

# ETUDE DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES D'ENERGIE HYBRIDES PV/DIESEL ET DE LEUR IMPACT SUR LE COUT DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
**MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ENVIRONNEMENT**  
OPTION: Energie et Procédés Industriels

-----

Présenté et soutenu publiquement le [21/06/2013] par :

**Brahim Abdallah BRAHIM**

**Travaux dirigés par :**

- **Dr Daniel YAMEGUEU**
- **Dr Yao AZOUMAH**

CENTRE COMMUN DE RECHERCHE Energie et Habitat Durable

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Sayon SIDIBE**

Membres et correcteurs : **Dr. Daniel YAMEGUEU**  
**Ing. Ahmed SANKARA**

**Promotion [2012/2013]**

## REMERCIEMENTS

- ✚ Le présent travail a été effectué au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Nous n'aurions pu réaliser ce travail sans l'aide de personnes diverses que nous tenons à remercier.
- ✚ C'est un agréable plaisir pour moi de remercier mon encadreur Dr Yao K. AZOUMAH, directeur du Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durable pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire et permis de travailler sur un sujet intéressant et d'actualité.
- ✚ Je tiens à remercier particulièrement mon co-encadreur Dr Daniel YAMEGUEU, enseignant chercheur au 2iE, pour la qualité de son encadrement, sa rigueur scientifique, sa grande confiance et sa sympathie. J'associe à ces remerciements David TSUANYO, doctorant à 2iE, pour son appui scientifique et sa disponibilité à contribuer à mes recherches. Un merci très spécial à Patrice DANGANG pour ses conseils techniques, Henri KOTTIN, Hamed SANKARA et Mintou SIDIBE pour leur écoute et leurs conseils durant la période de mon stage.
- ✚ Je remercie toute l'équipe des enseignants, doctorants et ingénieurs chercheurs du LESEE y compris ceux du Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB) pour leur franche collaboration.
- ✚ A mes chers amis de la même promotion et particulièrement à Manu SESHIE, Franck ONDO NANG, Gaëlle KO, Ted DOSSA, Emmanuel NOULALA, Ahmed LIMAN et Julie NABIAS, les deux années passées ensembles ont été un grand succès.
- ✚ J'adresse un merci tout particulier à mes frères et sœurs Ahmat goni, Abdelsamad, Abdellatif, Taha, Moustapha, Aïcha Zam-zam et Rouman et à mes amis Mahadi, Hamdan, Mahamat Saleh pour leurs soutiens spirituel et matériel.
- ✚ Mes remerciements les plus émus vont à ma mère Dar-alsalam AHMAT et mon père Abdallah BRAHIM pour m'avoir soutenu, conseillé et donné les moyens d'arriver à la fin de ce cycle.

**RESUME**

L'accès à l'énergie électrique est le gage de tout développement économique. Cependant, les pays d'Afrique Subsaharienne présentent un faible taux d'accès à l'électricité ; la situation est encore plus exacerbée dans les zones rurales de ces pays. Compte tenu du potentiel énergétique solaire dont dispose le continent, les Systèmes d'Energie Hybrides (SEH) solaires photovoltaïque/Diesel pourraient constituer une solution technologique adaptée pour l'électrification rurale. Ces systèmes existent sous trois types de configurations : PV/Diesel série, PV/Diesel commutée et PV/Diesel parallèle.

L'étude que nous avons réalisée montre que la configuration « Flexy Energy est la plus appropriée comparativement aux autres configurations de systèmes hybrides PV/Diesel car elle conduit à un coût de production du kWh moins élevé.

---

**Mots Clés**

- 1- Système d'Energie Hybride
- 2- Solaire photovoltaïque
- 3- Groupe électrogène
- 4- Configuration

**ABSTRACT**

Access to electricity is the guarantee of any economic development. However, the countries of sub-Saharan Africa still have low access to electricity; the situation is exacerbated in rural areas of these countries. Given the solar potential of the continent, solar photovoltaic/Diesel Hybrid Energy Systems (HES) could be a technological solution for rural electrification. These systems come in three types of configurations: PV/Diesel series, PV/Diesel switched and PV/Diesel parallel.

The study we conducted shows that the configuration "Flexy Energy" is more appropriate than other configurations of PV/Diesel HES because it leads to a lower kWh cost of production.

---

**Keywords**

- 1- Hybrid Energy System
- 2- Photovoltaic
- 3- Generator
- 4- Configuration

ABREVIATIONS :

---

<b>SEH</b> : Système d'Energie Hybride	<b><math>V_{R\_OND}</math></b> : Valeur résiduelle des onduleurs
<b>LESEE</b> : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie	<b><math>PW(i, a, d)</math></b> : facteur d'annualisation des dépenses
<b><math>P_C</math></b> : Puissance crête du générateur photovoltaïque	<b><math>S(a, d)</math></b> : facteur d'actualisation des valeurs résiduelles
<b><math>E_j</math></b> : Besoin journalier	<b><math>P_{ond}</math></b> : Puissance onduleur
<b><math>E</math></b> : Irradiation solaire journalière	<b><math>P_{GE}, P_{GD}</math></b> : Puissance groupe électrogène
<b><math>\eta_{ond}</math></b> : Rendement de l'onduleur	<b><math>A(a, n_j)</math></b> : Facteur d'annualisation des coûts d'acquisition
<b><math>\eta_{reg}</math></b> : Rendement du régulateur	<b><math>P_p</math></b> : Puissance de pointe
<b><math>\eta_{bat}</math></b> : Rendement de la batterie	<b><math>\delta</math></b> : taux de charge fixe
<b><math>k_p</math></b> : Coefficient du panneau	<b>CC</b> : Courant continu
<b><math>C_{I\_PV}</math></b> : Coût d'investissement du champ PV	<b>AC</b> : Courant alternatif
<b><math>C_{I\_GD}</math></b> : Coût d'investissement du générateur diesel	<b>CSP</b> : Concentrating Solar Power (Centrale Solaire à Concentration)
<b><math>C_{I\_OND}</math></b> : Coût d'investissement des onduleurs	<b><math>C_{O\_OND}</math></b> : Coût d'opération des onduleurs
<b><math>C_{M\_PV}</math></b> : Coût de maintenance du système PV	<b><math>C_{R\_PV}</math></b> : Coût de remplacement du système PV
<b><math>C_{M\_GE}</math></b> : Coût de maintenance des générateurs diesel	<b><math>C_{R\_GE}</math></b> : Coût de remplacement des générateurs diesel
<b><math>C_{M\_OND}</math></b> : Coût de maintenance des onduleurs	<b><math>C_{R\_OND}</math></b> : Coût de remplacement des onduleurs
<b><math>C_{O\_PV}</math></b> : Coût d'opération du système PV	<b><math>V_{R\_PV}</math></b> : Valeur résiduelle du système PV
<b><math>C_{O\_GE}</math></b> : Coût d'opération des générateurs diesel	
<b><math>V_{R\_GE}</math></b> : Valeur résiduelle des générateurs diesel	

---

## Sommaire

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	1
1. Contexte .....	2
2. Objectifs de l'étude.....	3
3. Présentation du lieu de stage.....	3
<b>II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	4
1. Généralités .....	4
2. Générateur photovoltaïque .....	5
a. Première approche .....	6
b. Deuxième approche .....	6
c. Troisième approche .....	7
3. Générateur Diesel.....	8
4. Les systèmes de stockage .....	10
5. Onduleurs.....	10
6. Charge.....	11
7. Systèmes hybrides de production d'électricité.....	11
8. Structure du système hybride .....	12
9. Les différents types des configurations.....	13
A. Configuration PV/Diesel série .....	13
1. Fonctionnement du système [7].....	13
2. Avantages et inconvénients .....	14
B. Configuration PV/Diesel commuté .....	14
1. Fonctionnement du système [7].....	15
2. Avantages et inconvénients .....	15
C. Configuration PV/Diesel parallèle.....	16
1. Fonctionnement du système [7].....	16
2. Avantages et Inconvénients de la configuration.....	17
D. La configuration Flexy Energy .....	17
10. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH .....	18
<b>III. METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT</b> .....	20
1. Dimensionnement des systèmes.....	20
2. Formules usuelles pour les différents composants des systèmes .....	21
A. Champ Photovoltaïque .....	21
B. Capacité de la batterie d'accumulateur.....	23
C. Groupe électrogène.....	24
<b>IV. EVALUATION ECONOMIQUE</b> .....	25
A. Formulation du modèle.....	25
1. Coût d'investissement du système .....	26
2. Coût de maintenance du système .....	27
3. Coût d'opération des composants .....	27
4. Coût de remplacement des composants.....	28
5. Valeur résiduelle des composants.....	28

<b>V.</b>	<b>ETUDE DE CAS</b> .....	30
<b>a.</b>	<b>Zone de l'étude (village de Bilgo)</b> .....	30
<b>b.</b>	<b>Courbe de charge du village de Bilgo</b> .....	30
<b>VI.</b>	<b>RESULTATS</b> .....	31
<b>1.</b>	<b>Configuration PV/Diesel Série</b> .....	31
	Hypothèses : .....	31
<b>2.</b>	<b>Configuration PV/Diesel Commutée</b> .....	32
	Hypothèses : .....	32
<b>3.</b>	<b>Configuration PV/Diesel parallèle</b> .....	33
	Hypothèses : .....	33
<b>4.</b>	<b>Concept Flexy Energy</b> .....	34
	Hypothèses : .....	34
<b>VII.</b>	<b>ANALYSES ET DISCUSSIONS</b> .....	35
<b>1.</b>	<b>Configuration PV/Diesel série</b> .....	35
<b>2.</b>	<b>Configuration PV/Diesel commutée</b> .....	35
<b>3.</b>	<b>Configuration PV/Diesel parallèle</b> .....	35
<b>4.</b>	<b>Concept Flexy Energy</b> .....	36
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	37
<b>IX.</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	38
<b>ANNEXES</b> .....		40
	ANNEXE I : Caractéristiques du panneau PV .....	41
	ANNEXE II : Ensoleillement de la ville de Ouagadougou .....	42
	ANNEXE III : Caractéristiques de l'onduleur PV .....	43
	ANNEXE IV : Calcul économique pour la configuration PV/Diesel série .....	44
	ANNEXE V : Calcul économique pour la variante PV/Diesel Commutée .....	45
	ANNEXE VI : Calcul économique de la configuration PV/Diesel parallèle .....	46
	ANNEXE VII: Résultats du FLEXY-ENERGY .....	47

