

**THEME**

**EVALUATION TECHNIQUE DES  
PERFORMANCES D'UNE CENTRALE  
HYBRIDE SOLAIRE PV/GROUPE  
ELECTROGENE SANS STOCKAGE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER SPECIALISE EN GENIE ENERGETIQUE ET ELECTRIQUE  
OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 15 septembre 2010 par

**Georgette FUMTCHUM**

**Travaux dirigés par: Dr Yao AZOUMAH**

Enseignant-chercheur

UTER GEI

**Encadrés par : Daniel YAMEGUEU**

Doctorant LESEE

Promotion

[2009/2010]

## DEDICACES

A mon papa et ma maman,

**Gabriel NGNOKAM et Monique Béatrice KAPCHE.**

*Je suis ce que je suis grâce à vos prières et les valeurs intrinsèques que vous m'avez transmises. Que le créateur de l'univers vous accorde longue vie.*

Je vous aime

## REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études a été effectué au sein du Laboratoire d'Energie Solaire et d'Economie d'Energie (LESEE) à l'Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2ie), de ce fait je remercie

Monsieur **Paul GINIES**, Directeur Général de l'institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) pour l'opportunité qu'il offre à tous les étudiants africains de pouvoir réaliser leur rêve.

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de mémoire docteur **Yao AZOUMAH** pour l'appui scientifique et sa disponibilité durant ces quatre mois de stage. Strict et rigoureux, monsieur travailler au près de vous a été pour moi un privilège.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr **Daniel YAMEGUEU** pour tout son soutien, sa présence à tout moment où j'en avais besoin, même au risque d'y laisser sa vie. Que le seigneur te guide et te protège dans la suite de tes travaux de thèse.

Je remercie vivement le professeur **Yézouma COULIBALY**, pour le confort qu'il m'a permis d'avoir lors de mes différentes manipulations au laboratoire, ainsi que tous les connaissances et conseils transmis au courant de l'année académique.

A **Ferdinand** et **Déborah** du restaurant de kamboinsé, je vous remercie pour avoir sacrifié vos vacances pour nous faire à manger durant toute cette période de stage.

Il me serait impardonnable d'oublier de remercier mes amis pour leur soutien permanent, en particulier à **Diderot FOTSO**, **Geoffrey AMEGAN-AHO**, **Patrick DANGANG**, **Oliver KAPTO**, **Hervé MOMO**, **Judicaël ZONZO**, **Ismaël TOUANI**, **Spero DJOSSOU**, **Yvette NGANTI**.

Je tiens à adresser une mention particulière à tous mes camarades de classe, et tous les stagiaires de l'UTER GEI. L'ambiance conviviale qui a régné entre nous durant toute l'année m'a permis de me propulser à un niveau plus haut que possible.

Je finirai par les remerciements les plus importants qui vont au **DIEU** tout puissant qui m'a donné la force et l'intelligence de mener à bout ce travail, ainsi qu'à ma **famille** à qui je dois beaucoup.

## RESUME

Les systèmes hybrides photovoltaïques-groupe électrogène (systèmes PV hybrides) sont importants pour l'expansion du marché des systèmes PV. Ils constituent un compromis économiquement acceptable entre les frais d'immobilisation nécessités par les systèmes PV autonomes et les frais d'exploitation et d'entretien des génératrices alimentées aux combustibles fossiles, qui sont tous deux élevés. Ainsi, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une contribution à l'analyse du comportement et à la maîtrise des performances d'un SEH constitué par une source d'énergie renouvelable le PV, et un générateur diesel. Plusieurs paramètres sont analysés tels que : la part du photovoltaïque dans la production global en fonction du profil de charge, l'intensité et la tension délivrée en fonctionnement dynamique au vu d'analyser le comportement du groupe électrogène. En vu de pouvoir analyser et améliorer les performances de notre générateur PV, nous avons évalué des pertes d'énergie dues aux dépôts de poussière et la possibilité d'utilisé une pompe pour le nettoyage des panneaux. L'analyse liée à la pénétration des PV nous a montré que l'énergie délivrée par les PV est autant dépendante de la charge appliquée que de l'ensoleillement. Enfin une étude économique et environnementale effectuée nous a montré qu'en 321 jours, notre prototype dont la puissance maximale délivrée par les PV est de 2,85kWc a permis à 2ie d'économiser une somme de 471 625 FCFA soit 472 Euro et d'éviter une quantité d'émission de CO<sub>2</sub> de 3396,3 kg.

### Mots clés :

- 1) Systèmes d'énergie hybride,
- 2) Pénétration PV,
- 3) Fonctionnement dynamique,
- 4) Dépôts de poussière,
- 5) Configuration.

## ABSTRACT

The hybrid system-generators (PV hybrid systems) are important for the market development of PV systems. They are economically an acceptable compromise between capital costs required by stand-alone PV systems and operating costs and maintenance of generators powered by fossil fuels, which are both high. Thus, the research presented in this memoir is a contribution to the analysis of the behavior and the mastered performance of hybrid power systems consisted of a renewable energy source PV and a diesel generator. Several parameters are analyzed such as: the PV's share in overall production depending on the load profile, the intensity and the voltage delivered in a dynamic operation in view of analyzing the behavior of the generator. In the ability to analyze and improve the performance of our PV generator, we evaluated the energy loss due to dust deposits and the possibility of a pump used for cleaning panels. The analysis related to the penetration of PV has shown that the energy delivered by the PV is much dependent on the applied load than the sun. Finally, an economic and environmental study conducted showed us that in 321 days, our prototype which the maximum power delivered by PV is 2.85 kWp helped 2ie to save a sum of 471,625 FCFA or 472 Euro and avoid an amount of CO<sub>2</sub> emission of 3396.3 kg.

### Keywords:

- 1) Hybrid power systems,
- 2) PV penetration,
- 3) Dynamic operation,
- 4) Deposits of dust,
- 5) Configuration.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**CA** : Courant Alternatif

**CC** : Courant Continu

**Ensol** : Ensoleillement

**GE** : Groupe Electrogène

**GD** : Générateur Diesel

**GES** : Gaz à Effet de Serre

**LESEE** : Laboratoire d'Energie Solaire et d'Economie d'Energie

**MPPT**: Maximum Power Point Tracker

**Pac** : Puissance à la sortie de l'onduleur

**PV** : Photovoltaïque

**SEH** : Systèmes d'Energie Hybrides

**SONABEL** : Société Nationale d'Electricité du Burkina.

**Temp** : Température

**2ie** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et e l'Environ

## SOMMAIRE

DEDICACES .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
RESUME .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES FIGURES .....	x
I)INTRODUCTION GENERALE .....	1
I-1 Problématique .....	1
I-2 Axes d'étude .....	2
I-3 Objectifs de l'étude .....	2
I-4 Présentation du laboratoire d'accueil (LESEE) .....	3
I-5 Organisation du travail.....	3
IIERE PARTIE : SYTEME D'ENERGIE HYBRIDE .....	5
I.1 Introduction .....	5
I.2 Définition et mission des SEH .....	5
I.3 Etat de l'art .....	6
I.3.1 Principaux composants des SEH.....	7
I.3.1.1 Sources d'énergie renouvelable.....	7
I.3.1.2 Autres sources d'énergie renouvelable.....	11
I.3.1.3 Générateur diesel.....	11
I.3.1.4 Systèmes de stockage .....	12
I.3.1.5 Système de supervision .....	12

I.3.1.6 Convertisseurs .....	13
I.3.1.7 Charges.....	13
I.3.2 Configuration des SEH [10].....	13
I.3.3 Dimensionnement des SEH.....	18
I.3.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH .....	18
I.3.5 Commande des SEH.....	21
I.3.5.1 Stratégie de fonctionnement.....	21
I.3.5.2 Qualité de l'énergie électrique produite par les SEH .....	24
I-4 Conclusion .....	24
IIEME PARTIE : PRESENTATION DU PROTOTYPE D'EXPERIMENTATION « FLEXY ENERGY » ET METHODOLOGIE DES MANIPULATIONS.....	
26	
II-1 Introduction.....	26
II-2 Localisation.....	27
II-3 Concept « Flexy Energy » .....	27
II-4 Caractéristiques climatiques du site.....	28
II-5 Caractéristiques des composants de notre SEH.....	28
II-5-1 Caractéristiques du champ PV .....	29
II-5-2 Caractéristiques groupe électrogène.....	30
II-5-3 Caractéristiques de l'onduleur monophasé.....	30
II-7 Méthodes.....	32
II-7-1 Essais effectués sur la centrale hybride PV/GE sans stockage .....	32
II-7-2 Acquisition des données via le sunny webbox.....	33
II-7-3 Evaluation de l'ensoleillement .....	34
II-7-4 Essais pour évaluation de la pénétration solaire.....	34
II-7-5 Essais en régime dynamique .....	34



II-7-6 Test de dépôt de poussière sur les panneaux.....	35
II-8 Conclusion.....	35
IIIème PARTIE : RESULTATS, DISCUSSIONS ET ANALYSES .....	36
III-1 Introduction .....	36
III-2 RESULTATS .....	36
III-2- 1 Ensoleillement moyen.....	36
III-2-2 Pénétration solaire en fonction du profil de charge .....	37
III-2-3 Comportement du GE en fonctionnement dynamique.....	39
III-2-5 Influence de la poussière sur l'intensité des PV .....	44
III-2-6 Nettoyage des panneaux.....	45
III-2-6-1 Est –il avantageux d'utiliser de l'énergie pour le nettoyage des panneaux ? .....	46
III-3 ANALYSES ET DISCUSSIONS .....	48
III-4 Recommandations .....	51
III-5 Conclusion et quelques pistes d'optimisation .....	51
IVème PARTIE : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE DU PROJET	53
IV-1 Introduction.....	53
IV-2 Aspect économique .....	53
IV-2-1 Energie totale produite par le PV.....	53
IV-2-2 Réduction de la consommation du groupe électrogène .....	54
IV-3 Aspect environnemental.....	55
IV-3-1 Mesures d'atténuations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) sur le prototype « Flexy Energy ».....	55
IV-3-2 Avantages environnementaux des biocarburants.....	56
IV-4 Responsabilité sociétale et importance de l'accès aux services énergétiques.....	57
V) CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	59

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	60
ANNEXES.....	63
Annexe 1 : Bancs de charge utilisés .....	63
Annexe 2 : Fiche technique du sunny boy.....	65
Annexe 3 : Caractéristiques de la pompe .....	66
Annexe 4 : Relevés d'intensité et tension avec un profil de charge aléatoire .....	68

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: paramètres relevés et mesurés .....	31
Tableau 2: pertes de puissance dues aux dépôts de poussière.....	46
Tableau 3: récapitulatif, pertes dues aux dépôts de poussière, quantité d'énergie pour le nettoyage .....	48
Tableau 4: Energie moyenne journalière produite par le PV chaque mois .....	54

## LISTE D'EQUATION

Équation 1 : Puissance de la pompe .....	47
--	----

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: cellule photovoltaïque.....	8
Figure 2: panneau photovoltaïque constitué par $N_p$ branches en parallèle chacune avec $N_s$ Cellules en série .....	8
Figure 3: Influence de l'éclairement (a) et de la température (b) sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque .....	9
Figure 4: Caractéristique courant/Tension/Puissance d'un panneau PV.....	10
Figure 5: Caractéristiques puissance-tension d'un générateur PV .....	11
Figure 6: Système de supervision [3].....	13
Figure 7: Système hybride PV - Diesel série .....	14
Figure 8: Système hybride PV - Diesel commuté .....	16
Figure 9: Système hybride PV - Diesel parallèle .....	17
Figure 10: Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 kW .....	19
Figure 11: Diagramme des priorités des charges .....	23
Figure 12: Classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie .....	24
Figure 13: central solaire hybride PV/GE sans stockage (Kamboinsé-Burkina Faso) .....	26
Figure 14: carte de localisation du site.....	27
Figure 15: schéma général du prototype .....	29
Figure 16: Panneau Sanyo hit.....	29

Figure 17: Générateur diesel .....	30
Figure 18: Onduleur sunny boy.....	30
Figure 19: SUNNY WEBBOX .....	33
Figure 20: Bancs de charge résistive.....	34
Figure 21: multimètre et sonde du solarimètre.....	34
Figure 22: Ensoleillement mensuel .....	37
Figure 23: Profil de charge.....	37
Figure 24: Pénétration PV en fonction de la charge 1.....	38
Figure 25: Pénétration PV en fonction de la charge 2.....	39
Figure 26: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =1,8kW .....	40
Figure 27: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =3,6kW .....	41
Figure 28: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =5,4kW .....	42
Figure 29: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =7,2kW .....	43
Figure 30: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =8kW .....	44
Figure 31: Influence des dépôts de poussière sur la performance des .....	45
Figure 32: puissance moyenne PV par rapport à l'ensoleillement.....	50
Figure 33: Afficheur Sunny Matrix : énergie totale produite.....	54
Figure 34: Afficheur Sunny Matrix : CO <sub>2</sub> évité .....	55
Figure 35: photosynthèse des plantes .....	56
Figure 36: comparaison émissions de CO <sub>2</sub> et NO <sub>x</sub> .....	57

## **D) INTRODUCTION GENERALE**

Le soleil, la biomasse, l'eau, le vent sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de 2,2 milliards de personnes, habitants des régions isolées, d'accéder à l'électricité [1,2]. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les Systèmes d'Energie Hybrides (SEH). Le terme « Système d'Energie hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque, l'éolienne ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées. Les SEH sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles.

