

ANALYSE DES PERFORMANCES D'UNE CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE CONNECTEE AU RESEAU : CAS DE LA CENTRALE SOLAIRE DE ZAGTOULI AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE
DE
MASTER
SPECIALITE GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 28 Janvier 2025 par

Windgouda Kris Renait Junior KABORE (20210690)

Encadrant 2iE : Dr GOMNA ABOUBACAR, Enseignant-chercheur en Génie Electrique Energétique. Institut 2iE

Maître de stage : Dr KAMBOU Célestin, Chef de Service Etudes des Energies Renouvelables au Département Ingénierie des Projets d'Investissement

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

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. **Daniel YAMEGUEU NGUEWO**

Membres et correcteurs : Prof. Moussa SORO

Ing. Kodjo Sédi AGBOKOU

Promotion [2024/2025]



DEDICACES

A mon père, ma mère et à ma sœur pour avoir toujours été là pour moi et qui le sont encore aujourd'hui

A tous les membres de ma famille qui ont également été là pour moi

Je dédie ce travail

REMERCIEMENTS

Je souhaite en ces quelques lignes adresser mes sincères remerciements, à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens d'abord à remercier, le personnel pédagogique de l'institut 2iE pour la formation de qualité que j'ai reçu durant mon parcours.

Je remercie également mon Directeur de mémoire, **Dr ABOUBAKAR GOMNA**, ses conseils avisés et son expertise durant la rédaction de ce mémoire.

Je remercie aussi le Directeur Général de la Société Nationale d'Electricité du Burkina, M. **Souleymane OUEDRAOGO**, pour le stage accordé dans sa structure.

Je suis particulièrement reconnaissant envers mon Maitre de stage **Dr Célestin KAMBOU**, Chef de service Etudes des Energies Renouvelables, pour ses conseils et ses encouragements.

Mes remerciements s'adressent également à tous les agents du département Ingénierie des projets d'investissement (DIPI), pour leurs conseils avisés et leur partage d'expérience.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont accepté de participer à mon étude et qui ont ainsi contribué à l'enrichissement de ce mémoire.

RESUME

Ce présent mémoire porte sur l'analyse des performances de la centrale solaire photovoltaïque de Zagtoui au Burkina Faso. Nous remarquons que la SONABEL a un intérêt plus ou moins grandissant pour les énergies renouvelables. Le projet YELEEN, qui est un vaste projet d'intégration des centrales solaires vise à porter la part des énergies renouvelables à 30 % de la production et est en cours depuis le 1^{er} Juillet 2020. Cette transition vers les énergies renouvelables doit passer par l'analyse des performances des centrales existantes pour voir la pertinence de l'approche. Ainsi, notre travail consiste tout d'abord à analyser la chaîne énergétique et à calculer les paramètres économiques de la centrale. L'analyse de la chaîne énergétique, nous a permis de calculer l'indice de performance et le facteur de capacité de la centrale. Le calcul de l'indice de performance annuel de 2018 à 2024 nous donne des valeurs comprises entre 76 % et 81 %. Le facteur de capacité présente des valeurs comprises entre 16 % et 19 % ce qui est acceptable pour une centrale solaire photovoltaïque. Au regard de la littérature, ces valeurs sont un indicateur du bon fonctionnement global de la centrale solaire de Zagtoui. Il a néanmoins été observé des valeurs d'indice de performance inférieures à 70% certains mois qui peut être signe d'un problème sur la chaîne énergétique. Le calcul des paramètres économiques de la centrale de Zagtoui révèle un coût du cycle de vie qui est de 15 664 587 786,83 FCFA, le coût actualisé de l'énergie (LCOE) qui est de 44,32 FCFA pour un kWh avec une valeur actuelle nette positive de 4 506 383 278,27 FCFA et un temps de retour sur investissement TRI de 6,16 ans.

Mots clés : Centrale Solaire Photovoltaïque, Indice de Performance, LCOE, SONABEL, VAN, Zagtoui

ABSTRACT

This report analyses the performance of the Zagtouli photovoltaic solar power plant in Burkina Faso. We note that SONABEL has a more or less growing interest in renewable energies. The YELEEN project, a vast project to integrate solar power plants, aims to increase the share of renewable energy to 30% of production, and has been underway since 1 July 2020. This transition to renewable energies requires an analysis of the performance of existing power plants to determine the relevance of the approach. Our work therefore consists firstly of analysing the energy chain and calculating the economic parameters of the power plant. The analysis of the energy chain enabled us to calculate the plant's performance index and capacity factor. Calculating the annual performance index from 2018 to 2024 gives us values of between 76% and 81%. The capacity factor has values of between 16% and 19%, which is acceptable for a solar photovoltaic plant. According to the literature, these values are an indicator of the overall smooth operation of the Zagtouli solar power plant. However, in some months, performance index values of less than 70% were observed, which may indicate a problem in the energy chain. Calculation of the economic parameters of the Zagtouli plant reveals an estimated life-cycle cost of 15 664 587 786,83 FCFA, a discounted cost of energy (LCOE) of FCFA 44.32 per kWh with a positive net present value of FCFA 4,506,383,278.27 and an IRR payback time of 6.16 years.

Key words: Photovoltaic Solar Power Plant, Performance Index, LCOE, SONABEL, NPV, Zagtouli

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AC : Courant alternatif

BAD : Banque Africaine de Développement

CAPEX : Capital Expenditure (Dépenses d'investissement)

DAO : Dossier d'Appel d'Offre

DC : Courant continu

FC : Facteur de capacité

kWc : KiloWatt-crête

MWc : MégaWatt-crête

kWh : KiloWatt heure

LCOE : Levelized Cost of Energy [Coût actualisé de l'Energie]

MWh : Mégawattheure

NPV : Net Present Value [Valeur Actuelle Nette]

OPEX : Operational Expenditures [Dépenses Opérationnelles]

PR : Performance Ratio [Ratio de Performance]

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina

TRI : Temps de Retour

VAN : Valeur Actuelle Nette

Wc : Watt-crête

SOMMAIRE

DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
SOMMAIRE	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
INTRODUCTION.....	- 1 -
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL ET DE LA ZONE D’ETUDE-	2
-	
I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....	- 2 -
1. Missions de la SONABEL.....	- 2 -
2. Organisation et fonctionnement de la SONABEL	- 2 -
3. Présentation de la Direction Etudes de la Planification et de L’ingénierie (DIPI). -	3 -
I.2. Présentation de la zone d’étude	- 4 -
1. Objectifs et hypothèses du travail.....	- 5 -
2. Etat des lieux de la centrale de Zagtouli.....	- 5 -
II. Matériels et méthodes d’Analyse des données de la centrale de Zagtouli	- 7 -
II.1. Evaluation de la chaine de production de Zagtouli.....	- 7 -
1. Calcul de la production théorique au niveau de la centrale	- 7 -
2. Méthodes d’analyse des données de productions réelles et d’ensoleillement	- 8 -
II.2. Analyse des paramètres économiques de la centrale	- 13 -
1. Life Cycle Cost (LCC)	- 13 -
2. Levelized Cost of Energy (LCOE)	- 14 -
3. Net Present Value (NPV)	- 15 -
4. Le temps de retour simple	- 15 -

III.	Résultats et discussions	- 16 -
III.1.	Résultats.....	- 16 -
1.	Résultats de l’analyse de la production théorique	- 16 -
2.	Indicateurs de performance et ensoleillement de la centrale	- 17 -
3.	Indice de performance et facteur de capacité	- 19 -
IV.	Discussions.....	- 19 -
IV.1.	Analyse de la chaine de production.....	- 19 -
IV.2.	Analyse des paramètres économiques de la centrale.....	- 26 -
1.	Prévision sur la production de Zagtoui.....	- 26 -
2.	. Le LCC (Life Cycle Cost)	- 27 -
3.	. Le LCOE.....	- 28 -
4.	Résultat de la VAN et discussion	- 28 -
5.	. Le Temps de retour sur investissement simple.....	- 29 -
V.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	- 29 -
	Bibliographie.....	- 32 -
	Liste des Annexes.....	I
	Annexe.....	II

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coordonnées géographiques de la centrale de Zagtouli	- 5 -
Tableau 2: Paramètres du DAO de la centrale de Zagtouli	- 7 -
Tableau 3: Production de la centrale de Zagtouli en MWh/an	- 8 -
Tableau 4: Ensoleillement sur le plan incliné (kWh/m ²)	- 9 -
Tableau 5: Paramètres pour le calcul économique de la centrale solaire de Zagtouli	- 14 -
Tableau 6: Calcul de la production théorique de Zagtouli suivant les données du DAO ...	- 16 -
Tableau 7: Productible spécifique par an en kWh/kWc	- 17 -
Tableau 8: Productible de référence en kWh/kWc	- 18 -
Tableau 9: Productible de référence attendu	- 18 -
Tableau 10: Indice de performance et facteur de capacité annuel de la centrale	- 19 -
Tableau 11: Prévision de la production de la centrale de Zagtouli	- 26 -
Tableau 12: Récapitulatif du Life Cycle Cost	- 27 -
Tableau 13: LCOE de la centrale de Zagtouli	- 28 -
Tableau 14 : VAN de la centrale de Zagtouli	- 29 -

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de la Direction des études, de la planification et de l'ingénierie ..	- 4 -
Figure 2: Image de la centrale solaire de Zagtouli extraite de Google Earth.....	- 6 -
Figure 3: Synoptique de la centrale de Zagtouli	- 7 -
Figure 4: Evolution de la production de 2018 à 2024	- 12 -
Figure 5: Production et indices de performance en 2018.....	- 20 -
Figure 6 : Production et indice de performance 2019	- 21 -
Figure 7: Production et Indice de performance 2020	- 22 -
Figure 8: Production et indice de performance de Zagtouli en 2021	- 23 -
Figure 9: Production et indice de performance de Zagtouli en 2022	- 24 -
Figure 10: Production et ensoleillement de la centrale en 2023	- 25 -
Figure 11: Production et indice de performance.2024	- 25 -

INTRODUCTION

Selon le ministère de l'Énergie, des Mines et des Carrières du Burkina Faso, en 2023, le taux d'électrification était de 87,04 % en milieu urbain et de seulement 7,02 % en milieu rural, ce qui souligne les défis persistants en matière d'accès à l'électricité, notamment en raison de l'insuffisance des infrastructures et des disparités entre les zones urbaines et rurales [1]. Pour faire face à ces défis, de nombreux projets sont en cours dont le projet YELEEN. En effet ce projet vise le développement de centrales solaires photovoltaïques et le renforcement du système électrique national. Il est en cours depuis juillet 2020, avec pour but principal, la contribution du solaire à au moins 30 % de la production de la SONABEL [2]. Ainsi, en plus de Zagtoui qui injecte 33,7 MWc et Ziga 1,1 MWc, 4 nouvelles centrales issues du projet YELEEN sont en construction à Dori, Gaoua, OUAGA NORD-OUEST et Diapaga, le tout pour une puissance totale de 51 MWc [2]. La mise en œuvre de ces nouvelles centrales a pour but de promouvoir les énergies renouvelables et profiter de l'ensoleillement important dans notre pays. En effet, le Burkina Faso possède une irradiation journalière estimée à 5,5 kWh/m² [3]. Ce qui représente un bon potentiel solaire à exploiter pour une production d'énergie à grande échelle. En plus de cela, le monde entier tend de plus en plus vers les sources d'énergie vertes c'est-à-dire des sources renouvelables pour pallier aux ressources fossiles. Le solaire est ainsi une bonne alternative à saisir dans notre pays.

Cependant, la construction des nouvelles centrales solaires et l'exploitation effective de ces dernières doit passer par un bilan des centrales déjà existantes à savoir Zagtoui et Ziga pour vérifier les performances de ces dernières. C'est dans ce contexte qu'il nous a été donné de réfléchir sur le thème suivant : << Analyse des performances d'une centrale solaire photovoltaïque connectée au réseau : Cas de la centrale Solaire de Zagtoui >>. Notre étude s'articule ainsi autour deux principaux points à savoir analyser la chaîne énergétique de la centrale et calculer les paramètres économiques de la centrale de Zagtoui.

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1. Missions de la SONABEL

La SONABEL a trois missions principales à savoir produire, transporter et/ou exporter et distribuer l'énergie électrique sur toute l'étendue du territoire Burkinabé.

A cet effet elle est placée sous trois tutelles qui sont :

- Tutelle technique et administrative qui est assurée par le ministère de l'énergie, des mines et des carrières ;
- Tutelle de gestion exercée par le ministère du Commerce ;
- Tutelle financière exercée par le ministère de l'Economie et des finances.

2. Organisation et fonctionnement de la SONABEL

La SONABEL est présidée par un conseil d'administration qui est l'organe suprême de la société et est composé de six (06) membres dont cinq (5) représentants de l'état et un (1) représentant des travailleurs. Le commissariat aux comptes est assuré par le cabinet ACEDA International.

Un Directeur Général dirige la SONABEL et exerce sa mission de gestion de la Société en conformité avec le décret n°97-599/PES/PM/MEM/MCIA du 31 décembre 1997 portant approbation des statuts de la SONABEL.

Cet organe exécutif a pour rôle de :

- Faire exécuter les décisions prises en Conseil d'Administration ;
- Veiller au bon fonctionnement de la Société ;
- Créer et maintenir de bonnes relations entre la société et son environnement.

La Direction Générale rend compte au Conseil d'Administration, qui, elle, exécute ses missions aidées de ses six conseillers techniques, le Secrétariat Générale, deux directions et les départements suivants :

- Direction de l'Audit et du Contrôle Interne (DACI),
- Direction des Finances et de la Comptabilité,
- Département de la Communication et des Relations Publiques (DCRP),
- Département Contrôle de Gestion (DCG),
- Département du Conseil Juridique et du Contentieux (DCJC),
- Département de la Recherche et du Développement (DRD),

- Département de la Sécurité (DS).