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Méthode de calcul des caractéristiques du champ PV .....	21
Tableau 2: Tension du générateur en fonction de la puissance.....	22
Tableau 3: Comparaison entre onduleur autonome et onduleur réseau .....	23
Tableau 4: Formules usuelles pour le calcul de la capacité de la batterie .....	23
Tableau 5: Méthode de calcul pour le dimensionnement du groupe électrogène [12] .....	24
Tableau 6: Calcul du coût d'investissement des composants du système .....	26
Tableau 7 : Calcul du coût de maintenance des composants .....	27
Tableau 8: Calcul du coût d'opération des composants.....	27
Tableau 9: Calcul du coût de remplacement des composants.....	28
Tableau 10: Calcul de la valeur résiduelle des différents composants .....	28
Tableau 11: Valeurs des paramètres utilisés dans le calcul des différents coûts .....	29
Tableau 12: Résumé du choix des composantes et coût du kWh .....	31
Tableau 13: Résumé du choix des composantes et coût du kWh .....	32
Tableau 14: Résumé du choix des composantes et coût du kWh .....	33
Tableau 15: Résumé des choix des composantes et coût du kWh.....	34
Tableau 16: Caractéristique du panneau PV .....	41
Tableau 17: Ensoleillement de la ville de Ouagadougou.....	42
Tableau 18: caractéristiques de l'onduleur .....	43
Tableau 19: Calcul économique pour la configuration PV/Diesel Série .....	44
Tableau 20: Calcul économique pour la variante PV/Diesel Commutée.....	45
Tableau 21: Calcul économique pour la configuration PV/Diesel parallèle.....	46
Tableau 22: Résultats du Flexy Energy .....	47



## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	7
Figure 2: Configuration du moteur diesel [17] .....	8
Figure 3: Classification des systèmes d'énergie hybrides .....	11
Figure 4: Système hybrides PV/Diesel Série .....	13
Figure 5: Système hybride PV/Diesel Commuté .....	14
Figure 6: Systèmes hybride PV/Diesel parallèle.....	16
Figure 7: Architecture générale des centrales Flexy Energy .....	18
Figure 8: Courbe d'ensoleillement à Ouagadougou .....	30
Figure 9: Courbe de charge journalière du village de Bilgo .....	30

## I. INTRODUCTION

---

La plupart des pays d'Afrique subsaharienne, et le Burkina Faso en particulier, ont encore aujourd'hui un faible taux d'accès à l'électricité. Dans les zones rurales, le taux d'électrification est de moins de 14% au Burkina Faso, et l'Afrique subsaharienne de façon générale connaît un taux d'électrification de 27% [1]. La consommation de l'énergie électrique est précédée de la production, du transport et de la distribution aux consommateurs ce qui représente un fardeau financier pour l'électrification des sites isolés. Les besoins en électricité des pays mentionnés ci-dessus sont majoritairement satisfaits par des centrales thermiques ; par conséquent, le coût de l'énergie électrique est en permanence tributaire du coût des hydrocarbures, lequel ne cesse d'augmenter. En outre, l'utilisation des combustibles fossiles donne lieu à l'émission de nombreux polluants et de gaz à effet de serre.

Paradoxalement, l'Afrique dispose d'un énorme potentiel énergétique peu ou presque pas exploité : le soleil (74% du continent reçoit un ensoleillement moyen annuel supérieur à 1900kWh/m<sup>2</sup>/an), ce qui plaide en faveur du développement des systèmes d'énergie solaire dans ces régions.

Les systèmes de secours (groupes électrogènes, accumulateurs d'énergie) sont toujours indispensables, en raison des perturbations dues à une forte variabilité de la demande des utilisateurs que connaît le réseau électrique basse tension.

A ce jour, les techniques développées selon le lieu d'utilisation et les puissances demandées offrent la possibilité de combiner plusieurs systèmes de production d'énergie (systèmes hybrides) [2]. Ces nouvelles technologies ont l'avantage de pouvoir alimenter en électricité aussi bien des réseaux locaux isolés que le réseau existant. L'hybridation des sources de production d'énergie peut se présenter actuellement comme une alternative énergétique rationnelle par rapport aux sources conventionnelles pour l'électrification des zones rurales et isolées. En effet, la disponibilité locale et le coût nul de la matière première (soleil, vent), l'augmentation du prix et la raréfaction des énergies fossiles, ainsi que les problèmes de pollution engendrés par ces derniers militent en faveur de l'utilisation des énergies renouvelables.

On distingue plusieurs types de systèmes hybrides à savoir (liste non exhaustive) :

- Systèmes d'énergie hybride PV/Diesel avec ou sans stockage
- Systèmes d'énergie hybride Eolien/PV/Diesel avec ou sans stockage

- Systèmes d'énergie hybride Eolien/PV avec ou sans stockage
- Systèmes d'énergie hybride Eolien/Diesel

Ces systèmes sont caractérisés par leur aspect modulaire et peuvent être installés à proximité des utilisateurs, en zones isolées ou en milieu urbain.

Ce mémoire se focalise sur l'étude des systèmes hybrides PV/Diesel.

## 1. Contexte

Le concept d'« électricité décentralisée » (production de l'électricité sur le lieu même de son utilisation), a encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable. La tendance actuelle montre que l'intégration de ces types d'énergie (solaire, éolienne, hydraulique, etc.) dans les systèmes électriques isolés (systèmes insulaires ou réseaux villageois) se fait en association avec l'utilisation des ressources conventionnelles, tels les générateurs Diesel.

L'association de plusieurs sources d'énergie offre une certaine fiabilité au système global mais pose aussi plusieurs problèmes, entre autres :

- nécessité de rechercher la configuration optimale du système,
- choisir correctement la taille de chaque composant du système,
- optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système.

Le présent mémoire s'intéresse en particulier aux systèmes hybrides PV/Diesel. Plusieurs architectures de ces systèmes existent dans lesquelles le générateur photovoltaïque travaille soit en parallèle, soit en alternance avec le générateur Diesel. Ainsi il existe :

- ✓ les systèmes hybrides PV/Diesel série,
- ✓ les systèmes hybrides PV/Diesel commuté,
- ✓ les systèmes hybrides PV/Diesel parallèle.

Le concept « Flexy Energy » développé par le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie du 2iE propose une nouvelle variante des systèmes hybrides PV/Diesel parallèle dans laquelle une gestion optimisée de la production et des charges est réalisée à travers une unité de contrôle-commande appelé le « Flexy Control » ; le but étant la minimisation du coût de production du kWh. Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une analyse détaillée des différentes architectures des systèmes PV/Diesel cités ci-dessus ainsi que de celle du système proposé dans le concept « Flexy Energy », et une étude de leur impact sur le coût de production du kWh.

## 2. Objectifs de l'étude

Les objectifs spécifiques de la présente étude sont :

- ❑ Effectuer une analyse détaillée des différentes architectures des systèmes hybrides PV/Diesel existants, y compris la variante « Flexy Energy ».
- ❑ Définir une méthodologie de dimensionnement adaptée à chaque type de configuration tenant compte des exigences technologiques de chaque configuration.
- ❑ Faire une évaluation économique de chaque configuration et étudier leur impact sur le coût de production du kWh, y compris la variante « Flexy Energy ».

## 3. Présentation du lieu de stage

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) est l'un des laboratoires du centre commun de Recherche Energie et habitat Durables (CCREHD) de 2iE. Le LESEE a pour objectif de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle et durable d'énergies électrique, mécanique et thermique en Afrique. Le LESEE est dirigé par Dr. Yao Azoumah. Son équipe actuelle se compose de 3 enseignants chercheurs permanents, 1 post-doctorant, 4 doctorants, 11 ingénieurs de recherche, 1 assistant d'enseignement et de recherche, 1 technicienne de labo, 1 assistante administrative et 3 professeurs associés.

Le LESEE exerce ses activités à travers deux axes de recherche :

- **Axe 1** : Conversion de l'énergie solaire dans les environnements chauds et rudes

Cet axe se décompose en trois sous-axes de recherche :

- Systèmes solaires photovoltaïques en milieu hostiles,
- Centrales solaires à concentration (CSP) pour mini réseaux,
- Habitats solaires.

- **Axe 2** : Gestion optimale de l'énergie durable : production, transport, distribution

Cet axe se décompose en deux sous-axes de recherche :

- L'hybridation des systèmes énergétiques,
- L'interaction sources/réseaux intelligents/utilisateurs.

## II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

### 1. Généralités

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est un système qui associe au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable [6, 15]. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les SEH sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et si possible de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergies renouvelables, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. D'un point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées.

Les performances d'un SEH, son rendement et sa durée de vie, sont influencés en partie par sa conception, c'est-à-dire l'architecture, le dimensionnement des composants, le type de composants etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont :

- la consommation spécifique du groupe électrogène,
- le nombre et la durée des pannes,
- le nombre d'arrêt pour l'entretien,
- le coût du kWh
- etc.

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesel et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [4] : un bus à CC pour les batteries, les sources et les charges à CC, et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable

peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels.

A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charges différées, charges optionnelles, charges de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et des charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelables et des générateurs diesel), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

## 2. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque transforme l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Du point de vue technique, on estime que les systèmes de conversion à énergie solaire sont potentiellement capables de répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale.

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques. Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique, ni sous aucune forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (le rendement le plus élevé aujourd'hui en laboratoire est de 25%) et sous un ensoleillement nominal de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Ce faible rendement des sources photovoltaïques a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. L'adaptation se fait à l'aide de convertisseur statique contrôlé (onduleur) pour différents modes de fonctionnement. Comme la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible,

il est nécessaire de disposer d'associations en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatibles avec le matériel électrique usuel. Nous présentons dans ce travail de mémoire quelques modèles mathématiques permettant de calculer la puissance délivrée par un module solaire photovoltaïque.