### ***1-1 Problématique***

Certaines filières des énergies renouvelables, déjà matures, peuvent fournir des composants fiables et économiquement rentables pour l'intégration dans les systèmes d'énergie électrique. Cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des SEH sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur essor.

Pour les régions isolées ou éloignées, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. [3]

Les moyens de productions tels que le photovoltaïque, l'éolien, le petit hydraulique etc., présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but premier d'un SEH est d'assurer l'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable. Dans tous les cas, la bonne qualité de la puissance doit être garantie par rapport aux normes de sécurité des personnes et d'usage des équipements.

Bien que notre prototype soit conçu avec un onduleur monophasé et expérimenté avec des bancs de charge triphasés, notons que le but du SEH étudiés lors de ce travail est entre autre d'alimenter en énergie à la fois des charges triphasées et monophasées, à une tension sinusoïdale à amplitude et fréquences constantes. Une charge électrique triphasée non-

équilibrée ou des charges monophasées alimentées par un SEH triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension entre les phases.

### *I-2 Axes d'étude*

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans ce mémoire consiste en l'évaluation technique des performances d'une centrale hybride solaire PV/groupe électrogène (diesel ou biocarburant) en fonction du profil de demande en énergie et de la ressource solaire.

Quelques aspects nous permettant d'évaluer les performances des SEH sont à étudier :

**La configuration du SEH :** Le système d'énergie renouvelable retenu est le photovoltaïque. Bien que le stockage d'énergie soit un facteur clef dans un SEH en site isolé, notons que dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Dans notre étude, nous n'utiliserons pas de stockage mais un système de renfort diesel pour satisfaire la disponibilité de l'énergie pour la charge en dépit des fluctuations d'énergie renouvelable.

**La qualité de l'énergie :** La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Les caractéristiques de la tension sont définies et décrites selon les aspects suivants : fréquence, amplitude, symétrie du système triphasé, distorsions harmoniques.

### *I-3 Objectifs de l'étude*

L'objectif global de ce mémoire de fin d'études est de déterminer la pénétration solaire optimale de PV dans un système hybride en fonction du profil des charges et de l'ensoleillement ainsi que le comportement dynamique du groupe électrogène face aux sollicitations brusques de charges.

Il s'agira spécifiquement de :

- Etudier les pénétrations du champ PV en fonction des charges,
- Etudier le comportement du groupe électrogène en fonctionnement dynamique,
- Etudier l'impact des dépôts de poussière et évaluer la quantité d'eau nécessaire pour le nettoyage des panneaux,
- Effectuer une analyse environnique (étude économique et environnemental) de la centrale hybride PV/GE.

#### ***I-4 Présentation du laboratoire d'accueil (LESEE)***

Le LESEE (Laboratoire d'Energie Solaire et d'Economie d'Energie) qui est le premier en Afrique sub-sahélienne à avoir monté un prototype de centrale solaire hybride PV/groupe électrogène sans stockage, est un laboratoire constitué d'une plateforme technique de haut niveau à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie). Il travaille en partenariat avec les laboratoires et entreprises du Nord comme du Sud et accueille tous les ans des stagiaires venant de partout dans le monde.

##### **➤ Objectif 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, pyréliomètre, 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) ;
- ✓ Un laboratoire pédagogique de thermique et froid ;
- ✓ Un laboratoire pédagogique d'électrotechnique ;
- ✓ 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 m<sup>2</sup>, d'une tour de 10 m et d'un bloc électrique de petite puissance (en cours d'acquisition).

#### ***I-5 Organisation du travail***

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois parties.

Dans la première partie, après avoir présenté la définition et la mission des SEH, un état de l'art de ce système est réalisé. Notre travail portant sur un SEH PV/GE, une attention particulière sera consacrée à ces types de sources. Ensuite sont présentées les différentes

solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables en site isolé, les moyens de dimensionnement, ainsi que les problèmes de fonctionnement du SEH et quelques stratégies de commande usuelles.

La deuxième partie, portera sur la méthodologie et l'expérimentation du prototype (Flexy Energy). Des différents essais en vue de déterminer le pourcentage de pénétration solaire, d'analyser le comportement dynamique du GE sont effectués avec un profil de charge défini ainsi que l'impact des dépôts de poussières sur les panneaux.

Ensuite dans la troisième partie, nous présenterons et analyserons et discuterons les résultats obtenus à l'issus duquel nous évaluerons les performances du système en prodiguant quelques recommandations et pistes d'optimisation.

La quatrième partie sera consacrée à l'étude environnisme. Nous effectuerons une évaluation environnementale et économique de la centrale hybride. Ensuite nous achèverons par une conclusion générale et des perspectives.



## **IERE PARTIE : SYTEME D'ENERGIE HYBRIDE**

### **I.1 Introduction**

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel est la source principale d'énergie électrique. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est prohibitif et le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement. La baisse continue des prix des générateurs basés sur les énergies renouvelables et la fiabilité croissante de ces systèmes ont mené à une plus grande utilisation des sources d'énergie renouvelable pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Une des propriétés qui limite l'utilisation de des énergies renouvelables est liée à la variabilité des ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est certainement le couplage entre plusieurs sources, par exemple des générateurs photovoltaïque et diesel.

Après avoir présenté la définition et la mission d'un SEH, nous nous intéressons dans cette partie à l'état de l'art, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrirons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables en site isolé, ainsi que les moyens de dimensionnement du SEH. Quelques problèmes de fonctionnement et les stratégies de commande habituelles du SEH seront présentés à la fin de cette première partie.

### **I.2 Définition et mission des SEH**

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) sont des systèmes qui associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classique, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable [4,5]. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides 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 la fourniture de l'énergie demandée et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie.

Du 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 systèmes isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié.

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part, le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés) [4]. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

### I.3 Etat de l'art

- **Pourquoi un système hybride**

Dans les zones rurales, le coût élevé de l'extension du réseau électrique oblige les institutions à envisager d'autres solutions alternatives. Parmi elles, on trouve l'utilisation de groupes électrogènes (GE) diesel souvent considérés comme une solution économique et fiable, mais générant quelques nuisances d'ordre environnementale et pratique pour l'utilisateur :

- Coûts élevés de fonctionnement,
- dépendance énergétique (pays de l'OPEP),
- problème d'approvisionnement en carburant (éloignement des fournisseurs de carburants);
- maintenance compliquée et coûteuse,
- faible durée de vie (environ 5 ans et parfois moins),
- impossibilité d'une production électrique continue sur 24 heures (ou nécessité de disposer de plusieurs GE),
- nuisances sonores et problèmes de gestion des huiles de vidange.

Les systèmes photovoltaïques (PV) fournissent de l'électricité de manière ininterrompue avec des batteries de stockage, sans bruit, ni nuisances environnementales (excepté la présence des accumulateurs électrochimiques difficiles à recycler). Faciles à installer, ils nécessitent peu de maintenance et font preuve d'une grande fiabilité. Leurs

problèmes résident dans le coût d'investissement élevé nécessaire à leur installation et la limitation de la charge électrique à satisfaire.

Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être associés à d'autres sources d'énergie, la plupart du temps contrôlable comme un groupe électrogène, mais parfois aléatoires (association PV-éolien). Dans cette configuration, avec association de plusieurs sources, les avantages de chacune des sources d'énergie sont ainsi ajoutés:

- le système photovoltaïque réduit la consommation, le temps de fonctionnement et donc de la maintenance du groupe,
- la présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe,
- la présence du groupe réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries diminuant ainsi le coût du système,
- la fiabilité du système global est augmentée,
- les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée.

Se posent alors les problèmes suivants:

- ✓ choisir correctement la taille de chaque composant du système énergétique,
- ✓ optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système,
- ✓ et enfin, rechercher la configuration optimale, c'est-à-dire le coût de production minimal.

### ***1.3.1 Principaux composants des SEH***

Les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans les SEH. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme les éoliennes, l'énergie hydraulique, marémotrice, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustible). Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage et une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SEH. Les batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergies, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel (volant d'inertie) et le stockage d'hydrogène. Une description des composants habituels des SEH est donnée ci-après.

#### **1.3.1.1 Sources d'énergie renouvelable**

- **Générateurs photovoltaïques**

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques (figure 1). Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent presque pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie. La plupart des cellules PV mesurent autour de  $100 \text{ cm}^2$  et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [6] [7] [8]. Pour constituer des générateurs fournissant un courant et une tension continus suffisants pour être utilisés, les cellules sont regroupées en panneaux (modules) (figure 2). Par exemple, un panneau produisant 12 volts peut regrouper entre 30 et 40 cellules selon le fabricant. L'association de ces panneaux en série et/ou parallèle constitue le générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée. Cependant, la constitution de ce générateur est, en soi, relativement délicate, car un mauvais choix de couplage peut entraîner une perte non négligeable de rendement.

