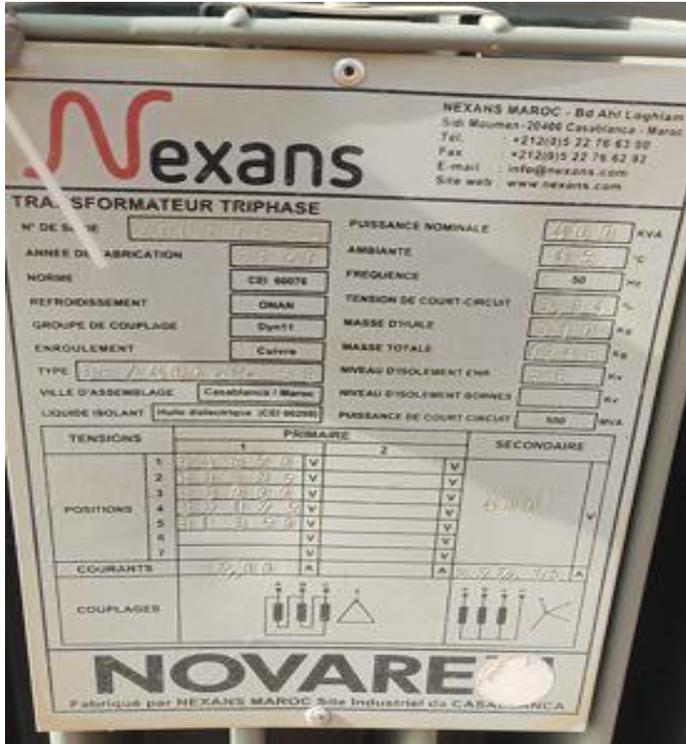


Figure 9: Plaque signalitique du transformateur de 400 Kva

Tableau 11: Caractéristique du transformateur.

Puissance nominale	400 kVA
Norme	CEI 60076
Fréquence	50 Hz
Refroidissement	ONAN
Type	36/400-H-59
Enroulement	cuivre
Courant au primaire	700 A
Courant au secondaire	577,35 A
Tensions au primaire	1) 34 650 V 2) 33 825 V 3) 33 000 V 4) 32 175 V 5) 31 350 V
Tension au secondaire	400 V

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

III.2 Dimensionnement avec le logiciel Pvsyst

Pour réaliser notre dimensionnement il y'a des paramètres que nous devons renseigner pour permettre au logiciel de faire les calculs.

La commune de Matiacoali ne figurant pas dans la base de données que nous propose le logiciel, nous avons les avons créés à partir des données GPS du projet.

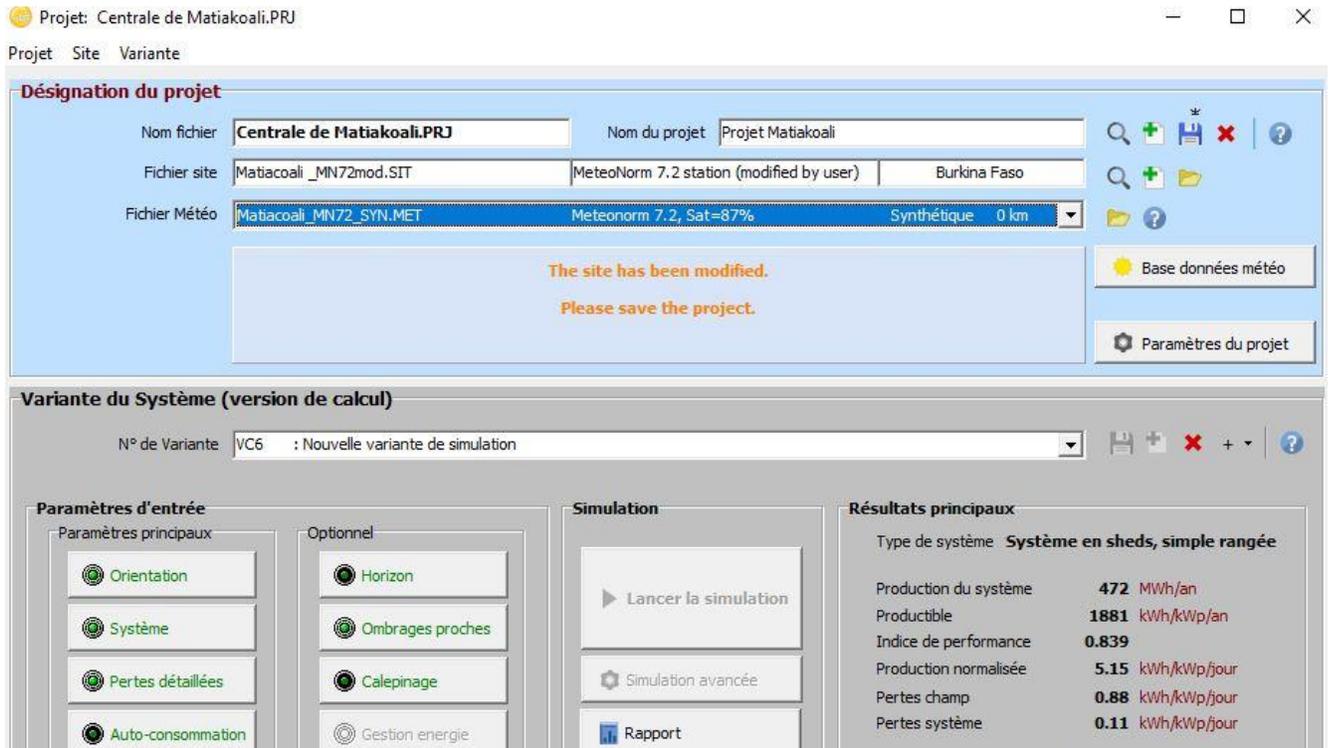


Figure 10: Les précisions sur le site

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

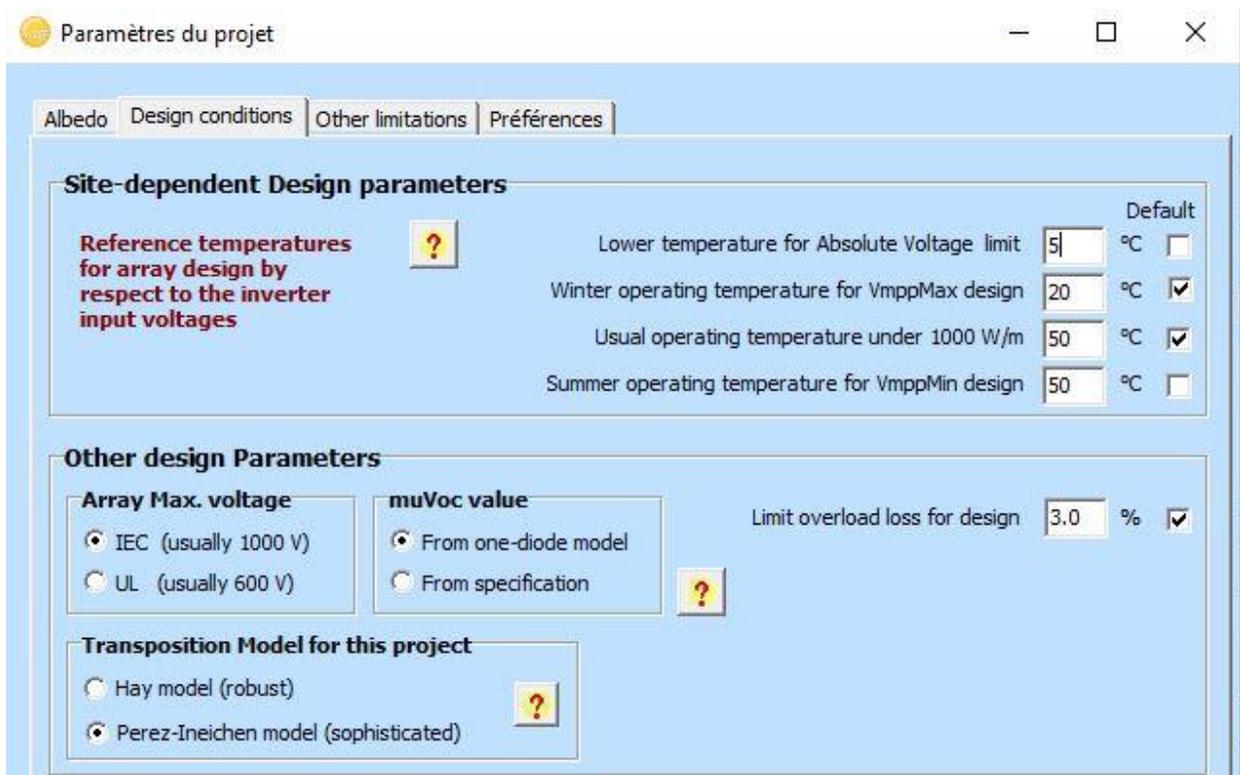


Figure 11: Les paramètres de température et d'influence de l'albédo

Dans la localité de Matiacoali les températures varient entre 5° et 50°C.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali



Figure 12: Paramétrage de l'albédo

La valeur de l'albédo varie en fonction du site il s'agit de la partie du rayonnement solaire qui est renvoyée par les surfaces réfléchissantes en présence.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