Le Secrétariat Général regroupe quatre (4) Pôles organisés en Directions Centrales et Départements comme ci-après :

- Pôle Support et Ressources
- Pôle Production, Transport et Mouvements d'Énergie (PPTME)
- Pôle Distribution et Commercial (PDC)
- Pôle Équipements (PEQ)

3. Présentation de la Direction Etudes de la Planification et de L'ingénierie (DIPI)

La direction Etudes de la Planification et de l'Ingénierie (DEPI) est une des directions de la SONABEL qui s'occupe de la planification en prévoyant la demande en termes d'énergie sur tout le territoire et en mettant en place des projets structurants pouvant répondre aux besoins des populations. Pour se faire, elle se compose de 4 départements à savoir :

- ❖ Département Planification des Etudes économiques et financière qui est chargé de la planification pour la construction d'une centrale par exemple et aussi de trouver les fonds nécessaires pour la mise en œuvre de projets prévus par les autres départements au niveau des organismes spécialisés. Elle s'occupe aussi de gestion financière de tous les projets en cours.
- ❖ Département Ingénierie des Projets d'Investissements (DIPI) qui s'occupent des études concernant les projets de réseau électrique, d'Energie Renouvelable, d'hydroélectrique et de mécanique. Ces études sont axées sur des faisabilité des projets prévus et ensuite de l'intégration sur le réseau existant de la SONABEL.
- ❖ Département Gestion des Projets d'Investissement : qui est chargé de l'élaboration des spécifications techniques c'est-à-dire le choix des équipements exigés et qui seront spécifiés dans le dossier d'appel d'offre (DAO) après étude au niveau de la DIPI. Elle possède également un rôle de suivi et contrôle des projets et des travaux des entreprises chargées des travaux jusqu'à la mise en service définitive.
- ❖ Département Génie civil : il s'occupe de la supervision de conception des ouvrages pour les projets. Ainsi, elle joue le rôle de services support pour la réalisation des plans en accord avec les études de la DIPI pour les ouvrages, les voiries, les postes HTA/BT, des différents locaux de la SONABEL et du lancement des appels d'offre à travers des DAO et contrôle des travaux des entreprises.

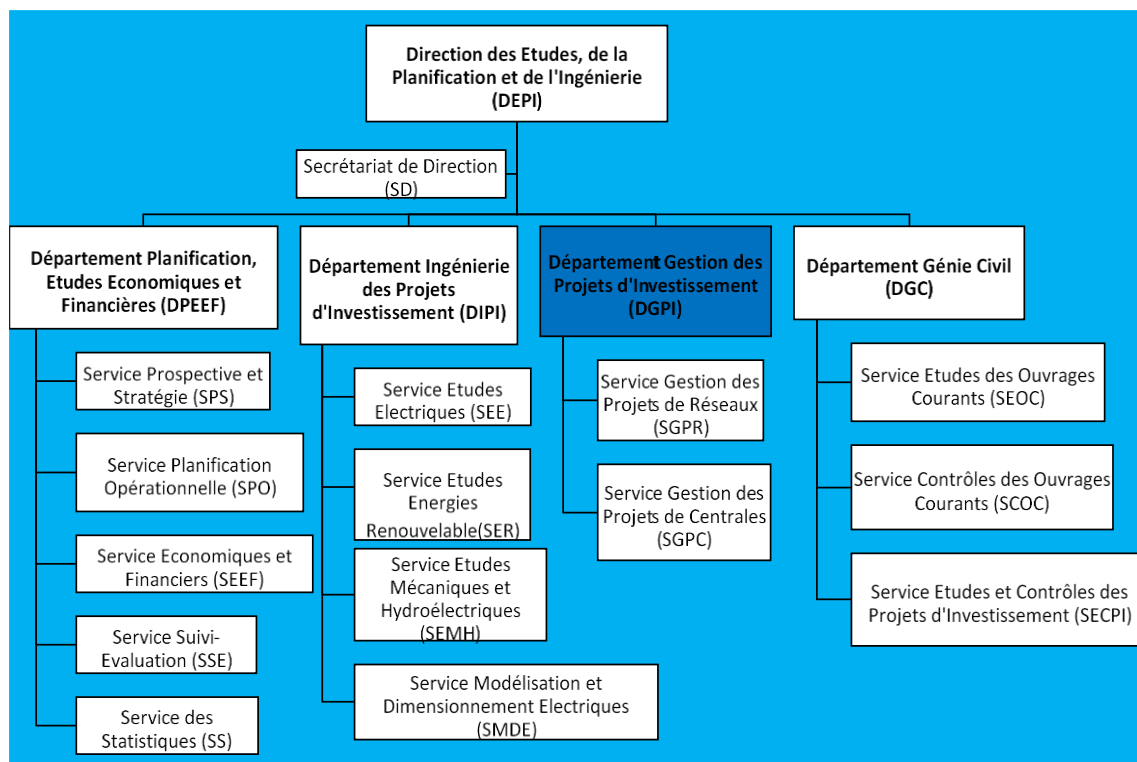


Figure 1: Organigramme de la Direction des études, de la planification et de l'ingénierie

I.2. Présentation de la zone d'étude

Le 20 avril 2017, le Burkina Faso a adopté la loi n°014/AN du 20 avril 2017 portant réglementation générale du secteur de l'énergie. Cette loi a libéralisé la production de l'énergie [4]. De nombreuses centrales solaires exploitées et de nombreux producteurs indépendants qui ont leurs centrales solaires installées et revendent l'énergie à la SONABEL. Ce sont principalement Urba Solar avec sa centrale de 30 MWc à Pa [5], Qair avec sa centrale de 24 MWc à Zano [6], Afrika Ren avec sa centrale de 38 MWc à Kodéni [7] et GreenYellow avec la centrale de Nagréongo avec une puissance installée de 30 MWc [8] . En plus de ces projets, nous avons le projet YELEEN avec une puissance totale de 51 MWc et Zagtouli et Ziga qui à eux deux injectent 34,8 MWc. Ce qui fait un total de 207,8 MWc. Cette initiative a pour but de porter la production solaire à 30 % du le mix énergétique du Burkina Faso [2].

Au regard de cet engouement pour les centrales solaires connectées au réseau, il est important de faire un bilan des performances des premières centrales existantes et exploitées par la SONABEL. L'une des premières centrales photovoltaïques au Burkina Faso est la centrale de Zagtouli. Elle a une capacité de 33,7 MWc et a été inaugurée en septembre 2017 [9]. Elle a été rétrocédée à la SONABEL depuis 2021.

La problématique principale de notre étude est de savoir si la centrale de Zagtouli est performante pour justifier l'investissement de tels projets.

1. Objectifs et hypothèses du travail

- Objectifs de l'étude

Le principal objectif de notre étude est d'évaluer les performances de la centrale solaire de Zagtouli. Ainsi, nous analysons la chaîne énergétique de la centrale, avec pour finalité de ressortir les indices de performances et les facteurs de performances. Enfin nous calculons aussi les paramètres économiques de la centrale qui sont aussi des paramètres très importants de l'analyse car ils nous permettent de savoir si le projet est économiquement viable.

- Hypothèses de l'étude

Pour mener à bien notre étude, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Nous considérons que la centrale injecte toute sa production sur le réseau SONABEL depuis février 2018 ;
- Notre analyse se limite au point d'injection de la centrale de Zagtouli.

2. Etat des lieux de la centrale de Zagtouli

- Description de la centrale de Zagtouli

La centrale solaire de Zagtouli est l'une des premières centrales construites au Burkina Faso et inaugurée en septembre 2017. Elle est située à Zagtouli ; un quartier périphérique de la ville de Ouagadougou. Les coordonnées GPS sont dans le Tableau 1. Cette centrale a été construite sur 60 hectares de terrain (Figure 2). Elle fait partie d'un large programme d'électrification grâce au solaire photovoltaïque avec à terme une participation d'au moins 30 % du solaire photovoltaïque à la production nationale soit plus 150 MWc. La centrale a été financée par l'Agence Française de Développement (AFD) et l'union européenne.

Une extension de 17 MWc de la centrale est en cours de réalisation ce qui verra la puissance installée de la centrale passer à 50 MWc avec du stockage et la mise en service est prévue pour 2025.

Tableau 1: Coordonnées géographiques de la centrale de Zagtouli

		Latitude	Longitude
Centrale de Zagtouli		12°18'18.93"N	1°38'13.20"O



Figure 2: Image de la centrale solaire de Zagtouli extraite de Google Earth

- Les Modules solaires PV

La centrale a une puissance installée de 33,696 MWc et est constituée de 129 600 modules polycristallins de 260 Wc de marque SolarWorld. Ces modules sont repartis en 1800 structures de 72 modules PV. Les Structures ont une inclinaison de 15° . Nous avons ainsi 5400 chaînes de 24 modules en série regroupés en 466 boîtiers courant continu pour 32 onduleurs. On a 12 chaînes par boîtier courant continu et 14 boîtiers par onduleur.

- Equipements de mesures de l'ensoleillement

La centrale possède aussi des équipements de mesures de l'ensoleillement reçue sur le plan incliné des modules et le plan horizontal constitué de pyranomètres.

- Les onduleurs et les transformateurs

Dans une centrale solaire photovoltaïque, l'onduleur est très important car il permet la conversion du courant continu en courant alternatif. Au niveau de la centrale solaire de Zagtouli, le champ PV possède 5400 chaînes de 24 modules regroupé en 466 boîtiers courant continu et relié à 32 onduleurs centraux. Chaque onduleur a une puissance de 1165 kW, une seule entrée MPPT, une tension de sortie de 420 V et une durée de vie garantie par le constructeur de plus de 20 ans [10] .

Le transformateur, permet d'élever la tension en sortie des onduleurs de 420 V à 33 kV qui correspond à la tension HTA du réseau. La centrale possède 16 transformateurs du constructeur CG POWER SYSTEMS BELGIUM NV. Ces 16 transformateurs injectent directement au

niveau du point d'injection de la centrale sous 33kV. Chaque transformateur a une puissance de 2330 kVA.

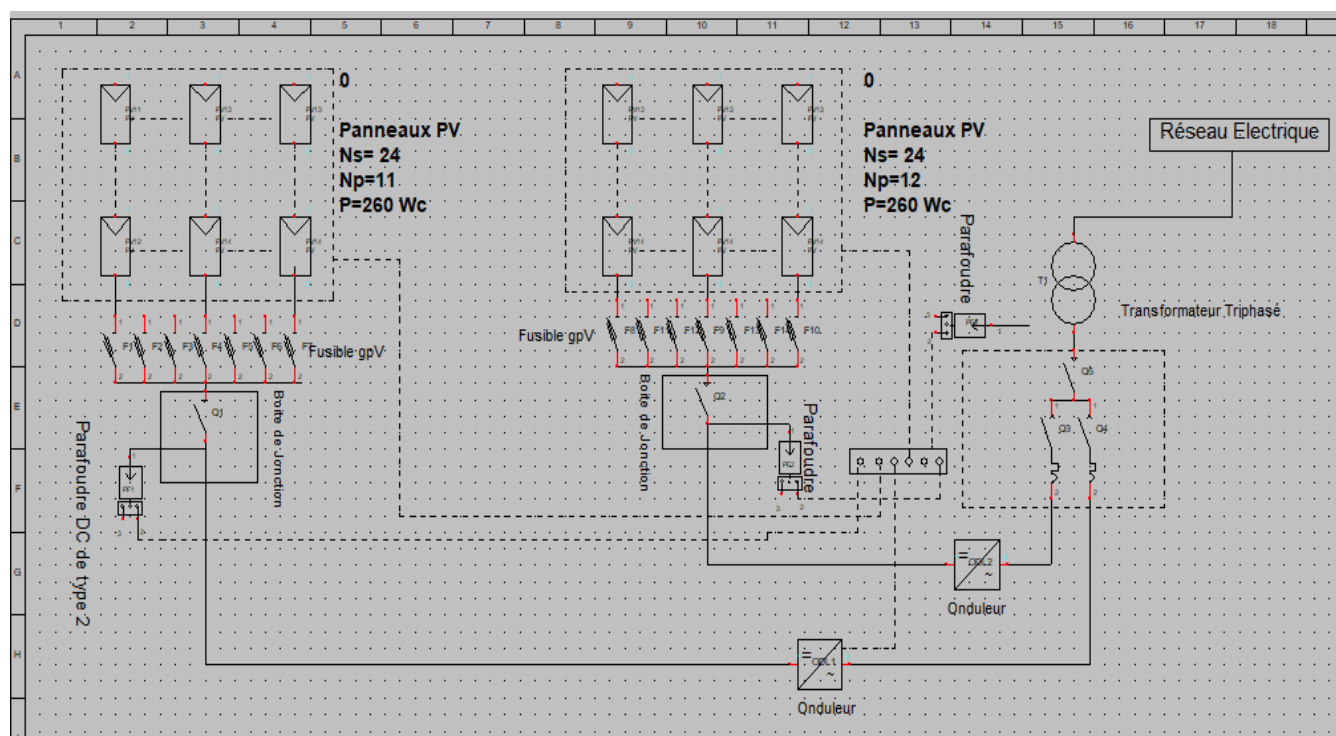


Figure 3: Synoptique de la centrale de Zagtouli

II. Matériels et méthodes d'Analyse des données de la centrale de Zagtouli

II.1. Evaluation de la chaine de production de Zagtouli

1. Calcul de la production théorique au niveau de la centrale

L'estimation de la production théorique de la centrale solaire de Zagtouli est réalisée à partir des données fournies dans le DAO. Cette analyse prend en compte les paramètres présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2: Paramètres du DAO de la centrale de Zagtouli

Paramètres DU DAO de la centrale de Zagtouli		
	Centrale solaire	Unité
Cout de la mise en place de la centrale	14 737 500 000	FCFA
Ressource solaire	2200	kWh.m ² an ⁻¹
Facteur de suivi	1	-
Facteur de performance	0,8	M ² /kW
Taux de dégradation annuelle de la production	0,7	%

Durée de vie du système	25	Année
Puissance installée	33696	kWc

À partir des données disponibles, la production de la centrale solaire de Zagtouli a été estimée sur une période de 25 ans. Cette estimation repose sur les paramètres suivants : la ressource solaire, le taux de dégradation annuelle de la production spécifié par le constructeur des modules, la durée de vie du système, ainsi que la puissance installée. L'énergie électrique produite par unité de capacité installée au cours d'une année est calculée à l'aide de la formule de l'équation 1.

$$En = 365 \times H_{POA} \times Pc \times PR \times (1 - d)^n \quad [11] \quad \blacksquare \quad (1)$$

Avec :

P_c : la puissance crête de la centrale

H_{POA} : la ressource solaire disponible en kWh/m²/an

PR : l'indice de performance de la centrale de Zagtouli

d : le coefficient de dégradation des panneaux

n : la durée de vie allant de 1 à 24

2. Méthodes d'analyse des données de productions réelles et d'ensoleillement

L'analyse de la centrale solaire de Zagtouli s'appuie sur les données de production disponibles depuis février 2018. La centrale injecte de l'énergie dans le réseau depuis novembre 2017, et son exploitation a été assurée par l'entreprise CEGELEC, du groupe VINCI, jusqu'en 2020.

