



**ETUDE ET ANALYSE EXPERIMENTALE D'UNE CENTRALE
HYBRIDE PV/GROUPE ELECTROGENE (DIESEL OU
BIOCARBURANT) SANS STOCKAGE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : ENERGIE ET GENIE DE PROCEDES**

Présenté et soutenu publiquement le 15 Juin 2010 par

Sibiri Judicaël Noël ZONGO

Travaux dirigés par: Dr Yao AZOUMAH

Enseignant-chercheur

UTER GEI

Daniel YAMEGUEU

Doctorant LESEE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Yézouma COULIBALY

Membres et correcteurs : Pr. Xavier PY

Dr. Yao AZOUMAH

Daniel YAMEGUEU

Promotion [2009/2010]

REMERCIEMENTS

Je n'aurais sans doute pas pu réussir cette formation, sans le concours et l'assistance des personnes bienveillantes ; qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Je remercie particulièrement :

- ✓ Monsieur Salif KABORE, Directeur général de la société nationale d'électricité du Burkina (SONABEL) ;
- ✓ Monsieur Ouokana GANOU, chef du département contrôles électriques et télécommunications (DCET) de la SONABEL ;
- ✓ Mes responsables et mes collègues de la SONABEL, particulièrement du DCET ;
- ✓ Monsieur Paul GINIES, Directeur Général de l'institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) ;
- ✓ Le corps professoral et l'administration du 2iE ;
- ✓ Monsieur Yezouma COULIBALY, chef de l'UTER GEI ;
- ✓ Monsieur Yao AZOUMAH, directeur du LESEE, mon directeur de mémoire, à qui je témoigne toute ma reconnaissance ; je formule, à son intention, mon vœu de réussite dans sa lourde mission ;
- ✓ Monsieur Daniel YAMEGUEU, mon encadreur de stage, qui m'a consacré son temps et son énergie ; je lui souhaite bon courage dans ses travaux de thèse ;
- ✓ Toute l'équipe sympathique et disponible du LESEE ;
- ✓ L'ensemble des stagiaires du LESEE ;
- ✓ Tous ceux qui m'ont apporté leur aide.

Ma famille, ma fiancée et mes amis ont été les leviers qui m'ont permis d'atteindre mes objectifs ; soyez en remerciés et que Dieu vous bénisse.

RESUME

Notre travail porte sur une étude et analyse expérimentale d'une centrale hybride PV/Diesel sans stockage d'énergie. Un prototype, composé d'un champ PV (de 2,85 kWc) en série avec un onduleur monophasé et couplé en parallèle à un groupe électrogène triphasé (de 11,5 kVA), a été installé sur le site de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement à Kamboinsé (latitude 12,44° et longitude -1,56°). La demande en énergie est simulée à partir de deux bancs de charges triphasés de 4 kW chacun. L'étude expérimentale est basée sur l'acquisition des données climatiques et des paramètres électriques du système PV et du groupe électrogène, pendant plusieurs mois de fonctionnement de la centrale hybride. L'analyse des résultats a permis de déterminer le point de fonctionnement optimal du système en fonction de la puissance demandée et de l'ensoleillement. En outre en comparant les performances de la centrale hybride PV/Diesel sans stockage à celles du groupe électrogène en fonctionnement exclusif, nous avons constaté que cette centrale hybride engendre une baisse de la consommation en gasoil ; ce qui entraîne également une réduction des émissions de CO₂. En termes de performances, l'optimisation des centrales hybrides doit être toujours envisagée, dans le but d'atteindre les objectifs d'économie en gasoil (et donc de la baisse du coût du kWh électrique) et de préservation de l'environnement, en diminuant les émissions de CO₂.

Mots clés : centrale hybride, photovoltaïque, groupe électrogène, expérimentation, optimisation

ABSTRACT

Our work is focused on the study and experimental analysis of a hybrid power station consisting of photovoltaic modules and diesel generator without storage of energy, the aim being to determine its optimal point of operation. With this intention, a prototype, made up of a photovoltaic modules (2,85 kWp) connected in serie with an single-phase current inverter and coupled in parallel with a three-phase generator, has been installed on the site of the International Institute for Water and Environmental Engineering (2iE) in Kamboinsé (latitude 12,44° and longitude -1,56°). The demand of energy is simulated by two three-phase load's bench of 4 kW each one. The experimental study is based on the acquisition of the weather data and the electric parameters of PV system and the diesel generator, during several months of operation of the hybrid power station. The analysis of the results made it possible to determine the systems point of optimal operation according to the required power and the solar radiation. Moreover, by comparing the performances of the PV/Diesel hybrid power station without storage with those of the generator under exclusive operation, we noted that this hybrid power station consumes less fuel, which results in a reduction of the CO₂ emissions. In terms of performances, the optimization of the hybrid power stations must always be considered, with the aim to achieve the objective of economizing fuel (and thus the reduction of the cost of electric kWh) and protection of the environment, by decreasing the CO₂ emissions.

Keys words: hybrid power station, photovoltaic, generator, experimentation, optimization

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Emissions annuelles des gaz à effet de serre (4).....	2
Figure 2: carte d'ensoleillement global en kWh/m ² /jour (6)	3
Figure 3: Equipe du LESEE	4
Figure 4: répartition des ressources dans la production d'énergie primaire (8)	6
Figure 5: consommation d'un groupe de 30 kW (13).....	9
Figure 6: coût d'exploitation en fonction du taux de charge du groupe	10
Figure 7: comparaison des coûts initiaux et d'exploitation entre PV et diesel, cas d'une station de télécommunication de puissance 10 kW (2).....	12
Figure 8: système hybride sans stockage	14
Figure 9: système hybride autonome sans stockage (source : IEA).....	14
Figure 10: paramètres de mesures de test de système hybride (19).....	15
Figure 11: équipement de test de système hybride PV/GE avec stockage (14).....	16
Figure 12: carte de localisation du site de Kamboinsé.....	19
Figure 13: ensoleillement global sur le site de Kamboinsé, année 2010	19
Figure 14: température et humidité relative année 2009 de la ville de Ouagadougou.....	20
Figure 15: (a) modules PV, (b) Sunny Boy (onduleur monophasé), (c) groupe électrogène triphasé de 11,5 kVA, (d) local du prototype	21
Figure 16: schéma de principe du prototype	22
Figure 17: thermomètre CA 861 K	24
Figure 18: (a) multimètre (b) sonde du solarimètre installé sur le plan incliné	24
Figure 19: écran du pupitre du groupe électrogène.....	24
Figure 20: écran de l'onduleur monophasé Sunny Boy.....	25
Figure 21: schéma électrique unifilaire du prototype.....	26
Figure 22: profil des charges N°1	27
Figure 23: profil des charges N°2	27
Figure 24: rapprochement entre données station météo et prototype.....	32
Figure 25: consommation horaire groupe électrogène 11,5 kVA	33
Figure 26: consommation spécifique du groupe électrogène 11,5 kVA	34
Figure 27: courbes charge constante 1,8 kW	35
Figure 28: courbes charges constantes 3,6 kW	36
Figure 29: courbes charges constantes 5,4 kW	37

Figure 30: courbes charges constantes 7,2 kW	38
Figure 31: courbes charges constantes 9,2 kW	39
Figure 32: courbes profil de charge N°1	40
Figure 33: courbes profil de charge N°2	41
Figure 34: comparaison entre consommation horaire centrale hybride et groupe seul.....	41
Figure 35: comparaison entre consommation spécifique centrale hybride et groupe seul.....	42
Figure 36: corrélation puissance PV et ensoleillement	43
Figure 37: performance de l'onduleur Sunny Boy	44
Figure 38: consommation horaire groupes électrogènes de 30 kW et 9,2 kW.....	45
Figure 39: corrélation linéaire de la puissance et de la consommation horaire du groupe électrogène	45
Figure 40: comparaison consommation horaire entre centrale hybride PV/GE et groupe électrogène seul, à 9,2 kW	47
Figure 41: comparaison consommation spécifique entre centrale hybride et groupe électrogène seul, à 9,2 kW	47
Figure 42: intersection entre des courbes de performances de quatres groupes électrogènes .	49
Figure 43: informations affichées sur le Sunny Matrix.....	50
Figure 44: photosynthèse des plantes (4)	52
Figure 45: comparaison émissions de CO ₂ et NO _x (source: travaux de S. SIDIBE, LBEB)..	53
Figure 46: (a) graines de Jatropha, (b) presse pour la production artisanale d'huile végétale .	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Accès à l'électricité dans le monde en 2005, (2)	1
Tableau 2: avantages et inconvénients du photovoltaïque	8
Tableau 3: avantages et inconvénients du groupe électrogène	10
Tableau 4: les phases du projet Flexy Energy	18
Tableau 5: caractéristiques d'un modules PV SANYO	22
Tableau 6: paramètres relevés et mesurés	28
Tableau 7: facteurs secondaires sur les modules PV	43
Tableau 8: performances journalière centrales hybrides, profil N°1	50
Tableau 9: performances journalières, centrale hybride, profil 2	51
Tableau 10: quantité annuelle de CO ₂ évité	51

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE :	Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement ;
AC :	courant alternatif;
DDO:	distilled diesel oil;
GE :	groupe électrogène ;
GEI :	génie énergétique et industriel ;
HMT :	hauteur manométrique totale ;
AIE :	agence internationale de l'énergie ;
LBEB :	laboratoire biomasse énergie et biocarburant ;
LESEE :	laboratoire énergie solaire et économie d'énergie ;
PV :	photovoltaïque ;
SONABEL :	société nationale d'électricité du Burkina.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RESUME.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
SOMMAIRE	vii
I. INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1 Problématique des sites isolés	1
I.2 Dépendance des énergies fossiles.....	1
I.3 Energie solaire	2
I.4 Présentation du laboratoire LESEE	4
I.5 Objectifs de l'étude.....	5
I.6 Démarche de l'étude.....	5
II. ETAT DE L'ART.....	6
II.1 Introduction	6
II.2 Energies renouvelables	6
II.2.1 Les performances d'un système PV	7
II.2.2 Avantages et inconvénients des modules photovoltaïques	8
II.3 Energies conventionnelles	8
II.3.1 Les performances des groupes électrogènes	9
II.3.2 Avantages et inconvénients des groupes électrogènes.....	10
II.4 Les systèmes hybrides PV/ Groupe électrogène.....	11
II.4.1 Définition	11
II.4.2 intérêt des systèmes hybrides	12

II.4.3	Dimensionnement et complexité.....	13
II.4.4	Problématique du stockage de l'énergie.....	13
II.4.5	Les systèmes hybrides PV/GE sans stockage	14
II.5	Modèle expérimental existant des systèmes hybrides PV/GE.....	15
II.6	Equipement de test de système hybride.....	16
II.7	Conclusion.....	16
III.	ETUDE DU COMPORTEMENT DE LA CENTRALE HYBRIDE PV/DIESEL	17
III.1	Concept de FLEXY ENERGY.....	17
III.1.1	Objectifs	17
III.1.2	Phases du concept :	17
III.2	Etats des lieux	18
III.2.1	Situation géographique du site	18
III.2.2	Ensoleillement du site de Kamboinsé	19
III.2.3	Température et humidité relative de la ville de Ouagadougou	20
III.3.	Description du prototype de « Flexy-Energy »	20
III.4	Equipements.....	21
III.4.1	Système hybride PV/Diésel sans stockage.....	21
III.4.2	Acquisition des données.....	23
III.4.3	Schéma électrique de la centrale hybride.....	25
III.5	Méthodes.....	26
III.5.1	Tests sur le prototype	27
III.5.2	Séquence des essais.....	30
III.6	Les objectifs de l'étude	31
IV.	RESULTATS	32
IV.1	Groupe électrogène	32
IV.2	Système hybride.....	35

IV.2.1	Essais à charge constante 1,8 kW.....	35
IV.2.2	Essais à charge constante 3,6 kW.....	36
IV.2.3	Essais à charge constante 5,4 kW.....	37
IV.2.4	Essais à charge constante 7,2 kW.....	38
IV.2.5	Essais à charge constante 9,2 kW.....	39
IV.2.6	Les essais sous profils de charges variables.....	40
IV.2.7	Comparaison entre système hybride PV/GE et groupe électrogène seul	41
V.	DISCUTIONS ET ANALYSES	42
V.1	Performance des modules photovoltaïques	42
V.2	Les performances de l'onduleur	44
V.3	Groupe électrogène seul	44
V.3	Système hybride PV/GE.....	46
V.4	Propositions d'optimisation.....	47
VI.	ANALYSE ENVIRONNOMIQUE	50
VI.1	Performances environnementales du champ PV.....	50
VI.2	Avantages environnementaux de la substitution du gasoil par les biocarburants dans les groupes électrogènes	52
VI.2	Economies financières	53
VI.3	Les retombées sociétales.....	53
VI.3.1	Lien entre énergie et pauvreté.....	53
VI.3.2	Les huiles végétales	54
VII.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	56
VIII.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58
IX.	ANNEXES	60

I. INTRODUCTION GENERALE

I.1 Problématique des sites isolés

On estime à plus de deux milliards, le nombre de personnes au monde vivant sur des sites isolés, sans accès à l'énergie électrique. L'extension des réseaux publics vers les zones rurales, coûte excessivement chère ; sa rentabilité est faible car remise en cause par la faiblesse de la demande électrique, également par la faiblesse de la densité de la population au niveau de ces zones. Du point de vue rentabilité, les systèmes décentralisés de production d'énergie électrique apparaissent comme une solution viable [1].

Tableau 1: Accès à l'électricité dans le monde en 2005, [2]

	Population	Population Urbaine	Population n'accédant pas à l'électricité	Population accédant à l'électricité	Taux d'électrification	Taux d'électrification urbain	Taux d'électrification Rural
	million	million	million	million	%	%	%
Afrique	891	343	554	337	37,8	67,9	19,0
Afrique du nord	153	82	7	146	95,5	98,7	91,8
Afrique subsaharienne	738	261	547	191	25,9	58,3	8,0
Pays développés d'Asie	3418	1063	930	2488	72,8	86,4	65,1
Chine et Asie de l'Est	1951	772	224	1728	88,5	94,9	84,0
Asie de l'Ouest	1467	291	706	760	51,8	69,7	44,7
Amérique latine	449	338	45	404	90,0	98	65,6
Moyen orient	186	121	41	145	78,1	86,7	61,8
Pays développés	4943	1866	1569	3374	68,3	85,2	56,4
OECD	1510	1090	8	1501	99,5	100,0	98,1
Niveau mondial	6452	2956	1577	4875	75,6	90,4	61,7

Au Burkina Faso, le taux d'électrification reste encore faible ; en effet comme la plupart des pays africains, environ 70% de la population vit dans des zones rurales et n'accède que très faiblement aux services énergétiques modernes et durables ce qui constitue un frein au développement local, tributaire de l'accès à l'énergie électrique.

I.2 Dépendance des énergies fossiles

Pour plusieurs raisons, l'énergie est le maillon faible dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne. La société nationale d'électricité du Burkina (SONABEL), pour assurer l'approvisionnement en énergie électrique, a consommé 129.037 tonnes de combustibles fossiles (fioul, DDO) pour l'année 2009. Cette importante importation de produits pétroliers

s'explique par le fait que 67% de la production d'énergie électrique soit d'origine thermique [3]. Cette dépendance énergétique forte envers les énergies fossiles est une situation susceptible de constituer une insécurité et comporte un impact environnemental négatif. En effet, la combustion des énergies fossiles est source d'émission de CO₂, un gaz responsable de l'effet de serre. La figure 1 montre la contribution aux émissions de CO₂, due à la production de l'énergie, soit 21,3%.

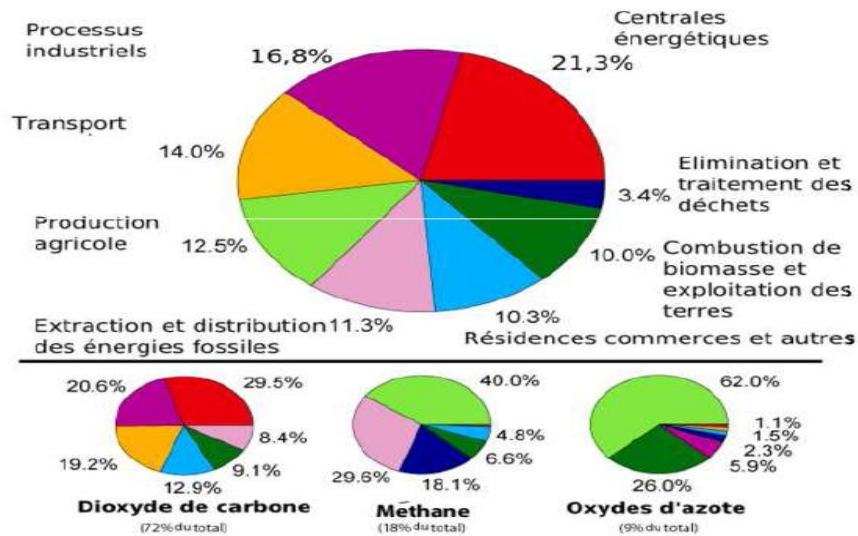


Figure 1: Emissions annuelles des gaz à effet de serre [4]

D'une part l'extension des réseaux vers les zones rurales ou éloignées des réseaux électriques n'est pas économique soit à cause des grandes distances ou de la faiblesse de la demande; d'autre part le système classique qui consiste à installer des groupes électrogènes présente des coûts d'exploitation et de maintenance élevés [1].

I.3 Energie solaire

L'Afrique fait partie des régions les plus ensoleillées au monde. Presque tout le Maghreb, les pays sahéliens et l'Afrique australe sont dans la ceinture solaire (régions du monde où l'ensoleillement normal direct excède 2000 kWh/m²/an). Le Burkina Faso dont l'irradiation globale moyenne est environ 5,5 kWh/m²/jour [5], bénéficie d'un ensoleillement favorable à l'implantation de projets de production d'énergie solaire (figure 2). En outre, ce pays est signataire du protocole de Kyoto adopté en 1997, qui vise une réduction des gaz à effet de

serre à travers le développement des énergies renouvelables et la prise en compte de l'efficacité énergétique dans les projets de développement.

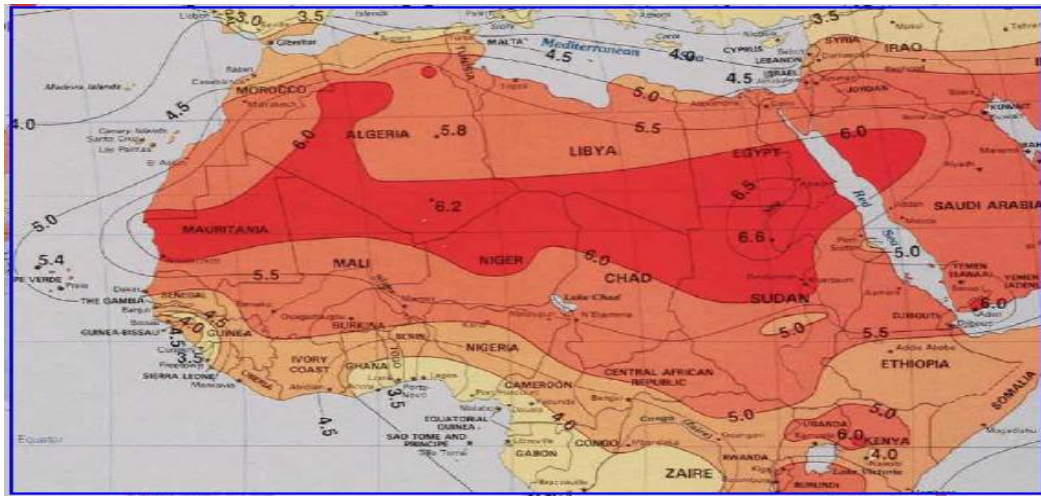


Figure 2:carte d'insolation globale en kWh/m²/jour [6]

La combinaison des énergies renouvelables avec les énergies fossiles pour la production de l'énergie dans les zones isolées constitue une offre attractive du point de vue économique et environnemental, incluant des réductions considérables de consommation de carburant et de production de CO₂ [7].

Les systèmes hybrides utilisent plusieurs sources d'énergie, généralement un groupe électrogène avec une ou plusieurs autres sources d'énergies renouvelables (soleil, vent, biomasse, hydraulique). Dans les pays développés, l'engouement envers les systèmes hybrides est grandissant ; des études montrent une plus grande fiabilité, flexibilité et compétitivité face aux systèmes mono sources [1].

De nos jours, de part le monde, aussi bien dans les pays du nord que du sud, on présente les systèmes hybrides comme étant une alternative pour une production décentralisée de l'énergie électrique. L'engouement est réel, mais le dimensionnement de ces systèmes est un verrou qui doit être levé pour favoriser leur développement. Notre travail qui porte sur l'étude et l'analyse expérimentale des systèmes hybrides PV/Diesel sans stockage s'inscrit dans le sens de maîtriser leur fonctionnement et leur dimensionnement.