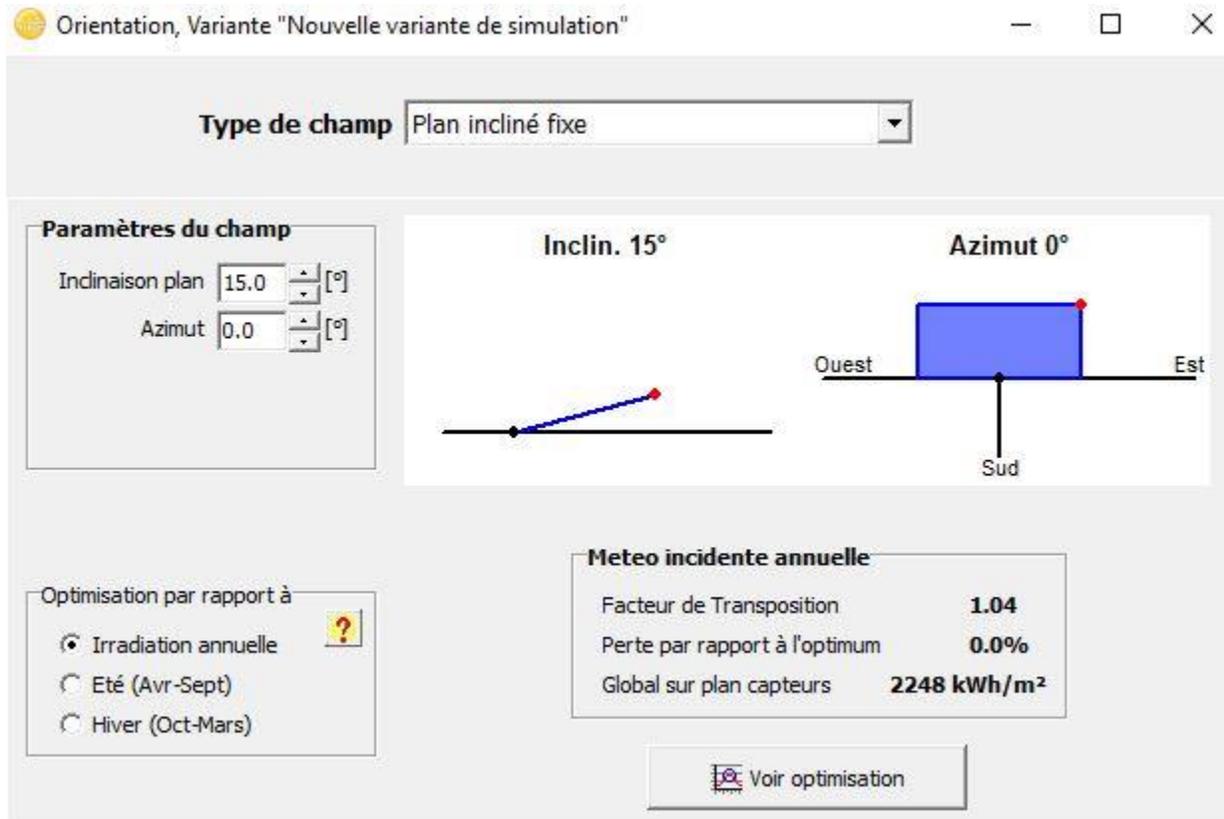


Figure 13: La définition de l'orientation

Au Burkina Faso, l'inclinaison des modules se fait plein sud avec une inclinaison de 15° par rapport à l'horizontale.

Les informations concernant le système ! Il s'agit de définir la puissance que nous voulons produire, faire le choix des équipements (modules, onduleurs), définir le nombre de sous champ.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Définition d'un système réseau, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Configuration globale du système

8 Nombre de types de sous-champs

?

🔗 Schéma simplifié

Résumé système global

Nombre de modules	880	Puissance PV nominale	251 kWp
Surface modules	1427 m ²	Puissance PV maximale	247 kWdc
Nbre d'onduleurs	8	Puissance AC nominale	216 kWac

Sous-champ #1 | Sous-champ #2 | Sous-champ #3 | Sous-champ #4 | Sous-champ #5 | Sous-champ #6 | Sous-champ #7 | Sous-champ #8

Nom et orientation du sous-champ

Nom: Sous-champ #1 Ordre: 1

Orient. **Plan incliné fixe**

Indinaison: 15° Azimut: 0°

Aide au dimensionnement

Pas de prédim. Entrez Pnom désirée: 31.4 kWc

Redimens. ou surface disponible(modules): 183 m²

Sélection du module PV

Tous les modules Filter: All PV modules Modules nécessaires approx. 110

Axitec Energy 285 Wp 27V Si-poly AXIpower HC AC-285PH/120S Since 2019 Manufacturer 2019 Ouvrir

Dimens. des tensions :p (50°C) 28.7 V Voc (10°C) 40.8 V

Use Optimizer

Sélection de l'onduleur

Disponibles Output voltage 400 V Tri 50Hz 50 Hz 60 Hz

Fronius International 27 kW 580 - 850 V TL 50/60 Hz ECO 27.0-3-S Since 2015 Ouvrir

Nbre d'onduleurs: 1 Tension de fonctionnement: 580-850 V Puissance globale ond. 27.0 kWac

Tension entrée maximale: 1000 V **Onduleur "string" avec 6 entrées**

Dimensionnement du champ

Nombre de modules et chaînes

Mod. en série: 22 entre 21 et 24

Nb. chaînes: 5 entre 4 et 5

Perte sur-puissance 0.0 % Rapport Pnom 1.16 Voir conditions

Nbre modules: 110 Surface: 183 m²

Conditions de fonctionnement

Vmpp (50°C)	632 V
Vmpp (20°C)	717 V
Voc (10°C)	897 V

Irradiance plan: 1000 W/m²

Imp (STC): 44.6 A Isc (STC): 47.1 A Isc (aux STC): 47.1 A

Max. données STC

Puiss. max. en fonctionnement à 1000 W/m² et 50°C: 28.2 kW

Puiss. nom. champ (STC): 31.4 kWp

Figure 14: La définition de la configuration du système

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

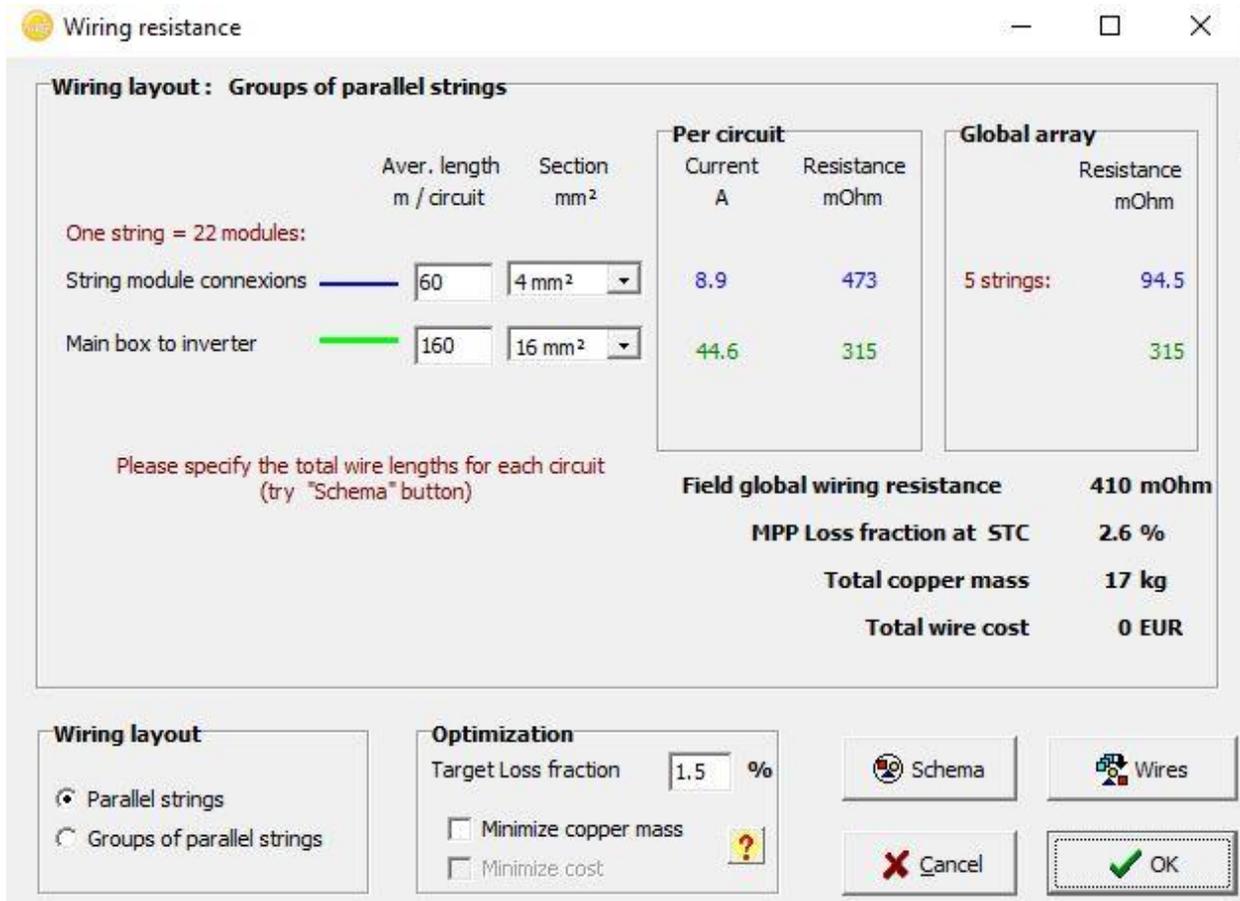


Figure 15: Les sections de câbles recommandées

La section de 4 mm² minimum pour les câbles allant des modules à la boîte de jonction et le 16 mm² de la boîte de jonction à l'onduleur.