Pour cette étude, les données de production et d'ensoleillement couvrent aussi la période de 2018 à 2024. Ces informations, présentées dans le Tableau 3 et

Tableau 4, serviront de base à notre analyse.

Tableau 3: Production de la centrale de Zagtouli en MWh/an

Mois	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janvier		5 395	5007	5311	5510	5 336	5 378
Février	4464	4685	5086	4803	4988	4823	5093
Mars	5014	4860	5015	4950	4523	5191	4934
Avril	4580	4732	4831	4677	4530	4698	5070
Mai	3720	4626	4722	4541	4640	4656	4540

Juin	4266	4348	4239	4559	4275	4297	4290
Juillet	4041	3854	4452	4137	4463	4464	4081
Août	4253	4082	3833	4050	4117	4018	3782
Septembre	4630	4883	4145	4788	4007	4669	4 228
Octobre	5268	5064	4824	4559	5200	5043	5008
Novembre	4959	5071	4647	5095	4813	4610	4961
Décembre	4970	5230	4933	5158	4778	5991	5249
Total	50165	56830	55 734	56 628	55844	57796	56612

Les données d'ensoleillement sur le plan incliné sont dans le

Tableau 4

Tableau 4: Ensoleillement sur le plan incliné (kWh/m²)

Mois	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janvier		208,36	190,9	205,02	202,05	192,16	204,58
février	168	186,17	196,59	190,68	189,9	174,9	188,93
Mars	189,61	191,61	199,8	196,97	162,51	188,26	189,81
Avril	177,96	182,56	177,21	188,6	170,08	171,55	182,43
Mai	149,8	181,46	180,19	176,55	174,28	180,08	175,19
Juin	162,51	163,45	155,67	168	155,84	164,85	163,71
Juillet	154,15	142,64	159,46	158	163,17	160,26	151,69
Août	161,17	150,84	136,71	154	149,68	145,36	139,99
Septembre	172,72	184,15	158	177	146,61	168,77	156,57
Octobre	195,1	186,86	187,21	191	196,78	178,94	189,85
Novembre	191,73	201,09	197,71	196,91	191,59	171,42	187
Décembre	197,64	205,08	191,48	190,23	173,32	201,16	193,9
Total	1920,39	2 184,27	2 130,93	2 192,96	2075,81	2097,71	2123,65

Nous remarquons que certaines données ne sont pas représentées comme en janvier 2018 où la gestion de la centrale n'était pas encore confiée à SONABEL. L'analyse de la production d'énergie peut être mesurée par plusieurs facteurs qui sont des indicateurs de performance d'une centrale solaire. Ce sont le productible de référence, le productible spécifique, les indices de performances par mois de production ainsi l'indice de performance global annuel, le productible attendu et enfin le facteur de capacité de la centrale par an.

- Le productible de référence

Le productible de référence représente l'énergie qui serait obtenue si on se trouve dans les conditions idéales donc le cas où les pertes sont nulles. Cette donnée est importante car elle permet de se faire une idée du productible reçu sur le plan des modules. On peut aussi interpréter le productible de référence comme le nombre heures crêtes solaires par mois.

Pour le calcul du productible de référence nous utiliserons[12] :

$$Y_r = \frac{H_{POA}}{G_{STC}} \quad \blacksquare \quad (2)$$

Avec :

Y_r : le productible de référence en (heures crêtes solaires ou en kWh/kW)

H_{POA} : est l'irradiation mesurée sur le plan des modules (kWh/m²)

G_{STC} : représente l'Irradiation de référence dans les conditions (Standard Test Conditions STC) $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$ soit 1 kW/m^2 .

- Le productible spécifique

Le productible Spécifique représente l'énergie totale qui peut être générée par un champ photovoltaïque sur une période donnée. Elle est généralement calculée en DC.

Le calcul du productible spécifique est fait en utilisant [12]:

$$Y_i = \frac{E_i}{P_o} \quad \blacksquare \quad (3)$$

Avec :

Y_i : le productible spécifique (kWh/kWc)

E_i : la production d'énergie de la centrale en kWh

P_o : la puissance DC de la centrale solaire en kWc

- L'indice de performance

L'indice de performance d'une centrale nous renseigne sur le rendement énergétique d'une chaîne de production comme le cas de Zagatouli. Cette donnée permet ainsi de savoir si l'installation fonctionne de façon optimale. Plusieurs facteurs peuvent ainsi influencer l'indice de performance d'une centrale. Ce sont :

- La température des panneaux qui influent grandement sur la production au niveau des modules photovoltaïques. Cette donnée est un facteur limitant et est visible sur la fiche technique du module

- Encrasement des modules photovoltaïque est un facteur qui limite la production. En effet plus le panneau est encrassé plus son efficacité est réduite.
- Coefficient de rendement de l'onduleur. En effet si le rendement de conversion de l'onduleur est élevé l'indice de performance le sera aussi.
- Dégradation des modules photovoltaïques : Une dégradation des modules a fil du temps est prévu par le constructeur. Cependant avec les conditions extrêmes et la variation de l'ensoleillement il est très compliqué de déterminer ce facteur de dégradation au niveau d'une centrale solaire.

Pour le calcul de l'indice de performance nous avons utilisé l'expression [12] :

$$PR = \frac{Y_i}{Y_r} \times 100 \quad \blacksquare \quad (4)$$

Avec :

PR : L'indice de performance

Y_f : le productible spécifique (kWh/kWc)

Y_r : le productible de référence (kWh/kWc)

- Le productible de référence attendu

Le productible attendu représente le productible de référence multiplié par le facteur de performance. Ainsi le productible attendu est l'énergie réellement reçue par unité de puissance. Ainsi ayant le productible de référence nous pouvons déterminer les pertes sur le plan incliné en kWh/kW ou en heures crêtes solaire.

L'expression du productible attendu est tirée de [12] :

$$\blacksquare \quad Y_{exp} = PR \times Y_r \quad \blacksquare \quad (5)$$

Avec

PR : l'indice de performance

Y_r : le productible de référence

Pour le calcul des pertes sur la perte sur le plan incliné il suffit de soustraire le productible de référence attendu du productible de référence lui-même.

- Le facteur de capacité

Le facteur de capacité d'une installation solaire photovoltaïque est le rapport entre la production réelle annuelle et sa production si elle avait fonctionné à la puissance nominale.

Pour le facteur de Capacité l'expression utilisée pour le calcul est [12] :

$$\blacksquare \quad FC = \frac{E_i(kWh)}{8760(heures) \times P_o(kWc)} \quad \blacksquare \quad (6)$$

Avec :

FC : le facteur de capacité

E_i : l'énergie au point d'injection en kWh

8760 (Heures) qui est le nombre d'heures par an

P_o représente la puissance nominale du champ photovoltaïque en kWc

- Détermination du coefficient de dégradation de la production

Après avoir analysé la production de la centrale de Zagtoui, nous allons prévoir la production future de la centrale de Zagtoui. Pour cela nous avons tout d'abord examiné les écarts d'une année à une autre pour essayer de desceller une éventuelle dégradation de la production à partir des données du Tableau 3.

- De 2019 à 2020, la production est passée de 56 830 MWh à 55 734 MWh donc une diminution de 1,93 %.
- De 2020 à 2021 la production a augmenté et est passé de 55 734 MWh à 56 628 MWh soit une augmentation de 1,58 %.
- De 2021 à 2022, on a une régression de la production la faisant passer de 56 628 MWh à 55 844 MWh donc une régression de 1% par rapport à 2021.
- Cependant de 2022 à 2023, la production a augmenté et est passée de 55 844 MWh à 57 796 MWh soit une augmentation de 3,37% par rapport à 2022.

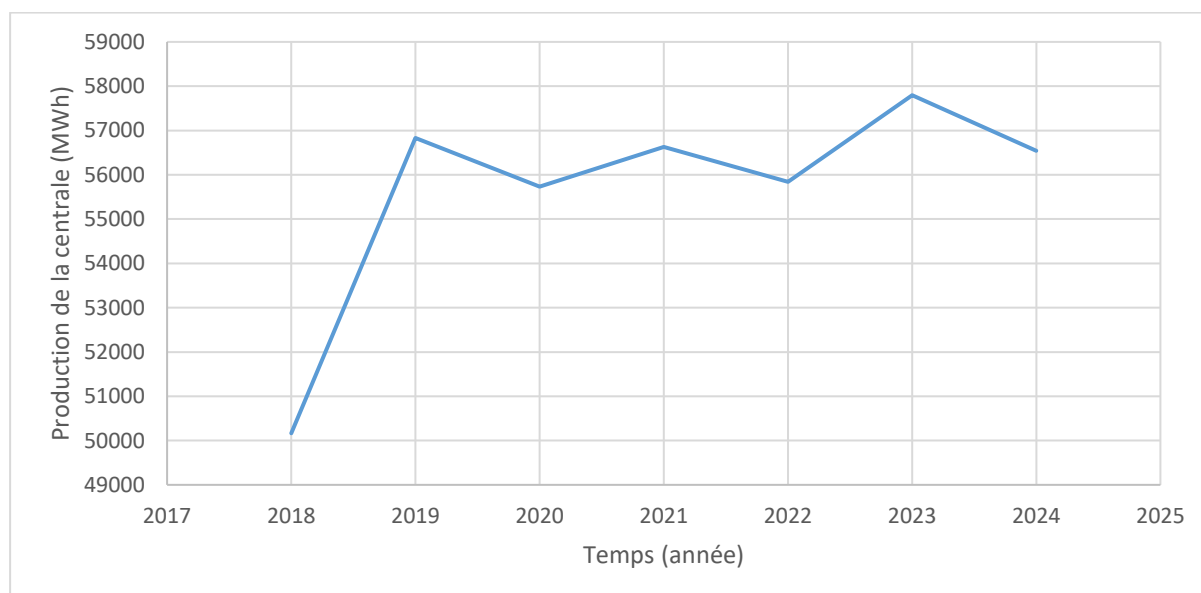


Figure 4: Evolution de la production de 2018 à 2024

Il nous a été donné de constater que la production de la centrale solaire est influencée par de nombreux facteurs (climatique, maintenance etc.), rendant complexe l'estimation du taux de

dégradation des modules à partir des données de production. De même, l'analyse des performances globales de la centrale n'a pas permis de déterminer le coefficient de dégradation de la centrale. En réalité, les données disponibles semblent indiquer une amélioration des performances de la centrale au fil du temps.

En conséquence, notre étude se basera sur les données du constructeur qui prévoient une dégradation de 0,7% l'an. En tenant compte de cette donnée, un coefficient de dégradation de 0,7 % sera adopté pour la suite de cette analyse[13] .

Par ailleurs, il est nécessaire d'estimer l'ensoleillement incident moyen ainsi que l'indice de performance moyen de la centrale sur la période 2019-2023. Les calculs effectués donnent un ensoleillement moyen de 2 138 kWh/m² et un indice de performance moyen de 0,79.

À partir de 2024, la production future de la centrale sera donc estimée en considérant :

- Un coefficient de dégradation de 0,7 % par an,
- Un ensoleillement incident moyen de 2138 kWh/m²,
- Un indice de performance moyen de 0,79

II.2. Analyse des paramètres économiques de la centrale

Le calcul des paramètres économiques de la centrale de Zagtouli consiste à déterminer les paramètres tel que le LCC, le LCOE, la VAN et le TRI de la centrale solaire photovoltaïque de Zagtouli. Pour un projet de centrale solaire, cet aspect peut être très important pour les producteurs privés et aussi pour la SONABEL. En effet, si le coût de production de l'énergie est plus élevé que le prix de d'achat de la même énergie par la SONABEL, le projet n'est pas rentable. Donc l'aspect économique n'est pas à négliger. Dans le contexte de Zagtouli et des projets de centrales solaires injectant sur le réseau, le but est à long terme de réduire le coût du kWh en augmentant la part des énergies renouvelables sur le réseau SONABEL [2].