I.4 Présentation du laboratoire LESEE

Le laboratoire énergie solaire et économie d'énergie (LESEE) est l'un des cinq laboratoires que dispose le 2iE, dans le cadre de ses travaux de recherches et d'enseignement. A l'instar des autres, le LESEE constitue une plate forme technique de haut niveau; il est piloté par une équipe très dynamique. Le LESEE travaille en collaboration avec des partenaires aussi bien du sud que du nord. Les axes de recherches du LESEE sont décrits en annexe 1.

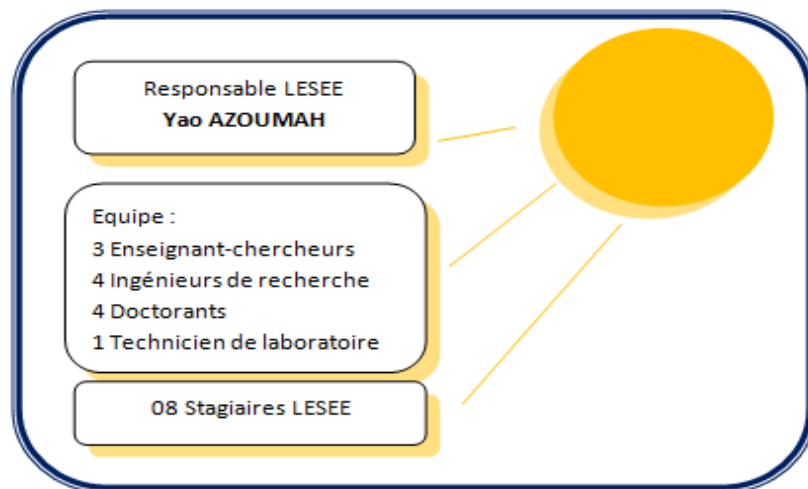


Figure 3: Equipe du LESEE

✓ Objectifs du LESEE

L'objectif principal du LESEE est de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique /thermique en Afrique.

✓ Equipements du LESEE

- Une station météo entièrement équipée (pyranomètre, pyrhéliomètre, anémomètre, girouette, hygromètre) ;
- Une station de pompage photovoltaïque (800Wc, HMT 45m) ;
- Un prototype de centrale hybride solaire PV/groupe électrogène sans stockage (2,85 kWc, 11,5 kVA) ;
- Une plateforme solaire PV composée de: champ PV, bancs de test de modules PV, simulateur/analyseur de réseaux (en cours d'acquisition) ;

- Une plateforme solaire à concentration composée d'un héliostat de 25 m², d'une tour de 10 m et d'un bloc électrique de petite puissance (en cours d'acquisition).

I.5 Objectifs de l'étude

Cette étude, qui porte sur un prototype de système hybride PV/groupe électrogène installé sur le site du 2iE de Kamboinsé, a pour objectif principal de déterminer quel est le point optimal de fonctionnement dans un tel système, pour un profil des charges donné et dépendamment de l'ensoleillement. Spécifiquement, il s'agira de:

- Etudier les performances du système hybride PV/Diésel sans stockage en fonction des charges et dégager le pourcentage optimal de solaire PV dans le système hybride ;
- Etudier le comportement du groupe électrogène (consommation en carburant) en fonction des charges ;
- Effectuer une analyse environmique (étude économique et impact environnemental) sur une vingtaine d'années.

I.6 Démarche de l'étude

La première partie de notre étude est consacrée à l'état de l'art en matière de systèmes hybrides PV/GE sans stockage. Dans cette partie, une présentation des performances du système PV et des groupes électrogènes est faite. Le contexte des systèmes hybrides est également présenté. La problématique des systèmes hybrides est posée en termes de complexité dans le dimensionnement ; d'absence de procédures et de moyens permettant d'évaluer leurs performances.

La seconde partie de l'étude porte sur l'expérimentation du prototype. Une suite de mesures de performance du groupe électrogène seul et de la centrale PV/GE est réalisée pendant trois mois, sous plusieurs profils de charges. Les résultats de ces tests sont dégagés en termes de fonctionnement optimal.

La troisième et dernière partie est consacrée à l'étude économique et environnementale de la centrale hybride PV/Diésel sans stockage.

II. ETAT DE L'ART

II.1 Introduction

Les systèmes hybrides combinent l'utilisation d'au moins deux sources d'énergies différentes, par exemple un système PV couplé à un groupe électrogène. Dans le cas des systèmes hybrides PV/GE sans stockage d'énergie hors réseau, le groupe électrogène fonctionne en continu. Les performances du groupe électrogène, quand il fonctionne seul sont bien connues, par contre dans un système hybride, elles doivent être étudiées, afin d'appréhender l'influence du système PV sur son fonctionnement.

Pour permettre un développement futur et durable des systèmes hybrides en Afrique subsaharienne, région du monde où l'accès à l'électricité est le plus bas, il est absolument nécessaire de pouvoir évaluer leurs performances et de maîtriser leurs dimensionnements.

II.2 Energies renouvelables

Bien que les énergies renouvelables soient reconnues comme étant des énergies propres, favorables à la préservation de l'environnement, leur part dans la fourniture mondiale d'énergies primaires est très marginale, comme le montre la figure 4 :

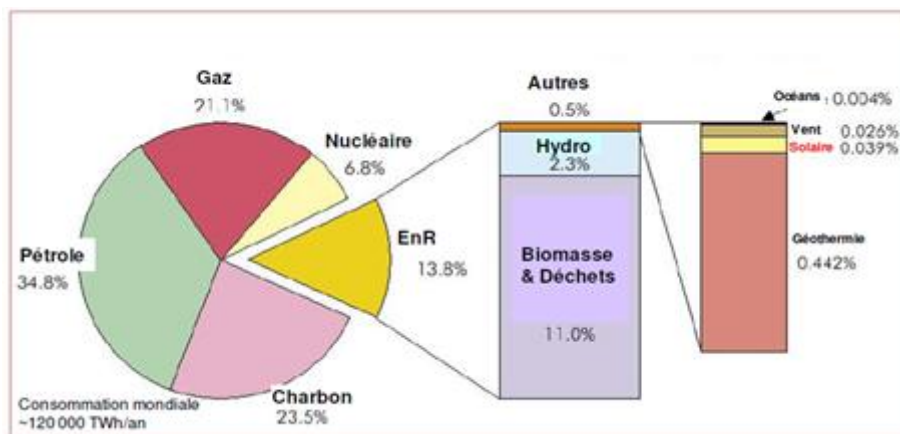


Figure 4: répartition des ressources dans la production d'énergie primaire [8]

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables la plus répandue au monde ; cette énergie est inépuisable et son utilisation ne provoque pas d'émissions de CO₂. Dans les pays où l'irradiation solaire est comprise entre 3 et 6 kWh/m²/jour, cette énergie est souvent

envisagée comme alternative pour amoindrir l'utilisation des énergies fossiles. Bien que le coût des installations soit excessif, leurs applications trouvent leur raison d'être dans des zones isolées, où l'extension des réseaux de distribution d'énergie n'est pas une solution économique [1].

II.2.1 Les performances d'un système PV

Les modules photovoltaïques se composent de cellules associées en plusieurs rangées. En dépit des avancées technologiques enregistrées ces dernières années, le rendement global des systèmes PV est d'environ 12% [1].

La puissance crête délivrée par un module PV est souvent approximée par une relation linéaire [7]:

$$P_{PV,DC} = \eta_{PV} \times I_{PV} \quad (1)$$

$P_{PV,DC}$: puissance délivrée.

η_{PV} : rendement des modules PV.

I_{PV} : puissance solaire reçue sur toute la surface du champ PV.

La puissance délivrée, par l'onduleur est donnée par :

$$P_{PV,AC} = \eta_{inv} \times P_{PV,DC} \quad (2)$$

$P_{PV,AC}$: puissance AC délivrée par l'onduleur.

η_{inv} : rendement de l'onduleur.

L'influence de la température ambiante sur la puissance délivrée par les modules PV est un facteur important, en matière de performances des modules PV. Le modèle donné dans [9] est le suivant :

$$P(G, T_{mod}) = P_{STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot \eta_{rel}(G', T') \quad (3)$$

Où P_{STC} est la puissance dans les conditions standards (STC) de G_{STC} de 1000 W/m² et $T_{mod-STC}$ de 25°C. η_{rel} est l'efficacité relative instantanée donnée par :

$$\eta_{rel}(G', T') = 1 + k_1 \ln G' + k_2 (\ln G')^2 + T'(k_3 + k_4 \ln G' + k_5 (\ln G')^2 + k_6 T'^2) \quad (4)$$

G' et T' sont des paramètres ; $G' = G/G_{STC}$ et $T' = T_{mod} - T_{mod_STC}$

k_1 à k_6 sont des coefficients dérivés des données expérimentales sur un site donné.

II.2.2 Avantages et inconvénients des modules photovoltaïques

Les contraintes majeures dues à l'utilisation du PV sont son coût exorbitant et son faible rendement. Quelques avantages et inconvénients des systèmes PV sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2: avantages et inconvénients du photovoltaïque

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'exploitation quasi inexistant ; ▪ Durée de vie pouvant dépasser 20 ans ; ▪ Impacts environnementaux moindres (sans émissions de CO₂) ; ▪ Expansion facile (rajout de panneaux) ; ▪ Disponibilité locale de la ressource solaire (nul besoin de transporter la ressource) ; ▪ Absence de nuisances sonores ; ▪ Grande fiabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'investissement très élevé ; ▪ Faible rendement, en général inférieur à 12% ; ▪ Energie intermittente dépendante de l'ensoleillement (fluctuation de l'énergie au cours de la journée); ▪ Fonctionnement de nuit impossible ; ▪ Difficulté d'ajouter des charges supplémentaires non prévues.

II.3 Energies conventionnelles

Pendant longtemps, on a eu recours aux groupes électrogènes pour l'approvisionnement des zones isolées en énergie électrique. L'acquisition d'un groupe électrogène est relativement moins chère, mais il présente des coûts d'exploitations et de maintenance élevés, particulièrement quand il fonctionne à faible charge [10, 11].

Les groupes électrogènes, qui consomment du gasoil, contribuent à la pollution de l'environnement ; chaque litre de gasoil consommé occasionne une émission d'environ 3 kg de CO₂ [12].

II.3.1 Les performances des groupes électrogènes

Généralement les performances d'un groupe électrogène sont caractérisées par sa consommation horaire, ainsi que sa consommation spécifique. La consommation d'un groupe de 30 kW est donnée par la figure 5 :

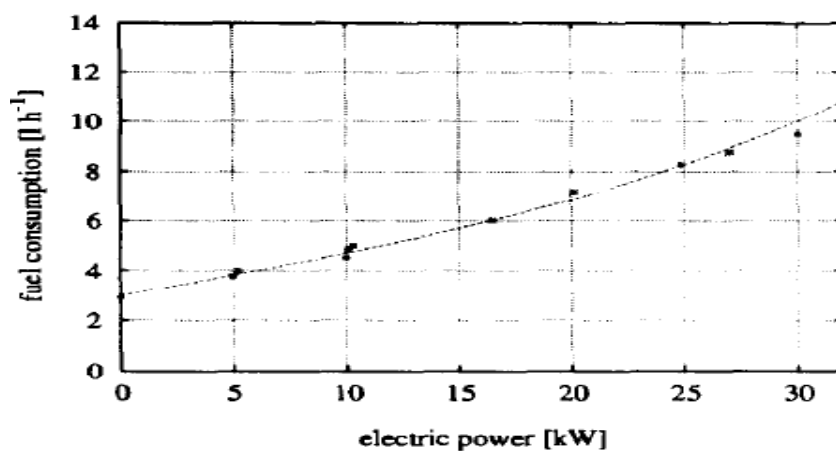


Figure 5: consommation d'un groupe de 30 kW (13)

Un fonctionnement intermittent du groupe électrogène, c'est-à-dire avec de nombreux cycles de démarrage – arrêt, provoque une usure prématurée des pièces, ce qui accroît les besoins en maintenance. Pour pouvoir répondre, à une brusque augmentation de la demande en énergie, le groupe électrogène fonctionne avec une réserve tournante, c'est-à-dire que le groupe produit un surplus d'énergie [1].

Le fonctionnement sous faible charge des groupes électrogènes n'est pas recommandé, à cause de l'usure des pièces ; généralement les constructeurs recommandent de tourner le groupe à une puissance supérieure ou égale à 30% de sa puissance nominale.

L'utilisation optimale du groupe électrogène est réalisée lorsqu'il fonctionne à une charge correspondant à 80% de sa charge nominale [14]. Comme le montre la figure 6, le coût de l'énergie produite par un groupe électrogène est favorable lorsqu'il fonctionne proche de sa puissance nominale.

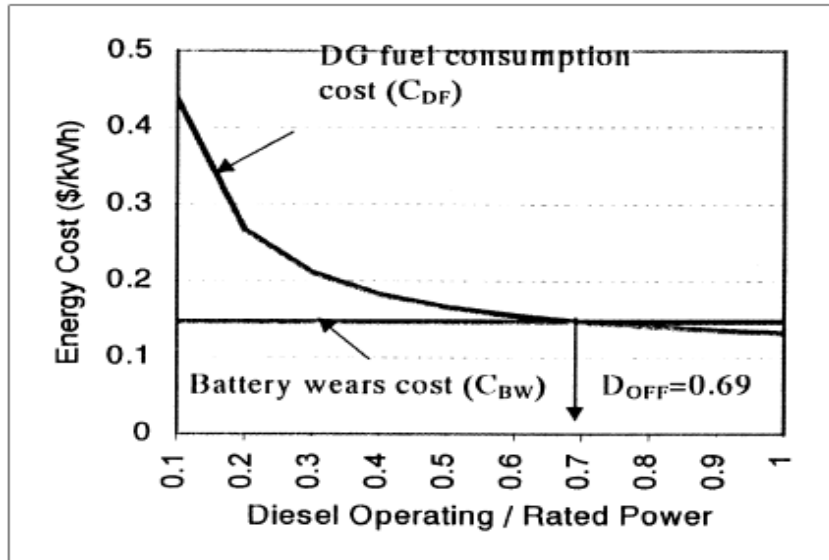


Figure 6: coût d'exploitation en fonction du taux de charge du groupe

II.3.2 Avantages et inconvénients des groupes électrogènes

Quelques avantages et inconvénients des groupes électrogènes sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3: avantages et inconvénients du groupe électrogène

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût initial faible ; ▪ Fonctionnement avec une réserve tournante ; ▪ Disponibilité 24/24 heures. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation d'énergies fossiles avec ses corollaires ; ▪ Faible rendement aux faibles charges ; ▪ Coûts d'exploitation élevés ; ▪ Nécessité de maintenance continue (main d'œuvre qualifiée et pièces de rechanges) ; ▪ Nuisances sonores ; ▪ Emissions de CO₂.

II.4 Les systèmes hybrides PV/ Groupe électrogène

II.4.1 Définition

D'un point de vue général, un système hybride de production d'énergie est celui qui combine plusieurs sources disponibles et mobilisables.

En particulier, les applications hybrides à base de solaire photovoltaïque combinent le solaire avec une ou plusieurs autres sources.

Le plus important étant de satisfaire la demande en énergie, les systèmes hybrides doivent prendre en compte les options suivantes :

- Utilisation d'une ou de plusieurs sources d'énergies renouvelables ;
- Option avec ou sans stockage d'énergie ;
- Option avec ou sans groupe(s) électrogène(s) ;
- Option connectée à un réseau de distribution électrique ou isolée.

Le choix de plusieurs sources d'énergies renouvelables pour constituer un système hybride est conditionné par leurs disponibilités sur le site d'implantation dudit système. En plus, il doit exister une complémentarité entre les différentes sources. Par exemple, le solaire peut être combiné avec un groupe électrogène.

Ce scénario est intéressant car le générateur photovoltaïque et le groupe électrogène présentent des caractéristiques complémentaires : le coût initial pour le PV est élevé, comparé à celui du groupe électrogène ; les coûts d'exploitation et de maintenance du PV sont faibles, relativement à ceux du groupe électrogène ; l'énergie produite par le groupe électrogène est disponible à tout moment, pendant que celle du PV varie en fonction de l'ensoleillement [1].



Figure 7: comparaison des coûts initiaux et d'exploitation entre PV et groupe diesel, cas d'une station de télécommunication de puissance 10 kW [2]

II.4.2 intérêt des systèmes hybrides

De nos jours, les groupes électrogènes ne sont plus une meilleure solution, à cause de leurs coûts d'exploitation élevés, de leur maintenance complexe et de la nécessité de transporter et de stocker le carburant. D'une part, la préoccupation grandissante concernant les problèmes environnementaux, d'autre part les progrès en matière de développement de technologies propres contribuent à faire des énergies renouvelables des solutions efficaces et efficientes en matière de développement durable et de préservation de l'environnement [15]. L'utilisation de plusieurs sources d'énergie telles que le soleil et l'éolien, permet de rendre plus fiable et efficiente la fourniture de l'énergie électrique.

Les systèmes hybrides présentent les qualités suivantes :

- Fiabilité ;
- Flexibilité ;
- Economique.

Dans les systèmes hybrides PV/GE, le groupe électrogène permet de réduire la taille du champ photovoltaïque, pendant que le système PV permet de réduire le temps de fonctionnement du groupe, sa consommation en gasoil, les coûts d'exploitation et de maintenance [16]. On peut donc situer l'intérêt des systèmes hybrides à ces niveaux, à savoir :

- diminuer le temps de fonctionnement des groupes électrogènes ;
- diminuer la consommation en gasoil.

Dans les systèmes simples, le groupe électrogène tourne en continu, pour couvrir la différence entre l'énergie demandée et celle produite par le PV ; alors le groupe électrogène fonctionne souvent sous faible charge ou dans de mauvaises conditions. Dû au faible rendement du groupe pour les faibles charges, l'économie en consommation de gasoil est limitée pour ces systèmes [1].

II.4.3 Dimensionnement et complexité

Lorsqu'ils sont bien dimensionnés, les systèmes hybrides peuvent être plus fiables et compétitifs que les systèmes PVseuls. Cependant les systèmes hybrides sont plus complexes, due à l'intermittence de l'énergie renouvelable, à la variabilité de la demande et à la non linéarité des composants du système. Les méthodes classiques de dimensionnement sont limitées pour le dimensionnement de tels systèmes [16].

II.4.4 Problématique du stockage de l'énergie

Certaines énergies renouvelables comme le solaire et l'éolienne présentent l'inconvénient d'être intermittentes due à leur dépendance avec les aléas climatiques tels que l'ensoleillement ou la vitesse du vent. De ce fait il est souvent difficile de satisfaire les besoins. Pour pallier à cette discordance entre ressources et besoins, on utilise un stockage de l'énergie. Les différentes techniques de stockage de l'énergie sont nombreuses, parmi elles, le stockage électrochimique par des batteries d'accumulateurs est le plus utilisé dans les systèmes PV.

Le dispositif de stockage joue un rôle important surtout quand le profil des charges journalier est en déphasage avec l'évolution de l'ensoleillement au cours de la journée, également pendant les périodes de maintenance. Le coût des batteries est très significatif, à cause de l'investissement initial très élevé et du fait qu'elles sont remplacées plusieurs fois au cours de la vie du système. En effet, ce coût peut atteindre jusqu'à 20% du coût total du système hybride et 40% pour un système PV autonome [17]. Généralement on utilise un stockage de type électrochimique (batterie cadmium) qui, en fin de vie, constituent un problème environnemental majeur lorsque les batteries ne sont pas recyclées.

II.4.5 Les systèmes hybrides PV/GE sans stockage

L'installation de panneaux PV en combinaison avec les groupes électrogènes connectés à un réseau de distribution public ou à un mini réseau local est une meilleure alternative à l'utilisation exclusive des groupes électrogènes [18].

Les systèmes hybrides PV/GE sans stockage sont une option qui gagne du terrain. Il existe deux approches en matière de tels systèmes :

- Utilisation avec un réseau électrique public : on parle en ce moment d'injection directe.

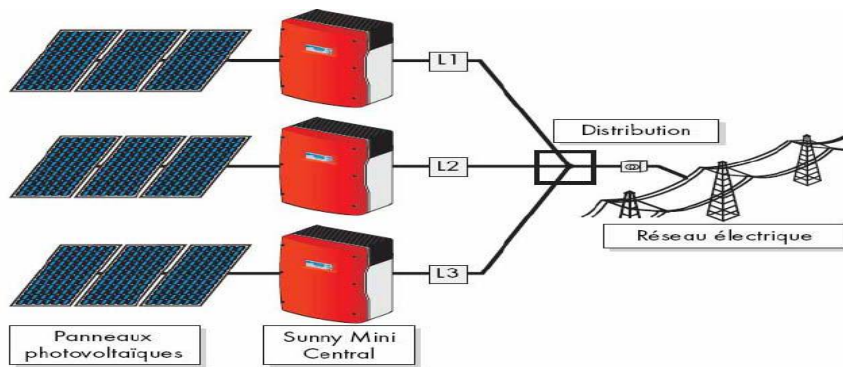


Figure 8: système hybride sans stockage

N.B : au niveau du réseau local (distribution), il existe un parc de groupes électrogènes.

- Utilisation sur un site isolé : cas des réseaux de distribution d'énergie locaux non interconnectés à un réseau électrique public ; on parle alors de système hors réseau électrique public.

