

OPTIMISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DU CHAMP PHOTOVOLTAIQUE DE LA CENTRALE SOLAIRE DE ZAGTOULI.

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 16/07/2024 par

Cherif OUEDRAOGO (20170725)

Directeur de mémoire : Dr Y. Moussa SORO, Maître de Conférences CAMES, Chef du département Génie Électrique et Énergétique à 2iE.

Maitre de stage : Ing. Électromécanicien ALBERT SOUBEIGA, Chef du Département Production des Énergies Renouvelables (SONABEL).

Structure d'accueil du stage : Société Nationale d'Électricité du Burkina (SONABEL)

Jury d'évaluation du mémoire :

Présidente : **Dr. Marie TIEMTORE/SAWADOGO**

Membres et correcteurs : **Dr. Moussa KADRI**

Ing. Madieumbe GAYE

Promotion [2023-2024]

DEDICACES

Je dédie ce mémoire

*À mes parents Rasmané OUEDRAOGO et ma défunte
mère Rose OUEDRAOGO ainsi qu'à mes deux frères
et sœur pour leur encouragement et leur soutien
durant toutes ces années d'études.*

*À ma famille, amis et proches et à ceux qui me
donnent de l'amour et de l'encouragement.*

À tous ceux que j'aime.

CITATION

*« L'histoire sera clémente avec moi car j'ai
l'intention de l'écrire. »*

Winston CHURCHILL

*« Le fils ne portera pas l'iniquité de son
père, et le père ne portera pas l'iniquité de
son fils. »*

Ezéchiel 18 : 20

REMERCIEMENTS

Avant de commencer, je tiens à remercier l'Éternel Dieu sans qui rien n'est possible. Je lui suis reconnaissant pour sa bonté, sa bénédiction et sa protection, lui qui guide mes pas depuis toujours.

J'adresse mes remerciements au directeur de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ainsi qu'à l'ensemble de son personnel pour m'avoir offert un cadre de formation et de développement professionnel de haute qualité.

Je profite de l'occasion pour exprimer ma reconnaissance au Dr Y. Moussa SORO, Maître de Conférence CAMES, chef du département Génie Électrique, Énergétique et Industriel de l'institut 2iE, pour la direction de mon mémoire, ses précieux conseils, son orientation efficace et son assistance inestimable.

J'adresse également un grand merci à l'endroit de monsieur Souleymane OUEDRAOGO, Directeur Général de la SONABEL pour m'avoir accordé un stage au sein de sa société

J'adresse un merci particulier à Monsieur Albert SOUBEIGA, mon maître de stage. Je le remercie pour son soutien, ses recommandations, sa disponibilité et de m'avoir permis de profiter de sa haute qualité d'encadrement.

Je tiens à témoigner ma gratitude à Monsieur Thierry TONTEPANBO, chef de la centrale de ZAGTOULI pour ses remarques sincères, son influence et le temps précieux qu'il m'a accordé.

Je tiens à remercier tout le personnel de la centrale, pour son partage d'expérience lors de mon passage à la centrale.

Pour finir, j'adresse ici un sincère merci à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu et ont contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

Ce mémoire traite de l'optimisation technico-économique du champ photovoltaïques de la centrale solaire de Zagtouli. L'étude se concentre sur l'amélioration des performances et de la rentabilité de la centrale, qui est en service depuis cinq ans. Actuellement, la centrale de ZAGTOULI ne fonctionne pas de manière optimale en raison **des diverses pannes récurrentes, des problèmes de découplage avec le réseau et d'un programme de nettoyage des modules** inadéquat pour le contexte géographique du site (zone poussiéreuse, température élevée et humidité). L'analyse technique inclut l'interprétation des différents paramètres de performance de la centrale selon la norme **< IEC 61724 : Photovoltaïque System Performance Monitoring >**. L'étude de l'impact du nettoyage des modules photovoltaïques sur la production de la centrale a conduit à la conclusion qu'un nettoyage hebdomadaire des modules est plus rentable. En effet, l'évaluation des coûts de cycle de vie (CCV), le calcul du Levelized Cost of Energy (**LCOE = 73,36 Fcfa/kWh**) et du Temps de Retour sur Investissement (**TRI= (5,96 ans)**) de la solution d'optimisation avec l'ajout d'un autre tracteur de nettoyage a révélé que cette solution est plus rentable et plus adaptée au contexte de la centrale. D'autres part, le gain monétaire annuel au cas où notre proposition serait mise en œuvre a été estimé à **19 188 138 Fcfa**. Les impacts environnementaux et sociaux de cette solution incluent la réduction des émissions de CO₂ grâce à la production optimisée d'énergie propre et la création d'emploi.

Mots Clés :

- 1 – Centrale Solaire de ZAGTOULI**
- 2 – Energie solaire PV**
- 3 – Optimisation technico et économique**
- 4 – Nettoyage**
- 5 – Optimisation**

ABSTRACT

This thesis deals with the techno-economic optimization of the photovoltaic modules at the ZAGTOULI solar power plant. The study focuses on improving the performance and profitability of the plant, which has been operational for five years. The current state of the ZAGTOULI plant is suboptimal due to recurring breakdowns, grid decoupling issues, and a lack of inadequate module cleaning program suitable for the site's geographical context (dusty area, high temperatures, and humidity). The technical analysis includes interpreting various performance parameters of the plant according to the standard <IEC 61724 : Photovoltaic System Performance Monitoring>. Studying the impact of cleaning the photovoltaic modules on the plant's production led to the conclusion that weekly module cleaning is more cost-effective. Indeed, evaluating the life cycle costs (LCC), calculating the Levelized Cost of Energy (LCOE = 73.36 Fcfa/kWh), and the Return on Investment (ROI = 5.96 years) for the optimization solution with the addition of another cleaning tractor revealed this solution to be more profitable and better suited to the plant's context. Furthermore, the estimated annual monetary gain if our proposal were implemented is 19,188,138 Fcfa. The environmental and social impacts of this solution include reducing CO2 emissions through optimized production of clean energy and job creation.

Keywords :

- 1 – ZAGTOULI Solar power plant**
- 2 – Solar PV energy**
- 3 – Technical and economic optimization**
- 4 – Photovoltaic module**
- 5 – Cleaning**

SOMMAIRE

Dédicaces	i
Citation	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Sommaire	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	x
Liste des abréviations	xi
introduction générale.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DE LA CENTRALE DE ZAGTOULI	2
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : SONABEL.....	3
I.1 Généralité de la SONABEL	3
I.2 Historique	3
I.3 Organigramme	4
II. Compréhension des systèmes photovoltaïques	4
II.1 Généralités sur les énergies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque	4
II.2 Description des systèmes photovoltaïques connecté au réseau	5
III. Présentation de la zone d'étude : la centrale de ZAGTOULI	7
III.1 Ressource humaine de la centrale.....	7
III.2 Localisation et généralités sur la centrale de ZAGTOULI.....	8
III.3 Vue d'ensemble du fonctionnement de la centrale de ZAGTOULI.....	10
III.4 Présentation des composantes de la centrale de ZAGTOULI	12
CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'ETUDE ET DE LA METHODOLOGIE	22
I. Présentation de l'étude	23

I.1	Contexte de l'étude	23
I.2	Justification de l'étude	23
I.3	Objectif de l'étude	24
I.4	Résultats attendus	25
II.	Méthodologie de l'étude.....	26
II.1	Collecte des données	26
II.2	Analyse des données.....	26
II.3	Optimisation des coûts de maintenance et d'exploitation.....	28
II.4	Recommandations pour l'amélioration de la production	28
II.5	Recommandation pour la durabilité	28
CHAPITRE III : ETUDE DES PERSPECTIVES POUR L'OPTIMISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA CENTRALE SOLAIRE DE ZAGTOULI		29
I.	ANALYSE TECHNIQUE.....	30
I.1	Paramètres de surveillance des performances du système PV	30
I.2	Détermination de l'impact des poussières sur la production.....	32
I.3	Détermination des pertes du système à travers le rendement de la production des modules de l'OND 1 du CPI N°9	32
II.	Résultats et discussions	32
II.1	Evaluation des facteurs climatiques influençant la production	32
II.2	Evaluation de l'efficacité globale de la centrale.....	35
II.3	Evaluation des paramètres de surveillance mensuelle de la centrale	36
II.4	Détermination de l'impact des poussières sur la production.....	36
II.5	Détermination des pertes du système à travers le rendement de la production des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9.	39
II.6	Récapitulatif des résultats de l'analyse des performances de la centrale	46
III.	Proposition des solutions retenues pour optimiser la production de la centrale	47
IV.	ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES SOLUTIONS D'OPTIMISATION	49

IV.1	Critères d'optimisation et les paramètres économiques prise en compte	49
IV.2	Les paramètres d'évaluation économique	50
IV.3	Étude de la solution d'optimisation du nettoyage hebdomadaire des panneaux solaires 52	
IV.4	Etude de la solution d'optimisation du système de nettoyage automatique des modules PV 54	
IV.5	Étude de la solution d'optimisation des onduleurs	59
V.	IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL DES DIFFERENTES SOLUTIONS D'OPTIMISATION	60
V.1	Introduction	60
V.2	Méthodologie d'identification et d'évaluation des impacts	61
V.3	Rappel du cadre législatif régissant le projet	61
V.4	Identification et description des activités sources	61
V.5	Évaluation de l'importance des impacts	62
V.6	Plan de Gestion Environnemental et Social	63
	CONCLUSION	64
	RECOMMANDATIONS	65
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66
	ANNEXES	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique des modules SUNMODULE PLUS	13
Tableau 2 : Dispositif de protection des BJ.....	16
Tableau 3 : Caractéristiques des câbles	17
Tableau 4 : Les types de cellules HTA	20
Tableau 5: Caractéristiques d'une cellule HTA	20
Tableau 6 : Récapitulatif des paramètres de performance de la centrale suivant la norme IEC 61724.....	27
Tableau 7 : Récapitulatif des indices de performance de la centrale	32
Tableau 8 : Résultats des analyses des facteurs climatiques	34
Tableau 9 : Tableau comparatif des valeurs du PR et du Yr.....	35
Tableau 10 : Tableau récapitulatif du PR des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9 en fonction des pertes du système.....	39
Tableau 11 : Analyse de l'évolution du rendement journalier	41
Tableau 12 : Récapitulatif des activités spécifiques que pourrait alimenter la perte d'énergie constaté.....	45
Tableau 13 : Perspective de faisabilité des solutions d'optimisations	47
Tableau 14 : Critères d'un bon nettoyage	49
Tableau 15 : Critères d'une bonne maintenance	50
Tableau 16 : Résultat du calcul du coût du cycle de vie	52
Tableau 17 : Résultat du calcul du LCOE de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur	53
Tableau 18 : Résultats du calcul du TRI de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur	53
Tableau 19 : Explication du fonctionnement du programme de nettoyage.....	56
Tableau 20 : Résultat du calcul du coût du cycle de vie de la solution du système de nettoyage automatique	57
Tableau 21 : Résultat du calcul du LCOE de la solution du système de nettoyage automatique	57
Tableau 22 : Résultats du calcul du TRI de la solution du système de nettoyage automatique.....	58
Tableau 23 : Proposition de différentes solutions au défauts récurrents des onduleurs.....	59
Tableau 24 : Description des activités sources d'impact	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Sources d'énergie renouvelable 2021(IRENA)[5]	5
Figure 2 : Principe de production de l'énergie solaire[8].....	7
Figure 3 : Vue satellitaire de la centrale de Zagtouli	8
Figure 4 : Principe de fonctionnement de la centrale.....	11
Figure 5 : Structure électrique d'une ligne de production [8].....	12
Figure 6 : Cotation d'une cellule SUNMODULE PLUS.....	14
Figure 7 : Structure fixe de type paysage	14
Figure 8 : Représentation d'une boîte de jonction	15
Figure 9 : Onduleur Max 1165 TL	18
Figure 10 : Transformateur Pauwels 2,33 MVA dans son enclave grillagée.....	19
Figure 11 : Cellules HTA AO1, AO2, AO3.....	21
Figure 12 : Chaîne des rendements aux différentes étapes de la conversion d'énergie d'un système PV.....	30
Figure 13 : Évolution des indices de performance de l'année 2023	36
Figure 14 : Courbe combinée de l'ensoleillement et de la production de l'énergie.....	37
Figure 15 : Courbe de l'évolution du PR des modules de l'onduleur 1 du CPI N°9	41
Figure 16 : Représentation de l'évolution de production en fonction des pertes sur le cycle de nettoyage.	42
Figure 17 : Représentation du grafcet fonctionnel	55

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AFD	Agence Française de Développement
BJ	Boite de jonction
BM	Banque Mondiale
CAPEX	Dépenses en capital (Capital Expenditures)
CPI	Centre Photovoltaïque Intégré
DPER	Département de Production des Energies Renouvelables
EIES	Étude d'Impact Environnemental et Social
FCFA	Francs des Communautés Françaises en Afrique
GWh	Gigawattheure
HT	Haute Tension
IRENA	Agence Internationale pour les Energies Renouvelables
km	Kilomètre
km²	Kilomètre carré
kWh	Kilowattheure
m²	Mètre carré
MT	Moyenne tension
MWh	Mégawattheure
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
OPEX	Dépenses d'exploitation (Operating Expenditures)
PGES	Plan de gestion Environnemental et Social
PV	Photovoltaïque
UE	Union Européenne
TRI	Temps de Retour sur Investissement
SONABEL	Société Nationale d'Électricité du Burkina

INTRODUCTION GENERALE

L'Internationale Renouvelables Energy Agency (IRENA) prévoit qu'à l'horizon 2050, jusqu'à 90% de l'approvisionnement mondial en énergie pourrait provenir de sources renouvelables, avec une part significative de l'énergie solaire photovoltaïque. Cette projection fait partie de la stratégie d'IRENA visant à limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels. Ces prévisions et recommandations sont détaillées dans leurs rapports intitulés « World Energy Transitions Outlook ».[1] L'énergie solaire photovoltaïque qui est une source d'énergie renouvelable et inépuisable à l'échelle humaine est une des voies technologiques par excellence pour atteindre cet objectif. Particulièrement adaptée aux pays des régions sahéliennes comme le Burkina Faso qui bénéficient de niveaux d'ensoleillement parmi les plus élevés au monde avec une irradiation solaire quotidienne moyenne pouvant atteindre 5 à 7 kWh/m². De plus, de nombreux pays comme le Burkina Faso bénéficient de soutiens financiers et techniques de la part d'organisations internationales, ce qui facilite le développement de projets solaires à grande échelle. La centrale solaire de ZAGTOULI, située près de Ouagadougou est un parfait exemple illustrant cette situation car elle est l'une des plus grandes installations photovoltaïques de la sous-région. Elle a été conçue pour répondre à la demande croissante d'énergie propre et pour réduire la dépendance du pays aux combustibles fossiles. Cependant, malgré son potentiel considérable, la centrale fait face à plusieurs défis techniques et économiques qui affectent sa performance globale.

Comment optimiser la performance et la rentabilité de la centrale solaire de ZAGTOULI en surmontant les défis techniques et économiques ?

Dans le présent mémoire, une étude technico-économique de l'optimisation de l'exploitation de la centrale photovoltaïque de Zagtouli a été développée. Plusieurs paramètres feront l'objet d'une présentation, il s'agira entre autres de l'énergie annuelle produite, des indicateurs de performance et les techniques d'optimisation réalisable d'un point de vue économique.

Enfin, la conclusion résume les principaux résultats obtenus et propose des recommandations, complétées par diverses annexes pour plus d'éclaircissements.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DE LA CENTRALE DE ZAGTOULI

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : SONABEL

I.1 Généralité de la SONABEL

La Société Nationale d'Électricité du Burkina (SONABEL) est une société d'état au capital de soixante-trois milliards trois cent huit millions deux cent soixante-dix mille (63 308 270 000) Francs CFA exclusivement détenu par l'état burkinabè. Elle relève de la tutelle de trois ministères à savoir : le Ministère de l'Énergie, des Mines et des Carrières pour la tutelle technique ; le Ministère de l'Économie, des Finances et du Développement pour la tutelle financière ; et le Ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat pour la tutelle de gestion.[2]

La SONABEL a pour rôle la production, l'importation, le transport et la distribution de l'énergie électrique sur toute l'étendue du territoire du Burkina Faso. Pour atteindre ses objectifs et être en conformité avec la politique environnementale actuelle qui est orientée sur la transition vers les énergies renouvelables, elle met en œuvre de grands projets d'investissement allant dans ce sens tels que la centrale solaire de 33 MWc de ZAGTOULI.

I.2 Historique

La SONABEL est une entreprise publique depuis le 14 avril 1995. Son capital, initialement de 46 milliards de francs CFA, a été augmenté à 63 308 270 000 francs CFA le 15 juillet 2013. Le siège social de la société est situé à Ouagadougou. En 1976, la SONABEL avait le statut d'Établissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC). Depuis sa création, elle a subi plusieurs modifications, tant au niveau financier qu'au niveau de sa dénomination. Elle a été connue sous les noms d'Énergie de l'Afrique-Occidentale Française (ENERGIE AOF), de Société Africaine d'Électricité (SAFELEC) et de Société Voltaïque d'Électricité (VOLTELEC). SONABEL a longtemps été le seul opérateur ayant le monopole de la production, du transport et de la distribution de l'électricité au Burkina Faso.

Depuis 1998, l'état a permis l'entrée de producteurs indépendants dans le secteur de l'électricité. Cependant, aucun acteur privé n'a encore investi dans la production d'électricité. En décembre 2000, le gouvernement burkinabé a publié un document intitulé « Lettre de Politique de Développement du Secteur de l'Énergie », destiné à guider les réformes énergétiques dans le pays et à détailler la stratégie gouvernementale dans ce domaine.

La loi n°012-2011/AN du 4 juillet 2011, autorisant la privatisation de la SONABEL, a été

adoptée par l'Assemblée nationale. Cependant, bien que le processus de privatisation ait été lancé, il a été abandonné par la suite.[3]

I.3 Organigramme

La SONABEL est dirigée par un Conseil d'Administration, qui constitue l'organe décisionnel suprême de la société. Ce conseil est composé de 9 membres, dont 8 représentent l'État et les travailleurs. Le commissariat aux comptes est assuré par le cabinet ACECA International. La gestion quotidienne de la SONABEL est assurée par un directeur général, qui exerce ses fonctions conformément au décret n°97-599/PES/PM/MEM/MCIA du 31 décembre 1997[4], approuvant les statuts de la SONABEL. **Annexe I :Présentation**

II. COMPREHENSION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 Généralités sur les énergies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque

Les énergies renouvelables jouent un rôle fondamental dans la transition énergétique mondiale, offrant des solutions durables pour répondre aux besoins croissants en électricité tout en réduisant l'empreinte carbone. Ces sources d'énergie tirent leur puissance de ressources naturelles inépuisables telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse.

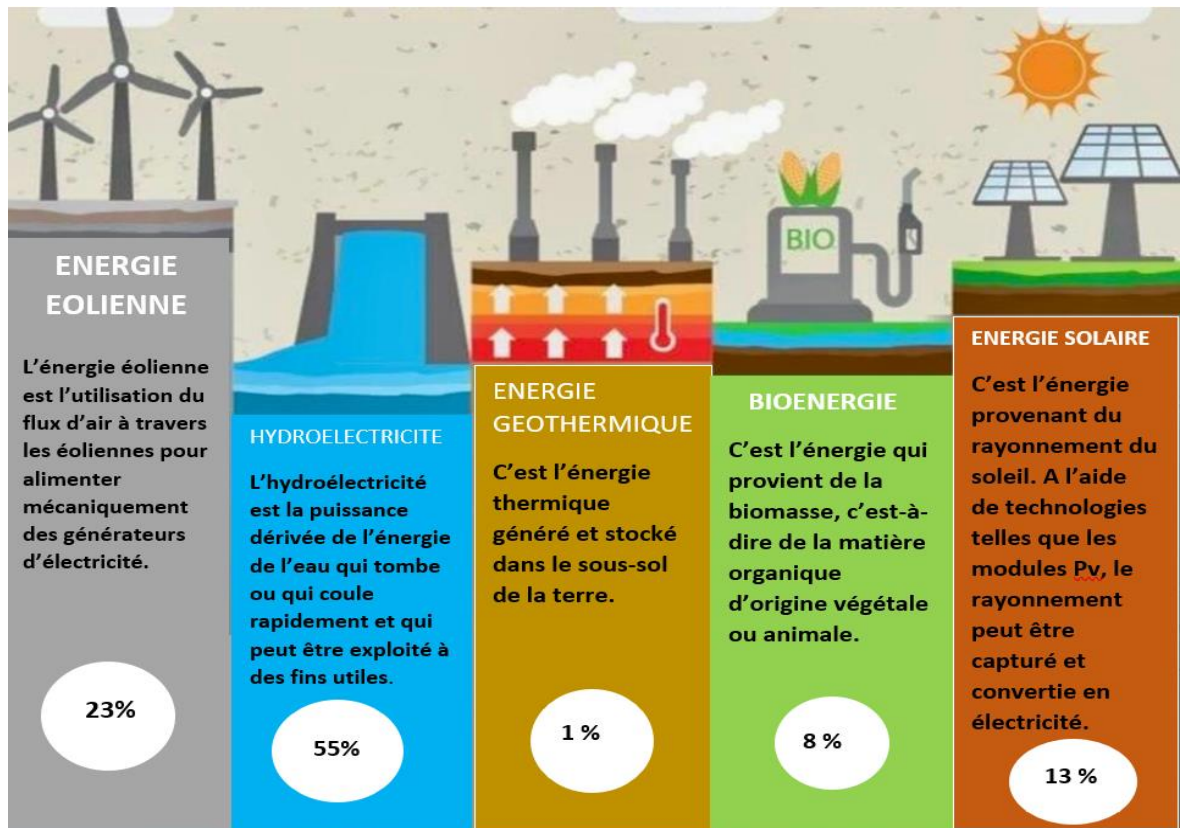


Figure 1 : Sources d'énergie renouvelable 2021(IRENA)[5]

L'énergie solaire est une composante essentielle des énergies renouvelables qui est particulièrement adaptée au climat ouest-africain car il est tributaire de la conversion de la lumière du soleil en électricité ou en chaleur. Dans notre cas d'étude, nous nous focaliserons sur l'énergie solaire photovoltaïque plus précisément à une de ses multiples applications à savoir les systèmes photovoltaïques connecté au réseau.

