



ÉTUDE DE LA RÉHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 02 juillet 2019 par :

TANOU Siaka Acheick, N° : 20100049

**ENCADREUR 2IE : Dr Daniel YAMEGUEU Docteur, Enseignant-chercheur Génie
Énergétique, Institut 2iE.**

**Maître de stage : Paul Pipi-Kassida KABORE, Ingénieur Électricien, Chef de Projet BID
et Directeur technique par intérim de l'Agence Burkinabé de l'Électrification Rurale (ex
ABER).**

Structure d'accueil : Agence Burkinabé de l'Électrification Rurale (ex-FDE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Ing. Ahmed ZONGO

Membres et correcteurs : Dr Daniel YAMEGUEU
Ing. Justin BASSOLE

Promotion [2017/2018]

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire

À

Mes parents.

Père, toi qui n'as cessé de ménager aucun effort pour ma réussite,

Mère, toi qui m'as toujours soutenu en toutes circonstances,

Je vous remercie, je vous serai à jamais reconnaissant et éternellement redevable.

Que le 'Tout-Puissant' vous protège et vous garde aussi longtemps que possible à nos côtés.

Je vous aime de tout mon cœur.

CITATION

« C'est votre attitude bien plus

que votre aptitude qui

détermine votre altitude »

Zig Ziglar

REMERCIEMENTS

Notre travail n'aurait pu se faire sans l'aide de l'Agence Burkinabé de l'Electrification Rurale (ex-FDE), du 2IE et des personnes ressources de bonnes volontés.

Mes sincères gratitudee vont à l'endroit du FDE/ABER.

- ✚ Nous remercions M. Ismaël NACOULMA Directeur Général de ABER/FDE.
- ✚ Nous remercions M. Yacouba CAMARA ex -Directeur Général du FDE/ABER pour m'avoir donné la chance de faire mon stage de fin d'étude au sein du FDE/ABER.
- ✚ Nous remercions Dr Daniel YAMEGUEU pour les directives et l'encadrement reçus.
- ✚ Nous remercions M. Pipi-Kassida Paul KABORE Directeur technique par intérim de l'ABER/FDE qui n'a ménagé aucun effort pour la réussite de mon stage.
- ✚ Nous remercions M. Gervais OUOBA ancien Directeur technique du FDE/ABER pour son soutien indéfectible durant mon stage
- ✚ Nous remercions M. Anselme COMPAORE pour l'assistance et l'encadrement qu'il m'a offerts durant mon stage.
- ✚ Nous remercions M. Rodrigue IDOGO, l'Auditeur interne de l'ABER/FDE, pour l'aide offerte et tous les conseils prodigués.
- ✚ Nous remercions M. Saliou TALL responsable chargé de la planification et du suivi évaluation pour tout son soutien durant mon stage.
- ✚ Nous remercions mon co-stagiaire, M. Abdoul Kader DIASSO, pour son aide et sa compréhension.
- ✚ Nous remercions également tout le personnel FDE/ABER pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant mon stage.
- ✚ Nous remercions nos parents pour leur soutien et leur compréhension.

Puissent-ils tous trouver ici le témoignage de notre profonde gratitude.

RÉSUMÉ

Notre travail est une étude qui porte sur la réhabilitation de la centrale électrique diesel de Douma. Douma, un village de la commune rurale de Tangaye, est situé à 25 km de la ville de Ouahigouya dans la province du Yatenga qui fait partie de la région du nord au Burkina Faso. Lors de cette étude, nous avons comparé deux technologies de centrale : la première est une centrale électrique diesel et la seconde est une centrale hybride solaire PV/diesel avec stockage. De cette étude technique et financière, il est ressorti que la centrale hybride est plus coûteuse à l'investissement (170 170 000 FCFA), mais plus rentable que celle diesel (72 600 000 FCFA) sur la durée du projet. Ainsi, nous avons un LCOE de 62,6 FCFA/kWh pour la centrale hybride contre 258,1 FCFA/kWh pour la centrale électrique diesel. Le kilowattheure fixé à 350 FCFA donne un temps de retour sur investissement de 6,7 ans pour la centrale hybride contre 17 ans pour la centrale électrique diesel. Ainsi donc, nous avons opter pour la centrale hybride ayant 5 onduleurs hybrides triphasés multifonctions supportant un champ PV de 50 kWc avec un stockage de 5130 Ah pour des batteries OPZS de 2 V 1370 Ah et deux GE de 20 kVA.

.

.

Mots Clés :

- 1 – Centrale électrique diesel
- 2 – Centrale hybride solaire PV/Diesel
- 3 - Électricité
- 4 - Energie
- 5 – Réhabilitation-

ABSTRACT

Our work is a study that focuses on the rehabilitation of the diesel power plant in Douma. Douma is a village in the rural commune of Tangaye and located 25 km from the city of Ouahigouya Yatenga Province which is part of the northern region of Burkina Faso. In this study, we have compared two power plant technologies: the first is a diesel-electric power plant and the second is a hybrid solar power plant PV/Diesel with storage. From this technical and financial study, it has come out that hybrid power plant is more expensive to invest in (170 170 000 FCFA) but more profitable on the project duration than the diesel power plant (72 600 000 Fcfa). Thus, we have an LCOE 62,6 Fcfa/kWh for the hybrid plant against 258.1 Fcfa/kWh for the diesel-electric power plant over the duration of the project. The kilowatt hour fixed at 350 Fcfa gives a time of return on investment of 6.7 years for the hybrid power station against 17 years for the diesel power station. So, we have opted for the hybrid solar power plant having 5 multifunctional three-phase hybrid inverters supporting a PV field of 50 kWp with a storage of 5130 Ah for batteries OPZS of 2 V 1370 Ah and two GE of 20 kVA.

Key words:

- 1 - Diesel electric power plant**
- 2 –Electricity**
- 3 - Energy**
- 4 - Hybrid solar PV/Diesel with storage power plant**
- 5 – Rehabilitation**

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ABER	: Agence Burkinabè de l'Électrification Rurale
Ah	: Ampère-heure
CO ₂	: Dioxyde de Carbone
tCO ₂	: Tonne de dioxyde de carbone
COOPEL	: Coopérative d'électricité
DANIBA	: Coopération Danoise
EIES	: Étude d'Impact Environnemental et Social
FDE	: Fonds de Développement de l'Électrification
GE	: Groupe Électrogène
Hi	: Ensoleillement
kVA	: Kilovoltampère
kW	: Kilowatt
kWc	: Kilowatt-crête
kWh	: Kilowatt-heure
LCOE	: Coût moyen actualisé de l'énergie
PASEL	: Projet d'Appui au Secteur de l'Électricité
PNDES	: Programme National de Développement Économique et Social
PTF	: Partenaires Techniques et Financiers
PV	: Photovoltaïque
RSI (ROI)	: Retour Sur Investissement (Return Of Investment)
SONABEL	: Société Nationale Burkinabé d'Électricité
TDE	: Taxe de Développement de l'Électrification
TRSI	: Temps de Retour Sur Investissement
UE	: Union Européenne
Wc	: Watt crête

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	i
CITATION	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS	vi
TABLE DES MATIERES	1
LISTES DE TABLEAUX	3
LISTES DES FIGURES	4
I. INTRODUCTION	5
II. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	6
II.1. Objectifs du travail	6
II.2. Hypothèses de travail	6
III. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ÉTUDE	8
III.1. Présentation de la structure d'accueil	8
III.1.1. Présentation[7]	8
III.1.2. Missions	8
III.1.3. Modes de financement	8
III.1.4. Organigramme	9
III.2. Présentation de la zone d'étude	9
IV. PRÉSENTATION DU PROJET	11
V. MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION	13
VI. ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE	17
VI.1. Introduction	17
VI.2. Profil de charge	17
VI.3. Étude technique des solutions proposées	18
VI.3.1. Centrale électrique diesel	18
VI.3.2. Centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage	19
VI.4. Calcul des émissions de CO ₂	22

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

VI.5. Conclusion	22
VII. ÉTUDE DE FAISABILITÉ FINANCIÈRE – ÉTUDE DES COÛTS	23
VII.1. Introduction.....	23
VII.2. Étude financière des coûts.....	23
VII.2.1. Centrale électrique diesel	23
VII.2.2. Centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage	26
VII.3. Conclusion	30
VIII. ANALYSES TECHNIQUE ET FINANCIÈRE, ET CHOIX.....	31
VIII.1.1. Analyse technique	31
VIII.1.2. Analyse financière	33
VIII.1.3. Choix technique et économique.....	33
IX. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	35
IX.1. Sensibilité sur les batteries de stockage (centrale hybride)	35
IX.2. Sensibilité sur le prix du carburant	38
IX.3. Sensibilité sur le prix de vente du kWh	40
IX.4. Conclusion	41
X. GESTION DE LA CENTRALE.....	42
XI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	43
XII. BIBLIOGRAPHIE.....	44
XIII. ANNEXES.....	46

LISTES DE TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des éléments de production et de distribution	11
Tableau 2: Dimensionnement du GE.	18
Tableau 3 : Consommation de carburant en fonction du nombre d’heures de fonctionnement. ...	19
Tableau 4 : Consommations d’huile en fonction du nombre d’heures de fonctionnement.	19
Tableau 5 : Dimensionnement du PV et du stockage.....	20
Tableau 6 : Consommation de carburant en fonction du nombre d’heures de fonctionnement. ...	21
Tableau 7 : Consommations d’huile en fonction du nombre d’heures de fonctionnement.	21
Tableau 8 : Émissions de CO2 en fonction de la quantité de carburant consommé.....	22
Tableau 9 : Récapitulatif des coûts de la centrale électrique diesel.	24
Tableau 10 : Détail des différents coûts de la centrale diesel	25
Tableau 11 : Récapitulatif des coûts de la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage.....	26
Tableau 12 : Détail des coûts d’investissements de la centrale hybride	27
Tableau 13 : Détail des coûts d’opération de la centrale hybride	27
Tableau 14 : Détail des coûts de maintenance de la centrale hybride	28
Tableau 15 : Détail des coûts de remplacement de la centrale hybride	28
Tableau 16 : Détail des coûts résiduels de la centrale hybride	29
Tableau 17 : Récapitulatif des différentes valeurs de la sensibilité sur le stockage	35
Tableau 18 : Récapitulatif des coûts des deux centrales et leurs LCOE en fonction du prix du carburant.....	38
Tableau 19 : Valeurs du RSI et du TRSI en fonction du prix de vente du kWh	40

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de l'ABER 9

Figure 2 : Zone de la commune de Tangaye en vert[10] 10

Figure 3 : Photo des supports en bois de la localité de Douma. 12

Figure 4 : Diagramme du profil de charge de Douma 17

Figure 5 : Courbe de la consommation de carburant en fonction du taux de charge des GE. 23

Figure 6: Configuration architecturale « Multi-master » avec onduleurs[19]. 32

Figure 7 : Histogramme du coût du projet, du LCOE et de la quantité de CO2 produit en fonction du taux de stockage des batteries. 36

Figure 8 : Histogramme des coûts des deux centrales et leurs LCOE en fonction du prix du carburant. 39

Figure 9 : Diagramme de l'impact du prix de vente du kWh sur le RSI et le TRSI..... 41

I. INTRODUCTION

Depuis la première révolution industrielle du XVIII^e siècle en Angleterre et la deuxième révolution industrielles de 1880, l'énergie n'a de cesse été considérée comme moteur de développement et levier de croissance. Dès lors, le développement d'un pays ne saurait se faire sans un essor énergétique. La problématique du développement dans les pays en voie de développement est fortement corrélée à la question de l'accès à l'énergie en général et à l'électricité en particulier. Des études empiriques ont démontré l'existence de relations positives entre l'accès à l'électricité et le niveau de développement des pays. Le Burkina Faso est l'un des pays qui a le plus faible taux d'électrification au monde, alors que les enjeux de son développement sont énormes. En effet, au 31 décembre 2017, les taux d'électrification au niveau national, urbain et rural se situaient respectivement à 20,62%, 65,84% et 3,24% et le taux de couverture électrique national à 35,58% [1]. Pour améliorer l'accès à l'énergie et booster la croissance, des structures de mises en œuvre de la politique énergétique du pays ont été opérationnalisées. Il s'agit de la SONABEL, de l'ABER (ex-FDE) et de l'ANEREE. Au niveau rural, l'ABER reste l'acteur majeur de mise en œuvre de la politique d'accès à l'énergie au Burkina Faso. Dans sa stratégie, plusieurs projets d'électrification sont conçus et mis en œuvre suivant plusieurs technologies.

Dans le cadre des projets PASEL, l'électrification de vingt (20) localités du Burkina par la construction et la réhabilitation de 18 plates-formes multifonctionnelles hybrides (diesel/PV) avec micro réseaux électriques, de deux centrales hybrides (diesel/PV) avec stockage de type PSH-ERB 100% et l'hybridation de la centrale de Tinakoff [2] ont été lancées. Parmi les localités bénéficiaires, Douma de la commune de Tangaye province du Yatenga a été choisi. L'entreprise en charge de la localité est Afrik-Energie. Le système actuel est non fonctionnel dans la localité. D'où la vision de la réhabilitation en vue de sa mise en marche.