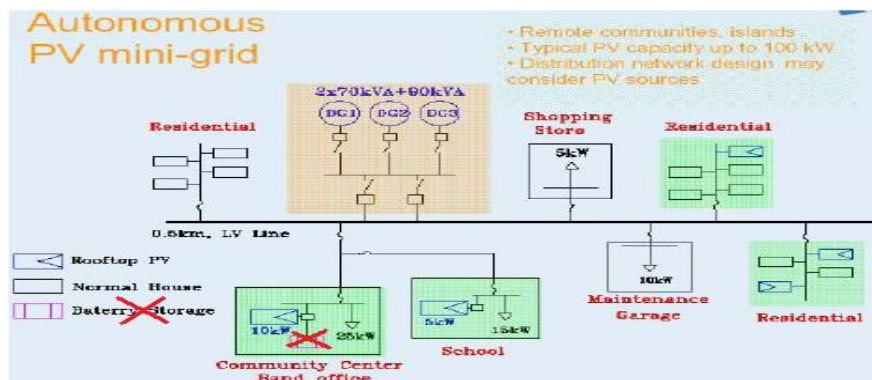


Figure 9: système hybride autonome sans stockage (source : IEA)

II.5 Modèle expérimental existant des systèmes hybrides PV/GE

Une étude expérimentale d'un système hybride consiste à effectuer des mesures sur un prototype ou une installation existante, en vue de :

- comparer les résultats par rapport à ceux attendus ;
- évaluer le comportement en vue de maîtriser le développement futur d'autres projets.

La norme CEI 61724 est celle recommandée pour l'évaluation des systèmes photovoltaïques ; elle donne les différents paramètres à prendre en compte.

Concernant l'évaluation des performances des systèmes hybrides, il a fallu adapter cette norme, car il n'existe pas de procédures communes en matière d'évaluation des performances de ces systèmes [19]. La figure suivante est une adaptation de cette norme dans le cadre des systèmes hybrides PV/ éolien. La partie encadrée de la figure suivante est l'objet de la modification.

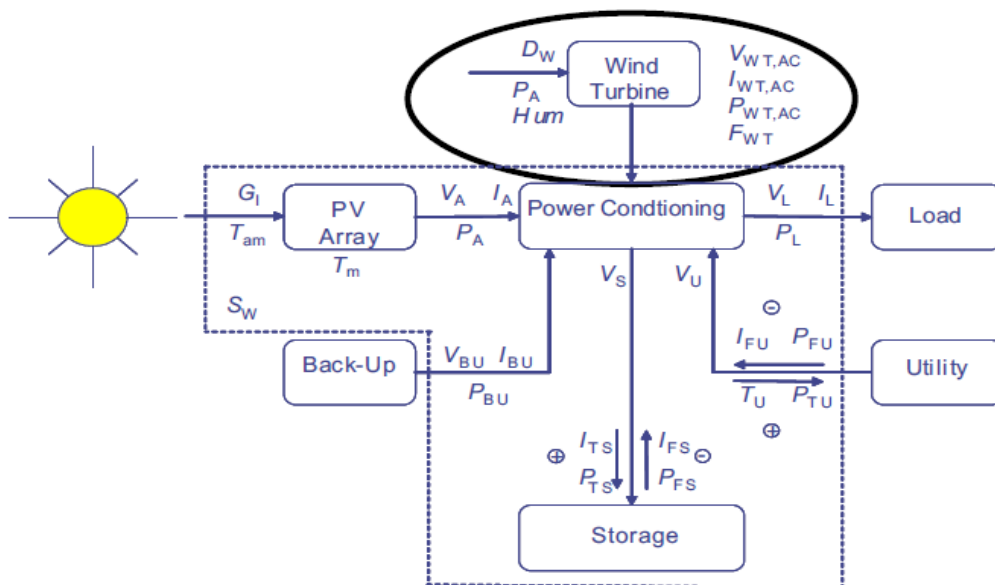


Figure 10: paramètres de mesures de test de système hybride [19]

II.6 Equipement de test de système hybride

L'étude expérimentale des systèmes hybrides nécessite de mettre en place des équipements de test. La figure suivante, présente un moyen de tester un système hybride PV/GE avec batteries, en vue de mesurer ses performances. L'outil a été développé dans le but d'apporter une amélioration dans l'approvisionnement en électricité des centres éloignés [14].

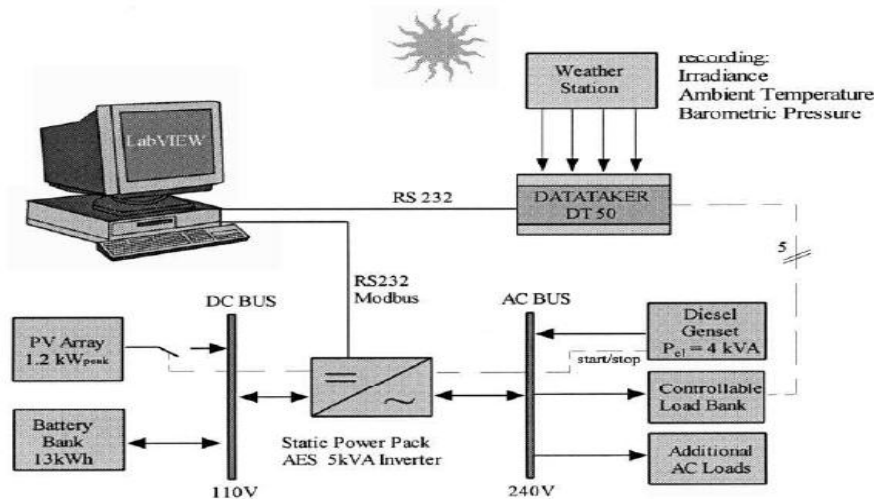


Figure 11: équipement de test de système hybride PV/GE avec stockage [14]

II.7 Conclusion

L'évaluation des performances des systèmes hybrides est identifiée comme étant une des questions clés pour leur développement; en raison du manque de confiance, le développement de ce marché est compromis et demande une démonstration de leur fiabilité [19].

Mettre en place une méthode fiable pour évaluer les performances d'un système hybride répond à un besoin important, dans le sens d'encourager les investissements dans les systèmes hybrides [19].

Notre dispositif expérimental est un outil important, dont le but est de pouvoir réaliser des essais sur le système hybride PV/GE sans stockage. Cette possibilité d'expérimentation va dans le sens de renforcer la confiance en permettant des études fiables sur les systèmes hybrides PV/GE sans stockage. Contrairement à d'autres outils expérimentaux (figure 11), le notre est moins complexe, c'est un dispositif original et facile à mettre en place.

III. ETUDE DU COMPORTEMENT DE LA CENTRALE HYBRIDE PV/DIESEL DU 2iE

III.1 Concept de FLEXY ENERGY

Le concept de Flexy-Energy consiste en la production décentralisée d'énergie électrique en utilisant une centrale hybride PV/groupe électrogène sans batteries de stockage.

III.1.1 Objectifs

Les objectifs visés à travers le concept Flexy-Energy sont les suivants :

- accroître l'accès aux services énergétiques en milieu rural et semi rural ;
- assurer la sécurité de l'approvisionnement énergétique en zones rurale et urbaine, à travers la diversification et la substitution progressive des produits pétroliers ;
- réduire la facture nationale d'importation pétrolière et maintenir les prix de l'électricité à un niveau acceptable, pour les populations surtout les plus démunies ;
- accroître la production agricole ;
- accroître les revenus des plus pauvres à travers des activités génératrices de revenus liées aux services énergétiques ;
- réduire les impacts environnementaux des services énergétiques en proposant des solutions propres et durables (diminution des gaz à effet de serre).

III.1.2 Phases du concept :

Dans le but d'accroître les performances environnementales et les impacts sociaux (lutte contre la pauvreté) il est prévu plusieurs phases d'évolution. La substitution du gasoil par les biocarburants est l'objectif visé.

Tableau 4: les phases du concept Flexy-Energy

Phase 1	substitution de 35% de la production de la centrale thermique par du solaire PV ;
Phase 2	substitution de 50% (des 65% de capacité de production de la centrale à base de fossile) par des biocarburants
Phase 3	substitution de 100% énergies fossiles par les biocarburants, maîtrise totale des procédés utilisant les biocarburants ;
Phase 4	une énergie renouvelable et moins chère pour les ruraux, un accès plus facile aux populations démunies via la dissémination du concept en milieux ruraux.

NB : actuellement la phase 1 est réalisée.

III.2 Etats des lieux

III.2.1 Situation géographique du site

Le site du 2iE de Kamboinsé est situé à 15 km de la ville de Ouagadougou, sur l'axe routière RN22. Kamboinsé, localité située du côté Nord de la ville de Ouagadougou est aujourd'hui considérée comme faisant partie de sa banlieue. Les coordonnées géographiques sont les suivantes : latitude 12°,27' Nord et longitude 1°33' Ouest.

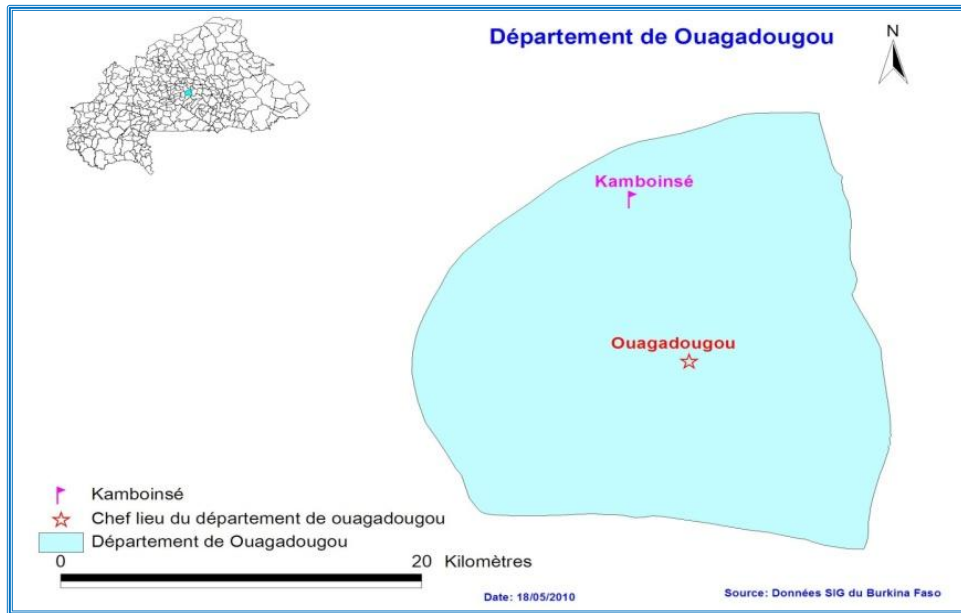


Figure 12: carte de localisation du site de Kamboinsé

III.2.2 Ensoleillement du site de Kamboinsé

L'offre d'énergie solaire est caractérisée par l'ensoleillement qui est en moyenne de 5,5 kWh/m²/jour pendant 3000 à 3500 h par an, au Burkina Faso [5].

Le laboratoire énergie solaire et économie d'énergie (LESEE) du 2iE a équipé sa station météorologique d'appareils tels que le pyranomètre, le pyréliomètre et bien d'autres équipements, ce qui a permis de mesurer l'ensoleillement global.

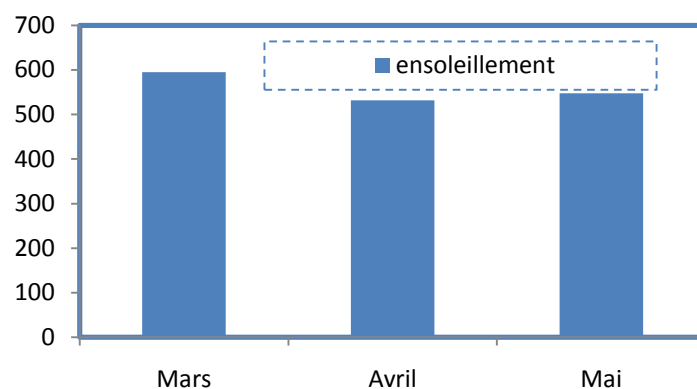


Figure 13: ensoleillement global sur le site de Kamboinsé, année 2010

III.2.3 Température et humidité relative de la ville de Ouagadougou

La figure 14 montre que les mois les plus chauds de l'année sont Avril, Mars et Mai ; pendant ces mois, l'air est moins humide. Les mois les plus humides sont Juillet, Août et Septembre.

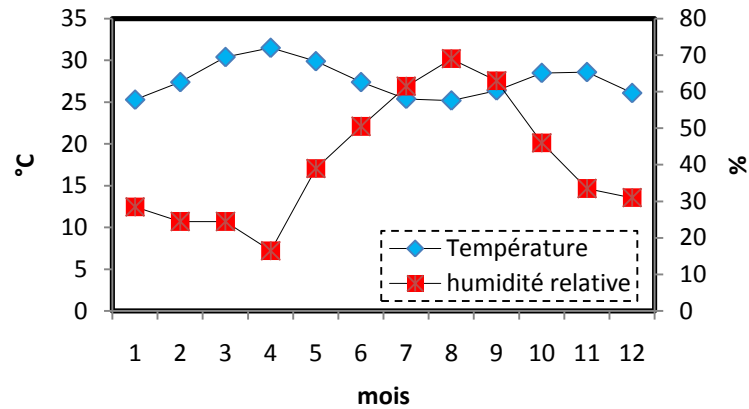


Figure 14: température et humidité relative année 2009 de la ville de Ouagadougou

III.3. Description du prototype de « Flexy-Energy »

Le local du prototype est placé à proximité (quelques mètres) du laboratoire d'électricité et d'électrotechnique, il occupe un espace d'environ 20 m². La toiture du local orientée plein sud avec une inclinaison de 14°, est complètement couverte de panneaux photovoltaïques. La partie extérieure du local est clôturée par une grille de protection métallique, elle abrite le groupe électrogène qui y est installé sur un massif. La partie intérieure du local, réalisée en menuiserie métallique et en vitrage, accueille l'onduleur, l'afficheur électronique, l'inverseur de sources électriques, ainsi que tous les appareils et appareillages électriques et internet ; cet endroit fait également office de bureau pour les techniciens, car les confort thermiques (climatisation, ventilation) et visuel (éclairage) y sont assurés.



Figure 15: (a) modules PV, (b) Sunny Boy (onduleur monophasé), (c) groupe électrogène triphasé de 11,5 kVA, (d) local du prototype

III.4 Equipements

III.4.1 Système hybride PV/Diésel sans stockage

Le prototype de centrale hybride PV/Diésel sans stockage est constitué principalement d'un système photovoltaïque avec la possibilité de couplage soit à un groupe électrogène diésel ou à un réseau électrique. Le champ PV, d'une puissance crête de 2,85 kW, est relié à un onduleur monophasé. Le monitoring du système PV est assuré par un afficheur électronique Sunny Matrix et un acquiiseur de données Sunny Webbox. Le groupe électrogène triphasé d'une puissance de 11,5 kVA, ainsi que le réseau basse tension triphasé 220/380 V sont couplés individuellement avec le système PV à travers un inverseur de sources électriques. La production électrique de la centrale hybride alimente les charges internes (ventilation, climatisation et éclairage) du prototype lui-même.

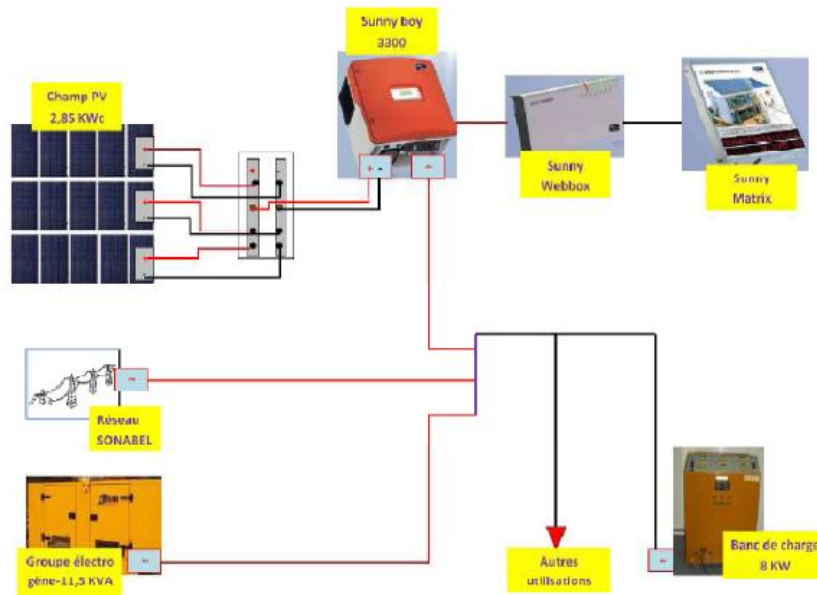


Figure 16: schéma de principe du prototype

▪ **Le champ photovoltaïque**

Le champ PV, d'une surface de 17,7 m², est constitué de 15 modules photovoltaïques, associés en série-parallel. La puissance crête de chaque module est 190 W, dans les conditions standards (ensoleillement 1000W/m² et température ambiante 25°C), la puissance du champ est de 2,85 kWc. Le champ photovoltaïque forme un plan dont l'inclinaison avec l'horizontal est de 14°, avec une orientation plein sud. Les modules sont de marque SANYO ; ils sont composés de cellules constituées en couches de silicium monocristallin et de plusieurs couches minces de silicium amorphe. Leur rendement est de 16%, d'après le fournisseur.

Tableau 5: caractéristiques d'un module PV SANYO

Désignation	valeur
Dimensions :	
Longueur (mm) x largeur (mm) x épaisseur (mm)	1319 x 894 x 35
Puissance (W)	190
Courant maximal (A)	3,47
Tension maximale (V)	54,8
Rendement (%)	16,1
technologie	Silicium monocristallin et amorphe

- **Le groupe électrogène**

Le groupe électrogène est constitué d'un moteur diesel Mitsubishi S3L2. SD, trois cylindres et quatre temps, couplé à un alternateur triphasé de série ECO3-N. Le groupe a été construit par SDMO, ses caractéristiques nominales sont : puissance 11,5 kVA, tension simple 230 V, vitesse de rotation 1500 tr/mn. Le capotage du groupe est de type insonorisé. Le démarrage du groupe est manuel pour le moment.

- **L'onduleur monophasé**

L'onduleur monophasé Sunny Boy SMA modèle SB 3300 est un onduleur solaire d'une puissance nominale de 3300W, qui transforme le courant continu des panneaux PV en courant alternatif et qui injecte ce dernier dans le réseau électrique. L'ensemble champ PV en série avec l'onduleur fonctionne en parallèle avec le groupe électrogène triphasé. L'onduleur injecte sa puissance sur la phase correspondant à la phase 1 du groupe électrogène. La puissance maximale d'entrée est de 3820 W, celle de sortie est de 3600 W et le rendement maximal est de 95,6% (voir la fiche technique du Sunny boy 3300 en annexe 4)

- **Les bancs de charges résistives**

Les bancs de charges permettent de simuler la demande. Les deux bancs de charges sont identiques ; leurs caractéristiques sont les suivantes : type triphasé, puissance maximale de 4 kW. Les paliers de puissances disponibles sur le banc sont : 200, 400, 600, 800 et 1000W ; ils peuvent être combinés entre eux pour atteindre ou approcher la puissance désirée, cela grâce à des commutateurs manuels.

III.4.2 Acquisition des données

Les données nécessaires pour notre étude sont récoltées à partir d'instruments de mesure dont un thermomètre et un solarimètre. L'onduleur et le groupe électrogène permettent également d'acquérir d'autres données.

- **Température ambiante**

L'évolution de la température, au cours de la période des essais est donnée par des mesures collectées manuellement chaque trente minutes. L'appareil de mesure de la température est une sonde thermique reliée à afficheur numérique, de références Chauvin Arnoux 861K.



Figure 17: thermomètre CA 861 K

▪ Radiation solaire

Le solarimètre, de références EXTEL, M- 830B est placé directement sur le plan incliné du champ photovoltaïque et mesure au fil du soleil, la puissance solaire en W/m^2 reçue par les panneaux PV. Les relevés, au cours des essais, se font par pas de temps de trente minutes.

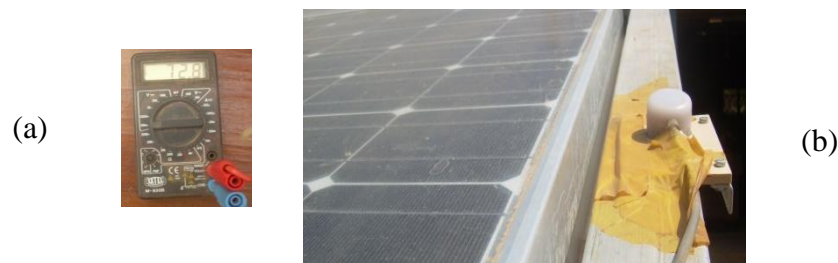


Figure 18: (a) multimètre (b) sonde du solarimètre installé sur le plan incliné

▪ Paramètres électriques du groupe et des bancs de charges

Le pupitre du groupe électrogène affiche sur un écran, les paramètres électriques de fonctionnement. Les informations relevées sont les suivantes : courants en ampère, tension monophasée ou triphasée en volt, fréquence du groupe en hertz, vitesse du groupe en tour par minute.