Le schéma simplifié du champ connecté au réseau, peut se représenter comme suit :

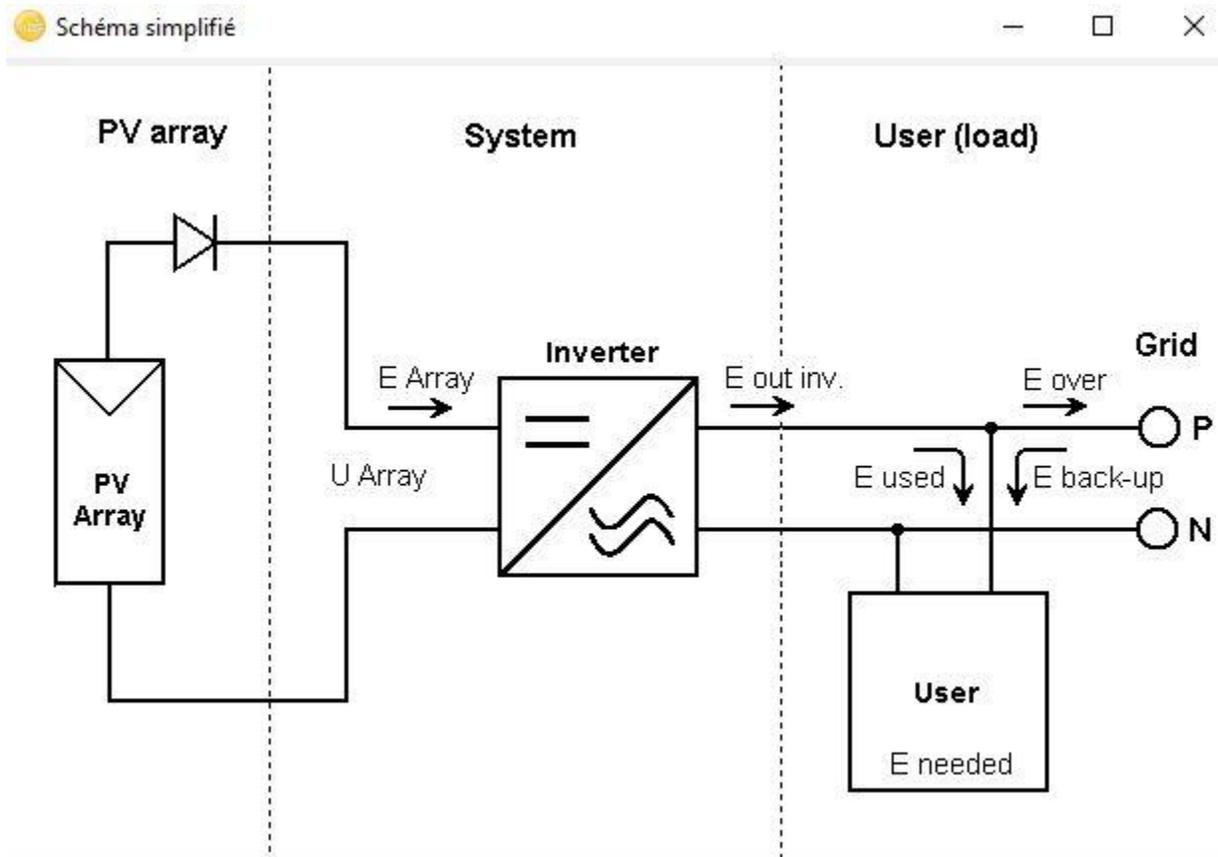


Figure 16: Schéma simplifié du système

V Etude financière

La décomposition des investissements engagés pour la réalisation de la centrale est résumée dans le tableau 10 ci-après.

Tableau 12: Récapitulatif général pour la réalisation de la centrale

Fourniture, installation et raccordement de la centrale	
Désignation	Montant (Ffca)
Travaux préparatoires	5 450 000
Fourniture et installation de la centrale	237 317 125
Injection sur le réseau HTA	17 301 536
Mise en service et formation	5 250 000
Total HT 1	265 318 661
Montant de la TVA(18%)	47 757 358,98
<i>Total 1 TTC</i>	<i>313 076 020</i>
Génie civil	
Administration	27 624 740
Local Onduleurs	17 816 576
Mur de clôture grillagée	12 651 200
Logement gardien	7 995 910
Latrines	1 956 080
Total HT 2	68 044 506
Montant de la TVA(18%)	12 248 011,08
<i>Total 2 TTC</i>	<i>80 292 517,08</i>
TOTAL TTC	393 368 537,1

Pour la suite de notre étude, chacune de ces valeurs correspond à la VAN (valeur actuelle net) des coûts et de l'énergie.

La durée de vie considérée est de 25 ans, les modules ont une durée de vie de 25 ans, les onduleurs une durée de 10 ans ; ils seront donc remplacés 2 fois durant l'existence de l'ouvrage.

Nous avons alors

$$LCOE = \frac{408\,867\,391,46}{11320000} = 36,12 \text{ Fcfa/kWh}$$

LCOE= 36,12 Fcfa/kWh

VI Résultats et Analyse

Nous allons maintenant faire une synthèse des résultats obtenus dans la partie dimensionnement et par la suite nous ferons aussi les analyses de ces différents résultats. Les études, analytiques et par le logiciel nous ont conduit à des résultats assez similaires. Le tableau 11, qui fait une synthèse des principaux résultats.

Tableau 13: Comparaison des résultats de la méthode analytique et ceux de la méthode logiciel

Paramètres	Résultats obtenus par la méthode analytique	Résultats obtenu par la méthode logiciel
Puissance crête attendue (kWc)	250,8	250,8
Nombre de modules	880	880
Nombre de modules par sous champ	110	110
Nombre de strings par sous champ	5	5
Nombre de modules par string	22	22
Nombre d'onduleurs	8	8

Nous remarquons aucune différence. Nous avons les mêmes valeurs par la méthode analytique que par la méthode logiciel.

✚ Résultats et analyse de la méthode analytique

Le tableau 12 résume les résultats obtenus après les vérifications sur l'onduleur choisi

Tableau 14:Vérification des paramètres de l'onduleur

Vérifications	Fronius Eco 27 .0-3-S	
	Calculs	Spécification
Tension nominal	$22*39,9= 877,8$ OK	$877,8 < 1000$
Plage MPPT	$22*31= 682$ OK	$580 < 682 < 850$
Courant entré de l'onduleur	$5* 9,2= 46$ OK	$46 < 47,7$
Ratio de puissance	$37,8/31,35 = 1,2$ OK ³	$110 < 1,2$
Rendement	98,30%	

Nous constatons que tous les paramètres de contrôle sont au vert. Ce qui nous confirme que le choix que nous avons effectué au niveau des équipements est acceptable. Il est aussi important de tenir compte de la possibilité d'ilotage[15]

✚ Résultats et analyse de la méthode logiciel

A l'issu des différentes simulations sur PVsyst, la définition du nombre de sous champ dans notre centrale.et de la puissance crête à installer, le choix des modules et des onduleurs se sont fait suivant les exigences du cahier de charge. Les choix se sont portés sur les modules de la marque BISOL Si-mono de 285W et les onduleurs sont ceux du fabricant Fronius International modèle Eco 27.0-3-S de 27 kVa. Nous constatons que le ratio de puissance que nous avons avec ce

³ Nous constatons que notre ratio est en dehors de la plage recommandée $110\% < 120\%$. Cependant l'onduleur que nous avons choisi intègre la fonctionnalité du point de fonctionnement dynamique pour limiter la puissance. Le surplus de puissance de 10% sera bridé par l'onduleur

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Le système est dans la plage conseillée 1,16 et qu'il y'a pas de pertes de puissance au niveau de l'onduleur.

A partir des histogrammes générés avec le logiciel nous constatons que le gros des pertes est localisé au niveau de la collecte du rayonnement solaire puis viennent les pertes systèmes et les pertes à la sorties des onduleurs.