Dans cette optique, au sein de l'ABER ex-FDE organe assurant l'électrification rurale au Burkina Faso et chargée de l'étude et de l'élaboration de projets concernant l'électrification rurale, une étude sera menée sur le dimensionnement de la plate-forme multifonctionnelle hybride (diesel/PV) avec stockage et micro réseaux électriques de la localité de Douma, en vue de l'optimisation des projets de ladite structure. La rédaction de ce mémoire est structurée autour de sept principaux axes qui sont : la description de l'ABER/FDE et du présent projet, la méthodologie d'étude, l'étude technique, l'étude financière, l'analyse de sensibilité et la gestion de la centrale.

II. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

II.1. Objectifs du travail

L'objectif général du projet est de réhabiliter le système de production d'énergie de la localité de Douma par la mise en place d'une centrale hybride PV/diesel avec stockage pour subvenir aux besoins de la population actuelle.

Notre étude portera en particulier sur l'étude technique et économique de la réhabilitation et d'autres aspects regroupés en objectifs spécifiques tel que cité ci-dessous :

- Étude de la faisabilité technique des centrales électriques (comparaison entre une centrale diesel et une centrale hybride solaire PV/Diesel avec stockage)
- Étude de la faisabilité financière des deux centrales électriques
- Détermination du LCOE et du RSI
- L'analyse de sensibilité sur le taux de stockage et le prix du carburant
- Gestion de la centrale électrique.

II.2. Hypothèses de travail

- Détermination de la puissance optimale du champ PV et celle du GE à installer, et la capacité du stockage de cette plate-forme multifonctionnelle hybride (diesel/PV) avec stockage
- Les données d'ensoleillement sont données par le logiciel RETScreen 4 de la zone de Ouahigouya, car elle est la plus proche de notre zone d'étude Douma (voir Annexe 3).
- Le PV peut supporter 60% des charges journalières qui correspondent aux charges diurnes de 08h à 18h ;
- Les batteries peuvent supporter 40% des charges journalières qui correspondent aux charges nocturnes de 19h à 08h ;
- Les GE fonctionnent de 18h à 19h ;
- Le PV + les batteries ensemble supportent la totalité des charges journalières ;
- Par abonné dans les ménages, nous avons en moyenne 3 lampes de 11 W ;
- Dans la localité en moyenne 45% soit 50 abonnés ont 1 télévision de 90 W et 1 ventilateur de 75 W ;

- Dans la localité en moyenne 70% soit 75 abonnés ont 1 radio de 55 W ;
- Nous avons en moyenne 10 réfrigérateurs de 120 W parmi les abonnés pour le commerce ;
- Nous avons 1 moulin électrique de 3 kW dans la localité pour les activités de mouture des femmes ;
- Nous avons 1 atelier de soudure de 3 kW dans la localité
- Nous avons un système d'éclairage public composé de 22 lampes LED de 100 W ;
- Le nombre d'abonnés en moyenne est de 110 abonnés après la première année de fonctionnement[3].

Dans notre étude, nous avons dimensionné le groupe électrogène en tenant compte de plusieurs facteurs[4] importants à savoir :

- La pression barométrique : la puissance du moteur électrique varie avec l'altitude. En effet, lorsque celle-ci dépasse 150 mètres au-dessus du niveau de la mer, un GE perd environ 1% de sa puissance sur tous les 100 mètres ;
- La température ambiante : nécessite en principe une étude particulière. En effet, lorsque la température dépasse 30°C, un GE perd environ 2% de sa puissance par tranche de 5°C ;
- Le GE est dimensionné pour supporter la charge maximale c'est-à-dire 100% ;
- Le GE va fonctionner à 80% de sa charge pour une meilleure performance.

Remarque : Dans notre étude de la solution 1, les GE fonctionnent 24h/24h alors qu'au niveau de la solution 2, les GE ne fonctionnent que 2h par jour.

- Faire une évaluation financière de la remise en état de fonctionnement
 - Nous avons utilisé un taux d'intérêt de 4%[5] (voir Annexe 7 pour plus de détail).
 - Nous avons utilisé un taux d'inflation de 2%[6] (voir Annexe 8 pour plus de détail).

III. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ÉTUDE

III.1. Présentation de la structure d'accueil

III.1.1. Présentation[7]

L'ABER a été créée le 20 avril 2017. L'ABER est un établissement public de l'état à caractère administratif, doté de la personnalité juridique, de l'autonomie financière et de gestion et bénéficie de prérogatives de puissance publique. L'ABER est placée sous la tutelle technique du Ministre chargé de l'Énergie et de la tutelle financière du Ministre chargé des Finances.

L'ABER, plus connue sous son ancien nom FDE, est située à Ouagadougou dans le quartier de Ouaga 2000 entre l'ambassade du Sénégal et le palais des sports.

III.1.2. Missions

L'Agence a pour mission de :

- promouvoir une couverture équitable du territoire national en énergie électrique en développant l'électrification rurale à moindre coût ;
- contribuer à la mise en œuvre du plan national d'électrification ;
- faciliter l'accès des populations rurales à l'électricité ;
- assurer la maîtrise d'ouvrage déléguée dans le cadre de la réalisation des infrastructures ;
- assurer la supervision des activités d'électrification rurale et d'utilisation de l'énergie en milieu rural entreprises par les autres institutions actives dans ces domaines ;
- élaborer un rapport annuel à l'attention du ministre en charge de l'énergie sur les activités de l'électrification rurale[8].

III.1.3. Modes de financement

L'ABER a plusieurs sources de financement telles que :

- La subvention annuelle de l'État ;
- La Taxe de Développement de l'Électrification (TDE) : 2 FCFA / kWh facturé par la SONABEL ;
- Le financement des Partenaires Techniques et Financiers (PTF) : DANIDA ;
- La Banque Mondiale (BM) ;
- L'Union Européenne (UE)- FACILITE I ET II d'Abu Dhabi et la Banque Africaine de Développement (BAD) ;

- Recouvrement des prêts aux Coopératives d'Électricité (COOPEL), recettes diverses, Legs, Dons, etc.

III.1.4. Organigramme

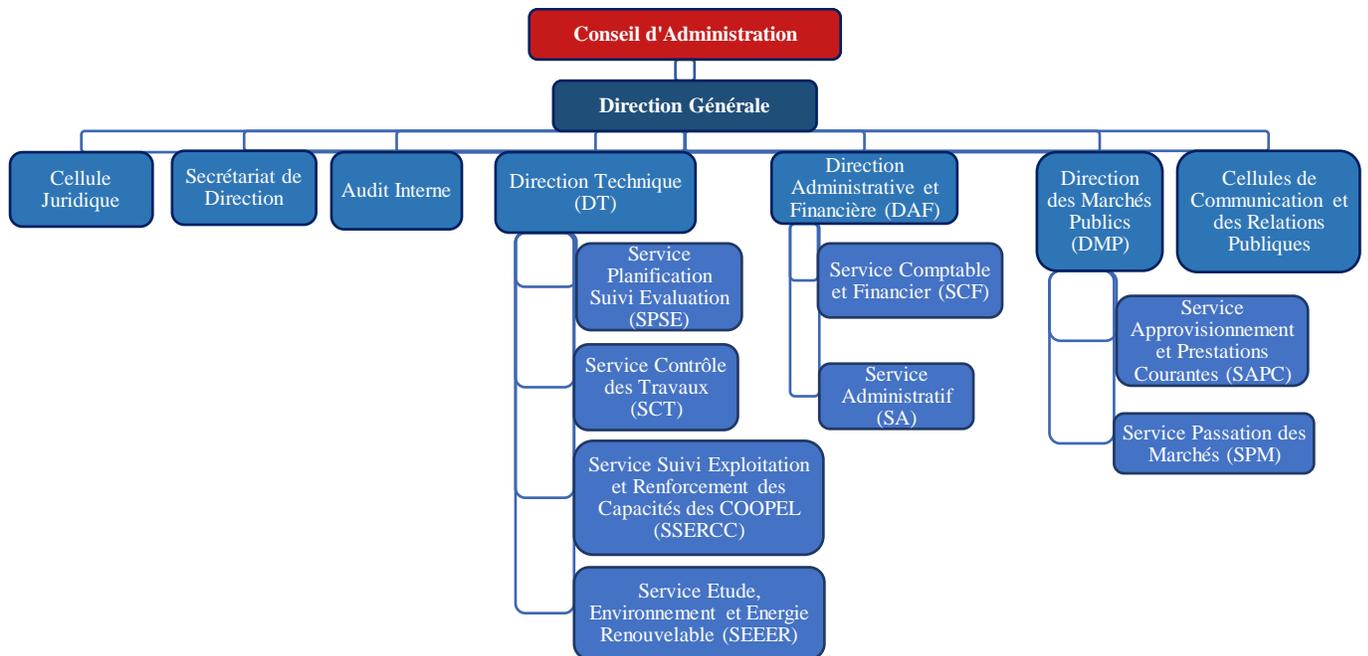


Figure 1: Organigramme de l'ABER

Le Service Etude, Environnement et Energies Renouvelables de la Direction technique est le service au sein duquel notre étude a été menée.

III.2. Présentation de la zone d'étude

Située à 25 km de Ouahigouya, dans la province du Yatenga, la commune rurale de Tangaye a une population estimée à 30.909 habitants composée de 35 villages. Son conseil municipal a été installé le 1^{er} juin 2006 et compte 70 conseillers dont 18 femmes. Cette commune a bénéficié du ministère de l'Énergie, des mines et carrières l'électrification de 6 villages dont Tangaye, Tougué-Mossi, Pèla, Touya, Douma et Goutoula[9].

En 2018, la centrale électrique diesel de Douma n'était pas en état de fonctionnement. Alors, la localité de Douma fait partie des projets actuels de réhabilitation du Ministère de l'Énergie en vue de sa remise en service.

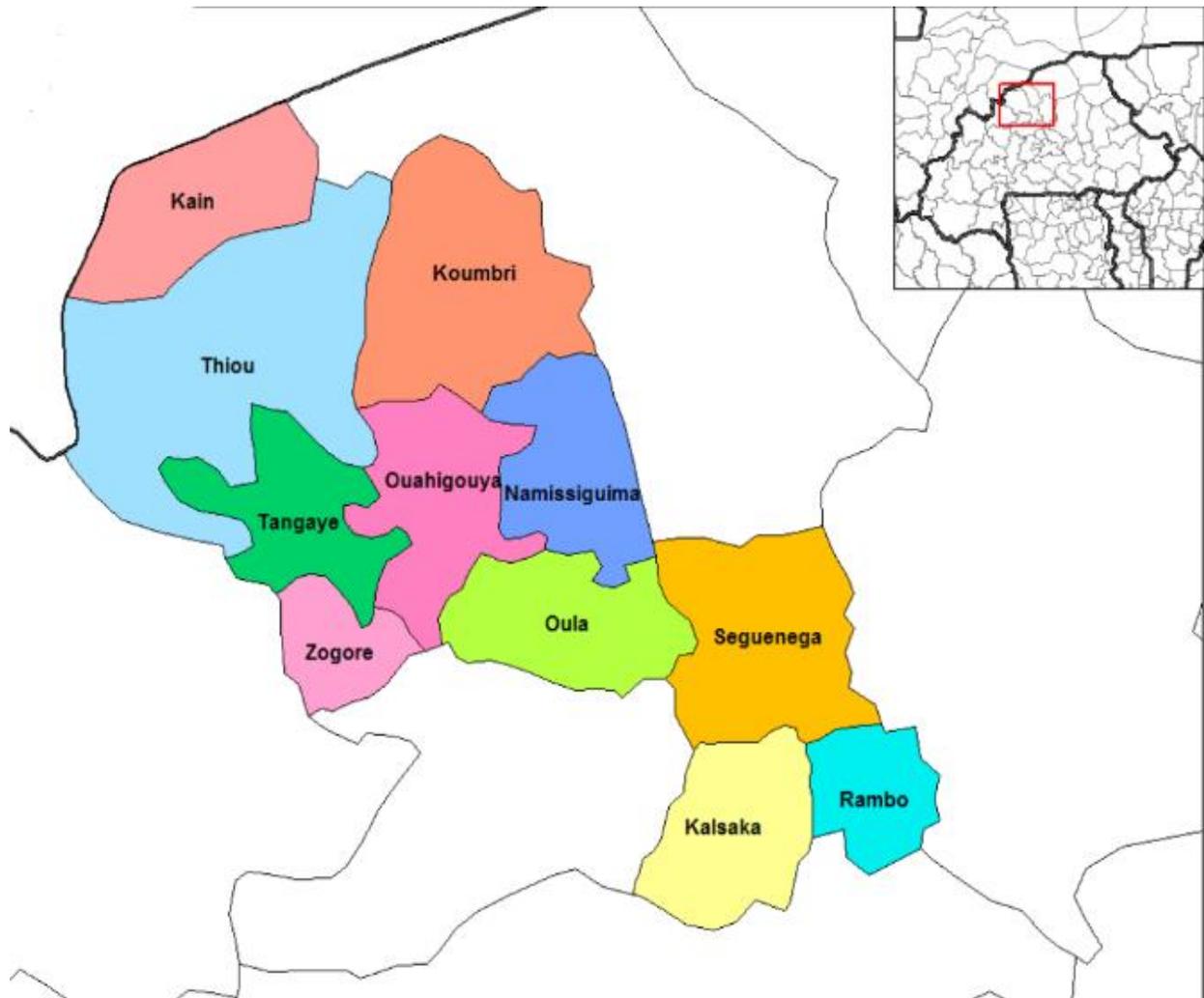


Figure 2 : Zone de la commune de Tangaye en vert[10]

La carte de la zone de Tangaye nous montre la situation géographique de la commune de Tangaye en vert dans la région du nord du Burkina Faso dans la province du Yatenga dont le chef-lieu est Ouahigouya.