Figure 19: écran du pupitre du groupe électrogène

La précision de la mesure est faible pour les valeurs de courant de l'ordre de 1 à 3 ampères, nous utilisons alors une pince ampèremétrique qui donne une lecture fiable des faibles courants. Cette pince dont la référence est ARNOUX CHAUVIN, F09, 600 V, 400 A sert également à mesurer les valeurs de courant au niveau des bancs des charges.

▪ **Paramètres électriques de l'onduleur**

L'onduleur Sunny Boy du fabricant SMA affiche sur son écran les paramètres électriques délivrés. Les relevées manuelles sur l'onduleur concernent les paramètres suivants : la puissance AC délivrée, la tension et les énergies en kWh.



Figure 20: écran de l'onduleur monophasé Sunny Boy

L'onduleur enregistre également les paramètres électriques d'entrée à savoir le courant, la tension des panneaux PV. Ces données ne sont pas affichées sur l'écran, elles ne sont accessibles qu'une fois l'ordinateur connecté à l'onduleur via un câble réseau. La disponibilité des données enregistrées est d'un mois, elles sont supprimées au delà de ce temps.

III.4.3 Schéma électrique de la centrale hybride

Le groupe électrogène et le réseau électrique basse tension sont triphasés. L'onduleur solaire est monophasé et injecte la totalité de sa production sur une seule phase.

Un inverseur de sources automatique assure un fonctionnement du système PV soit en parallèle avec le groupe électrogène ou en parallèle avec le réseau électrique basse tension (secteur). La sortie utilisation de l'inverseur de sources alimente les charges internes du local du prototype ou les bancs de charges résistives. Le groupe est démarré manuellement ; la présence de la tension du groupe électrogène est détectée par l'inverseur qui assure une permutation automatique en coupant le réseau, couplant ainsi le PV au groupe.

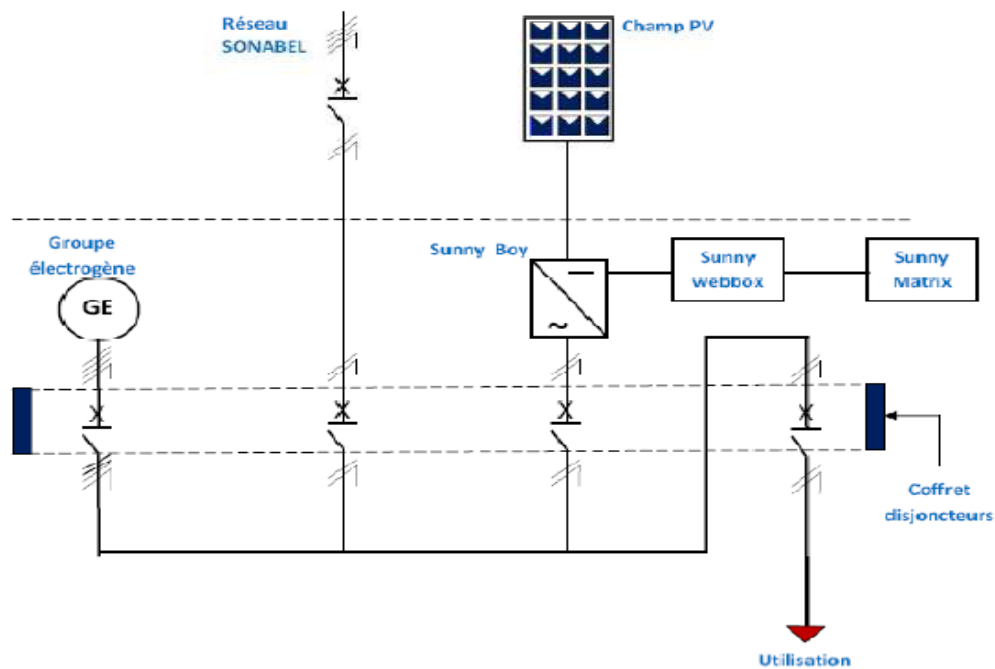


Figure 21: schéma électrique unifilaire du prototype

III.5 Méthodes

Dans sa conception, le système hybride autorise un fonctionnement de type site isolé, dans ce cas le champ PV est couplé au groupe électrogène, ou un fonctionnement de type injection directe qui consiste à injecter toute la puissance PV dans un réseau électrique public sous tension.

L'objet de l'expérimentation porte sur le cas d'un fonctionnement de type site isolé dans lequel le système PV est couplé au groupe électrogène. Dans un tel fonctionnement le groupe électrogène tourne sans interruption toute la durée de l'essai. La demande en énergie est entièrement satisfaite par le système hybride, une part de l'énergie est délivrée par le groupe électrogène, tandis que le système PV assure la fourniture de l'autre part. L'onduleur fonctionne en mode MPP (maximum power point), ce qui permet de tirer le maximum de puissance du système PV.

Le comportement du système hybride est étudié à travers une série d'essais. Selon différents profils de charges, les essais sont répétés pendant plusieurs mois et les données sont récoltées.

Pendant les périodes d'expérimentation, le système hybride est déconnecté des charges réelles ; la demande en énergie est assurée par une simulation en utilisant des bancs de charges résistives.

III.5.1 Tests sur le prototype

III.5.1.1 Les profils des charges

Dans le cadre de cette étude, il a été retenu deux profils de charges. Le profil de charges N°1 possède une allure semblable à celle rencontrée en zone urbaine, avec une évolution progressive de la demande marquée par une pointe dans la demi-journée autour de 10 à 11 heures. Dans l'après midi, la même évolution est observée et marquée par une seconde pointe. La moyenne des puissances de ce profil est de 5,32 kW et la puissance maximale est 8 kW.

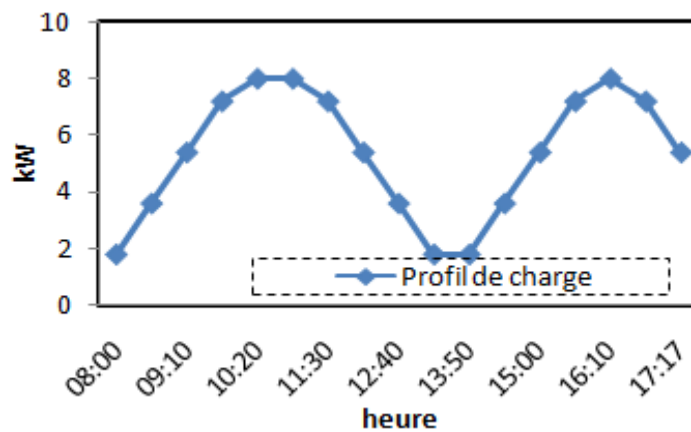


Figure 22: profil des charges N°1

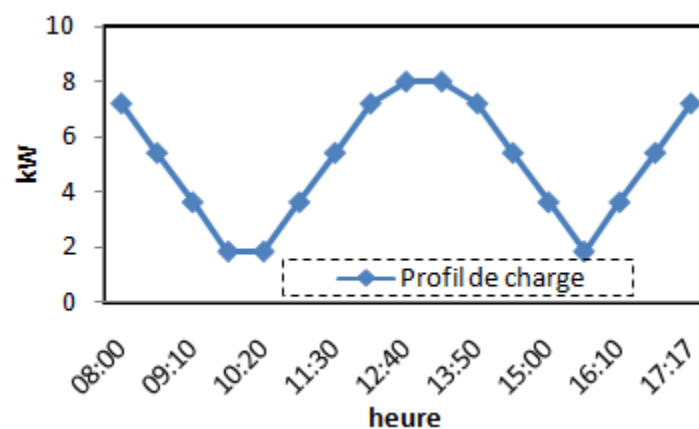


Figure 23: profil des charges N°2

Dans les zones rurales, le profil de charges est souvent marqué par une pointe matinale, suivie d'une baisse progressive de la demande au cours de la journée ; une autre pointe peut être observée dans l'après midi. Le profil de charge N°2 représente ce type d'évolution de la demande en énergie et pourrait correspondre à un profil rural. La moyenne des puissances de ce profil est de 5,07 kW et la puissance maximale est 8 kW.

III.5.1.2 Les protocoles de mesures

L'étude expérimentale sur le prototype nécessite l'acquisition de paramètres importants. Certains paramètres sont mesurés manuellement par l'opérateur des essais tandis que d'autres sont lus directement sur les équipements tels que l'onduleur et le pupitre du groupe électrogène.

Tableau 6: paramètres relevés et mesurés

Paramètres	Méthode de mesure
Ensoleillement global,	Mesurée par le solarimètre
Température ambiante	Mesurée par le thermomètre
Tension PV, V_{PV}	Enregistrée par le Sunny Boy
Intensité PV, I_{PV}	Enregistrée par le Sunny Boy
Puissance AC de l'onduleur, P_{ac}	Enregistrée par le Sunny Boy
Energie du jour, E_{jour}	enregistrée par le Sunny Boy
Energie cumulée, E_{total}	enregistrée par le Sunny Boy
Intensité par phase 1 du groupe électrogène, $I_{GE,ph1}$	Mesurée avec la pince ampermétrique
Intensités des 03 phases du groupe électrogène	Disponible sur le pupitre du groupe
Tensions groupe électrogène	Disponible sur le pupitre du groupe
Fréquence du groupe électrogène	Disponible sur le pupitre du groupe
Vitesse de rotation du groupe	Disponible sur le pupitre du groupe
Consommation en gasoil du groupe électrogène	Mesurée par l'opérateur*
Intensité demandée par la charge	Mesurée avec la pince ampermétrique

* le groupe électrogène n'est pas équipé d'un compteur volumétrique, le niveau du carburant du réservoir est affiché en % au niveau du pupitre.

Dans le cadre de l'acquisition des différents paramètres et ce en rapport avec l'utilisation du système hybride, nous avons défini deux protocoles (voir les contenus dans les annexes 2 et 3).

✓ Protocole N°1 : test sur le groupe électrogène en fonctionnement seul

Ce protocole sert à mesurer les performances du groupe électrogène, en termes de consommations horaire et spécifique.

Le groupe électrogène n'est pas équipé d'un compteur volumétrique qui donne une mesure précise de sa consommation de gasoil en l/h ; ce qui a nécessité de modifier le circuit de l'alimentation en carburant du groupe électrogène. Cette modification a consisté à débrancher les circuits combustibles du réservoir, pour les ramener ensuite à un Becher gradué 2000 ml. En d'autres termes, nous avons remplacé le réservoir du groupe par un récipient gradué (Becher) sur lequel il est possible de lire le volume du carburant.

Le circuit d'alimentation en carburant permet à la pompe de gasoil d'amener le gasoil depuis le réservoir jusque dans la chambre de combustion. Le gasoil non consommé dans cette chambre de combustion retourne dans le réservoir par le circuit retour combustible.

✓ Protocole N°2 : test sur le système hybride

Ce protocole permet de relever les différents paramètres nécessaires pour évaluer et analyser les performances dans le cas d'un fonctionnement hybride. Les essais à charges constantes et à profil variable sont réalisés suivant ce protocole.

Les contenus des deux protocoles sont en annexes 2 et 3.

Certains paramètres sont extraits à partir de la connaissance d'autres paramètres ;

L'intensité AC délivrée par le système PV n'est pas directement mesurée, elle est déduite sachant que le courant demandé par la charge, sur la phase 1, est la somme des courants délivrés par le groupe électrogène et le système PV :

$$I_{PV,AC} = I_{CH,ph1} - I_{GE,ph1} \quad (5)$$

La puissance P_{GE} , délivrée par le groupe électrogène, est calculée à partir des paramètres de tension et de courant lus sur le pupitre de commande du groupe électrogène :

$$P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

La consommation spécifique du groupe électrogène est calculée, en rapportant sa consommation horaire sur sa puissance totale délivrée.

$$\text{consommation spécifique} \left(\frac{l}{kWh} \right) = \frac{\text{consommation horaire} (l/h)}{\text{puissance délivrée}} \quad (7)$$

III.5.2 Séquence des essais

- **Essais de performance du groupe électrogène seul**

Pendant cet essai, le groupe électrogène seul est en fonctionnement et ses performances sont évaluées en termes de consommation horaire de carburant (l/h) et de consommation spécifique (l/kWh). Au cours de cet essai la consommation en litre du moteur ainsi que les paramètres électriques de l'alternateur sont relevés chaque trente minutes. Les paramètres électriques en question sont les suivants : courants, tensions, fréquence et vitesse de rotation.

- **Essais du système hybride sous charges constantes**

Ces essais à charge constante consistent à utiliser le système hybride sous une charge constante, pendant toute la durée de son fonctionnement journalier. Les paliers de charges de constantes utilisés au cours de ces essais sont les suivants : 1,8, 3,6, 5,4 7,2 et 9,2 kW. L'objectif de ces essais est d'observer le comportement du système hybride en termes de performance et de répartition de charges.

- **Essais du système hybride sous profils de charges 1 et 2**

Contrairement aux essais à charge constante, ces essais consistent à faire fonctionner le système hybride PV/GE sans stockage, pour répondre à des charges qui varient dans le temps. La variation de charge en fonction du temps est appelée profil de charges. Deux profils de charges ont été définis et sont simulés à l'aide des bancs de charges triphasés. Dans les deux profils de charge, la charge maximale est de 8 kW et celle minimale est de 1,8 kW.

III.6 Les objectifs de l'étude

L'objectif général de l'étude est, à partir de l'étude expérimentale du prototype, de dégager des résultats à même de servir dans le cadre de développement de projets futurs dans le domaine des systèmes hybrides PV/GE sans stockage.

En fonction des profils de charges, Il s'agira précisément d'évaluer les performances du prototype :

- Evaluer la ressource solaire pendant les mois d'essais ;
- Evaluer les performances du champ solaire ;
- Evaluer les performances du groupe électrogène seul ;
- Evaluer les ratios puissance solaire/puissance groupe, en fonctionnement hybride (répartition de charge entre solaire et groupe électrogène);
- Comparer le fonctionnement du groupe électrogène en fonctionnement hybride et en fonctionnement seul ;
- Faire des propositions d'optimisation.

IV. RESULTATS

Radiation solaire

Les puissances solaires, exprimées en W/m^2 , mesurées à l'aide du solarimètre ont été relevées entre 08 et 17h30 mn. Ces données concernent la période des essais réalisés dans les mois de Mars, Avril et Mai. Au niveau de la station météorologique de Kamboinsé, l'ensoleillement global est enregistré à l'aide d'un pyranomètre. La figure 24 qui concerne les moyennes mensuelles d'ensoleillement, montre que les mesures de la station et celles du prototype sont proches.

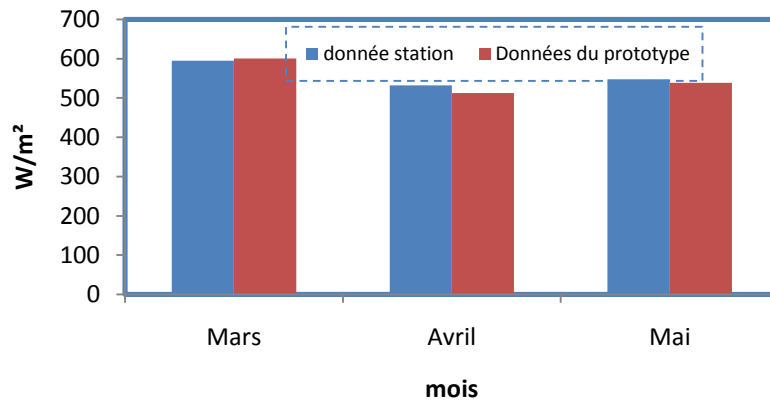


Figure 24: rapprochement entre données station météo et prototype

Les modules photovoltaïques

En général, les mois d'Avril, de Mars et de Mai sont les mois les plus ensoleillés de l'année, au Burkina. Pendant toute la durée de nos essais entre le 1^{er} mars et le 20 mai 2010, la puissance maximale enregistrée par le champ PV a été de 2,5 kW pour un ensoleillement de 995 W/m^2 . Cette puissance est inférieure à la puissance crête du champ PV qui est de 2,85 kW, nous expliquerons cela dans la suite du travail.

IV.1 Groupe électrogène

Le fonctionnement du groupe seul, c'est-à-dire que le système PV est mis hors utilisation, nous a permis de mesurer sa consommation horaire en l/h ainsi que sa consommation

spécifique en l/kWh. Le groupe électrogène est soumis à différentes charges allant de 1,8 à 8 kW, ce qui permet d'observer son fonctionnement sous des régimes de faible et forte charges.

La consommation horaire en l/h, du groupe électrogène est définie comme le rapport de la consommation en litre de gasoil sur le temps de fonctionnement du groupe. Les essais sur le groupe, dont la puissance est 11,5 kVA, montrent que ce paramètre varie entre 1,2 litres pour une charge appliquée au groupe de 1,8 kW et 2,9 litres pour une charge appliquée au groupe de 8 kW. La différence entre ces deux valeurs est donc de 1,6 litre en une heure, ce qui est considérable sachant que le groupe électrogène fonctionne en continu.

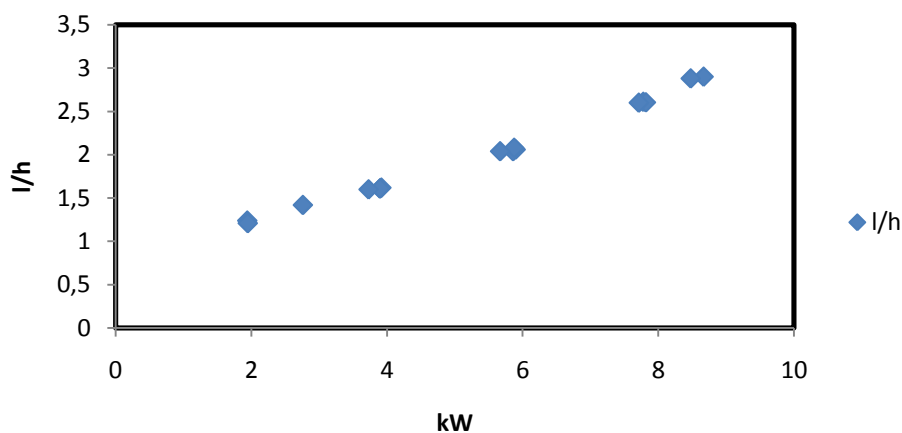


Figure 25: consommation horaire groupe électrogène 11,5 kVA

La consommation spécifique du groupe, en l/kWh est définie comme le rapport, pendant une durée de fonctionnement donnée, de la consommation de gasoil sur l'énergie délivrée. Ce paramètre est important et permet d'évaluer les performances du groupe électrogène. Les essais montrent que les valeurs de ce paramètre varient entre 0,33 et 0,63. La consommation spécifique est meilleure quand sa valeur est faible, ce qui correspond à un fonctionnement en charges élevées. Pour les faibles charges, la consommation spécifique est élevée et traduit un mauvais rendement du groupe.

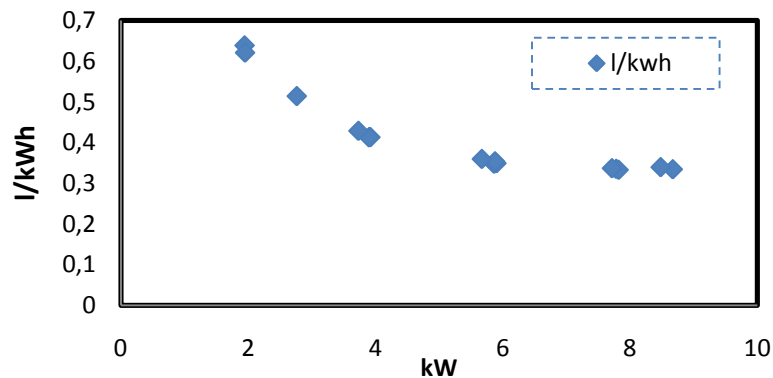


Figure 26: consommation spécifique du groupe électrogène 11,5 kVA

Les essais sur le groupe électrogène se sont déroulés en cours de journée entre 08 heures et 17 heures ; les températures ambiantes enregistrées ce jour montre une variation entre 30 et 44°C.

Dans le but de connaître l'effet de la température ambiante sur la consommation du groupe électrogène en gasoil, les essais ont été réalisés, un autre jour, à trois moments différents de la journée à savoir le matin à 08h30 à une température moyenne de 32,25°C, à 12h30 à une température moyenne de 38,1°C et l'après midi à 17h20 à une température moyenne de 37,85°C. La consommation du groupe en gasoil, au cours de trente minutes d'essais, a été de 1,31 litres pour l'essai du matin et celui de midi et 1,30 litres pour celui de l'après midi. Les résultats montrent que la consommation horaire du groupe, dans les mêmes conditions de charges reste identique et n'est pas influencée par l'évolution de la température ambiante. Ce qui nous a permis de formuler l'hypothèse selon laquelle la consommation horaire du groupe électrogène n'est pas sensible à la température ambiante.

La demande d'énergie est entièrement satisfaite par la production de l'énergie due au fonctionnement du groupe électrogène seul. Une comparaison entre l'énergie demandée et l'énergie produite, montre qu'un excès d'énergie électrique est produit par le groupe électrogène ; en moyenne le surplus d'énergie est de 7% par rapport à la demande, avec une plage de variation entre 4 et 9%.