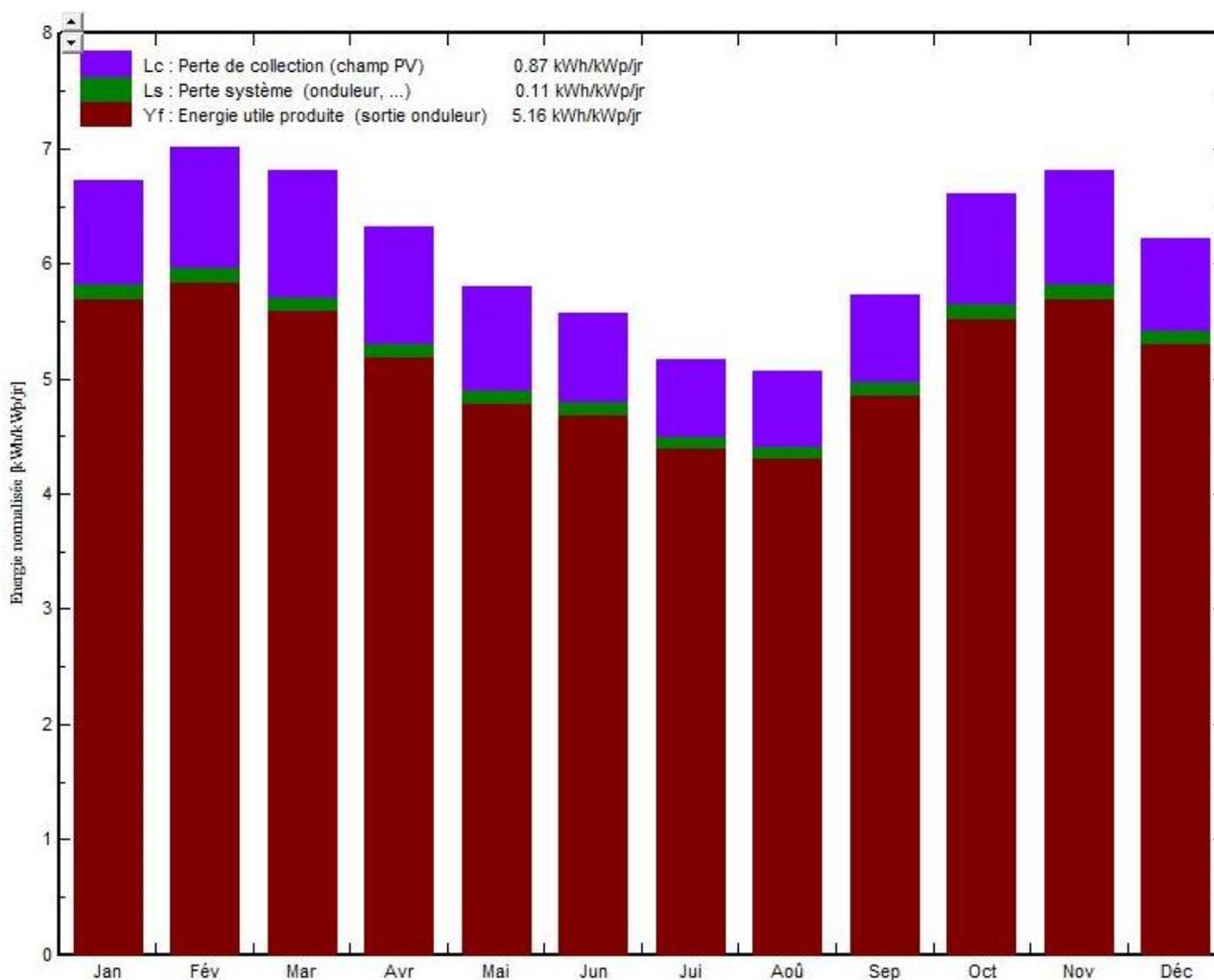


Figure 17: Production mensuelle de la centrale de Matiacoali

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Les simulations nous permettent de voir que les période de fortes productions sont durant les 3 premiers et les 3 derniers mois de l'année. L'indice de performance de l'ensemble de notre système varie entre 0,849 et 0,821. Aussi la production n'est pas coréllée à l'irradiation globale horizontale qui peut être forte mais l'énergie injectée sur le réseau n'est pas la valeur maximale. Il y'a dautre paramètres qui influencent la production PV. Il s'agit de la température ambiante,les ombrages ainsi que l'indice plan des capteurs. Les mois de janvier et de mars le montrent.

Nous constatons aussi que durant les mois ayant une forte irradiation diffuse horizontale la production d'énergie diminue. L'annexe 10 résume l'ensemble des données sur une année.

Résultats et analyse de la partie financière

Le tableau 13 renferme les différents coûts qui sont considérés pour les différents calculs et les résultats obtenus.

Tableau 15:Récapitulatif de l'analyse financière

Désignation	Chiffres
Coût initial d'investissement (Fcfa)	393 368 537
Coût d'exploitation annuel (entretien et maintenance) (Fcfa)	1.000.000
Energie totale produite sur la durée de vie (MWh)	452.8
Coût total de la centrale sur sa durée de vie (Fcfa)	448 671 417
LCOE (Fcfa/kWh)	36,12

■ Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Le LCOE de notre centrale est de 36,12 Fcfa en le comparant au coût de production d'un kWh thermique qui est de 125,44 Fcfa [16]. Nous nous rendons compte que le coût du kWh thermique est nettement supérieur au coût de production du kWh solaire. Cela nous montre que la production de notre central est plus intéressante. Elle permettra à la population d'avoir l'énergie électrique à un coût plus abordable.

Il faut ajouter à cela que le LCOE de notre centrale est relativement bas en comparaison aux autres projets au Burkina Faso. Cette comparaison est faite par rapport à la centrale de Zagtoulie de la SONABEL qui a un cout de production de 75 francs CFA/kWh.

La technologie hydro-électrique a le coût moyen actualisé de production de l'énergie le plus faible. Cependant cette dernière n'est pas viable au Burkina Faso du fait de la faible pluviométrie et du manque de retenue d'eau pérennes [8]

L'Etat burkinabé par son ministère en charge de l'énergie entreprend de plus en plus des projets en vue d'accroître l'accès à l'électricité aux populations rurales et ainsi d'accroître le taux d'électrification au Burkina Faso.

Conclusion et Recommandations

Il ressort au terme de notre étude que la centrale solaire photovoltaïque présente un grand intérêt ; elle permet de satisfaire la demande d'énergie électrique et l'accroissement des taux d'électrification et de couverture nationale. La construction de cette centrale soulagera le quotidien des populations vivant dans cette commune. Il est important de pouvoir utiliser l'électricité aussi bien pour les services de défense et de sécurité que pour les centres de soins. Car la région de l'Est est en zone d'insécurité. Le transformateur utiliser pour notre centrale n'est pas approprié car sa puissance est juste. Nous recommandons un transformateur de 400 Kva à la place du transformateur de 250 Kva déjà en place.

Pour un fonctionnement optimal de la centrale nous faisons les recommandations suivantes:

- ❖ Mettre en place un planning d'entretien et de maintenance des différents équipements. Cela va du nettoyage régulier des modules, au soufflage des onduleurs et aussi du local technique;
- ❖ Des inspections régulières du site de production, pour détecter des anomalies comme des modules cassés ou endommagés, s'assurer que des animaux ou des insectes n'ont pas endommagé les câbles, vérifier que les BJP sont toujours bien étanches aux infiltrations d'eau surtout pendant la saison pluvieuse
- ❖ Former des agents locaux pour des interventions l'entretien et la maintenance de la centrale rapide pour assurer la continuité de service.

Bibliographie

- [1] sectorielle, Ministère de l'énergie en collaboration avec la direction générale des études des statistiques, « Stratégie dans le domaine de l'énergie 2019-2023 », 2018.
- [2] Ministère de l'énergie des mines et des carrières, « PLAN DIRECTEUR NATIONAL PRODUCTION-TRANSPORT-DISTRIBUTION ET D'ELECTRIFICATION RURALE 2017 – 2025 ». Juin 2017.
- [3] ARSE, « Rapport d'activité 2019 de l'Autorité de Régulation du Secteur de l'Energie », ARSE, Ouagadougou, Burkina Faso, janv. 2021.
- [4] (DGESS), Direction générale des études et des statistiques sectorielles, « Tableau de bord 2018 du ministère de l'énergie ». déc. 2019.
- [5] ecowapp, « Rapport annuel 2020 Système d'Echanges d'Energie Electrique Ouest Africain », 2020. [En ligne]. Disponible sur:
https://www.ecowapp.org/sites/default/files/rapport_annuel_wapp_2020_fin_11.pdf
- [6] TRACTEBEL ENGINEERING S.A, « Etude de la stabilité du réseau électrique du Burkina Faso pour l'intégration de la production solaire: Rapport de collecte de données », 2019.
- [7] Assemblée nationale, al., « Décret N° 2019-0902 / PRES/PM/ME/MINEFID/MCIA portant modalité d'accès des auto producteurs d'énergies renouvelables au réseau électrique et conditions de rachat de leur excédent d'énergie. » 2019.
- [8] S. SEMPORE, « Etude comparative de la viabilité des technologies de production d'électricité en Afrique de l'ouest en utilisant le LCOE cas du Burkina Faso (mémoire de master) », Ouagadougou, Burkina Faso, juin 2014.
- [9] Helioscope, « Hélioscope shading reporte dimensionnement ». 2020.
- [10] (INSD), Institut National de la statistique et de la démographie, al, « Rapport préliminaire du cinquième recensement général de la population et de l'habitat », Burkina Faso, 2020.
- [11] MOINE, Gérard, *L'électrification solaire photovoltaïque*, Observ'ER. 2016.
- [12] afnor, al., « Norme française NFC 15-100 Installation électrique basse tension ».
- [13] Dr Ahmed O BAGRE, « Dimensionnement Technique des installations PV connectées réseau , note de cours 2iE ». 2017.
- [14] Walter Short, Daniel J. Packey, and et Thomas Holt, « A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies ». mars 1995.
- [15] H. Colin (CEA-INES), al., « Ilotage des installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique: Règlements, méthodes de détection et retours de terrain », 2011.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

[16] Société Nationale d'Electricité du Burkina, « Rapport d'activités 2020 de la SONABEL », Ouagadougou, Burkina Faso, 2020.