II.2 Description des systèmes photovoltaïques connecté au réseau

- **Historique**

L'histoire de l'énergie photovoltaïque débute en 1839 avec la découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre Edmond Becquerel. En 1954, les Bell Laboratories développèrent les premières cellules solaires en silicium efficaces, marquant le début de leur utilisation pratique. Dans les années 1950 et 1960, ces cellules furent utilisées dans les satellites spatiaux pour fournir une source d'énergie fiable. À partir des années 1970, leur usage s'étendit aux applications terrestres, notamment pour les installations isolées et les équipements de communication. Depuis les années 1990, l'adoption des systèmes photovoltaïques a

considérablement augmenté grâce à la baisse des coûts et aux préoccupations environnementales croissantes. Aujourd'hui, les systèmes photovoltaïques sont largement utilisés dans le monde entier, jouant un rôle clé dans la transition vers des énergies renouvelables.[6]

- **Définition**

Un système photovoltaïque connecté au réseau est une installation électrique qui dépend d'une connexion à un réseau électrique AC. Ces systèmes sont souvent installés dans des zones urbaines où le réseau électrique est disponible. Les grandes centrales connectées au réseau se retrouvent plutôt dans les zones non habitées à proximité des réseaux de transport HT. Ils ne nécessitent pas de stockage électrochimique car l'énergie produite est injectée dans le réseau.[7]

Le principe de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque connecté au réseau est basé sur plusieurs étapes clés :

- ✓ La captation de l'énergie solaire et sa conversion en courant électrique continu grâce à l'effet photovoltaïque.
- ✓ Le courant continu produit par les modules solaires est ensuite envoyé vers un onduleur qui convertit ce courant continu en courant alternatif, utilisable par les appareils électriques conventionnelles.
- ✓ La production d'électricité des modules solaires est utilisée pour la consommation locale ou est injectée dans le réseau électrique public selon la typologie du système utilisé.
- ✓ Le système solaire photovoltaïque est conçu pour fonctionner de manière synchronisée avec le réseau électrique public.

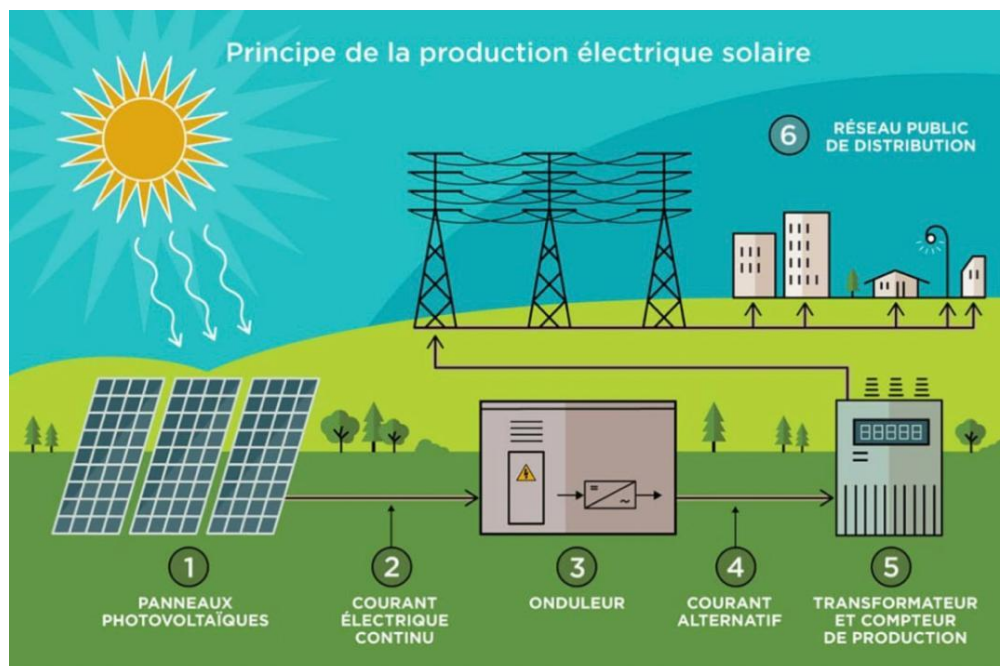


Figure 2 : Principe de production de l'énergie solaire[8]

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE : LA CENTRALE DE ZAGTOULI

III.1 Ressource humaine de la centrale

La centrale de ZAGTOULI relève du Service de Production des Energies Renouvelables de Ouagadougou (SPERO) qui est lui-même rattaché au Département de Production des Energies Renouvelables (DPER). Elle bénéficie d'un personnel compétent et expérimenté, incluant des ingénieurs, des techniciens supérieurs et des ouvriers spécialisés dans des domaines variés tels que l'énergie solaire, le génie électrique, la télécommunication et l'informatique entre autres. En cas de travaux qui nécessitent des compétences supplémentaires, il est possible d'augmenter l'effectif de la centrale en embauchant des contractuels.

La composition du personnel de la centrale est la suivante :

- ✓ Le personnel encadrant composé de trois (03) agents
- ✓ Le personnel d'exploitation et de maintenance composé de quatre (04) agents

- ✓ Le personnel temporaire pour le nettoyage des modules composé de trois (03) agents.

III.2 Localisation et généralités sur la centrale de ZAGTOULI

La centrale solaire de Zagtouli se trouve dans une banlieue proche de Ouagadougou, située à 10 km sur la route de Bobo-Dioulasso. Elle représente l'une des plus grandes installations photovoltaïques en Afrique de l'Ouest. Elle est repérée par les coordonnées géographiques suivantes : $12^{\circ}18'30''\text{N}$ $1^{\circ}38'30''\text{W}$ (donnée Google Earth).



Figure 3 : Vue satellitaire de la centrale de Zagtouli

Inauguré le 29 novembre 2017, la centrale solaire photovoltaïque de Zagtouli au Burkina Faso est un projet majeur dans le domaine de l'énergie renouvelable dans la sous-région Ouest-africaine.

Ce projet vise à diversifier le mix énergétique du Burkina Faso en exploitant l'abondance de l'énergie solaire dans la région. La centrale de Zagtouli représente un pas important vers la réduction de la dépendance aux énergies fossiles.

La production est capable de satisfaire 660 000 personnes et son coût économique de production est estimé entre 30 et 40 FCFA/kWh.

L'inauguration de cette centrale solaire photovoltaïque témoigne des efforts du Burkina Faso pour promouvoir les énergies renouvelables, améliorer l'accès à l'électricité et stimuler le développement durable.

✓ Coût et Financement

La centrale solaire photovoltaïque de Zagtouli résulte d'un partenariat entre l'état burkinabé, l'Union Européenne et la France, via l'Agence Française de Développement (AFD). Le coût total de la centrale est de 47,5 millions d'euros, soit 31 134 350 000 FCFA. Le financement provient de l'UE sous forme de don de 25 millions d'euros et de l'AFD à travers un prêt de 22,5 millions d'euros.

✓ Construction et Expertise

La construction de la centrale de 33,7 MWc a été réalisée par un groupement d'entreprises dirigé par CEGELEC SA/SDEL Elexa/SolarWorld sur une superficie de 60 hectares. L'entreprise CONCO a fourni son expertise pour les travaux complémentaires de l'évacuation de l'énergie de la centrale. L'entreprise TYBSA/BEM, assistée par la SONABEL, a supervisé et coordonné l'ensemble du projet.

✓ Description Générale du Site

L'emprise de la centrale solaire, incluant les structures, modules et CPI, couvre environ 51 hectares. La surface totale à l'intérieur du mur d'enceinte de 2 mètres atteint environ 60 hectares. Une parcelle de 29 hectares à l'est a été réservée pour une future extension de 17 MWc, avec l'appui de la Banque Européenne d'Investissement. La centrale est équipée d'une liaison de raccordement, d'un poste solaire, de trois boucles de distribution de 33 KV et de 17 caméras de surveillance infrarouge autour du champ photovoltaïque (PV).

✓ Définition et Structuration du Champ

Le champ solaire photovoltaïque est composé de 129 600 modules de 260 Wc en silicium polycristallin. Il compte 1 800 tables de structures maintenues au sol par 32 400 pieux en acier, enfoncés à 1,20 mètre dans le sol. Les structures comprennent 72 modules inclinés à 15° face au sud, formant 5 400 chaînes de 24 modules en série, avec 466 boîtiers de regroupement courant continu (cc). Cette chaîne est connectée à 16 postes

transformateurs/onduleurs, totalisant 32 onduleurs de 1,1 MW chacun. Le système comprend également un poste de contrôle (SCADA) pour la gestion du flux énergétique.[9]

III.3 Vue d'ensemble du fonctionnement de la centrale de ZAGTOULI

Principe de fonctionnement

La centrale solaire de Zagtouli utilise plusieurs composants essentiels pour la production et la distribution de l'énergie solaire suivant le schéma modules-onduleurs-comptage-transformateurs-réseau MT ou HT.

- ✓ Les modules photovoltaïques sont la première étape de cette chaîne, convertissant l'énergie solaire en courant électrique continu grâce à l'effet photovoltaïque. Ce sont les constituants de base du système de production.
- ✓ La boîte de jonction joue un rôle crucial en collectant le courant produit par les modules photovoltaïques et en le dirigeant vers le système de transformation et de distribution. Elle assure une connexion sécurisée et organisée des différents câbles électriques, facilitant le flux d'électricité à travers le système.
- ✓ Le Centre de Production Intégré (CPI) est divisé en trois compartiments principaux. Le premier compartiment contient deux onduleurs centraux qui transforment le courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif, nécessaire pour les réseaux électriques. Le deuxième compartiment abrite un transformateur qui élève la tension de basse tension (BT) à haute tension alternative (HTA) pour permettre un transport efficace de l'électricité sur de longues distances. Le troisième compartiment contient des cellules HTA qui assurent la protection et la sécurité du système en régulant et sécurisant le flux d'électricité à haute tension.
- ✓ Enfin, le poste de livraison, également connu sous le nom de poste de comptage, est l'étape finale avant l'intégration de l'électricité au réseau de distribution. Il mesure et enregistre la quantité d'électricité produite et livrée au réseau, garantissant la conformité aux normes de comptage et de facturation de l'énergie.

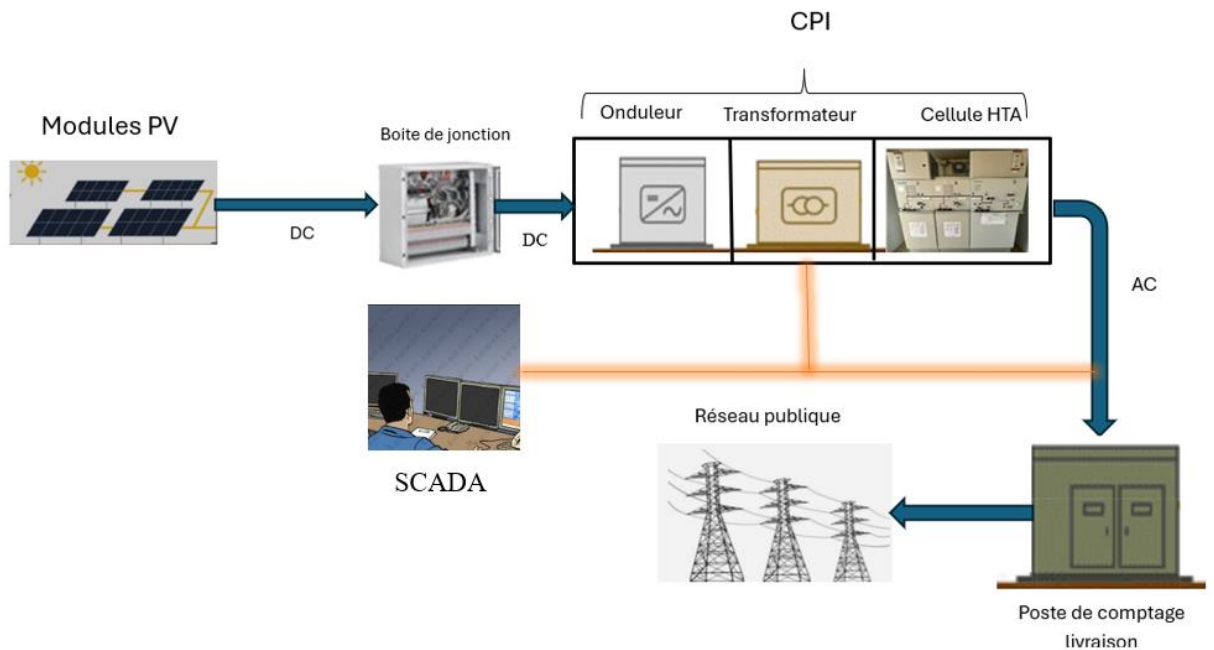


Figure 4 : Principe de fonctionnement de la centrale

Configuration du Champ Solaire de la Centrale de ZAGTOULI

Le champ solaire est constitué de 129 600 modules PV avec une configuration qui est organisée de la manière suivante :

- ✓ String : Chaque chaîne (string) est constituée de 24 modules connectés en série, répartis en 4 colonnes de 6 rangées, formant ainsi 5 400 chaînes de 24 modules en série.
- ✓ Table : Ces chaînes sont ensuite regroupées en tables (structures) de 72 modules chacune. On dispose au total de 1 800 tables dans le champ solaire sachant que chaque table comporte 3 strings.
- ✓ À la fin de chaque groupe de 3 ou 4 tables se trouve une B.J. Les modules sur chaque table sont disposés en 6 rangées de 12 modules en orientation paysage.

Vue d'ensemble d'une ligne

Chaque ligne de production dans un CPI comprend entre 216 et 288 modules, connectés à deux onduleurs centraux, un transformateur de puissance de 2330 kVA, un transformateur auxiliaire de 10 kVA, et diverses cellules. Chaque onduleur est relié à 14 (quatorze) ou 15 (quinze) boîtes de jonction, selon la configuration sur le terrain.

Les modules sont connectés en série pour former des strings de 24 modules, avec des câbles solaires en cuivre de 6 mm² de section. Cela permet une connexion efficace et stable des modules, assurant une production optimale d'énergie solaire. Il y a au total

72 lignes de structures, chacune étant reliée à la terre.

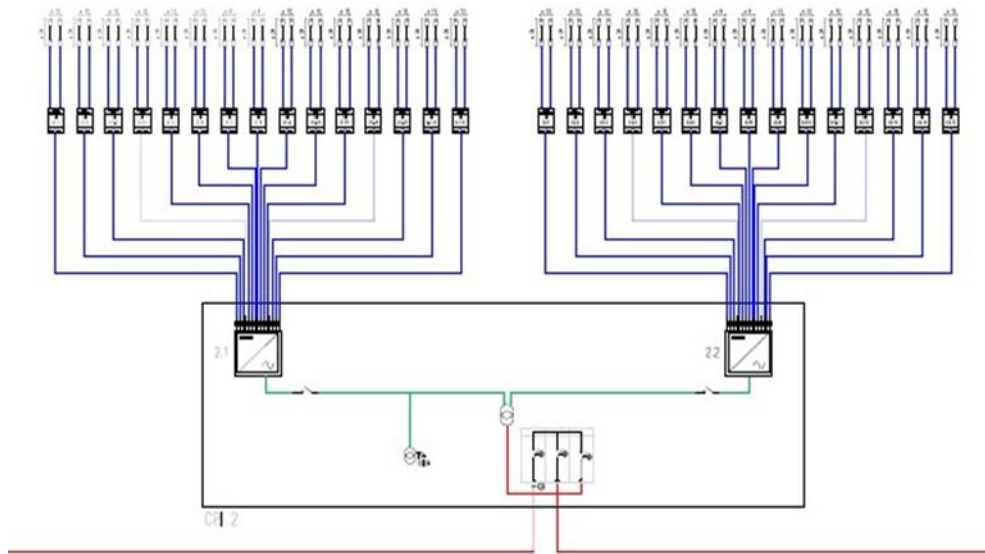


Figure 5 : Structure électrique d'une ligne de production [8]

III.4 Présentation des composantes de la centrale de ZAGTOULI

- **Les modules solaires photovoltaïques**

Les modules solaires photovoltaïques sont des dispositifs composés de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Au nombre de 129 600 panneaux photovoltaïques (SUNMODULE PLUS -silicium polycristallin) installés. Chaque panneau est caractérisé par une puissance crête de 260 Wc. Les caractéristiques des modules PV sont résumées ci-dessous :

Tableau 1 : Caractéristique des modules SUNMODULE PLUS

Caractéristiques	Valeurs
Dimensions	100 cm x 167,5 cm
Épaisseur	33 mm
Rendement	15,5%
Classe II	Max 1000 V
Connecteurs	H4
Diodes by-pass	Au nombre de trois (03), elles assurent l'isolement des cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'échauffement de la cellule.
Resistance mécanique	5400 / 2400 Pa
Cadre renforcé	Montage possible par petit côté.

La fiche technique des modules SUNMODULE PLUS est référencée en **Annexe I :Présentation**

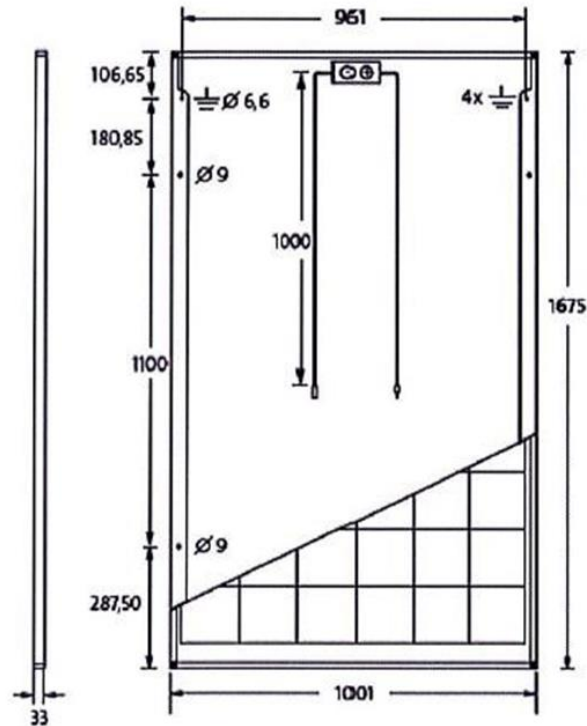


Figure 6 : Cotation d'une cellule SUNMODULE PLUS

Les modules solaires photovoltaïques reposent sur des structures fixes au nombre de 1800 de type paysage (6 sur la largeur et 12 sur la longueur). L'ensemble est ancré sur des pieux métalliques avec un espacement entre rangées de 5,3 m.

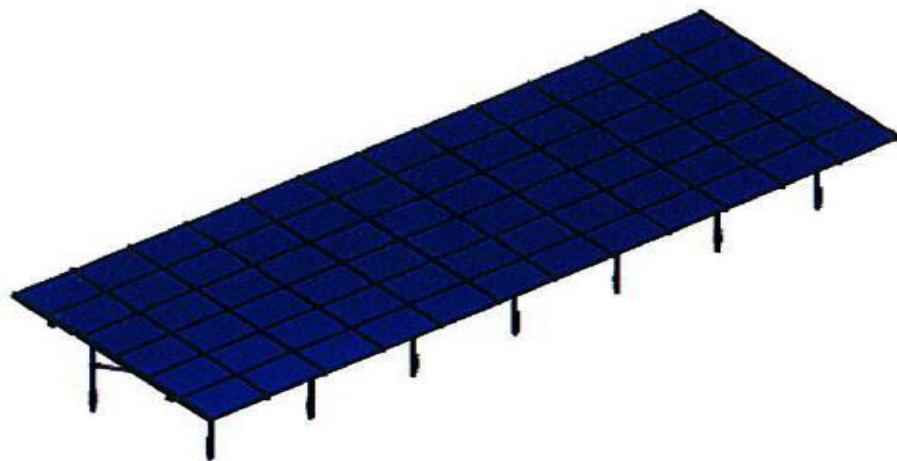


Figure 7 : Structure fixe de type paysage

Le raccordement des chaînes de modules est fait grâce à des câbles solaires 6 mm² rouge (+) et noir (-), à l'abri sous les structures en cheminement sans boucle d'induction.

- **Les boîtes de jonctions**

- ✓ Fonction de la boîte de jonction

Une boîte de jonction (ou boîtier de raccordement) dans une centrale solaire photovoltaïque connectée au réseau est un composant essentiel pour assurer la connexion sûre et efficace des panneaux solaires au réseau électrique. Au nombre de 466 et disposé entre 9 et 12 chaînes par boîte.

De la marque TAIS CUBE Palazzoli, la boîte est faite de panneau en résine thermodurcissable dont sa grande spécificité est qu'il ne brûle pas et n'émet pas de fumées toxiques. Il est aussi résistant aux agents chimiques et rayons UV.

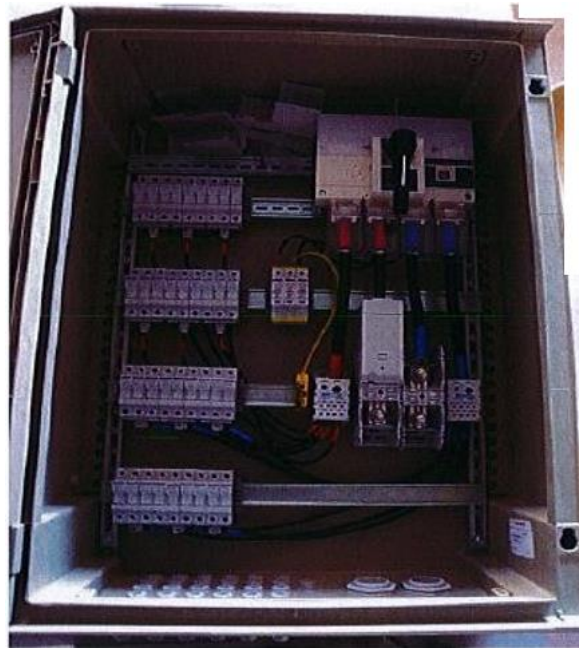


Figure 8 : Représentation d'une boîte de jonction

- ✓ Rôle de la boîte de jonction

- La boîte de jonction est une interface cruciale entre les panneaux solaires et le système électrique global de la centrale solaire.
- Elle facilite le regroupement des connexions électriques des modules solaires, simplifiant ainsi le câblage et la maintenance.