### a. Première approche

Le modèle d'essai présenté ci-dessous permet de calculer la puissance maximale fournie par le module, en utilisant la température et l'éclairement solaire incident. Ce modèle a été élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004 [1, 2].

$$P_m = -(a * G + b)T_c + c * G + d$$

$P_m$  : Puissance maximale produite (W) ; a, b, c et d sont des composantes positives qui peuvent être connues expérimentalement ;  $T_c$  : Température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire suivante :

$$T_c = T_a + \left[ \frac{NOCT - 20}{800} \right]$$

$T_a$  : Température ambiante (K) ; NOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature). Elle est définie comme étant la température de la cellule sous certaines conditions définies par l'éclairement solaire ( $800 \text{ W/m}^2$ ), la distribution spectrale (AM 1.5), la température ambiante ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et la vitesse de vent ( $>1\text{m/s}$ ) ; G : Eclairement solaire incident sur un plan incliné ( $\text{W/m}^2$ ).

### b. Deuxième approche

La puissance produite du générateur photovoltaïque peut être calculée à partir de l'équation suivante [3] :

$$P = \eta * S * N * G$$

S : Surface du module photovoltaïque ; G : Eclairement solaire sur plan incliné ( $\text{W/m}^2$ ) ;

N : Nombre de modules constituant le champ photovoltaïque.

$\eta$  : Rendement de référence du module sous les conditions standards ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 1000\text{W/m}^2$  et AM1.5).

$$\eta = \eta_r (1 - \gamma(T_c - T_o))$$

$\gamma$  : Coefficient de température ( $^\circ\text{C}$ ) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  de la température de la cellule. Les valeurs typiques de ce coefficient se situent entre  $0.004$  et  $0.006 \text{ }^\circ\text{C}$  [4].

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur dans les conditions standard (la puissance totale  $P$ , la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le courant de court-circuit  $I_{CC}$  et la surface du panneau).

### c. Troisième approche

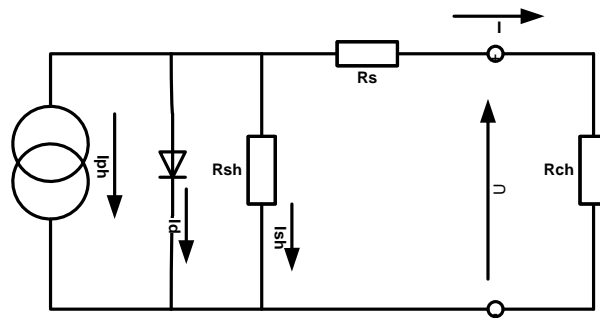


Figure 1: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle mathématique fait usage des spécifications des modules photovoltaïques données par les fabricants. Il s'agit donc une méthode très simple pour connaître la puissance produite par les modules photovoltaïques [4, 16].

$$I_m = I_{CC} \cdot \left\{ 1 - \left[ C_1 \cdot \exp\left(\frac{V_m}{C_2 \cdot V_{CO}}\right) - 1 \right] \right\} + \Delta I$$

$C_1$  et  $C_2$  sont des paramètres qui peuvent se calculer par les relations suivantes :

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{CC}} \right) * \exp\left(-\frac{V_{mp}}{C_2 * V_{CO}}\right)$$

$$C_2 = \frac{V_{mp}}{V_{CO}} - 1 / \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{CC}}\right)$$

$\Delta I$  est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire. Il est défini par l'expression :

$$\Delta I = \alpha_o * \left(\frac{G}{G_o}\right) * \Delta T + \left(\frac{G}{G_o} - 1\right) * I_{CC}$$

$$\Delta T = T_c - T_o$$

La tension  $V_m$  du module est déterminée par l'équation suivante :

$$V_m = V_{mp} \left[ 1 + 0.0539 \log\left(\frac{G}{G_o}\right) \right] + \beta_o * \Delta T - R_s * \Delta I$$

La résistance série  $R_s$  est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.



La puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par :

$$P_m = I_m * V_m$$

### 3. Générateur Diesel

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs diesel. Dans un système hybride PV/Diesel, le générateur classique est généralement constitué d'un moteur diesel qui est couplé à un générateur synchrone (cf. figure 2 ci-dessous). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux de carburant de façon à garder la vitesse du moteur diesel et la vitesse du générateur synchrone constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

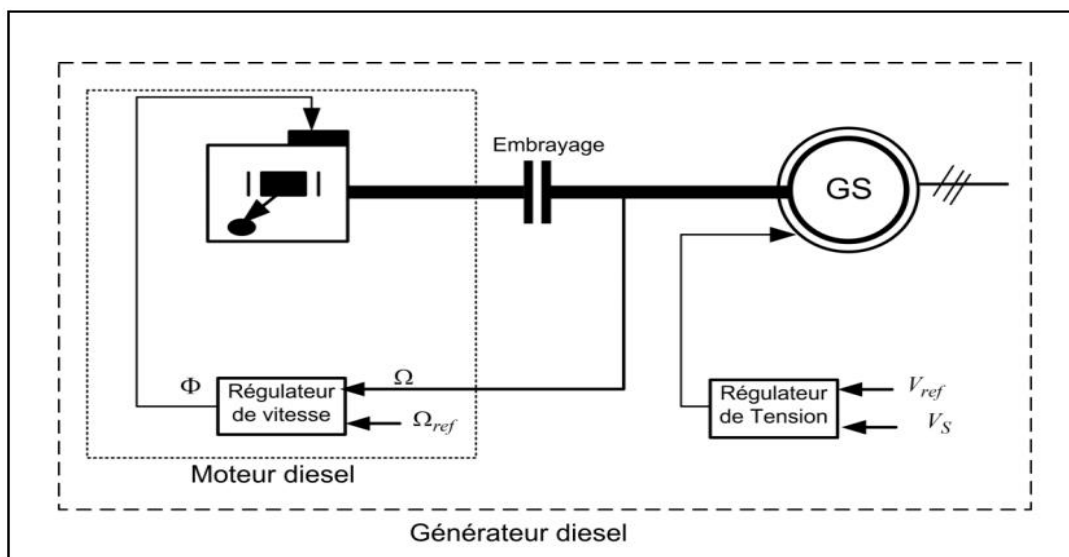


Figure 2: Configuration du moteur diesel [17]

Le groupe électrogène est constitué d'un moteur Diesel qui fait tourner un alternateur. Le fonctionnement normal du générateur est le suivant : le couple fourni à l'alternateur par le moteur fait tourner le rotor de l'alternateur, ce qui génère des courants triphasés au stator.

Lorsque la puissance du GE change de sens (cas de configuration parallèle), le fonctionnement du GE est modifié. En effet, le courant circule dans le sens inverse : il est absorbé par l'alternateur et contribue à créer un couple qui va faire tourner le rotor et ainsi entraîner le moteur Diesel qui est couplé avec l'alternateur. Ce phénomène est connu sous le nom de monitoring car la machine synchrone fonctionne alors comme un moteur. Dans le cas de GE reliés au réseau, ce phénomène arrive lorsque l'alimentation du moteur Diesel est coupée ou insuffisante. En effet, lorsqu'il n'y a

plus assez de couple pour faire tourner l'alternateur à la vitesse du réseau, celui-ci absorbe de la puissance du réseau et continue à tourner à la même vitesse (imposée par la fréquence du réseau). Dans le cas des systèmes d'énergie hybrides, le retour de puissance peut conduire à l'effondrement du système s'il est conséquent et prolongé. Lorsqu'une charge inférieure à la production de la source renouvelable est imposée, la fréquence du réseau crée par le GE augmente très rapidement et le système s'effondre à cause de la survitesse [18].

Le mécanisme mis en jeu est celui de la régulation de la vitesse du moteur Diesel. Un régulateur agit sur l'admission de combustible dans le moteur afin de maintenir constante. Par son principe même, le régulateur ne modifie la position de la vanne d'admission que si la vitesse de la machine varie. Quand la vitesse augmente, le régulateur diminue l'admission et la puissance décroît ; quand la vitesse diminue, le régulateur augmente l'admission et la puissance croît.

Le courant fourni par le générateur diesel à un instant  $t$  est donné par la formule suivante [10] :

$$I_{GD}(t) = I_{GD_{max}} * x_{GD}(t)$$

Avec  $I_{GD_{max}}$  : Intensité maximale du générateur diesel et  $x_{GD}(t)$  : le taux de charge (exprimée en pourcentage de sa puissance nominale) à un instant  $t$ .

Pour un nombre  $n_{GD}$  de générateurs, le courant total à un instant  $t$  est donné par :

$$I_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} I_{GD_{i_{max}}} * x_{GD_i}(t) * \varepsilon_i(t)$$

Un générateur diesel est caractérisé par sa consommation (horaire ou spécifique) de carburant. La consommation horaire d'un générateur est donnée par la formule suivante :

$$Q(t) = a * P_{GD}(t) + b * P_{GD_{nom}}$$

Ou  $a(l/kWh)$  et  $b(l/kWh)$  sont des constantes caractéristiques du générateur diesel,  $P_{GD}(t)$  est la puissance délivrée à un instant  $t$  donnée et  $P_{GD_{nom}}$  est la puissance nominale du générateur diesel.

Les puissances  $P_{GD_{nom}}$  et  $P_{GD}(t)$  s'exprime comme suit :

$$P_{GD}(t) = \sqrt{3} * I_{GD}(t) * U_{GD_{nom.AC}} * \cos\varphi$$

$$P_{GD_{nom}} = \sqrt{3} * I_{GD_{max}} * U_{GD_{nom.AC}} * \cos\varphi$$

$U_{GD_{nom.AC}}$  et  $\cos\varphi$  sont respectivement la tension nominale du générateur diesel et le facteur de puissance.

Pour un nombre  $n_{GD}$  des générateurs, on a :

$$P_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} * I_{GD}(t) * U_{GD_{nom.AC}} * \cos\varphi * \varepsilon_i(t)$$
$$P_{GD_{nom}} = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} * I_{GD_{max}} * U_{GD_{nom.AC}} * \cos\varphi * \varepsilon_i(t)$$

Donc à un instant t, la consommation en carburant des générateurs diesel est donnée par :

$$Q_{GD}(t) = \sqrt{3} * \cos\varphi * \sum_{i=1}^{n_{GD}} (I_{GD_{i_{max}}} * U_{GD_{i_{nom.AC}}} * (a * x_{GD_i}(t) + b) * \varepsilon_i(t)$$

#### 4. Les systèmes de stockage

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les générateurs ; cependant, dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur diesel et par suite les émissions des gaz, il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (solaire et groupe diesel). Enfin dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source (tampon), en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture d'énergie. Il existe plusieurs types de stockage de l'énergie parmi lesquels nous pouvons citer :

- les batteries
- le pompage eau
- le volant d'inertie
- l'hydrogène
- etc.