Annexes

ANNEXE 1: PROJET DE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE AU BURKINA FASO

N°	Porteur de projet	Puissance installée	Statut	Date de mise en service escomptée	Emplacement dans le pays
1	SONABEL Financement UE/AFD	33 MWc	Exploitation	2017	Zagtouli
2	SONABEL Financement Chine Taiwan	1.1 MWc	Exploitation	2017	Ziga
3	SONABEL Financement BEI	17 MWc	En négociation	2022	Zagtouli
4	Ministère de l'énergie (projet PASEL) SONABEL, Agence d'exécution Financement BM (Projet	20 MWc	DAO publié	2020	Koudougou
5	Ministère de l'énergie (projet PASEL), SONABEL, Agence d'exécution Financement BM (Projet	10 MWc	DAO publié	2020	Kaya

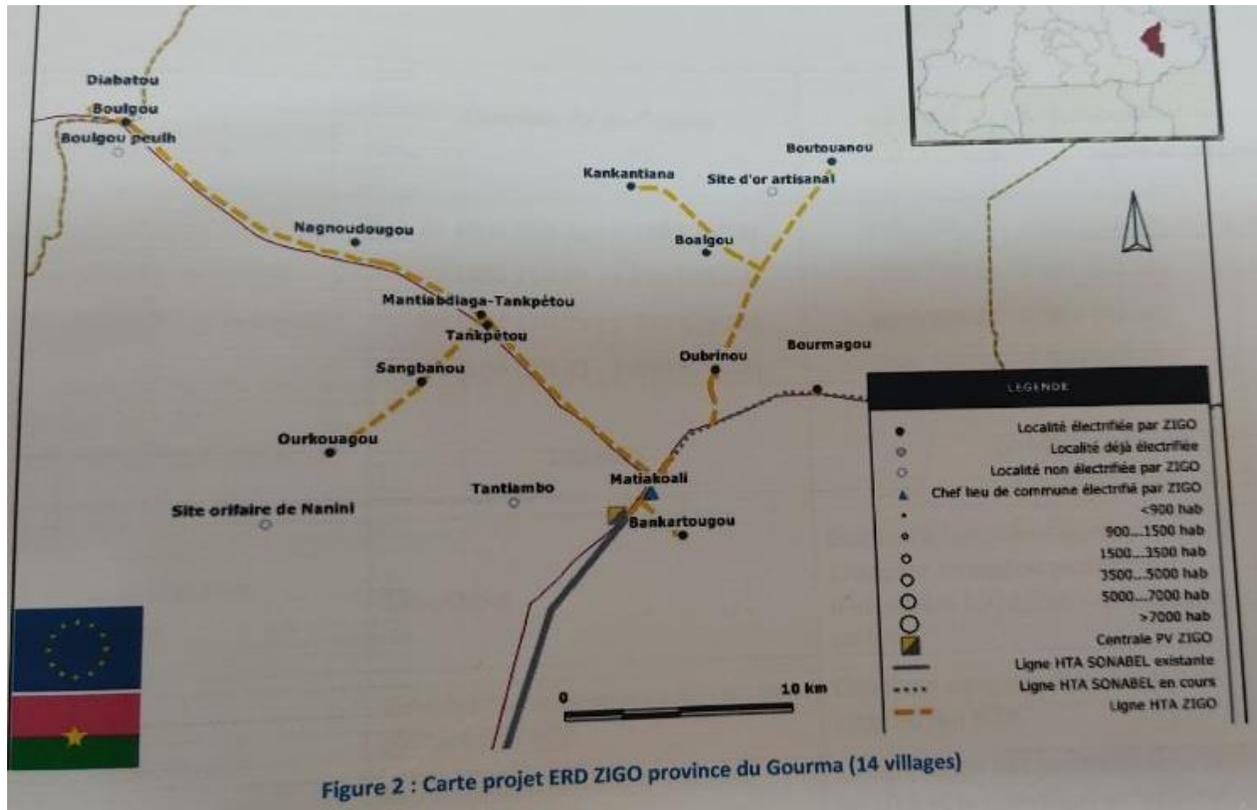
Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

7	Programme YELEEN SONABEL, Agence d'exécution Financement AFD/BAD	6 MWc	Etude en cours	2021	Dori
8	GREEN YELLOW	30 MWc	Accord du Conseil des Ministres du 14/ 11/18 pour la signature des contrats PPP	2021	Ouagadougou
9	AFRICA-REN (GREEN WISH)	38 MWc	Accord du Conseil des Ministres du 14/11/18 pour la signature des contrats PPP et PPA	2021	Bobo- Dioulasso
10	WAPP/SONABEL	150 MWc	Etude en cours	2024	Kaya-Koupéla
11	SOLTECH/QUATRAN/SYSCOM	24 MWc	Accord du du conseil des ministres du 14/11/2018 pour signature des contrats PPP et PPA	2021	Tenkodogo (Zano)

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

12	QUATRAN/SYSCOM	18 MWc		2021	Dédougou
13	NAANGE	36 MWc		2021	Kalzi
14	URBASOLAR	30 MWc		2021	Pa
15	AFRICA-REN (GREEN WISH)	38 MWc		2021	Bobo-Dioulasso
16	SONABEL financement KFW	14MWc+ stockage de 4 MW	Etude en cours	2021	Matruku (Bobo)

ANNEXE 2 : CARTE DU PROJET ZIGO PROVINCE DU GOURMA

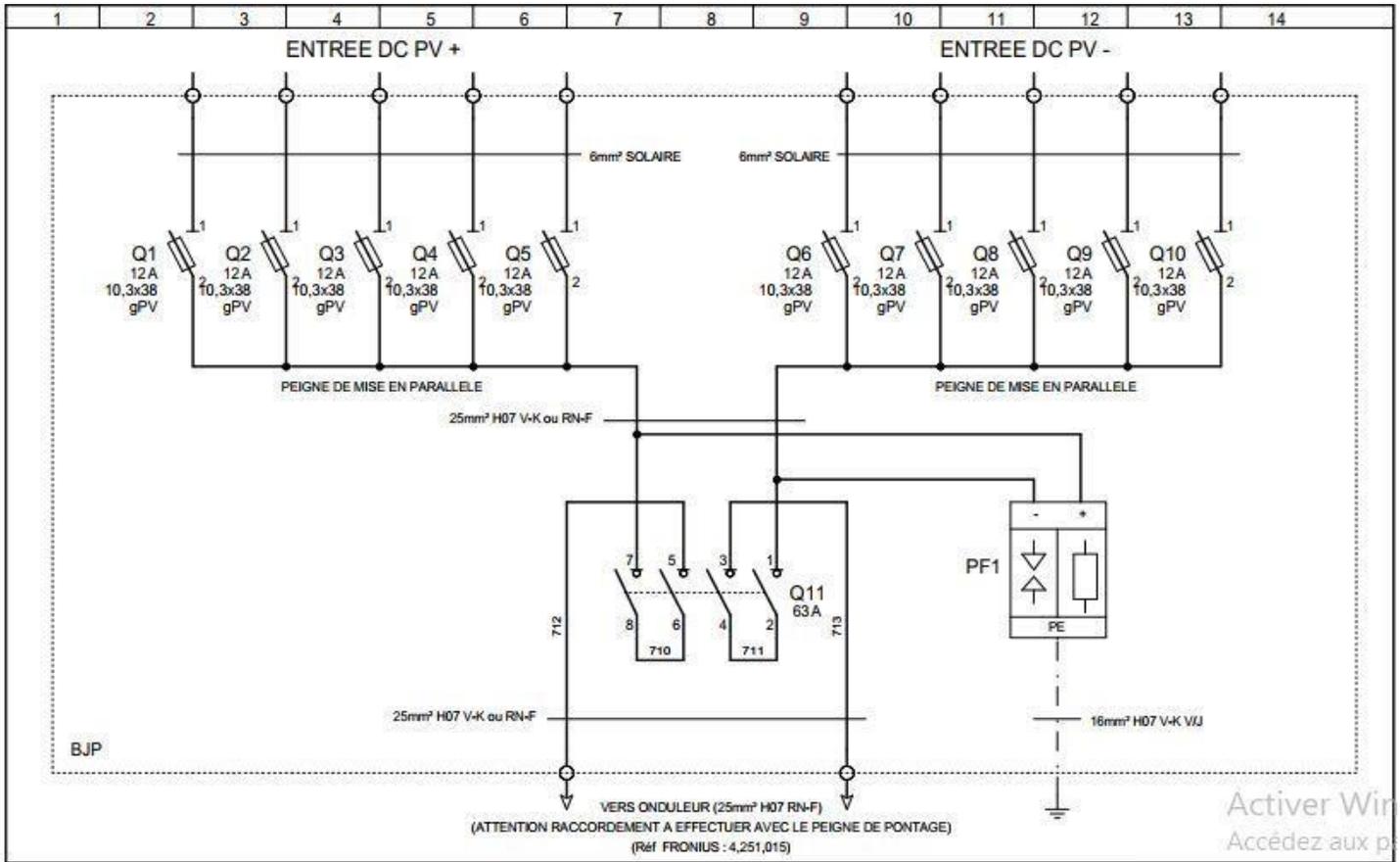


Numéro	Localités	Numéro	localités
1	Diabatou	8	Matiacoali
2	Boulgou	9	Oubrinou
3	Nagnoudougou	10	Bourmagou
4	Mantiabdiaga	11	Boalgou
5	Tank pétou	12	Kankantiana
6	Sangbanou	13	Boutouanou
7	Ourkouagou	14	Bankartougou