- ✓ Emplacement et intégration

- Située à proximité des panneaux solaires, la boîte de jonction est installée sur une structure de montage facilement accessible pour les différentes manipulations.
- Son emplacement stratégique minimise les pertes de puissance dues à la résistance des câbles.
- ✓ **Caractéristiques électriques**
La boîte de jonction est conçue pour gérer les courants générés par les panneaux solaires.

Elle inclut des dispositifs de protection suivant :

Tableau 2 : Dispositif de protection des BJ

Caractéristiques	Données
Parafoudre	Dispositif de protection électrique conçu pour dévier les surtensions transitoires, généralement causées par la foudre, afin de protéger les équipements électriques et électroniques contre les dommages. Il agit en dirigeant l'excès de courant vers la terre, empêchant ainsi les surtensions de se propager dans le système électrique et de causer des dégâts.
Fusible	Il existe 24 dans chaque boîte. C'est un dispositif de protection électrique conçu pour interrompre le courant électrique en cas de surintensité (25A, 1000 V DC, 10 * 38 max, 60°c max).
Interrupteur	C'est un dispositif électrique permettant d'ouvrir ou de fermer un circuit électrique, contrôlant ainsi le passage du courant.

- ✓ **Connectivité :**
 - Les câbles DC (courant continu) en provenance des panneaux solaires sont connectés à la boîte de jonction.
 - Des câbles type U1000 AR02V, en tranchée permettent de relier la boîte de jonction au système de câblage principal de la centrale solaire (onduleur).

La conception de la boîte de jonction facilite la maintenance régulière tout en garantissant une durabilité optimale dans des conditions environnementales du site.

- **Cellule photovoltaïque Intégrée (CPI)**

Une cellule photovoltaïque Intégrée (CPI) vise à maximiser l'utilisation de l'énergie solaire de manière esthétique et fonctionnelle. C'est un container de 40 pieds en acier avec une

isolation intérieure divisé en 3 compartiments à savoir : onduleur, transformateur, les cellules HTA.

III.4.1.1 Onduleur

III.4.1.1.1 Définition

La centrale de Zagtouli fonctionne avec des onduleurs centraux de marque Ingeteam Power Max 1165 TL au nombre de 32 répartis dans 16 CPI.

Un onduleur central est un composant essentiel d'une centrale solaire, convertissant l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques (courant continu) en électricité compatible avec le réseau (courant alternatif).

Chaque CPI dispose d'une paire d'onduleurs couplés en parallèle avec un système de ventilation d'air forcée pour le refroidissement des onduleurs. On note aussi la présence de capteurs de fumée et d'une sonde de température pour prévenir tout éventuel défaut.

III.4.1.1.2 Types d'onduleurs centraux

Il existe différents types d'onduleurs centraux tels que les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou les onduleurs à tension continue (CDI). Dans notre cas, l'onduleur à MLI a été choisi pour ses avantages qui incluent son efficacité énergétique, sa capacité à maintenir une tension stable et son adaptation aux variations des conditions d'ensoleillement.

Tableau 3 : Caractéristiques des câbles

Caractéristiques	Données
Garantie	10 ans
Puissance DC Max	1513,2 kW
Nombre d'entrées DC (avec fusibles)	15
Tension / Courant (DC)	1050 V / 2000A
Puissance AC Max	1164 kW
Puissance AC Nominale	1071 kW
Tension / Courant (AC)	420 V / 1600 A

Température d'utilisation	-20 à +55°C
Rendement	98%



Figure 9 : Onduleur Max 1165 TL

III.4.1.1.3 Systèmes de suivi et de contrôle

Les onduleurs sont équipés de systèmes de suivi et de contrôle avancés permettant la surveillance à distance, la gestion de la performance, et la détection précoce de problèmes au niveau du SCADA.

III.4.1.2 Transformateur

III.4.1.2.1 Définition

Un transformateur est un dispositif électrique utilisé pour ajuster les niveaux de tension de l'électricité générée par les panneaux solaires.

Dans notre cas d'étude, il s'agit d'un transformateur HT/BT à huile, simple enroulement du côté BT qui est conçu pour convertir l'électricité de la moyenne tension à basse tension. Il utilise un seul enroulement du côté basse tension et utilise de l'huile pour refroidir et isoler les composants internes, assurant ainsi un fonctionnement efficace et fiable.

III.4.1.2.2 Rôle du Transformateur

La fonction principale du transformateur dans une centrale solaire est la conversion de la tension pour faciliter le transport efficace de l'électricité. Il est utilisé dans le réseau de distribution électrique pour ajuster les niveaux de tension en fonction des besoins des consommateurs.

III.4.1.2.3 Emplacement et Intégration

Le transformateur est placé à l'air libre dans une enclave en grillagée.



Figure 10 : Transformateur Pauwels 2,33 MVA dans son enclave grillagée

III.4.1.2.4 Caractéristiques Techniques

Avec une puissance nominale de 2,33 MVA, le transformateur est muni d'un système de protection DGPT2, un capteur de fumé et une sonde température pour contrôler l'échauffement du dispositif.

III.4.1.3 Cellules HTA

Les cellules HTA sont utilisées pour gérer et contrôler la haute tension générée par les panneaux solaires. Elles assurent la sécurité, la distribution et le contrôle de l'électricité à des niveaux de tension élevés avant sa connexion au réseau électrique.

Chaque CPI est équipé de trois cellules distinctes :

Tableau 4 : Les types de cellules HTA

Type de cellule	Rôle	Composition
Cellule A01	Cellule d'arrivé	Équipée d'un transformateur de courant TOR. Motorisées et le refroidissement est de type ventilation à air forcée
Cellule A02	Cellule de départ	Motorisées et le refroidissement est de type ventilation à air forcée
Cellule A03	Cellule de protection du transformateur	En plus d'un disjoncteur, trois transformateurs de courant TOR et un relais de protection numérique "PL70IT" Motorisées et le refroidissement est de type ventilation à air forcée

Ces cellules de marque SIEMENS, présentent les spécifications suivantes :

Tableau 5: Caractéristiques d'une cellule HTA

Caractéristiques	Valeurs
Tension nominale (U_r)	36 kV
Courant nominal (I_r)	630 A
Fréquence	50 Hz

Ces données sont cruciales pour assurer la compatibilité et le bon fonctionnement de la cellule HTA dans le réseau électrique global de la centrale solaire PV.



Figure 11 : Cellules HTA AO1, AO2, AO3

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'ETUDE ET DE LA METHODOLOGIE

I. PRESENTATION DE L'ETUDE

I.1 Contexte de l'étude

Face aux défis du changement climatique et de la dépendance aux énergies fossiles, le développement des énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque, est devenu crucial. Le Burkina Faso, bénéficiant de plus de 3 000 heures d'ensoleillement annuel, possède un fort potentiel pour l'énergie solaire.[10] Le pays, cependant, fait face à une forte dépendance aux importations d'électricité et une couverture énergétique insuffisante.

La centrale solaire de Zagtouli, inaugurée en 2017 avec une capacité de 33 MW, est la plus grande d'Afrique de l'Ouest et vise à augmenter l'offre d'électricité, diversifier le mix énergétique, réduire les coûts et l'impact environnemental. Pour maximiser ses avantages, il est essentiel d'optimiser ses performances et sa rentabilité.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse des performances du champ solaire, la gestion des coûts de maintenance et d'exploitation, et la modélisation pour identifier les meilleures stratégies d'optimisation. En fournissant des recommandations pour améliorer l'efficacité technico-économique de la centrale de Zagtouli, ce travail contribue à renforcer la durabilité des projets solaires au Burkina Faso.

I.2 Justification de l'étude

La centrale solaire de Zagtouli située au Burkina Faso est un exemple intéressant pour étudier l'optimisation technico-économique des modules solaires pour plusieurs raisons :

- Pertinence énergétique :

La centrale solaire de Zagtouli contribue à la production d'énergie renouvelable dans le pays. Une étude approfondie sur l'optimisation technico-économique de ses composants contribuerait à maximiser son efficacité énergétique.

- Cycle de Vie des Installations solaires :

Cette étude contribuera à prolonger la durée de vie utile de la centrale, optimisant ainsi son rendement sur le long terme. En d'autres termes, l'étude a pour but de permettre à la SONABEL et à la centrale solaire de Zagtouli de rester compétitives sur le plan énergétique et de tirer le meilleur parti de leurs investissements initiaux.

- Économies financières :

L'optimisation des différents composants de la centrale offre des avantages économiques en réduisant les coûts liés à la maintenance, au remplacement et à la gestion des déchets électroniques.

Cela peut également favoriser des pratiques de gestion plus rentables.

- Pratiques responsables :

L'optimisation technico-économique s'inscrit dans une démarche de pratiques responsables, offrant des solutions pratiques pour gérer les composants de la centrale de manière écologique et socialement responsable.

- Impact Social :

En minimisant l'empreinte environnementale des centrales solaires, notre recherche peut contribuer à atténuer les impacts sociaux négatifs associés à la gestion inappropriée des déchets électroniques.

- Alignement avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) :

L'optimisation des composants de la centrale solaire s'aligne avec plusieurs ODD, notamment ceux liés à l'énergie propre, à l'action climatique, à la vie terrestre et à la consommation responsable.

- Anticipation des défis futurs :

Face à la croissance rapide des installations solaires, anticiper et résoudre les défis liés à la dégradation et à la baisse de performance des équipements est essentiel pour maintenir la viabilité à long terme de la centrale.

- Potentiel de transfert de connaissances :

Les résultats de mon étude à Zagtouli peuvent servir de modèle transférable pour d'autres centrales solaires, contribuant ainsi à la création d'une base de connaissances globale pour l'industrie photovoltaïque.

Aussi, il s'agira d'une étude qui devra être mise à jour en fonction de l'évolution de la technologie du solaire photovoltaïque.

La problématique de notre travail sera : Comment optimiser techniquement et économiquement les modules solaires de la centrale photovoltaïque de ZAGTOULI ?

I.3 Objectif de l'étude

L'étude vise à évaluer les performances des modules photovoltaïques en analysant leur efficacité en fonction des conditions climatiques locales telles que l'ensoleillement, la température et la poussière. Cette analyse permettra d'identifier les facteurs influençant la performance des modules et de proposer des solutions pour améliorer leur rendement.

Un autre objectif est l'optimisation des coûts de maintenance et d'exploitation. Pour ce faire, l'étude proposera des stratégies visant à réduire ces coûts sans compromettre la fiabilité et la performance des installations.

L'analyse de la production et de l'utilisation de l'énergie produite par la centrale est également cruciale. Il s'agit d'évaluer la production énergétique actuelle et de proposer des améliorations pour maximiser l'utilisation de cette énergie tout en minimisant les pertes.

L'étude se penchera également sur l'impact économique et la rentabilité des améliorations technico-économiques proposées. Elle analysera les coûts et les bénéfices économiques associés, en évaluant le retour sur investissement et l'impact sur la viabilité économique à long terme de la centrale.

Enfin, des recommandations seront formulées pour assurer la durabilité et l'amélioration continue des modules photovoltaïques. Ces recommandations viseront à améliorer l'efficacité et la viabilité économique des modules tout en proposant des mesures pour s'adapter aux évolutions technologiques et climatiques.

I.4 Résultats attendus

L'étude vise à produire un rapport d'évaluation technique détaillant les performances actuelles des modules photovoltaïques, les défis techniques rencontrés, et les solutions proposées pour améliorer leur efficacité. Ce rapport sera crucial pour comprendre l'état actuel de la centrale et identifier les domaines nécessitant des améliorations.

Un plan de réduction des coûts sera élaboré, proposant des stratégies concrètes pour diminuer les coûts de maintenance et d'exploitation. Ce plan inclura des projections économiques démontrant les économies potentielles et l'amélioration de la rentabilité, offrant une feuille de route claire pour les gestionnaires de la centrale.

Pour optimiser la production et l'utilisation de l'énergie, des recommandations spécifiques seront fournies. Ces recommandations viseront à maximiser l'efficacité énergétique et à mieux répondre aux besoins énergétiques, en utilisant les ressources disponibles de manière plus efficiente.

L'étude inclura également une analyse de rentabilité et des scénarios économiques. Cette évaluation détaillera le retour sur investissement et les bénéfices économiques attendus des optimisations proposées, permettant de justifier les investissements nécessaires et de planifier pour un avenir durable.

Enfin, des recommandations pour la durabilité seront formulées. Elles comprendront des mesures pour assurer l'amélioration continue des installations photovoltaïques, l'adaptation aux conditions changeantes et l'adoption de nouvelles technologies. Ces recommandations viseront à garantir que la centrale reste performante et rentable sur le long terme.

Ces résultats fourniront une analyse exhaustive et des recommandations concrètes, qui seront partagées avec les représentants de la SONABEL pour optimiser la performance et la rentabilité de la centrale solaire de Zagtouli. Cela contribuera de manière significative à la transition énergétique durable du Burkina Faso.

II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Dans la suite de notre travail, les différents paramètres ci-dessous feront l'objet d'un développement et constitueront la méthodologie de l'étude de faisabilité de l'optimisation technico-économique du champ photovoltaïque de la centrale solaire de Zagtouli.

II.1 Collecte des données

La collecte des données s'est déroulée de la manière suivante :

Elle a débuté par une phase d'observation générale de l'état globale de la centrale. Ensuite, nous avons eu à mener des enquêtes auprès des techniciens et responsables de la maintenance pour identifier les problèmes récurrents, la qualité et la fréquence du nettoyage des modules solaires ainsi que les opportunités d'amélioration du système de maintenance. Enfin, elle s'est conclue par la phase de collecte au niveau du SCADA des données de production de la centrale, de l'ensoleillement sur toute l'année 2023 et aussi les données de surveillance, incluant la production des boîtes d'interconnexion, notamment celle de la boîte de jonction du CPI N°9 de l'onduleur N°1, l'ensoleillement journalier et la production journalière durant une période spécifique (27/12/2023 au 24/01/2024) pour restreindre l'étude.

II.2 Analyse des données

Cette section a été dédiée à une analyse élargie des performances annuelles de la centrale solaire pour identifier les tendances et les anomalies sur une période prolongée.

L'évaluation à consister à analyser les données recueillies pour évaluer l'efficacité des modules photovoltaïques et identifier les facteurs influençant leur performance. Une évaluation des paramètres suivants a été étudié :

- ✓ Les paramètres de performance de la centrale suivant la norme IEC 61724

Tableau 6 : Récapitulatif des paramètres de performance de la centrale suivant la norme IEC 61724

Les paramètres de performance de la centrale	Descriptions
1. Rendement de référence (Yr)	Il correspond au rapport entre la quantité totale de rayonnement solaire H_t atteignant la surface des panneaux solaires PV et la quantité de rayonnement de référence G_o . Il permet d'évaluer la performance du système PV par rapport à des conditions idéales.
2. Rendement du champ PV (Ya)	C'est rapport entre l'énergie réellement générée E_{DC} par le système PV sur une période donnée (jour) et l'énergie théorique maximale nominale P_o du système dans des conditions standard (STC). Il prend en compte les pertes dues à l'irradiation, à la température et à l'efficacité des composants.
3. Rendement final du système PV (Yf)	Le rendement final correspond au nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à sa puissance nominale.
4. Le ratio de performance (PR)	C'est un indice qui mesure l'efficacité globale d'une installation photovoltaïque (PV) à convertir l'énergie solaire en électricité. Le PR permet d'identifier les pertes de performance dues à des facteurs tels que la température, l'ensoleillement, la poussière et les inefficacités du système.
5. Les pertes divers L_c	Les pertes diverses L_c sont définies par la différence entre le rendement de référence et le rendement du champ PV. Elles représentent les pertes liées aux températures des panneaux (des températures de cellule en fonctionnement supérieures à 25°C), câblages, ombrages partiels, pertes spectrales, salissures et erreurs dans la recherche du point de puissance maximale.

- ✓ Détermination de l'impact des poussières sur la production :

Il s'agira ici d'effectuer une observation de la production spécifique d'un onduleur (onduleur 1 du CPI N°9) sur toute la période de nettoyage des modules. Les mesures ont été prises à intervalles réguliers tout au long de la journée pour capturer les variations diurnes de la production d'énergie solaire.

Ceci permettra d'apprécier la production des modules avant et après nettoyage pour pouvoir déterminer s'il est nécessaire ou non de diminuer l'écart de nettoyage entre les modules.

- ✓ Détermination de l'impact du nettoyage sur la production des modules de l'OND 1 du CPI N°9 :

L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure le nettoyage des panneaux solaires influence le rendement de la production. Il s'agira d'examiner les variations du rendement des modules ciblés de l'onduleur avant et après le nettoyage des panneaux solaires sur une période de 29 jours.

II.3 Optimisation des coûts de maintenance et d'exploitation

Proposer des stratégies concrètes basées sur les données et les analyses pour réduire les coûts de maintenance et d'exploitation sans compromettre la fiabilité et la performance des installations.

II.4 Recommandations pour l'amélioration de la production

- ✓ Optimisation de la Production : Formuler des recommandations pour maximiser la production et l'utilisation de l'énergie produite par la centrale, en visant à maximiser l'efficacité et à répondre aux besoins énergétiques de manière plus efficiente.
- ✓ Analyse de Rentabilité : Évaluer le retour sur investissement des améliorations proposées et les bénéfices économiques attendus.

C'est la synthèse des résultats et la formulation des différentes méthodes d'optimisation retenues pour la suite de l'étude.

II.5 Recommandation pour la durabilité

- ✓ Amélioration Continue : Proposer des mesures pour assurer l'amélioration continue des installations photovoltaïques, incluant l'adaptation aux conditions changeantes et l'adoption de nouvelles technologies.
- ✓ Viabilité à Long Terme : Formuler des recommandations pour garantir la durabilité et la rentabilité des installations sur le long terme.

Cette méthodologie permettra de fournir une analyse exhaustive et des recommandations concrètes pour optimiser la performance et la rentabilité de la centrale solaire de Zagtouli, contribuant ainsi à la transition énergétique durable du Burkina Faso.

**CHAPITRE III : ETUDE DES PERSPECTIVES POUR
L'OPTIMISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA
CENTRALE SOLAIRE DE ZAGTOULI**

I. ANALYSE TECHNIQUE

I.1 Paramètres de surveillance des performances du système PV

La norme « IEC 61724 : Photovoltaic System Performance Monitoring » a été retenue comme une des méthodes d'évaluations des performances de la centrale car elle fournit un cadre essentiel pour la surveillance et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques en se proposant des indices de référence.[11]

Aussi différents paramètres dérivés associés au bilan énergétique et aux performances du système feront l'objet d'analyse et d'interprétation.

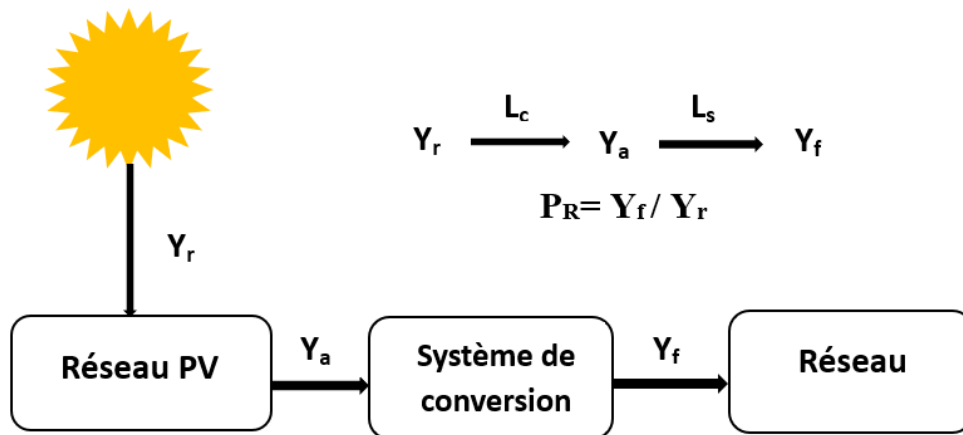


Figure 12 : Chaîne des rendements aux différentes étapes de la conversion d'énergie d'un système PV.

- **Rendement de référence (Y_r)**

La formule employée pour déterminer le rendement de référence est la suivante :

$$Y_r = \frac{H_t}{G_0} \quad (1)$$

- ✓ Y_r : le rendement de référence est une valeur adimensionnelle.
- ✓ H_t : l'ensoleillement solaire en kWh/m².
- ✓ G_0 : l'irradiance de référence (Température de cellule à 25°C, Spectre de lumière AM 1.5) qui vaut 1 kW/m².

- **Rendement du champ PV (Y_a)**

Le rendement du champ PV est obtenu par la formule suivante :

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_o} \quad (2)$$

- ✓ Y_a : le rendement du champ PV est une valeur adimensionnelle.
- ✓ E_{DC} : l'énergie totale générée kWh par le système PV sur une période donnée (jour).
- ✓ P_o : la puissance nominale en kWc des rangées dans des conditions standard (STC) : irradiation : 1000 W/m², 25°C de température ambiante et spectre de référence AM 1.5-G).

- **Le rapport de performance (PR)**

Le rapport de performance PR se détermine comme suit :

$$PR = \frac{\text{Energie produite}}{n_p * a * \eta * \text{ensoleillement}} \quad (3)$$

- ✓ PR : est une quantité adimensionnelle qui indiquent à quel point un système PV approche les performances idéales dans des conditions réelles d'exploitation [6].
- ✓ Energie produite : énergie produite par le système en kWh
- ✓ n_p : le nombre de panneau PV
- ✓ a : la surface d'un panneau en mètre carré
- ✓ η : le rendement d'un panneau PV
- ✓ Ensoleillement : valeur du rayonnement en kWh/m²

- **Rendement final du système PV (Yf)**

Le rendement final se calcule de la manière suivante :

$$Y_f = PR * Y_r \quad (4)$$

- ✓ Y_f : une valeur adimensionnelle
- ✓ PR : le rapport de performance
- ✓ Y_r : le rendement de référence

- **Les pertes divers L_c**

Les pertes diverses (L_c) sont définies par la différence entre le rendement de référence et le rendement du champ PV.

$$L_c = Y_r - Y_a \quad (5)$$

- ✓ L_c : une valeur adimensionnelle
- ✓ Y_r : le rendement de référence
- ✓ Y_a : le rendement du champ PV

I.2 Détermination de l'impact des poussières sur la production

Pour évaluer cet impact des poussières sur le rendement de la production, nous avons procédé à l'analyse de la production des modules PV d'un onduleur spécifique (onduleur 1 du CPI N°9) sur toute la période de nettoyage des modules pendant 29 jours.