1. Life Cycle Cost (LCC)

Le Life Cycle Cost (LCC) d'une centrale solaire photovoltaïque représente l'ensemble des coûts d'un système sur son cycle de vie, c'est-à-dire depuis la phase de conception jusqu'au démantèlement. Il inclut tout d'abord les coûts initiaux d'investissement, comprenant l'achat des panneaux solaires, des onduleurs, des structures de support et des équipements électriques, ainsi que les frais d'installation. Ensuite, nous avons aussi les coûts d'exploitation et de maintenance (O&M), englobant les interventions préventives, les réparations et le remplacement de certains composants comme les onduleurs et les coûts liés au démantèlement et au recyclage en fin de vie.

Le calcul du LCC[14] se fait comme suit :

$$LCC = C_o + \sum_{j=1}^T \frac{C_j \times (1 + i)^t}{(1 + j)^t} \quad \blacksquare \quad (7)$$

Avec :

T :la durée de vie de l'installation (an)

C₀ : le CAPEX du projet ou frais d'investissement de la centrale (FCFA)

C_j : représente les coûts opérationnels et de maintenance de la centrale (FCFA)

i : le taux d'inflation(%/an)

j : le taux d'intérêt (%/an)

2. Levelized Cost of Energy (LCOE)

Le Coût actualisé de l'énergie (LCOE) est un indicateur du coût moyen de production de l'électricité pour que la centrale soit plus ou moins rentable. Ainsi, on se base sur ce prix pour savoir si le projet pourrait apporter des bénéfices au vu du prix d'achat de l'électricité. Il est aussi un indicateur du coût moyen de production de l'électricité en tenant compte de l'investissement initial et des charges fixes et variables.

Pour le calcul de ce paramètre économique, l'expression issue de [14] est la suivante :

$$LCOE = \frac{LCC}{\sum_{t=1}^T \left(\frac{E_t \times (1 + d)^t}{(1 + j)^t} \right)} \quad \blacksquare \quad (8)$$

Avec :

T :la durée de vie de l'installation (an)

i : le taux d'inflation(%/an)

d : le taux de dégradation des modules par an(%/an)

j : le taux d'intérêt (%/an)

E_T : l'énergie générée pendant la durée de vie (kWh)

Les données considérées pour le calcul du LCOE sont résumées dans le Tableau 5 :

Tableau 5: Paramètres pour le calcul économique de la centrale solaire de Zagtouli

Paramètres économiques de la centrale de Zagtouli		
	Centrale solaire	Unité
Cout de la mise en place de la centrale	14 737 500 000	FCFA
Frais d'entretien annuel et de maintenance de la centrale	46 565 260	FCFA
Ressource solaire	2 138	kWh.m-2. an-1

Taux d'intérêt en (%)	5,5	(%)
Taux d'inflation	3,6	(%)

Pour le calcul du LCOE, nous n'avions pas les éléments sur les coûts opérationnels de la centrale, nous avons ainsi considéré les données fournies par un guide de la banque mondiale pour les projets de centrales commerciales. Ce document estime les frais OPEX d'une centrale à 2200 USD par MW/an [15]. Ce qui fait un total estimatif de 46 565 260 CFA. Le taux d'intérêt est estimé à 5,5 % l'an [16]. Le taux d'inflation, lui est de 3,6 % l'an [17]. La ressource solaire, elle, est une moyenne des ensoleillements sur le plan incident de 2019 à 2023. Tous ces différents paramètres nous permettront de déterminer un coût estimatif du LCOE.

3. Net Present Value (NPV)

Le Net Present Value (NPV) encore appelé VAN (Valeur actuelle nette) est une mesure de la rentabilité d'un projet. Lorsque la VAN est positive on suppose l'investissement rentable dans le cas contraire on considère que l'investissement n'est pas rentable. La formule issue de [18] suivante sera utilisée pour le calcul :

$$VAN = \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+a)^j} = \sum_{j=0}^n \frac{O_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+a)^j} \quad \blacksquare \quad (9)$$

Avec

VAN : Valeur actuelle nette

O_j : Les revenus

C_j : Les frais ou dépenses

C_j : Les Cash-flow

a : représente le taux d'actualisation

n : la durée de vie de la centrale estimé à 25 ans

Le taux d'actualisation est de 12 % pour notre étude. Il provient de le BAD [19]

4. Le temps de retour simple

Le temps de retour simple représente le temps nécessaire pour récupérer un montant investi. Pour le cas des centrales solaires photovoltaïques nous aurons à calculer le temps de retour sur investissement de Zagtoui. La formule suivante issue de [18] est utilisé pour le calcul du temps de retour sur Investissement :

$$TRS = \frac{C_o}{O_j} \quad \blacksquare \quad (10)$$

Avec :

TRS : le temps de retour simple

I : Investissement initial

O_j : Gains annuels du projet

III. Résultats et discussions

III.1. Résultats

1. Résultats de l'analyse de la production théorique

Le calcul de la production de la production théorique prévu par le DAO a permis d'obtenir le résultat suivant dans le Tableau 6 :

Tableau 6: Calcul de la production théorique de Zagtoui suivant les données du DAO

Année	Energie théorique produite (MWh/an)	Année	Energie théorique produite (MWh/an)
1	58 889,83	13	54 129,16
2	58 477,60	14	53 750,25
3	58 068,25	15	53 374,00
4	57 661,78	16	53 000,38
5	57 258,14	17	52 629,38
6	56 857,34	18	52 260,97
7	56 459,33	19	51 895,15
8	56 064,12	20	51 531,88
9	55 671,67	21	51 171,16
10	55 281,97	22	50 812,96
11	54 895,00	23	50 457,27
12	54 510,73	24	50 104,07
		25	49 753,34
TOTAL	1. 354 965,70249383		

Pour l'estimation de la production sur le cycle de vie qui est 25 ans présenté au niveau du Tableau 6, nous avons considéré un ensoleillement moyen de 2 200 kWh /m², un indice de performance de 0,8 et une dégradation de 0,7 %. Ce calcul a été fait pour 25 ans de fonctionnement.

Nous remarquons que de la première aux vingt cinquièmes années de fonctionnement la production est passée de 58 889 MWh à 49 753 MWh. Ce qui correspond à une dégradation cumulée de 15,51 % sur 25 ans.

Ce qui veut aussi dire que selon les calculs effectués précédemment la centrale reste performante après les 25 ans de fonctionnement car elle fonctionnera toujours à plus de 84,49 % de sa puissance nominale.

2. Indicateurs de performance et ensoleillement de la centrale

Le calcul des indicateurs de performance de la centrale de Zagtoui se résume à déterminer le productible de référence, le productible spécifique, l'indice de performance et le facteur de capacité de la centrale. Ces facteurs nous permettent de mettre en évidence des problèmes sur la production et d'estimer les pertes.

- Le productible spécifique représente les heures crêtes solaires par mois c'est-à-dire le nombre d'heures durant lesquelles une irradiation de 1 000 W/m² donnerait une quantité d'énergie équivalente à l'énergie totale du jour considérée. Il est exprimé en kWh/kWc. Pour notre cas, les calculs sont consignés dans le tableau qui suit. Nous avons ainsi une moyenne comprise entre 5 et 7 heures équivalentes par jour pour l'ensemble des 6 années présentées.

Tableau 7: Productible spécifique par an en kWh/kWc

Mois	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janvier		160	148,59	157,61	163,52	158	159,60
Février	132,48	139,04	150,94	142,54	148,03	143,13	151,14
Mars	148,80	144,23	148,83	146,90	134,23	154,05	146,42
Avril	135,92	140,43	143,37	138,80	134,44	139,42	150,46
Mai	110,40	137,29	140,13	134,76	137,70	138,17	134,73
Juin	126,60	129,04	125,80	135,30	126,87	127,52	127,31
Juillet	119,92	114,37	132,12	122,77	132,45	132,48	121,11
Août	126,22	121,14	113,75	120,19	122,18	119,24	112,24
Septembre	137,40	144,91	123,01	142,09	118,92	138,56	125,47
Octobre	156,34	150,28	143,16	135,30	154,32	149,66	148,56
Novembre	147,17	150,49	137,91	151,20	142,83	136,81	147,23
Décembre	147,49	155,21	146,40	153,07	141,80	177,80	155,77
Total	1488,75	1 687	1 654	1 681	1657,29	1715,22	1680,08

- Le productible de référence représente l'énergie moyenne qui peut être produite par kWc au niveau de l'installation de Zagtoui sans les conditions idéales sur une période

donnée. Le productible de référence le plus élevé est celui de 2021 avec 2 192,96 kWh/kWc.

Tableau 8: Productible de référence en kWh/kWc

Mois	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janvier		208,36	190,9	205,02	202,05	192,16	204,58
Février	168	186,17	196,59	190,68	189,9	174,9	188,93
Mars	189,61	191,61	199,8	196,97	162,51	188,26	189,81
Avril	177,96	182,56	177,21	188,6	170,08	171,55	182,43
Mai	149,8	181,46	180,19	176,55	174,28	180,08	175,19
Juin	162,51	163,45	155,67	168	155,84	164,85	163,71
Juillet	154,15	142,64	159,46	158	163,17	160,26	151,69
Août	161,17	150,84	136,71	154	149,68	145,36	139,99
Septembre	172,72	184,15	158	177	146,61	168,77	156,57
Octobre	195,1	186,86	187,21	191	196,78	178,94	189,85
Novembre	191,73	201,09	197,71	196,91	191,59	171,42	187
Décembre	197,64	205,08	191,48	190,23	173,32	201,16	193,9
Total	1920,39	2 184,27	2 130,93	2 192,96	2075,81	2097,71	2123,65

- Le productible de référence attendu de la centrale de Zagatouli de Zagatouli représente l'énergie réellement injecté au niveau de la centrale. Il est exprimé en kWh/kWc au niveau du Tableau 9 pour la centrale de Zagatouli. Il peut aussi être exprimé en kWh si on le multiplie par la puissance crête du champ en ce moment c'est l'énergie produite qu'elle représente. Nous avons aussi calculé les pertes sur le plan incliné par mois qui est en Annexe 6. Ces pertes sont importantes car elles ont un impact direct sera sur la production d'énergie. Il est ainsi important de toujours d'estimer ses pertes.

Tableau 9: Productible de référence attendu

Mois	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janvier		160,11	148,59	157,62	163,52	158,36	159,60
Février	132,48	139,04	150,94	142,54	148,03	143,13	151,15
Mars	148,80	144,23	148,83	146,90	134,23	154,05	146,43
Avril	135,92	140,43	143,37	138,80	134,44	139,42	150,46
Mai	110,40	137,29	140,14	134,76	137,70	138,18	134,73
Juin	126,60	129,04	125,80	135,30	126,87	127,52	127,31
Juillet	119,93	114,38	132,12	122,77	132,45	132,48	121,11
Août	126,22	121,14	113,75	120,19	122,18	119,24	112,24
Septembre	137,41	144,91	123,01	142,09	118,92	138,56	125,47
Octobre	156,34	150,28	143,16	135,30	154,32	149,66	148,56

Novembre	147,17	150,49	137,91	151,20	142,84	136,81	147,23
Décembre	147,50	158,41	146,40	153,07	141,80	177,80	155,78
Total	1 488,75	1 689,75	1 654,02	1 680,56	1 657,29	1 715,22	1 680,08

3. Indice de performance et facteur de capacité

- Indice de performance

L'indice de performance d'une centrale solaire photovoltaïque est un indicateur qui permet de connaître la qualité de la production. Donc plus l'indice de performance est élevé, plus la production est rentable et la centrale est bien maintenue.

Dans cette optique, nous avons calculé l'indice de performance par mois et l'indice de performance annuel de la centrale solaire de Zagtoui.

Ces données nous permettront de déceler les problèmes au niveau de la production qui peuvent être de cause naturelle comme un ensoleillement insuffisant ou une température ou d'ordre technique comme une panne ou un mauvais entretien des équipements.

- Le facteur de capacité

Il traduit le pourcentage d'énergie qu'on peut générer en une année de fonctionnement par rapport à la puissance installée. Ce facteur de puissance est ordinairement compris entre 10 et 20 % pour les installations solaires classiques[15].

Nous avons ainsi calculé le facteur de capacité de la centrale de 2018 à 2024. Ce facteur de puissance est compris entre 15 et 19 % dans les conditions réelles relevées sur la centrale

Tableau 10: Indice de performance et facteur de capacité annuel de la centrale

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Indice de performance	0,77	0,77	0,78	0,77	0,80	0,81	0,79
Facteur de capacité	0,17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,1958	0,17

Les données d'indices de performance par mois sont en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

IV. Discussions

IV.1. Analyse de la chaîne de production

L'analyse des facteurs influençant la production de la centrale de Zagtoui a permis de calculer les indices de performance, qui reflètent le rendement de la chaîne énergétique. Un indice de

performance proche de 1 (100 %) indique que la centrale est très performante, voire idéale, tandis qu'un indice inférieur à 0,7 peut signaler un problème au sein de la chaîne énergétique.

Pour une analyse approfondie, nous avons examiné la production de la centrale année par année en nous appuyant sur les indices de performance, le facteur de capacité, ainsi que la production totale.