IV. PRÉSENTATION DU PROJET

Le système de production et de distribution de l'énergie électrique de la localité de Douma est composé d'un seul GE et d'un mini-réseau BT. Cette centrale est à l'arrêt depuis près de cinq années suite à différents problèmes survenus au cours de son fonctionnement. La centrale fonctionnait 10 heures par jours. Dans notre étude, la population aura accès à l'énergie 24h/24h.

Il est impératif de remettre en marche cette centrale pour assurer un développement économique et social de la localité. Nul n'est sans savoir que sans énergie, il n'y a pas de développement.

Sur le site, nous avons constaté l'arrêt total de la centrale diesel. Aussi, les bâtiments et les poteaux sont presque en état de ruine. Il faut noter que les supports du mini-réseau de cette centrale diesel sont en bois Teck.

La localité de Douma qui a une population de 3859 habitants est un village qui a :

- Deux écoles ;
- Une mosquée ;
- Une église ;
- Un marché ;
- Un CSPS.

L'ensemble des éléments qui constituent le système de production et de distribution de la centrale électrique diesel est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Récapitulatif des éléments de production et de distribution

DOUMA	Réseau de distribution BTA				Production GE	
	Support	Câble	Portée	Abonné	GE	Puissance
	Nombre	Mètre	Mètre	Nombre	Nombre	kVA
	75	3 000	40	42	1	100

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Dans la localité de Douma les supports sont en bois comme l'indique l'image de la Figure 3.



Figure 3 : Photo des supports en bois de la localité de Douma.

Ces supports bois ne sont plus en état de faire un réseau de distribution, car ils sont attaqués par les termites. Pour un réseau plus sécurisé et plus durable, il est prévu dans le projet de remplacer tous les supports bois par des supports métalliques ou en béton.

V. MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

- ✓ Faire l'inventaire technique du système de production et de distribution

Au cours des visites sur le site et accompagnés par deux conseillers du village de Douma, nous avons procédé à un recensement du matériel existant de la centrale diesel ainsi que celui du mini-réseau de distribution.

- ✓ Identifier les causes de l'arrêt de fonctionnement de la centrale pour trouver des solutions techniques pour parer à ces causes

Nous nous sommes entretenus avec les dirigeants de la centrale ainsi que la population de Douma. Ainsi, nous avons pu déterminer quelques causes de l'arrêt de la centrale.

- ✓ Déterminer la puissance crête optimale à installer et la capacité de stockage de cette plate-forme multifonctionnelle hybride (diesel/PV) avec stockage

afin de dimensionner optimalement la plate-forme multifonctionnelle PV-diesel avec stockage, nous avons utilisé plusieurs documents [11],[12]. Nous avons d'abord déterminé le profil de charge de la consommation qui nous donne les besoins journaliers. Puis, nous avons déterminé la puissance crête à installer. Enfin, nous avons déterminé la capacité de stockage.

Les différentes formules utilisées sont les suivantes :

- La puissance rectifiée (P_r) en W = (Puissance des récepteurs CA ou CC) / ($\text{Ren}_{CC/CA}$ ou $\text{Ren}_{CC/CC}$). (1)
- *Besoin journalier* (B_j) = *Puissance rectifiée* * *temps de fonctionnement*. (2)
- *Puissance crête* (P_{cmini}) = $\frac{\text{Besoin journalier } (B_j)}{H_i \times R_{bat} \times R_{gen}}$. (3)

Avec :

P_{cmini} (Wc): puissance crête

H_i (kWh/m²/j) : rayonnement moyen journalier du mois sur le plan des panneaux solaires (plan incliné)

R_{gen} (%) : rendement du générateur PV

R_{bat} (%) : rendement des batteries d'accumulateurs

- $C_{batmini}(Ah) = \frac{B_j(Wh/j)}{V_{bat}(V) \times R_{bat} \times DM} \times J_{raut}. (4)$

DM (%): Décharge profonde

Vbat (%): tension des batteries d'accumulateurs

- ✓ Dimensionner le groupe électrogène

Le dimensionnement du GE dans le cadre de notre étude a été fait en respectant différentes conditions. Nous avons pris la puissance rectifiée au niveau du profil de charge tout en tenant compte des différents facteurs qui influencent la puissance du GE. Nous avons majoré la puissance du GE par les différentes pertes occasionnées par ces facteurs.

Les formules utilisées sont les suivantes :

- Pertes dû à l'altitude = ((Altitude du lieu en mètre - 150m) *1%) /100m. (5)
- Pertes dû à la température = ((Température du lieu en °C- 30°C) *2%) /5°C. (6)
- Puissance du GE = Puissance rectifiée finale / (le taux de charge nominale de fonctionnement du GE en % * (100% - somme des pertes en %)). (7)

- ✓ Faire une évaluation financière de la remise en état de fonctionnement

Pour faire l'évaluation financière du projet, nous avons mis à contribution plusieurs personnes ressources pour avoir les différents coûts engendrés par le projet telles que les ingénieurs du FDE/ABER, des commerçants, des techniciens en maintenance et exploitation de centrales solaires et de GE.

- ✓ Déterminer le LCOE

La formule de calcul du LCOE est la suivante

- $LCOE = \frac{LCC}{USf(i,a,d)W} \cdot (8)$

W : Production annuelle d'électricité (kWh/an)

LCC : le coût total du cycle de vie du générateur

- $W = S * r * H * Cp. (9)$

W : Énergie (kWh/an)

S : surface

r : rendement

H : ensoleillement (kWh/m²/an)

Cp: Coefficient de performance

- $LCC = C_I + USf(i, a, d)[C_M + C_O] + USf(i, a', d)C_R - \left(\frac{1+i}{1+a}\right)^d S. (10)$

C_I = coût d'investissement

C_M = coût de maintenance

C_O = coût d'opération

C_R = coût de remplacement

S = coût résiduel

Remarque : Tous ces coûts sont exprimés en devise (FCFA)/an

USf = Série uniforme des facteurs d'actualisation

i = taux d'intérêt (%/an). Elle est obtenue en faisant la moyenne entre le taux le plus élevé 4,5% et le taux le plus bas 3,5% de 2017 et 2018.

a = taux d'inflation (%/an). Elle est obtenue en faisant la moyenne des taux d'intérêt des douze mois de 2018.

a' = taux d'inflation ajusté (%/an) pour les coûts périodiques tels que les coûts de remplacement

d = durée du projet (année)

- $USf(i, a, d) = \left(\frac{1+i}{1+a}\right) \left[\left(\frac{1+i}{1+a}\right)^d - 1 \right] / \left(\frac{1+i}{1+a} - 1\right). (11)$

$$a' = \frac{(1+a)^{d_j}}{(1+i)^{d_j-1}}. (12)$$

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

dj : durée de vie du composant j (en années)

- ✓ Déterminer le RSI
- $RSI = (\text{gain} - \text{investissement}) / \text{investissement}$ (12)
- Le temps de retour sur investissement : Coût total du projet sur 20ans/ gain d'un an. (13)
- ✓ Faire une analyse de sensibilité du taux stockage et du prix du carburant

Nous avons fait varier les taux de stockage et le prix du carburant afin de voir la manière dont se comportent les différents éléments du projet.

VI. ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE

VI.1. Introduction

Plusieurs technologies permettent d'électrifier une localité. Mais notre étude technique portera sur deux systèmes différents afin de choisir le meilleur système. Les deux systèmes proposés sont la centrale électrique diesel et la centrale hybride[13] solaire PV/Diesel avec batteries de stockage.

VI.2. Profil de charge

Après une enquête, nous avons établi le profil de charge (voir Annexe 1 et Annexe 2) qui se présente comme suit dans la Figure 4 :

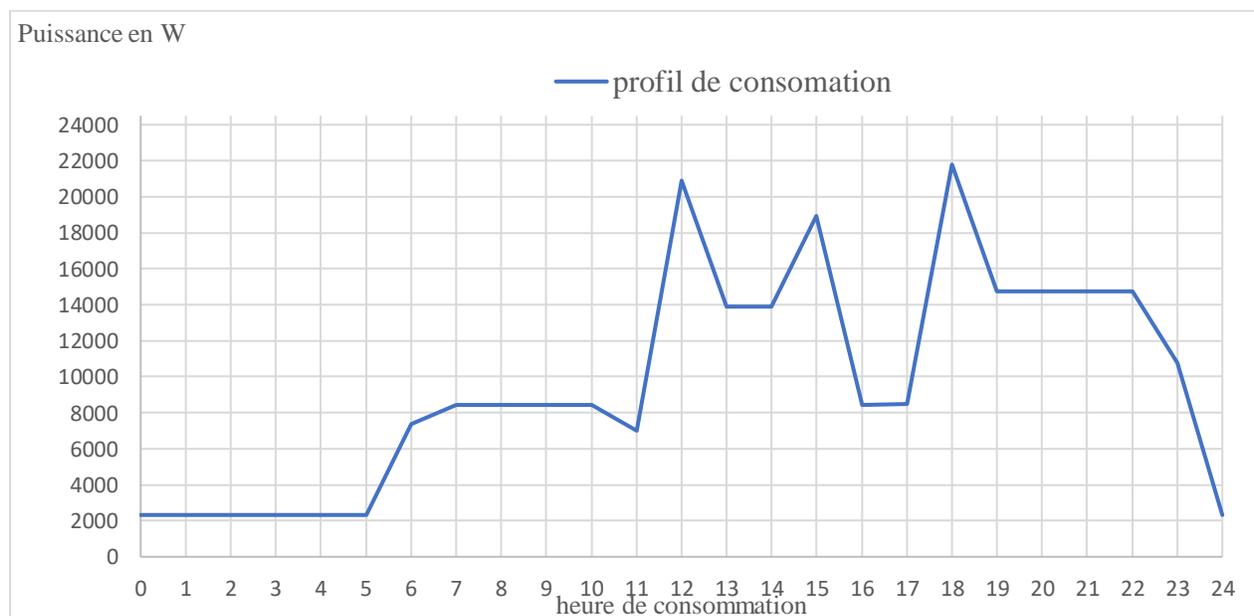


Figure 4 : Diagramme du profil de charge de Douma

Le diagramme du profil de charge montre comment varie la consommation de l'énergie durant toute une journée. C'est grâce à ce profil que notre étude a été menée.

Les plus faibles consommations se situent entre 23h et 06h du matin. Elle représente la charge de l'éclairage public qui est de 2323 W par heure. Puis, les charges commencent à monter à partir de 06h du matin jusqu'à 7363 W par heure avec l'atelier de mouture et détenteurs de réfrigérateurs. Enfin, les autres charges vont suivre jusqu'à atteindre un premier pic à 12h de 20895 W par heure, puis un second pic, mais moins important à 15h et le plus haut pic est repéré autour de 18h avec presque la plupart des charges en marche. Les détails sont en Annexe 1 et Annexe 2.

VI.3. Étude technique des solutions proposées

VI.3.1. Centrale électrique diesel

La technologie des groupes électrogènes est très bien maîtrisée de nos jours. Dans notre étude, les GE fonctionnent 24h/24h. Alors, nous allons dimensionner nos GE selon le profil de charge de la figure 2.

VI.3.1.1. Calcul et détermination des paramètres techniques

Après les différents calculs, nous avons obtenu les résultats consignés dans le Tableau 2 :

Tableau 2: Dimensionnement du GE.

Pertes Totales	%	5,8
Puissance active	kW	27,2
Puissance apparente	kVA	34
Puissance du GE corrigée	kVA	36,1

Les pertes totales sont les pertes liées aux facteurs température et altitude du lieu. Le GE va perdre 5,8% de sa puissance du fait de ces facteurs.

La puissance active est due au fonctionnement du GE à 80% de sa puissance pour assurer un meilleur fonctionnement et un amortissement plus lent.

La puissance apparente est la puissance GE affectée du facteur de puissance 0,8.

La puissance du GE corrigée est la puissance minimale que doit avoir le GE en tenant compte des pertes.

Nous choisissons deux GE de 20 kVA pour notre installation.

Le Tableau 3 et le Tableau 4 nous donnent les différentes quantités de carburant et d'huile consommées durant le fonctionnement de la centrale.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 3 : Consommation de carburant en fonction du nombre d'heures de fonctionnement.

Équipement	Nombre d'heures de fonctionnement			Quantité de carburant consommée en litre		
	h/j	h/an	h/20 ans	l/j	l/an	l/20ans
GE (maitre)	24	8 760	175 200	70,6	25 776	515 526
GE (esclave)	3	1 095	21 900	8,16	2 978	59 568
Total	27	9 855	197 100	78,78	28 755	575 094

Nous constatons que la consommation de carburant par jour est d'environ 79 litres ce qui est assez important. Ce rythme de la consommation va donner environ 575 094 litres sur les 20 années de la durée du projet.

Tableau 4 : Consommations d'huile en fonction du nombre d'heures de fonctionnement.

Équipement	Nombre d'heures de fonctionnement			Quantité d'huile du moteur en litre		
	h/j	h/an	h/20 ans	l/j	l/an	l/20ans
GE (maitre)	24	8 760	175 200	1,4	518,6	10 371,8
GE (esclave)	3	1 095	21 900	0,2	64,8	1 296,4
Total	27	9 855	197 100	1,6	583,4	11 668,3

Pour les consommations d'huile du moteur, nous avons environ 585 litres en une année d'utilisation.