#### 5. Onduleurs

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Ils sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome (ou encore onduleur réseau) exige la

présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi plus chers.

## 6. Charge

Les charges électriques rendent utile une puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et des charges inductives. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistive et inductive. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent aussi avoir des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont des variations transitoires de tension et de courant pendant les changements de fonctionnement du système.

## 7. Systèmes hybrides de production d'électricité

Les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables sont les Systèmes d'Energie Hybrides (SEH). Ces systèmes combinent et exploitent plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique, en général une ou plusieurs sources conventionnelles (groupe électrogène) et au moins une source d'énergie renouvelable. Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi [20].

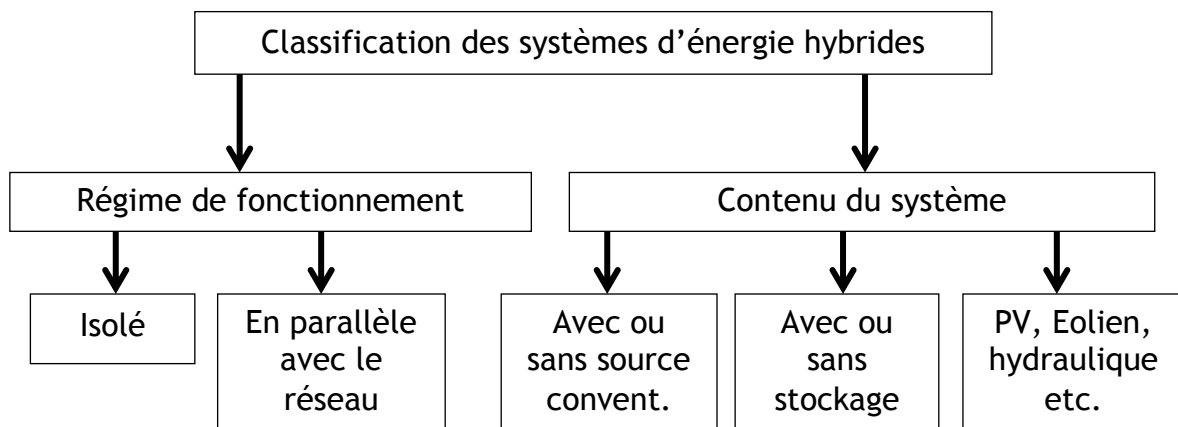


Figure 3: Classification des systèmes d'énergie hybrides

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable [12]. Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie sont influencés en partie par sa conception (dimensionnement des composants, types de composants, architecture) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement.

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte combinant bus à courant alternatif (CA) et bus à courant continu (CC) avec des batteries de stockage est très répandue [L. Satayanov]. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries de stockage pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient des générateurs diesel. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (< 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Les systèmes plus grands (puissance > 100 kW) sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés.

Dans les SEH, les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesel sont souvent utilisés. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice ou l'énergie contenue dans l'hydrogène ; ces systèmes comportent aussi des convertisseurs, des charges et une forme de gestion de l'énergie. Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie.

## 8. Structure du système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

- La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc.
- La présence ou non de dispositifs de stockage. La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.
- La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le profil de consommation de la charge électrique alimentée. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

## 9. Les différents types des configurations

### A. Configuration PV/Diesel série

#### Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel série

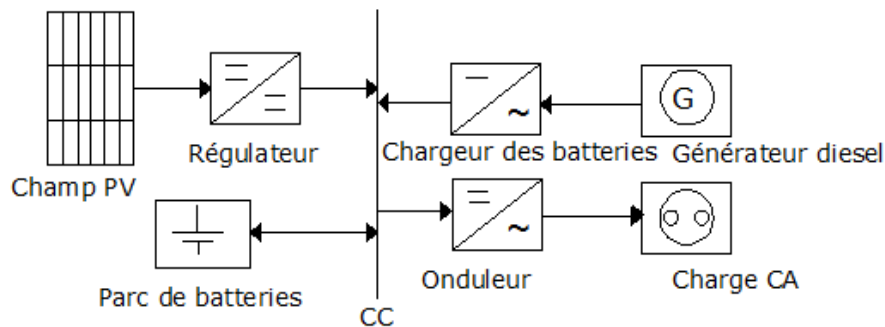


Figure 4: Système hybrides PV/Diesel Série

#### 1. Fonctionnement du système [7]

Dans ce type de configuration, le générateur diesel est connecté au bus à courant continu. La connexion peut se faire directement (dans le cas d'un générateur à courant continu) ou à travers un redresseur. Le générateur peut alimenter la charge à travers des convertisseurs électroniques ou charger la batterie. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le groupe diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ PV et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. Il faut noter que dans la plupart de ce type de configurations, le transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie diminue le rendement du système.

Le régime de fonctionnement du générateur dépend de la demande en énergie, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV. Quand l'énergie produite par le champ est en excès, cela sert à charger la batterie, et celle-ci se décharge quand l'énergie produite n'est pas suffisante. Le contrôleur solaire prévient la surcharge et la décharge de la batterie. On peut également faire appel à un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra de faire fonctionner le champ à son point maximum de puissance. On peut adjoindre un système automatique de mise en marche et arrêt du générateur diesel si nécessaire.

## 2. Avantages et inconvénients

### Avantages

- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique ;
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension dont la forme, l'amplitude et la fréquence sont convenables.
- Un dimensionnement facile du générateur.

### Inconvénients

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible ;
- La batterie doit avoir une grande capacité ;
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur ;
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

## B. Configuration PV/Diesel commuté

### Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel commuté

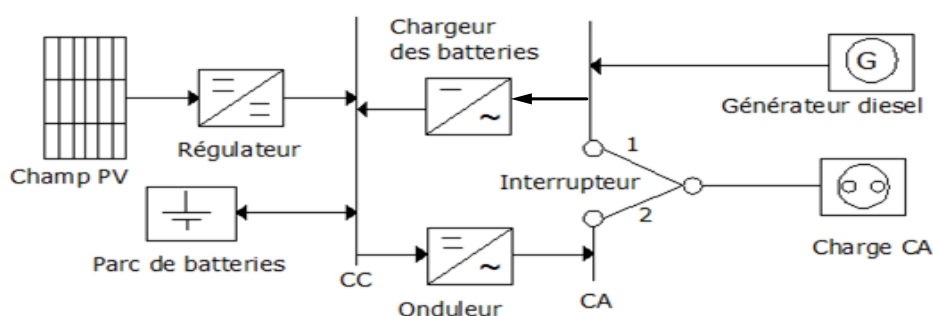


Figure 5: Système hybride PV/Diesel Commuté

## 1. Fonctionnement du système

Dans ce type de configuration, le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur, mais le fonctionnement en parallèle est toujours impossible [7]. La batterie peut être chargée par le champ PV et le diesel par l'intermédiaire d'un redresseur.

Il n'y a pas des pertes de conversion significatives liées à la production du générateur diesel (en comparaison par rapport à la configuration série). En principe, la puissance produite par le générateur diesel est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour charger la batterie. Le diesel est arrêté lorsque la demande est faible et qu'elle peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle.

## 2. Avantages et inconvénients

### Avantages

- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation du carburant ;
- Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel ;
- L'onduleur peut fournir au consommateur la tension désirée en forme et en valeur.

### Inconvénients

- L'apparition d'une coupure instantanée lors de la commutation des sources ;
- Le générateur diesel et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système ;
- Une construction complexe.



## C. Configuration PV/Diesel parallèle

### Schéma synoptique du système PV/Diesel parallèle

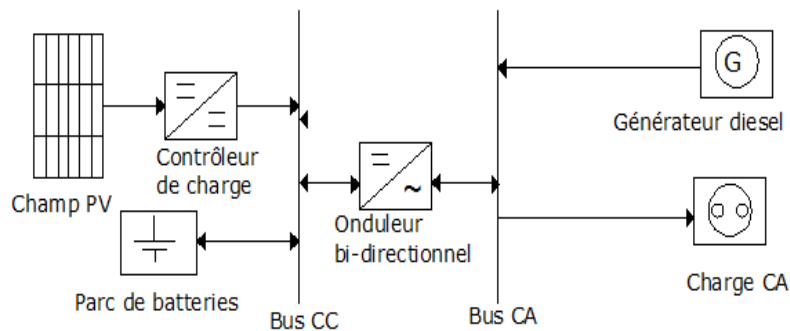


Figure 6: Systèmes hybride PV/Diesel parallèle

### 1. Fonctionnement du système [7]

Dans cette configuration, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources.

Le générateur diesel est connecté au bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit comme onduleur quand la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. La charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. On diminue le nombre des éléments dans le système en utilisant un seul convertisseur. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul. La capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. En outre, la possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système. Enfin, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la part de l'énergie directement utilisée et conduit donc à une augmentation du rendement du système.