- En 2018, l'indice de performance moyen était de 0,77, avec une production totale de 50 165 MWh de février à décembre et un facteur de capacité de 17 %. Le mois de mai a enregistré la production la plus faible, avec 3720 MWh et un indice de performance de 0,73. Ce mois a connu un ensoleillement particulièrement faible de 110,39 kWh/m², comme indiqué dans la Figure 5 ce qui peut expliquer cette baisse de la performance en décembre 2018, l'indice de performance était de 0,74, ce qui reste assez bas. Toutefois, l'ensoleillement était le plus élevé de l'année. Le mois de décembre correspond à la période d'harmattan au Burkina Faso, durant laquelle les températures sont généralement plus modérées, ce qui favorise une meilleure production d'énergie. Malgré cela, l'hypothèse la plus probable peut être l'encrassement des panneaux solaires dû à la poussière, ce qui suggère un manque de maintenance des modules photovoltaïques. Le calcul des pertes sur le plan incliné représente 431,638 kWh/kW sur un total d'ensoleillement reçue de 1 920,39 kWh/kW. Ce qui représente 22,477 % Ses pertes sont notamment dû à la maintenance des modules, le rendement des onduleurs, l'échauffement des câbles et aussi l'instabilité du réseau Mais nous ne pouvons pas attribuer ces pertes. Cette valeur reste quand même très élevée par rapport aux pertes sur le plan incliné de 2022 et 2023 qui sont à 20 et 18 %

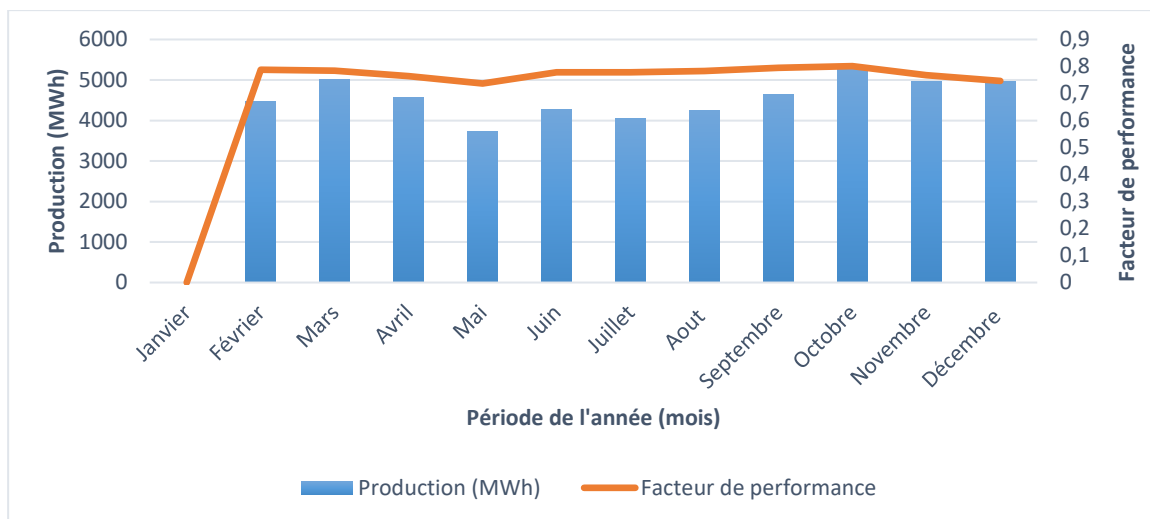


Figure 5: Production et indices de performance en 2018

En 2019, la production de Zagtoui était de 56 830 MWh avec un indice de performance de 0,77 et un des meilleurs facteurs de capacité estimé à 19 %. Les indices les plus faibles enregistrés sont en février avec 0,74, en Mars avec 0,72 et en Novembre avec 0,74. La production ainsi que l'ensoleillement de ces mois reste pourtant les plus élevés comme le montre le mois de Février et Novembre n'étant pas des mois de chaleur, l'explication la plus plausible serait l'encrassement des modules au niveau de la centrale donc un manque de maintenance ou l'instabilité du réseau ayant entraîné le découplage des onduleurs. En effet l'injection d'une centrale solaire respecte certaines normes tel que la qualité de la fréquence et la tension du réseau. Une maintenance plus accrue pourrait augmenter la production de façon accrue surtout dans la période d'Octobre à mars où nous constatons globalement un bon ensoleillement et la température est favorable à une bonne production même malgré souvent un indice de performance bas.

Le calcul des pertes révèle qu'elle représente aussi 22 % du productible de référence. Ce qui peut être optimiser.

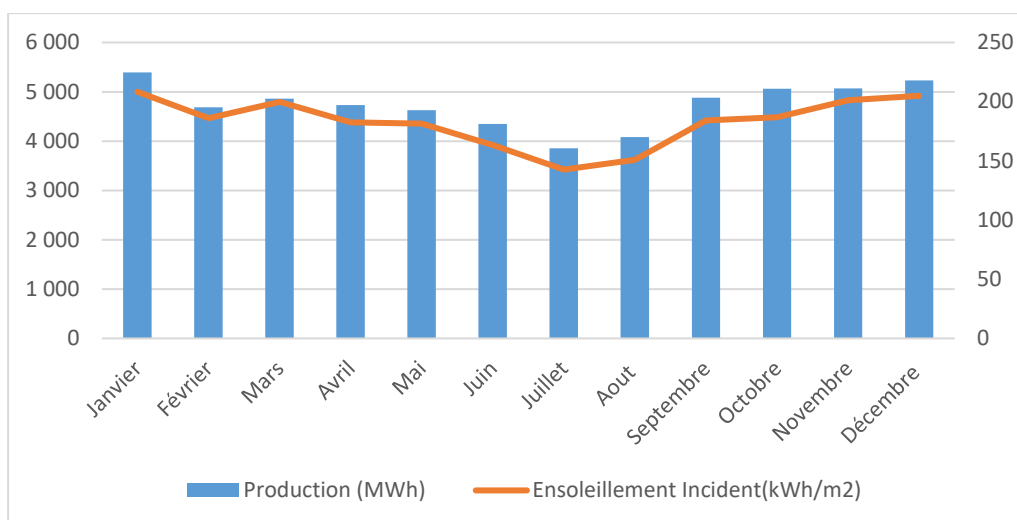


Figure 6 : Production et indice de performance 2019

- En 2020, Zagtouli a injecté 55 734 MWh avec un indice de performance global de 0,77 en moyenne et un facteur de capacité de 18,88 %. Après analyse l'indice le plus bas enregistré est 0,69 qui est celui du mois de Novembre. L'encrassement des panneaux dû à la poussière est un facteur non négligeable mais pas suffisant pour expliquer un indice aussi bas. La deuxième alternative serait l'ensoleillement incident. Mais le mois de Novembre a enregistré l'ensoleillement le plus élevé après le mois de Mars comme le indique sur la Figure 7. La température aussi ne peut pas être considérée car les températures durant cette période sont les plus basses de l'année. Nous attribuons ainsi cette valeur sûrement à un problème technique sur la chaîne de production ayant occasionné des pertes ou des travaux de maintenance ayant nécessité l'arrêt de la centrale. Pour le mois de décembre le PR est remonté à 0,76 donc l'hypothèse d'une panne sur la centrale ayant nécessité l'arrêt partiel en novembre est retenue comme explication. Nous avons aussi le mois de Mars où le PR est à 0,74 malgré l'ensoleillement le plus élevé de l'année. Nous pouvons ainsi attribuer cette valeur à la maintenance des modules car pour le mois d'Avril l'indice remonte à 0,80. Le productible de référence qui est l'ensoleillement reçu sur le plan incliné est de 2 130,93 kWh/kW avec des pertes estimées à environ 23 % donc un ensoleillement reçu de 1 641,19 kWh/kW. Cette valeur peut aussi être optimisée.

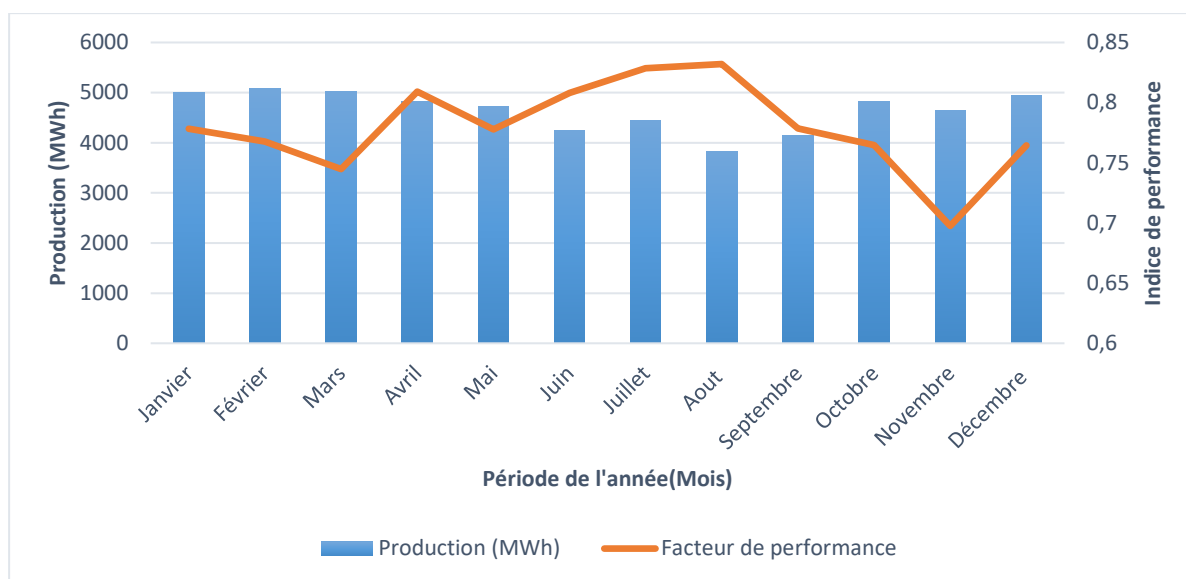


Figure 7: Production et Indice de performance 2020

- En 2021, l'indice de performance moyen relevé était de 0,76 avec une production de 56 628 MWh et un facteur de capacité de 18 %. L'indice de performance le plus bas enregistré est celui d'Octobre. Cet indice était de 0,70. L'encrassement des panneaux n'est pas à négliger durant cette période mais nous pensons que la centrale a eu des soucis d'ordre technique dû à l'instabilité du réseau expliquant cette valeur car l'ensoleillement enregistré est élevé (Figure 8) et l'encrassement à lui seul ne peut pas expliquer cet indice bas. En avril l'indice qui est à 0,73 peut être expliqué par la température élevée durant cette période de l'année. Ainsi, malgré un ensoleillement élevé l'indice est bas mais la production reste quand même l'une des plus élevée de l'année 2021 avec 4 677 MWh injecté sur le réseau national pour ce mois. Les pertes sur le plan incliné représentent 23 %. 2021 enregistre donc le taux le plus élevé de pertes de la centrale de Zagtouli. 2021 est aussi l'année ayant enregistré l'indice de performance le plus bas.

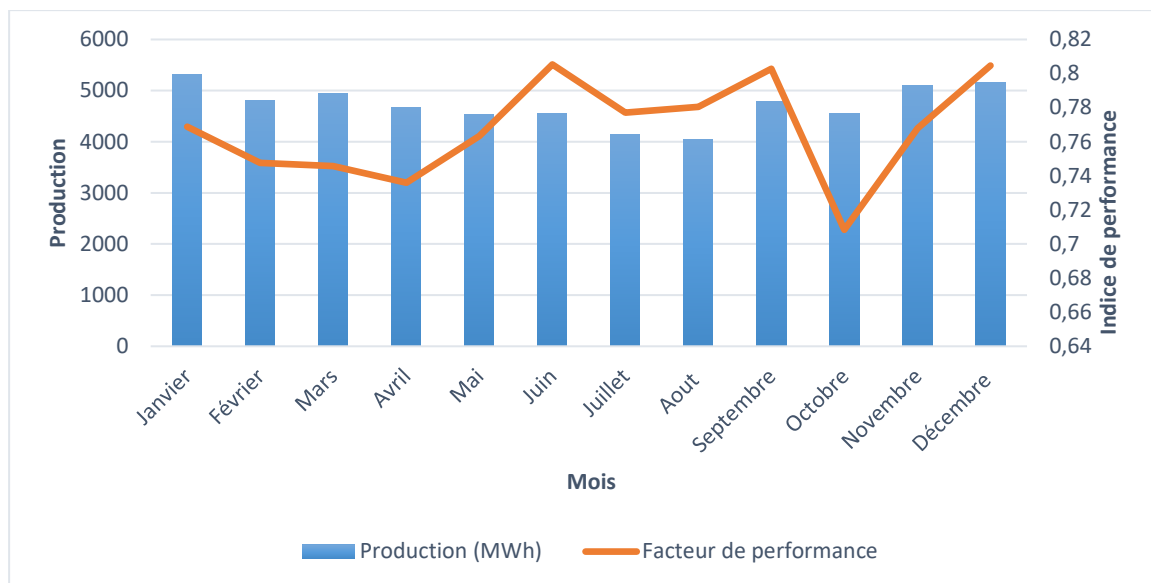


Figure 8: Production et indice de performance de Zagtoui en 2021

- En 2022, la production de la centrale était de 55 844 MWh avec un indice de performance moyen de 0,799 donc pratiquement 0,8 et un facteur de capacité de 18 %. Pour l'année 2022 tous les indices de performances sont supérieurs à 0,78 excepté celui de novembre qui est à 0,745. Cette valeur peut s'expliquer par l'encrassement des panneaux dû à la poussière. On remarque ainsi que la valeur remonte à 0,81 en décembre sur la Figure 9. Mais l'énergie injectée elle reste quand même de 4 813 MWh ce qui n'est pas négligeable. Nous pouvons dire que l'année 2022 est une des années où la centrale est la très performante. En effet pour un ensoleillement total de 2 042,55 kWh/m² pour 2022, la production est supérieure à 2020 où l'ensoleillement annuel était de 2 130,93 kWh/m². Ces valeurs peuvent aussi s'expliquer par le fait qu'en 2022, le réseau est plus stable que les années précédentes et une maintenance accrue. Les pertes enregistrées aussi en sont la preuve. On enregistre des pertes sur le plan incliné estimé à 20 %. Ce qui n'est pas mal.