IV.2 Système hybride

IV.2.1 Essais à charge constante 1,8 kW

Cette charge représente environ 20% de la puissance nominale en kW du groupe électrogène. Les paramètres électriques au cours de cet essai ne sont pas stables. Pour une moyenne de puissance solaire de 536 W/m^2 , la puissance PV est 12,7% la puissance totale de la charge; cette même puissance représente 38% des 0,6 kW de la phase 1. Le groupe avec une puissance moyenne de 1,79 kW assure quasiment la totalité de la puissance demandée. A ce niveau de charge, la puissance fournie par le générateur PV ne change pas la puissance du GE qui reste pratiquement constante (figure 27-b). La consommation spécifique du GE ne varie pas beaucoup, sa moyenne atteint $0,685 \text{ l/kWh}$ (figure 27 –c).

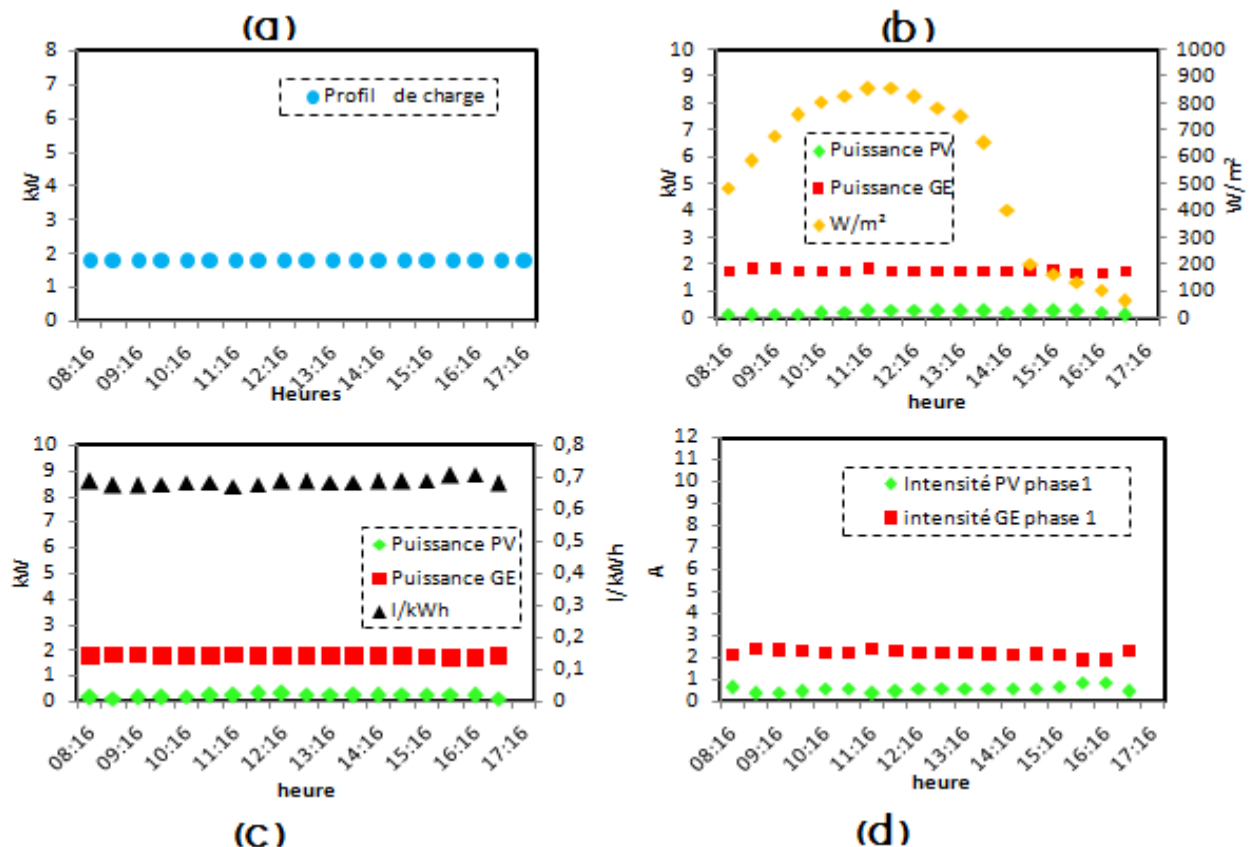


Figure 27: courbes charge constante 1,8 kW, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) consommation spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.2 Essais à charge constante 3,6 kW

Cette charge constante représente environ 40% de la puissance nominale en kW du groupe électrogène (Figure 28-a). Pour une puissance moyenne solaire de 334 W/m², la puissance moyenne PV est de 0,849 kW, soit 23,5% de la puissance totale demandée par la charge; cette même puissance représente 70,7% des 1,2 kW de la phase 1. La figure 28-d montre que sur la phase 1, le générateur PV délivre un courant supérieur à celui du GE. Le groupe électrogène dont la puissance moyenne fournie est 3,01 kW assure 83,6% de la puissance totale demandée par la charge. On remarque cependant que pendant les moments de fort ensoleillement, la puissance du GE est écrêtée par la puissance fournie par le générateur PV (figure 28-b). La moyenne de la consommation spécifique du GE est 0,477 l/kWh.

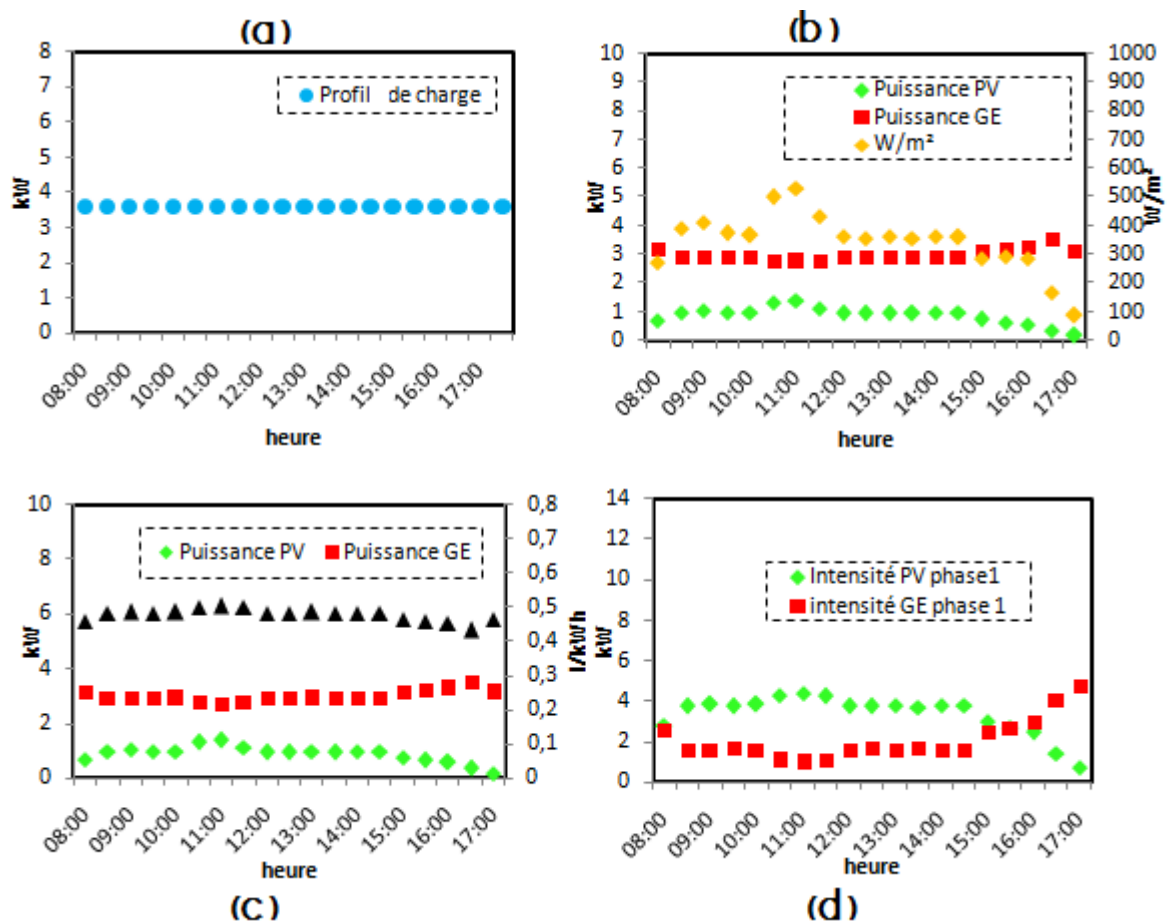


Figure 28: courbes charges constantes 3,6 kW, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) rendement spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.3 Essais à charge constante 5,4 kW

Cette charge constante représente environ 60% de la puissance nominale en kW du groupe électrogène (figure 29-a). Pour une puissance moyenne solaire de 627 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,549 kW, soit 28,6% de la puissance totale demandée par la charge ; cette même puissance représente 86% des 1,8 kW de la phase 1 ; la figure 29-d montre que sur la phase 1, le générateur PV délivre un courant supérieur à celui du groupe électrogène. Ce dernier dont la puissance moyenne est 4,37 kW assure 80% de la puissance totale demandée par la charge. On remarque cependant que pendant les moments de fort ensoleillement, la puissance du GE est écrêtée par la puissance fournie par le générateur PV (figure 29-b). La consommation spécifique du GE dont la moyenne est 0,393 l/kWh, est faiblement supérieure, au moment des forts ensoleillements.

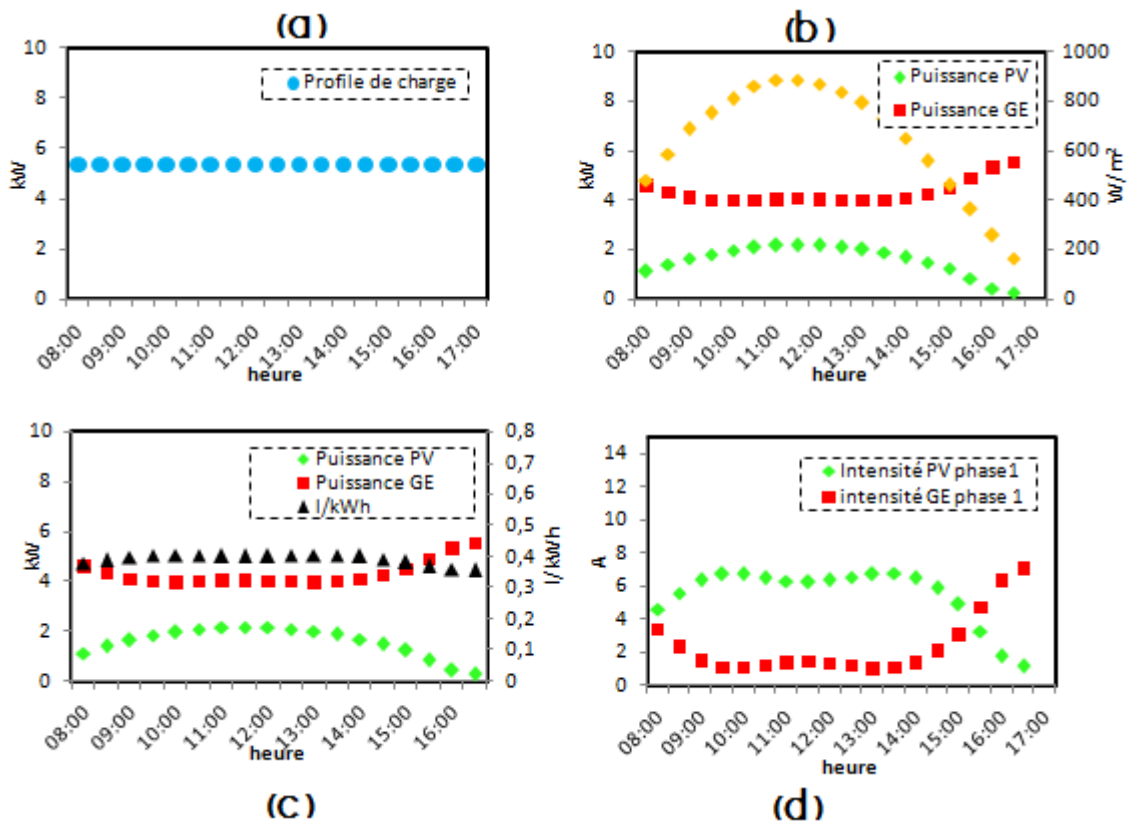


Figure 29: courbes charges constantes 5,4 kW, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) consommation spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.4 Essais à charge constante 7,2 kW

Cette charge constante représente environ 80% de la puissance nominale en kW du groupe électrogène (Figure 30-a). Pour une puissance moyenne solaire de 520 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,300 kW, soit 18% de la puissance totale demandée par la charge; cette même puissance représente 54% des 2,4 kW de la phase 1 ; la figure 30-d montre que sur la phase 1, le générateur PV délivre un courant supérieur à celui du groupe électrogène. Ce dernier dont la puissance moyenne est 6,4 kW assure 88% de la puissance totale demandée par la charge. On remarque cependant que pendant les moments de fort ensoleillement, la puissance du GE est écrêtée par la puissance fournie par le générateur PV (Figure 30-b). La consommation spécifique du GE dont la moyenne est 0,344 l/kWh, varie faiblement à la hausse au moment des forts ensoleillements.

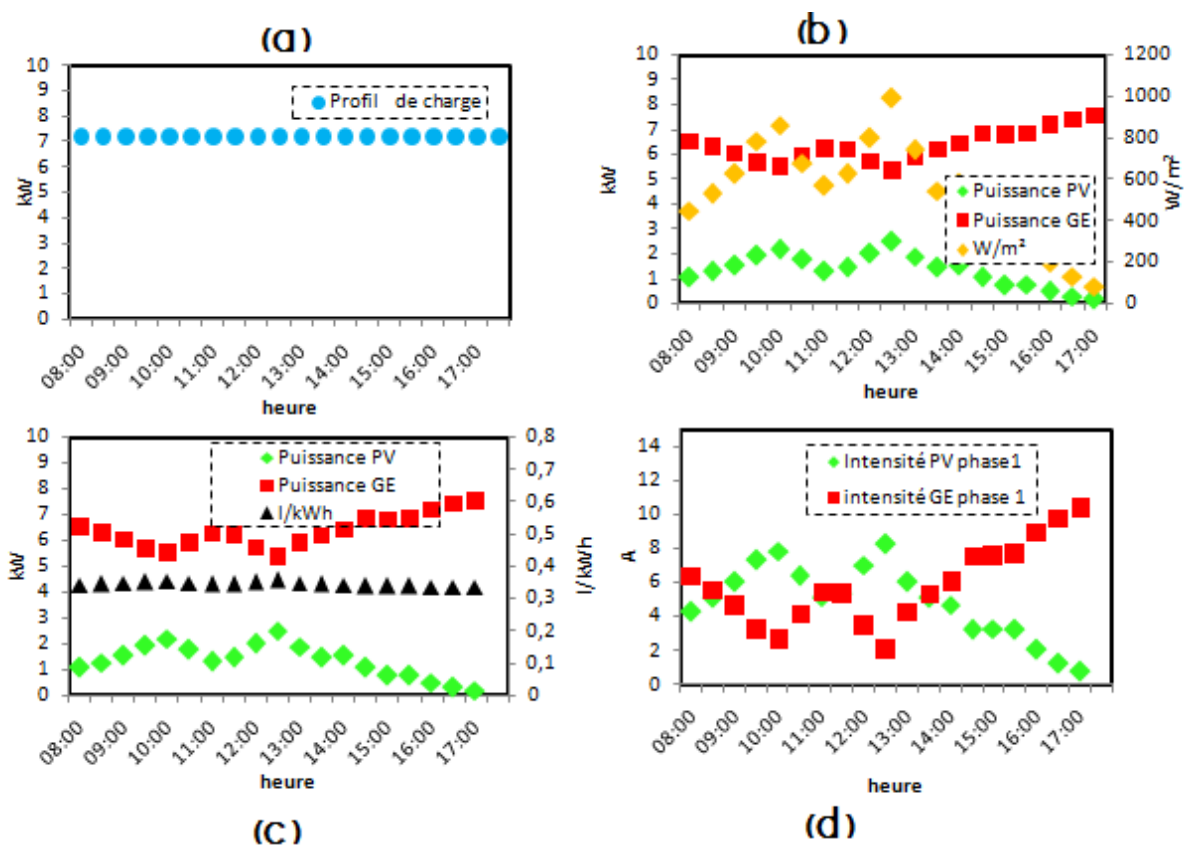


Figure 30: courbes charges constantes 7,2 kW, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) consommation spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.5 Essais à charge constante 9,2 kW

Cette charge constante représente la puissance nominale en kW du groupe électrogène (figure 31-a). Pour une puissance moyenne solaire de 534 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,341 kW, soit 14,7% de la puissance totale demandée par la charge; cette même puissance représente 43,8% des 3,06 kW de la phase 1 ; la figure 31-d montre que sur la phase 1, le générateur PV délivre un courant supérieur à celui du GE, au moment des pics d'ensoleillement. Le groupe électrogène dont la puissance moyenne est de 8,27 kW assure 89% de la puissance totale demandée par la charge. On remarque cependant que pendant les moments de fort ensoleillement, la puissance du GE est écrêtée par la puissance fournie par le générateur PV (figure 31-b). La consommation spécifique du GE dont la moyenne est 0,336 l/kWh, est pratiquement constant.

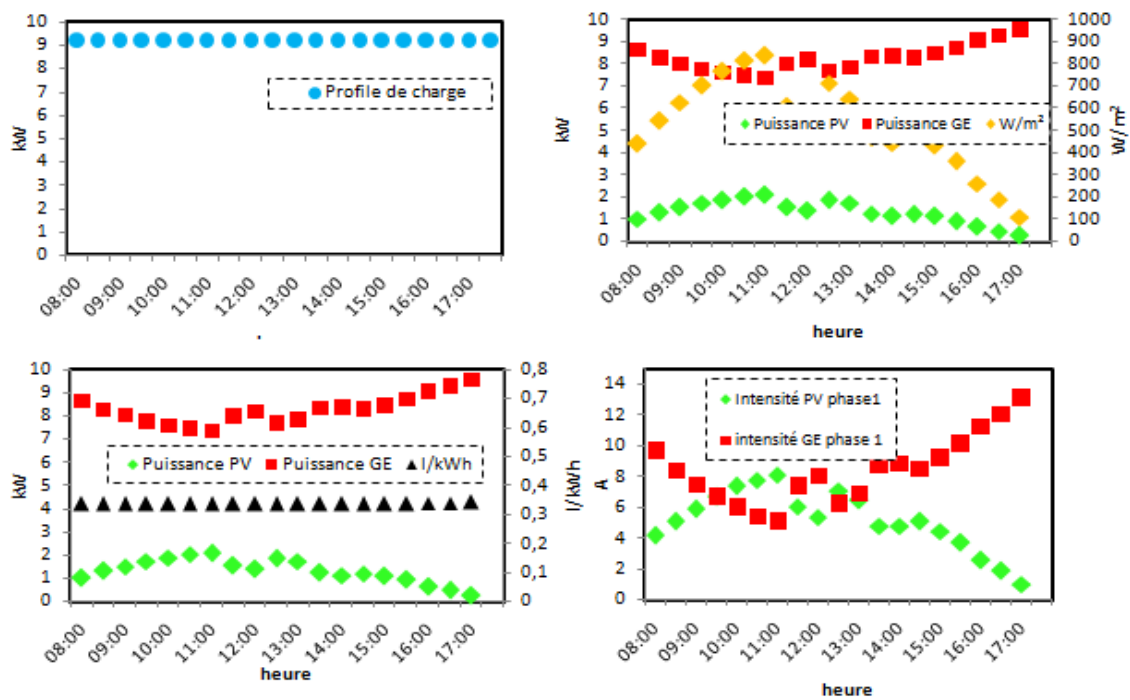


Figure 31: courbes charges constantes 9,2 kW, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) rendement spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.6 Les essais sous profils de charges variables

Les essais sous profils de charges variables montrent une répartition des puissances de charges entre le système PV et le groupe électrogène. La contribution du groupe électrogène sur les trois phases est toujours supérieure à celle du PV. Le fonctionnement montre que pendant les périodes de faibles charges, les performances du groupe sont faibles (0,66 l/kWh), cependant une meilleure consommation spécifique (0,336 l/kWh) est constatée pendant les périodes de fortes charges.