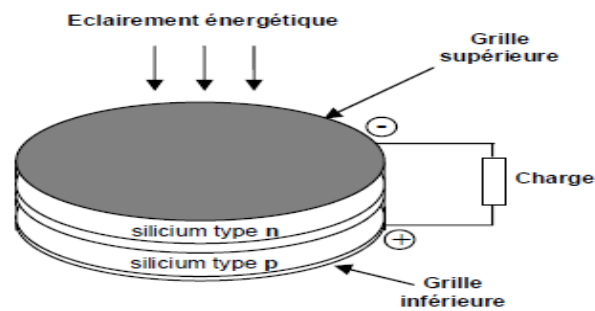


Figure 1: cellule photovoltaïque

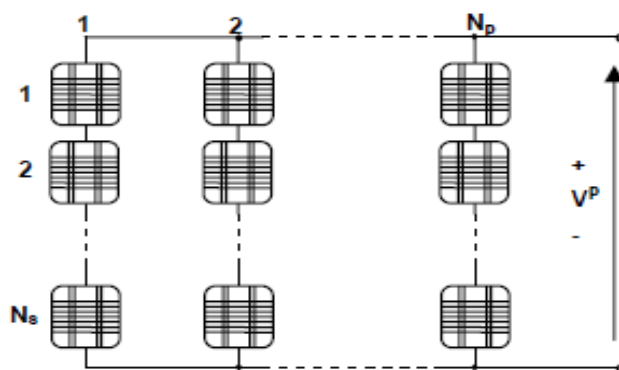
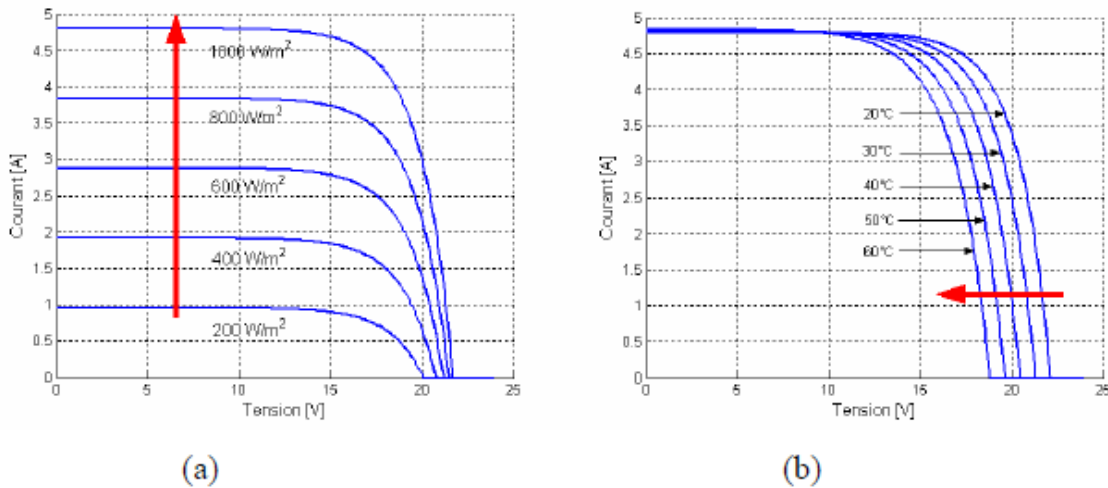


Figure 2: panneau photovoltaïque constitué par  $N_p$  branches en parallèle chacune avec  $N_s$  Cellules en série

Lorsqu'un photon ayant suffisamment d'énergie est absorbé par le semi-conducteur, il produit la rupture d'une liaison de valence et libère ainsi un électron, ce qui crée un « trou »

positif [9]. Ces charges sont ensuite séparées par le champ électrique au niveau de la jonction np, puis se dirigent vers les contacts électriques correspondants. En reliant les deux couches, à travers un circuit électrique, on obtient un mouvement des électrons qui passent d'une couche à l'autre et créent ainsi un courant électrique.

- ✓ L'influence de l'éclairement énergétique  $G_a$  et de la température  $T_c$  de la cellule sur la caractéristique  $I_c - V_c$  de la cellule PV.



**Figure 3: Influence de l'éclairement (a) et de la température (b) sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque**

La Figure 3(a) montre l'augmentation logarithmique de la tension de fonctionnement à vide avec l'éclairement, pendant que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement. L'influence de la température de la cellule sur les caractéristiques  $I_c - V_c$  est illustrée dans la Figure 3 (b). L'effet prédominant avec l'augmentation de la température de la cellule est la diminution de la tension de fonctionnement à vide ; la cellule est ainsi moins efficace. Le courant de court-circuit augmente légèrement avec la température de la cellule.

#### ✓ Optimisation du rendement énergétique du système PV

Comme il est montré dans la figure 4, il existe un seul point sur la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque pour lequel la puissance maximale est produite. Quand un panneau est connecté directement sur une batterie (couplage direct), en général le point de fonctionnement n'est pas le Point de Puissance Maximale (MPP maximum power point) (Figure 4).

La puissance délivrée par les panneaux PV dépend de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes [10]. Ainsi, dans un système à couplage direct, le système PV doit être surdimensionné pour assurer la puissance demandée par la charge.

Pour optimiser le rendement énergétique du système PV, une solution est l'utilisation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker). Celui-ci permet de suivre le point de puissance maximale en contrôlant la tension ou le courant PV indépendamment de la charge [11].

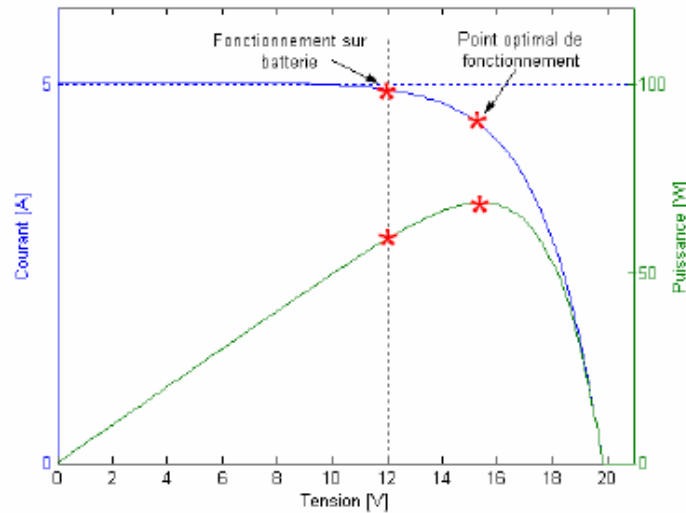
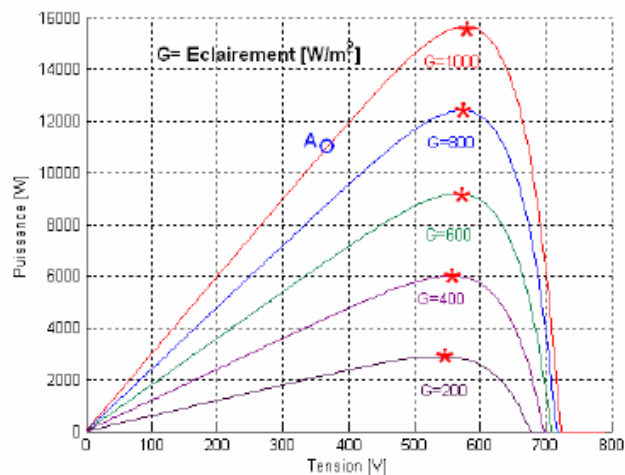


Figure 4: Caractéristique courant/Tension/Puissance d'un panneau PV

Cependant, l'emplacement du PPM sur les courbes P-V n'est pas connu à priori. Il doit être localisé par une méthode de calcul ou par un algorithme de recherche. La situation est compliquée par le fait qu'entre le PPM, l'éclairement et la température, il existe une dépendance non-linéaire, (figure 5) :



**Figure 5: Caractéristiques puissance-tension d'un générateur PV**

### I.3.1.2 Autres sources d'énergie renouvelable

L'éolienne, fiable et rentable, représente la source d'électricité idéale pour de nombreuses applications.

Les centrales hydrauliques sont aujourd'hui les premières sources d'énergie renouvelable. La production mondiale de petites centrales hydrauliques, très attractives pour une production hybride, est estimée à  $85 \cdot 10^9$  kWh [12]. Les variations de débit des cours d'eau sur les rivières peuvent aussi être exploitées par les centrales au fil de l'eau.

Dans la liste des sources d'énergie renouvelable pouvant exploiter les ressources locales, nous avons les centrales à biomasse, une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse et les centrales géothermiques qui captent la chaleur de la croûte terrestre pour produire de l'électricité.

### I.3.1.3 Générateur diesel

Dans le cas d'un système d'énergie renouvelable, la production d'énergie électrique est réalisée en fonction des ressources (soleil, vent...) et non de la demande. Dans le cas des installations autonomes, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Ce système de commande peut prendre une variété de formes, le plus répandu étant le système de commande numérique. Une approche est d'utiliser un seul générateur pour fixer la fréquence (générateur maître) du réseau et laisser les autres tourner à vitesse fixe (générateurs esclaves), donc fonctionner à un débit de carburant constant. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est fixé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'usage du carburant.

#### ➤ Problèmes des Générateurs diesels

Il va sans dire que sous un même profil de charge, les systèmes hybrides PV/GE consomment moins de combustible que les groupes électrogènes seuls. Cependant, l'avantage économique réel de ces systèmes réside dans la réduction des frais d'entretien. Toutefois,

l'utilisation intermittente de groupes électrogènes est aussi responsable d'une certaine usure [13] qui doit être réduite le plus possible par l'établissement de conditions appropriées de mise en marche et de fonctionnement. Il existe peu de documentation dans la littérature quant à la réutilisation de la chaleur perdue par les groupes électrogènes, mais c'est là un facteur important pour leur exploitation dans un climat froid. L'application de nouvelles technologies par exemple, celle faisant appel à un groupe électrogène à vitesse variable [14] et à un moteur diesel pour démarrage sous un froid très prononcé peuvent augmenter de beaucoup l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes.

#### **I.3.1.4 Systèmes de stockage**

Le stockage est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [15].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

#### **I.3.1.5 Système de supervision**

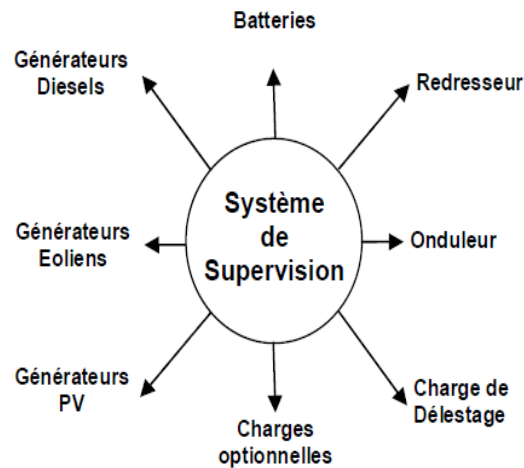
La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Les réseaux multi-diesel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance.

Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur le générateur synchrone du diesel ou la commande de l'éolienne.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants (Figures 6). Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs



diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.



**Figure 6: Système de supervision [3]**

### **I.3.1.6 Convertisseurs**

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs (réalisent la conversion CA/CC), les onduleurs (réalisent la conversion CC/CA) et les hacheurs (réalisent la conversion CC/CC).

### **I.3.1.7 Charges**

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

### **I.3.2 Configuration des SEH [10]**

Le champ photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est souvent nécessaire

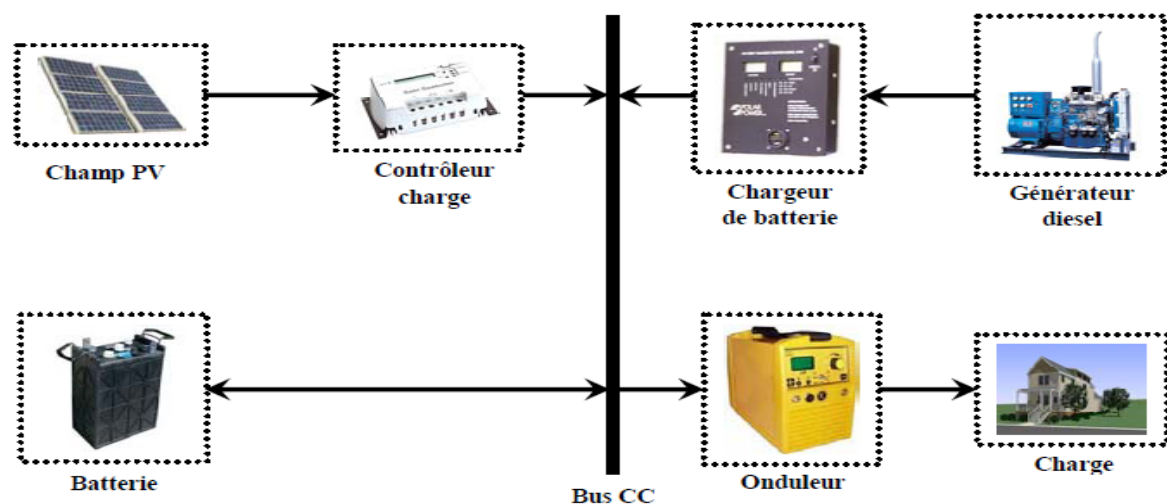
d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel. On distingue les configurations suivantes:

- Système hybride PV - Diesel série
- Système hybride PV - Diesel commuté
- Système hybride PV - Diesel parallèle.