I.3 Détermination des pertes du système à travers le rendement de la production des modules de l'OND 1 du CPI N°9

Pour cette partie, l'analyse de la courbe de tendance de l'ensoleillement et de la production des modules PV de l'onduleur permettra de mettre en lumière l'importance du nettoyage régulier des panneaux solaires pour maintenir un rendement optimal des onduleurs.

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau ci-dessous résume les mesures de production, d'ensoleillement ainsi que les paramètres de performance calculés (PR, Yr, Ya, Yf et Lc).

Tableau 7 : Récapitulatif des indices de performance de la centrale

Mois	Production (l'Ensoleilleme		PR	Yr	Yf	Ya	Lc
Janvier	5336	192,16	0,83	0,96	0,79	0,21	0,75
Février	4823	174,9	0,82	0,97	0,79	0,21	0,76
Mars	5191	188,26	0,82	0,94	0,77	0,21	0,73
Avril	4698	171,55	0,81	0,89	0,72	0,19	0,69
Mai	4656	180,08	0,77	0,9	0,69	0,19	0,71
Juin	4297	164,85	0,77	0,85	0,66	0,18	0,67
Juillet	4464	160,26	0,83	0,8	0,66	0,18	0,62
Août	4018	145,36	0,82	0,73	0,6	0,16	0,57
Septembre	4669	168,77	0,82	0,87	0,72	0,19	0,68
Octobre	5043	178,94	0,84	0,89	0,75	0,2	0,69
Novembre	4610	171,42	0,8	0,89	0,71	0,19	0,7
Décembre	5391	198,16	0,81	0,99	0,8	0,22	0,78

L'examen de ces résultats s'effectuera avec l'interprétation des différents tracés suivants et leurs impacts sur les performances de la centrale.

II.1 Evaluation des facteurs climatiques influençant la production

En générale les études montrent une forte corrélation positive entre l'ensoleillement et la production d'énergie des centrales photovoltaïques. De plus, les facteurs climatiques comme les températures élevées, la grande humidité et une grande couverture nuageuse sont des phénomènes qui influencent négativement la

production.[12][13][14]. En d'autres termes plus l'ensoleillement est élevé plus la production d'électricité est élevée mais cela n'est pas toujours vérifié comme dans notre cas d'étude.

En effet, les données de surveillance indiquent que malgré un ensoleillement moindre, le mois de février (169,73 kWh/m²- 4 823 MWh) présente une production d'électricité plus élevée que celui du mois de mai (180,08 kWh/m²- 4 656 MWh). Les données climatiques [15] montrent que les facteurs climatiques qui favorisent la réduction de la production sont plus importantes au mois de Mai par rapport à ceux du mois de Février.

- ✓ Février : Température moyenne de 32°C, humidité de 19%, couverture nuageuse de 6%.
- ✓ Mai : Température moyenne de 35°C, humidité de 58%, couverture nuageuse de 31%.

Tableau 8 : Résultats des analyses des facteurs climatiques

Facteurs Affectants	Impacts	Explication
Température	Les panneaux solaires photovoltaïques (PV) sont sensibles à la température. À des températures plus élevées, les modules PV voient leur efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité diminuer. En février, avec une température moyenne de 32°C, les modules fonctionnent plus efficacement comparés au mois de mai, où la température moyenne est de 35°C.	En mai, les températures plus élevées (35°C) entraînent une dégradation de l'efficacité des modules PV, réduisant la production d'électricité, même avec un ensoleillement plus important.
Humidité	Une humidité élevée peut causer de la condensation sur les panneaux, surtout pendant la nuit, entraînant une accumulation de saleté et de poussière. Cela nécessite un nettoyage plus fréquent pour maintenir la performance des modules.	En mai, avec une humidité de 58%, il est probable que la condensation et l'accumulation de saleté soient plus importantes qu'en février (humidité de 19%). Cela peut réduire la quantité de lumière atteignant les cellules solaires et donc diminuer la production d'électricité.
Couverture Nuageuse	Une couverture nuageuse élevée réduit la quantité de lumière directe atteignant les modules PV. Cependant, la lumière diffuse à travers les nuages peut encore être utilisée, bien que de manière moins efficace.	En mai, la couverture nuageuse de 31% est nettement plus élevée qu'en février (6%). Cela signifie que moins de lumière solaire directe atteint les modules PV en mai, réduisant ainsi la production d'électricité.

De plus, au Burkina Faso la période la plus poussiéreuse se situe généralement entre les mois de mars et mai. Les vents forts transportent la poussière sur de longues distances, ce qui peut réduire la performance des panneaux photovoltaïques.

En combinant ces facteurs, il devient clair que même avec un ensoleillement moindre, les conditions climatiques de février (température modérée, faible humidité, faible couverture nuageuse) sont plus favorables pour une production optimale d'électricité par les modules photovoltaïques comparés aux conditions de mai.

Conclusion partielle : On tire de cette partie que généralement la production dépend fortement de l'ensoleillement du site mais il existe aussi des facteurs extérieurs tels que le climat qui affectent la production de la centrale.

II.2 Evaluation de l'efficacité globale de la centrale

Le PR mesure l'efficacité globale de la centrale à convertir l'énergie solaire en électricité, en tenant compte des pertes liées aux conditions météorologiques, à l'orientation des panneaux et les éventuels points d'ombrage.

Tableau 9 : Tableau comparatif des valeurs du PR et du Yr

Mois	PR	Yr
Janvier	0,82	0,96
Février	0,82	0,96
Mars	0,82	0,94
Avril	0,81	0,88
Mai	0,76	0,90
Juin	0,77	0,85
Juillet	0,83	0,80
Août	0,82	0,72
Septembre	0,82	0,87
Octobre	0,84	0,89
Novembre	0,80	0,88
Décembre	0,81	0,99

Les valeurs du PR sur l'ensemble des mois de l'année 2023 sont inférieures à ceux du rendement de référence, cela indique qu'il y a des pertes dans le système qui réduisent l'efficacité de la centrale par rapport à son potentiel théorique.

Conclusion partielle : Cette comparaison entre le PR et le rendement de référence (Yr) suggère des possibilités d'amélioration des performances de la centrale solaire de ZAGTOULI.

II.3 Evaluation des paramètres de surveillance mensuelle de la centrale

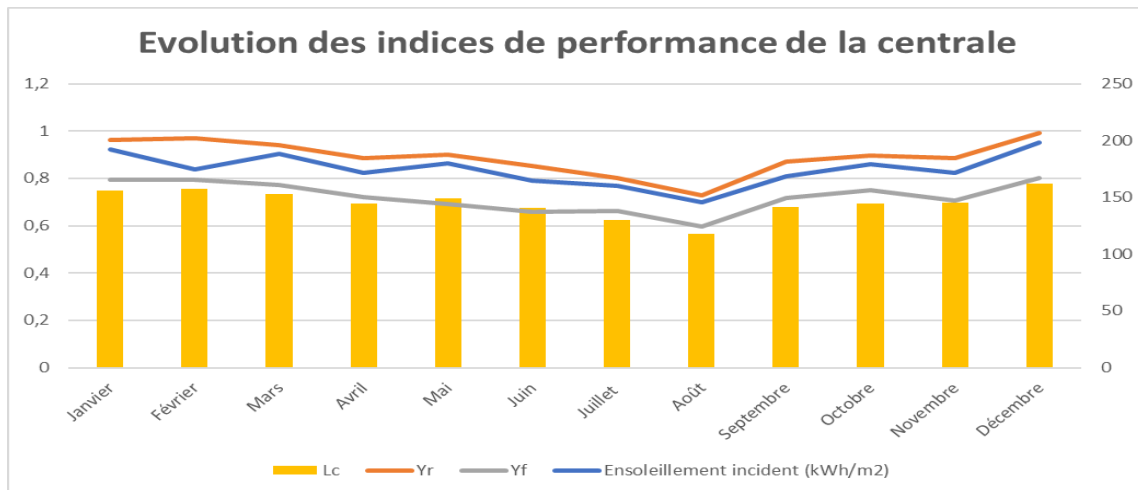


Figure 13 : Évolution des indices de performance de l'année 2023

On observe des variations mensuelles des rendements et des pertes diverses, qui sont étroitement liées aux conditions d'ensoleillement. Les mois les plus ensoleillés ont tendance à avoir des rendements plus élevés, tandis que les mois avec moins d'ensoleillement ont des rendements plus faibles. Les pertes dans le système suivent généralement une tendance similaire aux rendements, avec des pertes plus élevées lorsque les conditions d'ensoleillement augmentent.

Conclusion partielle : L'analyse détaillée de chaque mois permet de comprendre l'évolution des performances du système photovoltaïque tout au long de l'année, mais ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur l'état de la centrale. D'autres paramètres comme l'impact des poussières sur la production sont essentiels pour tirer des déductions sur l'optimisation et les éventuelles améliorations continues.

II.4 Détermination de l'impact des poussières sur la production

Il s'agit d'une analyse du programme de nettoyage sur un mois complet de la production des modules de l'onduleur 1 du CPI N°9.

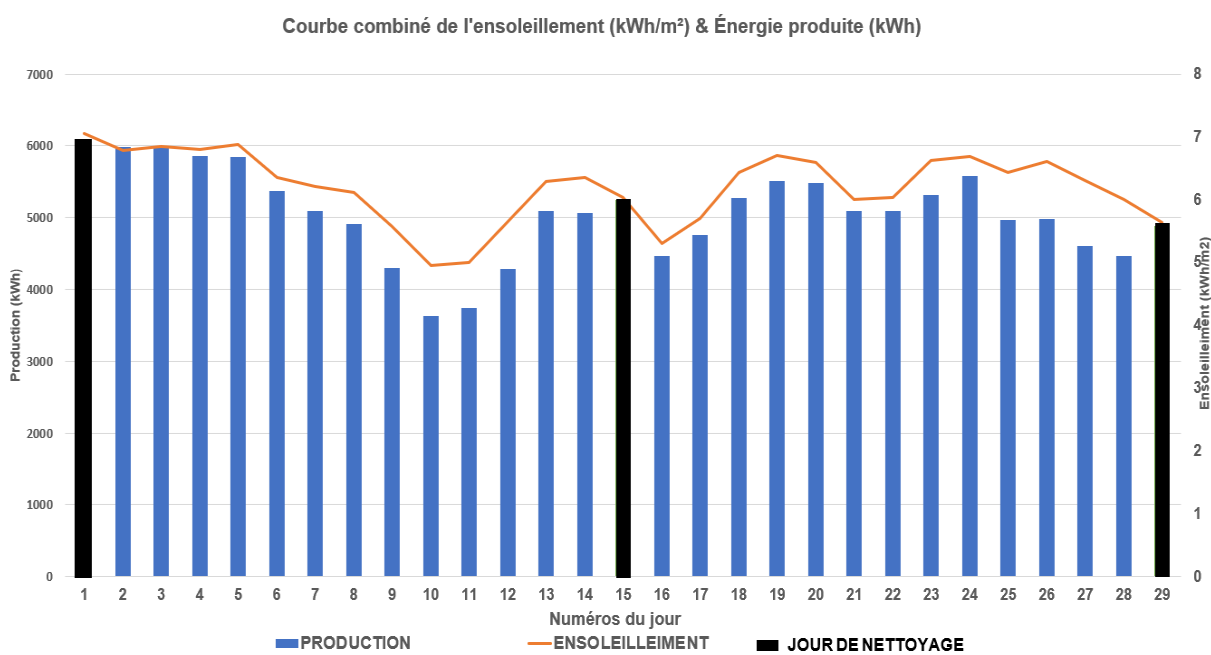


Figure 14 : Courbe combinée de l'ensoleillement et de la production de l'énergie

- **Analyse des données**

L'histogramme de production d'énergie solaire montre des variations significatives au cours des 29 jours d'observation. Les modules étant nettoyé à partir de 6h du matin, les jours de nettoyage des modules solaires, on observe une augmentation marquée de la production d'énergie solaire, indiquant une amélioration de l'efficacité des modules.

Par exemple, le dernier jour de nettoyage (jour 29) et la journée qui la précède (jour 28) dont les modules n'ont pas été nettoyés depuis 14 jours, malgré un ensoleillement du jour 28 (6 kWh/m²) supérieur à celui du jour 29 (5,64 kWh/m²), on remarque que la production du jour 29 est supérieure à celui du jour 28, ce qui est notable à cause de la corrélation directe entre l'ensoleillement et la production d'énergie. En effet, une des explications de cette situation est l'efficacité des modules après le nettoyage et la perte en efficacité de ces derniers à cause de l'accumulation des poussières.

Le gain en pourcentage de la production d'énergie solaire entre ces deux jours consécutifs sera :

Soit E_j la production d'énergie journalière et j le numéro du jour, on aura :

$$\text{Gain de production} = \left(\frac{E_j - E_{j-1}}{E_{j-1}} \right) * 100 \quad (6)$$

En utilisant les données où la production d'énergie solaire du jour 28 est 4729,36 kWh et le jour 29 est 4801,82 kWh :

$$\text{Gain de production} = \left(\frac{4801,82 - 4729,36}{4729,36} \right) * 100$$

Gain de production = 1,53 %

Donc, après nettoyage le gain en pourcentage de la production d'énergie solaire entre ces deux jours consécutifs est d'environ 1,53 % après deux semaines d'accumulation de poussière. Ce gain est assez conséquent compte tenu du déficit d'ensoleillement du jour 29 par rapport à celui du jour 28.

Les jours 10 et 11, correspondant aux jours avec l'ensoleillement le plus bas, ont enregistré une baisse notable de la production d'énergie solaire (Les panneaux n'ont pas été nettoyé depuis plus d'une semaine). Cela suggère que les conditions météorologiques influencent fortement la production d'énergie solaire de même que leurs états en termes d'accumulation de salissure.

Le jour 13, caractérisé par un ensoleillement bien élevé, a enregistré une production d'énergie élevée, même sans nettoyage récent des panneaux. Cela souligne une fois de plus l'importance de l'ensoleillement dans la production d'énergie solaire, même en présence d'une accumulation de poussière sur les panneaux.

• **Interprétation**

Nos résultats confirment l'importance du nettoyage régulier des panneaux solaires pour maintenir des niveaux optimaux de production d'énergie solaire. Cependant, nous constatons également que les conditions météorologiques, en particulier l'ensoleillement, est le facteur déterminant principal de la production d'énergie solaire. Les jours avec un ensoleillement plus faible ont un impact significatif sur la production d'énergie solaire, mais cette situation est atténuée après un nettoyage des panneaux.

Conclusion partielle : Cette étude met en évidence l'importance du nettoyage régulier des panneaux solaires dans les zones poussiéreuses pour maintenir des niveaux optimaux de production d'énergie solaire. Cependant, elle souligne également que les variations d'ensoleillement ont un impact majeur sur la performance du système.

II.5 Détermination des pertes du système à travers le rendement de la production des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9.

Cette partie nous a permis d'avoir une analyse plus précise car avec un nombre réduit de module PV, on élimine les pannes des différents composants de la centrale qui peuvent influencer la production. En effet, notre choix d'observation s'est porté sur cet onduleur car il n'a pas eu d'arrêt ou de panne durant toute la période d'observation.

Tableau 10 : Tableau récapitulatif du PR des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9 en fonction des pertes du système

DATE	ENSOLEILLEMENT (kWh/m ²)	N° du jour	PR	PR Moyen	INTERVALLE
27/12/2023	7,06	Jour 1	83,99	82,83	JOUR 1-7
28/12/2023	6,79	Jour 2	85,4		
29/12/2023	6,85	Jour 3	84,9		
30/12/2023	6,84	Jour 4	82,92		
31/12/2023	6,88	Jour 5	81,83		
01/01/2024	6,35	Jour 6	81,14		
02/01/2024	6,21	Jour 7	79,65		
03/01/2024	6,12	Jour 8	80,84	78,68	JOUR 8-14
04/01/2024	5,57	Jour 9	79,15		
05/01/2024	4,96	Jour 10	79,25		
06/01/2024	5	Jour 11	78,96		
07/01/2024	5,48	Jour 12	78,16		
08/01/2024	6,29	Jour 13	77,27		
09/01/2024	6,35	Jour 14	77,17		
10/01/2024	6,24	Jour 15	84,7	82,76	JOUR 15-21
11/01/2024	5,47	Jour 16	84,8		
12/01/2024	5,91	Jour 17	83,81		
13/01/2024	6,48	Jour 18	83,41		
14/01/2024	6,7	Jour 19	82,82		
15/01/2024	6,6	Jour 20	81,04		
16/01/2024	6	Jour 21	78,76		
17/01/2024	6,04	Jour 22	83,91	80,91	JOUR 22-28
18/01/2024	6,63	Jour 23	82,03		
19/01/2024	6,69	Jour 24	82,42		
20/01/2024	6,44	Jour 25	81,53		
21/01/2024	6,61	Jour 26	79,65		
22/01/2024	6,31	Jour 27	78,76		
23/01/2024	6	Jour 28	78,06		

$$PR = \left(\frac{E * Gi}{S * np * r * H} \right) * 100 \quad (7) \quad [15]$$

$$E = \frac{S * np * r * H * PR}{Gi} \quad (8)$$

- ✓ E : énergie produite réellement en kWh
- ✓ S : surface d'un module photovoltaïque (1,675 m²).
- ✓ Gi : la quantité de rayonnement de référence qui est de 1 kW/m²
- ✓ r : rendement du module photovoltaïque
- ✓ np : nombre de module photovoltaïque (dans notre cas la portion des modules PV connectés à l'onduleur 1 du CPI N°9 soit 3888)
- ✓ H : ensoleillement/rayonnement sur la surface inclinée en kWh/m²
- ✓ PR : indique l'efficacité à laquelle le système convertit l'énergie solaire reçus en prenant en compte l'ensemble des pertes tel que les pertes de l'onduleur, température, câbles et connexion etc...

L'évolution quotidienne du PR des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9 sur une période de 29 jours (période durant laquelle les modules ont bénéficié de deux cycles de nettoyage) est la suivante :

Après environ une semaine, l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires commence à réduire progressivement le rendement de la production. Cela se traduit par une légère diminution du PR au fil des jours.

Avant le nettoyage final (jour 29), le rendement du PR des modules PV est à un bas niveau depuis le dernier nettoyage. Cependant, après un nettoyage, une amélioration du rendement du PR est immédiatement observée. **Cette amélioration peut être attribué en grande partie par l'effet immédiat du nettoyage, permettant aux panneaux solaires de mieux capter la lumière solaire et donc d'augmenter la production d'électricité.**

Dans notre cas d'étude, on a observé les performances des panneaux d'un onduleur spécifique pendant un mois après un nettoyage initial.

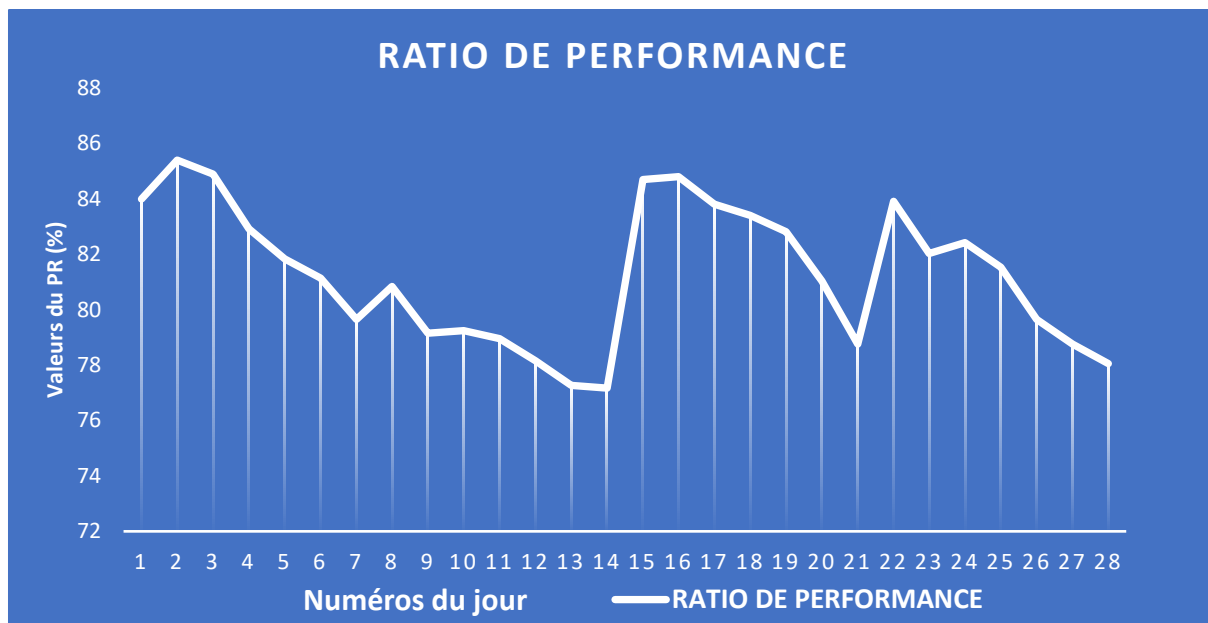


Figure 15 : Courbe de l'évolution du PR des modules de l'onduleur 1 du CPI N°9

Tableau 11 : Analyse de l'évolution du rendement journalier

Au début du mois entre le jour 1-14	Pour la période entre le jour 15 et 28
<p>L'évolution du PR a une allure descendante en générale entre le jour 1 et 14. Nous avons décidé de fixer la fréquence de nettoyage à une semaine contrairement au programme au programme actuel de la centrale qui prévoit deux semaines. Après détermination du gain que pourra nous offrir cette résolution, nous indiquerons si cette fréquence est adaptée ou non pour maintenir un rendement optimal.</p>	<p>L'allure de la courbe de la figure 15 est semblable à celle de la période du jour 1-14 avec un point d'inflexion au jour 22. Cette similitude confirme le fait que l'évolution du PR est la même après chaque nettoyage.</p>
<p>Conclusion partielle</p>	
<p>Sur la base de ces observations et des hypothèse posées, nous pouvons conclure que le nettoyage des panneaux solaires au début du mois a eu un effet positif sur les performances de production, mais cette amélioration diminue progressivement au fil du temps. Nous suggérons qu'un nettoyage hebdomadaire des panneaux solaires pourrait être nécessaire pour maintenir des performances optimales du système photovoltaïque.</p>	

• Estimation de l'impact du nettoyage sur le PR

Après nettoyage des modules PV, on remarque que le ratio de performance (PR) a augmenté de manière positive. Des études menées par la National Renewable Energy Laboratory (NREL) [16] montrent que le nettoyage des panneaux PV peut entraîner des augmentations de performance du PR allant de 5% à 11%, en fonction de la quantité de pollens et de poussières accumulées sur les panneaux.