Les deux GE de 20 kVA chacun nous donnent une puissance totale à installer de 40 kVA. Cette valeur est due à l'influence de la température, de l'altitude et du régime de fonctionnement.

VI.3.2. Centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage

VI.3.2.1. Introduction

Le solaire PV est une technologie en énergie renouvelable et ne produisant pas de gaz à effet de serre. Ainsi, notre projet participera au développement durable du pays en l'utilisant.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Dans notre étude, le PV pourra supporter 60% des charges et les batteries 40% des charges. En somme, le PV et le stockage supportent 100% des charges.

Les GE pourront supporter la charge maximale en cas d'inconvénient et ne fonctionneront que 2 h/j.

VI.3.2.2. Calcul et détermination des paramètres techniques

Notre étude de cette solution technique nous donne les résultats suivants dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Dimensionnement du PV et du stockage.

Champ PV			Onduleur		Stockage pour 1 jour		
Panneau (250 W)	Puissance du champ	Énergie produite par le PV	Stellarwatt hybride triphasé 10 kW	Puissance	Batterie 2 V (9 OPZS Solar power 1370)	Capacité de stockage	Énergie stockée pour utilisation
Nombre	kWc	kWh/an	Nombre	kW	Nombre	Ah	kWh
200	50	73 910	5	50	120	5 130	98

Notre centrale hybride a une puissance crête de 50 kWc avec 200 panneaux solaires de 250 kWc[14]. Cette puissance est supportée par 5 onduleurs hybrides triphasés de 10 kW[15]. Le stockage est composé de 120 batteries de 2 V[16] ayant une capacité de 1026 Ah en 10 heures. Ainsi, la capacité de stockage totale est de 5 130 Ah pour une énergie utilisable de 98 kWh. Les détails sont en Annexe 6.

Les GE de secours ont les mêmes caractéristiques que ceux dimensionnés au Tableau 2. Alors, nous aurons deux GE de 20 kVA.

La consommation de carburant et la quantité d'huile de moteur utilisée sont inscrites dans le Tableau 6 et dans le Tableau 7.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 6 : Consommation de carburant en fonction du nombre d'heures de fonctionnement.

Équipement	Nombre d'heures de fonctionnement			Quantité de carburant consommée		
	h/j	h/an	h/20 ans	l/j	l/an	l/20ans
GE (maitre)	1	365	7 300	4	1 460	29 200
GE (esclave)	1	365	7 300	4	1 460	29 200
Total	2	730	14 600	8	2 920	58 400

Nous constatons que la consommation de carburant par jour est d'environ 8 litres ce qui est assez faible en termes de quantité journalière consommée. Ce rythme de la consommation va donner environ 58 400 litres sur les 20 années de la durée du projet.

Tableau 7 : Consommations d'huile en fonction du nombre d'heures de fonctionnement.

Équipement	Quantité d'huile					
	Nombre d'heures de fonctionnement			Huile de moteur		
	h/j	h/an	h/20 ans	l/j	l/an	l/20ans
GE (maitre)	1	365	7 300	0,1	22	432
GE (esclave)	1	365	7 300	0,1	22	432
Total	2	730	14 600	0,1	43	864

Pour les consommations d'huile du moteur, nous avons 43 litres en une année d'utilisation.

La centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage a une puissance de 50 kWc, un stockage de 5 130 Ah et deux GE de 20 kVA.

VI.4. Calcul des émissions de CO2

L'émission de dioxyde de carbone par la combustion du diesel donne un ration de 2640g CO₂/litre[17]. C'est un facteur important à prise de décision et à l'orientation technique d'un projet. Le Tableau 8 résume les émissions de CO2 sur les périodes de fonctionnement.

Tableau 8 : Émissions de CO2 en fonction de la quantité de carburant consommé

Type de système	Carburant			CO2 émit		
	l/j	l/an	l/20ans	kg/j	kg/an	kg/20ans
Centrale électrique diesel	79	28 755	575 094	208	75 912	1 518 248
Centrale hybride solaire PV/Diesel avec stockage	8	2 920	58 400	21	7 709	154 176

La centrale électrique diesel a une production de 75,9 tCO₂/an ce qui est très élevé par rapport au 7,7 tCO₂/an produite par la centrale hybride solaire PV/Diesel avec stockage. Pour avoir plus de détail, se référer à l'Annexe 11.

VI.5. Conclusion

Le choix technique est d'installer une centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage. Cette centrale sera composée d'un champ solaire PV de 50 kWc, d'un stockage de 5 130 Ah et de deux GE de 20 kVA. La centrale produira environ 154,176 tCO₂ sur de la durée du projet.

VII. ÉTUDE DE FAISABILITÉ FINANCIÈRE – ÉTUDE DES COÛTS

VII.1. Introduction

Une étude technique est toujours suivie d'une étude financière. Ainsi, dans notre étude financière des coûts, nous allons nous focaliser sur le prix des différents composants de nos différents systèmes pour évaluer les coûts de chaque système dans un premier temps. Puis, nous allons évaluer la rentabilité de notre projet.

VII.2. Étude financière des coûts

VII.2.1. Centrale électrique diesel

Cette étude portera sur le prix des GE et le coût de la consommation de carburant durant la durée du projet d'une manière générale.

VII.2.1.1. Calcul des coûts

Les GE de 20 kVA sont dimensionnés pour fonctionner à plusieurs niveaux de sa charge. Ils ont des consommations en carburant variable[18] selon la charge illustrée sur la Figure 5.

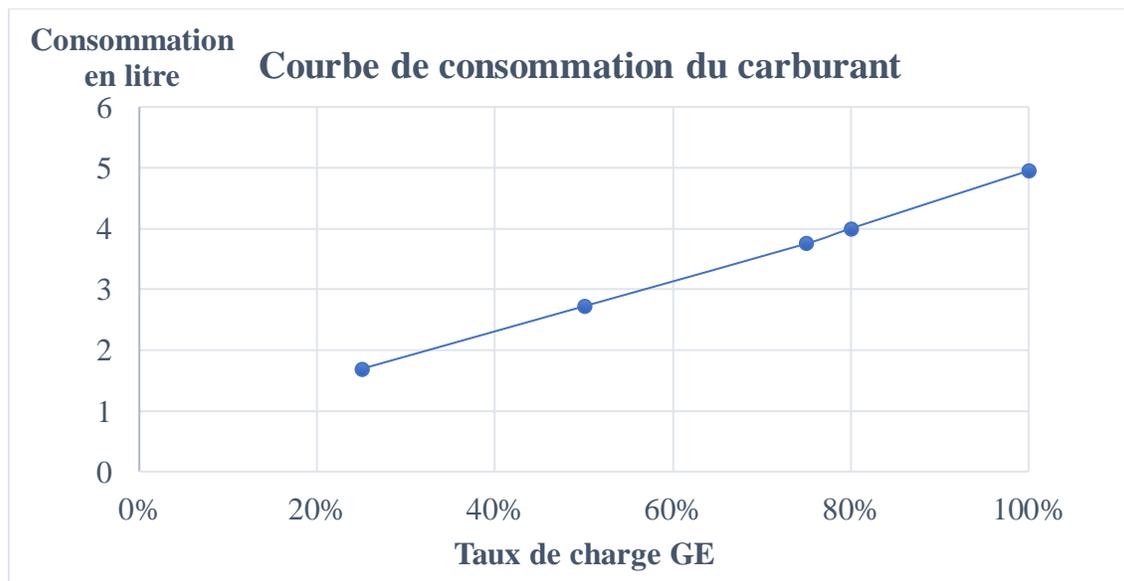


Figure 5 : Courbe de la consommation de carburant en fonction du taux de charge des GE.

La quantité de carburant consommée augmente avec le taux de charge lors du fonctionnement des GE. Ainsi, nous avons des consommations de 1,69 litre ; 2,72 litres ; 3,75 litres ; 4 litres et 4,95 litres respectivement à des taux de charges de 25% ; 50% ; 75% ; 80% et 100%. Le Tableau 9 nous donne un résumé estimatif des coûts liés au projet de la centrale électrique diesel.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 9 : Récapitulatif des coûts de la centrale électrique diesel.

Période	Coût d'investissement en FCFA	Coût d'opération en FCFA	Coût de maintenance en FCFA	Coût de remplacement en FCFA	Coût résiduel en FCFA	Total en FCFA
Mois	-	1 678 244	155 134	-	-	-
Année 1	72 600 000	20 138 934	1 861 610	-	-	-
Total 20 ans en FCFA	72 600 000	402 778 674	37 232 190	91 300 000	17 274 286	603 910 864

Les coûts d'opération s'élevant à 402 778 674 FCFA constituent environ 67% du coût total du projet qui est de 603 910 864 FCFA. Ensuite, le coût d'investissement fait 72 600 000 FCFA soit environ 12% du total du projet. Ce coût d'investissement comprend les coûts d'acquisition de GE et du synchroniseur ainsi que les coûts de la construction d'un forage et des bâtiments. Puis, les coûts de maintenance et de remplacement font environ 21% du projet. Enfin, le coût résiduel fait 17 274 286 FCFA. Les détails sont dans le Tableau 10 ci-dessous.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 10 : Détail des différents coûts de la centrale diesel

Types de coût	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)	Total (FCFA)
Coût investissement	GE	Nombre	2	8 200 000	16 400 000	72 600 000
	Synchroniseur	Nombre	1	24 600 000	24 600 000	
	Local	Nombre	3	5 000 000	15 000 000	
	Forage+ réservoir	Nombre	1	10 000 000	10 000 000	
	Main-d'œuvre	Ensemble	1	6 600 000	6 600 000	
Coût opération	Carburant en l	Litre	575 094	571	328 378 674	402 778 674
	Transport carburant	Semaine	1 040	30 000	31 200 000	
	Technicien 2	Mois	480	70 000	33 600 000	
	Gardien	Mois	240	40 000	9 600 000	
Coût maintenance	Huile	Litre	11 668	1 375	16 043 940	37 232 190
	Filtre à air	Nombre	99	15 000	1 478 250	
	Filtre à carburant	Nombre	493	40 000	19 710 000	
Coût remplacement	GE	Nombre	11	8 200 000	90 200 000	91 300 000
	Batterie	Nombre	11	100 000	1 100 000	
	Main-d'œuvre	Ensemble	1	9 130 000	9 130 000	
S= Coût résiduel	GE	Nombre	1	6 560 000	6 560 000	17 274 286
	Local	Nombre	3	3 571 429	10 714 286	
Total sur 20ans sans coût résiduel		Ensemble	-		603 910 864	

VII.2.1.2. Détermination des paramètres financiers

- LCOE

Dans notre étude, nous avons calculé le LCOE et trouvé une valeur de 258,1 FCFA pour notre centrale électrique diesel.

NB : La vraie valeur de l'énergie est définie par les fluctuations quotidiennes de l'offre et de la demande et ne peut être contenue dans le LCOE.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

- RSI

Nous avons considéré 350 FCFA comme le coût du kWh et une prime fixe de 1500 FCFA. Ainsi, nous avons obtenu un RSI de 7,31% pour un temps de retour sur investissement d'environ 18,6 ans. Mais le RSI est de 17,38% pour un temps de retour sur investissement d'environ 17 ans lorsque nous tenons compte de la part (60%) de l'investissement qui est non remboursable et du coût résiduel du projet.

VII.2.2. Centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage

Cette étude portera sur les prix des modules solaires, des batteries et les différents coûts engendrés sur la durée du projet.

VII.2.2.1. Calcul des coûts

Une estimation des coûts engendrés par le projet est résumée dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : Récapitulatif des coûts de la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage.