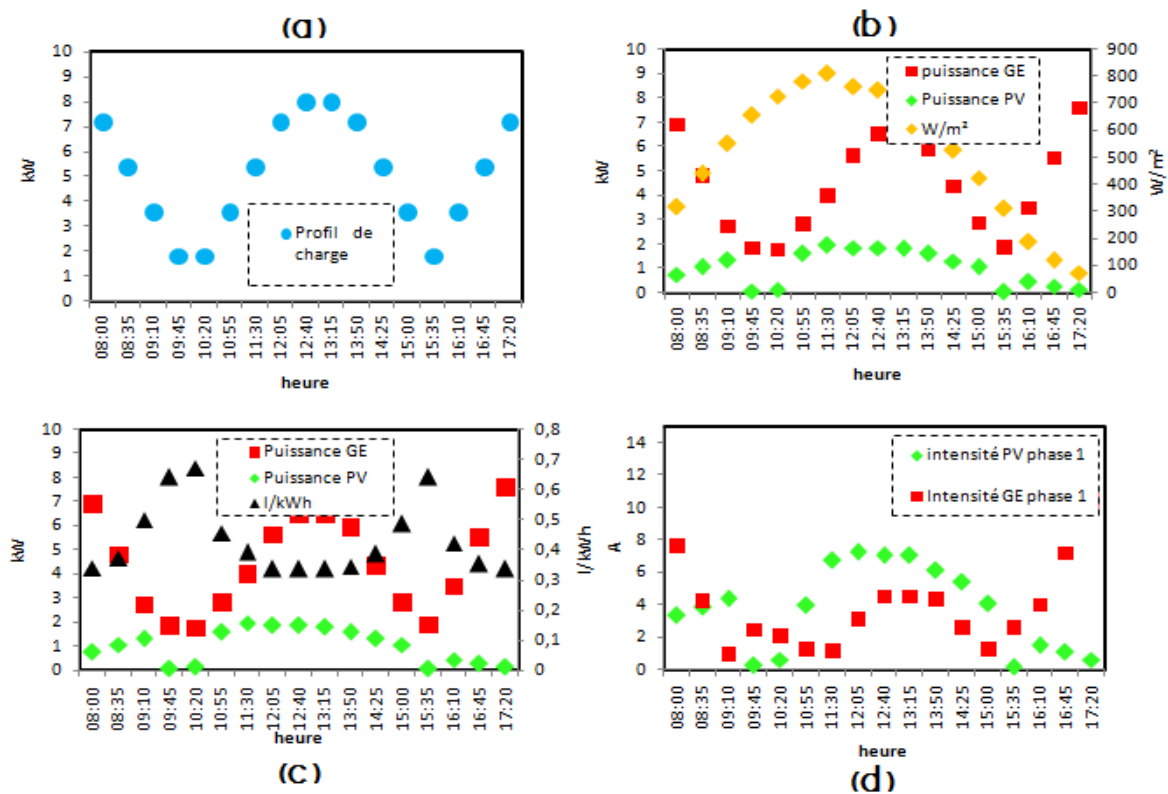


Figure 32: courbes profil de charges N°1, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) consommation spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

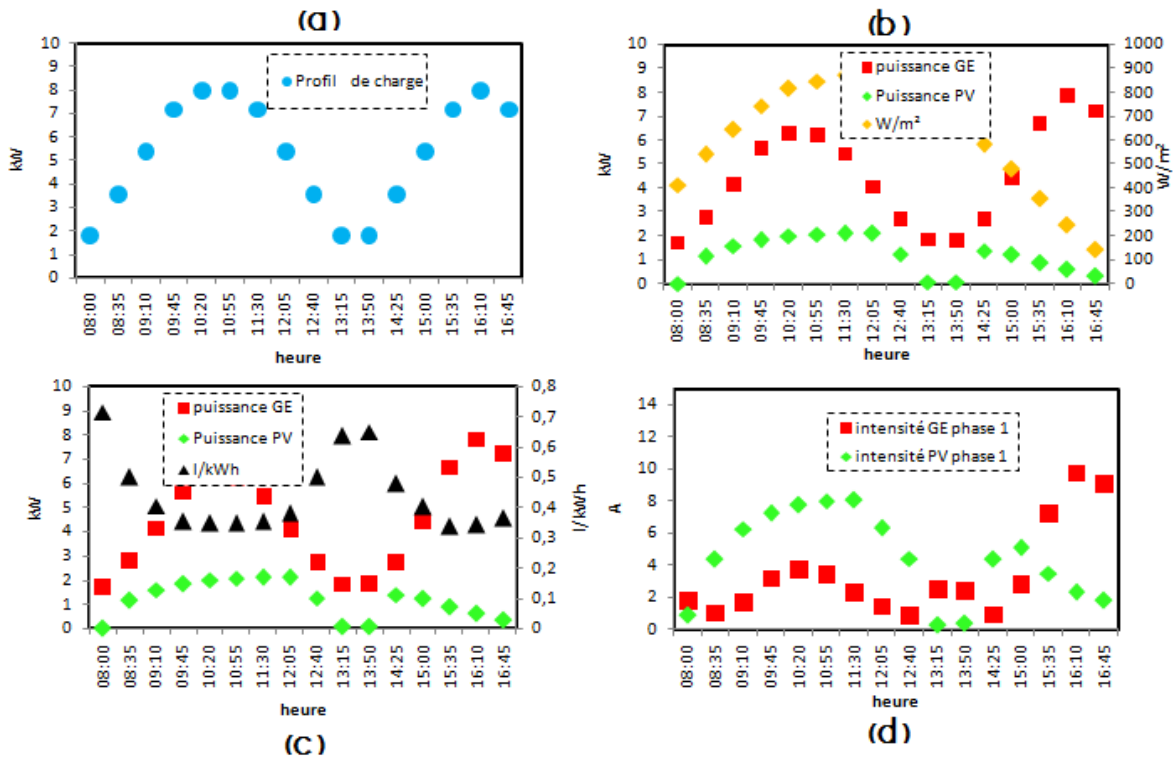


Figure 33: courbes profil de charges N°2, (a) profil de charge, (b) répartition de charge entre PV et GE, (c) consommation spécifique du GE, (d) intensité PV et GE sur la phase 1

IV.2.7 Comparaison entre système hybride PV/GE et groupe électrogène seul

Le système hybride PV/GE sans stockage présente une consommation horaire en gasoil plus faible que celle du groupe en fonctionnement seul. La différence est importante quand la charge est forte. A faible charge, l'avantage comparatif des systèmes hybrides sur le groupe électrogène seul est faible (figure 34).

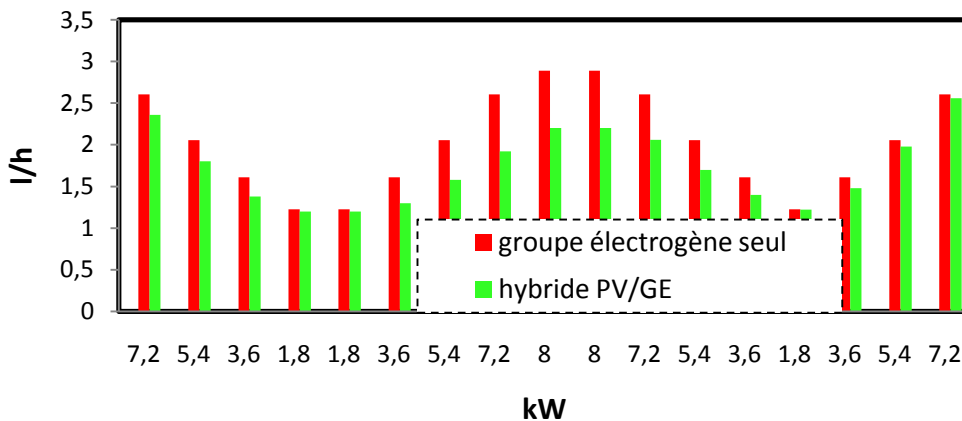


Figure 34: comparaison entre consommation horaire centrale hybride et groupe seul

Lorsque le système hybride PV/GE sans stockage fonctionne sous faible charge, nous remarquons que la consommation spécifique est supérieure à celle, quand le groupe électrogène fonctionne seul. Cette différence est réduite quand la puissance délivrée par le groupe prend des valeurs supérieures (7,2 et 8 kW); donc aux charges élevées la consommation spécifique des deux systèmes est pratiquement la même (figure 35).

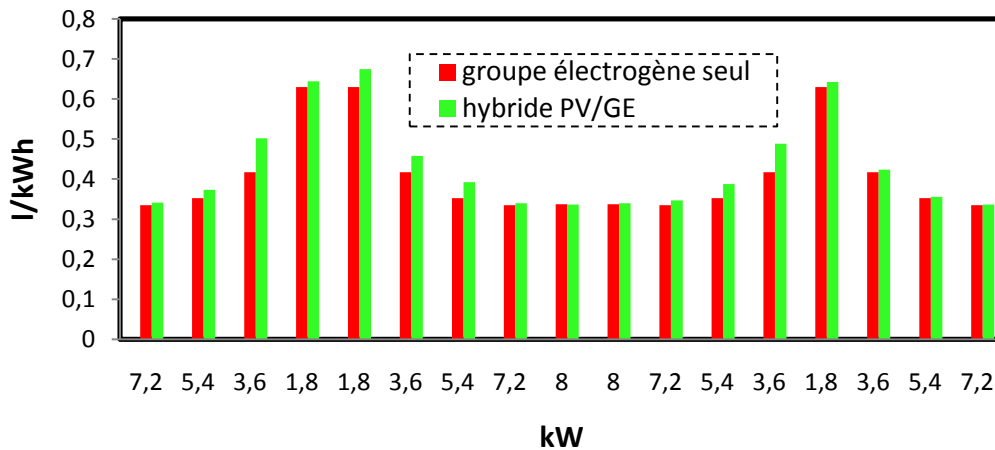


Figure 35: comparaison entre consommation spécifique centrale hybride et groupe seul

V. DISCUSSIONS ET ANALYSES

V.1 Performance des modules photovoltaïques

La puissance maximale délivrée par le système PV (modules et onduleur monophasé), pendant la période des essais, est de 2,5 kW, sous un ensoleillement de 995 W/m². En considérant un rendement de 95% de l'onduleur et en utilisant l'équation 2, la puissance maximale délivrée par les modules est de 2,63 kW. Nous remarquons que nous n'atteignons que 92,2% de la puissance crête installée. L'équation 3, montre qu'un ensoleillement inférieur à 1000 W/m² ou des températures ambiantes élevées (supérieures à 25°C) contribuent à diminuer la puissance délivrée par les modules, d'où cette baisse de 7,8% par rapport à la puissance crête. D'autres facteurs sont également responsables des pertes de puissance [20] ; ils sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 7: facteurs secondaires sur les modules PV

Effet secondaires	Plage
Température	1% à 10%
Angle d'incidence	1% à 5%
Distribution spectrale	0 à -3%
Incertitudes des données du constructeur	0 à 5% ou plus
vieillesissement	5% au delà de la durée de vie
disparité	2%
Saletés et poussière	0 à 15%
neige	Dépendant du site
Ombreage partiel	Dépendant du site
Fileries et diodes	3%

La connaissance de la corrélation entre la puissance PV et l'ensoleillement global est importante, en matière de dimensionnement. L'équation 3 donne cette corrélation. Les données expérimentales à charges constantes montrent que cette corrélation, est linéaire.

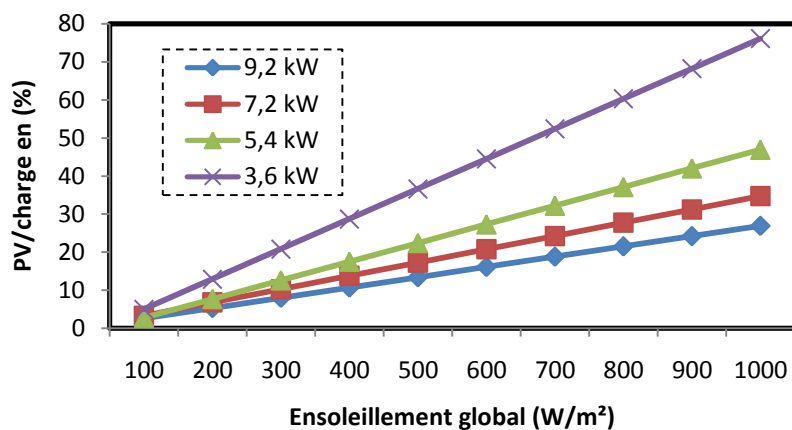


Figure 36: corrélation puissance ratio PV/charge et ensoleillement

V.2 Les performances de l'onduleur

Les données enregistrées dans le Sunny Boy, permettent d'évaluer le rendement de l'onduleur monophasé. Les données d'entrée de l'onduleur sont le courant (I_{PV}) et la tension PV (U_{PV}) ; la puissance P_{AC} délivrée est la donnée de sortie. Le rendement est le rapport de la puissance de sortie sur celle d'entrée. Le rendement maximal enregistré est 95,56% ; cette valeur est très proche du rendement maximal de 95,6% donné par le du constructeur.

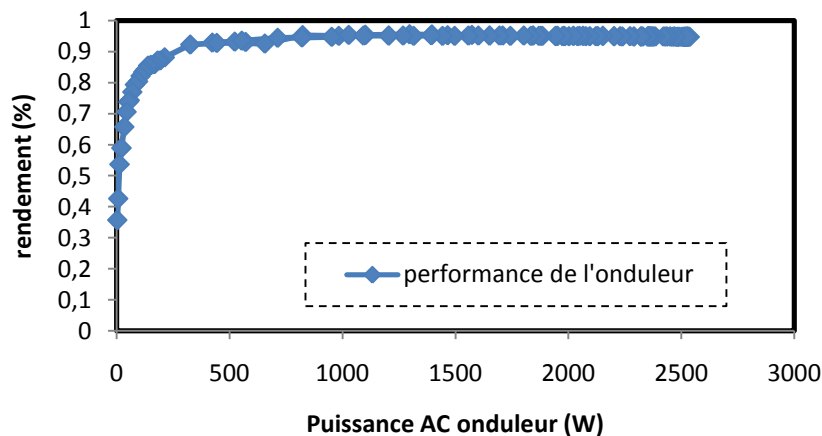


Figure 37: performance de l'onduleur Sunny Boy

V.3 Groupe électrogène seul

Les consommations horaire et spécifique d'un groupe électrogène sont des paramètres importants pour évaluer ses performances. Les résultats de l'expérience montrent qu'il existe une corrélation entre la consommation du groupe électrogène et la puissance délivrée.

$$\text{consommation horaire (l/h)} = 0,98 \cdot e^{0,126 \cdot P} \quad (8)$$

La figure suivante compare la consommation horaire de notre groupe à celle d'un autre de puissance plus élevée. Nous nous rendons compte que la consommation horaire est proportionnelle à la taille du groupe électrogène.

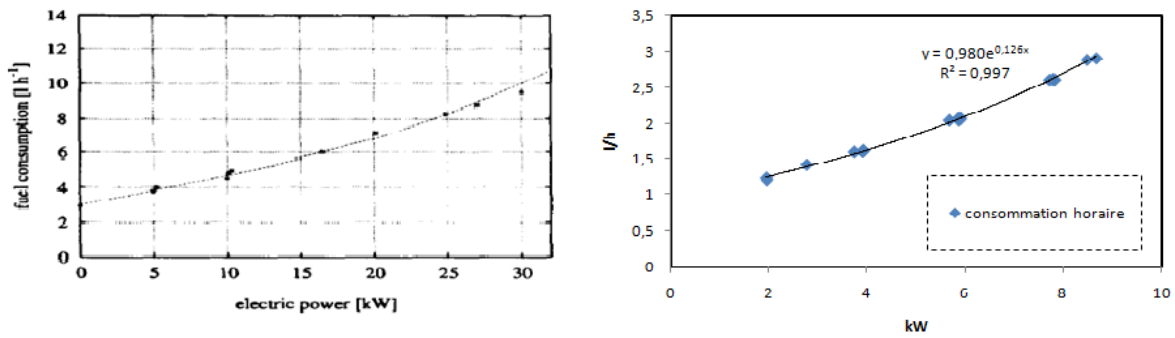


Figure 38: consommation horaire groupes électrogènes de 30 kW et 9,2 kW

L'analyse de la consommation spécifique du groupe électrogène seul montre que 7,2 kW est le point optimal de fonctionnement, avec une valeur de 0,331 l/kWh. Cette puissance correspond à 80% de la puissance nominale en kW ; ce résultat est le même que dans la littérature.

Cependant dans la littérature, la corrélation entre puissance délivrée et la consommation horaire est souvent donnée par un modèle linéaire. Les auteurs les plus cités sont Skarstein et Ulhen [21] qui ont obtenu la relation suivante :

$$F(t) = 0,246 P_{DG_i}(t) + 0,08415 P_{R_i} \quad (9)$$

Où P_{DG_i} est la puissance délivrée par le groupe en kW, P_{R_i} la puissance nominale du groupe en kW et $F(t)$ sa consommation horaire (l/h).

En effet, dans le cadre d'une optimisation, il est pratique de programmer une équation linéaire. La courbe linéaire suivante est celle obtenue à partir de nos essais, la corrélation est très proche de celle obtenue par Skarstein et Ulhen.

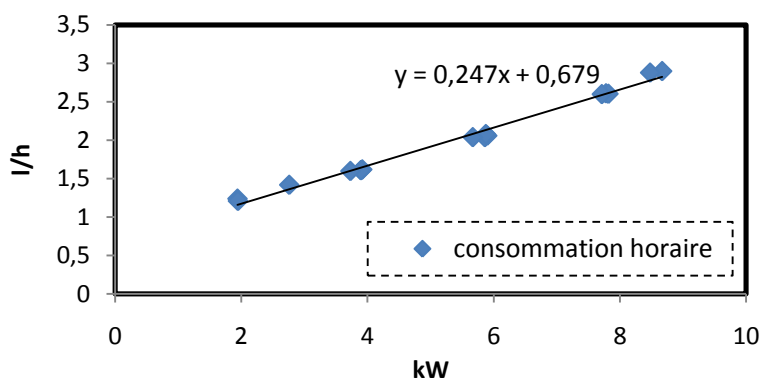


Figure 39: corrélation linéaire de la puissance et de la consommation horaire du groupe électrogène

V.3 Système hybride PV/GE

Dans le cas d'un fonctionnement hybride, la puissance délivrée par le système photovoltaïque dépend de l'ensoleillement. L'énergie délivrée par le système PV est entièrement consommée par la charge, le groupe électrogène produit le complément d'énergie. Dans un tel fonctionnement on remarque que le système PV se comporte comme une charge négative, ce qui donne lieu à deux situations :

Situation (a) : Quand la charge est faible, la contribution du PV bien que marginale, a tendance à diminuer la puissance demandée au groupe électrogène. Dans un tel cas, le groupe électrogène est confronté à une charge encore plus faible. La performance du groupe électrogène dans le système hybride est plus médiocre que quand le groupe fonctionne seul.

Situation (b) : quand la charge est élevée, proche de la puissance nominale, la contribution du groupe électrogène est grande. Le système PV comme nous l'avons déjà dit, se comporte comme une charge négative, et contribue à baisser la puissance demandée au groupe à un niveau proche de 80% de sa puissance nominale. Dans ce cas, la puissance PV écrête la puissance demandée au groupe électrogène, ainsi son point de fonctionnement tend vers le point optimal. Ce qui explique pourquoi, les performances du groupe dans le système hybride sont bonnes.

L'essai à charge constante de 9,2 kW répond à la situation (b) ; c'est le point de fonctionnement optimal, avec une moyenne de consommation spécifique de 0,336 l/kWh. Cette valeur est très proche de la consommation optimal (0,331 l/kWh) du groupe en fonctionnement seul.

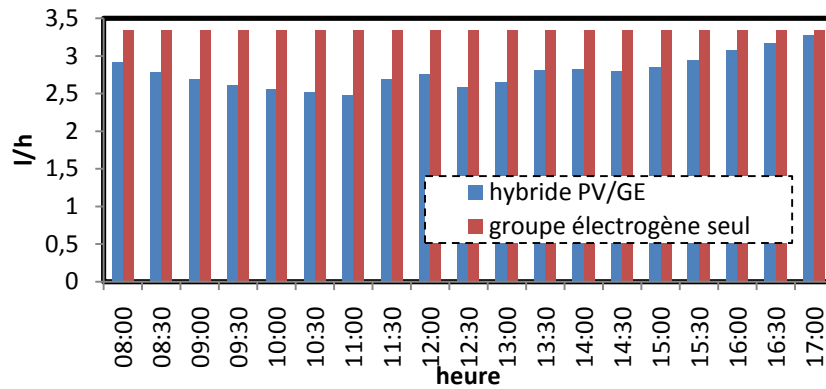


Figure 40: comparaison consommation horaire entre centrale hybride PV/GE et groupe électrogène seul, à 9,2 kW

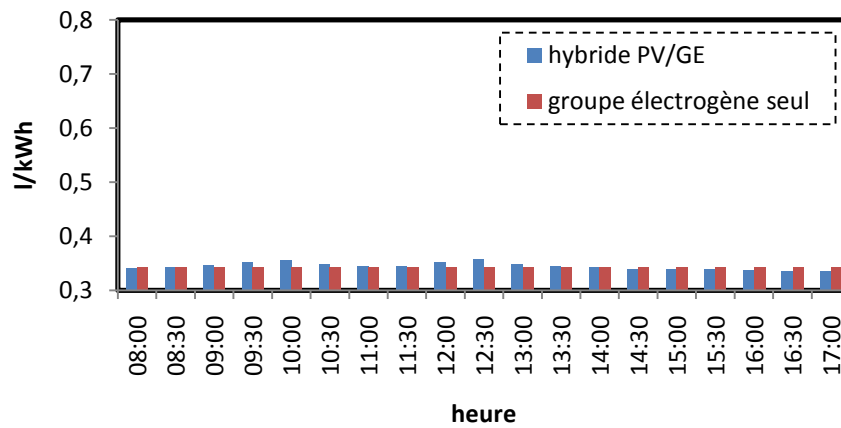


Figure 41: comparaison consommation spécifique entre centrale hybride et groupe électrogène seul, à 9,2 kW

V.4 Propositions d'optimisation

En vue d'améliorer les performances du groupe électrogène dans le système hybride PV/GE sans stockage, il est nécessaire de définir des contraintes de fonctionnement pour ce dernier. [22] :

Pour éviter que le groupe fonctionne à très faible charge, c'est-à-dire à moins de 30% de sa puissance nominale, il faut définir une puissance minimale $P_{GE \min}$ en dessous de laquelle, il n'est pas autorisé à fonctionner ;

Les cycles de démarrage-arrêt fréquents sont à l'origine de l'usure des pièces et du vieillissement du groupe électrogène, il faut définir un temps minimum de fonctionnement du groupe électrogène, une fois démarré ;

Eviter de surcharger le groupe électrogène, ce qui revient à le faire fonctionner à une puissance toujours inférieure à sa puissance nominale.