Pour mettre en évidence l'impact du nettoyage des modules photovoltaïques sur le PR, on a collecté les données de production d'énergie avant et après le nettoyage des modules PV de l'onduleur 1 du CPI N°9 (le nombre de modules connectés à l'onduleur 1 = $(12 \times 4 \times 72) + (2 \times 3 \times 72) = 3888$ modules, soit 12 boîtes de jonctions de 4 tables et 2 boîtes de jonctions de 3 tables). Ainsi que leur ensoleillement respectif sur une période équivalente de deux cycles de nettoyage des modules (tableau 9).

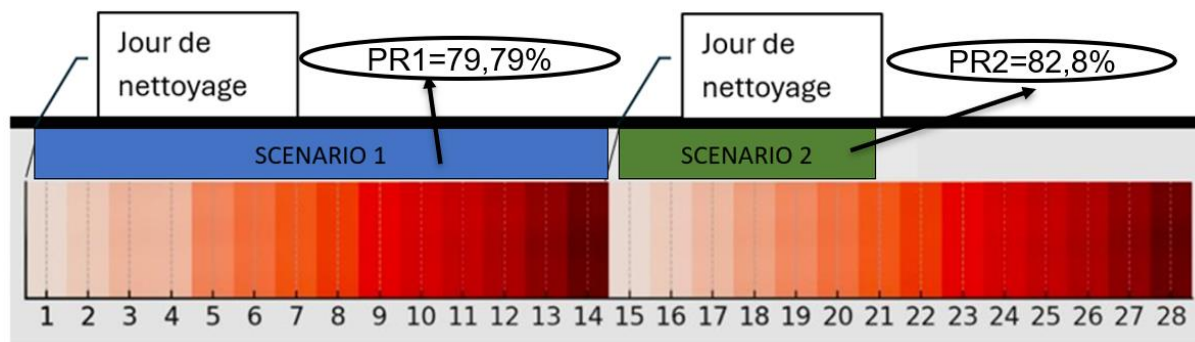


Figure 16 : Représentation de l'évolution de production en fonction des pertes sur le cycle de nettoyage.

La portion en couleur rouge dégradé représente les pertes moyennes après une semaine de nettoyage des modules, donc une semaine d'accumulation de saleté (assez bonne production) et celle en rouge foncé les pertes moyennes (plus importantes) après plus d'une semaine de nettoyage, donc plus d'une semaine d'accumulation de saleté (production moins conséquente).

- ✓ Scénario 1 : Nettoyage toutes les deux semaines (fréquence de nettoyage pour une période de 14 jours) :

C'est le cas actuel du mode de fonctionnement du nettoyage de la centrale de ZAGTOULI.

- ✓ Scénario 2 : Nettoyage hebdomadaire (pour une période de 7 jours)

C'est le mode de fonctionnement de nettoyage souhaitable, c'est à dire effectuer un nettoyage quand la production commence à baisser significativement.

- Le PR journalier moyen immédiatement après nettoyage avec une accumulation des saletés de moins d'une semaine (jours 1 à 7- jours 14 à 21, ce sont des intervalles d'une

semaine pendant laquelle le PR est élevé) :

$$PR_1 = (82,83 + 82,76) / 2$$

$$PR_1 = 82,8 \%$$

- Le PR journalier moyen après un nettoyage avec une accumulation des saletés de plus d'une semaine (jours 8 à 14 - jours 22 à 27) :

$$PR_2 = (78,68 + 80,91) / 2$$

$$PR_2 = 79,79 \%$$

- Le calcul de l'augmentation du PR est le suivant :

$$\Delta PR = PR_1 - PR_2 \quad (9)$$

$$\Delta PR = 3,01 \%$$

Ainsi, le nettoyage des modules PV a permis d'augmenter le ratio de performance de près de 3,01%.

• Estimation de l'énergie perdue quotidiennement

Soit l'énergie moyenne produite par les modules de l'onduleur 1 du CPI N°9 après une accumulation d'une semaine des saletés (EP_1) où la moyenne des valeurs du PR est plus élevée et (EP_2) celles après une accumulation de deux semaines.

- ✓ L'énergie moyenne produite EP_1 durant les jours 1 à 7 et 15 à 21 :

$$EP_1 = \sum E_i J_r(1 - 7; 15 - 21) / 14 \quad (10)$$

$$EP_1 = 5400,95 \text{ kWh}$$

- ✓ L'énergie produite moyenne EP_2 durant les jours 8 à 14 et 22 à 28 :

$$EP_2 = \sum E_i J_r(8 - 14; 22 - 28) / 14 \quad (11)$$

$$EP_2 = 4513,68 \text{ kWh}$$

- ✓ Calcul de la production énergétique supplémentaire si on adoptait le nouveau programme de nettoyage (fréquence hebdomadaire) :

Ce sont les pertes qu'on observe dans le système de nettoyage actuel de la centrale (si un module est nettoyé le premier du mois, il faut attendre le 14^{ème} jour du mois au minimum pour qu'il bénéficie d'un autre nettoyage) par rapport à un nettoyage d'une fréquence maximum d'une semaine.

$$\Delta E = EP_2 - \frac{EP_1 * PR_2}{PR_1} \quad (12)$$

$$\Delta E = 690,93 \text{ kWh}$$

Le nettoyage des modules PV avec une fréquence minimale d'une semaine permettrait une production supplémentaire de 690,93 kWh pour la période de 28 jours d'observation considérée.

- **Estimation de la perte totale annuelle de production de la centrale**

La perte de production de 690,93 kWh pour 28 jours concerne uniquement les modules de l'onduleur 1 du CPI N°9 constituée de 3888 modules. Ici, **nous poserons l'hypothèse que ses pertes sont constantes tout au long de l'année pour toute la centrale durant la saison sèche. Notre hypothèse exclu la saison pluvieuse d'une durée de 4 mois pendant laquelle le nettoyage des modules est arrêté.**

La perte de production pour 28 jours des modules de toute la centrale qui est composé de $n_p = 129\ 600$ modules :

$$\text{Perte de production pour 28 jours de toute la centrale} = \left(\frac{\Delta E * n_p}{n_p \text{ ond } 1} \right) \quad (13)$$

$$\text{Perte de production pour 28 jours de toute la centrale} = \left(\frac{690,93 * 129\ 600}{3888} \right)$$

$$\text{Perte de production pour 28 jours de toute la centrale} = 23\ 031,03 \text{ kWh}$$

Cette perte d'énergie est celle de 28 jours de toute la centrale. Par extrapolation pour une année de 365 jours, on peut tirer le gain total en énergie de la centrale annuellement en suivant un programme qui permet d'effectuer un nettoyage de chaque module à une fréquence hebdomadaire en ne considérant pas les 04 mois (122 jours) de la saison pluvieuse ou le nettoyage est arrêté :

$$\text{Perte total de production de la centrale par an} = \left(\frac{\text{Perte de production pour 28 jours} * 243 \text{ jours}}{28 \text{ jours}} \right) * \quad (14)$$

$$\text{Perte total de production de la centrale par an} = 199\ 876,44 \text{ kWh}$$

On peut estimer alors que la centrale perd environ 199 876,44 kWh en une année soit 0,35% de la production annuelle.

Selon les données de la Banque mondiale et de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation moyenne d'électricité par habitant au Burkina Faso était d'environ 75 à 100 kWh par an en 2020.

Si l'on considère qu'un foyer moyen au Burkina Faso est composé de 5 à 6 personnes, la consommation annuelle d'électricité d'un foyer pourrait être estimée entre 375 et 600 kWh par an. On peut estimer que la perte d'énergie annuelle de la centrale aurait pu servir à alimenter environ entre 533 et 333 ménages durant une année.

En terme fiduciaire, pour un prix moyen du kWh compris entre 96 et 165 Fcfa suivant la grille tarifaire de la SONABEL[16], **une perte de production de 199 876,44 kWh équivaut alors à 19 188 138 (dix-neuf million cent quatre-vingt-huit mille cent trente-huit) Fcfa au prix de vente des ménages au Burkina Faso. Un nettoyage hebdomadaire permettrait un gain économique de cette somme par an.**

Le tableau 12 présente d'autres comparaisons pratiques pour mettre en évidence l'importance d'un gain d'énergie de 199 876,44 kWh.

Tableau 12 : Récapitulatif des activités spécifiques que pourrait alimenter la perte d'énergie constaté.

Appareils électriques	Commentaires
Réfrigérateur	Pour un type de réfrigérateur moderne qui consomme en moyenne 800 kWh/an ; avec ce gain d'énergie, on pourrait alimenter 250 réfrigérateurs pendant une année.
Télévision LED	Mettre en marche pendant une année en continu environ 946 télévisions (pour une consommation de 0,1 kWh pour 1 heure de fonctionnement).
Eclairage Public	Faire fonctionner 456 lampadaires LED (100 W) pendant environ une année (8760 heures) pour un fonctionnement de 12 heures par jour.
Un climatiseur	Pour un modèle SHARP climatiseur Split de 1 CV, la puissance est de 900 à 930 W. La consommation (kWh)=P*Temps(8h)*365 La consommation annuelle sera de 2715,6 kWh, ce qui équivaut à alimenter pendant une année environ 73 climatiseurs.
Une voiture électrique (Poids= 0,5 t).	Pour une consommation moyenne de 15 kWh pour 100 Km parcourue, on peut parcourir avec ce type de voiture électrique le tour complet de la terre environ 33 fois. En se basant sur la fiche technique de la NASA ou la circonférence de la terre est indiqué à environ 40 075 km. On peut aussi dans une certaine mesure faire 444 allers-retours avec 100 véhicules électriques entre les deux sites de l'Institut 2iE (Ouaga- Kamboinsin) distant de 15 Km.

Conclusion partielle : Cette interprétation met en lumière l'importance du nettoyage régulier des panneaux solaires pour maintenir un rendement optimal de l'installation. Les résultats montrent une tendance claire : le rendement du PR augmente après chaque nettoyage, puis diminue progressivement jusqu'au prochain nettoyage. Cela souligne l'effet bénéfique du nettoyage des panneaux solaires sur la productivité énergétique globale du système et dans notre cas d'étude la nécessité d'un nettoyage hebdomadaire.

II.6 Récapitulatif des résultats de l'analyse des performances de la centrale

- ✓ Les valeurs de production du SCADA sont cohérente par rapport aux attentes, ce qui indique que la centrale est bien dimensionnée et fonctionnelle.
- ✓ Aussi, on sait que la production est généralement proportionnelle à l'ensoleillement du site mais il existe cependant des facteurs extérieurs qui affectent cette production notamment la température et le climat. L'exemple qui illustre parfaitement cette situation est la production du mois de février qui est supérieur à la production du mois de mai qui est plus ensoleillé. Après nos analyses, il en ressort qu'une des explications à ce phénomène est la température (32°C), l'humidité (19%) et la couverture nuageuse (6%) qui sont des conditions favorables à une bonne production par rapport aux valeurs des conditions climatiques du mois de mai (35°C-58%-31%) d'où sa faible production par rapport à celle du mois de février.
- ✓ L'ensemble des valeurs du PR mensuel de la centrale sont élevé, cela indique que la centrale fonctionne efficacement mais n'exclue pas l'existence de perte.
- ✓ L'analyse de l'impact des poussières du jour 29 (jour de nettoyage des modules) et la journée qui la précède jour 28 (journée dont les modules n'ont pas été nettoyés depuis 14 jours), on remarque que la production du jour 29 est supérieure à celle du jour 28. Une des explications évidentes est le gain de production des modules après leur nettoyage. En effet, le gain en pourcentage de la production d'énergie solaire entre ces deux jours consécutifs est d'environ 1,53 %.

Ce gain de production met en évidence l'importance du nettoyage régulier des panneaux solaires dans les zones poussiéreuses pour maintenir des niveaux optimaux de production d'énergie solaire.

III. PROPOSITION DES SOLUTIONS RETENUES POUR OPTIMISER LA PRODUCTION DE LA CENTRALE

Voici quelques solutions proposées pour optimiser la production d'énergie solaire malgré les conditions météorologiques variables, le dysfonctionnement de certaines composantes et l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires de la centrale solaire de ZAGTOULI. Nous procéderons par élimination successive des solutions qui ne se seront pas en phase avec les réalités technique et financière de notre contexte.

Les colonnes en vert représentent les solutions retenues et celle en rouge les solutions inadéquates selon notre contexte (ce sont des solutions d'optimisation qui ne nécessitent pas une étude de faisabilité technique et économique car elles sont limitées par les restrictions de la conception de la centrale).

Tableau 13 : Perspective de faisabilité des solutions d'optimisations

Proposition des solutions d'optimisation	Faisabilité	Restriction	Solution retenue
Nettoyage hebdomadaire (une fréquence de nettoyage optimal) des panneaux solaires	La mise en place d'un calendrier de nettoyage régulier est réalisable avec l'achat d'un tracteur de nettoyage supplémentaire comme celui existant sur la centrale.	Les restrictions économiques peuvent limiter la capacité à investir dans du matériel supplémentaire pour le nettoyage.	Cette solution sera retenue car son utilisation est déjà connue par les exploitants de la centrale.
Revêtements antiadhérents	L'application de revêtements antiadhérents est techniquement réalisable en tenant compte s'ils n'affectent pas les performances de la centrale.	Les coûts associés à l'application de ces revêtements peuvent être un facteur limitant. De plus, les gains en termes d'énergie ne sont pas connus.	L'application de revêtements n'est pas une solution adaptée selon les spécifications du fournisseur sur la rentabilité à long termes entre les gains en production et le prix du produit.
Systèmes de suivi solaire	L'installation de systèmes de suivi solaire nécessitera des modifications de la structure de	Les restrictions économiques peuvent limiter la faisabilité de cette solution.	En tenant compte des différentes restrictions, cette situation s'avère ne

	support des panneaux solaires.	Les contrats existants avec le concepteur de la centrale imposent également des limites sur les modifications structurelles.	pas être viable dans notre contexte.
Systemes de nettoyage automatique	Cela peut nécessiter des modifications mineures qui n'affecte pas la conception de la centrale pour l'intégration des systèmes de nettoyage.	Les coûts élevés peuvent être un obstacle majeur à cette solution.	Cette solution peut être retenue car elle intègre aussi un système de surveillance en temps réel de la production d'énergie solaire pour détecter les baisses de rendement dues à l'accumulation de poussière.
Optimisation des onduleurs	La surveillance et la maintenance préventive peuvent être mises en place en accentuant des contrôles réguliers. En effet, selon le registre des pannes, l'arrêt des onduleurs est très fréquent sur la centrale entraînant ainsi l'interruption de la production.	Il n'y a presque pas de facteur limitant car il existe déjà un personnel qualifier pour la surveillance.	L'orientation vers cette solution se justifie par les économies qui seront réalisées grâce à une maintenance proactive.
Utilisation de drones	Les drones peuvent être utilisés pour surveiller l'état des panneaux solaires et détecter les zones nécessitant un nettoyage.	Les contraintes sont entre autres la formation du personnel, la gestion de la maintenance à venir des drones et le cout d'investissement de départ.	Bien qu'elles permettent une intervention rapide et ciblée sans affecter la conception de la centrale, cette solution viendra ajouter son lot de problème à une centrale qui en possède déjà.

<p>La formation du personnel</p>	<p>Elle est essentielle pour assurer une exploitation efficace de la centrale. Former le personnel sur les meilleures pratiques de nettoyage et de maintenance des équipements pour assurer une efficacité maximale du fonctionnement.</p>	<p>Cela nécessite simplement des efforts de formation et de sensibilisation.</p>	<p>Cette solution est généralement plus rentable que d'autres options techniques.</p>
----------------------------------	--	--	---

IV. ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES SOLUTIONS D'OPTIMISATION

IV.1 Critères d'optimisation et les paramètres économiques prise en compte

- **Critères d'un bon nettoyage**

Les différentes solutions obtenues devront être en adéquation avec les différents critères énumérer ci-dessous :

Tableau 14 : Critères d'un bon nettoyage

Critères	Commentaires
Efficacité du nettoyage	Le système est conçu pour être capable de nettoyer efficacement la poussière, les dépôts et autres contaminants des surfaces des panneaux solaires pour garantir une production maximale d'électricité.
Automatisation	Le système est conçu pour être entièrement automatisé pour fonctionner de manière autonome, en minimisant ou en éliminant le besoin d'intervention humaine.
Compatibilité avec les panneaux solaires	Le système est adapté à la configuration spatiale du parc solaire de la centrale.
Consommation d'eau minimale	Le système doit utiliser une quantité minimale d'eau pour éviter le gaspillage et minimiser l'impact environnemental.
Fiabilité	Le système doit être fiable et durable, capable de fonctionner de manière cohérente et efficace dans les conditions environnementales du site (les températures extrêmes).
Facilité d'entretien	Le système doit être facile à entretenir, avec un accès facile aux composants pour les opérations de maintenance.

Coût total de possession	Le système doit offrir un bon rapport qualité-prix sur le long terme.
--------------------------	---

- **Critères d'une bonne maintenance**

Tableau 15 : Critères d'une bonne maintenance

Critères	Commentaires
Planning préventif	Elaboration de plans de maintenance préventive basés sur les historiques de pannes
Documentation	Utilisation de manuels techniques détaillés et de plan d'équipement
Technologies de diagnostic	Emploi de méthodes de surveillance pour anticiper et prévenir les pannes
Proactivité et réactivité	Capacité à réagir rapidement aux pannes et à effectuer des réparations

IV.2 Les paramètres d'évaluation économique

Les différentes mesures économiques ci-dessous serviront d'outil d'évaluation pour l'étude de la viabilité économique des solutions retenus.

- **Coût de cycle de vie**

C'est une approche qui prend en compte tous les coûts associés à un projet sur sa durée de vie complète.

- **Le coût initial d'achat**

C'est le coût d'achat du matériel de nettoyage et des équipements nécessaires.

$$C_o = \sum n_i m_i * C \quad (15)$$

- ✓ m : La quantité des matériels
- ✓ C : prix unitaire d'un matériel
- ✓ C_o : prix d'achat total des matériels
- ✓ n : nombre totale de type de matériels

- **Coût de remplacement**

C'est le cout total des équipements qui seront remplacer au cours du cycle de vie.

$$C_t = k * C_i \quad (16)$$

- ✓ C_t : Coût total de remplacement
- ✓ $C_{Initial}$: cout initial des produits qui seraient remplacés
- ✓ k : facteur d'actualisation du C si le produit serait racheté n années plus tard

Le coût de cycle de vie se calcule par la somme des différents coûts d'exploitation y compris les frais de maintenance et de remplacement du matériel.

$$CCV = C_o + C_{tmaint} + C_{tr} + C_{inst} \quad (17)$$

- ✓ CCV : coût de cycle de vie
- ✓ C_{inst} : coût de l'installation
- ✓ C_{tmaint} : coût total de la maintenance
- ✓ C_{tr} : coût total de remplacement

• Levelized Cost of Energy (LCOE)

La formule générale pour calculer le LCOE, qui représente le coût moyen actualisé de production d'un kWh d'énergie électrique sur la durée de vie d'un projet est la suivante :

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{k=1}^n OPEX(k)}{\sum_{k=1}^n (1-d)^k E_{pro}} \quad (18)$$

- ✓ k : le Compteur du temps en année
- ✓ n : nombre d'années couvert par le projet
- ✓ $CAPEX$: investissement initial de l'installation
- ✓ $OPEX(k)$: frais d'exploitation et de maintenance à l'année k
- ✓ d : dégradation annuelle de la production(%/an)
- ✓ E_{pro} : Energie produit annuellement sans dégradation

$$E_{pro} = P_c * Pr * G * 365 \quad (19)$$

- ✓ P_c : Puissance crête installée
- ✓ PR : Ratio de Performance
- ✓ G : irradiation solaire journalière
- Temps de Retour sur Investissement (TRI)

Le TRI (ou ROI, pour Return on Investment) est une autre mesure financière qui indique combien de temps, il faudra pour récupérer l'investissement initial à partir des flux de trésorerie générées par le projet.

$$TRI = \frac{\text{Investissement initial}}{\text{Bénéfice net cumulé positif}} \quad (20)$$

- ✓ Investissement initial : les dépenses de départ ou frais de construction du projet (flux négatif).
- ✓ Bénéfice net cumulé positif : l'ensemble des gains que le nouveau projet pourra engendrer (flux positif).

IV.3 Étude de la solution d'optimisation du nettoyage hebdomadaire des panneaux solaires

L'accumulation de poussière sur les panneaux solaires peut réduire leur efficacité et affecter la production d'énergie solaire de la centrale photovoltaïque de Zagtouli. Le nettoyage régulier des panneaux solaires est une solution potentielle pour maintenir leur performance optimale.

L'objectif de l'étude est d'évaluer la faisabilité technique et financière du nettoyage régulier des panneaux solaires de la centrale de Zagtouli.

- **Détermination des paramètres techniques**

Fréquence de nettoyage : Après une analyse des conditions climatiques locales et de l'accumulation de poussière, il est recommandé d'effectuer un nettoyage hebdomadaire des panneaux solaires.

Méthode de nettoyage : Le nettoyage peut être effectué à l'aide d'un tracteur équipé d'une brosse rotative et d'un système de pulvérisation d'eau pour éliminer la poussière comme celui déjà présent dans la centrale.