Période	Coût d'investissement en FCFA	Coût d'opération en FCFA	Coût de maintenance en FCFA	Coût de remplacement en FCFA	Coût résiduel en FCFA	Total
Mois	-	343 943	59 508	-	-	403 452
Année 1	170 170 000	4 127 320	714 100	-	-	175 011 420
Total 20 ans	170 170 000	82 546 400	14 282 000	114 000 000	61 865 905	380 998 400

Le coût total du projet sur les 20 années sans tenir compte du coût résiduel est de 380 998 400 FCFA avec un coût d'investissement de 170 170 000 FCFA soit environ 44,7% du total. Les coûts d'opération et de remplacement font environ 51,6% du total contre 3,7% pour la maintenance. À la fin du projet, nous avons un coût résiduel de 61 865 905 FCFA. Les détails de ces coûts sont indiqués dans les tableaux ci-dessous.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 12 : Détail des coûts d'investissements de la centrale hybride

Coûts d'investissement				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en FCFA	Prix total en FCFA
PV	Nombre	200	125 000	25 000 000
Câbles + structures	Ensemble	1	-	2 500 000
Batterie stockage	Nombre	120	375 000	45 000 000
GE	Nombre	2	8 200 000	16 400 000
Synchroniseur	Nombre	1	24 600 000	24 600 000
Onduleur	Nombre	5	3 000 000	15 000 000
Local	Nombre	4	4 000 000	16 000 000
Forage+ réservoir	Ensemble	1	10 000 000	10 000 000
Batterie pour GE	Nombre	2	100 000	200 000
Main-d'œuvre	Ensemble	1	15 470 000	15 470 000
Total	FCFA			170 170 000

Tableau 13 : Détail des coûts d'opération de la centrale hybride

Coûts d'opération				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en FCFA	Prix total en FCFA
Technico-commercial	Nombre	2	70 000	140 000
Gardien	Nombre	1	35 000	35 000
Carburant	Nombre	243	571	138 943
Autres	Nombre	1	30 000	30 000
Total/mois	FCFA			343 943
Total/an	FCFA	12	343 943	4 127 320
Total/20 ans	FCFA	20	4 127 320	82 546 400

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 14 : Détail des coûts de maintenance de la centrale hybride

Coûts de maintenance				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en FCFA	Prix total en FCFA
GE				
Huile consommée	Nombre	2	5 088	10 175
Filtre à huile	Nombre	2	5 000	10 000
Filtre à air	Nombre	2	500	1 000
Filtre à carburant	Nombre	2	6 667	13 333
Courant	Mois	1	5 000	5 000
Autres	FCFA	1	20 000	20 000
Total/mois	FCFA	-	-	59 508
Total/an	FCFA	12	59 508	714 100
Total/20 ans	FCFA	20	714 100	14 282 000

Tableau 15 : Détail des coûts de remplacement de la centrale hybride

Coûts de remplacement						
Désignation	Unité	Durée de vie en année	Nombre de remplacement	Quantité	Prix unitaire en FCFA	Prix total en FCFA
Batterie stockage	Nombre	8	2	120	375 000	90 000 000
Onduleur	Nombre	10	1	5	3 000 000	15 000 000
Main-d'œuvre	Ensemble	-	-	1	-	9 000 000
Total/20 ans	FCFA			-		114 000 000

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Tableau 16 : Détail des coûts résiduels de la centrale hybride

Coûts résiduels				
Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en FCFA	Prix total en FCFA
GE	Nombre	2	218 667	437 333
PV	Nombre	200	25 000	5 000 000
Batt.	Nombre	240	187 500	45 000 000
Local	Nombre	4	2 857 143	11 428 571
Total / 20 ans	FCFA			61 865 905

VII.2.2.2. Détermination des paramètres financiers

- LCOE

Dans notre étude, nous avons calculé le LCOE et trouvé une valeur de 62,6 FCFA/kWh pour notre centrale hybride solaire PV/Diesel.

NB : La vraie valeur de l'énergie est définie par les fluctuations quotidiennes de l'offre et de la demande et ne peut être contenue dans le LCOE.

- RSI

Nous avons considéré le coût du kWh à 350 FCFA avec une prime fixe de 1500 FCFA. Ainsi, nous avons obtenu un RSI de 70,09% pour un temps de retour sur investissement d'environ 11,8 ans de fonctionnement. Mais en tenant compte de la part subventionnée non remboursable de l'investissement (60%) et du coût résiduel du projet, nous avons un RSI de 113,13% pour un temps de retour sur investissement de 6,7 années.

VII.3. Conclusion

Le projet de la centrale électrique diesel est estimé à 72 600 000 FCFA en investissement. Les coûts engrangés sur la durée du projet sont estimés à 603 910 864 FCFA. En effet, le coût d'opération de la centrale englobe la majeure partie des coûts du projet soit environ 67% du coût total du projet sur les 20 années de fonctionnement. Cela nous a conduits à un LCOE de 258,1 FCFA/kWh avec un temps de retour sur investissement de 17 ans et un RSI de 17,38%.

Le projet de la centrale solaire hybride est estimé à 170 170 000 FCFA en investissement. Les coûts engrangés sur la durée du projet sur 20 ans sont estimés à 380 998 400 FCFA. En effet, l'investissement de la centrale engendre à lui seul environ 44,7% du coût total du projet sur les 20 années de fonctionnement. Cela nous a conduit à un LCOE de 62,6 FCFA/kWh, un RSI de 113,13% et un temps de retour sur investissement de 6,7 années.

Alors, nous aurons comme choix financier la centrale solaire hybride PV/Diesel avec stockage.

VIII. ANALYSES TECHNIQUE ET FINANCIÈRE, ET CHOIX

VIII.1.1. Analyse technique

Nous avons une puissance de 36,1 kVA qui nous a conduits au choix de deux GE de 20 kVA ayant une puissance cumulée de 40 kVA pour notre localité. En effet, pour des raisons opérationnelles et en tenant compte de la consommation durant le fonctionnement, nous avons opter pour le choix de deux GE de 20 kVA[18] à la place d'un seul GE de 40 kVA afin d'optimiser le fonctionnement et assurer une bonne maintenance du système.

Remarque : les GE de 20 kVA fonctionneront en alternance l'un en maitre et l'autre en esclave. Les petits GE ne sont pas munis de synchroniseur, alors nous allons acquérir un synchroniseur afin d'assurer leur synchroniseur.

La quantité de carburant consommé qui est de 575,094 m³ sur les 20 années de fonctionnement est relativement élevée au niveau de la centrale électrique diesel. Cela est problématique parce que le pétrole est en voie de raréfaction. Une des contraintes avec cette technologie est qu'elle est productrice de gaz à effet de serre en grande quantité. En effet, cette quantité de carburant consommé pendant le fonctionnement va produire 1518,248 tCO₂. Or le CO₂ est un gaz à effet de serre, ce qui va contribuer au réchauffement climatique. Donc cette solution technique n'est pas totalement satisfaisante.

La centrale hybride solaire PV/Diesel avec batterie de stockage a une puissance de 50 kWc. Cette faible puissance à installer est due au fait que nous avons choisi de dimensionner le champ PV avec 60% des besoins de la localité. Ensuite, les batteries de stockage ont une capacité de 5 130 Ah qui correspond à 246.24 kWh. Mais l'énergie utilisable est 98 kWh. Cela est dû au fait que le taux de décharge profonde est de 50% et que la batterie a un rendement de 80%. Nous avons choisi ce taux de décharge pour des raisons d'amortissement de la batterie. En effet, 50% de décharge profonde nous donne 3000 cycles[16] de charge-décharge des batteries qui est d'environ 8 ans si on a une charge-décharge par jour. Alors que si nous déchargeons les batteries à plus de 50% le nombre de cycles des batteries va diminuer. Or la durée de vie des batteries est fonction du nombre de cycles. Par exemple à 80% de décharge profonde nous avons 1500 cycles qui font environ 4 ans. Certes, le nombre de batteries va baisser, mais la fréquence de remplacement va augmenter.

Dans l'étude, un GE de 40 kVA ne sera pas avantageux lorsqu'il s'agit des faibles charges. Selon notre profil de charge, la consommation moyenne est d'environ 10 kWh. Ainsi, nous avons opté pour deux GE de 20 kVA à la place d'un seul GE de 40 kVA. En plus, nous avons choisi deux

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

heures de fonctionnement par jour pour notre système en cas de non-enseillement. En effet, dans un premier cas, il peut arriver que le GE ne fonctionne pas durant des jours. Dans le deuxième cas, il arrivera des moments où la période de non-enseillement dépasse deux heures par jours alors, les heures prévues les jours de non-fonctionnement du GE vont compenser ces heures en plus.

Notre système solaire PV/Diesel avec batterie de stockage aura une configuration architecturale « Multi-master » avec onduleurs[19] qui est illustrée dans la Figure 6. Cette configuration permet de coupler plusieurs onduleurs à des générateurs Diesel. Ainsi, l'augmentation du champ photovoltaïque est aisée, car elle ne nécessite pas un arrêt total du système. Dans les deux architectures, un système de contrôle central peut être installé afin d'optimiser l'opération des générateurs diesel (niveau de puissance, synchronisation, démarrage, arrêt)[19].

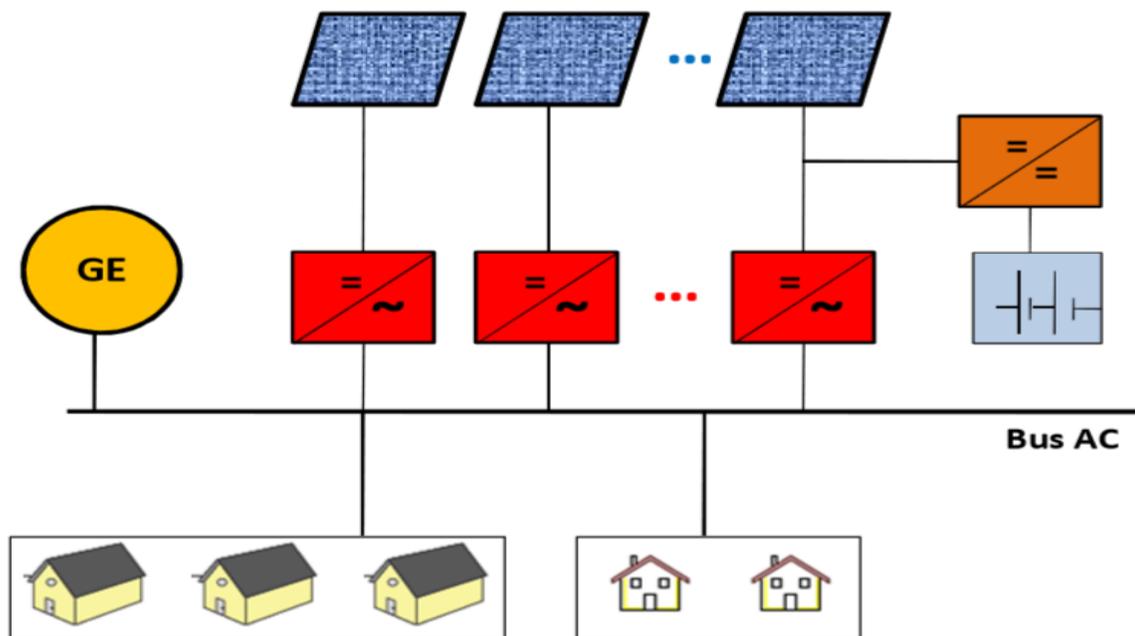


Figure 6: Configuration architecturale « Multi-master » avec onduleurs[19].

La production de CO₂ dans ce système est de 154,176 tCO₂ sur les 20 ans. Cette valeur est très faible comparé à celle de la centrale électrique diesel.

VIII..1.2. Analyse financière

Nous constatons que le coût d'investissement de la centrale électrique diesel qui est de 72 600 000 FCFA face à 170 170 000 FCFA pour la centrale hybride est deux fois plus coûteux à l'investissement que l'hybride. Certes, le montant total du projet de la centrale électrique diesel est de 603 910 864 FCFA alors que celui de la centrale hybride solaire PV/diesel avec batteries de stockage est 380 998 400 FCFA. En effet, la centrale électrique est environ deux fois plus coûteuse que celle hybride avec un coût d'opération qui fait 67% du montant total du projet soit 402 778 674 FCFA contre 23% soit 82 546 400 FCFA pour l'hybride. Cela est la principale raison du coût élevé du projet.

La centrale hybride a un LCOE de 62,6 FCFA/kWh contre 258,1 FCFA/kWh pour celle diesel. Le LCOE de la centrale diesel est 4 fois supérieur au LCOE de la centrale hybride.

Le RSI dans les deux cas est inférieur à la durée du projet. La centrale hybride a un RSI de 113,13% ce qui la rend très rentable contre 17,38% pour la centrale diesel. La centrale hybride a un temps de retour sur investissement de 6,7 ans contre 16,8 ans pour celle diesel. Le RSI et le temps de retour sur investissement ont été calculés avec un coût du kWh de 350 FCFA. Mais, ce coût pourrait revenir cher pour la population rurale dans le cas de la centrale diesel. Mais pour la centrale hybride, ce coût peut être revu à la baisse jusqu'à 200 FCFA afin que la population rurale puisse aisément avoir accès à l'énergie.

La centrale solaire hybride PV/Diesel avec batteries de stockage est notre choix de projet du point de vue financier, car elle est largement moins coûteuse avec un bon LCOE et RSI que la centrale diesel.

VIII..1.3. Choix technique et économique

Les deux systèmes sont tous les deux techniquement bons et applicables dans notre localité. Le choix technique simple sera celui de la centrale électrique diesel, car elle aura une maintenance centralisée c'est-à-dire que les interventions de maintenance se feront directement sur les GE. Alors que dans le cas de la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage, nous avons la partie PV, ensuite la partie stockage et enfin les GE.

Du point de vue environnemental le choix se portera sur la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage, car elle donne de l'énergie propre dans la partie PV et elle ne produit pas de gaz à effet de serre sauf dans la partie GE qui en produira moins comparé à la centrale électrique diesel.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Dans le cadre du développement durable et du PNDES le Burkina Faso est enclin aux énergies renouvelables dans sa vision à long terme. D'où le choix de la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage.

Le choix financier est de mettre en place une centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage. En effet, cette centrale est deux fois moins coûteuse avec un coût de 380 998 400 FCFA sur la durée du projet que celle électricité diesel qui génère un coût de 603 910 864FCFA.

Le choix technique et financier est d'opter pour l'installation d'une centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage. Cette centrale sera composée d'un champ solaire PV de 50 kWc, d'un stockage de 5 130 Ah et de deux GE de 20 kVA. Elle coutera en tout 380 998 400 FCFA et ne produira qu'environ 154,176 tCO₂ durant les 20 années de la durée du projet. Ce choix montre que la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockages donne la meilleure offre technique à un coût financier réduit et beaucoup moins d'émission de CO₂ donc de gaz à effet de serre. Elle aura un temps de retour sur investissement de 6,7 ans avec un RSI de 113,13%.