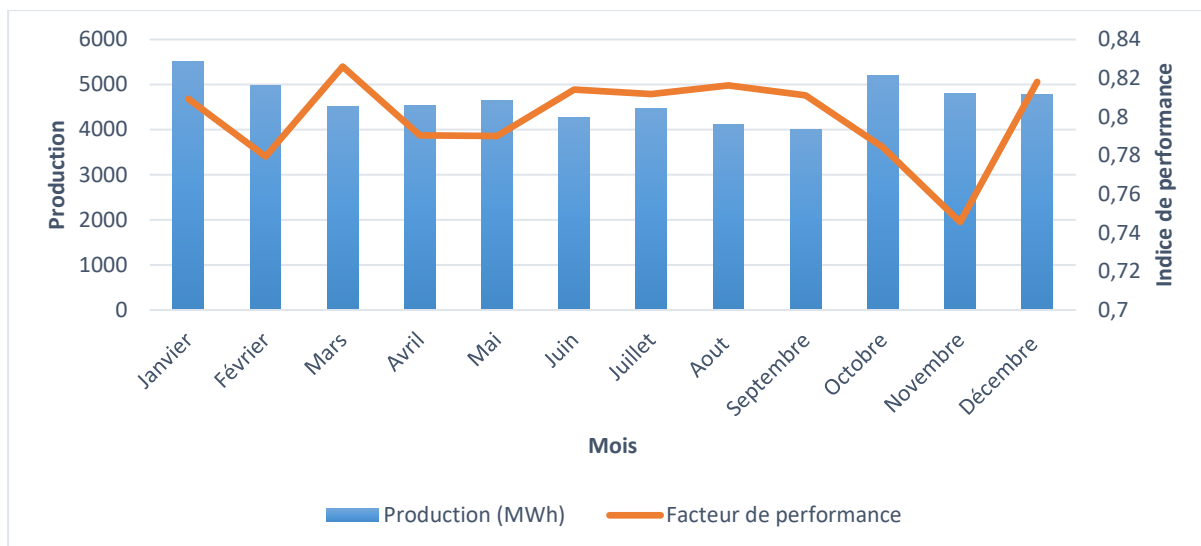


Figure 9: Production et indice de performance de Zagtoui en 2022

- L'année 2023 est l'année où la centrale a été la plus performante depuis qu'elle injecte sur le réseau. En effet la centrale a injecté une production record de 57 796 MWh avec un indice de performance global de 0,81 qui reflète les bonnes conditions de productions et de maintenance de la centrale. Les indices les moins élevés sont enregistrés pour les mois de Mai et Juin avec 0,76 et 0,77 comme le montre la Figure 10. Pour rappel on a enregistré l'indice de performance le plus élevé durant 2023 en Décembre qui est de 0,88 avec une production record de 5 991 MWh donc pratiquement 6 000 MWh. Ce qui montre à quel point l'indice est très important et maintenir un bon indice de performance c'est optimiser la production de la centrale. Nous remarquons que les productions mensuelles les plus élevées ont été d'Octobre à

Décembre et on a enregistré les ensoleillements les plus élevés dans certains de ces mois. L'ensoleillement durant 2023 est de 2 097,71 kWh/m². Ce qui reste inférieur à celui de 2019, 2020 et 2021. Nous remarquons aussi que le réseau SONABEL est plus stable ces dernières années grâce aux interconnexions avec les pays voisins et les producteurs indépendants. Ce qui veut dire que la stabilité du réseau est aussi un des facteurs clés pour une bonne production d'une centrale solaire.

Les pertes en kWh/kW aussi enregistrés sont très basses et estimés à 18 % du total reçu.

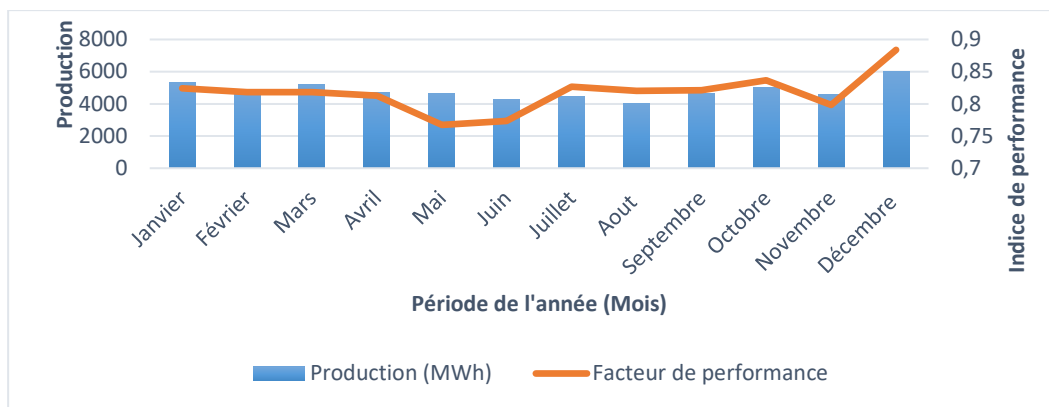


Figure 10: Production et ensoleillement de la centrale en 2023

- Pour 2024, de janvier à novembre on a produit 56 612 MWh avec un indice de performance global de 0,79. De janvier à Décembre, la production la plus basse enregistrée est celle d'Aout qui a aussi enregistré l'ensoleillement sur le plan du module le plus bas. Le PR aussi enregistré est de 0,79 donc la centrale fonctionne dans les meilleures conditions comparées à 2019, 2020.

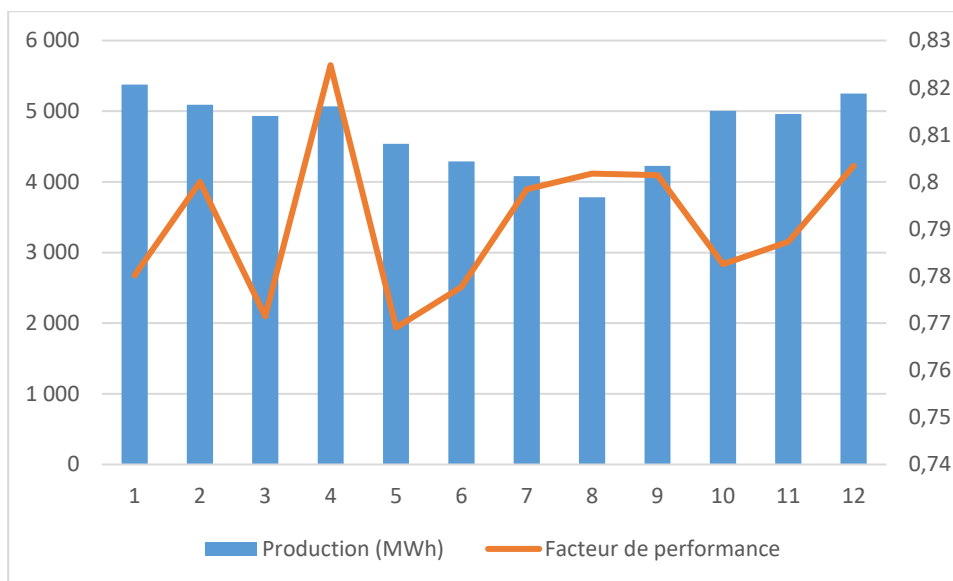


Figure 11: Production et indice de performance.2024

En conclusion, les indices de performance et les données d'ensoleillement montrent clairement que la production d'énergie est fortement influencée par les conditions climatiques, la maintenance des équipements et la stabilité du réseau SONABEL pour cette partie de discussion.

IV.2. Analyse des paramètres économiques de la centrale

L'analyse des paramètres économiques de Zagtouli est tout aussi importante. En effet l'optimisation de la production de Zagtouli provoquera aura forcément un effet positif sur l'économie de la centrale. Pour se faire, nous avons calculé les différents paramètres économiques de Zagtouli.

1. Prévision sur la production de Zagtouli

Le taux de dégradation de la centrale de Zagtouli est estimé à 0,7 % par le constructeur des modules photovoltaïques. L'ensoleillement moyen calculer sur la base de l'ensoleillement de 2019 à 2022 donne une valeur de 2 138 kWh/m² /an. Nous avons aussi considéré que la centrale fonctionnera un indice de performance moyen des six dernières années. Cet indice moyen nous donne 0,79. Ces paramètres que nous considérerons comme optimisé nous donne les données consignées dans le Tableau 11 :

Tableau 11: Prévision de la production de la centrale de Zagtouli

Année	Energie théorique attendue (MWh/an)
1	58 889,83
2	58 477,60
3	58 068,25
4	57 661,78
5	57 258,14
6	56 857,34
7	56 459,33
8	56 064,12
9	55 671,67
10	55 281,97
11	54 895,00
12	54 510,73
13	54 129,16
14	53 750,25
15	53 374,00
16	53 000,38
17	52 629,38

18	52 260,97
19	51 895,15
20	51 531,88
21	51 171,16
22	50 812,96
23	50 457,27
24	50 104,07
25	49 753,34
Total	1 354 965,70
Facteur de capacité (%)	18,361402

Le calcul de la prévision de la production est très important car elle nous permet d'estimer la production estimative de la centrale en 25 ans en utilisant les données réelles de production et la décroissance du constructeur. Au bout de 25 ans on devrait avoir un estimatif de 1 385 201,07 MWh au lieu de 1 354 965,70 . Ce qui représente plus que la production prévue dans le DAO. Cela peut s'expliquer par le fait que la centrale se dégrade beaucoup moins vite que prévu.

2. . Le LCC (Life Cycle Cost)

Le LCC représente les dépenses effectuées sur la centrale solaire sur sa durée de vie qui est 25 ans. Il est calculé en additionnant le cout d'investissement aux charges durant le fonctionnement tel que la maintenance et de remplacement des équipements défaillants. Le récapitulatif du LCC est résumé dans le tableau qui suit

Tableau 12: Récapitulatif du Life Cycle Cost

LCC	
Investissement Initial	14 737 500 000 FCFA
Frais opérationnels annuels	46 565 260 FCFA
Total frais opérationnels actualisé sur 25 ans	927 087 786,83 FCFA
LCC	15 664 587 786,83 FCFA

3. . Le LCOE

Le LCOE est un indicatif du coût moyen de production de l'électricité. A cet effet son calcul est primordial car il permet de savoir si le projet est rentable au vu des autres sources d'énergies. Au Burkina Faso particulièrement le prix du kWh reste l'un des plus élevé. Il est compris entre 96 et 165 FCFA. Pour la centrale solaire de Zagtoui nous avons estimé le coût de production du kWh. Le calcul détaillé se trouve en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 13: LCOE de la centrale de Zagtoui

LCOE de la centrale solaire de Zagtoui			
	Coût d'installation ou CAPEX (Millions de FCFA)	Coût de maintenance ou OPEX (FCFA)	Energie totale en 25 ans (kWh)
Installation	14 737 500 000,00	-	-
TOTAL sur 25 ans	14 737 500 000,00	927 087 786,83	1 347 540 329,33
LCOE(FCFA/kWh)	44,32		

Après le calcul estimatif du LCOE, nous trouvons un coût moyen du LCOE égale à 44,32 FCFA. Ce calcul est vraiment estimatif car il y a plusieurs paramètres qui pourraient contribuer à la hausse ou à la baisse de ce coût moyen.

La production solaire photovoltaïque ne représente que 8,1 % de la production totale de la SONABEL en 2023[20]. Une augmentation de la production solaire photovoltaïque pourrait contribuer à la baisse du prix du kWh conformément aux objectifs du projet YELEN.

4. Résultat de la VAN et discussion

La Valeur Actuelle Nette est un indicateur financier de la rentabilité des projets. Pour le cas de Zagtoui, nous allons essayer d'estimer la VAN de la centrale grâce aux données de production et au LCOE calculé. Nous allons pris une valeur de 12 % pour le taux d'actualisation.

Le Tableau 14 résume le calcul de la VAN

Tableau 14 : VAN de la centrale de Zagtoui

Valeur actuelle nette de la centrale de Zagtoui		
Année (t)	Bénéfices revente électricité (FCFA)	Dépenses actualisées (FCFA)
Installation	14 737 500 000,00	-
TOTAL sur 25 ans	19 243 883 278,27	15 102 718 622,42
VAN (FCFA)	4 506 383 278,27	

Après le calcul de la VAN nous trouvons 4 506 383 278,27 FCFA qui est supérieur à 0. Donc on peut dire que le projet est très rentable car le bénéfice représente quand même plus de 4 milliards. Le calcul est estimatif mais cela reste quand même un projet très rentable en plus d'être un projet qui évite la pollution de l'environnement.

Le tableau détaillé du calcul de la VAN est en **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

5. . Le Temps de retour sur investissement simple

Le retour sur Investissement d'un projet est la période au bout de laquelle on récupère un investissement. Pour le calcul nous avons déterminé le bénéfice moyen annuel de la centrale qui est 2 389 408 768,42 FCFA.

Pour le cas de Zagtoui nous aurons à calculer cette valeur selon la formule évoquée plus haut.

$$TRI = \frac{14\,737\,500\,000,00}{2\,389\,408\,768,42}$$

Nous avons ainsi un temps de retour sur investissement simple de 6,16 ans.

Sachant que la durée de vie estimative selon le constructeur est de 25 ans pour une centrale solaire photovoltaïque, il reste encore plus de 18 ans d'exploitation de la centrale. Ce qui en fait un projet très rentable. Comme calculé au niveau de la VAN, on remarque que l'exploitation durant ses 15 ans rapporterait environ 4,5 milliards de FCFA.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La centrale solaire de Zagtoui est l'une des centrales pionnières d'un vaste projet d'électrification par le solaire photovoltaïque.