## 2. Avantages et Inconvénients de la configuration

### Avantages

- Les composants des systèmes n'ont pas besoin d'être dimensionnés pour la charge totale car le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus, il n'y a pas de conversion de l'énergie produite par le générateur ;
- Baisse du nombre des convertisseurs électroniques, ce diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;
- Une avarie du convertisseur initial électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

### Inconvénients

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible ;
- Nécessité d'une personne qualifiée
- Le bus continu est plus difficile à contrôler

## D. La configuration Flexy Energy

Le concept Flexy Energy est une approche originale pour assurer la fiabilité, la qualité et la rentabilité de la fourniture d'électricité en milieu rurale et péri-urbain, tout en garantissant un coût stable, compatible avec les capacités des bénéficiaires. Le concept Flexy-Energy porte sur la configuration originale de centrale hybride solaire PV/groupe électrogène, sans stockage dans les batteries, et fonctionnant à la fois au diesel et/ou aux huiles végétales. Le concept Flexy Energy se propose également de mettre en place une gestion intelligente de la production d'électricité à partir des diverses sources (PV, diesel..) et des charges des consommateurs

L'architecture générale des centrales Flexy Energy se présente comme sur la figure ci-dessous :

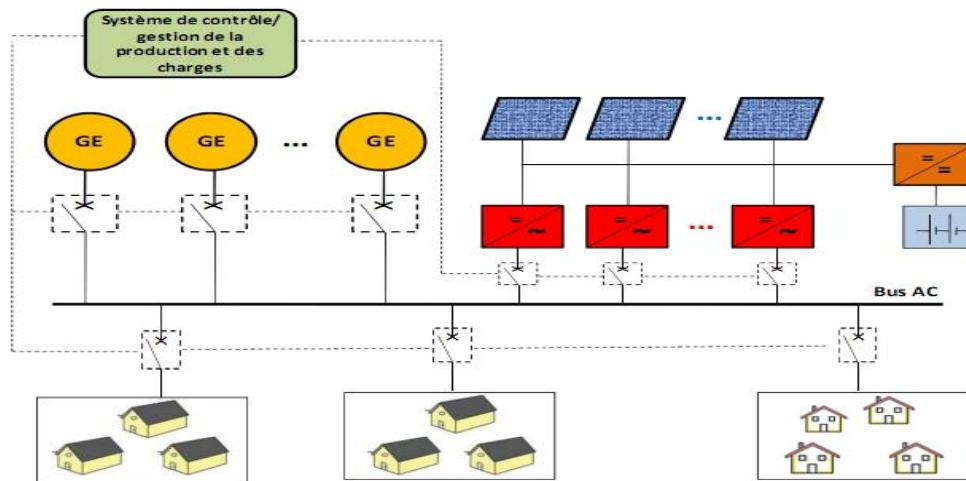


Figure 7: Architecture générale des centrales Flexy Energy

La configuration Flexy Energy est une nouvelle architecture des systèmes hybrides PV/Diesel parallèle dans laquelle il y'a une gestion optimisée de la production et des charges à travers une unité de contrôle-commande appelée le Flexy Control.

## 10. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Compte tenu de la nature aléatoire et intermittente des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesel en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt). Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesel.

Si l'apport en énergie renouvelable est suffisant pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesel par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesel démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesel peut par conséquent être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour la phase de démarrage.

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau n'est pas éliminé, la production d'énergie

renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré, ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolés triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes.
- Des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- Les ressources en énergie renouvelable : ces ressources (le vent, le soleil) sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts (courts circuits...) peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi au pire des cas détruire certains composants.

### III. METHODOLOGIE DE DIMENSIONNEMENT

---

La conception d'un système d'énergie hybride (SEH) exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des différents composants du système, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace. Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SEH.

Les principaux facteurs pour le dimensionnement sont :

- les conditions environnementales du site (ensoleillement, température, humidité, vitesse du vent) ;
- le profil de la courbe de charge (consommation) ;
- les ressources financières ;
- la disponibilité de la technologie et le support technique.

#### 1. Dimensionnement des systèmes

Afin de comparer les différentes configurations de manière raisonnable, les mêmes conditions de demande en quantité d'énergie et de temps de disponibilité du service ont été gardées pour effectuer les calculs de dimensionnement.

Pour des raisons techniques et écologiques, un groupe électrogène ne doit pas fonctionner toute la journée. C'est pour cette raison que les batteries sont intégrées comme moyen d'élargissement pour la disponibilité horaire des différents systèmes.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement des systèmes d'énergie hybrides et systèmes d'énergie renouvelable parmi lesquels : HOMER, RESCREEN, PVSYST (PV seul), RETSCREEN, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, HYBRID2... Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisations sont différentes. Une brève description de quelques-uns de ces outils est donnée ci- après [21]:

**HOMER** - C'est un outil basé sur le modèle des séries chronologiques, développé par le *National Renewable Energy Laboratory*, capable d'optimiser un système hybride contenant différents composants : éolienne, PV, micro-hydrocentrale, diesel, réseau, pile à combustible et batteries. Il exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système dans le but de vérifier

si elles sont réalisables. Il estime ensuite le coût d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au coût de leur cycle de vie. En ce qui concerne les composants à prendre en considération, ils doivent être prévus au préalable afin de réaliser l'optimisation.

**RETSCREEN** : C'est un outil d'analyse des projets d'énergie propre, basé sur Excel, qui aide les décideurs à déterminer rapidement si un projet d'énergie renouvelable, d'efficacité énergétique ou de cogénération est financièrement et techniquement viable.

Dans ce présent mémoire, nous allons effectuer le dimensionnement par une méthode analytique.

## 2. Formules usuelles pour les différents composants des systèmes

### A. Champ Photovoltaïque

Le dimensionnement du champ PV a pour but de déterminer les composants de l'installation photovoltaïque à partir des données météorologiques du site (ensoleillement) et des besoins électriques de l'utilisateur, tout en intégrant le concept d'efficacité énergétique.

La méthodologie proposée ci-dessous est un dimensionnement par itération car le dimensionnement précis d'un système photovoltaïque est relativement complexe (il y a des nombreux paramètres à prendre en compte) [3].

#### Calcul de la puissance crête du champ PV

Tableau 1: Méthode de calcul des caractéristiques du champ PV

Champ PV	Formules
Puissance crête du champ PV	$P_c = \frac{E_j}{E * \eta_{ond} * \eta_{reg} * \eta_{bat} * k_p}$
Nombre de modules en série	$N_{MS} = \frac{V_{gen}}{V_m}$
Nombre de banches parallèles	$N_{BPM} = \frac{P_c}{P_m * N_{MS}}$
Nombre de modules total	$N_{MT} = N_{MS} * N_{BPM}$
Surface du champ photovoltaïque	$S_{Ch_{PV}} = N_{MT} * S_M$

## Choix de la tension nominale du système

Après avoir recensé les différents appareils de l'installation, les caractéristiques électriques (puissance, tension, type de courant CC ou AC) et le temps susceptible d'utilisation journalière préconisé par le client, après avoir dressé le bilan de puissance estimatif en prenant compte des rendements (convertisseur, onduleur) nous choisissons la tension du générateur PV en fonction de la puissance des modules.

Tableau 2:Tension du générateur en fonction de la puissance

Puissance du champ photovoltaïque (kWc)	0-0.5	0.5-2	2-10	>10
Tension recommandée (DC)	12	24	48	> 48

## Choix des onduleurs

Dans un premier temps, il faut déterminer la puissance totale rectifiée en aval du convertisseur et de l'onduleur. L'onduleur est choisi dans le catalogue du fournisseur sur la base de sa puissance nominale,  $P_n$  (VA) qui doit être supérieure ou égale à  $k \cdot P_2$ , où  $k$  est un facteur compris entre 2 et 3 pour tenir compte des appels de courant au démarrage des appareils (si l'installation comporte des moteurs, il est préférable de prendre  $k=3$ ) [3].

Notons que le choix de l'onduleur doit respecter les conditions suivantes :

- Tension à vide de la chaîne ( $V_{oc}$ ) \* Nbre de modules en série doit impérativement être inférieur à la tension maximale d'entrée de l'onduleur ( $V_{max}$ ).
- $V_{oc} \cdot N_b \text{ module série} < V_{max} \text{ onduleur}$   
Cette condition est à respecter impérativement sinon l'onduleur sera détruit.
- Tension nominale d'une chaîne ( $V_{mpp}$ ) \* Nbre de modules en série doit être supérieur à la tension minimale ( $V_{min}$ ) d'entrée de l'onduleur
- $V_{mpp} \cdot N_b \text{ module série} > V_{min} \text{ onduleur}$
- La tension de fonctionnement du champ PV doit être dans la plage de tension de l'onduleur, sinon il y a décrochage de l'onduleur et arrêt de la production d'énergie.
- La somme des courants  $I_{sc}$  des chaînes en parallèle doit être inférieure au courant d'entrée maximal de l'onduleur ( $I_{max}$ ) :  $\sum I_{sc} < I_{max} \text{ onduleur}$
- Le ratio Puissance nominale DC de l'onduleur sur Puissance du champ PV doit être compris entre 70% et 120% :  $0,7 < P_{\text{onduleur}}/P_{\text{champ PV}} < 1,2$

L'onduleur pour site isolé ou l'onduleur-chargeur constitue le centre nerveux d'un système à couplage AC. Il garantit en permanence l'équilibre entre puissance produite et puissance consommée. Les principales différences entre onduleurs pour site isolé et onduleurs photovoltaïque sont répertoriées dans le tableau ci-dessous. [13]

Tableau 3: Comparaison entre onduleur autonome et onduleur réseau

	<b>Onduleur réseau</b>	<b>Onduleur autonome</b>
<b>Direction du flux d'énergie</b>	Unidirectionnel	Bidirectionnel
<b>Fonctionnalités</b>	Régulation MPP, Courant réseau sinusoïdal	Gestion des batteries, du générateur et des charges, tension réseau sinusoïdale
<b>Capacité de surcharge</b>	Environ 110%	environ 300% (protège contre le court-circuit)
<b>Puissance active/reactive</b>	Injection de puissance active pure	Charge à facteur de puissance variable
<b>Tension DC caractéristique</b>	125V – 850 V (technique string)	12V, 24V, 48V

## B. Capacité de la batterie d'accumulateur

La capacité de la batterie d'accumulateurs se détermine par les formules répertoriées dans le tableau ci-dessous. [3]

Tableau 4: Formules usuelles pour le calcul de la capacité de la batterie

<b>Batterie</b>	<b>Formules</b>
<b>Capacité de la batterie d'accumulateur (Ah)</b>	$C_{bat\_min} = \frac{Charge\ journalière\ E_j}{V_{bat} * R_{bat} * DM} * J_{raut}$
<b>Nombre d'accumulateurs série</b>	$N_{as} = \frac{V_{bat}}{V_{acc}}$
<b>Nombre de branches parallèle</b>	$N_{bp} = \frac{C_{bat\_min}}{C_{acc}}$
<b>Nombre total des accumulateurs</b>	$N_{tbat} = N_{as} * N_{bp}$



### C. Groupe électrogène

Le dimensionnement de groupe électrogène est fait en utilisant les formules contenues dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5: Méthode de calcul pour le dimensionnement du groupe électrogène [12]

Groupe électrogène	Formules usuelles
<b>Puissance maximale du groupe électrogène</b>	$P_{(GE\_max)} = (P_P * f_p) / f_t$
<b>Puissance appelée du groupe électrogène</b>	$P_{app} = \frac{P_{GE\_max}}{0.9}$
<b>Durée de vie [ans]</b>	$D_{GE} = T_{vie} / (T_{marche} * 365)$
<b>Combustible consommé [litres]</b>	$C_{vol\_fuel} = C_{fuel} * (\sum P_{i\ entre\ 0\ et\ T_{marche}} + 0.1 * C_{bat})$

## IV. EVALUATION ECONOMIQUE

Après les caractéristiques techniques des systèmes d'approvisionnement, il est nécessaire d'intégrer tous les coûts associés pour les confronter aux paiements prévus par les consommateurs. C'est ainsi que nous avons estimé les revenus offerts par chaque option technique. Identifier les systèmes les plus rentables dans le contexte Burkinabé pourrait conduire à motiver des investisseurs dans le domaine, soutenant ainsi une infrastructure électrique fiable pour que les populations rurales soient capables de générer plus d'activités et de valeur ajoutée.