IX. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

IX.1. Sensibilité sur les batteries de stockage (centrale hybride)

Le stockage est un problème majeur dans le domaine de l'énergie vu qu'il engendre un coût assez important dans la réalisation d'un projet. C'est pourquoi nous avons trouvé bon de faire une analyse de sensibilité sur le stockage pour voir comment elle peut influencer le projet. Dans notre étude, la partie du solaire PV initialement dimensionnée ne change pas. Seules la part du GE et celle du stockage changent. Nous avons les mêmes caractéristiques qu'avec un stockage de 40% sauf que le type de batterie et la capacité de stockage vont changer ainsi que le coût du stockage. Le Tableau 17 ci-dessous nous donne un résumé de la sensibilité sur le taux de stockage.

Tableau 17 : Récapitulatif des différentes valeurs de la sensibilité sur le stockage

Taux de stockage	LCOE (FCFA/kWh)	Coût projet (FCFA)	CO2 produit (tCO2)
40%	62,6	380 998 400	154,2
30%	97,0	387 972 825	385,4
20%	120,4	406 861 380	539,6
10%	143,5	417 571 684	693,8

Pour rendre plus appréciable cette sensibilité, nous avons illustré les résultats du tableau 11 à travers l'histogramme ci-dessous.

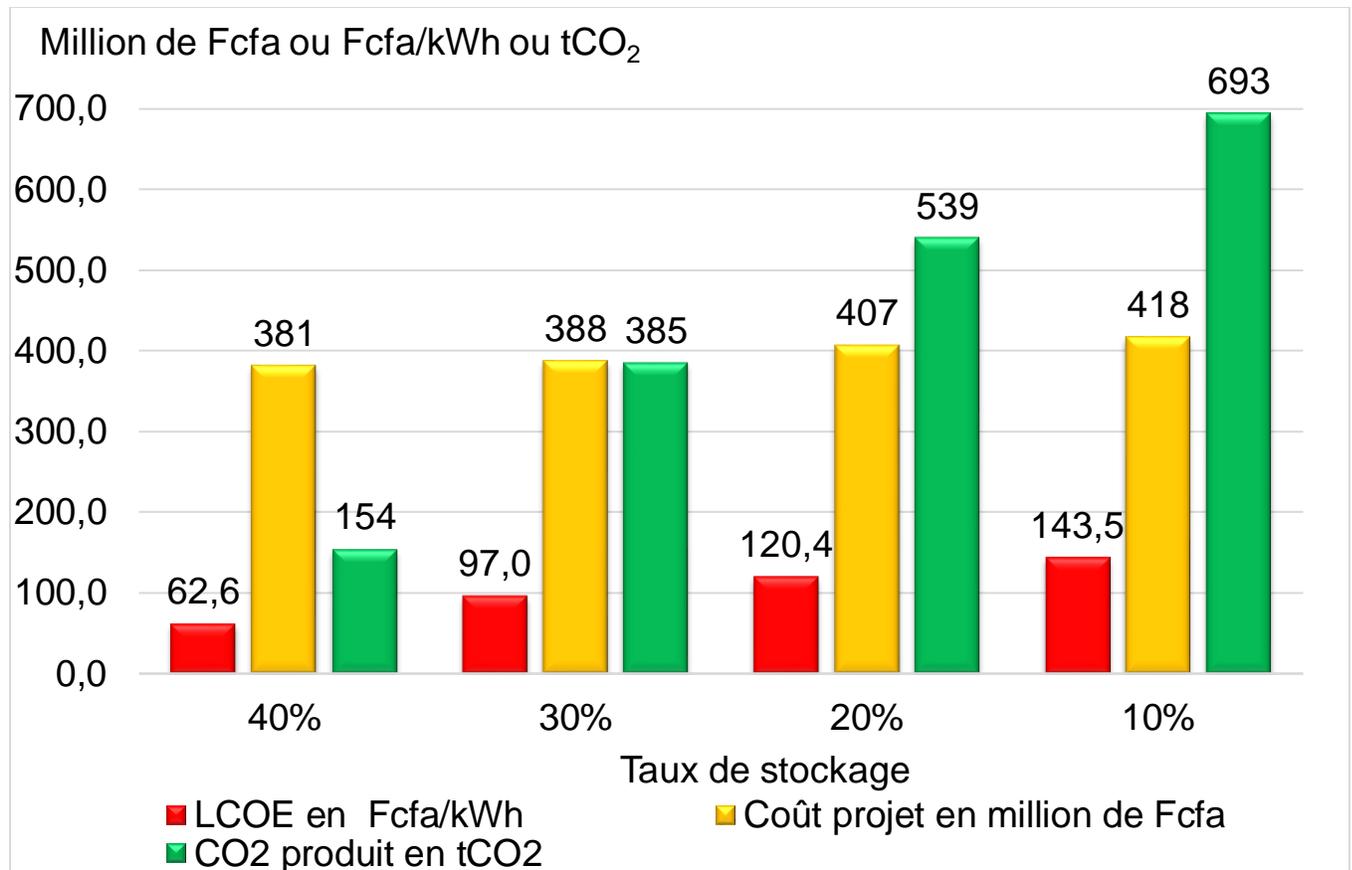


Figure 7 : Histogramme du coût du projet, du LCOE et de la quantité de CO₂ produit en fonction du taux de stockage des batteries.

Le stockage à 30% signifie que le stockage seul est en mesure de prendre en charge 30% des charges nocturne de la localité de Douma durant un jour de fonctionnement et les GE supporteront en plus 10% des charges nocturnes. Donc nous aurons un stockage de 4005 Ah en tout avec des batteries 2V- 7 OPzs Solar power 1070. En plus, le nombre d'heures de fonctionnement du GE va passer de 2h à 5h. Cela conduira à une augmentation de la consommation en carburant ainsi que tout ce qui est lié au facteur nombre d'heure de fonctionnement. Ainsi, la quantité de carburant va passer de 58 400 litres à 146 000 litres sur la durée du projet et celle du CO₂ va passer de 154,2 tCO₂/20ans à 385,4 tCO₂/20ans. Les 30% comme stockage vont engendrer au total un coût de 387 972 825 FCFA sur la durée du projet. Aussi, le LCOE sera de 97 FCFA/kWh.

Le stockage à 20% signifie que le stockage seul est en mesure de prendre en charge 20% des charges nocturnes de la localité de Douma durant un jour de fonctionnement et les GE vont assurer en plus 20% des charges nocturnes. Ainsi, nous aurons un stockage de 2730 Ah en tout avec des

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

batteries 2V- 7 OPzs Solar power 730. En plus, le nombre d'heures de fonctionnement du GE va passer de 2h à 7h. Cela conduira à une augmentation de la consommation en carburant qui sera de 204400 litres sur la durée du projet et la quantité de CO2 produite donnera 539,6 tCO2/20ans. Les 20% comme stockage vont engendrer au total un coût de 406 861 380 FCFA sur la durée du projet. Aussi, le LCOE sera de 120,4 FCFA/kWh.

Le stockage à 10% signifie que le stockage seul est en mesure de prendre en charge 30% des charges nocturnes de la localité de Douma durant un jour de fonctionnement et 30% des charges nocturnes seront assurées en plus par les GE. Alors, nous aurons un stockage de 1330 Ah en tout avec des batteries 2V- 7 OPzs Solar power 350. En plus, le nombre d'heures de fonctionnement du GE va passer de 2h à 9h. Cela conduira à une augmentation de la consommation en carburant qui sera de 262800 litres sur la durée du projet et la quantité de CO2 produite donnera 693,8 tCO2/20ans. Les 10% comme stockage vont engendrer au total un coût de 417 571 684 FCFA sur la durée du projet. Aussi, le LCOE sera de 143,5 FCFA/kWh.

Dans notre étude de la sensibilité sur les différents taux de stockage, nous constatons d'abord que le coût du projet sur la durée du projet ne fait que croître lorsque nous réduisons le taux de stockage. Ce qui nous amène à dire que le stockage ne doit pas être trop bas, car cela influence négativement le coût du projet. En effet, lorsque le taux de stockage baisse le coût du stockage va décroître tout en entraînant l'augmentation de la consommation en carburant, car les charges restantes seront supportées par le GE. Or le coût du carburant est un facteur qui augmente le coût du projet. C'est ce qui explique en partie l'augmentation du coût du projet lorsque le taux de stockage baisse.

Ensuite, nous notons que le nombre d'heures de fonctionnement du GE va augmenter avec la baisse du taux de stockage. Cela engendre une production supplémentaire de gaz à effet de serre à travers la consommation de carburant supplémentaire.

Enfin, nous avons le LCOE qui croît avec la baisse du taux de stockage, car les coûts des différentes parties du projet ont augmenté.

IX..2. Sensibilité sur le prix du carburant

Le coût du carburant est un facteur important dans une centrale où il y'a au moins un GE. Au regard de cette importance, cette partie de la sensibilité est axée sur le prix du carburant pour voir les comportements des principaux éléments. Le Tableau 18 ci-dessous résume la sensibilité sur le prix du carburant.

Tableau 18 : Récapitulatif des coûts des deux centrales et leurs LCOE en fonction du prix du carburant

Prix du carburant en Fcfa	Centrale diesel		Centrale hybride	
	Coût projet en million de Fcfa	LCOE en Fcfa/kWh	Coût projet en million de Fcfa	LCOE en Fcfa/kWh
450	534,3	218,1	373,9	58,5
500	563,1	234,6	376,9	60,2
571	603,9	258,1	381,0	62,6
600	620,6	267,7	382,7	63,5
625	635,0	276,0	384,2	64,4
650	649,3	284,3	385,6	65,2

Pour bien appréhender les résultats du tableau ci-dessus, nous avons illustré les résultats avec la Figure 8 ci-dessous.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

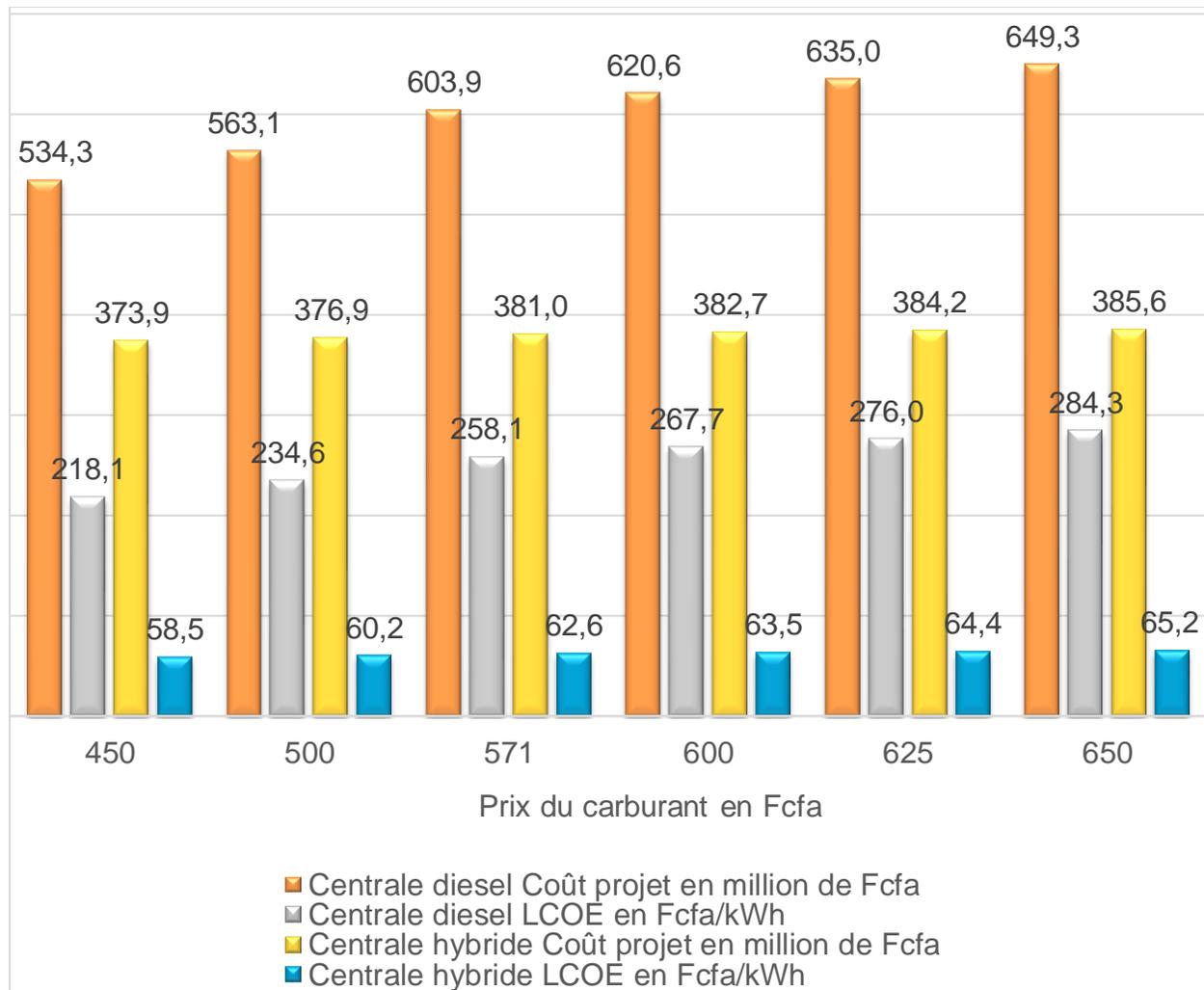


Figure 8 : Histogramme des coûts des deux centrales et leurs LCOE en fonction du prix du carburant.