Nous présenterons ci-après, les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

➤ **Configuration série**

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée et puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge, ce qui implique des pertes de conversion significatives. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le générateur diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. De plus, il faut noter que dans la plupart des systèmes de ce type, le rendement du système est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie, augmentant ainsi le nombre des cycles charge – décharge (Figure 7).



**Figure 7: Système hybride PV - Diesel série**

Le régime de fonctionnement du générateur dépend d'une part de la demande d'énergie et d'autre part, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV.

La batterie se charge quand de l'énergie est produite en excès par le champ. Au contraire, quand l'énergie produite n'est pas suffisante, alors la batterie se décharge. Le contrôleur solaire prévient la surcharge de la batterie et sa décharge trop profonde. On peut également faire appel à un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra au générateur PV de fonctionner à son point maximum de puissance. Le système hybride peut travailler de manière automatique si on ajoute un système de mise en marche et arrêt du générateur diesel.

Les avantages sont:

- La puissance du GE peut être optimale lorsqu'il approvisionne la charge et qu'en plus il charge la batterie jusqu'à un niveau de charge de la batterie de 70 - 80 %.
- Le système électrique est simplifié à cause de l'absence de changement de la source d'électricité en courant alternatif.
- La mise en marche du générateur diesel ne provoque pas d'interruption de l'alimentation de la charge.
- Grâce à l'onduleur, on peut obtenir différentes formes du courant selon les besoins (sinusoïdal, carré,...).

Les inconvénients sont:

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel, c'est pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la puissance de pointe de la charge.
- La durée de vie de la batterie est diminuée à cause de l'augmentation du nombre des cycles charge - décharge.
- Le rendement total du système est faible à cause des pertes de conversion dues au fait que le générateur diesel ne peut pas fournir son énergie directement à la charge.
- La détérioration de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

#### ➤ **Configuration commutée**

Cette configuration est très fréquemment utilisée malgré ses limitations opérationnelles. La charge peut être alimentée soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie mais le fonctionnement en parallèle n'est pas encore possible. La batterie peut être chargée de nouveau par le champ PV et le diesel. L'avantage principal de cette configuration par rapport à la configuration série consiste dans l'élimination de la conversion de l'énergie fournie par le générateur d'où l'élimination des pertes supplémentaires de conversion.

En principe, la puissance produite par le générateur est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour la charge de la batterie. Comme dans le cas précédent, le

diesel est arrêté, lorsque la demande est faible et 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 (Figure 8).

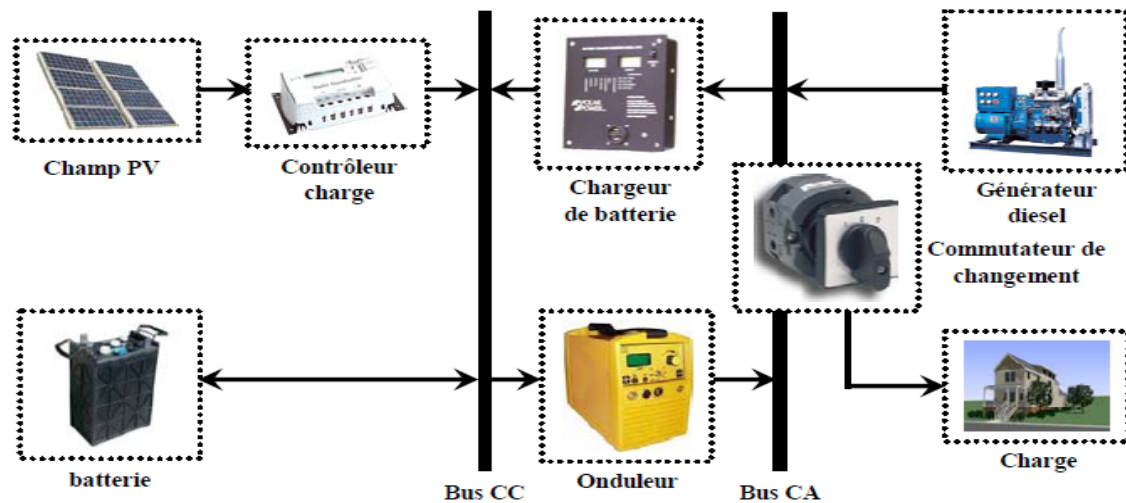


Figure 8: Système hybride PV - Diesel commuté

Les avantages de cette configuration sont:

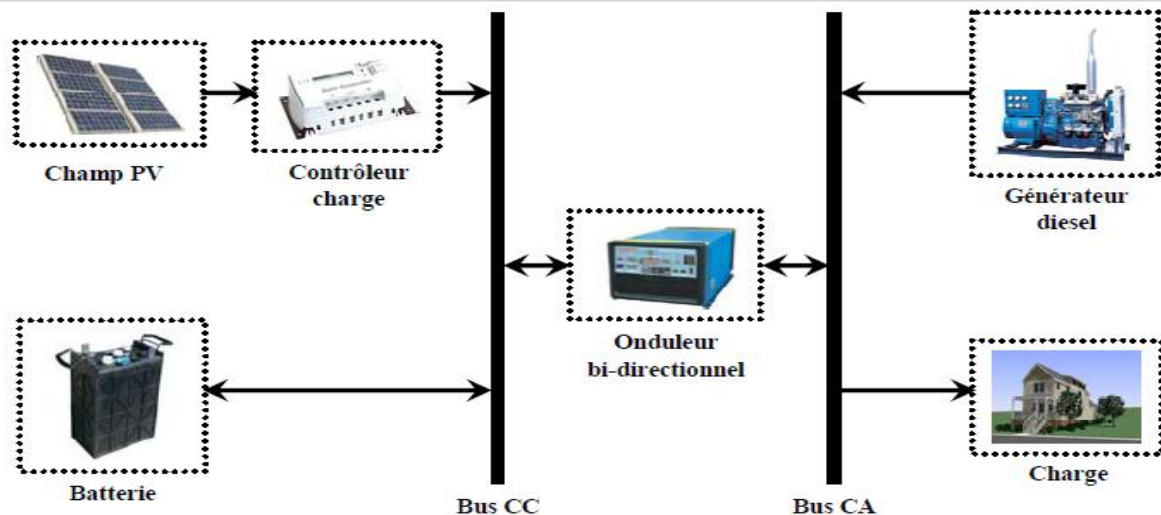
- Différentes formes du courant sont possibles, selon les besoins (sinusoïdal, signal carré).
- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant.

Par contre, les inconvénients sont:

- Il y a une coupure instantanée, lors de la commutation des sources alternatives.
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance pointe de la charge, ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge.

#### ➤ Configuration parallèle

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources. L'onduleur bi-directionnel peut fonctionner, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. Grâce à l'onduleur bi-directionnel, le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur (Figure 9).



**Figure 9: Système hybride PV - Diesel parallèle**

Ce système possède deux améliorations par rapport aux configurations série et commutée.

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

En utilisant un seul convertisseur comme onduleur et redresseur, on diminue le nombre des éléments dans le système. 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.

#### **Avantages:**

- L'alimentation de la charge peut être faite d'une manière optimale.
- Le rendement du générateur diesel peut être augmenté.
- Le besoin d'une maintenance du diesel est réduit.
- Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.

#### **Désavantages:**

- Le contrôle automatique est indispensable pour le fonctionnement du système.
- L'onduleur doit fournir un courant sinusoïdal pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le fonctionnement du système n'est pas évident pour une personne non formé.

Dans ce mémoire, nous avons choisi d'étudier un système hybride photovoltaïque fonctionnant selon la configuration parallèle.

### **I.3.3 Dimensionnement des SEH**

La conception des SEH exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace [17,18]. De plus pour obtenir un taux de pénétration importante des sources d'énergie renouvelable, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose [19].

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 du dimensionnement sont :

- Les conditions environnementales du site (éclairage énergétique, vitesse du vent, température, humidité) ;
- Le profil de charge ;
- Les préférences et les demandes du client ;
- Les ressources financières ;
- La disponibilité de la technologie et le support technique.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH [20] [21]: HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL... Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes.

### **I.3.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH**

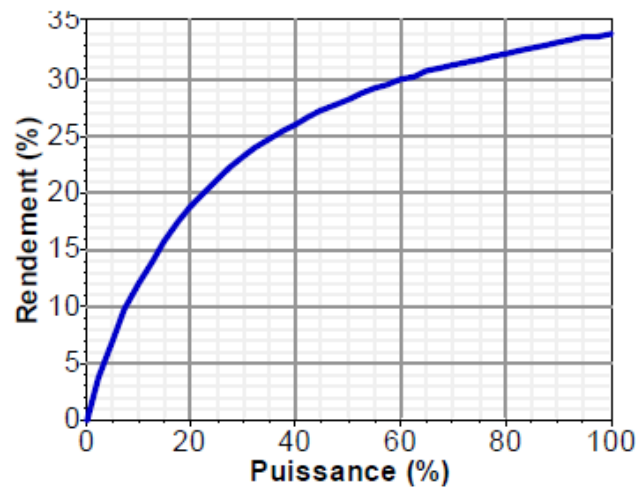
Les systèmes d'énergie en site isolé rencontrent en général les mêmes problèmes que les réseaux faibles [22]. Ces difficultés, qui ne se présentent pas dans les grands réseaux interconnectés, sont en général causées par :

- Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment de la charge),

- Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Compte tenu de la nature stochastique 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 diesels en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt) [23].

Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels. Ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse (Figure 10), mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30% de la consommation à pleine charge) [24]. Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.



**Figure 10: Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 kW**

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence [25]. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels 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 diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs



[24] [26]. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que 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 ne peut pas être 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 l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence. D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires 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. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court-circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs.

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 isolé 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 d'énergie renouvelable : les ressources comme le soleil et le vent, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les courts-circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

### **I.3.5 Commande des SEH**

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables.

Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH :

1. La stratégie de fonctionnement, qui implique des décisions liées au flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système,
2. La qualité de l'énergie, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

#### **I.3.5.1 Stratégie de fonctionnement**

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [27] [28].

Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

- Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.
- Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, l'écart type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc.
- Les caractéristiques des générateurs classiques : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.

- La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc).
- Les normes de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après :

➤ **Gestion du stockage**

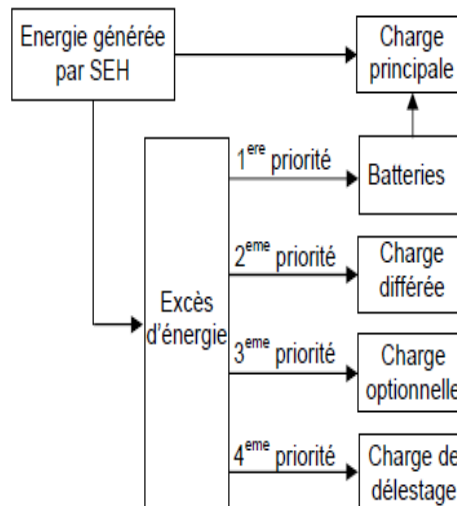
Deux types de stockage [29] sont utilisés dans les SEH: le stockage à court terme et le stockage à long terme.

La stratégie de stockage à court terme, « Peak Shaving Strategy », permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou de la charge. Cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation de carburant.

Le stockage à long terme, « Cycle Charge Strategy » est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue. Cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique et de réduire les cycles démarrage/arrête des GD et donc, la consommation de carburant. Avec cette stratégie, le GD est arrêté jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau minimal. Une fois ce seuil atteint, le GD redémarre et reste en fonctionnement jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau maximal et le cycle se répète encore une fois et ainsi de suite.