Le but de notre étude était l'étude de la chaîne énergétique de la centrale en vue d'une optimisation et d'estimer un facteur de dégradation de la centrale qui aurait permis d'estimer

en moyenne la production future de la centrale. Nous avons ainsi plusieurs points que nous avons analysés.

Tout d'abord nous avons rencontrés des difficultés dans la détermination du coefficient de dégradation. En effet on a l'impression qu'il n'y a pas de dégradation et au contraire qu'au fil des ans la production est de plus en plus importante. L'exemple est pris pour 2023 qui comptabilise une production énergétique estimé à presque 58 000 MWh qui est la plus importante depuis que la centrale a été construite. Ce que nous avons expliqué par le fait que l'injection de la production solaire est fonction de la stabilité du réseau. Ainsi plus le réseau est instable, plus les onduleurs seront déconnectés et il n'y aura pas d'injection sur le réseau.

Au niveau de l'analyse de la chaine de production, nous remarquons que l'effet de la température n'est pas aussi important car sur les 6 années récoltés la période chaude qui est principalement de Mars-Avril enregistre de bonnes productions malgré les températures élevées.

Ensuite nous remarquons que les productions les moins importantes sont enregistrés dans les mois de Juillet et Août qui enregistre aussi les ensoleillements les plus bas de l'année. Ce qui montre une fois de plus la corrélation entre la production d'énergie et l'ensoleillement.

Enfin les productions les plus importantes pour presque toutes les données ont été enregistrés entre Octobre et Janvier. Cette période semble être la période propice pour la production d'énergie. En effet, il ne fait ni trop chaud, ni trop froid et les ensoleillements sont les plus élevés enregistrés. Nous avons ainsi eu une production record de 5 991 MWh au mois de Décembre 2023 avec un indice de performance aussi record de quasiment 0,9. Ce qui nous prouve que bien vrai l'ensoleillement est un paramètre important mais l'indice de performance d'une centrale est aussi un paramètre non négligeable à surveiller pour une bonne production car il reflète le rendement de la chaine énergétique considéré. Nous recommandons ainsi des mesures d'optimisation tel qu'un nettoyage plus rigoureux des modules pour optimiser la production durant cette période.

Au niveau des paramètres économiques de la centrale nous avons calculé le LCOE, la VAN et le TRI simple de la centrale.

Après le calcul du LCOE, le prix moyen estimé du kWh est à 44,32 FCFA. Ce qui est beaucoup plus bas que le coût moyen actuel du kWh estimé entre 96 et 136 FCFA.

Nous pouvons ainsi dire que le prix moyen de production de Zagtouli est vraiment très bas mais malheureusement le solaire a un faible taux dans mix énergétique de la SONABEL et souffre du problème de continuité durant la nuit. Il faudrait un taux de pénétration plus élevé des

centrales solaires ainsi que l'amélioration de la technologie en terme de stockage pour espérer remonter la contribution du solaire.

Ensuite, la VAN de la centrale est estimée à plus de 4 milliards de FCFA. La VAN est largement supérieure à 0. Ce qui en fait un investissement très rentable.

Enfin le TRI actualisé du projet de la centrale est approximativement de 6,16 ans sur une durée de vie de 25 ans.

En définitive, après un calcul estimatif des paramètres économiques de la centrale nous pouvons dire que le projet est rentable. En effet, la durée de vie de la centrale est estimée à 25 ans mais la centrale produira toujours à plus de 80 % avec les estimations que nous avons considérées.

En somme, la centrale solaire de Zagtoui injecte depuis bientôt 7 ans sur le réseau national. La tendance de la production d'énergie est principalement dépendante de l'ensoleillement et de l'indice de performance. Cependant l'indice de performance semble être un bon indicatif à suivre pour desceller les problèmes au niveau de Zagtoui. L'indice le plus bas enregistré est en Novembre 2020. Ce qui suppose qu'il y a eu des défauts techniques ou une maintenance nécessitant l'arrêt de la centrale. Les autres indices restent assez constants et sont supérieurs dans l'ensemble à 0,75. Ce qui n'est pas si mal au vu du climat au Burkina Faso.

Il serait très important de mener des études plus poussées sur Zagtoui, ce qui permettra d'optimiser les futurs projets de centrale solaire au Burkina Faso et ainsi de maximiser la production.

Bibliographie

- [1] « memc_tableau_de_bord_2023.pdf ». Consulté le: 2 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: http://cns.bf/IMG/pdf/memc_tableau_de_bord_2023.pdf
- [2] « SONABEL - 2022 - ANNUAIRE DES PROJETS DE LA SONABEL Janvier 2022.pdf ».
- [3] « Sci-Hub | Siting guidelines for concentrating solar power plants in the Sahel: Case study of Burkina Faso | 10.1016/j.solener.2010.05.019 ». Consulté le: 23 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sci-hub.yt/10.1016/j.solener.2010.05.019>
- [4] « loi_014_2017_portant_reglement_sect_energie.pdf ». Consulté le: 15 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.arse.bf/IMG/pdf/loi_014_2017_portant_reglement_sect_energie.pdf
- [5] « Burkina : Lancement des travaux de construction d'une centrale photovoltaïque à Pâ - Urbasolar ». Consulté le: 8 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://urbasolar.com/burkina-lancement-des-travaux-de-construction-dune-centrale-photovoltaïque-a-pa/>
- [6] « Burkina Faso : Qair Inaugure une Centrale Solaire de 24 MW à Zano — Qair Africa ». Consulté le: 8 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://africa.qair.energy/fr/burkina-faso-qair-inaugure-une-centrale-solaire-de-24-mw-a-zano/>
- [7] « Kodéni Solar (38MW): Bouclage financier et lancement de la construction - Africa Ren ». Consulté le: 8 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.africa-ren.com/kodeni-solar-bouclage-financier-et-lancement-de-la-construction/>
- [8] « Suivi des travaux de construction des centrales solaires en mode PPP: satisfecit de la Direction Générale de l'Energie - Ministère de l'Energie, des Mines et des Carrières ». Consulté le: 8 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.energie-mines.gov.bf/accueil/details?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=291&cHash=3ad656fe0c3a28b158fa06d0676ee266
- [9] Aera, « Inauguration de la plus grande centrale solaire d'Afrique de l'Ouest à Zagatouli | AFD - Agence Française de Développement ». Consulté le: 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.afd.fr/fr/actualites/communiqu-de-presse/inauguration-de-la-plus-grande-centrale-solaire-dafrique-de-louest-zagatouli>
- [10] « INGECON - Fiche Technique Onduleur INGECON SUN 1165 TL B420 .pdf ».
- [11] Dr Ing TOSSA, « Systèmes PV connectés réseau 28-03-2022_TKA_im ».
- [12] « GIZ_RMS-APST_Guide-Exploitation-Maintenance-stations-photovoltaïques.pdf ». Consulté le: 21 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.giz.de/en/downloads_els/GIZ_RMS-APST_Guide-Exploitation-Maintenance-stations-photovoltaïques.pdf
- [13] « Sunmodule Plus SW 260 poly_EN.indd.pdf ». Consulté le: 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fullcirclesolar.co.za/wp-content/uploads/2015/06/FCS-Sunmodule-Plus-SW-260-poly_EN_print.pdf
- [14] « Verissimo et al. - 2020 - Area and LCOE considerations in utility-scale, sin.pdf ». Consulté le: 2 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sci.bban.top/pdf/10.1016/j.solener.2020.09.070.pdf>
- [15] « 99396-FRENCH-IFC-Solar-Report-PUBLIC.pdf ». Consulté le: 13 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/269661484651089911/pdf/99396-FRENCH-IFC-Solar-Report-PUBLIC.pdf>

- [16] « Burkina-Faso - Taux d'intérêt | 2010-2024 Données | 2025-2026 Prévisions ». Consulté le: 11 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.tradingeconomics.com/burkina-faso/interest-rate>
- [17] « Burkina Faso Inflation Rate ». Consulté le: 5 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://tradingeconomics.com/burkina-faso/inflation-cpi>
- [18] « Knipping - 2017 - Financement et rentabilité.pdf ». Consulté le: 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://environnement.brussels/sites/default/files/pres-171130-nrj-1-6-rent-fr.pdf>
- [19] « benin_-re-_projet_de_developpement_des_competences_pour_emploi_dans_les_secteurs_prioritaires_-_phase_i_-pdcesp-i_0.pdf ». Consulté le: 9 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.afdb.org/sites/default/files/documents/projects-and-operations/benin_-re-_projet_de_developpement_des_competences_pour_emploi_dans_les_secteurs_prioritaires_-_phase_i_-pdcesp-i_0.pdf
- [20] « Rapport SONABEL 2023-1.pdf ». Consulté le: 29 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sonabel.bf/wp-content/uploads/Rapport%20SONABEL%202023-1.pdf?t=1734597768>
- [21] « On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an off-grid site: East Malaysian perspectives | Request PDF ». Consulté le: 6 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/223562211_On_the_policy_of_photovoltaic_and_diesel_generation_mix_for_an_off-grid_site_East_Malaysian_perspectives

Liste des Annexes

Annexe 1: Récapitulatif de la prévision de la production sur 25 ans.....	II
Annexe 2: Indice de performance et facteur de capacité de 2018 à 2021	XI
Annexe 3: Indice de performance et facteur de capacité de 2022 à 2024.....	XII
Annexe 4: Calcul du LCOE de la centrale de Zagtouli.....	XI
Annexe 5: Calcul de la Valeur Actuelle Nette de la Centrale de Zagtouli.....	XII
Annexe 6: Pertes au niveau de la centrale de Zagtouli en kWh/m ²	XI
Annexe 7: Fiche technique du module photovoltaïque installé à Zagtouli	XI
Annexe 8: Production au niveau de la centrale par mois	XII
Annexe 9: Pertes au niveau de la centrale en kWh/kW	XII
Annexe 10: Prévision de la production réel au niveau de la centrale de Zagtouli	XIII

Annexe

Annexe 1: Récapitulatif de la prévision de la production sur 25 ans

Année	Energie théorique attendue (MWh/an)
1	58 889,83
2	58 477,60
3	58 068,25
4	57 661,78
5	57 258,14
6	56 857,34
7	56 459,33
8	56 064,12
9	55 671,67
10	55 281,97
11	54 895,00
12	54 510,73
13	54 129,16
14	53 750,25
15	53 374,00
16	53 000,38
17	52 629,38
18	52 260,97
19	51 895,15
20	51 531,88
21	51 171,16
22	50 812,96
23	50 457,27
24	50 104,07
25	49 753,34
Total	1 354 965,70
Facteur de capacité (%)	18,361402

Annexe 2: Indice de performance et facteur de capacité de 2018 à 2021

	2018		2019		2020		2021	
Mois	Production (MWh)	Indice de performance	Production (MWh)	Indice de performance	Production (MWh)	Indice de performance	Production (MWh)	Indice de performance
Janvier	-	-	5 395	0,7684202	5007	0,7783829	5311	0,7687794
Février	4464	0,7885633	4685	0,7468296	5086	0,7677796	4803	0,7475308
Mars	5014	0,7847742	4860	0,7218757	5015	0,7448985	4950	0,7458075
Avril	4580	0,7637738	4732	0,7692381	4831	0,8090409	4677	0,7359483
Mai	3720	0,736975	4626	0,7565652	4722	0,7777087	4541	0,7633179
Juin	4266	0,7790448	4348	0,789453	4239	0,808128	4559	0,805345
Juillet	4041	0,7779774	3854	0,801848	4452	0,8285621	4137	0,777052
Aout	4253	0,7831281	4082	0,8031157	3833	0,8320706	4050	0,7804695
Septembre	4630	0,7955363	4883	0,786931	4145	0,7785546	4788	0,8027911
Octobre	5268	0,8013277	5064	0,8042647	4824	0,7647155	4559	0,7083663
Novembre	4959	0,7675836	5071	0,7483845	4647	0,6975345	5095	0,7678883
Décembre	4970	0,7462824	5230	0,7724478	4933	0,7645561	5158	0,8046814
TOTAL	50165	0,774997	56 830	0,7724478	55 734	0,7793277	56 628	0,7619934
Facteur de capacité	0,169948901		0,19252858		0,18881555		0,191844242	

Annexe 3: Indice de performance et facteur de capacité de 2022 à 2024

	2022		2023		2024	
Mois	Production (MWh)	Indice de performance	Production (MWh)	Indice de performance	Production (MWh)	Indice de performance
Janvier	5510	0,809309	5336	0,8240897	5 378	0,7801521
Février	4988	0,7795126	4823	0,8183689	5093	0,8000081
Mars	4523	0,8259774	5191	0,8183039	4934	0,7714392
Avril	4530	0,7904358	4698	0,8127256	5070	0,8247709
Mai	4640	0,7901182	4656	0,767307	4540	0,7690741
Juin	4275	0,814102	4297	0,7735672	4290	0,777685
Juillet	4463	0,8117237	4464	0,8266481	4081	0,7984198
Aout	4117	0,8162792	4018	0,8203264	3782	0,8017633
Septembre	4007	0,8111056	4669	0,8210135	4 228	0,8013977
Octobre	5200	0,7842311	5043	0,8363791	5006	0,7825316
Novembre	4813	0,7455292	4610	0,7981069	4961	0,7753339
Décembre	4778	0,818124	5991	0,8838516	5249	0,80337887
Total	55844	0,799704	57796	0,816724	46 402	0,791494758
Facteur de capacité	0,189188208		0,19580119		0,174007484	