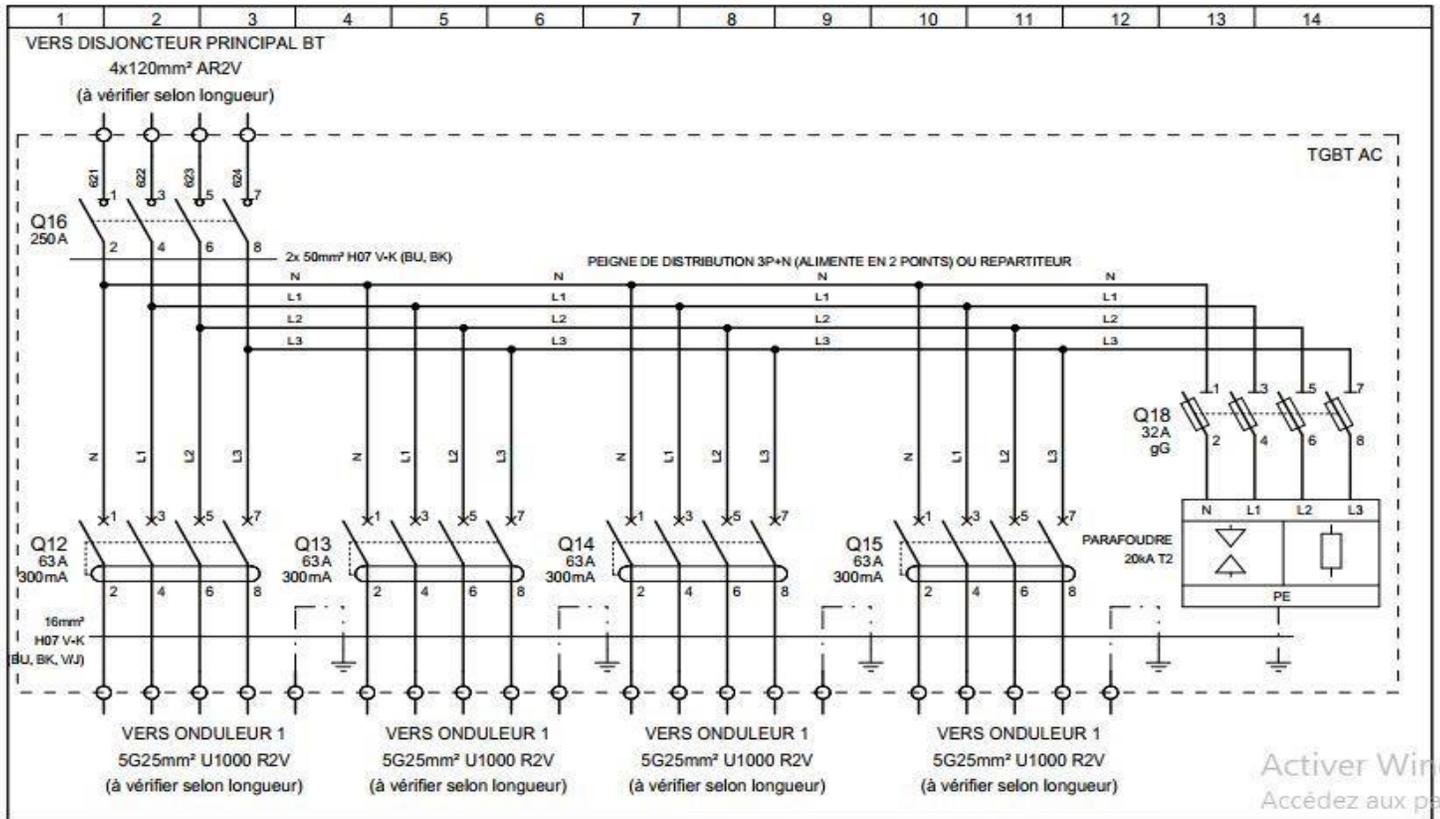
ANNEXE 3: DONNEES RELATIVES A L'ENVIRONNEMENT

Région	Est
Province	Gourma
Type	Commune rurale
Température	+5°C à +50°C
Altitude	Inférieur à 400 m
Humidité relative	Jusqu'à 100% en période humide et variant entre 40 et 90% en période sèche
vitesse du vent	Jusqu'à 120 km/h
Nature du vent	chargé de sable
Précipitations	Pluie battante continue
Nature de l'air	fortement poussiéreux
Animaux	Présence de nombreux insectes et rongeurs
Niveau céraunique (Nk)	environ 130/an
Densité de foudroiement (Ng)	environ 20/an/km ²
Pollution	On ne rencontre pas de problème important de pollution autre que la poussière de sable et de latérite en particulier pendant l'harmattan
Rayonnement solaire	Durée de l'ensoleillement journalier est compris entre 6 et 8 heures avec un ensoleillement de 1200W/m ²

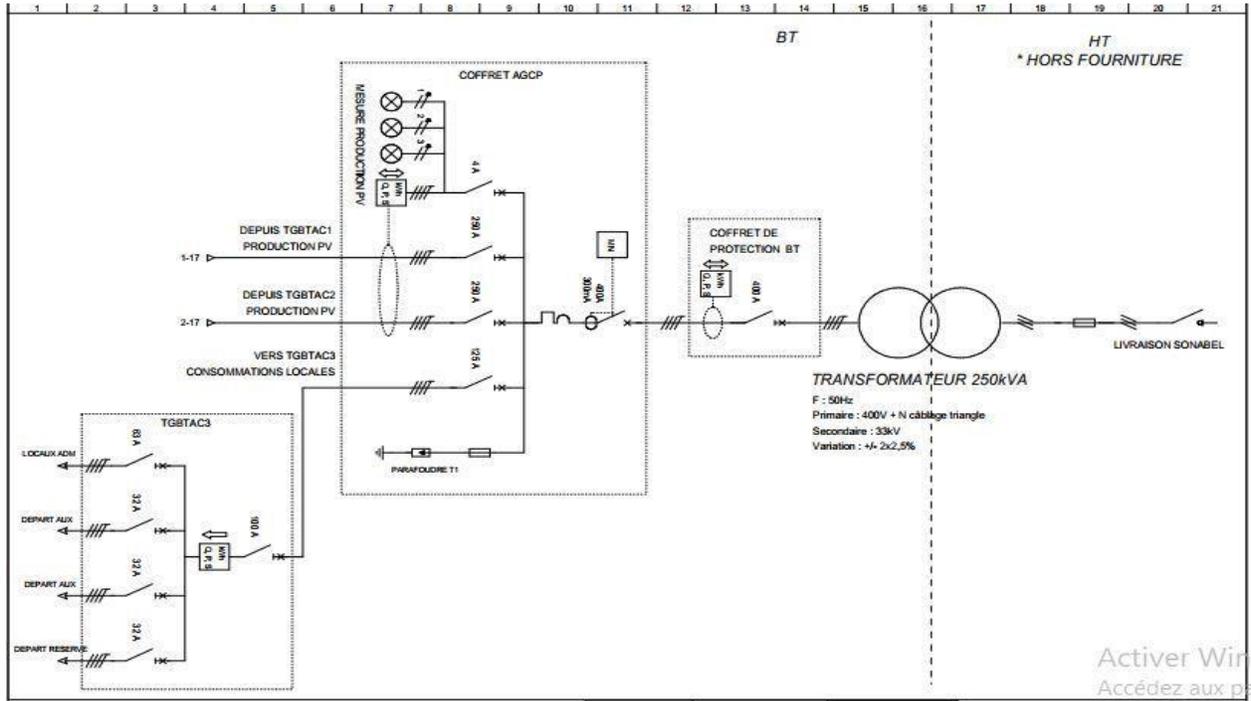
ANNEXE 4 : SCHEMA MULTIFILAIRE DE LA BOITE DE JONCTION



ANNEXE 5: SCHEMA MULTIFILAIRE DU TGBT AC



ANNEXE 6: SCHEMA MULTIFILAIRE DU L'AGCP



Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

ANNEXE 7 CARACTERISTIQUES DU SYSTEME DE MONITORING

Marque	Fronius
Modèle	Fronius solar web, fronius sensor box

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging

Fronius
SHIFTING THE LIMITS

FRONIUS SENSOR CARD / BOX

/ Measuring additional values

/ With the Fronius Sensor Card / Box, up to six sensors for measuring insolation, ambient temperature, module temperature, wind speed, etc. can be integrated into the Fronius DATCOM system. Using the insolation and module temperature data, you are able to check your PV system and quickly identify anomalies in the system output to keep performance at a consistently high level. You can choose between a box and a card.

OVERVIEW OF THE MEASURING SIGNAL INPUTS

The diagram illustrates the monitoring system architecture. It shows a solar module and various sensors (insolation, temperature, wind speed) connected to an inverter with a Datamanager. The inverter is also connected to a Fronius Sensor Card/Box. The Sensor Card/Box is connected to a Fronius Solar web interface and an electricity meter. The electricity meter is connected to the grid. A legend indicates that dashed lines represent communication paths and solid lines represent power paths.

The Fronius Sensor Card / Box offers inputs for up to six measuring signals.