### A. Formulation du modèle

Le modèle développé est basé sur la définition d'une fonction objectif (coût) ou Life Cycle Cost (LCC) [11, 14]. Cette dernière prend en compte toutes les dépenses occasionnées par le système pendant sa durée de vie (coût d'investissement, coûts d'opération et de maintenance, coût de remplacement). La définition de cette fonction passe par les étapes classiques d'analyse financière des projets d'ingénierie.

Dans le cas de notre étude, la fonction objective prend en compte les coûts d'acquisition, d'opération, de maintenance et de remplacement des générateurs diesels, du champ photovoltaïque et des onduleurs. On peut l'écrire de la manière suivante :

$$F = C_{I_{PV}} + C_{I_{GD}} + C_{I_{OND}} + C_{M_{PV}} + C_{M_{GE}} + C_{M_{OND}} + C_{O_{PV}} + C_{O_{GE}} + C_{O_{OND}} + C_{R_{PV}} + C_{R_{GE}} + C_{R_{OND}} - V_{R_{PV}} - V_{R_{GE}} - V_{R_{OND}}$$

Les différents coûts cités sont des valeurs actualisées. La procédure d'actualisation permet de prendre en compte le moment (année) ou une dépense est réalisée.

Selon que les dépenses sont courantes (coûts d'opération, de maintenance, etc.) ou non courantes (coûts de remplacement, etc.), le facteur d'actualisation des dépenses s'exprime respectivement de la manière suivante :

$$PW(i, a, d) = \frac{\left(\frac{1+i}{1+a}\right) * \left[\left(\frac{1+i}{1+a}\right)^d - 1\right]}{\left(\frac{1+i}{1+a}\right) - 1}$$
$$PW(i, a, d) = \frac{\left(\frac{1+i}{1+a'}\right) * \left[\left(\frac{1+i}{1+a'}\right)^d - 1\right]}{\left(\frac{1+i}{1+a'}\right) - 1}$$

a, i et d sont respectivement le taux d'actualisation, le taux d'inflation et la durée du projet.

$a'$  est le taux d'actualisation pour les dépenses non courantes et est donné par :

$$a' = \frac{(1 + a)^{n_j}}{(1 + i)^{n_j - 1}} - 1$$

Pour le calcul des valeurs résiduelles, la connaissance de la durée de vie restante du composant est nécessaire. Pour un composant  $j$ , la durée de vie restante est donnée par :

$$nr_j = n_j - \left[ d - n_j * ENT \left( \frac{d}{n_j} \right) \right]$$

ENT arrondit un nombre à l'entier immédiatement inférieur.

Le facteur d'actualisation des valeurs résiduelles est donné par :

$$S(a, d) = \frac{1}{(1 + a)^d}$$

Le facteur d'annualisation du coût d'acquisition d'un composant  $j$  est donné par :

$$A(a, n) = \frac{a * (1 + a)^{n_j}}{(1 + a)^{n_j - 1}}$$

### 1. Coût d'investissement du système

Le coût d'une installation varie en fonction de la puissance installée. Une analyse des coûts de quelques composants a permis d'établir quelques corrélations. Le coût d'investissement des différents composants est calculé par les formules dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6: Calcul du coût d'investissement des composants du système

Calcul du coût d'investissement des composants du système		
Champ PV	Groupe diesel	Onduleur
$C_{I_{PV}} = a_1 * P_C^{1-b_1}$	$C_{I_{GE}} = a_2 * D_{max} * P_{GE_{max}}^{-b_2}$	$C_{I_{OND}} = a_3 * P_C * P_{OND}^{-b_3}$

$C_{I_{PV}}$  est le coût d'investissement du champ PV en € ;  $a_1$  et  $b_1$  sont des constantes et sont respectivement égales à 5654 et 0.03.

$C_{I_{GE}}$  est le coût d'investissement des générateurs diesel en € ;  $a_2$  et  $b_2$  sont des constantes et sont respectivement égales à 2544.9 et 0.72.

$C_{I_{OND}}$  est le coût d'investissement des onduleurs en € ;  $a_3$  et  $b_3$  sont des constantes et sont respectivement égales à 1398.9 et 0.2

## 2. Coût de maintenance du système

Le coût de maintenance du système est généralement pris à un pourcentage de son coût d'investissement annualisé.

Tableau 7 : Calcul du coût de maintenance des composants

Calcul du coût de maintenance des composants		
Champ PV	Groupe diesel	Onduleurs
$C_{M_{PV}} = m \cdot PW(i, a, d) * A(a, n_{PV}) \cdot a_1 * P_C^{1-b_1}$	$C_{M_{GE}} = (a_4 + b_4 \cdot P_{GE}) \cdot N * PW \cdot \sum_{t=1}^{24} \varepsilon t_i$	Supposé nul (=0)

$C_{M_{PV}}$  : Coût de maintenance du champ PV ; m est le coefficient de maintenance pris égal à 2%.

## 3. Coût d'opération des composants

Le coût d'opération du champ PV et celui des onduleurs est faible et supposé nul dans notre présente analyse.

Tableau 8: Calcul du coût d'opération des composants

Calcul du coût d'opération des composants		
Champ PV	Groupe électrogène	Onduleurs
0	$C_{O_{GD}} = C_0 * (a_0 * \delta + b_0) \cdot N \cdot PW(i, a, d) \cdot P_{GD} \cdot \sum_{t=1}^{24} x_{t+3}$	0

$C_{O_{GD}}$  est le coût d'opération du générateur diesel ;  $C_0$  est le coût du litre de carburant.

#### 4. Coût de remplacement des composants

Le coût de remplacement des composants est donné par les formules dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9: Calcul du coût de remplacement des composants

Coût de remplacement des composants du système		
Champ PV	Groupe diesel	Onduleur
0	$C_{R\_GD} = PW(i, a', d) \cdot a_2 \cdot D_{max} \cdot P_{GD}^{-b_2}$	$C_{R\_OND} = PW(i, a', d) \cdot a_3 \cdot P_C \cdot P_{OND}^{-b_3}$

Nous supposons qu'il n'y a pas de remplacement des modules PV durant la période d'exploitation considérée. Le coût de remplacement des générateurs diesel et des onduleurs prend en compte le taux d'actualisation ajusté pour le remplacement des générateurs diesel et des onduleurs.

#### 5. Valeur résiduelle des composants

Le calcul de la valeur résiduelle du champ PV, du groupe diesel et de l'onduleur se calcule par les formules dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10: Calcul de la valeur résiduelle des différents composants

Calcul de la valeur résiduelle des composants		
Champ PV	Groupe diesel	Onduleur
$V_{RPV}$ $= S(a, d) \cdot \frac{nr_{PV}}{n_{GD}} \cdot a_1 \cdot P_C^{1-b_1}$	$V_{RGD}$ $= S(a, d) \cdot \frac{nr_{GD}}{n_{GD}} \cdot D_{max} \cdot a_2 \cdot P_{GD}^{-b_2}$	$V_{ROND}$ $= S(a, d) \cdot \frac{nr_{OND}}{n_{ond}} \cdot a_3 \cdot P_{ond}^{-b_3}$

Dans notre présente analyse, nous avons utilisés les valeurs des paramètres suivants :

Tableau 11: Valeurs des paramètres utilisés dans le calcul des différents coûts

<b>Champ PV</b>	<b>Durée de vie des modules en année pris égale à 25 ans</b> <b>Coefficient de maintenance m pris égal à 2%</b>
<b>Générateur diesel</b>	Durée de vie en année prise égale à 8 ans Coefficient de consommation en carburant $a_o$ (L/kWh) pris égal à 0.246 Coefficient de consommation en carburant $b_o$ (L/kWh) pris égal à 0.084 Coefficient de maintenance $a_4$ (€/h) pris égal à 0.17 Coefficient de maintenance $b_4$ (€/h) pris égal à 0.007 Coût du carburant (€/L) pris égal à 0.9 Taux de charge fixe $\delta$ (%) pris égale à 80
<b>Onduleur</b>	Rendement pris égal à 0.95
<b>Taux d'inflation i (%)</b>	4
<b>taux d'actualisation (%)</b>	8

## V. ETUDE DE CAS

### a. Zone de l'étude (village de Bilgo)

La zone de l'étude prise en compte dans le présent dimensionnement est le village de Bilgo (5700 habitants) situé à 35 km au Sud-Est de Ouagadougou. Compte tenu du manque de données dans la zone d'étude, les données d'ensoleillement obtenues pour la ville de Ouagadougou à partir de RETScreen indiquées dans le tableau en annexe seront utilisées pour notre dimensionnement.

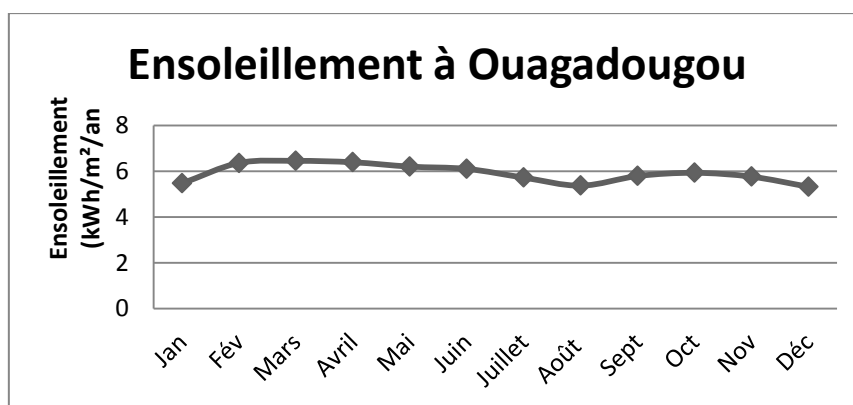


Figure 8: Courbe d'ensoleillement à Ouagadougou

### b. Courbe de charge du village de Bilgo

Le village de Bilgo a une consommation qui varie en fonction des heures. La puissance maximale du village en instantané est de 68 kW.