Dans le cas d'un système hybride PV/GE sans stockage avec un seul groupe électrogène, les propositions d'optimisation sont les suivantes :

Si $P_{\text{demande}} > P_{\text{GE min}}$, le système hybride PV/GE fonctionne pour satisfaire la demande.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire que la puissance demandée est inférieure à la puissance minimale, seul le groupe électrogène est utilisé pour satisfaire la demande [7].

Ce schéma de fonctionnement qui consiste souvent à faire fonctionner le groupe électrogène seul, quand la puissance demandée est faible, annule la contribution du système PV dans la satisfaction de la demande en énergie (en cas de non stockage) ; ce qui constitue une faiblesse.

Dans le but d'utiliser toute la production de l'énergie PV, deux autres solutions sont possibles :

Prévoir des charges dites « dump load » exemple remplissage d'un château d'eau. Ces charges sont mises en contribution dans les moments de faible charge, dans le but de permettre au groupe de fonctionner dans de bonnes conditions ;

Aussi, le système PV peut être associé à plusieurs groupes électrogènes en parallèle et de tailles différentes. Cette technique donne des résultats satisfaisants pour les systèmes hybrides PV/éolien ; une stratégie de commande est nécessaire pour démarrer les groupes électrogènes. Des seuils de fonctionnement sont définis en tenant compte de l'intersection entre les courbes de performances des différents groupes électrogènes [22].

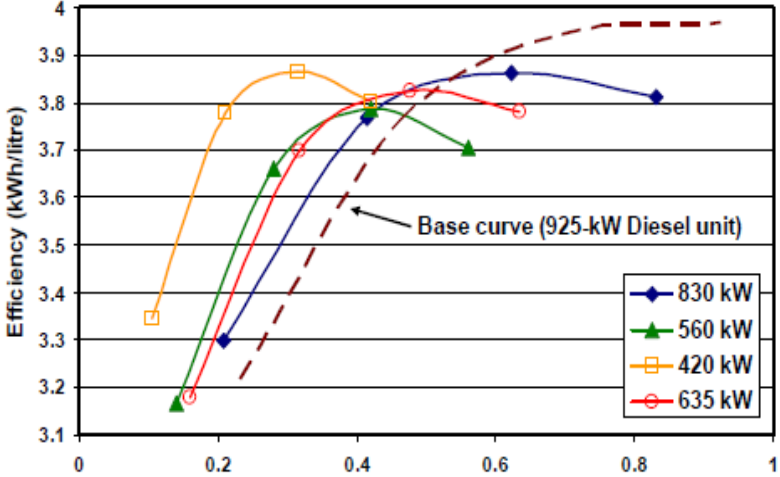


Figure 42: intersection entre des courbes de performances de quatre groupes électrogènes

VI. ANALYSE ENVIRONNOMIQUE

VI.1 Performances environnementales du champ PV

Le prototype Flexy-Energy a été mis en service le 10 octobre 2009 ; A la date du 20 Mai 2010, l'afficheur Sunny matrix montre une quantité de CO₂ évitée de 2514,7 kg, pour un temps de fonctionnement de l'onduleur solaire effectif de 2422,44 heures, soit 100 jours.



Figure 43: informations affichées sur le Sunny Matrix

Les performances environnementales de la centrale hybride PV/GE sans stockage, en fonctionnement sous les deux profils de charges sont résumées dans les tableaux suivants. Les moyennes journalières de quantité de CO₂ économisée est 8,85 kg pour le profil de charge 1 et 9,05 kg pour le profil de charge N°2, au cours des trois mois d'essais.

Tableau 8: performances journalières centrales hybrides, profil N°1

Désignation	unité	Mars	Avril	Mai
Energie demandée	kWh/j	42,38	42,6	42,6
Energie fournie par groupe électrogène	kWh/j	34,94	38,09	37,99
Energie fournie par le PV	kWh/j	11,45	8,98	9,33
CO ₂ économisé	Kg/j	10,34	7,83	8,4
Consommation en gasoil	l/jour	14,35	14,81	14,81
Ensoleillement global	W/m ²	643,52	420,19	487,21
Ratio PV/groupe électrogène	%	32,8	23,6	24,8
Ratio énergie PV/Energie demandée	%	27%	21%	21%

Tableau 9: performances journalières, centrale hybride, profil 2

Désignation	unité	Mars	Avril	Mai
Energie demandée	kWh/j	39,8	39,5	39,5
Energie fournie par groupe électrogène	kWh/j	33,08	34,27	34,18
Energie fournie par le PV	kWh/j	10,09	9,66	10,47
CO ₂ économisé	Kg/j	9,05	8,7	9,4
Consommation en gasoil	l	13,53	13,78	13,7
Ensoleillement global	W/m ²	591,71	532,90	553,56
Ratio énergie PV/groupe électrogène	%	30,5	28,18	30,64
Ratio énergie PV/ énergie demandée	%	25	24,4	26,5

A partir de ces données, nous pouvons évaluer la quantité totale de CO₂ évitée au cours d'une année de fonctionnement de la centrale hybride, dans les mêmes conditions que pendant nos essais.

Tableau 10: quantité annuelle de CO₂ évité

Quantité annuelle de CO₂ évité	
Profil de charge N°1	3230,25 kg
Profil de charge N°2	3303,25 kg

Ces données sont idéales car elles ne tiennent pas compte des indisponibilités qui pourraient survenir sur le groupe électrogène en raison de pannes ou d'entretiens.

Une projection sur une période de 20 ans, donne une économie en CO₂ de 64.605 kg.

VI.2 Avantages environnementaux de la substitution du gasoil par les biocarburants dans les groupes électrogènes

En plus des CO₂ économisée par le système PV, le concept Flexy-Energy vise à améliorer la performance environnementale du groupe électrogène. En effet, les phases 2 et 3 du concept Flexy-Energy prévoient une substitution progressive du gasoil par les biocarburants.

La contribution des biocarburants au réchauffement climatique dû à l'effet de serre est insignifiante car le CO₂ émis pendant la combustion est recyclé par photosynthèse par les plantes [23]. Contrairement, la combustion des énergies fossiles, due au fait que le carbone ait été séquestré depuis des millions d'années, émet des CO₂ qui contribuent à l'effet de serre.

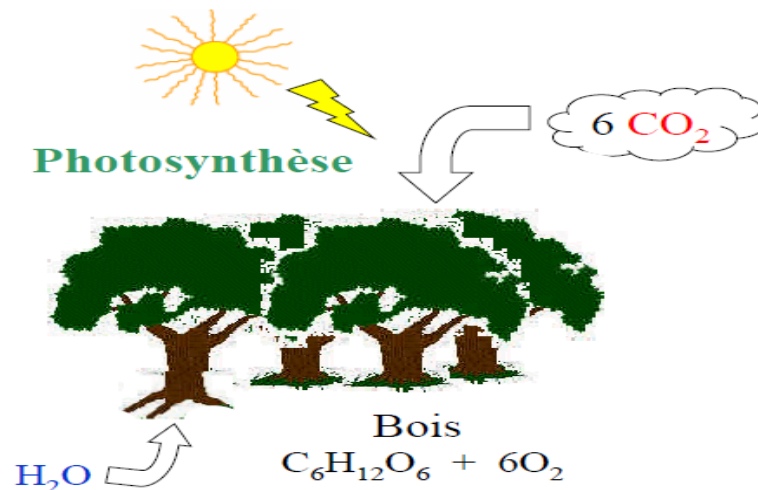


Figure 44: photosynthèse des plantes [4]

Les huiles végétales sont des biocarburants qui peuvent être mélangées au gasoil et utilisées dans les moteurs des groupes électrogènes. Cependant une utilisation directe des huiles végétales pures n'est possible que lorsque le moteur fonctionne en pleine charge et nécessite une modification du moteur, par l'installation d'un kit de bicarburation.

Les travaux effectués au LBEB, dans le cadre d'une thèse en cours et préparé par S. SIBIBE, montrent que pour un moteur en pleine charge, la combustion des huiles végétales émet légèrement moins de CO₂ et de NO_x (figure 45).

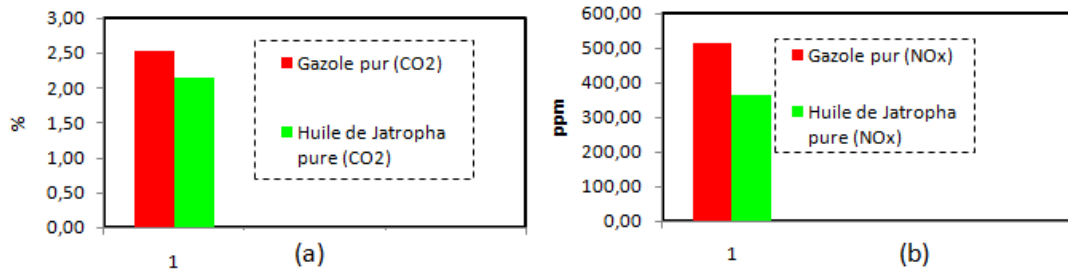


Figure 45: comparaison émissions de CO2 et NOx (source: travaux de S. SIDIBE, LBEB)

VI.2 Economies financières

Les essais réalisés au cours des trois mois ont permis de montrer que la centrale hybride PV/GE sans stockage consomme en moyenne 14,6 l par jour contre une consommation de 16,87 l du groupe électrogène en fonctionnement seul, pour un même profil des charges. Sur la base de ce résultat, nous pouvons estimer une économie annuelle de 829 l, soit une économie financière de 559 575 FCFA soit 853 Euro, en considérant le coût actuel du litre de gasoil à 675 FCFA.

Les conditions de fonctionnement de la centrale hybride, pendant nos essais, visaient à évaluer les performances de la centrale en vue de formuler des propositions d'optimisation. Le but principal n'était pas de réaliser des économies de carburant. Malgré cela, nous avons pu constater un gain annuel de 559 575 FCFA soit 853 Euro, ce qui est encourageant.

Notre étude nous a permis de dégager des voies d'optimisation des performances des centrales hybrides PV/Diésel sans stockage. La mise en œuvre des techniques d'optimisation permettra de faire des gains beaucoup plus importants que ceux obtenus dans le cadre de nos essais.

VI.3 Les retombées sociétales

VI.3.1 Lien entre énergie et pauvreté

L'accès à l'énergie électrique et aux autres sources d'énergies modernes est une nécessité mais ne suffit pas pour un développement économique et social. L'eau potable, les services de santé et d'éducatons, sont par exemple des priorités dans les populations pauvres. Cependant les services énergétiques modernes permettent d'améliorer la vie dans les milieux pauvres.

Par exemple, la lumière électrique permet de prolonger les activités au delà de la journée et améliore les résultats scolaires ; le réfrigérateur électrique permet de conserver les médicaments et d'offrir un service de santé de qualité et à moindre coût.

L'absence de l'énergie électrique et d'autres sources modernes d'énergies, dans un milieu donné, a pour conséquence de favoriser une utilisation intensive de la biomasse à des fins énergétiques. Les conséquences sont les suivantes [24] :

- Genre : les femmes passent plusieurs heures dans la journée à rassembler le bois de chauffe ; ce qui contribue à leur vulnérabilité car elles ne peuvent pas se consacrer à des activités génératrices de revenus ;
- Santé : les femmes et les enfants sont exposés aux gaz nocifs dus à la mauvaise combustion de la biomasse, surtout au moment de la cuisine ;
- Agriculture : certaines biomasses utilisées comme fertilisant des sols sont détournées pour satisfaire la demande en énergie des foyers ;
- Environnement : la coupe abusive du bois pour satisfaire les besoins énergétiques domestiques entraîne la désertification ainsi que d'autres impacts environnementaux.

L'absence de services énergétiques modernes entrave fortement le développement social et économique.

VI.3.2 Les huiles végétales

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont soit des graines ou des amandes soit des fruits. En fait, toutes les graines, tous les fruits et toutes les amandes contiennent de l'huile, mais seuls sont appelés oléagineux ceux qui servent à produire industriellement de l'huile et qui sont cultivés dans ce but.

En termes de caractéristiques, la composition chimique des huiles végétales correspond la plupart des cas à des mélanges de 95% de triglycérides et 5% de composants minoritaires dont les acides gras libres.

Les huiles végétales sont des biocarburants qui peuvent être mélangées au gasoil et utilisées dans les moteurs des groupes électrogènes ; elles sont obtenues à partir de plantes oléagineuses par simple pression à froid, sans solvant, décantée et filtrée, et sans modification

chimique. Les huiles végétales ont des caractéristiques similaires à celles du fioul. En particulier, un indice de cétane qui indique une aptitude au fonctionnement en cycle de Diesel.

Les huiles végétales peuvent être utilisées comme carburants :

- En tant que carburant industriel : par trans-estérification à l'aide d'un alcool méthylique ou éthylique ;
- En tant que carburant local : dans ce cas on privilégie l'usage sous leur forme naturelle.

La production des huiles végétales comme carburants locales suit plusieurs étapes, afin de garantir leur qualité ; ce sont : collecte, prétraitement, pressage et trituration, traitement et qualité, décantation et filtrage et enfin le stockage et la distribution [25].

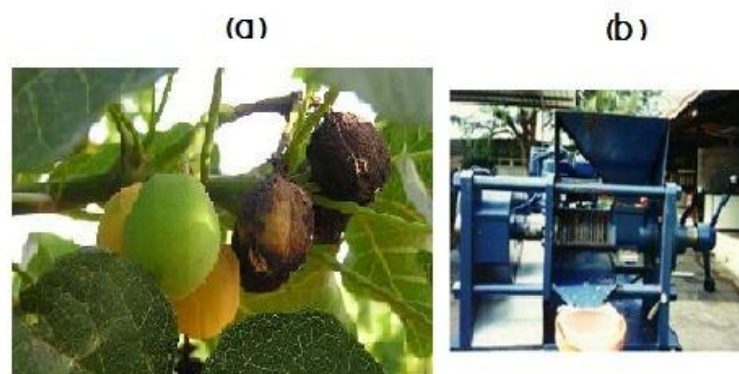


Figure 46: (a) graines de Jatropha, (b) presse pour la production artisanale d'huile végétale

La production des huiles végétales, comme biocarburant est une véritable opportunité qui permettra d'une part de résoudre la problématique de l'énergie et d'autre part de créer des emplois localement. Les populations rurales, à travers des moyens de production simples, comme les presses pourront s'adonner à la production des huiles végétales, ce qui peut être générateur d'emplois et de revenus. De ce point de vue, le concept Flexy-Energy est d'une grande originalité, parce qu'il offre une solution complète en matière de développement durable.

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les systèmes hybrides PV/Diesel sans stockage combinent l'utilisation de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie conventionnelle des groupes électrogènes. Lorsque bien dimensionnés, ces systèmes hybrides peuvent être plus fiables et compétitifs avec les systèmes mono sources. Cependant les systèmes hybrides sont plus complexes, du à l'intermittence de l'énergie renouvelable, à la variabilité de la demande et à la non linéarité des composants du système. Les méthodes classiques de dimensionnement sont limités pour le dimensionnement de tels systèmes [16].

C'est dans ce contexte, que l'institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement, précisément son laboratoire énergie solaire et économie d'énergie (LESEE) a mis en place un prototype de centrale hybride PV/Diesel sans stockage, dans le but d'aider à apporter des solutions aux développements des productions d'énergie décentralisées.

La centrale hybride PV/Diesel sans stockage implanté à Kamboinsé (localité situé à 15 km de Ouagadougou) se compose d'un champ PV de 2,85 kWc, d'un onduleur monophasé couplé à un groupe électrogène de 11,5 kVA. Des bancs de charge triphasés ont permis de simuler la demande en énergie.

Deux profils de charges ont été définis dans le cadre de l'expérimentation ; le profil N°1 correspond à un profil urbain, tandis que le profil N°2 correspond à un profil rural. Des essais ont été réalisés pendant les mois de Mars, Avril et Mai, dans le but d'étudier et analyser expérimentalement ladite centrale hybride.

Les résultats montrent que les centrales hybrides sans stockage présentent des avantages comparatifs par rapport aux groupes électrogènes :

- consommation en carburant moins élevée, avec une économie de 2,27 litre en moyenne par jour ;
- impact environnemental moins élevé, avec une quantité moyenne de 9 kg de CO₂ évitée par jour.

Vue la taille du prototype (champ PV 2,85 kWc, groupe électrogène de 11,5 kVA) ces résultats sont encourageants. L'analyse des résultats montre qu'il existe un important potentiel

d'économie en carburant et en CO₂ en optimisant le fonctionnement des centrales hybrides PV/Diésel sans stockage.

L'analyse des résultats montre que les performances de la centrale hybride PV/Diésel sont médiocres en situation de faible de charge. Lorsque la puissance demandée croît vers la puissance nominale, les performances des centrales hybrides s'améliorent, c'est-à-dire que la consommation spécifique du groupe devient plus faible. Le point optimal de fonctionnement de notre centrale hybride est atteint pour des charges proches de la puissance nominale du groupe électrogène avec une pénétration en énergie du système PV de l'ordre de 20%. Dans de telles conditions le fonctionnement du groupe électrogène est optimal.

En termes de propositions d'optimisation, les fonctionnements sous faibles charges sont à éviter, pour ce faire il faut définir une puissance minimale de 30% la puissance nominale du groupe, en dessous de laquelle, le système PV est délesté pour laisser le groupe seul en fonctionnement. Une autre solution consiste à prévoir des charges qui sont uniquement alimentées que pendant les moments de faible demande, cette solution évite le délestage de l'énergie PV. Ces charges peuvent être constituées d'une station de pompage d'eau. Une dernière solution consiste à utiliser des groupes électrogènes de puissances différentes en cascade, chaque groupe étant utilisé de telle sorte qu'il fonctionne autour de son point optimal.

L'étude expérimentale des systèmes hybrides PV/Diésel sans stockage se poursuit toujours à travers d'autres travaux qui visent à évaluer leurs performances pendant des conditions défavorables. Le sujet est d'une grande importance, en témoigne les travaux de recherche en cours. Les systèmes hybrides PV/Diésel sans stockage sont une solution pour répondre aux besoins des zones rurales en matière d'électrification. Le concept Flexy-Energy est une véritable opportunité en matière de développement durable et mérite d'être soutenu.

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **S.M. Shaahid, I. El-Amin.** Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, Vol. 13, 625–633.
- [2]. *www.ruralec.org*. [En ligne]
- [3]. **SONABEL.** *Rapport d'activités*. 2009.
- [4]. **Blin, J.** *cours biocarburants*. s.l. : institut internationale de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.
- [5]. **Ministère de l'énergie, des mines et des carrières.** *www.mines.gov.bf*. [En ligne]
- [6]. *www.solar4power.com*. [En ligne]
- [7]. **Christopher W. Ajan, S. Shahnawaz Ahmed.** On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an. *Solar Energy*. 2003, Vol. 74, 453–467.
- [8]. **Azoumah, Y.** *cours de thermique solaire*. s.l. : Institut internationale de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.
- [9]. **Thomas Huld, Ralph Gottschalg.** Mapping the performance of PV modules, effects of module. *Solar Energy*. 2010, Vol. 84, 324–338.
- [10]. **Jae-Shik Park, Takeshi Katagi.** Operation control of photovoltaic/diesel hybrid generating system considering fluctuation of solar radiation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2001, Vol. 67, 535-542.
- [11]. **Tripanagnostopoulos, Y.** Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*. 2007, Vol. 81, 1117–1131.
- [12]. **Ali Al-Alawi, Saleh M Al-Alawi.** Predictive control of an integrated PV-diesel water and power supply system using an artificial neural network. *Renewable Energy*. 2007, Vol. 32, 1426–1439.
- [13]. **Beyer, H. Georg et Degner, T.** Assessing the maximum fuel savings obtainable in simple wind-diesel systems. *Solar energy*. 1997, Vol. 61, 5-10.