➤ **Gestion des charges**

La stratégie de gestion des charges peut aussi être à court terme et à long terme [30]. Les deux types de stratégie utilisent les charges pour faire varier la demande d'énergie. Ainsi, les charges sont connectées et déconnectées par ordre de priorité (Figure 11). Les pompes à eau et les unités de désalinisation sont des exemples de charges différées de faible priorité en fonctionnement normal. Les charges optionnelles sont toutes des charges ayant une utilité et pouvant être utilisées durant l'excédent d'énergie qui autrement serait dissipé.



**Figure 11: Diagramme des priorités des charges**

La stratégie de contrôle à court terme connecte et déconnecte les charges du système en fonction du dépassement de certains seuils fixes pour la fréquence du bus à CA. Les charges sont connectées de manière progressive, selon les variations de la fréquence. La charge de délestage (dump load) est une charge spéciale dont la puissance peut être modifiée en fonction de la déviation de fréquence. Elle peut aider à régler la fréquence du réseau dans des conditions de surplus d'énergie.

La gestion à long terme assure l'équilibre énergétique sur des intervalles de temps importants. Les charges différées et optionnelles ont en général une priorité réduite pendant une partie de la journée. Elles doivent être connectées seulement quand leur régime de priorité est élevé. Dans le cas du pompage de l'eau, quand le niveau de l'eau dans le bassin est bas, la pompe acquiert une priorité élevée et elle doit démarrer. La stratégie de gestion des charges peut aussi être utilisée pour réduire les pertes énergétiques du GD.

### ➤ Réserve tournante

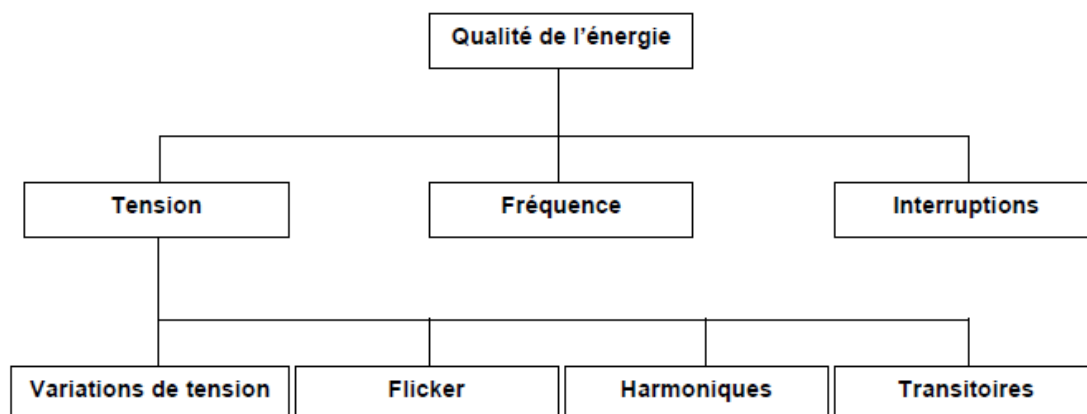
La réserve tournante est définie en [31] comme étant l'exigence du système de commande définie par la capacité des générateurs classiques de couvrir les changements immédiats causés par l'arrêt des générateurs d'énergie renouvelable et par l'augmentation soudaine de la charge. En effet, la réserve tournante détermine la capacité instantanée de réserve minimale du GD en fonction des prévisions de la production d'énergie renouvelable et de l'évolution de la charge. Une réserve d'énergie doit être toujours disponible pour éviter

l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable.

### I.3.5.2 Qualité de l'énergie électrique produite par les SEH

Le terme « qualité de l'énergie électrique » fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence, dans le réseau électrique, de différents phénomènes électriques (comme, par exemple, le flicker ou des distorsions harmoniques). La figure 12 montre une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques [32].

Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être semblables aux caractéristiques des grands réseaux interconnectés. Les consommateurs qui sont connectés aux réseaux isolés, tout comme ceux connectés aux grands réseaux interconnectés, utilisent les mêmes appareils. Par conséquent, les exigences de qualité de l'énergie sont généralement les mêmes.



**Figure 12: Classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie**

## I-4 Conclusion

Une brève description des SEH a été réalisée dans cette partie. Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les SEH ont été données. Notre travail portant sur un SEH composé des panneaux PV et d'un générateur diesel, une attention particulière a été consacrée à ce type de sources. Les différents types d'architectures existants,

les outils de dimensionnement, ainsi que les problèmes et les stratégies de commande habituelles des SEH ont également été présentés.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du SEH doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce but, compte tenu du fait que notre étude soit portée sur un prototype déjà conçu et réalisé, nous exploiterons non seulement les résultats obtenus par le passé pour optimiser notre système mais, nous chercherons d'autres pistes d'optimisation qui n'ont pas été encore explorées, d'où les différentes expériences effectuées.

## **IIEME PARTIE : PRESENTATION DU PROTOTYPE D'EXPERIMENTATION « FLEXY ENERGY » ET METHODOLOGIE DES MANIPULATIONS.**

### **II-1 Introduction**

La forte croissance de la population prévue dans les années à venir (11 milliards d'individus à la fin de ce siècle) devrait encore augmenter les besoins. Pour pallier à ce problème, l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) a mis sur pied un prototype qui consiste en la production décentralisée de l'énergie électrique à partir d'une centrale hybride solaire photovoltaïque/groupe électrogène diesel ou biocarburant sans batteries de stockage (Figure 13); le but étant de substituer progressivement le gasoil avec lequel le groupe électrogène fonctionne au départ par le biocarburant (biodiesel ou les huiles végétales pures).

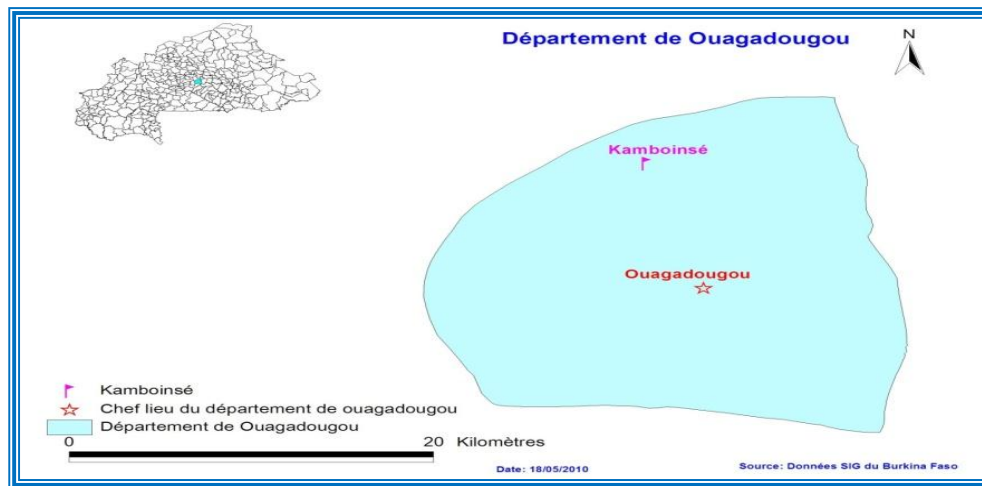


**Figure 13: central solaire hybride PV/GE sans stockage (Kamboinsé-Burkina Faso)**

Il faut noter qu'une des propriétés qui freine la production de l'énergie dans les zones isolées est l'approvisionnement en carburant et la maintenance des GE (très utilisés en zone isolée). Dans cette partie, après avoir situé le lieu d'implantation de notre prototype, expliquer le concept de « Flexy Energy » et donné les caractéristiques climatiques du dit lieu ainsi que les caractéristiques de tous les composants entrant dans notre système hybride, nous présenterons les bases qui nous ont permis d'effectuer les différents essais ainsi que la méthodologie suivie.

## II-2 Localisation

Le site d'implantation du prototype est situé à 15 Km de la ville de Ouagadougou (figure 14).



**Figure 14: carte de localisation du site**

La latitude du site est de  $12,44^{\circ}$  C et la longitude  $-1,56^{\circ}$ , pour des raisons techniques (écoulement facile des poussières sur les panneaux), un angle d'inclinaison de  $14^{\circ}$  a été choisi pour l'installation des panneaux.

## II-3 Concept « Flexy Energy »

Le concept consiste en la production décentralisée de l'énergie électrique à partir d'une centrale hybride solaire photovoltaïque/groupe électrogène diesel ou biocarburant sans stockage ; le but étant de substituer progressivement le gasoil par le biocarburant (biodiesel ou les huiles végétales pures).

### a) Objectifs du concept

- accroître l'accès aux services énergétiques en milieux rural et semi-rural
- assurer la sécurité de l'approvisionnement énergétique en zone urbaine et rurale, à travers la diversification et la substitution progressive des produits pétroliers
- réduire la facture nationale d'importation pétrolière et maintenir les prix de l'énergie à un niveau acceptable pour les populations, surtout les plus démunies
- accroître la production agricole

- accroître les revenus des plus pauvres à travers le développement d'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...)

#### **b) Les phases du concept**

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

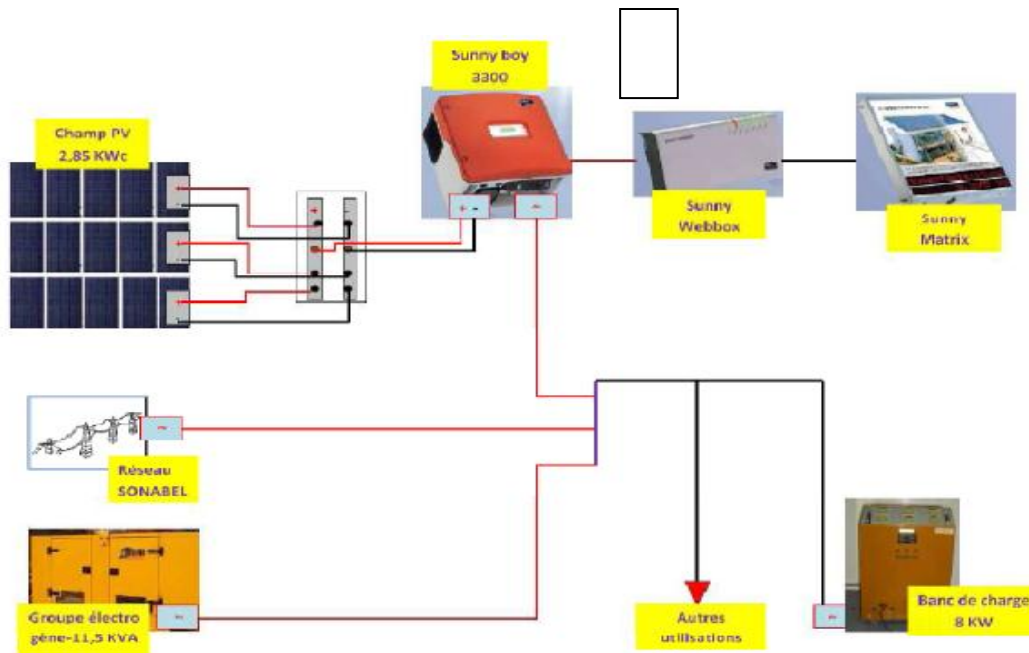
## **II-4 Caractéristiques climatiques du site**

Le Burkina –Faso fait partie des régions du monde où l'ensoleillement normal direct excède 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an. Le Burkina Faso dont l'irradiation globale moyenne est environ 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/jour [33], bénéficie d'un ensoleillement favorable à l'implantation de projets de production d'énergie solaire.