Nous constatons qu'en faisant varier le prix du carburant de 50 FCFA, le coût de la centrale hybride varie de 3 000 000 FCFA pendant que le coût de la centrale diesel varie de 30 000 000 FCFA. Aussi, le LCOE de la centrale hybride varie très légèrement par rapport au LCOE de la centrale diesel.

IX.3. Sensibilité sur le prix de vente du kWh

Le prix de vente du kWh est un facteur important dans le fonctionnement de la centrale. En effet, si le prix de vente du kWh est très élevé, les consommateurs ruraux risquent de ne pouvoir pas payer les factures ou de même pas s'abonner. C'est dans cette optique que nous avons jugé bon de faire une analyse de sensibilité sur le prix de vente du kWh et nos résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19 : Valeurs du RSI et du TRSI en fonction du prix de vente du kWh

Prix du kWh en Fcfa	Centrale hybride		Centrale diesel	
	TRSI (an)	RSI (%)	TRSI (an)	RSI (%)
125	17	10	-	-
150	15	22	-	-
175	13	33	-	-
200	11	45	-	-
225	10	56	-	-
250	9	68	-	-
275	8	79	-	-
300	8	90	19	3
325	7	102	18	10
350	7	113	17	17
375	6	125	16	25
400	6	136	15	32

Le tableau 19 nous montre les variations du retour sur investissement et le temps de retour sur investissement des deux centrales en fonction du prix de vente du kWh. Pour mieux appréhender ces variations, nous avons fait un diagramme qui est facilement interprétable par rapport au tableau 19.

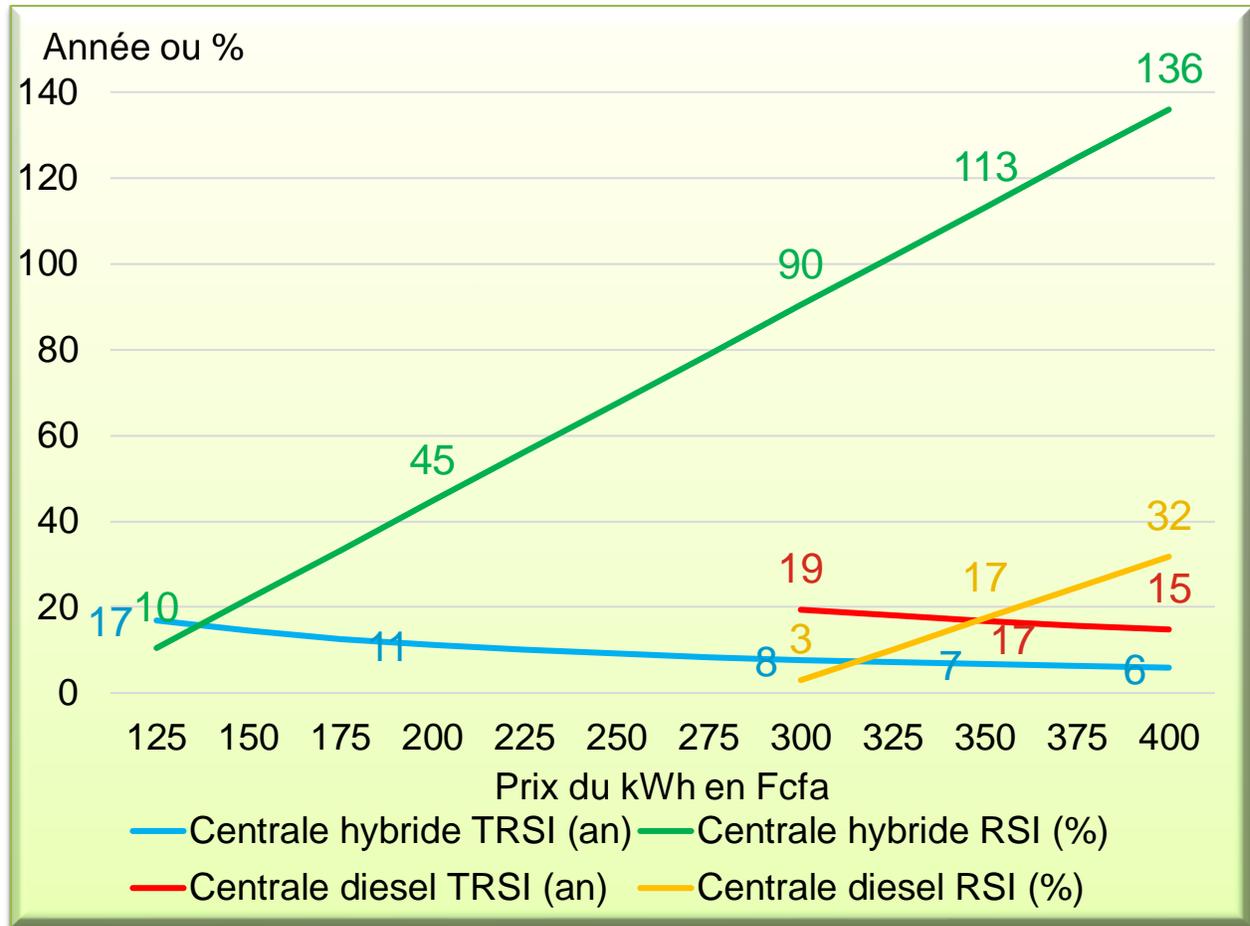


Figure 9 : Diagramme de l'impact du prix de vente du kWh sur le RSI et le TRSI

Nous constatons que la centrale hybride est rentable à partir de 125 FCFA avec un RSI de 10% et un TRSI de 17 ans. Par contre, il faut un prix de vente du kWh de 350 FCFA pour que la centrale diesel commence à être vraiment rentable avec un RSI de 17% et un TRSI de 17 ans. Le même prix de vente du kWh donne pour la centrale hybride un RSI de 113% avec un TRSI de 7 ans

IX.4. Conclusion

La sensibilité sur le taux de stockage nous montre que le stockage ne doit pas être trop petit pour que le projet soit économiquement bon. Aussi, la sensibilité sur le prix du carburant montre que le prix du carburant rend le projet de la centrale électrique diesel très coûteux par rapport au projet de celle qui est hybride. La sensibilité sur le prix de vente du kWh montre que la centrale hybride est plus viable que la celle diesel avec un prix de vente du kWh faible.

X. GESTION DE LA CENTRALE

Afin de faciliter et d'appuyer le processus d'électrification rurale décentralisée au Burkina Faso, la coopération danoise[20], DANIDA, a déjà depuis quelques années fournie un appui à la mise en œuvre d'une série d'activités d'accompagnement au volet électrification rurale de la politique burkinabè, entre autres des études et des assistances techniques.

Pour faciliter l'électrification de centres ruraux, les expériences ont montré qu'il est normalement pertinent de mettre en place un groupe de travail dès le démarrage de l'étude. Ce groupe de travail doit comprendre des personnes ressources de la communauté. Le groupe de travail servira de lien avec les consultants responsables de l'étude. Le groupe de travail aura également un rôle important à jouer dans le processus de création de la COOPEL, et il serait judicieux d'inclure les personnes ressources dans la liste des candidats pour le bureau de la COOPEL.

Selon l'article 8 de la loi n°14-99 du 15 avril 1999 : « Est coopérative toute association autonome de personnes qui se sont volontairement réunies sur leur propre initiative en vue de satisfaire leurs besoins et aspirations économiques, sociales et culturelles communs au moyen d'une entreprise économique, dirigée démocratiquement, en fournissant une quote-part équitable du capital social nécessaire et en acceptant une juste participation aux risques et aux fruits de cette entreprise, au fonctionnement de laquelle les adhérents participent activement et dont ils sont les seuls propriétaires et les principaux usagers ».

Les principes d'action coopérative sont :

- L'adhésion volontaire et ouverte à tous ;
- Le fonctionnement démocratique et participatif ;
- La Participation économique des membres ;
- L'autonomie et l'indépendance ;
- L'Engagement envers la communauté.

La COOPEL mise en place se chargera de la gestion de notre centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage.

XI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Notre étude nous a menés au choix de la centrale hybride solaire PV/Diesel avec batteries de stockage pour notre localité de Douma du point de vue technique, économique et environnemental. Cette centrale est composée de 5 onduleurs hybrides supportant 200 panneaux solaires avec une production annuelle de 73 910 kWh et un stockage de 5 130 Ah en C₁₀ avec des batteries de 2V-9 OPzS solar.power 1370. Le coût d'investissement est de 170 170 000 FCFA avec un coût total généré de 380 998 400 FCFA sur la durée du projet. Le LCOE de la centrale hybride est de 62,6 FCFA. Aussi, elle génère des gaz à effet de serre de 154,176 tCO₂/20ans du fait du fonctionnement du GE. Avec un RSI de 113,13% et un temps de retour sur investissement de 6,7 ans, le projet serait le bienvenu.

Quelques recommandations pourraient amener à la vulgarisation de l'énergie dans notre pays. Il faudrait que :

- Les projets d'électrification ruraux doivent avoir plus de subventions de l'État pendant le fonctionnement afin de permettre à beaucoup d'investisseurs de s'intéresser à ce domaine pour les localités ayant très peu d'abonnés pour faciliter l'accès à l'énergie à tous.
- L'état doit laisser le libre arbitre aux investisseurs privés de fixer le prix du kWh afin que leurs projets soient rentables et moins coûteux pour la population à cause de la concurrence, mais avec certaines limites.
- Les projets de centrale électrique diesel doivent être revus à la baisse au profit des projets de centrales hybrides ou solaires pour permettre un développement durable et la protection de l'environnement.
- La commune de Tangaye est à 25 km de la ville de Ouahigouya, nous pourrions envisager un raccordement au réseau national pour cette localité de Douma et les localités environnantes.

XII. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- [1] Ministère de l'Énergie, « Rapport d'activité », Ministère de l'Énergie, 2018.
- [2] Fonds de Développement de l'Électrification, « DAO PLATEFORMES MULTIFONCT_PASEL_24avril2017 ». .
- [3] Fonds de Développement de l'Électrification, « Rapport d'activité », 2018.
- [4] « Dimensionnement petit groupe électrogène ». .
- [7] FDE, « Présentation Fonds de Développement de l'Électrification (FDE) », Février-2018.
- [8] L'ASSEMBLE NATIONALE, *LOI N°014-2017/AN - PORTANT RÉGLEMENTATION GÉNÉRALE DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE*. p. 10.
- [11] Dr Ahmed BAGRE, « CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AVEC BATTERIE ». .
- [12] Dr Y. Moussa SORO, « CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PV AVEC STOCKAGE ». .
- [13] F. Omar, « Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Énergies Renouvelables ». 2014.
- [14] SOLARWORLD, « AXUN_FICHE_TECHNIQUE_SUNMODULE_PLUS_POLY_250-260_fr ». .
- [15] STELLARWATT, « Onduleur Hybride triphasé 10 kW ». 12-oct-2018.
- [16] HOPPECKE, « OPzS_solar_power_fr_27.02 ». .
- [18] GENELEC, « gryw-2D-t5-s-fr ». .
- [19] Y. N. Daniel, « EXPÉRIMENTATION ET OPTIMISATION D'UN PROTOTYPE DE CENTRALE HYBRIDE SOLAIRE PV/DIESEL SANS BATTERIES DE STOCKAGE : VALIDATION DU CONCEPT « FLEXY ENERGY » », 2iE et PERPIGNAN, 2012.
- [20] DANIBA, « Module COPEL ». .

Sites internet

- [5] TRADINGECONOMICS.COM CENTRAL BANK OF WEST AFRICAN STATES (BCEAO), « Burkina- Faso - Taux d'intérêt », 12-déc-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.tradingeconomics.com/burkina-faso/interest-rate>.

- [6] TRADINGECONOMICS.COM INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DE LA DÉMOGRAPHIE, BURKINA FASO, « Burkina- Faso - Taux d'inflation », 12-déc-2018. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.tradingeconomics.com/burkina-faso/inflation-cpi>.
- [9] S. Adama, « Commune de Tangaye », 09-déc-2018. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.allafrica.com/stories/200709140157.html>.
- [10] « Tangaye (département) », 12-déc-2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Tangaye_\(département\)](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Tangaye_(département)).
- [17] ecoscore, « Comment calculer les émissions de CO2 en fonction de la quantité de carburant consommé ? », 01-sept-2019. [En ligne]. Disponible sur: [ecoscore.be/fr/info/ecoscore/co2](https://www.ecoscore.be/fr/info/ecoscore/co2).