- / Two analogue inputs for two temperature sensors*
- / One analogue input for evaluating a voltage signal (e.g. an insolation sensor)*
- / Two digital inputs, e.g. for an energy meter and a wind speed sensor*
- / One analogue input for evaluating a current signal (0 to 20 mA, 4 to 20 mA)*

In addition to the Fronius Sensor Card / Box, a Fronius Datamanager is required for evaluating the data. This is either fitted as standard in the inverter or can be easily retrofitted.

ANNEXE 8 : CARACTERISTIQUES DE L'ONDULEUR

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging



FRONIUS ECO

/ L'onduleur compact visant des rendements de pointe



/ Technologie SnapInverter



/ Communication de données intégrée



/ Smart Grid Ready



/ Dynamic Peak Manager



/ Zéro feed-in



/ Le Fronius Eco triphasé dont les classes de puissance vont de 25,0 à 27,0 kW, répond de façon optimale aux exigences des grandes installations. Grâce à son faible poids et au système de montage SnapInverter, cet appareil sans transformateur peut être installé facilement et rapidement en intérieur comme en extérieur. La gamme SnapInverter établit de nouveaux standards en matière de sécurité par sa classe de protection IP 66. Son support mural peut recevoir jusqu'à 6 chaînes en direct et intègre des porte-fusibles pour la protection des 2 polarités. Également, une protection contre la surtension en option permet de passer en mode boîte de jonction DC intégrée.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES FRONIUS ECO

DONNÉES D'ENTRÉE	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Courant d'entrée max. ($I_{dc\ max}$)	44.2 A	47.7 A
Courant de court-circuit max. du champ de modules		71.6 A
Tension d'entrée min. ($U_{dc\ min}$)		580 V
Tension de démarrage d'injection ($U_{dc\ start}$)		650 V
Tension d'entrée nominale ($U_{dc,r}$)		580 V
Tension d'entrée max. ($U_{dc\ max}$)		1 000 V
Plage de tension MPP ($U_{mpp\ min} - U_{mpp\ max}$)		580 - 850 V
Nombre de trackers MPP		1
Nombre de connecteurs DC		6
Puissance max générateur PV ($P_{dc\ max}$)		37.8 kWc

DONNÉES DE SORTIE	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Puissance de sortie nominale AC ($P_{ac,r}$)	25 000 W	27 000 W
Puissance de sortie max.	25 000 VA	27 000 VA
Courant de sortie AC ($I_{ac\ nom}$)	37.9 A / 36.2 A	40.9 A / 39.1 A
Couplage au réseau (plage de tension)	3-NPE 380 V / 220 V ou 3-NPE 400 V / 230 V (+20 % / -30 %)	
Fréquence (plage de fréquence)	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Taux de distorsion harmonique	< 2.0 %	
Facteur de puissance ($\cos \varphi_{ac,r}$)	0 - 1 ind. / cap.	

DONNÉES GÉNÉRALES	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Dimensions (hauteur x largeur x profondeur)	725 x 510 x 225 mm	
Poids	35.7 kg	
Indice de protection	IP 66	
Classe de protection	1	
Catégorie de surtension (DC / AC) ¹⁾	1 + 2 / 3	
Consommation nocturne	< 1 W	
Concept d'onduleur	Sans transformateur	
Refroidissement	Refroidissement par air régulé	
Montage	Montage intérieur et extérieur	
Plage de température ambiante	-25 °C / +60 °C	
Humidité de l'air admise	0 - 100 %	
Altitude max.	2 000 m	
Technologie de raccordement DC	Bornes à vis 2.5 - 16 mm ² 6x DC+ et 6x DC-	
Technologie de raccordement AC	Bornes à vis 2.5 - 16 mm ² 5 pôles	
Certificats et conformité aux normes	ÖVE / ÖNORM E 8001-4-712, DIN V VDE 0126-1-1/A1, VDE AR N 4105, CEI 62109-1/-2, CEI 62116, CEI 61727, AS 3100, AS 4777-2, AS 4777-3, CER 06-190, G83/2, G59/3, UNE 206007-1, SI 4777, CEI 0-16, CEI 0-21	

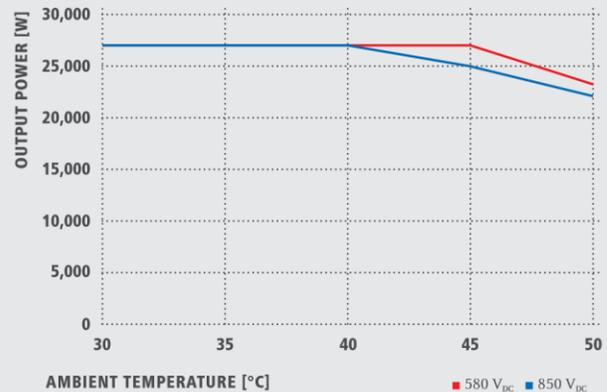
¹⁾ Selon la norme CEI 62109-1. Rail de montage disponible pour la protection contre la surtension de type 2 en option. Plus d'informations concernant la disponibilité des onduleurs sur le site www.fronius.com.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

COURBE DE RENDEMENT FRONIUS ECO 27.0.3-S



TEMPÉRATURE DE DERATING FRONIUS ECO 27.0.3-S



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES FRONIUS ECO

RENDEMENT	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Rendement max.	98.2 %	98.3 %
Rendement européen (ηEU)	98.0 %	98.0 %
η à 5 % P _{ac,r} ¹⁾	95.1 / 91.5 %	95.9 / 93.1 %
η à 10 % P _{ac,r} ¹⁾	97.0 / 95.2 %	96.8 / 95.7 %
η à 20 % P _{ac,r} ¹⁾	97.8 / 96.9 %	97.7 / 97.1 %
η à 25 % P _{ac,r} ¹⁾	98.0 / 97.0 %	98.1 / 97.3 %
η à 30 % P _{ac,r} ¹⁾	98.1 / 97.2 %	98.1 / 97.4 %
η à 50 % P _{ac,r} ¹⁾	98.2 / 97.5 %	98.3 / 97.5 %
η à 75 % P _{ac,r} ¹⁾	98.2 / 97.5 %	98.2 / 97.6 %
η à 100 % P _{ac,r} ¹⁾	98.2 / 97.5 %	98.1 / 97.5 %
Rendement MPP	> 99.9 %	

DISPOSITIFS DE PROTECTION	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Mesure d'isolation DC		Oui
Capacité de surcharge	Déplacement du point de fonctionnement dynamique, limitation de puissance	
Sectionneur DC		Oui
Support de fusible de chaîne intégré ²⁾		Oui
Protection inversion de polarité		Oui

INTERFACES	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
WLAN / Ethernet (LAN)	Fronius Solar.web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)	
6 entrées et 4 entrées/sorties numériques	Connexion au dispositif d'échange d'informations d'exploitation	
USB (connecteur de type A) ³⁾	Datalogging, mise à jour de l'onduleur par clé USB	
2x RS422 (connecteur RJ45) ³⁾	Fronius Solar Net	
Sortie signal ³⁾	Gestion de l'énergie (sortie relais à potentiel zéro)	
Datalogger et serveur Web	Intégrés	
Entrée extérieure ³⁾	Connexion compteur S0 / évaluation protection contre la surtension	
RS485	Modbus RTU SunSpec ou raccordement au compteur	

¹⁾ Et pour $U_{mpp\ min} = U_{dc,r} / U_{mpp\ max}$. ²⁾ En option avec 6 fusibles 15 A / 1 000 V au pôle positif. ³⁾ Également disponible dans la version light.

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging

NOUS AVONS TROIS DIVISIONS ET UNE PASSION : REPOUSSER LES LIMITES DU POSSIBLE.

/ Qu'il s'agisse des techniques de soudage, du photovoltaïque ou des techniques de charge de batterie, notre exigence est clairement définie : être le leader de l'innovation. Avec près de 3 700 collaborateurs dans le monde entier, nous repoussons les limites du possible, et plus de 800 brevets délivrés viennent le confirmer. Alors que les autres avancent lentement, nous progressons à pas de géant. Comme toujours. L'utilisation responsable de nos ressources constitue la base de l'action de notre entreprise.

Vous trouverez d'autres informations relatives à tous les produits Fronius ainsi qu'à nos partenaires commerciaux et représentants sur le site www.fronius.com

v06 Apr 2016 FR

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

ANNEXE 9 CARACTERISTIQUES DES MODULES

BISOL Premium Series
Multicrystalline PV Modules / BMU 275-285 Wp

BISOL
Solar company!

100% EU

- Designed & manufactured in EU
- All relevant certificates
- Module efficiency up to 17.4%
- +5W Strictly positive output power tolerance
- +13% Up to 13% higher real-life performance
- PID free
- 25 yr Supremely low degradation
- Excellent low light performance

Warranties:

Year	BISOL Linear Warranty	Standard Industry Linear Warranty	Standard Industry Tiered Warranty
1	97%	97%	80%
5	95%	95%	80%
10	93%	93%	80%
15	91%	91%	80%
20	89%	89%	80%
25	85%	85%	80%

Linear warranty 25 years 85% power output in 25th year

Product warranty 15 years

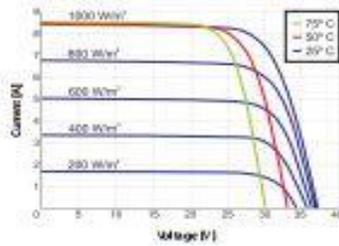
In compliance with:

MWS, Certisolis, CEM3, European Recycling Platform, CE, OVE, IEC 61215 ED1, IEC 61215 ED2, IEC 61701, IEC 61701, IEC 61701, A59033 compliant, AIT, INSTITUTO GIORDANO, MCS.