## **II-5 Caractéristiques des composants de notre SEH**

Notre centrale hybride PV/Diesel sans stockage est constituée principalement d'un système photovoltaïque avec la possibilité de couplage soit à un groupe électrogène diesel ou à un réseau électrique. Le champ PV, un groupe électrogène triphasé, un onduleur monophasé, un afficheur électronique Sunny Matrix, un acquiiseur de données Sunny Webbox ainsi que le réseau basse tension triphasé 220/380 V et un inverseur de source.





**Figure 15: schéma général du prototype**

Le type de configuration choisi pour la réalisation de notre centrale est la configuration parallèle (voir figure 9), mais l'onduleur bidirectionnel est remplacé par un onduleur unidirectionnel car le système étant sans stockage nous n'avons pas besoin de convertir l'énergie produite par le GE qui est à la base alternative en continue.

### *II-5-1 Caractéristiques du champ PV*

Le champ PV est composé de 15 panneaux de 190 Wc (Figure 16) chacun soit une puissance totale de 2,85 KWc, une tension de sortie de 274 V, une intensité délivrée de 10,40 A. Leurs cellules sont composées d'une couche de silicium monocristallin et de plusieurs couches minces de silicium amorphe et peuvent atteindre des rendements de 17%.



**Figure 16: Panneau Sanyo hit**

### *II-5-2 Caractéristiques groupe électrogène*

Le GE a une puissance nominale de 11,5 kVA, une tension simple 230 V, une vitesse de rotation 1500 tr/mn. Il est constitué d'un moteur diesel Mitsubishi S3L2. SD, trois cylindres et quatre temps, couplé à un alternateur triphasé de série ECO3-N. (Figure 17).



**Figure 17: Générateur diesel**

### *II-5-3 Caractéristiques de l'onduleur monophasé*

L'onduleur choisi pour notre installation est le sunny boy 3300 de marque SMA (Figure 18) dont les caractéristiques sont bien en accord avec les données de sortie de notre champ PV. (Voir annexe : 2) Il transforme le courant continu des panneaux PV en courant alternatif et injecte ce dernier soit sur le réseau électrique soit sur une des phases du groupe électrogène. Notons que ce type d'onduleur n'injecte son courant que lorsqu'il détecte la présence d'une tension.



**Figure 18: Onduleur sunny boy**

## II-6 Matériels utilisés

**Tableau 1: paramètres relevés et mesurés**

<b>Paramètres</b>	<b>Méthode de mesure et matériel</b>
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
Quantité de CO2 éviter	enregistrée par le Sunny Matrix
Intensité par phase 1 du groupe électrogène, $I_{GE,ph1}$	Mesurée avec la pince ampèremétrique
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 ampèremétrique

## II-7 Méthodes

### II-7-1 Essais effectués sur la centrale hybride PV/GE sans stockage

Pour effectuer nos essais, nous avons suivi des protocoles de manipulation non seulement au démarrage et à l'arrêt du GE, mais aussi au niveau de la variation des charges.

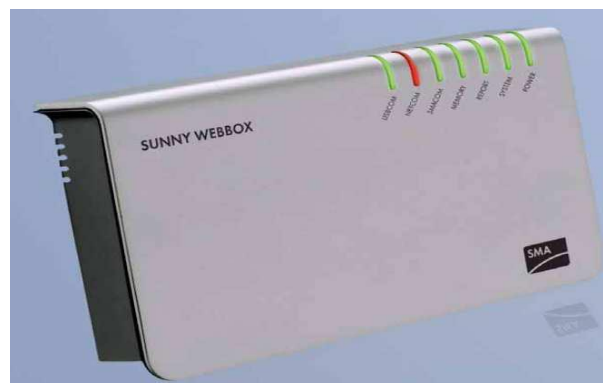
La procédure à suivre était la suivante :

- a) Ouvrir les disjoncteurs du coffret du local (climatiseur, ventilateur, éclairages et prises) ;
- b) Apprêter la fiche de relevés
- c) Démarrer le groupe électrogène à vide ;
- d) Laisser tourner le groupe électrogène pendant 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 préalablement défini;
- g) Mettre en marche le chronomètre et relever les mesures conformément à la fiche de relevés ;
- h) Arrêter le chronomètre quand la durée de l'essai est atteint et relever immédiatement les mesures (fin) conformément à la fiche de relevés;
- 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 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

En régime transitoire, la procédure est identique à la seule différence que lorsqu'on varie la charge on relève immédiatement les mesures, ensuite on laisse tourner la centrale pendant 30 minutes avant de passer à une autre charge et on relève immédiatement à nouveau les mesures.

### *II-7-2 Acquisition des données via le sunny webbox*

L'acquisition des données peut se faire via le SUNNY WEBBOX (Figure 19) car elle collecte en continu les données de l'onduleur, ce qui permet à l'exploitant de s'informer à tout moment de l'état de son installation ; connecter à un ordinateur, on suit les instructions données dans son manuel d'utilisation pour télécharger les données enregistrées. Néanmoins, avec le SUNNY WEBBOX il ya des données pouvant nous aider dans notre étude que nous n'avons pas ; raison pour laquelle nous procédons manuellement pour récolter les données en utilisant les appareils tels que : le thermomètre, le solarimètre. L'onduleur et le pupitre du groupe électrogène.



**Figure 19: SUNNY WEBBOX**

#### **❖ Les bancs utilisés pour la simulation des charges**

Les bancs que nous utilisons pour simuler nos charges sont des bancs résistifs supposés être de 8kW à raison de 4kW par banc, cependant après étalonnage, nous nous sommes rendus compte qu'ils valaient plus de 8kW. Nous avons mesurés chaque résistance et connaissant la tension, nous avons déduit la puissance. (Voir annexe). Après ces calculs nous nous sommes donc rendu compte que toutes nos charges étaient majorées. Certes ses valeurs inscrites sur les bancs sont généralement affectés d'une marge d'erreur qui est d'environ  $\pm 2\%$  mais après calcul nous avons constaté que l'erreur est d'environ  $\pm 5,4\%$  et  $\pm 9,6\%$  respectivement pour les bancs N°1 et banc N°2. Comme conséquence au lieu des charges de 1,8 ; 3,6 ; 5,4 ; 7,2 ; 8 kW nous avons plutôt celles de 1,9 ; 3,8 ; 5,7 ; 7,7 ; 8,2 kW.



**Figure 20: Bancs de charge résistive**

### *II-7-3 Evaluation de l'ensoleillement*

Pendant la durée de nos travaux de recherche qui a été de 4 mois, nous avons relevé tous les jours de 8h 30 à 16h45 l'éclairement journalière à l'aide d'un solarimètre et d'un multimètre (figure 21). Ensuite nous avons calculé l'ensoleillement mensuel.



**Figure 21: multimètre et sonde du solarimètre**

### *II-7-4 Essais pour évaluation de la pénétration solaire*

Ces essais consistent à faire fonctionner le système d'énergie hybride sur la période de mai à juin, en suivant un profil de charge bien défini. A des intervalles de temps de 30 minutes, nous relevons ou mesurons chaque paramètre suivant le tableau 1 après avoir varié la charge. Ensuite nous analysons les pénétrations solaires sur plusieurs jours de ces mois en fonction de la charge.

### *II-7-5 Essais en régime dynamique*

Ces essais consistent à analyser le comportement de la centrale hybride juste au moment où on passe d'une charge à une autre. Le changement brusque de charge a une grande

influence sur le fonctionnement du GE. Une première manipulation a consisté à mesurer et relever juste après avoir fait varier la charge, les données suivant le tableau 1, ce qui nous prenait environ 1 minute pour tout relever et mesurer (voir annexe :4). Pour rendre notre analyse plus fiable, nous avons fait une deuxième manipulation qui consistait après avoir varié la charge, de mesurer l'intensité délivrée sur les trois phases alimentant les charges (la phase 3 correspondant à celle où le PV aussi injecte son intensité) à des intervalles de temps de 10 secondes puis, la tension délivrée par le GE ainsi que l'intensité du GE sur la phase 1, pour pouvoir ensuite déterminer l'intensité délivrée par les PV en faisant une soustraction entre la phase 3 alimentant les charges et la phase 1 du GE.

#### ***II-7-6 Test de dépôt de poussière sur les panneaux.***

Compte tenu de la saison qui est pluvieuse et du fait de ne pas pouvoir avoir une quantité considérable de poussière sur les panneaux, ce temps nous a emmené à choisir pour cette partie de l'étude d'exposer deux panneaux identiques au soleil avec les caractéristiques suivantes : Dimension d'un panneau, 771 x 665 x 30 (mm), courant maximal 2,94A, puissance maximal 50W, tension à circuit ouvert 20,6V, type « Cell Technology Multi-Si »; montés sur un support incliné à 15° et orienté plein sud, l'un est constamment nettoyé avec de l'eau et l'autre gardé avec la poussière. Ainsi, à des intervalles de temps d'une heure nous mesurons à circuit ouvert l'ensoleillement, la tension et l'intensité délivrée par les deux panneaux et nous évaluons la quantité d'eau journalière utilisée pour le nettoyage des panneaux.

#### **II-8 Conclusion**

Dans cette partie, une brève présentation géographique et climatique du site d'implantation du prototype a été faite ainsi que les caractéristiques des composants entrants dans la réalisation de notre SEH. Les principaux tests nous permettant d'évaluer les performances de notre SEH ont été décrits. Dans la partie qui suit, nous allons présenter les résultats, les analyser et discuter afin de mieux appréhender le fonctionnement du système.

## **IIIème PARTIE : RESULTATS, DISCUSSIONS ET ANALYSES**

### **III-1 Introduction**

Dans la partie précédente, nous avons présentés les méthodes qui nous ont permis d'effectuer des mesures sur notre prototype.

Dans cette partie, les résultats obtenus après des expériences faites sur le prototype de début mai à fin août 2010 qui nous ont permis de mieux appréhender le fonctionnement des systèmes hybride PV/ groupe électrogène sans stockage sont analysés. Dans un premier temps nous présenterons les résultats d'ensoleillement moyen mensuel obtenus durant les 4 mois de stage. Cette période étant située dans une saison pluvieuse, nous étudierons la pénétration solaire en fonction du profil de charge. Cependant, les résultats obtenus après des essais en fonctionnement dynamique sous un autre profil de charge défini sont présentés et enfin nous analyserons les résultats de test de dépôts de poussière sur les deux panneaux ainsi que la quantité d'eau utilisée pour le nettoyage des panneaux.

### **III-2 RESULTATS**

#### ***III-2- 1 Ensoleillement moyen***

Pendant toute la durée de nos essais entre le 3 mai et le 27 août 2010, l'ensoleillement maximal enregistré par le champ PV a été de  $712,6\text{W/m}^2$ , ce qui représente 71,3% d'ensoleillement que le PV devrait recevoir pour produire le maximum d'énergie. Malgré le fait que nous soyons dans une période défavorable pour la radiation solaire, cette valeur n'est pas très loin de la valeur maximale qui est de  $1000\text{W/m}^2$ , ce qui montre qu'avec une bonne gestion des charges, notre centrale pourrait fonctionner durant toute l'année avec un apport d'énergie photovoltaïque important.