XIII. ANNEXES.

Annexe 1: Estimation des besoins journaliers	47
Annexe 2: Consommation d'énergie sur 24 h.....	48
Annexe 3 : Données d'ensoleillement de la localité de Ouahigouya utilisées pour Douma	49
Annexe 4 : Caractéristique du module PV	50
Annexe 5 : Caractéristiques des batteries de stockage HOPPECKE.	51
Annexe 6 : Dimensionnement PV	52
Annexe 7 : Tableau des taux d'intérêt du Burkina Faso en 2018.	55
Annexe 8 : Histogramme des taux d'inflation de janvier à octobre 2018.....	56
Annexe 9 : Tableau de maintenance des GE.....	57
Annexe 10 : Capture d'un GE et l'estimation de sa durée de vie du GE	58
Annexe 11 : Comment calculer les émissions de CO2 en fonction de la quantité de carburant consommé ?.....	59

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 1: Estimation des besoins journaliers

Équipement	Nbre	Tension	Puissance	Coef.	Rendement	Puissance rectifiée 1	Ku	Ks1	Nombre d'abonnés	Ks2	Puissance rectifiée 2	Coef. Sécurité	Puissance rectifiée 3
		V	W			W					W		W
Ampoule économique	3	220	11	1	1	12	1	0,75	110	0,8	798,6	1,2	958
Radio	1	220	55	1	1	55	1	1,0	75		4 840,0		5 808
Ventilateur	1	220	75	1	1,00	75	1	1,0	50		6 600,0		7 920
TV	1	220	90	1	0,85	106	1	1,0	50		9 317,6		11 181
Somme 1	6		231			248					21 556		25 867
Frigo	1	220	120	1	0,8	150	1	1,0	10		1 200,0		1 440
Atelier mouture	1	380	3 000	1	0,8	3 750	1	1,0	1		3 000,0		3 600
Ampoule économique	2	220	11	1	1,0	12	1	0,75	3		21,8		26
Atelier soudure	1	380	3 000	1	0,9	3 529	1	1,0	1		2 823,5		3 388
Lampe LED-EP	22	220	100	1	1,00	110	1	1,0	1		88,0		106
Somme 2	27		6 231			7 442				7 045	8 454		
Totaux			6462			7689,49				28601,556	34321,87		

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 2: Consommation d'énergie sur 24 h.

Equipement	Energie consommée par heure en Wh																								total	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		24
Ampoule écono	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2875	2875	2875	2875	2875	2875	0	17250
Radio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4356	4356	4356	4356	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17424
Ventilateur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3960	3960	3960	3960	0	0	3960	3960	3960	3960	3960	0	0	35640
TV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5591	5591	5591	5591	0	0	5591	5591	5591	5591	5591	5591	0	55906
Somme 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13907	13907	13907	13907	0	0	12426	12426	12426	12426	12426	8466	0	126220
Frigo	0	0	0	0	0	0	1440	1440	1440	1440	1440	0	0	0	0	1440	1440	1440	0	0	0	0	0	0	0	11520
atelier mouture	0	0	0	0	0	0	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	0	0	3600	3600	3600	3600	0	0	0	0	0	0	39600
Ampoule écono	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	52	0	0	0	0	0	0	105
Atelier soudure	0	0	0	0	0	0	3388	3388	3388	3388	3388	3388	3388	0	0	0	3388	3388	3388	0	0	0	0	0	0	30494
Lampe LED-EP	2323	2323	2323	2323	2323	2323	2323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2323	2323	2323	2323	2323	2323	2323	30202
Somme 2	2323	2323	2323	2323	2323	2323	7363	8428	8428	8428	8428	6988	6988	0	0	5040	8428	8481	9364	2323	2323	2323	2323	2323	2323	111920
Totaux	2323	2323	2323	2323	2323	2323	7363	8428	8428	8428	8428	6988	20895	13907	13907	18947	8428	8481	21789	14749	14749	14749	14749	10789	2323	238139,9

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 3 : Données d'ensoleillement de la localité de Ouahigouya utilisées pour Douma

Mois	Rayonnement quotidien horizontal kWh/m ² /j	Rayonnement solaire quotidien - incliné kWh/m ² /j
Janvier	5,2	5,9
Février	6,0	6,6
Mars	6,5	6,7
Avril	6,6	6,4
Mai	6,6	6,2
Juin	6,3	5,8
Juillet	6,0	5,6
Août	5,6	5,4
Septembre	5,8	5,8
Octobre	5,8	6,2
Novembre	5,4	6,0
Décembre	5,0	5,7
Annuel	5,9	6,0

Source : Logiciel RETScreen 4 – Ouahigouya

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 4 : Caractéristique du module PV

Caractéristique du module PV choisi		
Sunmodule SW 250 poly.		
Tension nominale (Vn)	V	24
Puissance crête (Pc)	Wc	250
Courant de court-circuit (Isc)	A	8,81
Tension en circuit ouvert (Voc)	V	37,6
Courant à puiss. max. (Ipm)	A	8,27
Tension à puissance max. (Vpm)	V	30,5
Rendement	%	14,91%
Longueur	m	1,675
Largeur	m	1,001
Épaisseur	m	0,033
Poids	kg	18
Surface	m ²	1,676675

Source : www.solarworld.com/AXUN_FICHE_TECHNIQUE_SUNMODULE_PLUS_POLY_250-260_fr

Annexe 5 : Caractéristiques des batteries de stockage HOPPECKE.

Caractéristiques de la batterie		
9 OPzS Solar power 1370		
Profondeur décharge	DM	50%
Capacité batterie (C ₁₀)	Ah	1026
Tension	V	2
Nombre de cycles	Nbr.C	3 000

Source : Voir fiche technique[16].

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 6 : Dimensionnement PV

a. Choix onduleur

Étape	Choix des onduleurs hybrides		
Vérification pour DOUMA	Onduleur hybride triphasé 10kW		
	Calcul		Spécification
Tension nominale	1504	40*37,6	720V - 900V
	752,0	1504/2	
	752,0	20*37,6	Voc=37,6
Plage de la tension MPPT	20,0	40,0	400V -800V
	20 ≤ 30,5 ≤ 40		Vmp=30,5
Courant entrée onduleur	12,9	2 branches 2*Isc=17,6 < 18,6	2*18,6A
Ratio de puissance	37,4	10000/(2*20*250)=1	0,9 - 1,1
Rendement %	91,0		
Technologie			
<p>Conclusion : L'onduleur hybride triphasé 10kW de STELLARWATT remplit toutes les conditions d'utilisation et a un bon rendement. Il convient bien pour le projet.</p>			

b. Configuration retenue onduleur-module

Configuration retenue	
Nombre de strings/onduleur :	2
Nombre de modules de 250 Wc par strings :	20
Nombre d'onduleurs hybrides STELLARWATT:	5

c. Paramètre de stockage

Jraut	j	1
Vbat	V	2
Rbat	%	80
DM	%	50
Cbatmin	Ah	992,2
Cminbat	Ah	1026
Nbats		24
Nbatp	Nombre	1
Nbat	Nombre	24
Cbat	Ah	1 026

d. Configuration retenue stockage

Configuration retenue		
Nombre de batteries en série/onduleur :	Nombre	24
Nombre de batteries par parallèle/onduleur :	Nombre	1
Nombre de batteries totales :	Nombre	120
Capacité de stockage d'une batterie à C_{10} :	Ah	1026

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

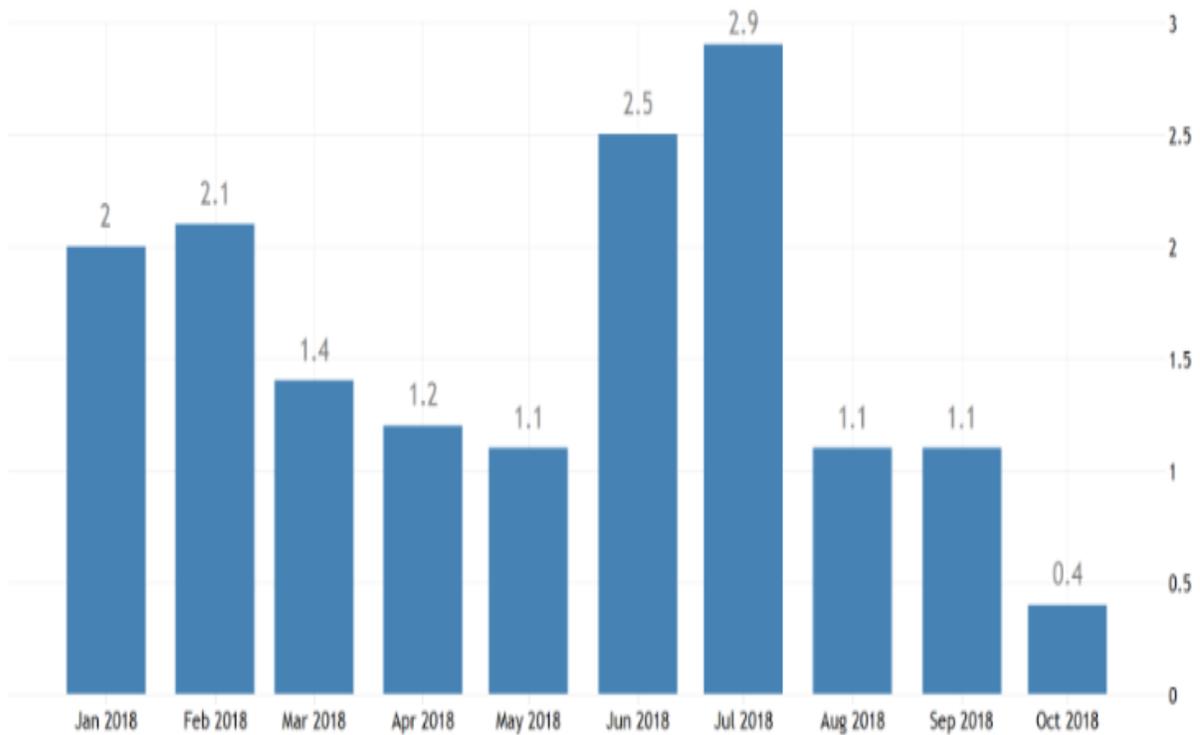
Annexe 7 : Tableau des taux d'intérêt du Burkina Faso en 2018.

Burkina-Faso Argent	Dernier	Précédent	Le plus élevé	Le Plus Bas	Unité
Taux d'intérêt	4.50	4.50	4.50	3.50	Pour Cent
Taux Interbancaire	4.44	5.08	7.35	3.75	Pour Cent
Fort Taux D'Intérêt	6.50	6.90	8.60	6.50	Pour Cent
Prêts Au Secteur Privé	1917374.00	1917643.00	1928646.00	427356.00	Xof - Million

Source: TRADINGECONOMICS.COM CENTRAL BANK OF WEST AFRICAN STATES (BCEAO).

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 8 : Histogramme des taux d'inflation de janvier à octobre 2018



SOURCE: TRADINGECONOMICS.COM | INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE, BURKINA FASO

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 9 : Tableau de maintenance des GE

	Refroidi par air 3000tr/min	Refroidi par eau 3000tr/min	Refroidi par eau 1500tr/min
Vidange huile	75-100	75-200	125-500
Changer filtre à huile	200	200	125-500
Changer filtre à air	500	1000	2000
Changer filtre à carburant	250	400	400
Contrôler séparateur eau/carburant	8-15	50-100	50-100
Contrôler niveau liquide refroidissement	Avant chaque utilisation	Avant chaque utilisation	Avant chaque utilisation

Source : <https://www.worldpowerfaqs.com/fr/categories/engine/48-does-a-generation-set-need-maintenance-and-what-does-that-mean>.

Les valeurs utilisées dans ce tableau sont exprimées en heures d'utilisation.

ETUDE DE LA REHABILITATION DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE DIESEL DE DOUMA

Annexe 10 : Capture d'un GE et l'estimation de sa durée de vie du GE



Source : https://www.worldpowerfaqs.com/fr/categories/generating-set-requirements/43-what-is-the-lifespan*of-my-generating-set.

Annexe 11 : Comment calculer les émissions de CO₂ en fonction de la quantité de carburant consommé ?

diesel :

1 litre de diesel pèse 835 grammes. Le diesel est composé à 86.2% de carbone (C), ce qui correspond à 720 g de C par litre de diesel. Pour brûler ce C en CO₂, 1920 g d'oxygène sont nécessaires. La somme nous donne donc $720 + 1920 = 2640$ g de CO₂ par litre de diesel.

Une voiture qui consomme 5 litre/100km va donc émettre $5L \times 2640 \text{ g/L} / 100$ (par km) = 132 g CO₂/km.

Essence:

1 litre d'essence pèse 750 grammes. L'essence est composée à 87% de carbone (C), ce qui correspond à 652 g de C par litre d'essence. Pour brûler ce C en CO₂, 1740 g d'oxygène sont nécessaires. La somme nous donne donc $652 + 1740 = 2392$ g de CO₂ par litre d'essence.

Une voiture qui consomme 5 litre/100km va donc émettre $5L \times 2392 \text{ g/L} / 100$ (par km) = 120 g CO₂/km.

LPG :

1 litre de LPG pèse 550 grammes. Le LPG est composé à 82.5% de carbone (C), ce qui correspond à 454 g de C par litre de LPG. Pour brûler ce C en CO₂, 1211 g d'oxygène sont nécessaires. La somme nous donne donc $454 + 1211 = 1665$ g de CO₂ par litre de LPG.

Une voiture qui consomme 5 litre/100km va donc émettre $5L \times 1665 \text{ g/L} / 100$ (par km) = 83g CO₂/km.

CNG:

Le CNG est un carburant à l'état gazeux (gaz naturel) qui est stocké sous haute pression. La consommation s'exprime donc en m³/100km. Nm³ correspond à un mètre cubique en condition normale (1 atm et 0°C).

1 Nm³ de CNG pèse 717 grammes. Le CNG est composé à 69.2% de carbone (C), ce qui correspond à 496 g de C par Nm³ de CNG. Pour brûler ce C en CO₂, 1323 g d'oxygène sont nécessaires. La somme nous donne donc $496 + 1323 = 1819$ g de CO₂ par Nm³ de CNG.

Une voiture qui consomme 5Nm³/100km va donc émettre $5Nm^3 \times 1819 \text{ g/Nm}^3 / 100$ (par km) = 91g CO₂/km.