- **Calcul et détermination des paramètres financiers**

Nous allons simplement présenter les résultats de l'étude ; les détails des calculs seront fournis en **Annexe V: Estimation financière de la solution d'optimisation (Achat d'un tracteur supplémentaire)**.

IV.3.1.1 Coût de cycle de vie

Tableau 16 : Résultat du calcul du coût du cycle de vie

Désignation	Valeur (FCFA)
Cout du tracteur (New Holland T4.75)	28 350 000
Rémunération des employées supplémentaires	79 200 000

Coût de remplacement des équipements	12 000 000
Frais de maintenance	15 592 500
Coût du carburant	6 985 440
CCV	142 521 111

Le CCV permet de mettre en place une planification et une budgétisation à long terme, en s'assurant que tous les coûts futurs sont anticipés et pris en compte. En d'autres termes, c'est une métrique qui permet de prévoir les besoins en financement pour les opérations et la maintenance continue.

IV.3.1.2 LCOE de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur

Tableau 17 : Résultat du calcul du LCOE de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur

Désignations	Valeurs	Unités
CAPEX	114 535 440	Fcfa
OPEX	1 254 204,55	Fcfa
Energie/an	199 876,44	kWh
LCOE	73,36	Fcfa/kWh

La solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur qui permettra d'avoir un nettoyage plus efficace des modules PV générera donc un gain positif de production de la centrale de 199 876,44 kWh annuellement.

Un LCOE de 73,36 Fcfa/kWh signifie qu'en moyenne, chaque kilowattheure d'électricité produite par le système coûte 73,36 Fcfa lorsqu'on tient compte de tous les coûts associés à la production de cette électricité sur la durée de vie du projet.

Cette valeur de LCOE est compétitive au coût économique de production de l'énergie qui est estimé entre 30 et 40 Fcfa/kWh et inférieur au coût de vente minimale du kWh de la SONABEL qui est de 96 FCFA. Cette comparaison montre que le projet est économiquement viable.[17]

IV.3.1.3 TRI de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur

Tableau 18 : Résultats du calcul du TRI de la solution d'optimisation qui intègre l'achat d'un nouveau tracteur

Désignations	Valeurs	Unités
CAPEX	114 535 440	Fcfa
Augmentation de la production	199 876,44	kWh
Prix de vente de l'électricité	96	Fcfa/kWh
Flux de trésorerie	19 188 138	Fcfa
TRI	5,96	Années

Le TRI de 5,96 ans signifie qu'il faudra environ 6 années pour que les économies et les revenus supplémentaires générés par le nouveau système de nettoyage compensent entièrement l'investissement initial.

Ce résultat suggère que le projet est bien conçu et efficace avec des coûts de fonctionnement et de maintenance relativement bas par rapport aux revenus générés.

Conclusion partielle : Ces différents résultats de l'étude de faisabilité technique et financière montrent que le nettoyage régulier avec une fréquence d'une semaine des panneaux solaires de la centrale de Zagtoui est une solution rentable et attractive car il promet une récupération relativement rapide de l'investissement.

IV.4 Etude de la solution d'optimisation du système de nettoyage automatique des modules PV

• Introduction

L'installation d'un système de nettoyage automatique est l'une des options la plus efficace pour éviter une accumulation rapide de poussière sur les panneaux solaires et optimiser la production d'énergie solaire.[18]

Le programme de nettoyage actuel est conçu de telle sorte qu'un module nettoyé aujourd'hui doit attendre au minimum 14 jours pour bénéficier d'un autre nettoyage.

Le nouveau système qui sera implanté prévoit une fréquence de sept (07) jours maximums entre deux nettoyages sur un même module. Cette fréquence variera en fonction de l'empoussièrement des modules, de la production et des conditions météorologiques. **En d'autres termes, en fonction du cas on pourrait par exemple avoir une fréquence de nettoyage de trois (03) jours si cela permettait de maintenir la production à un niveau optimal.**

Les indicateurs clés de performance pour évaluer l'efficacité du système sera la production moyenne des modules sur chaque boîte de jonction en tenant compte de l'influence de l'ensoleillement.

- **Calcul et détermination des paramètres techniques**

Cette partie servira à déterminer les différents composants du système incluant les composants mécaniques, électriques et électroniques nécessaires.

IV.4.1.1 Architecture Globale

L'adaptabilité au milieu de la centrale est une des contraintes majeures à l'installation du système.

Étant donné que les modules sont disposés de la même manière et formé de table de même dimension sur l'ensemble du site, un modèle de référence sur une table bien défini s'appliquera sur tout le reste de la centrale.

- Fonctionnement du système

Le système est représenté par le Graphe Fonctionnel de Commande Etape-Transition (GRAF CET) suivant :

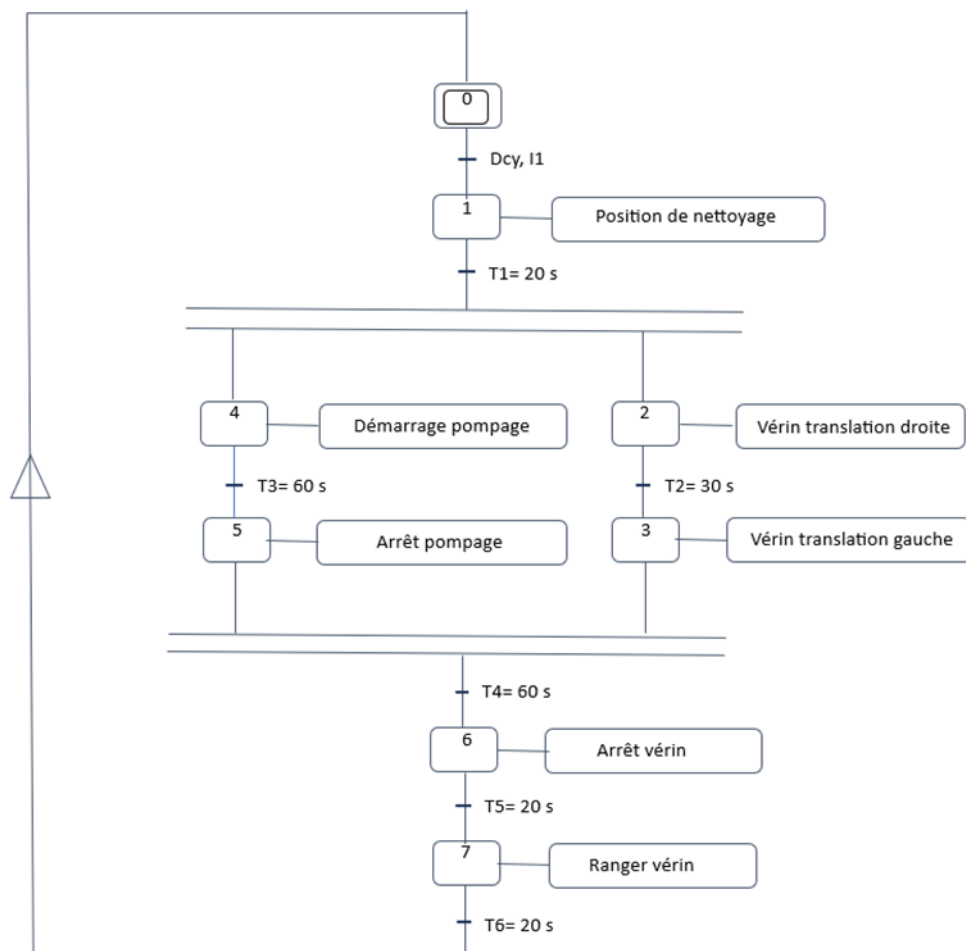


Figure 17 : Représentation du grafcet fonctionnel

Voici une explication claire du fonctionnement du programme de nettoyage des panneaux solaires avec un mouvement en aller-retour des brosses de nettoyage sur les panneaux, en utilisant le logiciel Zelio Soft 2 et le langage ladder, en prenant en compte le déversement d'eau par les buses de la brosse :

Tableau 19 : Explication du fonctionnement du programme de nettoyage

Étapes	Déroulement de la séquence
Déclenchement du nettoyage	Lorsque l'utilisateur démarre le nettoyage en appuyant sur un bouton de démarrage "Dcy", le programme commence à s'exécuter.
Activation du moteur	Au démarrage du nettoyage, le moteur est activé pour faire avancer les brosses de nettoyage sur les panneaux solaires. Cela est réalisé en activant une sortie associée au moteur dans le langage ladder.
Déversement d'eau	Simultanément au démarrage du mouvement des brosses, une vanne d'eau est ouverte pour permettre le déversement d'eau sur les panneaux solaires. Cette vanne est contrôlée par une autre sortie dans le programme.
Mouvement en aller	Les brosses se déplacent en avant jusqu'à atteindre la position désirée sur les panneaux solaires. Le mouvement est maintenu jusqu'à ce qu'un capteur de fin de course avant détecte la position finale des brosses.
Arrêt du déversement d'eau	Une fois que les brosses ont atteint la position avant, le déversement d'eau est arrêté. Cela se produit lorsque la sortie associée à la vanne d'eau est désactivée.
Mouvement en retour	Après avoir atteint la position avant, les brosses reviennent en arrière en direction de leur position de départ. Cela se produit lorsque le moteur est inversé, ce qui fait reculer les brosses.
Arrêt du mouvement	Une fois que les brosses ont effectué leur déplacement en aller-retour et sont revenues à leur position de départ, le moteur est désactivé pour arrêter le mouvement. Cela se produit lorsque les capteurs de fin de course avant et arrière détectent à nouveau leurs positions respectives.

IV.4.1.2 Développement du logiciel de programmation du système

Le logiciel Zelio Soft 2 a été utilisé pour programmer le contrôle automatisé du système.

Zelio Soft 2 est un logiciel de programmation développé par Schneider Electric pour la programmation des automates. Le programme conçu avec le langage Ladder contribuera à l'optimisation et à l'amélioration de la productivité de la centrale.

Les différents paramètres de simulation du programme tels que les équations des temps, l'adressage des étapes et séquences sont disponible en **Annexe II** Erreur ! Source du renvoi introuvable..

IV.4.1.3 Choix des composants auxiliaires du système

Les différents choix de sélection de composants ont été prise en fonction des sources d'alimentation en électricité et en eau déjà disponible sur la centrale.

- **Calcul et détermination des paramètres financiers**

Nous allons simplement présenter les résultats de l'étude ; les détails des calculs seront fournis en **Annexe VI : Estimation financière de la solution d'optimisation (Conception d'un système de nettoyage automatique)**

IV.4.1.4 Coût de cycle de vie

Tableau 20 : Résultat du calcul du coût du cycle de vie de la solution du système de nettoyage automatique

Désignation	Valeur (FCFA)
Coût du système auto	1 334 700 000
Coût de développement l'installation	360 000 000
Coût de remplacement	711 000 000
Frais de maintenance	33 367 500
CCV	2 439 067 500

Le CCV permet de mettre en place une planification et une budgétisation à long terme, en s'assurant que tous les couts futurs sont anticipés et pris en compte. En d'autres termes, c'est une métrique qui permet de prévoir les besoins en financement pour les opérations et la maintenance continue.

IV.4.1.5 LCOE de la solution du système de nettoyage automatique

Tableau 21 : Résultat du calcul du LCOE de la solution du système de nettoyage automatique

Désignations	Valeurs	Unités
CAPEX	1 694 700 000	Fcfa
OPEX	33 834 886	Fcfa
Energie/an	199 876,44	kWh
LCOE	1258,8	Fcfa/kWh

Un LCOE de 1258,8 Fcfa/kWh signifie qu'en moyenne, chaque kilowattheure d'électricité produite par le système coûte 1258,8 Fcfa lorsqu'on tient compte de tous les coûts associés à la production de cette électricité sur la durée de vie du projet.

Cette valeur de LCOE est largement supérieure par rapport au coût de l'énergie du réseau SONABEL (165 Fcfa/kWh) et non compétitif par rapport au coût économique de production de la centrale qui est estimé entre 30 et 40 Fcfa/kWh. Ces différentes comparaisons montrent que le projet n'est pas économiquement viable.

IV.4.1.6 TRI de la solution du système de nettoyage automatique

Tableau 22 : Résultats du calcul du TRI de la solution du système de nettoyage automatique

Désignations	Valeurs	Unités
Investissement initial	1 694 700 000	Fcfa
Augmentation de la production	199 876,44	kWh
Prix de vente de l'électricité	96	Fcfa/kWh
Flux de trésorerie	19 188 138	Fcfa
TRI	88,38	Années

Le TRI de 88 ans confirme encore plus que notre projet n'est pas économiquement viable.

Une valeur de TRI avoisine la durée de vie restante de la centrale ce qui vient lever le doute sur tout éventuel retour sur investissement. Toutes ces remarques viennent invalider un éventuel investissement sur ce projet.

Conclusion partielle : Ces différents résultats de l'étude de faisabilité technique et financière montrent que le projet d'ajout d'un système nettoyage automatique sur une très grande centrale comme celle de ZAGTOULI n'est pas une solution viable. En effet, une période de retour sur investissement très longue est sensible aux fluctuations économiques et à l'incertitude technologiques et réglementaire.

IV.5 Étude de la solution d'optimisation des onduleurs

• Introduction

Les onduleurs sont des composants essentiels des centrales photovoltaïques, convertissant l'énergie solaire en électricité utilisable par le réseau. L'optimisation de ces onduleurs peut contribuer à améliorer l'efficacité globale de la centrale et à maximiser la production d'énergie solaire.

• Détermination des paramètres techniques

L'évaluation de l'efficacité et de la fiabilité des onduleurs installés dans la centrale passe par la mesure des pertes énergétiques et des inefficacités dans la conversion de l'énergie solaire en électricité.

La liste ci-dessous représente un recensement exhaustif des défauts récurrents au niveau des onduleurs de la centrale de Zagtoui et la proposition de différentes solutions (source registre mensuel de la centrale).

Ces différentes pannes ne peuvent être supprimées définitivement, seule des contrôles réguliers et des interventions efficaces peuvent permettre d'atténuer les pertes due à ces défauts.

Le tableau ci-dessous est un récapitulatif des défauts récurrents qui surviennent au niveau des onduleurs et des propositions de solutions pour mieux être efficace face à ces défauts.

Tableau 23 : Proposition de différentes solutions au défauts récurrents des onduleurs

Défauts récurrents	Solutions
Arrêt de l'onduleur pour cause de nettoyage	C'est une action annuelle impérative qui se déroule en début de chaque année. La seule solution d'optimisation réside dans l'efficacité des maintenanciers à effectuer leurs tâches.
Défaut de ventilation de l'onduleur	Le remplacement du ventilateur est nécessaire en cas de surchauffe de l'onduleur. Effectuez des vérifications régulières et remplacez les ventilateurs défectueux pour assurer un refroidissement adéquat constituera un moyen d'augmenter la performance de la centrale.

Onduleur non démarré : défaut de surtension instantanée ou défaut d'isolement	Pour l'onduleur qui refuse de démarrer en raison d'un défaut de surtension instantanée ou d'isolement, il faut examiner le système de protection contre les surtensions et vérifier les composants isolants de l'onduleur.
Onduleur non démarré : tension PV basse	Il faut examiner le système de surveillance des tensions PV. Réajuster les seuils de démarrage si nécessaire et remplacer les composants défectueux.
Arrêt multiple onduleur : faible tension cc et valeur de la résistance d'isolement hors tolérance.	Pour éviter les arrêts multiples dus à une faible tension CC et une résistance d'isolement hors tolérance, effectuer des contrôles réguliers de la tension CC (état du contacteur DC) et de la résistance d'isolement.
Arrêt de l'onduleur pour défaut valeur de fréquence réseau.	En cas d'arrêt pour défaut de valeur de fréquence du réseau, il faut s'assurer que l'onduleur est synchronisé avec la fréquence du réseau. Effectuer des réglages appropriés et remplacer les composants défectueux si nécessaire.

Conclusion partielle : La sélection des meilleures pratiques d'optimisation des onduleurs pour la centrale photovoltaïque de Zagtoui est une solution avantageuse pour l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et maximiser la production d'énergie solaire.

V. IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL DES DIFFERENTES SOLUTIONS D'OPTIMISATION

V.1 Introduction

De nos jours, l'aspect environnemental et social est presque incontournable dans tous les projets de développement. Il semble alors impératif de mener une Etude d'Impact Environnementale et Social (EIES) pour évaluer les effets potentiels sur l'environnement et les communautés locales que pourront engendrer l'ajout des différentes solutions d'optimisation de la production de la centrale. L'intégration d'un nettoyage plus régulier avec l'achat d'un tracteur de nettoyage supplémentaire et la réalisation d'un système de nettoyage automatique produira certainement des impacts évidents sur l'environnement.

L'objectif de cette étude est d'identifier et d'évaluer toutes les options possibles pour minimiser les impacts négatifs, inventorier tous les biens et personnes affectés par ce projet [19]. Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'application de la politique, du respect des lois environnementales nationales et la protection de l'environnement.

V.2 Méthodologie d'identification et d'évaluation des impacts

La méthodologie que nous avons adopté pour évaluer les impacts environnementaux se résume dans les points suivants. Nous avons en premier lieu le rappel du cadre législatif régissant le projet. Ensuite, l'identification et description des activités sources puis l'évaluation de l'importance des impacts. Enfin, cette méthodologie prendra fin avec la présentation du plan de Gestion Environnemental et Social.

V.3 Rappel du cadre législatif régissant le projet

Sur le plan législatif et réglementaire, on peut citer principalement la loi N° 006-2013/AN du 02 Avril 2013, portant code de l'environnement au Burkina Faso, la loi N° 034-2012/AN du 02 avril 2012, la loi portant réorganisation Agraire et Foncière (RAF) au Burkina Faso, la loi N°003/2011/AN du 05 avril 2011 portant code forestier, et le décret N° 2015-1187/PRESTRANS/PM/MERH/MATD/MAE/MARHASA/MRH/MICA/MHU/MIDT/MCT du 22 Octobre 2015 portant conditions et procédures de réalisation et de la validation de l'évaluation environnementale stratégique, de l'étude et de la notice d'impact environnemental et social [20].

V.4 Identification et description des activités sources

Ces activités ont le potentiel d'influencer divers aspects environnementaux, notamment le milieu biophysique (tels que la végétation, l'ambiance sonore, le paysage, les sols et la faune, le foncier) et le milieu humain (comprenant la sécurité, l'emploi, l'offre et la qualité de la formation académique, ainsi que l'économie locale).

Tableau 24 : Description des activités sources d'impact

Activités sources	Descriptions	Impact milieu physique	Impact milieu humain
Transport et logistique	Transport du tracteur de nettoyage depuis le lieu d'achat jusqu'à la centrale solaire	Emissions de gaz à effet de serre (Production du CO ₂)	Augmentation du trafic routier, risques d'accidents
Formation et mise en service	Formation des opérateurs de la centrale pour l'utilisation et la maintenance du tracteur	Consommation de carburant pendant les tests et la mise en service	Besoin de ressource pour la formation

Utilisation du tracteur	Opération régulière du tracteur pour le nettoyage des panneaux solaires	Emissions de gaz à échappement (Production du CO2), consommation de carburant, l'usure des pneus libère des hydrocarbures	Impact potentiel sur la santé des opérateurs en raison de l'exposition aux polluants.
Installation du système de nettoyage automatique	Mise en place des équipements de nettoyage automatique sur les modules	Perturbation de la végétation locale, impact temporaire sur la faune locale	Réduction potentielle des opérateurs de la centrale dû à l'automatisation du nettoyage
Excavation des tranchées pour les câbles électriques	La pose de câblage sous-sol	Le Sol, la végétation, la faune	Création d'emploi
Gestion des eaux usées	Traitement et évacuation des eaux usées générées par le nettoyage	Pression sur les ressources en eaux locales	Recyclage potentiel des eaux usées, création de nouveau emploi
Nettoyage des modules	Les différents modes de nettoyage occasionnent des déversements hasardeux des huiles de vidange, des fuites d'huiles de moteur des engins mécanisés	Utilisation de l'eau, la faune, le sol et la végétation	Emploi, Bruit, la pollution de la nappe phréatique et des perturbations
Remplacement des composants	Il s'agit de la maintenance préventive ou curative	Pollution du sol, de la végétation	Interruption des activités
Utilisation de l'électricité	Le système entrainera une consommation d'électricité		Augmentation de la facture énergétique
Démantèlement du système automatisé	Arrêt après la fin du cycle de vie des appareils	Sol, végétation, paysage	Bruit, création d'emploi et réutilisation des matériaux
Arrêt définitif du tracteur	Il s'agit de l'orientation à suivre après la fin de vie du tracteur	Sol, eau, paysage	Santé et sécurité pour les résidents locaux

V.5 Évaluation de l'importance des impacts

Dans de cette étape, nous allons utiliser la grille de Martin Fecteau (1997) pour évaluer l'ampleur des impacts. Cette grille comporte des lignes qui représentent les options à évaluer, ainsi que des colonnes dédiées aux critères pertinents tels que l'intensité, l'étendue et l'importance. [14]

La grille de détermination de l'importance des impacts permet d'évaluer chaque impact du projet présenté en **Annexe VII Tab 12**.

V.6 Plan de Gestion Environnemental et Social

Le Plan de Gestion Environnementale et Social (PGES) comporte un programme de mise en œuvre des mesures d'atténuation, un programme de surveillance et de suivi environnemental. Le plan décline, pour les différents impacts des travaux identifiés, les éléments tels que l'action environnementale, les objectifs de l'action, les tâches de l'action, les indicateurs de l'efficacité de l'action. La mise en application effective de ce plan permettra d'atténuer les impacts négatifs du projet.

La synthèse du PGES est donné en **Annexe VII Tab 13**.

Conclusion partielle : La présente notice d'impact environnemental et social réalisée montre que l'adoption de nouvelle technique d'optimisation pour garantir une bonne production entrainera obligatoirement des impacts sur le plan environnement et social. La mise en œuvre d'un plan de gestion environnemental et social permettra d'atténuer ces différents impacts. Enfin, la réussite de ce projet dans le respect des normes environnementales et sociales repose sur l'implication de toutes les parties prenantes concernées.