Annexe 4: Calcul du LCOE de la centrale de Zagtoui

LCOE of Zagtoui Solar plant			
Temps (année)	Coût d'installation ou CAPEX(FCFA)	Coût de maintenance ou OPEX (FCFA)	Energie (MWh/ an)
1	-	46 565 363,33	55 488,00
2	-	46 565 363,33	56 830,00
3	-	46 565 363,33	55 734,00
4	-	46 565 363,33	56 628,00
5	-	46 565 363,33	55 844,00
6	-	46 565 363,33	57 796,00
7	-	46 565 363,33	56 539,67
8	-	46 565 363,33	56 145,88
9	-	46 565 363,33	55 752,85
10	-	46 565 363,33	55 362,58
11	-	46 565 363,33	54 975,05
12	-	46 565 363,33	54 590,22
13	-	46 565 363,33	54 208,09
14	-	46 565 363,33	53 828,63
15	-	46 565 363,33	53 451,83
16	-	46 565 363,33	53 077,67
17	-	46 565 363,33	52 706,13
18	-	46 565 363,33	52 337,18
19	-	46 565 363,33	51 970,82
20	-	46 565 363,33	51 607,03
21	-	46 565 363,33	51 245,78
22	-	46 565 363,33	50 887,06
23	-	46 565 363,33	50 530,85
24	-	46 565 363,33	50 177,13
25	-	46 565 363,33	49 825,89
TOTAL	14 737 500 000,00	1 164 134 083,32	1 347 540 329,33

LCOE(FCFA/kWh)	44,329077
----------------	-----------

Annexe 5: Calcul de la Valeur Actuelle Nette de la Centrale de Zagtouli

Valeur actuelle nette de la centrale de Zagtouli				
Temps (année)	Coût d'installation ou CAPEX(Millions de FCFA)	Bénéfices revente électricité(FCFA/an)	Dépenses	Cash-flow
installation	14 737 500 000,00			
1	-	2196189136	41576217,26	2 154 612 918,85
2	-	2008307919	37121622,55	1 971 186 296,75
3	-	1758550463	33144305,85	1 725 406 157,53
4	-	1595320048	29593130,23	1 565 726 917,43
5	-	1404672549	26422437,7	1 378 250 111,05
6	-	1298010891	23591462,23	1 274 419 428,88
7	-	1133746019	21063805,57	1 112 682 213,58
8	-	1005222876	18806969,25	986 415 906,39
9	-	891237781,7	16791936,83	874 445 844,88
10	-	790177783,2	14992800,75	775 184 982,50
11	-	700577266,8	13386429,24	687 190 837,52
12	-	621136808,8	11952168,96	609 184 639,87
13	-	550704331,4	10671579,43	540 032 751,97
14	-	488258393,8	9528195,92	478 730 197,90
15	-	432893379,5	8507317,785	424 386 061,74
16	-	383806362,4	7595819,451	376 210 542,93
17	-	340285462,4	6781981,653	333 503 480,71
18	-	301699521,5	6055340,761	295 644 180,78
19	-	267488950,8	5406554,251	262 082 396,54
20	-	237157614,4	4827280,582	232 330 333,83
21	-	210265634,9	4310071,948	205 955 562,97
22	-	186423013,8	3848278,525	182 574 735,29
23	-	165283975,6	3435962,969	161 848 012,67
24	-	146541953,4	3067824,079	143 474 129,32
25	-	129925142,6	2739128,642	127 186 013,97
Total	14 737 500 000,00	19243883278	365218622,4	18 878 664 655,84
VAN (FCFA)	4 506 383 278,27			

Annexe 6: Pertes au niveau de la centrale de Zagtouli en kWh/m²

Mois	janvier	février	Mars	avril	Mai	Juin	Juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Total/An
2018		35,521	40,809	42,039	39,401	35,907	34,225	34,953	35,315	38,761	44,561	50,145	431,638
2019	48,252	47,133	53,291	42,128	44,174	34,414	30,032	29,889	36,256	39,814	39,360	51,601	496,345
2020	42,307	45,652	50,969	33,840	40,055	29,869	27,337	22,958	34,988	44,048	59,800	57,916	489,739
2021	47,405	48,141	50,068	49,800	41,786	32,702	35,226	33,807	34,906	55,702	38,460	37,155	505,159
2022	38,529	41,871	28,280	35,643	36,578	28,970	30,721	27,499	27,694	42,459	48,754	31,523	418,521
2023	33,803	31,767	34,206	32,127	41,903	37,327	27,781	26,117	30,208	29,278	34,609	23,364	382,492
2024	44,976	37,784	43,383	31,967	40,456	36,395	30,578	27,751	31,095	41,286	42,662	-	408,334

Annexe 7: Fiche technique du module photovoltaïque installé à Zagtoui

Sunmodule[®] Plus SW 260 poly



PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

		260 Wp
Maximum power	P_{max}	260 Wp
Open circuit voltage	U_{oc}	38.4 V
Maximum power point voltage	U_{mp}	31.4 V
Short circuit current	I_{sc}	8.94 A
Maximum power point current	I_{mp}	8.37 A
Module efficiency	η_m	15.51 %

Measuring tolerance (P_{max}) traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power controlled)*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5PERFORMANCE AT 800 W/m², NOCT, AM 1.5

		260 Wp
Maximum power	P_{max}	192.4 Wp
Open circuit voltage	U_{oc}	34.8 V
Maximum power point voltage	U_{mp}	28.5 V
Short circuit current	I_{sc}	7.35 A
Maximum power point current	I_{mp}	6.76 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25°C: at 200 W/m², 100% (+/-2%) of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.

COMPONENT MATERIALS

Cells per module	60
Cell type	Poly crystalline
Cell dimensions	156 mm x 156 mm
Front	Tempered safety glass (EN 12150)
Back	film, white
Frame	Clear anodized aluminum
J-Box	IP65
Connector	H4

DIMENSIONS / WEIGHT

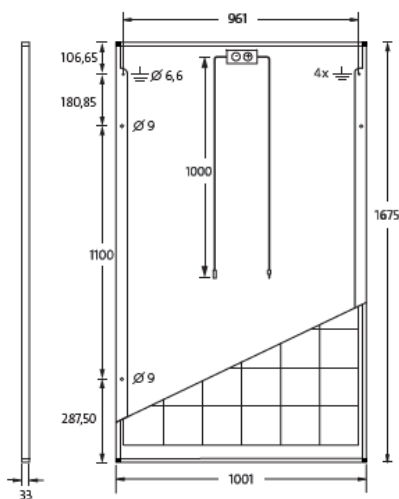
Length	1675 mm
Width	1001 mm
Height	33 mm
Weight	18.0 kg

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	46 °C
TK I_{sc}	0.051 %/K
TK U_{oc}	-0.31 %/K
TK P_{max}	-0.41 %/K

PARAMETERS FOR OPTIMAL SYSTEM INTEGRATION

Power sorting	-0 Wp / +5 Wp
Maximum system voltage SC II	1000 V
Maximum reverse current	25 A
Load / dynamic load	5.4 / 2.4 kN/m ²
Number of bypass diodes	3
Operating range	-40°C bis +85°C



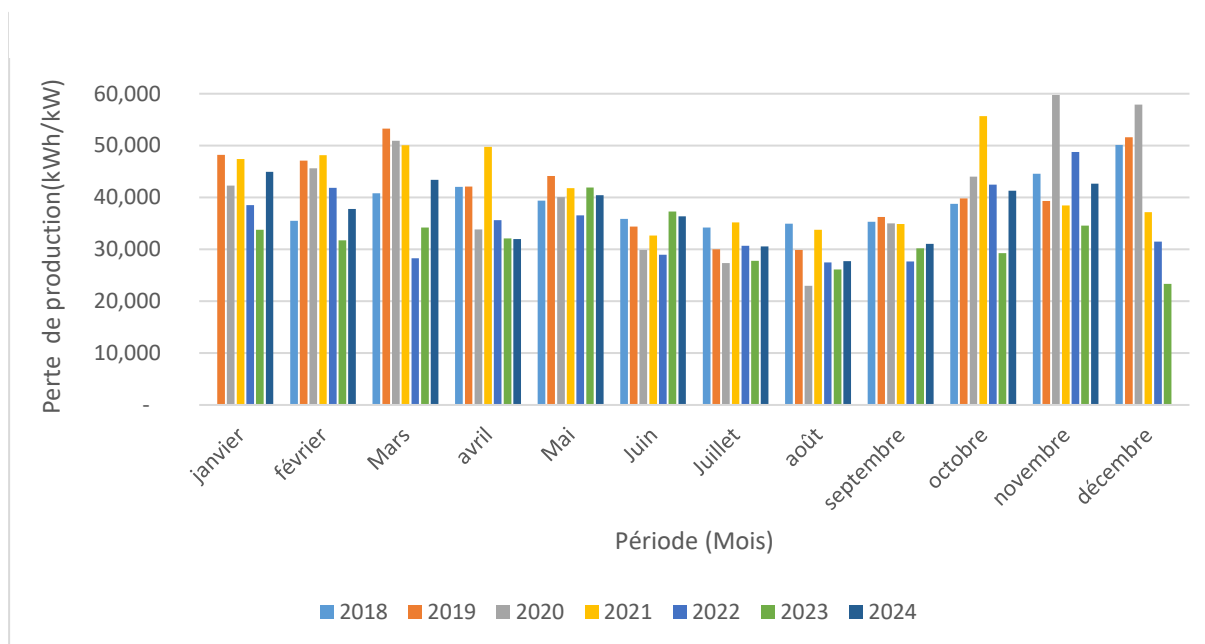
ORDERING INFORMATION

Order number	Description
82000008	Sunmodule Plus SW 260 poly

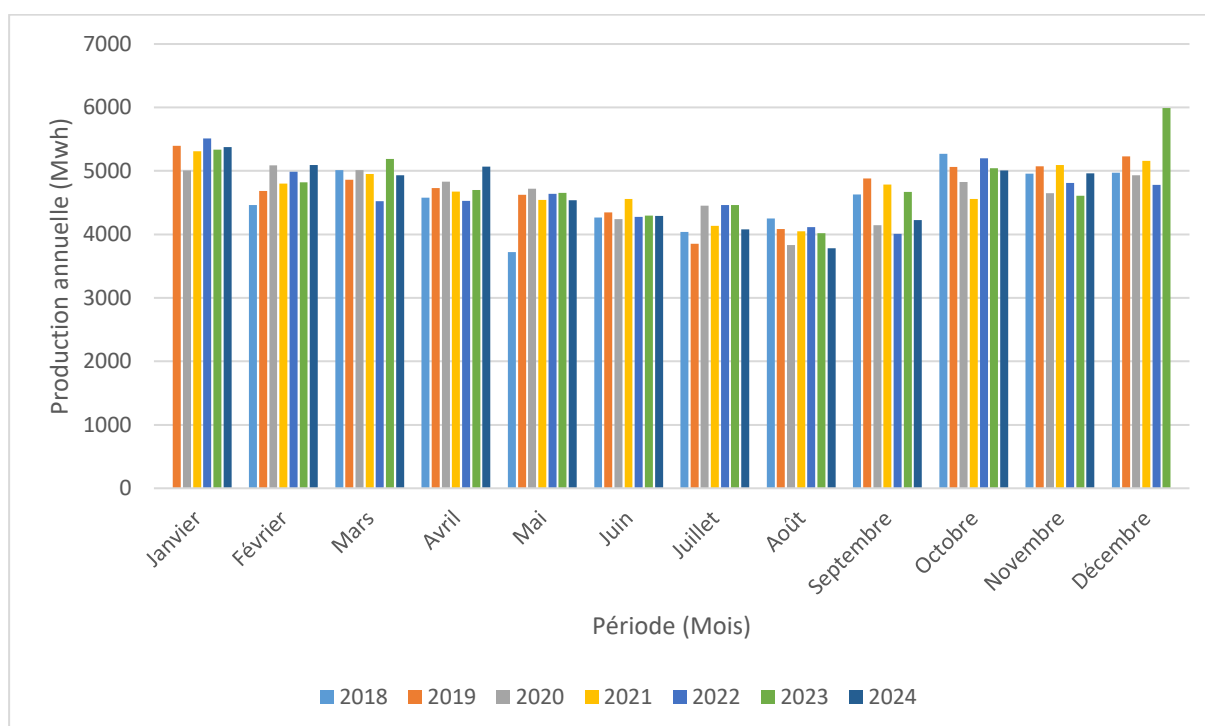
SolarWorld AG reserves the right to make specification changes without notice.
This data sheet complies with the requirements of EN 50380.

2016-03-08 EN

Annexe 8: Production au niveau de la centrale par mois



Annexe 9: Pertes au niveau de la centrale en kWh/kW



Annexe 10: Prévision de la production réel au niveau de la centrale de Zagtouli

Année	Ensoleillement incident moyen(kWh/m ²)	Indice de performance	Energie produite (MWh)
2018	1920,39	0,774996964	55488
2019	2 192	0,772447785	56 830
2020	2130,93	0,77932767	55 734
2021	2192,96	0,761993384	56 628
2022	2075,81	0,799703985	55844
2023	2097,71	0,816723988	57796
2024	1932,64	0,789325071	56 542
2025	2138	0,79	56913,21792
2026	2138	0,79	56685,56505
2027	2138	0,79	56458,82279
2028	2138	0,79	56232,9875
2029	2138	0,79	56008,05555
2030	2138	0,79	55784,02332
2031	2138	0,79	55560,88723
2032	2138	0,79	55338,64368
2033	2138	0,79	55117,28911
2034	2138	0,79	54896,81995
2035	2138	0,79	54677,23267
2036	2138	0,79	54458,52374
2037	2138	0,79	54240,68965
2038	2138	0,79	54023,72689
2039	2138	0,79	53807,63198
2040	2138	0,79	53592,40145
2041	2138	0,79	53378,03185
2042	2138	0,79	53164,51972