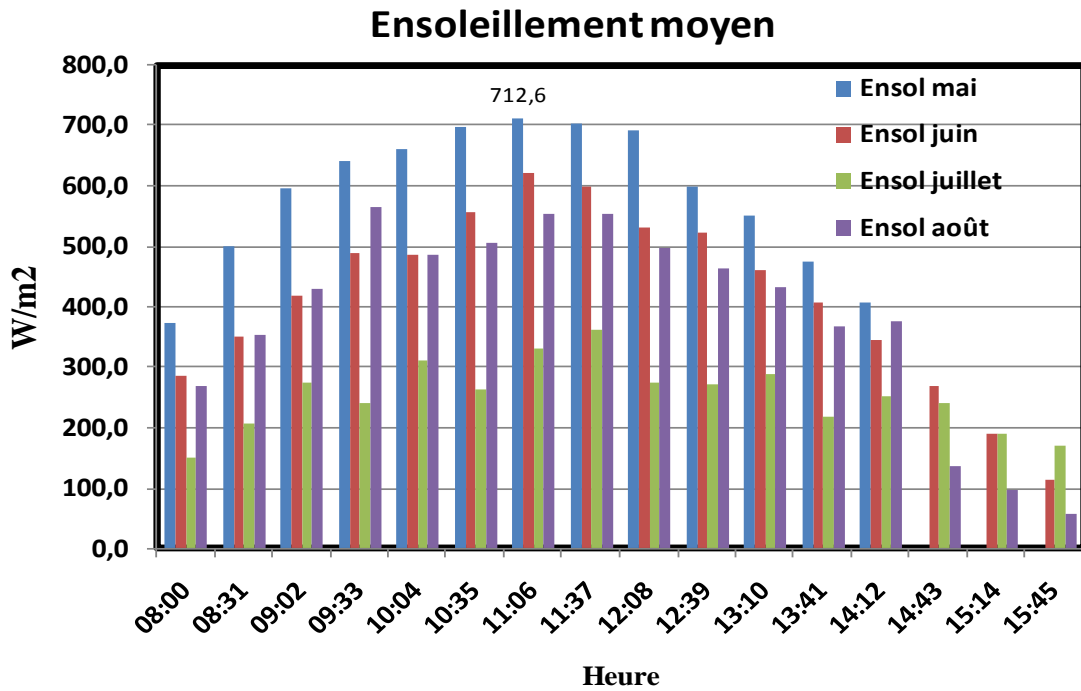


Figure 22: Ensoleillement mensuel

### III-2-2 Pénétration solaire en fonction du profil de charge

Nous avons utilisé un profil de charge défini comme sur la figure 23 pour simuler les charges pendant nos essais des mois de mai et juin.

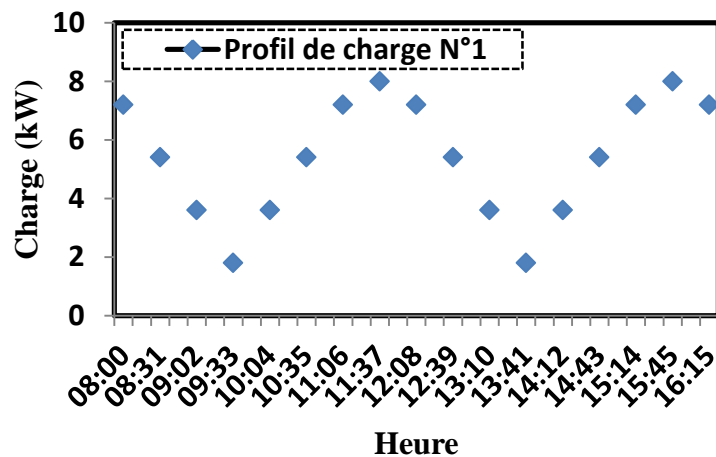


Figure 23: Profil de charge

Ces résultats obtenus avec un profil de charge défini nous montrent que le pourcentage maximal moyen de pénétration des PV est de 36,8% pour le profil 1 avec une charge de 3,6 kW. Le pourcentage minimal est de 8,4% pour le profil 1 avec une charge de 1,8 kW.

Les différents résultats représentés sous forme de courbe (figure 24) nous montrent l'influence de la charge sur la puissance délivrée par l'onduleur (Pac). Les courbes de la figure 24 qui sont issues des relevés de données sur la centrale hybride durant les mois de mai et juin nous montrent le comportement de l'onduleur face à la puissance appelée, la quantité d'énergie qu'on reçoit à la sortie de l'onduleur à des faibles charges n'est pas la totalité produite par les PV, ainsi les pertes générées par l'utilisation des charges de très faibles puissances sont importantes. Comme nous pouvons le remarquer sur les figures 24 et 25, lorsque nous faisons fonctionner notre centrale avec une charge de 1,8 kW, même avec un ensoleillement important, la puissance délivrée par le PV est très faible, d'où un manque de maximiser l'utilisation des PV.

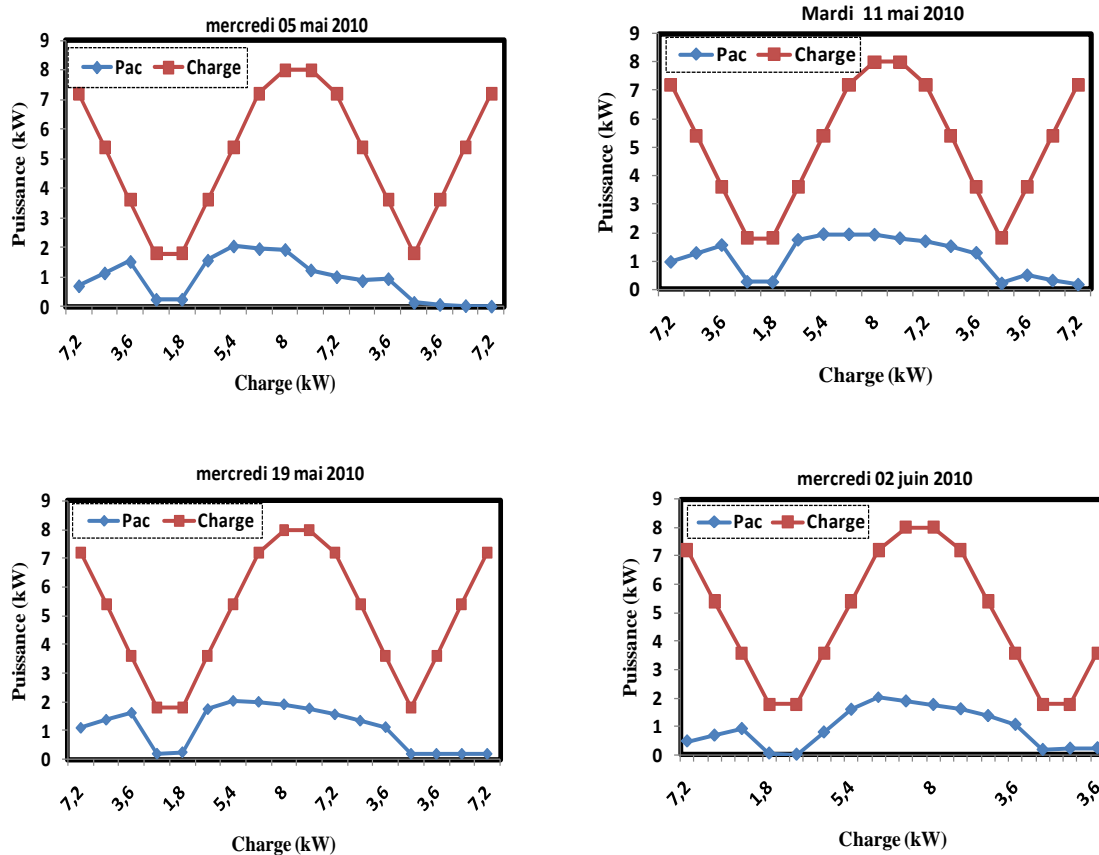


Figure 24: Pénétration PV en fonction de la charge 1

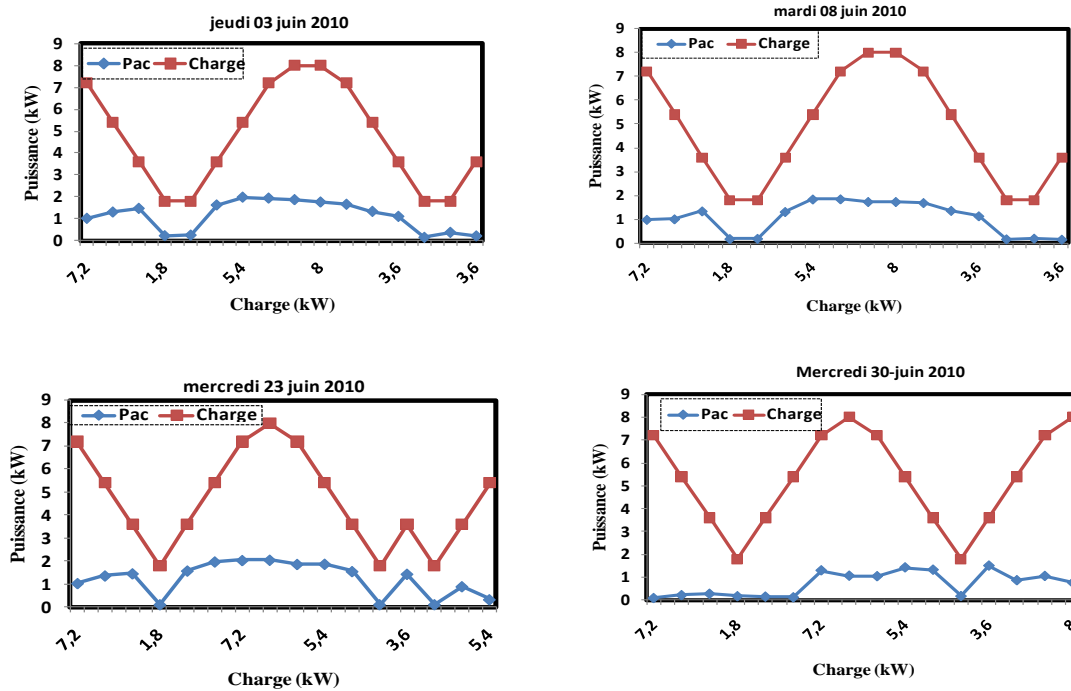


Figure 25: Pénétration PV en fonction de la charge 2

### III-2-3 Comportement du GE en fonctionnement dynamique

Les intensités I1,I2,I3 représentent les intensités délivrées par le PV et le GE à la charge, I3 étant la seule phase où le PV injecte son intensité. Notons qu'en dehors de I3 qui tend à s'éloigner des deux autres intensité à des charges élevées, les deux autres phases sont presque équilibrées, ce qui pourrait être dû au fait que notre onduleur soit monophasé. Nous avons en moyenne pour une charge de 1,8 kW une intensité de 2,7A sur les trois phases, pour une charge de 3,6kW nous avons 5,5A ; 8,3A pour la charge de 5,4kW ; 11A pour la charge de 7,2 kW et 12A pour celle de 8kW.

#### ❖ CHARGE 1,8kW

Les essais effectués sur la centrale les 23 et 24 août 2010, nous montrent qu'à ce niveau de la charge, l'intensité délivrée par les trois phases est comprise entre 2,7 et 2,9 A, la tension délivrée par les 3 phases V1,V2,V3 est généralement comprise entre 234 et 233 volt, sur la courbe de tension du lundi 23, la valeur prise à 9h 10s est un point aberrant qui pourrait être dû à une erreur de lecture.