CONCLUSION

Le présent mémoire a exploré l'optimisation technique et économique du champ photovoltaïque de la centrale de Zagtouli au Burkina Faso, une des plus grandes installations solaires en Afrique de l'Ouest. À travers une analyse détaillée des différents facteurs influençant la performance des systèmes photovoltaïques, tels que l'ensoleillement, la température, l'humidité et les conditions poussiéreuses, nous avons pu identifier les leviers d'amélioration possibles pour maximiser la production d'énergie et la rentabilité économique de la centrale. L'étude a mis en évidence plusieurs points clés dont l'impact des conditions climatiques. En effet, les températures élevées et l'humidité importante ont un impact négatif significatif sur l'efficacité des panneaux solaires.

D'autres part, la présence de poussières réduit considérablement la production d'énergie. Des stratégies de nettoyage régulières et efficaces sont nécessaires pour maintenir une performance optimale des panneaux photovoltaïques.

En intégrant des solutions comme l'ajout d'un nouveau tracteur de nettoyage pour réduire la fréquence du nettoyage en une semaine et les propositions de résolution efficace des défauts récurrents des onduleurs pour réduire leur temps d'arrêt, il est possible de réaliser un gain annuel de 19 188 138 FCFA. L'analyse économique a montré que les investissements supplémentaires peuvent être rapidement amortis grâce aux gains en efficacité. L'application de ces diverses recommandations pourrait donc augmenter la production annuelle de la centrale de Zagtouli d'environ 0,35%.

RECOMMANDATIONS

Comme recommandations, nous proposons à la SONABEL la mise en place de directives techniques sur les réseaux électriques. Ces directives regrouperont les retours d'expériences des projets déjà mis en place et les différentes hypothèses, servant ainsi de guide pour les futurs projets. Il est également recommandé d'implanter un système de stockage et de gestion des différentes opérations de maintenance ainsi que des informations de retour d'expériences des travaux déjà effectués. Cela permettra un gain de temps dans la recherche de solutions à certains problèmes. En outre, la création d'une bibliothèque et d'un pôle de recherche est conseillée. Cela offrira un accès à certaines données d'études antérieures qui pourront être utilisées pour les projets futurs. Il est essentiel d'assurer une formation continue des agents sur les nouvelles techniques et les meilleures pratiques en matière d'exploitation de la centrale. De plus, il est crucial de réévaluer régulièrement les coûts de cycle de vie (CCV) et le Levelized Cost of Energy (LCOE) pour s'assurer de la rentabilité continue de la centrale, garantissant ainsi une meilleure maîtrise des outils nécessaires pour assurer un fonctionnement optimal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] « World Energy Transitions Outlook 2023 ». Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- [2] « A Propos », SONABEL. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sonabel.bf/a-propos/>
- [3] « Notre histoire », SONABEL. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sonabel.bf/notre-histoire/>
- [4] « Organigramme », SONABEL. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sonabel.bf/organigramme/>
- [5] « IRENA sur X : “As of 2021, global renewable generation capacity reached 3 064 GW. Although #hydropower accounted for the largest share of the global total, solar & wind continued to dominate the expansion. Read more on @IRENA’s new Renewable Capacity Statistics 2022” ». Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://x.com/IRENA/status/1513728617980706820>
- [6] « L’histoire de l’énergie solaire », SirEnergies - Cabinet de conseil et de sourcing en énergie. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-solaire/>
- [7] A. TOSSA, « Systèmes PV connectés réseau 22-10-2022.pptx ».
- [8] « Notre avenir à tous passe par l’énergie solaire ! | Cdurable.info ». Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://cdurable.info/notre-avenir-a-tous-passe-par-l-energie-solaire/>
- [9] « Présentation Projet ZAGTOULI - 29 - 11 - Module II - IES.pdf ».
- [10] B. Z. François, « Energie solaire photovoltaïque, dernier rempart contre le déficit énergétique ». Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.investirauburkina.net/secteurs-et-marches/energie/burkina-faso-energie-solaire-photovoltaïque-dernier-rempart-contre-le-deficit-energetique-croissant.html>
- [11] « IS/IEC 61724 (1998) : Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data exchange and Analysis ».
- [12] pmmilum, « How Does Temperature Affect Solar Panel Energy Production ? », Ilum Solar. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://ilumsolar.com/how-does-temperature-affect-solar-panel-energy-production/>
- [13] M. K. Panjwani, S. K. Panjwani, F. H. Mangi, D. Khan, et L. Meicheng, « Humid free efficient solar panel », *AIP Conf. Proc.*, vol. 1884, n° 1, p. 020002, sept. 2017, doi: 10.1063/1.5002506.
- [14] A. Brock, « Do Solar Panels Work on Cloudy Days ? », Solar Alliance. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.solaralliance.com/how-do-clouds-affect-solar-panels/>
- [15] D. C. Nomades, « Historique-Météo.net », Historique Météo. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.historique-meteo.net/>
- [16] « Grille-Tarifaire.pdf ».
- [17] Alliance_Sahel, « La centrale solaire de Zagtoui, énergies renouvelables au Burkina Faso », Alliance Sahel. Consulté le : 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.alliance-sahel.org/actualites/centrale-solaire-de-zagtoui/>
- [18] « livre-blanc-libre-energie-2019.pdf ».
- [19] « EIE_2iE_2016_2018.pdf ».
- [20] « Rapport final EIES ligne 90 KV Kossodo - Ziniaré.pdf ».

ANNEXES

Annexe I :Présentation	68
Annexe II: Paramètres de programmation sur Zelio	70
Annexe III: Tracteur de nettoyage	75
Annexe IV: Choix des composantes auxiliaire du système de nettoyage automatique	76
Annexe V: Estimation financière de la solution d'optimisation (Achat d'un tracteur supplémentaire)	79
Annexe VI: Estimation financière de la solution d'optimisation (Conception d'un système de nettoyage automatique)	82
Annexe VII: Impact environnemental et social.....	84

Annexe I :Présentation

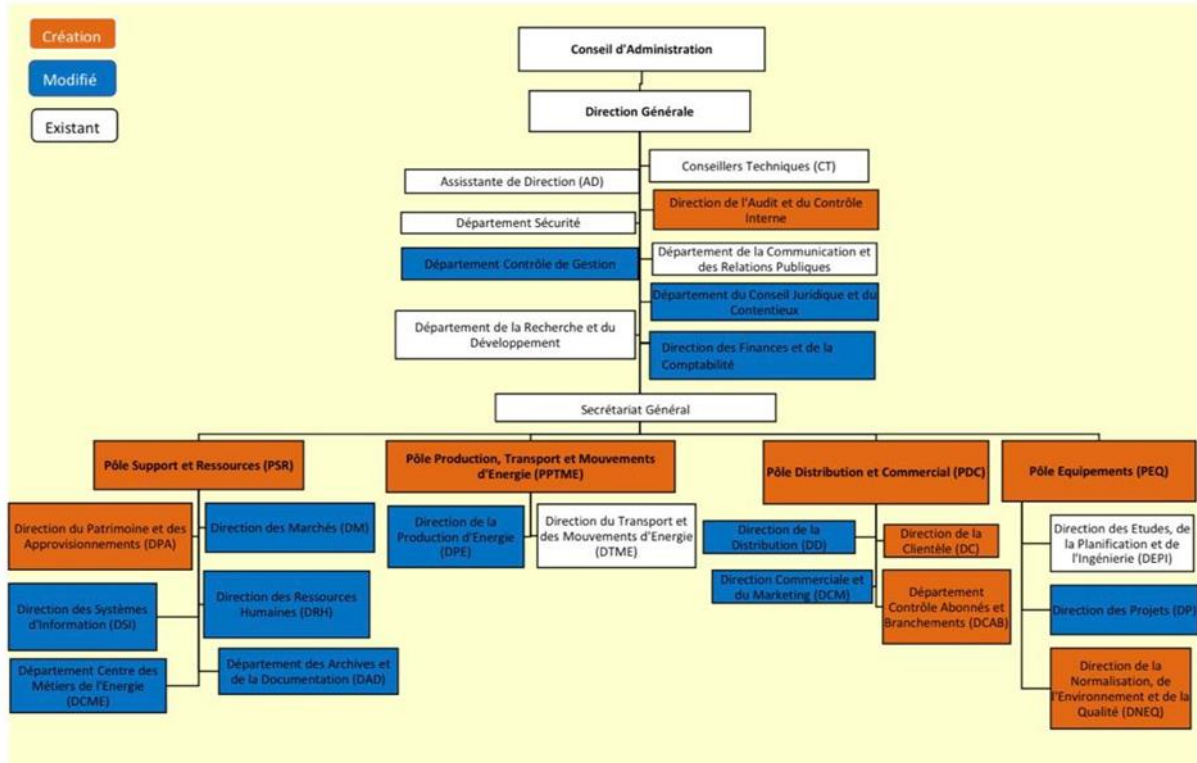


Fig 1: Récapitulatif de l’organigramme de la SONABEL

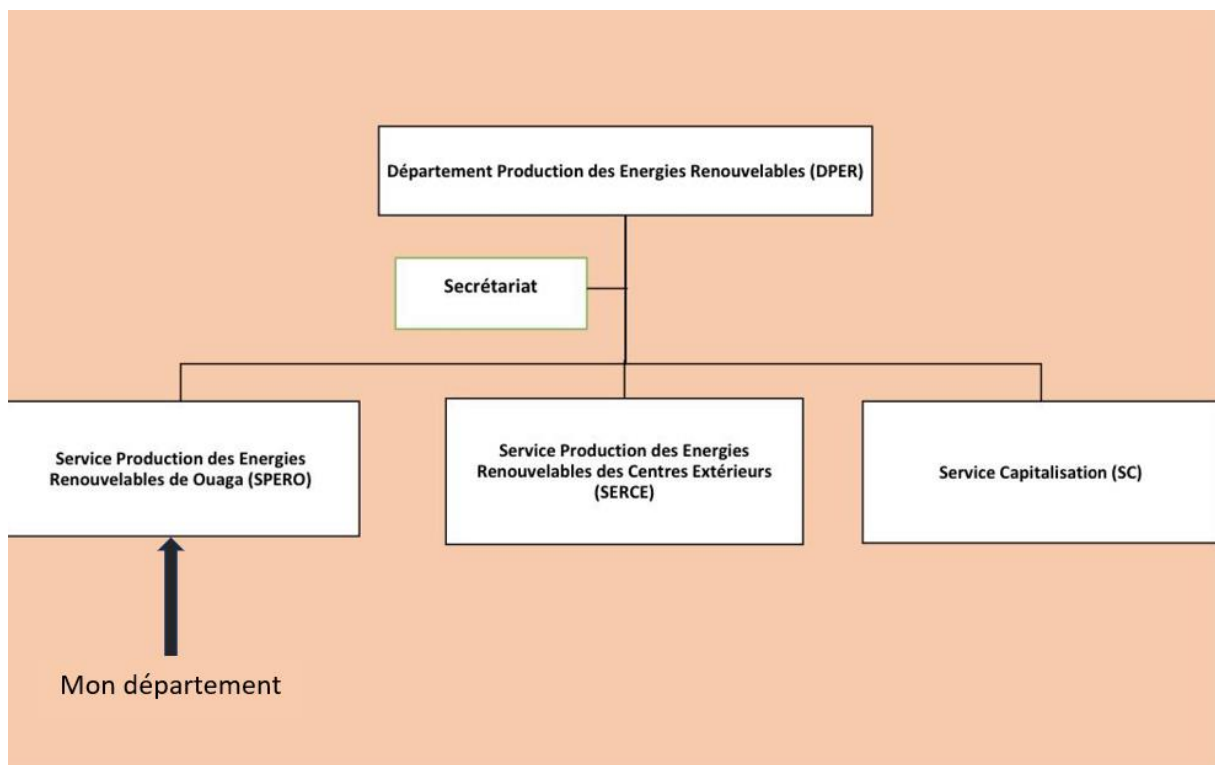


Fig 2: Organisation de mon département

Source : Sonabel.bf

Sunmodule[®] Plus SW 250 - 260 poly



SOLARWORLD
REAL VALUE

Fiche technique



- 

Fabrication en Allemagne,
pays à la pointe de la technologie
- 

TUV Power controlled :
Les tolérances de mesure les plus faibles
du marché
- 

Sunmodule Plus :
Une tolérance de puissance positive
- 

Garantie de puissance linéaire de 25 ans
et garantie produit de 10 ans

Pour la production de ses modules photovoltaïques, SolarWorld AG mise sur la technologie allemande et garantit ainsi une qualité durable pour ses produits.

Le certificat « Power controlled » du TÜV Rheinland est garant que la puissance nominale indiquée pour le module photovoltaïque Sunmodule Plus est contrôlée à intervalles réguliers : elle est ainsi garantie. L'écart avec les données du TÜV est de 2 % maximum.

La tolérance de puissance positive garantit une efficacité supérieure au niveau des installations. Suite aux tests, seuls les modules photovoltaïques dont la puissance nominale est égale ou supérieure à celle indiquée sont livrés. La tolérance des puissance se situe entre -0 Wc et + 5 Wc.

Avec sa garantie de performance linéaire assurée sur plus de 25 ans, SolarWorld garantit une réduction maximale des performances de 0,7 % par an, une nette plus-value par rapport aux garanties à deux niveaux pratiquées couramment sur le marché. Nos conditions générales de garantie et de service sécurisent votre investissement sur le long terme.

www.solarworld.com

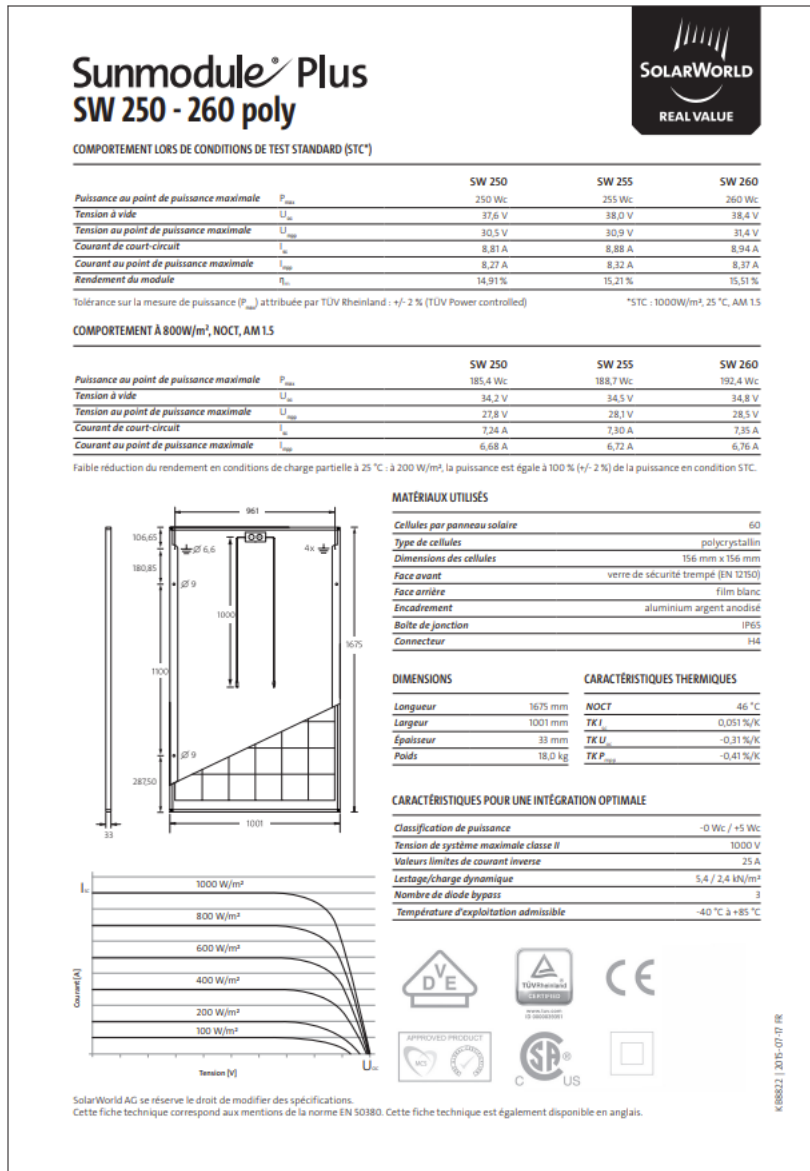


Fig 3: Fiche technique du module

Annexe II: Paramètres de programmation sur Zelio

Tab 1 :Equation des étapes

Étapes	CA	CD
1	X0.I1	X2.X4
2	X1.T1	X3
3	X2.T2	X6
4	X1.T1	X5

5	X4.T3	X6
6	X5.X3.T4	X7
7	X6.T5	X1

Adressages

Position de nettoyage = Q1

Démarrage pompage = vérin translation droite = Q2

Arrêt pompage = vérin translation gauche = Q3

Arrêt vérin = ranger vérin = Q4

Equations des sorties

X1 = M1

X2 = M2

X3 = M3

X4 = M4

X5 = M5

X6 = M6

X7 = M7

Séquences

Mouvement du vérin en position de nettoyage = 20 s

Translation vers la droite = 30 s

Translation vers la gauche = 30 s

Démarrage pompage = 60 s

Arrêt pompage = 60 s

Arrêt vérin = 20 s

Ranger vérin = 20 s

Translation droite et translation gauche trois allé retour = 60 s

Calcul des temps

Le démarrage pompage doit être prolongé pendant les deux (02) aller-retour du vérin. La sortie du vérin vers la droite fait 30 s et l'entrée du vérin vers la gauche fait 30 s donc un aller-retour fait 60 s ce qui fait alors 120 s de temps pour les deux (02) allés retour.

L'arrêt du pompage d'eau doit s'effectuer lors de l'arrêt et le rangement du vérin donc 120 s.

T1 = 20 s

T2 = 30 s

T3 = 60 s

T4 = 60 s

T5 = 20 s

T6 = 20 s

Simulation

Q1 = vérin position de nettoyage

Q2 = démarrage pompage et nettoyage droite

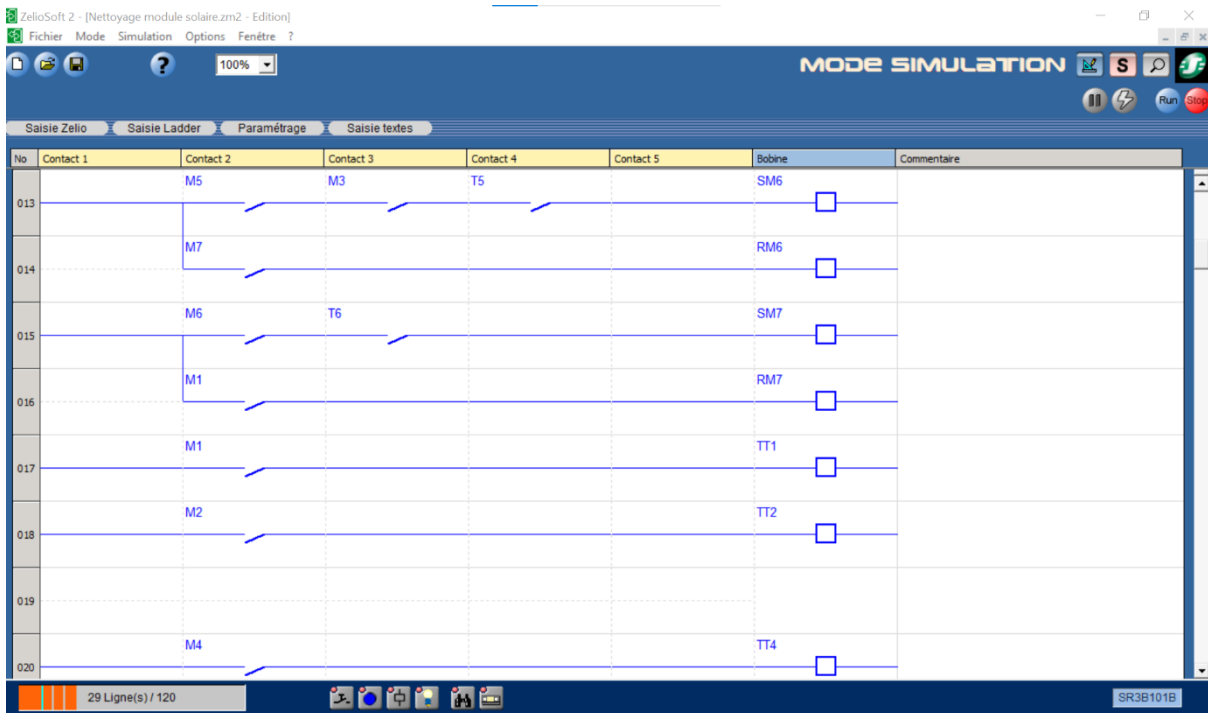
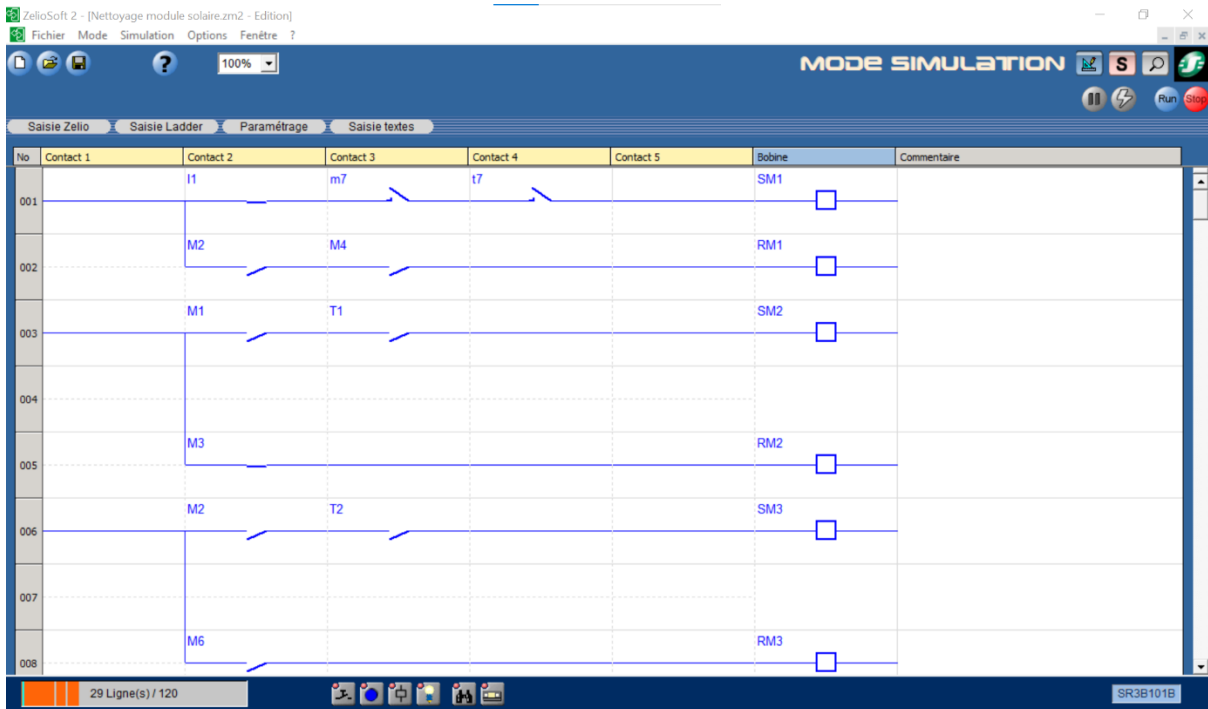
Q1 et Q3 = revient en position de nettoyage, nettoyage gauche