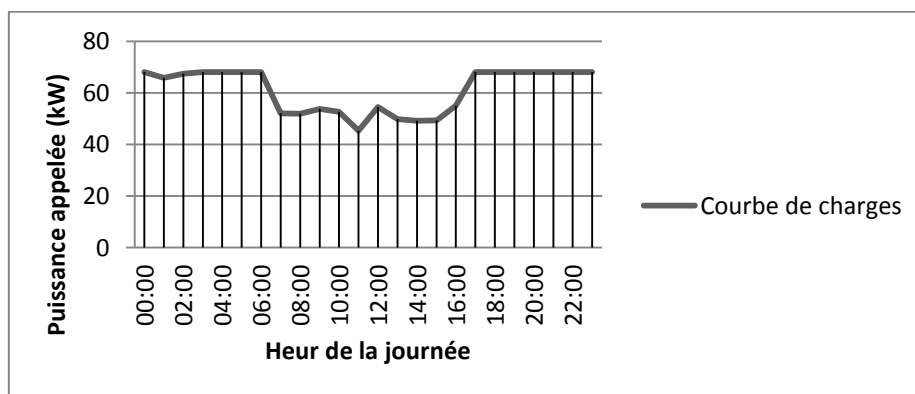


Figure 9: Courbe de charge journalière du village de Bilgo

Au vu de la courbe de charge du village de Bilgo, il faut noter que le souhait en consommation d'électricité ne semble pas varier significativement.

## VI. RESULTATS

### 1. Configuration PV/Diesel Série

Hypothèses :

- PV + Batterie alimente les pics de charge
- GE alimente les pics de charge
- Nombre de jours d'autonomie : 10h/jour

Tableau 12: Résumé du choix des composantes et coût du kWh

<b>Consommation du village</b>		<b>1463 kWh</b>	
Puissance de pointe		68 kW	
Taille des composants			
Champ PV		LCC (CFA)	Coût du kWh
Puissance crête (kWc)	453	2.510.273771	235.0465614
Tension du champ PV en (V)	600		
Nombre de modules série	20		
Nombre de modules parallèle	95		
Nombre total des modules	1900		
Surface du champ PV (m <sup>2</sup> )	3135		
Groupe électrogène			
Puissance max du GE (kW)	73.11		
Puissance appelée (kVA)	80		
Durée de vie	8		
Batteries			
Capacité minimale de la batterie (Ah)	39675		
Nombre de batteries en série	25		
Nombre de batteries en parallèle	12		
Capacité totale installée	42000		
Nombre total de batteries	300		
Onduleurs			
Puissance	80		
Quantité	6		



## 2. Configuration PV/Diesel Commutée

Hypothèses :

- Chaque source alimente la charge séparément
- PV + Batterie alimente les pics de charge
- GE alimente les pics de charge et la batterie

Tableau 13: Résumé du choix des composantes et coût du kWh

Consommation du village		1463 kWh							
Puissance de pointe		68 kW							
Taille des composants									
Champ PV		LCC (CFA)	Coût du kWh (CFA)						
Puissance crête (kWc)	453	2.612.606778	244.628393						
Tension du champ PV	600								
Nombre de modules série	20								
Nombre de modules parallèle	95								
Nombre total des modules	1900								
Surface du champ PV (m <sup>2</sup> )	3135								
Groupe électrogène				2.612.606778	244.628393				
Puissance max du GE (kW)	80.43								
Puissance appelée (kVA)	90								
Durée de vie	4								
Batteries						2.612.606778	244.628393		
Capacité minimale de la batterie (Ah)	47610.453								
Nombre de batteries en série	25								
Nombre de batteries en parallèle	14								
Capacité totale installée	49000								
Nombre total de batteries	350								
Onduleurs								2.612.606778	244.628393
Puissance	80								
Quantité	6								

### 3. Configuration PV/Diesel parallèle

Hypothèses :

- La combinaison des sources peut alimenter la puissance de pointe de la charge
- PV : 30% du besoin journalier
- GE : 70%
- Stockage : 3h

Tableau 14: Résumé du choix des composantes et coût du kWh

Consommation du village		1463 kWh			
Puissance de pointe		68 kW			
Taille des composants					
Champ PV		LCC (CFA)	Coût du kWh		
Puissance crête (kWc)	136	1283432023	120.172569		
Tension du champ PV	400				
Nombre de modules série	14				
Nombre de modules parallèle	41				
Nombre total de modules	574				
Surface du champ PV (m <sup>2</sup> )	948				
Groupe électrogène					
Puissance max du GE (kW)	81.24				
Puissance appelée (kVA)	80				
Durée de vie	4				
Batteries					
Capacité minimale de la batterie (Ah)	3570				
Nombre de batteries en série	17				
Nombre de batteries en parallèle	1				
Capacité totale installée	3600				
Nombre total de batteries	17				
Onduleurs					
Puissance	35				
Quantité	5				

#### 4. Concept Flexy Energy

Hypothèses :

- PV : 30% du besoin journalier
- GE : 70%
- Pas de stockage
- Unité de gestion

Tableau 15: Résumé des choix des composantes et coût du kWh

Consommation du village		1463 kWh	
Puissance de pointe		68 kW	
Taille des composants			
Champ V		LCC (CFA)	Coût du kWh
Puissance crête du champ PV	136	1.231.510055	115.3110099
Tension du champ	400		
Nombre de modules série	14		
Nombre de modules parallèle	41		
Nombre de modules totaux	574		
Surface du champ PV	948		
Groupe électrogène			
Puissance maximale du GE	21.5053		
	30.1075		
Puissance en KVA	2*24		
	33		
Onduleurs			
Puissance (kW)	20		
Quantité	7		

Dans ce présent analyse économique (cas du Flexy Energy) les prix des équipement de la gestion de l'énergie et production (automatisation est pris en compte)

## VII. ANALYSES ET DISCUSSIONS

---

### 1. Configuration PV/Diesel série

Dans cette configuration, le générateur PV et le parc de batteries répondent à la demande de la charge et le groupe électrogène sert de source d'appoint qui vient charger les batteries au cas où ces dernières se déchargent. Le groupe électrogène démarre lorsque la demande du village se maintient près de la puissance de pointe. Pour des raisons économique et écologique, nous réduisons le temps de fonctionnement du groupe électrogène (6 h/24) et limitons donc la consommation et la fréquence de maintenance du groupe électrogène.

Ici nous préférons faire fonctionner notre groupe électrogène entre 2 h du matin et 8 h, c'est-à-dire en moyenne 6 h par jour. A partir de 8 h il y aura présence d'ensoleillement et donc le générateur PV et le parc de batteries prendront le relais.

### 2. Configuration PV/Diesel commutée

Dans cette configuration, le générateur diesel et le générateur PV fonctionnent en alterné. Dans la journée, le générateur photovoltaïque et le parc de batteries alimentent la charge ; dans les moments de faible ensoleillement (ou absence d'ensoleillement) le générateur diesel démarre en alimentant en priorité la charge, et le surplus d'énergie sert à alimenter les batteries.

Le fonctionnement en parallèle n'est pas possible. En plus des différents composants des systèmes étudiés, cette configuration dispose d'un commutateur des sources qui peut être actionné de manière automatique ou manuelle selon la criticité de la charge à alimenter.

### 3. Configuration PV/Diesel parallèle

Dans cette partie, le groupe électrogène n'est pas dimensionné pour la puissance de pointe donc nous avons omis le facteur de pointe (prise égal à 1). Le générateur photovoltaïque alimente la charge à faible demande et le groupe électrogène le supplée lorsque la demande augmente. Les onduleurs choisis sont des onduleurs chargeurs et bidirectionnels.

#### 4. Concept Flexy Energy

Dans le cas du concept Flexy Energy, pour une gestion optimisée de la production et de la consommation, nous avons reparti la charge selon sa criticité :

- Charge normale : il s'agit des éclairages, charges des ménages ;
- Charge sensible : il s'agit des charges qui ne peuvent pas subir des délestages ;
- Charge pilotable : ce sont des charges qui peuvent être commandées à tout moment par un système de contrôle commande.

Pour une optimisation de la production en fonction de la charge, plusieurs groupes électrogènes sont couplés en parallèles afin de suivre au mieux la courbe de charge. Les groupes auront des puissances de 2\*24 kVA et 1\*33 kVA ; le champ PV approvisionnera la charge dans une proportion de 30% du besoin journalier, donc à une puissance de 135 kWc.

Vu les résultats de l'analyse économique des différentes configurations faite sur une durée de vie de 20 ans, nous pouvons conclure que la variante Flexy Energy est celle qui conduit à un coût du kWh moins élevé. Cette variante sera donc choisie pour notre étude de cas, notamment pour le village de Bilgo.

## VIII. CONCLUSION

---

Les systèmes d'énergie hybrides sont les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. En Afrique où le potentiel énergétique solaire est élevé, il est important de favoriser la substitution systématique des sources d'énergies conventionnelles qui deviennent de plus en plus contraignantes au regard du coût d'exploitation et d'opération.

Dans ce travail, nous avons présenté les différentes configurations des systèmes d'énergie hybrides PV/Diesel avec/et ou sans stockage en site isolé. Nous avons tout d'abord défini les méthodologies de dimensionnements propre à chaque configuration et ensuite réalisé une évaluation économique de chaque configuration pour le choix de la variante conduisant à un coût de production du kWh le moins élevé.

Nous avons constaté que les systèmes PV/Diesel avec stockage offrent une production continue qui suit le besoin de la charge, mais cette configuration n'est pas avantageuse du point de vue économique comparativement à la configuration PV/Diesel sans stockage qui offre une certaine flexibilité au niveau de la fiabilité du système et du coût.

Pour l'étude de cas que nous avons faite, nous choisissons la variante Flexy Energy (configuration PV/Diesel parallèle sans stockage) qui offre une gestion optimisée de la centrale de production.