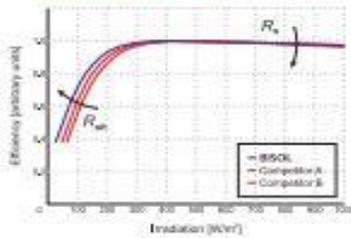
Certificates available upon request. Additional charges may apply.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

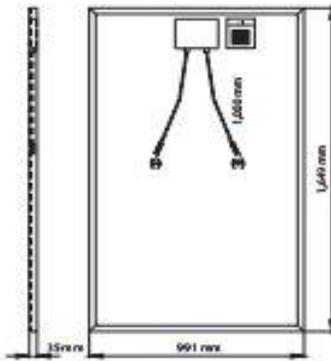
IV Curve at Various Irradiation Levels and Various Cell Temperatures



Effective Efficiency



Dimensions



Frame cross section



Electrical Specifications @ STC (AM1.5, 1,000 W/m², 25 °C):

Module Type	BMU	275	280	285
Nominal Power	P_{MPP} [W]	275	280	285
Short Circuit Current	I_{sc} [A]	9.35	9.50	9.60
Open Circuit Voltage	V_{oc} [V]	39.6	39.7	39.9
MPP Current	I_{MPP} [A]	8.95	9.10	9.20
MPP Voltage	V_{MPP} [V]	30.7	30.8	31.0
Solar Cell Efficiency	η_c [%]	18.6	18.9	19.3
Module Efficiency	η_{st} [%]	16.8	17.1	17.4
Power Output Tolerance			0/+ 5W	
Maximum Reverse Current			18 A	
Maximum System Voltage		1,000 V (Application Class A)		

Additional power classes available upon request. Efficiency at irradiation 200 W/m²: 93.3% of STC efficiency or higher. Power measurement tolerance $\pm 3\%$.

Electrical Specifications @ NOCT (AM1.5, 800 W/m², 20 °C, wind: 1m/s; Cell Temperature 44 °C):

Module Type	BMU	275	280	285
Nominal Power	P_{MPP} [W]	208	207	211
Short Circuit Current	I_{sc} [A]	7.57	7.69	7.77
Open Circuit Voltage	V_{oc} [V]	36.1	36.2	36.4
MPP Current	I_{MPP} [A]	7.25	7.37	7.45
MPP Voltage	V_{MPP} [V]	28.0	28.1	28.3

Power measurement tolerance $\pm 3\%$.

Thermal Specifications:

Current Temperature Coefficient	α	+ 0.049 %/K
Voltage Temperature Coefficient	β	- 0.31 %/K
Power Temperature Coefficient	γ	- 0.40 %/K
NOCT		44 °C
Temperature range		- 40 °C to +85 °C

Mechanical Specifications:

Length x Width x Thickness	1,649 mm x 991 mm x 35 mm
Weight	18.3 kg
Solar Cells	60 multi-j c-Si in series / 156 mm x 156 mm (6+7)
Junction Box / Connectors	Three bypass diodes / MC4 compatible / IP 67
Frame	Anodized AL with drainage holes / rigid anchored corners
Glass	3.2 mm glass with anti-reflective coating / tempered / high-transparency / low-iron content
Packaging	30 modules per pallet / stackable 3 pallets high
Certified Nominal Load (snow/wind)	5,400 Pa / 2,400 Pa
Impact resistance	Hailstone / ϕ 25 mm / 83 km/h (51 mph)

All unspecified tolerances are $\pm 5\%$. Unspecified product properties remain under full discretion of BISOL.

Accédez à
Activer
Solar company!

Dealer information

www.bisol.com | www.bisol.co.uk

Additional terms & conditions apply. Please see Standard Contract Warranty and General Sales Terms & Conditions.
© BISOL Group (solar) May 2019. All rights reserved. All information presented in this document is subject to change without prior notice and serve for informative purposes only.

Conception et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque de 250 kWc injection sur le réseau HTA 33 kV SONABEL à Matiacoali

Annexe 8: Fiche technique du transformateur

CAHORS		FICHE TECHNIQUE N°				F1631AL 00	
Transformateur triphasé immergé à remplissage intégral							
Nombre de phases	Triphasé	Diélectrique	Huile minérale	Type d'huile	CEI 60296		
CONDITIONS D'INSTALLATION							
Fonctionnement	Abaisseur	Type	Cabine		Installation	Extérieure	
Refroidissement	ONAN	Altitude max.	1,000 m				
Température max amb.	40 °C	Norme(s) de référence	CEI 60076				
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES							
Puissance	250 kVA	Fréquence	60 Hz	Couplage	Dyn11		
Puissance acoustique	62 dBA	Echauffement max huile	60 K	Enroulements	65 K		
		Pertes à vide	650 W	Max			
		Pertes en charge à 75°C	3,500 W	Max			
		Pertes totales	4,150 W	Max			
		Primaire		Secondaire			
Tension(s)	33,000 V		400 V				
Réglages tension primaire (%)	±2 x 2.5%						
Réglages tension primaire (volts)	±2 x 825V (±0.4 %)						
Couplage	D		yn				
Tension la plus élevée	36 kV		1.1 kV				
Tenue à fréquence industrielle	70 kV		3 kV				
Tenue au choc foudre	170 kV						
Impédance de court circuit	4.0 % (±10%)						
Courant nominal	4.37 A		361 A				
Nature des conducteurs	Cu		Cu				
Rendements à:		Cos phi = 1	Cos phi = 0.8	Chute de tension		Cos phi = 1	Cos phi = 0.8
Charge = 100%	98.37%	97.97%	Charge = 100%	1.47%	3.39%		
75%	98.62%	98.28%	80%	1.16%	2.71%		
50%	98.79%	98.50%					
25%	98.63%	98.29%					
RACCORDEMENTS							
Appellation	Primaire			Secondaire			
Dénomination	Bornes porcelaines			Bornes porcelaines			
Normes	DT 30Nf 250 DIN 42 531			BF 1-400A			
DIMENSIONNEL							
Encombrement	E1631ALR14						
TRAITEMENT DE SURFACE							
Dégraissage passivation, peinture d'apprêt poudre epoxy 40µ, finition peinture polyester épaisseur 40µ.		720 h		Couleur		RAL 7033	
Equivalence tenue brouillard salin suivant CEI 68							
EQUIPEMENT							
Anneaux de levage	-	Dispositif de remplissage					
Vanne de vidange	-						
Plaque signalétique	-						
ACCESSOIRES EN OPTION							
ESSAIS							
Essais de routine effectués systématiquement sur chaque appareil et faisant l'objet d'un procès verbal:							
- Mesure du rapport de transformation				- Pertes en charge, Tension de court-circuit			
- Mesure des résistances d'enroulement				- Mesure des pertes et du courant à vide			
- Tension appliquée sur enroulements primaires et secondaires				- Essais tension induite à deux fois la tension assignée pendant 30 secondes à 200 Hz.			
- Mesure des caractéristiques en court-circuit							
RED-73-E-008aj	Date	Auteur	Vérificateur				
Indice 06	2020/7/28	WD					
<small>Medium Voltage Division TRANSFOX, une société du Groupe Cahors 636, Avenue de Draguignan - 3 Toulon Est BP 89 - 83078 Toulon Cedex 3 - France www.groupe-cahors.com</small>							
<small>Tel : 33 (0)4 94 08 74 00 Fax : 33 (0)4 94 75 00 28</small>		<small>312 348 810 RCS Toulon - APE 2711Z TVA intracommunautaire FR 72 312 348 810</small>		 			
Toute reproduction partielle ou totale est interdite sans l'autorisation de la société TRANSFOX.							

ANNEXE 10: BILANS ET RESULTATS PRINCIPAUX

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Janvier	181.0	54.40	26.00	208.3	203.5	45.26	44.29	0.848
Février	179.4	63.30	28.10	196.3	191.4	41.94	41.04	0.833
Mars	203.9	74.70	31.80	211.3	205.4	44.40	43.46	0.820
Avril	193.7	84.80	33.20	189.5	183.2	39.90	39.06	0.822
Mai	191.7	89.40	32.50	179.6	173.3	38.08	37.27	0.827
Juin	182.1	85.40	29.70	167.2	161.0	36.08	35.31	0.842
Juillet	172.9	84.40	27.80	160.2	154.1	34.99	34.23	0.852
Août	163.2	94.90	26.90	157.1	151.1	34.34	33.58	0.852
Septembre	169.6	70.40	27.30	171.7	166.2	37.43	36.62	0.850
Octobre	190.7	71.50	29.70	205.0	199.3	43.89	42.95	0.835
Novembre	178.6	47.90	28.20	204.2	199.2	43.81	42.88	0.837
Décembre	164.2	47.00	25.29	192.7	188.0	42.11	41.19	0.852
Année	2171.0	868.10	28.87	2243.2	2175.6	482.22	471.86	0.839

Légendes:	GlobHor	Irradiation globale horizontale	GlobEff	Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages
	DiffHor	Irradiation diffuse horizontale	EArray	Energie effective sortie champ
	T_Amb	Température ambiante	E_Grid	Energie injectée dans le réseau
	GlobInc	Global incident plan capteurs	PR	Indice de performance