Q2 et Q4 = arrêt et nettoyage droite

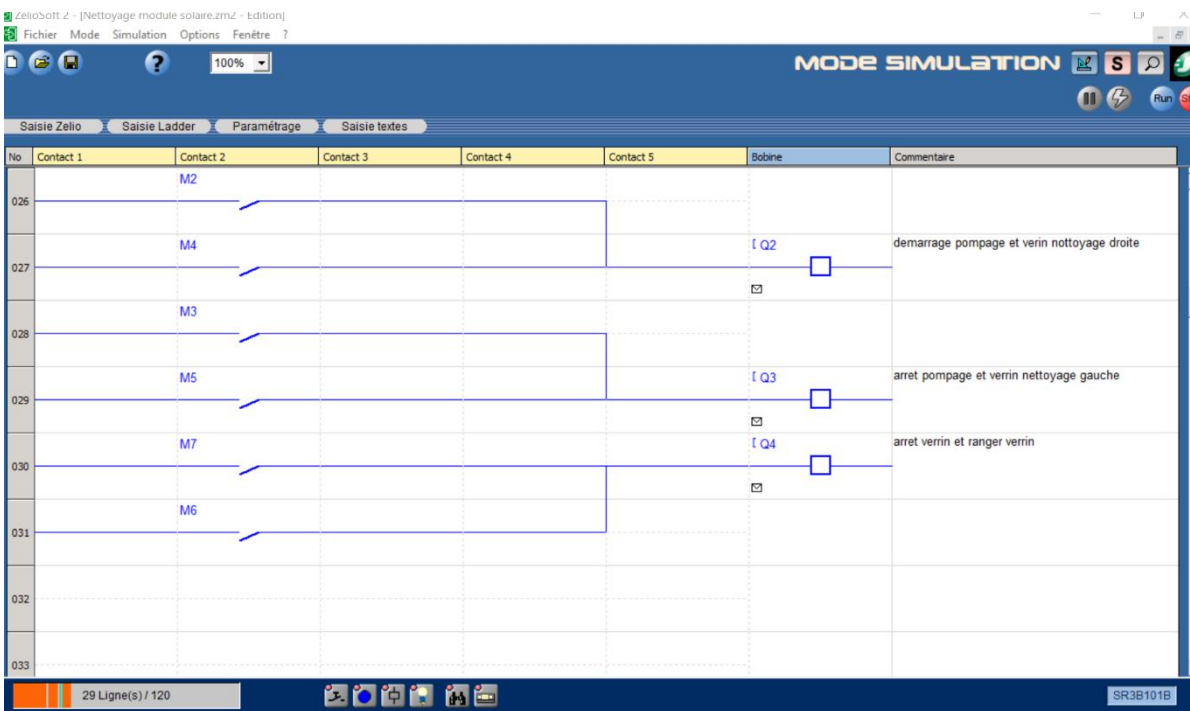
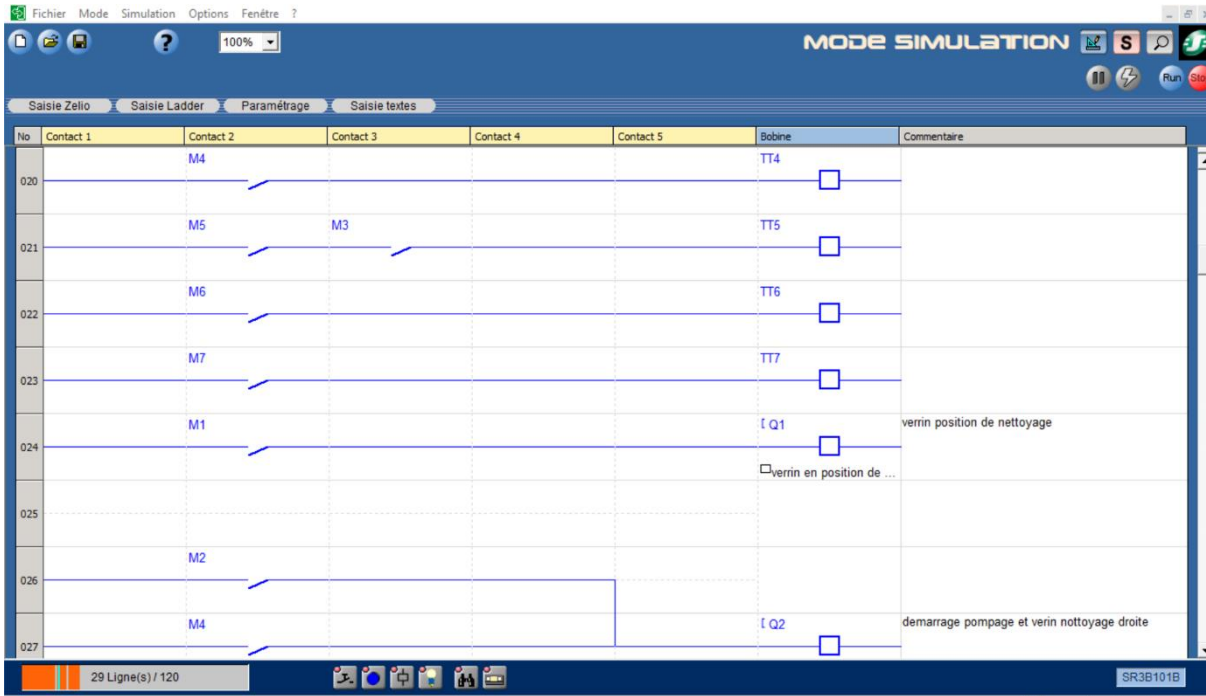
Q3 et Q4 = nettoyage gauche, arrêt vérin, arrêt pompage et ranger vérin

Fig. 2 : Récapitulatif des résultats de la simulation sur Zelio Soft 2

Optimisation technico-économique du champ photovoltaïque de la centrale de Zagtoui.



Optimisation technico-économique du champ photovoltaïque de la centrale de Zagtoui.



Annexe III: Tracteur de nettoyage



Annexe IV: Choix des composantes auxiliaire du système de nettoyage automatique Source d'alimentation

La source d'alimentation du système de nettoyage sera le réseau SONABEL. Cette résolution suit la configuration existante des équipements auxiliaires de la centrale qui sont tous raccordé au réseau. Elle vise aussi à réduire le coût réalisation du projet en n'engendrant pas des couts supplémentaires de conception de réseau électrique.

Moteur électrique



Fig. 4 : Le moteur électrique

Tab 3: Moteur électrique

Le variateur de vitesse

C'est un équipement essentiel pour réguler la vitesse de rotation du moteur électrique.

On a fait le choix d'un variateur de fréquence de Siemens Power Module 7,5 Kw.



Source d'eau

Une source d'eau fiable et durable est indispensable pour le bon fonctionnement du système. L'eau du forage déjà disponible sur le site de la centrale a été retenue comme source d'alimentation d'eau.

Le système consistera à l'installation d'un réseau de canalisation sur tout l'étendu du champ solaire pour desservir chaque table de nettoyage. Il sera aussi intégré des buses à haute pression pour une distribution efficace de l'eau et en optimisant les cycles de nettoyage.

- Les composantes mécaniques et électronique du système

Choix des brosses de nettoyage

Le choix des brosses s'est porté sur des brosses cylindriques de nettoyage de panneaux solaires de numéro de model : Roll brush-6.

Ce sont des brosses dont les caractéristiques prennent en compte les défis spécifiques posés par les conditions environnementales du site. Il s'agit de brosses munies de buses d'arrosage qui déversera l'eau au fur et à mesure du lavage.



Fig. 5 : La brosse Roll brush-6

Tab 4 : Tableau caractéristique de la brosse Roll brush-6

Type de contrôle	CNC
Customisation	Customisée
Condition	Nouveau
Automatisation	Semi-Automatique
Certification	ISO9001
Type	Sand Casting
Diamètre extérieur	350mm
Diamètre essieu	45mm
Poils	Nylon
Longueur de fil	50mm
Longueur de brosse	1000mm
Matériel du tuyau	Acier
Marque commerciale	XingYing

La longueur de la brosse sur le marché est de 01 mètre, le fournisseur offre la possibilité de customiser les brosses selon nos besoins. Le système requiert une brosse de 06 mètres sur chaque table. L'option technique est de mettre les brosses en série (mettre bout à bout 06 brosses).

Il s'agira de mettre bout à bout de manière linéaire des brosses de 1,6 cm chacune pour une couverture uniforme de tous les panneaux solaires. Le système devra couvrir l'ensemble des panneaux disposés en format paysage (6*12).

Annexe V: Estimation financière de la solution d'optimisation (Achat d'un tracteur supplémentaire)

Tab 5 : Calcul du CCV de sol 1

Coût du tracteur			
Désignation	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
New Holland+ Brosse de nettoyage	1	28 350 000	28 350 000
Frais de transport	0	5 000 000	0
Frais accessoires	0	250 000	0
Total		28 350 000	
Cout de développement de l'installation			
Frais d'installation des opérateurs	02	52 800 000	105600000
Total		105 600 000	
Coût de remplacement des composants du Tracteur			
Désignations	Années	Coût	
Brosse de nettoyage	5	1 200 000	
	10	1 200 000	
	15	1 200 000	
	20	1 200 000	
	25	1 200 000	
Système hydraulique et électrique	5	2 000 000	
	10	0	
	15	2 000 000	
	20	0	
	25	2 000 000	
Coût total de remplacement		12 000 000	
Coût de maintenance cumulée		15 592 500	
Coût de cycle de vie du tracteur		142 521 111 Fcfa	

Estimation du prix du carburant

- On a 402 lignes de 4 tables ; sachant qu'une table est constitué de 12 modules en formant paysage sur la longueur.

Longueur d'une table : $1,675 \text{ m} \times 12 = 20,1 \text{ m}$

La longueur totale des lignes de 04 tables est= $402 \times 4 \times 20,1 = 32\,320,8 \text{ m}$

- On a 64 lignes de 3 tables

La longueur totale des lignes de 03 tables est = $64 \times 3 \times 20,1 = 3\,859,2 \text{ m}$

- La longueur des allées et des contours des tables (un contour fait 10m) = $160 \times 10 = 1600 \text{ m}$

- La longueur totale des lignes de nettoyage des modules est :
- Un cycle de nettoyage complet est constitué d'un aller-retour et d'un aller pour terminer

$((402*4*20,1) *3) + 1600 = 98\ 562,4$ m ou 98,56 km.

Pour un nettoyage total de modules le tracteur devra parcourir 98,56 Km.

Le nettoyage étant hebdomadaire, on peut tirer la distance annuelle qui sera parcourue (les jours fériés et la saison pluvieuse étant exclu) = $98,56 \text{ km} * 35 = 3449,6$ km.

Pour notre modèle de tracteur le New Holland T4.75; on a une consommation de 10 litres par heure soit 3 litres de diesel par kilomètre.

Au Burkina Faso, le prix du diesel est actuellement à 675 Fcfa/litre.

Prix du carburant = $3449,6 \text{ km} * 3 * 675 \text{ Fcfa/litre} = 6\ 985\ 440$ Fcfa

Le prix du carburant sera d'environ 6 985 440 Fcfa par an.

Tab 6 : Calcul du CAPEX et de l'OPEX

Paramètres	Valeurs	Unités
Perte de rendement par ans	0,7	%
Perte de rendement à la dernière année	17,5	%
Taux d'actualisation	0,08	

Tab 7 : Résultats du calcul du LCOE de la solution de l'ajout du tracteur

Année	CAPEX	Maintenance	Remplaceme	OPEX	Energie prod	1	
1	117928611	708750	545454,545	1254204,55	198677,181	1,08	183960
2	0	708750	545454,545	1254204,55	197087,964	1,1664	168971
3	0	708750	545454,545	1254204,55	814538,275	1,259712	646606
4	0	708750	545454,545	1254204,55	809651,046	1,36048896	595117
5	0	708750	545454,545	1254204,55	804793,139	1,46932808	547728
6	0	708750	545454,545	1254204,55	799964,381	1,58687432	504113
7	0	708750	545454,545	1254204,55	795164,594	1,71382427	463970
8	0	708750	545454,545	1254204,55	790393,607	1,85093021	427025
9	0	708750	545454,545	1254204,55	785651,245	1,99900463	393021
10	0	708750	545454,545	1254204,55	780937,338	2,158925	361725
11	0	708750	545454,545	1254204,55	776251,714	2,331639	332921
12	0	708750	545454,545	1254204,55	771594,203	2,51817012	306410
13	0	708750	545454,545	1254204,55	766964,638	2,71962373	282011
14	0	708750	545454,545	1254204,55	762362,85	2,93719362	259554
15	0	708750	545454,545	1254204,55	757788,673	3,17216911	238886
16	0	708750	545454,545	1254204,55	753241,941	3,42594264	219864
17	0	708750	545454,545	1254204,55	748722,49	3,70001805	202356
18	0	708750	545454,545	1254204,55	744230,155	3,9960195	186242
19	0	708750	545454,545	1254204,55	739764,774	4,31570106	171412
20	0	708750	545454,545	1254204,55	735326,185	4,66095714	157762
21	0	708750	545454,545	1254204,55	730914,228	5,03383372	145200
22	0	708750	545454,545	1254204,55	726528,743	5,43654041	133638
Total	117928611	15592500	12000000	27592500	15790549,4		6928492

Tab 8 : Les données du TRI de l'ajout d'un tracteur

Paramètres	Valeurs	Unités
Investissement initial	117 928 611	Fcfa
Augmentation de la production	199 876,44	kWh
Prix de vente de l'électricité	96	Fcfa/KWh
Flux de trésorerie	19 188 138	Fcfa
TRI	6,14	Années

Annexe VI: Estimation financière de la solution d'optimisation (Conception d'un système de nettoyage automatique)

Tab 9 : Les Coûts du système automatique

Désignation	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
Moteur électrique	1	121 000	121 000
Brosse de nettoyage	6	3 000	18 000
Rails et support	40	10 000	400 000
Fut cubitainer	1	50 000	50 000
Variateur de vitesse	1	90 000	90 000
Tuyauterie	1	20 000	20 000
Courroie	1	7 500	7 500
Poulie en aluminium	2	17 500	35 000
Frais de transport	0	3 000 000	0
Frais accessoires	0	250 000	0
Total			1 334 700 000
COÛT DE DEVELOPPEMENT DE L'INSTALLATION			
Coût installation par table	1	200 000	200 000
Total			360 000 000
COÛT DE REMPLACEMENT DE COMPOSANTS DU MOTEUR			
Désignations	Années	Coût	
Moteur de nettoyage	5	0	
	10	121 000	
	15	0	
	20	121 000	
	25	0	
Brosse de nettoyage et courroies	3	25 500	
	6	25 500	
	9	25 500	
	12	25 500	
	15	25 500	
	18	25 500	
Coût total de remplacement		711 000 000	
Coût de maintenance cumulée		500 512 500	
Coût de cycle de vie		2 439 067 500	

Année	CAPEX	Maintenance	Remplaceme	OPEX	Energie produit/an		
1	1694700000	33367500	32318181,8	65685681,8	155,761162	1,08	144
2	0	33367500	32318181,8	65685681,8	817807,032	1,1664	701137
3	0	33367500	32318181,8	65685681,8	814538,275	1,259712	646606
4	0	33367500	32318181,8	65685681,8	809651,046	1,36048896	595117
5	0	33367500	32318181,8	65685681,8	804793,139	1,46932808	547728
6	0	33367500	32318181,8	65685681,8	799964,381	1,58687432	504113
7	0	33367500	32318181,8	65685681,8	795164,594	1,71382427	463970
8	0	33367500	32318181,8	65685681,8	790393,607	1,85093021	427025
9	0	33367500	32318181,8	65685681,8	785651,245	1,99900463	393021
10	0	33367500	32318181,8	65685681,8	780937,338	2,158925	361725
11	0	33367500	32318181,8	65685681,8	776251,714	2,331639	332921
12	0	33367500	32318181,8	65685681,8	771594,203	2,51817012	306410
13	0	33367500	32318181,8	65685681,8	766964,638	2,71962373	282011
14	0	33367500	32318181,8	65685681,8	762362,85	2,93719362	259554
15	0	33367500	32318181,8	65685681,8	757788,673	3,17216911	238886
16	0	33367500	32318181,8	65685681,8	753241,941	3,42594264	219864
17	0	33367500	32318181,8	65685681,8	748722,49	3,70001805	202356
18	0	33367500	32318181,8	65685681,8	744230,155	3,9960195	186242
19	0	33367500	32318181,8	65685681,8	739764,774	4,31570106	171412
20	0	33367500	32318181,8	65685681,8	735326,185	4,66095714	157762
21	0	33367500	32318181,8	65685681,8	730914,228	5,03383372	145200
22	0	33367500	32318181,8	65685681,8	726528,743	5,43654041	133638
TOTAL	1694700000	734085000	711000000	1445085000	16212747		7276842

Fig. 6 : Résultats du calcul du CAPEX et de l'OPEX de la solution 2

Tab 10 : Résultats du calcul du LCOE pour la solution de l'ajout du système de nettoyage automatique

LCOE (Fcfa/kWh)	1258,8
----------------------------	---------------

Tab 11 : Les données du TRI de l'ajout d'un système de nettoyage automatique

Investissement initial (Fcfa)	169 700 0000
Augmentation de la production(kWh)	199 876,44
Prix de vente de l'électricité (Fcfa/KWh)	96
Flux de trésorerie (Fcfa)	79 620 257,3
TRI(année)	88,28

Annexe VII: Impact environnemental et social

Tab 12 : Evaluation des impacts à partir de la grille de Fecteau

Milieu	Nature	Éléments du milieu	Intensité	Étendue	Durée	Importance
Biophysique	Négative	Faune	Faible	Locale	Longue	Mineure
	Négative	Sol	Forte	Locale	Longue	Majeure
	Négative	Paysage	Faible	Locale	Longue	Mineure
	Négative	Végétation	Moyenne	Locale	Moyenne	Moyenne
	Négative	Eaux	Forte	Locale	Longue	Majeure
	Négative	Air	Forte	Régionale	Longue	Majeure
	Négative	Ambiance Sonore	Faible	Locale	Courte	Mineure
Milieu humain	Positive	Offre et qualité formation	Forte	Locale	Longue	Majeure
	Positive	Emploi et niveau de vie	Forte	Locale	Moyenne	Majeure
	Positive	Sécurité	Moyenne	Locale	Longue	Moyenne
	Négative	Foncier	Faible	Locale	Longue	Mineure
	Positive	Patrimoine culturel	Faible	Locale	Moyenne	Mineure
	Positive	Facture énergétique	Forte	Locale	Longue	Majeure

Tab 13 : Plan de gestion environnementale

Récepteurs	Impacts	Actions environnementales	Objectifs de l'action	Tâches de l'action environnementale	Indicateur de suivi de l'efficacité de l'action et Acteurs de suivi de l'efficacité
Sols	Pollution par les hydrocarbures et autres déchets	Installation d'un bac métallique pour les vidanges à la base et de bacs à ordures Récupération et acheminement vers une station agréée	Minimiser/éviter le contact des hydrocarbures avec les couches superficielles des sols et dépôts anarchiques des ordures Recyclage des huiles de vidange et des ordures	Confection de bacs métalliques et Achat des bidons + tuyaux pour le transvasement et l'acheminement vers la station agréée	L'existence de bacs, absence d'ordures et de taches d'huile ou d'hydrocarbure sur le sol, aucune fuite relevée sur les bacs par la structure compétente
Eau	Pollution des eaux par les hydrocarbures	Effectuer les vidanges uniquement dans un espace agréé	Minimiser la pollution des eaux par les hydrocarbures et autres déchets	Éviter les vidanges/déversements dans les plans d'eau	Nombre d'individus intoxiqués, mortalité des espèces aquatiques indiquées et taches d'huile aux berges ou à la surface des eaux constatées par la mission de contrôle environnemental
Air	Pollution de l'air par la poussière et les fumées	Arrosage et contrôle des éléments filtrants des véhicules	Minimiser la poussière et les fumées pendant les travaux	Prélèvement de l'eau et arrosage, réaliser le contrôle tous les 3 mois des éléments filtrants	Nombre de cas de maladies pulmonaires signalés par les opérateurs de la centrale.
Faune	La pollution acoustique	Renforcement des capacités humaines	Préserver la faune dans son biotope	Organiser des réunions de sensibilisation et interdiction absolue d'abattre et de transporter le butin	Nombre de matériels et de formations fournis
Paysage	Changement du paysage	Remise à l'état des lieux (ré végétalisation), les défrichements et déboisement	Restauration du paysage et préservation de la flore Reboisement compensatoire	La ré végétalisation et la mise à disposition des débris aux riverains	Nombres de zones d'emprunt réaménagées,
Humain	Création d'emplois	Utilisation de la main d'œuvre locale	Diversification et augmentation des revenus	Recrutement d'agent	Nombre d'agent recrutés par l'entreprise