## IX. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] : **Heuraux Christine**, "Formation aux métiers de l'électricité : un projet pilote en Afrique de l'Ouest au service de l'électrification rurale", EDF, 21 et 23 mars 2011, Ouagadougou.
- [2] : M.A. Hamouda, M. Saïdi, A. Lachourene, C. Hamouda et A. Malek Etude et réalisation d'un système intelligent d'alimentation en énergie électrique d'une habitation en milieu urbain avec injection dans le réseau
- [3] : Mr. A. RUNGUDu, Mr. A. BAGRE, Dr. Yao Azoumah; Technologie Solaire cours 2012, dimensionnement PV
- [4] J. G. McGowan, J. F. Manwell, "Hybrid/PV/Diesel system experiences", Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [5] : L.Stoynov, G.Notton, V.Lazarov : Optimisation des systèmes multi sources de production d'électricité à énergies renouvelables Mars 2007
- [6] : GARENI INDUSTRIEL ET NET4UN : Système de production d'énergie hybrides solaire PV/Diesel. Constructeur de groupe électrogènes diesel, Intégrateur de systèmes solaires PV
- [7] : Ludmil Stoynanov Thèse préparé en cotutelle et soutenu pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN ENERGETIQUE. Thème : Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Université de Corse pascale PAOLI, Université technique de Sofia
- [8] : <http://www.burkina-ntic.net/Electrification-rurale-Une.html>
- [9] : Ecole de technologie supérieur Université du QUEBEC, Mémoire présent à l'école de technologie supérieur, Comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en Génie Electrique : Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride Eolien-Diesel. Montréal, Le 3 Mai 2010.
- [10] : Mémoire pour l'obtention du Master Spécialisé Génie Electrique Energétique et Energie Renouvelable (GEER) Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) Soutenu publiquement le 19 Septembre 2011. Bébé Magloire NAN NEUWOUH, Daniel YAMEGUEU. Thème : Analyse, Modélisation e simulation des systèmes hybrides PV/Diesel
- [11] : Daniel YAMEGUEU thèse : Expérimentation et optimisation d'un prototype de centrale hybride solaire PV/Diesel sans batteries de stockage : Validation du concept Flexy Energy. Soutenu publiquement le 19/10/2012, Laboratoire Energy solaire et Economie d'Energie LESEE et Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES-CNRS).

- [12] : Modèle d'électrification rurale pour localités de moins de 500 habitants au Sénégal, Ministère de l'énergie de Mine –Sénégal, composante électrification rurale. Auteur : Zaida Assani Dahouénon. Juillet 2005-janvier 2006
- [13] : SMA, Recueil Technologie2 ; Approvisionnement en énergie solaire des sites isolés et systèmes de secours. Principes, applications et solutions SMA
- [14] : LIFE CYCLE COST ANALYSIS MANUAL States of Illinois Capital Development Board july 1991
- [15] : Yao Azoumah : Cours M2 Energie, Chapitre 5 le mix énergétique et système intelligent\_2012-2013
- [16] : Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2 (2010) 257 – 264 : Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque M.Belhadj<sup>1</sup>, T. Benouaz<sup>2</sup>, A. Cheknane<sup>3</sup> et S.M.A Bekkouche<sup>4</sup>. Laboratoire de Physique et Dispositifs à Semi-conducteurs, Université de Beshar, Algérie... (Reçu le 10 Janvier 2010-accéptéle 28 Juin 2010)
- [17] : Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 199 – 209 : Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M. R. Benhaddadi. Centre de Développement des Energies Renouvelables Ecole Nationale Polytechnique, Département de l'Energie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada (reçu le 02 Mai 2006 - accepté le 30 Septembre 2006)
- [18] : Claude Chevassu cours sur les couplages des alternateurs
- [19] : Energy World Outlook
- [20] : Buzduga Stefania Roxana, stage de recherche 2-30 Novembre 2012 GREAH, Université du Havre, Etude d'un système hybride photovoltaïque éolien – diesel – structure et dimensionnement, rapport de stage
- [21] : <http://www.ines-solaire.org/france/DT1279185878/page/Logiciels.html>



## ANNEXES

ANNEXE I: Caractéristiques du panneau PV .....	41
ANNEXE II : Ensoleillement de la ville de Ouagadougou .....	42
ANNEXE III: Caractéristiques de l'onduleur PV .....	43
ANNEXE IV: Calcul économique pour la configuration PV/Diesel série .....	44
ANNEXE V: Calcul économique pour la variante PV/Diesel Commutée .....	45
ANNEXE VI : Calcul économique de la configuration PV/Diesel parallèle .....	46
ANNEXE VII: Résultats du FLEXY-ENERGY .....	47

## ANNEXE I : Caractéristiques du panneau PV

Tableau 16: Caractéristique du panneau PV

<b>Fabricant:</b>	REC		
<b>Panneau PV :</b>	REC240PE (BLK) (US)		
Technologie des cellules:	multi		
Panneau photovoltaïque actuel:	<input checked="" type="checkbox"/>		
<b>Caractéristiques électriques:</b>			
Puissance nominale:	240,00 Wp	<b>Coefficients de temp.:</b> %/°C    mV/°C	
Tolérance de puissance:	--- %	Tension MPP:	---    ---
Tension MPP:	30,40 V	Tension à vide:	-0,3200    -120,6
Courant MPP :	7,90 A		%/°C    mA/°C
Tension à vide:	37,70 V	Courant de court-circuit:	0,0110    0,92
Courant de court-circuit:	8,40 A	<b>Usure due à l'âge:</b>	%
Tension de système admissible:	600 V	Tolérance tension à vide:	0,0
Rendement du panneau photovoltaïque (STC):	14,55 %	Tolérance tension MPP:	0,0
Mise à la terre recommandée:	Aucune mise à la terre		%
<b>Caractéristiques mécaniques:</b>		Tolérance courant MPP:	0,00
Nombre de cellules dans le panneau photovoltaïque:		Tolérance courant de court-circuit:	0,00
Poids:	--- kg	<b>Commentaire:</b>	
Longueur:	1665 mm		▲
Largeur:	991 mm		▼

## ANNEXE II : Ensoleillement de la ville de Ouagadougou

Tableau 17: Ensoleillement de la ville de Ouagadougou

<i>Données d'ensoleillement à Ouagadougou</i>												
<i>Altitude</i>	306 m											
<i>Latitude</i>	12,4° N											
<i>Longitude</i>	-1,56°											
<i>Mois</i>	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
<i>Ensoleillement (kWh/m<sup>2</sup>/j)</i>	5,47	6,36	6,45	6,39	6,2	6,10	5,72	5,37	5,79	5,93	5,76	5,32
<i>Température (°C)</i>	25,1	28,0	31,4	33,2	32,4	29,7	27,5	26,5	27,4	29,1	28,2	25,4
<i>Humidité</i>	22,8	20,3	21,8	35,7	49,8	62,5	72,5	79,0	75,3	58,2	35,4	26,8

## ANNEXE III : Caractéristiques de l'onduleur PV

Tableau 18: caractéristiques de l'onduleur



**STP 20000TLEE-10**

### Caractéristiques générales:

Type de protection :	IP65
Largeur:	665,00 mm
Hauteur:	680,00 mm
Profondeur:	265,00 mm
Poids:	45,00 kg

### Rendement:

Taux de rendement maximal:	98,5 %
Rendement énergétique européen:	98,2 %

### Valeurs d'entrée:

Puissance DC max.:	20,45 kW
Tension DC max.:	1000 V
Tension nominale DC:	570 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT:	570-800 V
Courant d'entrée maximal:	36,0 A

### Valeurs de sortie:

Max. Puissance AC:	20,00 kVA
Puissance AC nominale:	20,00 kW
Facteur de déphasage min. (montant):	0,8
Tension du réseau:	160-280 V
Fréquence du réseau :	44-65 Hz

**ANNEXE IV : Calcul économique pour la configuration PV/Diesel série**

Tableau 19: Calcul économique pour la configuration PV/Diesel Série

<b>Désignation</b>	<b>PV</b>	<b>GE</b>	<b>OND</b>	<b>Batteries</b>
<b>Coût d'investissement</b>	419617601	72246165	191026237	22177257
<b>Coût de maintenance</b>	92833957	1363174,9	0	0
<b>Coût d'opération</b>	0	85590449	0	22177257
<b>Coût de remplacement</b>	191161958	14105412	181300731	3367707
<b>Valeurs résiduelles</b>	31938151	119456,38	11791743	6844832
<b>LCC</b>	671675365	172110654	36053525	40877388
<b>Total</b>	1245198632			

**ANNEXE V : Calcul économique pour la variante PV/Diesel Commutée**

Tableau 20: Calcul économique pour la variante PV/Diesel Commutée

<b>Désignation</b>	<b>PV</b>	<b>GE</b>	<b>OND</b>	<b>Batteries</b>
<b>Coût d'investissement</b>	1348143777	63359420,8	127249592	438326784
<b>Coût de maintenance</b>	298256130	3801368,1	0	0
<b>Coût d'opération</b>	0	88033948	0	0
<b>Coût de remplacement</b>	204721158	687241,98	19323372	66561719
<b>Valeurs résiduelles</b>	382806258	1047609,5	23564739	57060820
<b>LCC</b>	1468314807	154834369,4	123008224,5	447827682,6
<b>Total</b>	2193985084			

## ANNEXE VI : Calcul économique de la configuration PV/Diesel parallèle

Tableau 21: Calcul économique pour la configuration PV/Diesel parallèle

Désignation	PV	GE	OND	Batteries
<b>Coût d'investissement</b>	419617601	72246165	19102624	22177257
<b>Coût de maintenance</b>	92833957	1363174,9	0	287104,5
<b>Coût d'opération</b>	0	85590449	0	0
<b>Coût de remplacement</b>	191161958	14105412	181300731	4359799
<b>Valeurs résiduelles</b>	31938151	119456,38	11791743	6844832
<b>LCC</b>	671675365	172110654	360535225	40877388
<b>Total</b>	1181155943			

**ANNEXE VII: Résultats du FLEXY-ENERGY**

Tableau 22: Résultats du Flexy Energy

<b>Désignation</b>	<b>PV</b>	<b>GE</b>	<b>OND</b>	<b>Automatisation</b>
<b>Coût d'investissement</b>	419617601	89492088	191026237	28710446
<b>Coût de maintenance</b>	92833957	1592846,3	0	287104,5
<b>Coût d'opération</b>	0	51505311	0	0
<b>Coût de remplacement</b>	191161958	754985,57	181300731	4359799
<b>Valeurs résiduelles</b>	31938151	1150875,6	11791743	2427,963
<b>LCC</b>	671675365	142194355	360535225	33354921
<b>Total</b>	1181155943			