- [14]. **B. Wicherta, M. Dymondb.** Development of a test facility for photovoltaic-diesel hybrid energy systems. *Renewable Energy* . 2001, Vol. 22, 311-319.
- [15]. **S. Diafa, M. Belhame.** Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island. *Energy Policy* . 2008 , Vol. 36, 743–754.
- [16]. **Rodolfo Dufo-Lopez, José L. Bernal-Agustin.** Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms. *Solar Energy*. 2005, Vol. 79, 33–46.
- [17]. **Muselli, M. et Notton, G.** Design of hybrid-photovoltaic power generator with optimization of energy management. *Solar energy*. 2, 1999, Vol. 65, 143-157.
- [18]. **Colle, S. et Abreu, S. Luna.** Economic evaluation and optimization of hybrid diesel/photovoltaic systems integrated to utility grids. *Solar Energy*. 2004, Vol. 76, 295-299.
- [19]. **Luis Arribas, Luis Cano.** PV–wind hybrid system performance: A new approach and a case study. *Renewable Energy* . 2010, Vol. 35, 128–137.
- [20]. **IEA.** *PVPS task 2.*
- [21]. **H. Suryoatmojo, T. Hiyama.** Optimal design of Wind-PV-Diesel-battery system using genetic algorithm. 2009, 413-420.
- [22]. **Farid Katiraei, Member, IEEE, and Chad Abbey, Student Member, IEEE.** Diesel Plant Sizing and Performance Analysis of a Remote Wind-Diesel Microgrid. *IEEE*. 2007.
- [23]. **Agarwal, D. et Agarwal, A. K.** Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*. 2007, Vol. 27, 2314-2323.
- [24]. *World Energy outlook 2002, chapitre13: energy and poverty.*
- [25]. **Cirad.** *Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales.*

IX. ANNEXES

ANNEXE 1 : AXES DE RECHERCHE DU LESEE

ANNEXE 2 : PROTOCOLE DES MANIPULATIONS N°1

ANNEXE 3 : PROTOCOLE DES MANIPULATIONS N°2

ANNEXE 4 : FICHE TECHNIQUE SUNNY BOY

ANNEXE 1 : AXES DE RECHERCHE DU LESEE

Axe 1: Etude des centrales solaires à concentration. Pour répondre au manque de données d'ensoleillement fiables sur le continent, mieux dimensionner les installations solaires et répondre aux besoins des pays concernés, une part importante des activités du LESEE porte sur l'évaluation précise de la ressource solaire et des besoins énergétiques en Afrique. Le contexte climatique et économique assez particulier du continent africain amène à envisager également dans cet axe l'étude et la conception de nouveaux modèles de centrales solaires adaptés et moins coûteux : centrales hybrides solaire/biomasse, couplage des technologies existantes, centrales à cycles combinés, etc.

Axe 2: Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaires photovoltaïque (PV). Dans la perspective de la raréfaction des ressources énergétiques conventionnelles, il s'agit tout d'abord de développer des concepts pour la durabilité énergétique et environnementale dans les bâtis au sud du Sahara et de développer des outils pour une intégration optimale de l'énergie solaire PV dans l'architecture. Le second volet de cet axe porte sur la production d'électricité à grande échelle via des centrales hybrides PV/groupe électrogène et l'étude des problèmes liés à la connexion des systèmes solaires aux réseaux électriques existants.

Axe 3: Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques. Cet axe porte sur l'efficacité énergétique. Il s'agit ici de développer des outils pour une meilleure intégration des procédés énergétiques et/ou une conception optimale de ces procédés en s'appuyant sur des approches d'optimisation thermodynamique couplées à l'utilisation des méthodes d'optimisation géométrique multi-échelle.

ANNEXE 2 : PROTOCOLE DES MANIPULATIONS N°1

I. MATERIELS D'ESSAIS

	Désignation	Référence	Qté
1	Pince ampèremétrique	CHAUVIN ARNOUX, F09, 600 V, 400 A	1
2	Thermomètre digital	CHAUVIN ARNOUX, C.A 861, K thermometer	1
3	solarimètre	EXTEL, M- 830B	1
4	Banc de charges résistives	EDUTECH, Puissance max. 4 kW, triphasé	2
5	Becher	400 – 2000 ml	1
6	récipients	aucune	2

II. MONTAGE

- a) Connecter les deux bancs de charges résistives en parallèle (voir schéma N°1 de connexion des bancs de charges) ;
- b) Placer le thermomètre extérieur de mesure de la température ambiante ;
- c) Placer le b cher 2000 ml ;

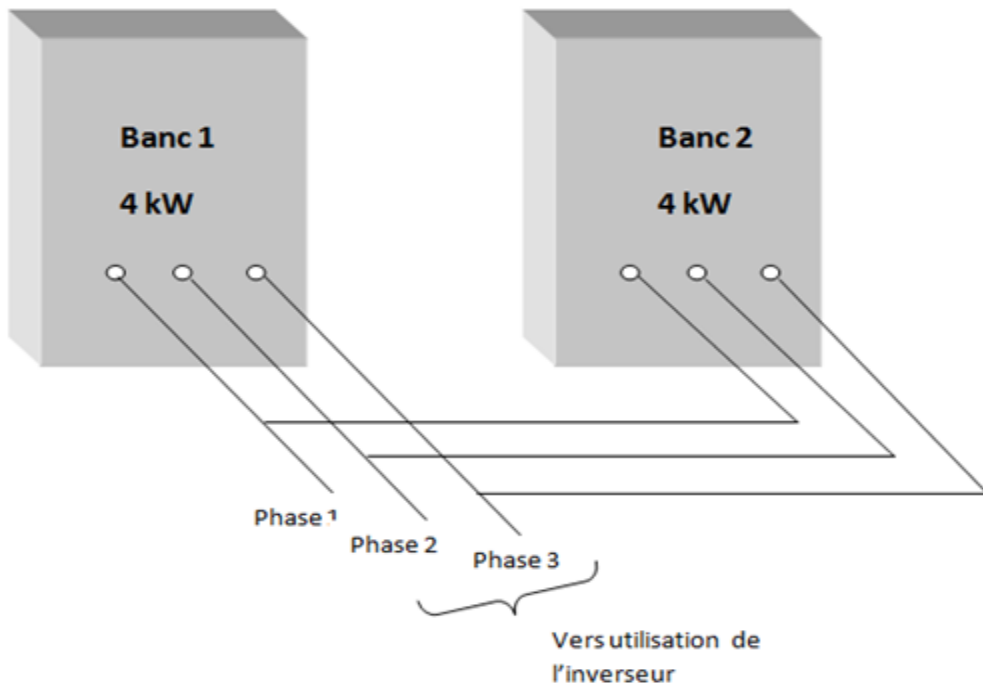
III. VERIFICATIONS GENERALES

- a) Vérifier le niveau de l'huile moteur ;
- b) Vérifier le niveau d'eau de refroidissement du moteur ;
- c) Vérifier que le disjoncteur du groupe est ouvert ;
- d) Vérifier que les disjoncteurs du coffret électrique du local Flexy-Energy sont ouverts ;
- e) Vérifier que l'onduleur monophasé SUNNY BOY est normal (led supérieure allumée vert permanent) ;
- f) Vérifier que l'afficheur SUNNY MATRIX est en marche ;

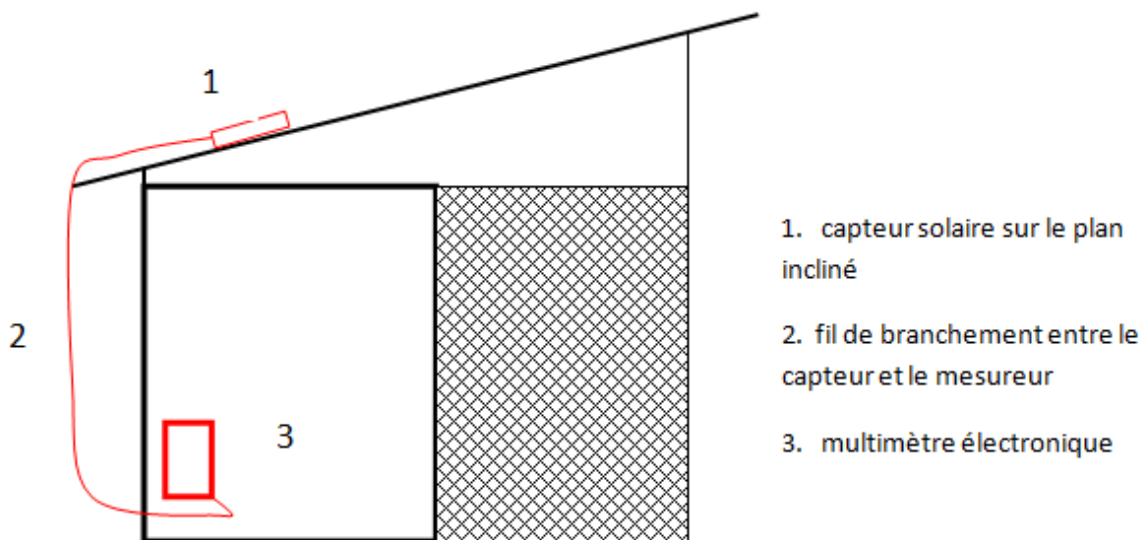
IV. ESSAIS SUR LE GROUPE ELECTROGENE

- a) Ouvrir les disjoncteurs du coffret électrique du local (climatiseur, ventilateur, éclairages et prises) ;
- b) Déconnecter l'interrupteur du SUNNY BOY ;
- c) Choisir un profil des charges ;
- d) Apprêter la fiche de relevés N°1 ;
- e) Remplir le Becher jusqu'à 2000 ml ;
- f) Démarrer le groupe électrogène à vide ;
- g) Laisser tourner le groupe électrogène pendant quelques minutes ;
- h) Fermer le disjoncteur du groupe électrogène ;
- i) Sélectionner une charge sur le(s) banc(s) des charges, correspondant à un point du profil de charges ;
- j) Remplir le bécber à 2000 ml et démarrer le chronomètre ;
- k) relever les mesures (début) conformément à la fiche de relevés N°1;
- l) Arrêter le chronomètre après 30 mn et relever les mesures (fin) conformément à la fiche de relevés N°1 ;
- m) Répéter ces quatre dernières opérations, en suivant le profil des charges du premier au dernier point;
- n) Décharger progressivement le groupe électrogène;
- o) Laisser le groupe fonctionner à vide pendant quelques minutes ;
- p) Arrêter le groupe électrogène ;
- q) Remettre l'interrupteur de l'onduleur ;
- r) Fermer les disjoncteurs du coffret du local Flexy-Energy.

SCHEMA N°1 :



SCHEMA N°2



DATE :			FICHE DE RELEVES N°1 ESSAIS SUR LE GROUPE ELECTROGENE SEUL								<u>OBSERVATIONS</u>					
			Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
Durée		mn														
Heures																
charge		kW														
Niveau de carburant		ml														
Température ambiante		°C														
Intensité pupitre du groupe électrogène	I1	A														
	I2	A														
	I3	A														
Intensité banc pince ampère.	Ip1	A														
	Ip2	A														
	Ip3	A														
Tension pupitre du groupe électrogène	V1	V														
	V2	V														
	V3	V														
Vitesse groupe		rpm														
Fréquence groupe		Hz														

ANNEXE 3 : PROTOCOLE DES MANIPULATIONS N°2

V. MATERIELS D'ESSAIS

	Désignation	Référence	Qté
1	Pince ampèremétrique	CHAUVIN ARNOUX, F09, 600 V, 400 A	1
2	Thermomètre digital	CHAUVIN ARNOUX, C.A 861, K thermometer	1
3	solarimètre	EXTEL, M- 830B	1
4	Banc de charges résistives	EDUTECH, Puissance max. 4 kW, triphasé	2
6	Récipients	aucune	2
7	Becher	400 – 2000 ml	1
8	chronomètre	aucune	1

VI. MONTAGES

Le montage des appareils sont nécessaires pour permettre l'acquisition des différents paramètres d'essais ; ce sont :

- d) Connecter les deux bancs de charges résistives en parallèle (voir schéma N°1 de connexion des bancs de charges) ;
- e) Placer le solarimètre (voir schéma N°2);
- f) Placer le thermomètre de mesure de la température ambiante.

VII. VERIFICATIONS GENERALES

- g) Vérifier le niveau de l'huile moteur ;
- h) Vérifier le niveau d'eau de refroidissement du moteur ;
- i) Vérifier que le disjoncteur du groupe est ouvert ;
- j) Vérifier que les disjoncteurs du coffret électrique du local Flexy sont ouverts ;
- k) Vérifier que l'onduleur monophasé SUNNY BOY est normal (led supérieure allumée vert permanent) ;
- l) Vérifier que l'afficheur SUNNY MATRIX est en marche ;

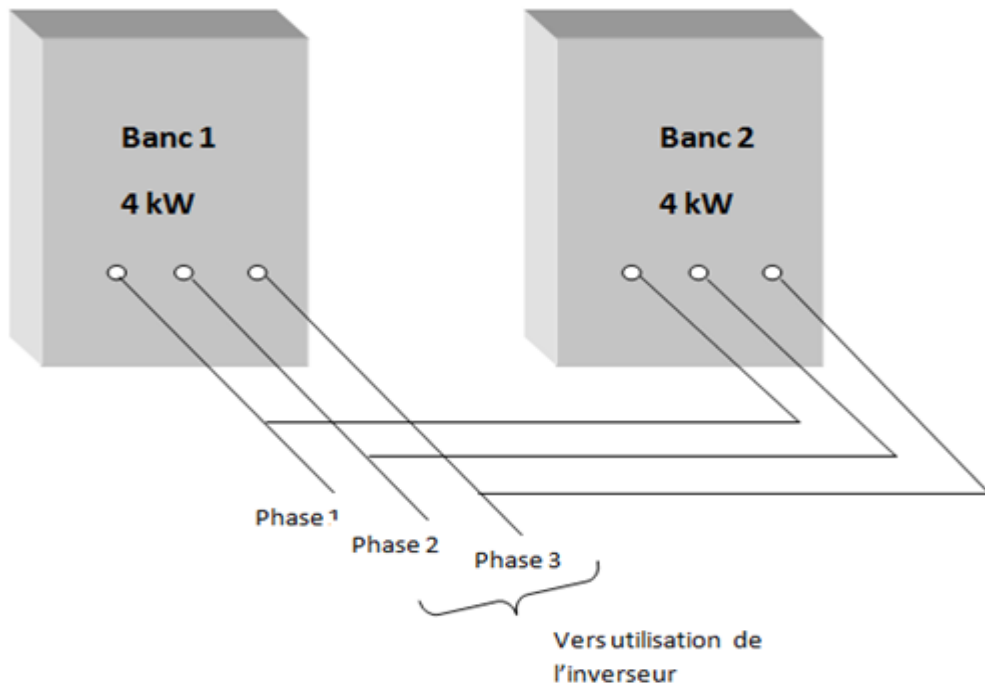
VIII. ESSAIS SUR LA CENTRALE HYBRIDE PV/DIESEL SANS STOCKAGE

Les mesures commencent à 08 heures précises et se déroulent en continu jusqu'à 17 heures 15 minutes, fin des essais. Les essais suivent les étapes suivantes :

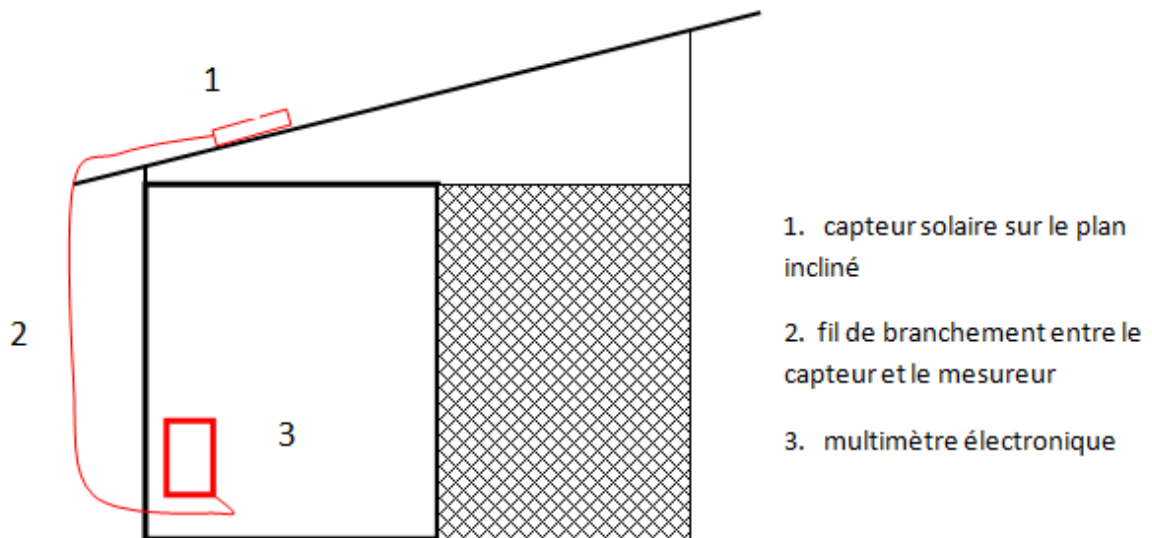
- a) Ouvrir les disjoncteurs du coffret du local (climatiseur, ventilateur, éclairages et prises) ;
- b) Apprêter la fiche de relevés N°2
- c) Démarrer le groupe électrogène à vide ;
- d) Laisser tourner le groupe électrogène pendant quelques 2 à 3 minutes ;
- e) Fermer le disjoncteur du groupe ;
- f) Sélectionner une charge sur le(s) banc(s) de charges, correspondant à un point du profil des charges ;
- g) démarrer le chronomètre et relever les mesures conformément à la fiche de relevés N°2;
- h) Arrêter le chronomètre quand la durée de l'essai est atteint et relever immédiatement les mesures (fin) conformément à la fiche de relevés N°2 ;
- i) Répéter ces trois dernières opérations, en suivant le profil des charges du premier au dernier point;
- j) Décharger progressivement le groupe électrogène ;
- k) Laisser le groupe tourner à vide pendant quelques 2 à 3 minutes ;
- l) Arrêter le groupe électrogène ;
- m) Ouvrir le disjoncteur du groupe électrogène ;
- n) Fermer les disjoncteurs du coffret du local, pour rétablir l'alimentation du prototype.

Date :		FICHE D'ESSAIS N°2 : CENTRALE HYBRIDE PV/DIESEL SANS STOCKAGE																							
Heures (Début-Fin)	Pourcentage	Intensité groupe électrogène			Tension groupe électrogène			Fréquence groupe	Vitesse groupe	Consommation groupe		Ensoleillement	Courant pince ampèremétrique			Puissance PV		Energie PV		Energie totalisée PV		Emission CO2 évitée totale		Température ambiante	
		A	A	A	V	V	V			ml	ml		A	A	A	W	W	kWh	kWh	kWh	kWh	kg	kg	°C	°C
	%							hz	rpm			W/m ²													

SCHEMA N°1



SCHEMA N°2



ANNEXE 4 : FICHE TECHNIQUE DU SUNNY BOY

		Caractéristiques techniques		
<p>Performant</p> <ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement Opticool • Rendement maximal de 95,6 % <p>Sécurité optimale</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interrupteur sectionneur DC intégré ESS • Séparation galvanique <p>Solution fiable</p> <ul style="list-style-type: none"> • Service et assistance téléphonique SMA • Garantie SMA : 5 ans, extension jusqu'à 20 ans 	<p>Valeurs d'entrée</p> <p>Puissance DC max. ($P_{DC, max}$)</p> <p>Tension DC max. ($U_{DC, max}$)</p> <p>Plage de tension PV, MPPT (U_{MPP})</p> <p>Courant d'entrée max. ($I_{PV, max}$)</p> <p>Tension DC résiduelle (U_{SS})</p> <p>Nombre max. d'entrées (parallèle)</p> <p>Dispositif d'interruption DC</p> <p>Varistors à surveillance thermique</p> <p>Contrôleur d'isolement</p> <p>Protection inversion des pôles</p>	Sunny Boy 3300		
			3820 W	
			500 V	
			200 V - 400 V	
			20 A	
			< 10 %	
			3	
			connecteur à fiche, ESS	
			Oui	
			Oui	
		diode en court-circuit		
	<p>Valeurs de sortie</p> <p>Puissance AC max. ($P_{AC, max}$)</p> <p>Puissance nominale ($P_{AC, nom}$)</p> <p>Coeff. dist. harm. courant réseau</p> <p>Tension nominale AC ($U_{AC, nom}$)</p> <p>Fréquence nominale ($f_{AC, nom}$)</p> <p>Coefficient de puissance ($\cos \phi$)</p> <p>Résistance aux courts-circuits</p> <p>Raccordement au réseau</p>	3600 W		
		3300 W		
		< 4 %		
		220 V - 240 V		
		50 Hz / 60 Hz		
		1		
		oui, régulation du courant		
		connecteur à fiche AC		
	<p>Rendement</p> <p>Rendement maximal</p> <p>Euro-eta</p>	95,2 %		
		94,4 %		
	<p>Indice de protection</p> <p>selon DIN EN 60529</p>	IP65		
	<p>Caractéristiques mécaniques</p> <p>Largeur / Hauteur / Profondeur (mm)</p> <p>Poids</p>	450 / 352 / 236		
		41 kg		