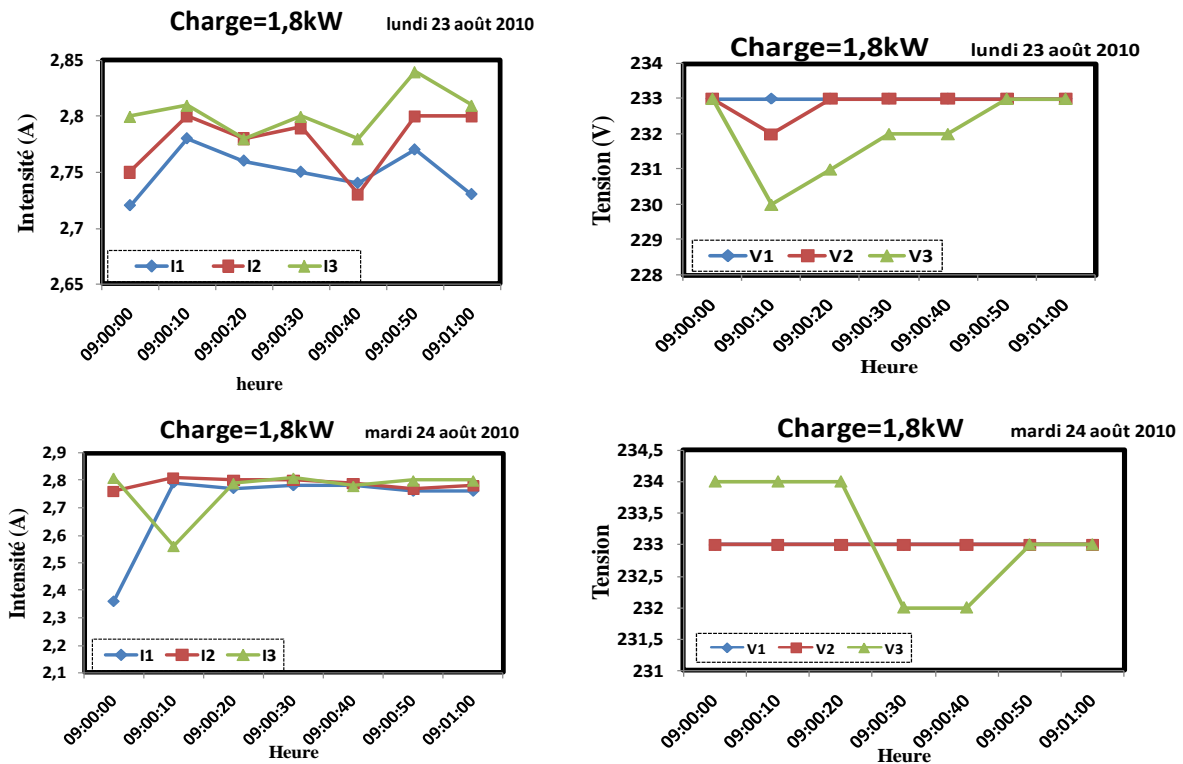


Figure 26: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =1,8kW

### ❖ CHARGE 3,6kW

A partir des essais effectués à une charge de 3,6kW, la tension délivrée par la phase 3 du GE V3 commence à s'écarter des deux autres V1 et V2 ; elle est comprise entre 234 et 222 volt. Certes que l'intensité elle aussi varie mais le décalage ne va pas au-delà des centimes lorsqu'elle est mesurée à l'aide d'un ampèremètre.

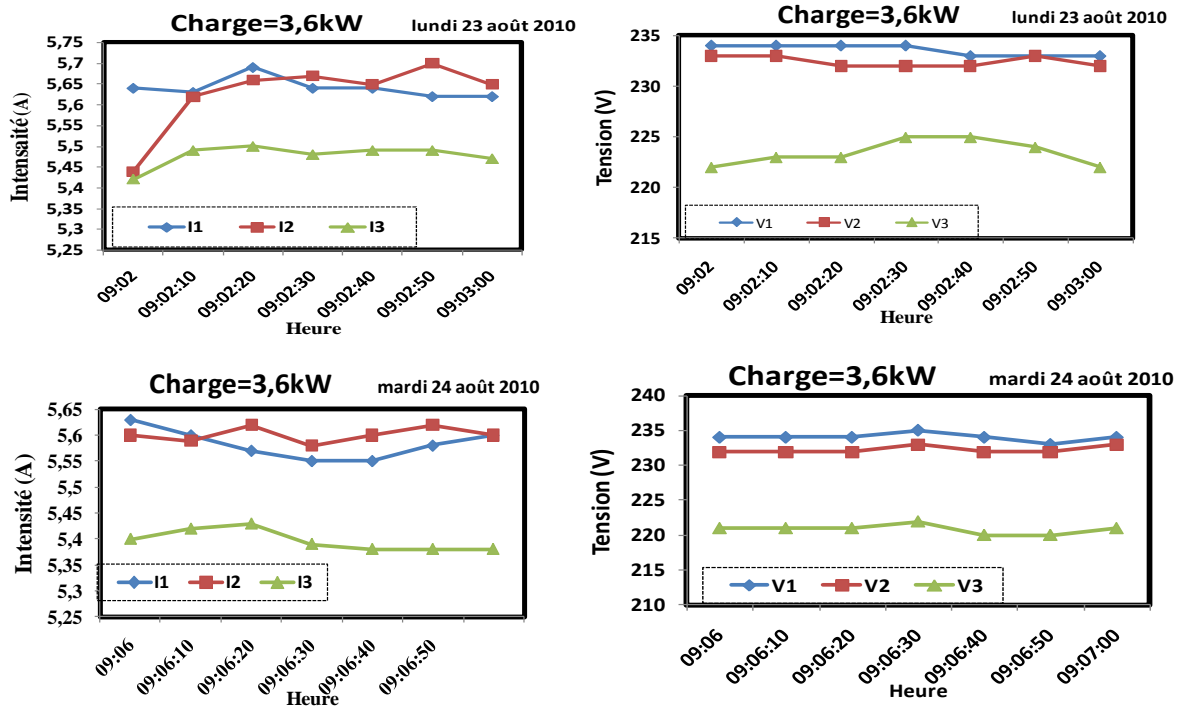


Figure 27: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =3,6kW

### ❖ CHARGE 5,4

A ce niveau de la charge, où la tension moyenne est comprise entre 234 et 220 volt, le déséquilibre de la tension délivrée par la phase V3 et les deux autres V1 et V2 commence à augmenter.

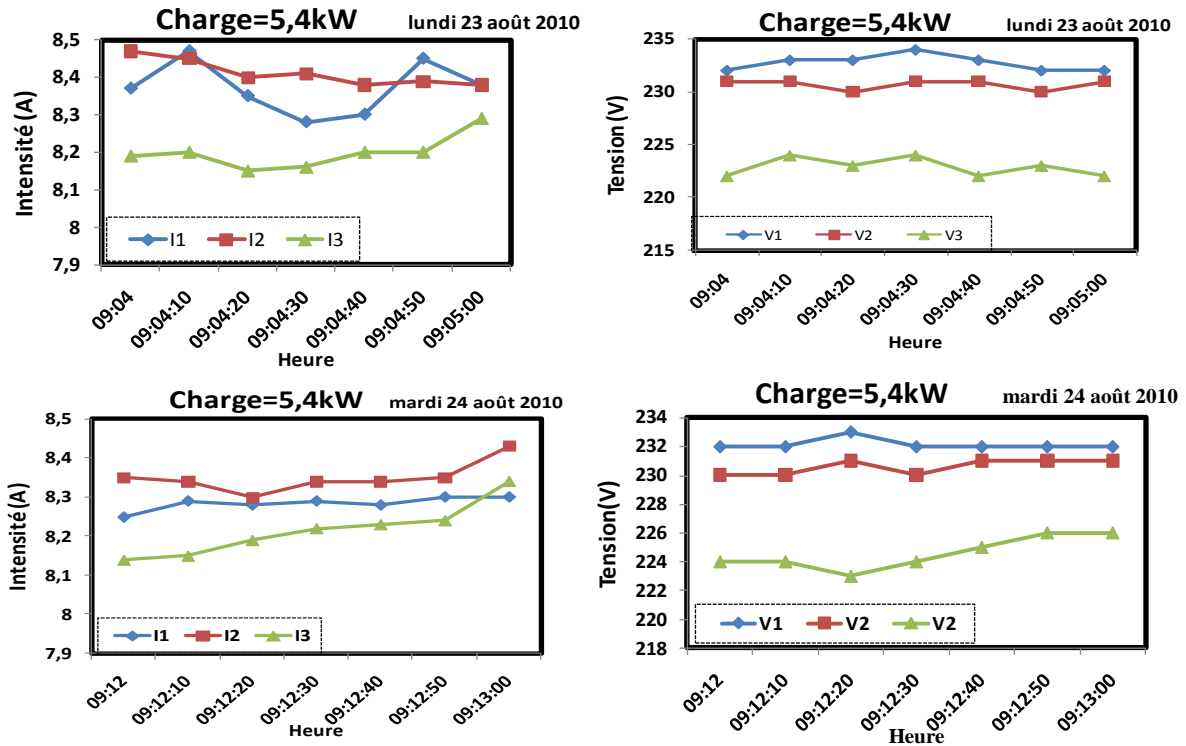


Figure 28: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =5,4kW

### ❖ CHARGE 7,2kW

A cette charge, l'intensité et la tension délivrée par la phase 3 baisse d'avantage et les deux autres V1 et V2 aussi, entre 234 et 232 volt. Ceci pourrait être dû à la pénétration importante de l'énergie PV qui n'est injectée que sur une seule phase (phase 3) ; ce qui crée un déséquilibre au niveau des phases. A ce niveau de la charge, où la tension moyenne est comprise entre 234 et 220, le déséquilibre de la tension délivrée par la phase V3 et les deux autres V1 et V2 commence à être observer.

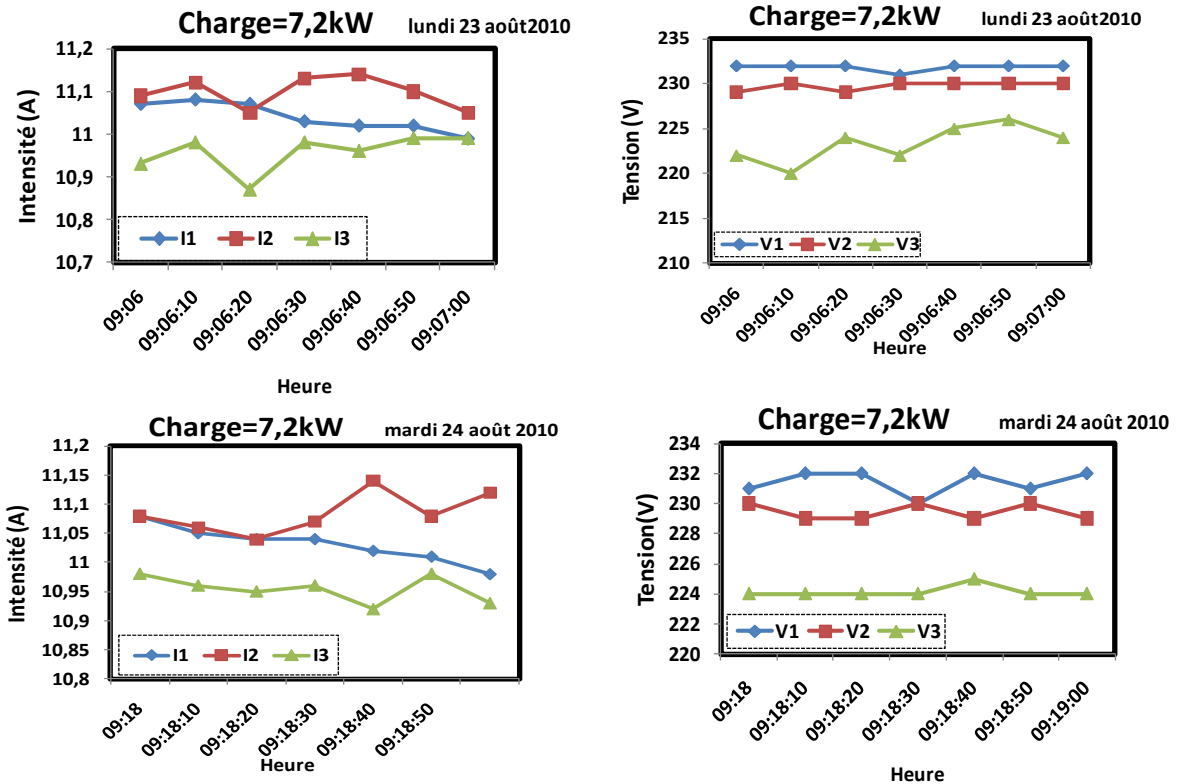


Figure 29: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =7,2kW

### ❖ CHARGE 8kW

A cette charge, la tension délivrée par la phase V3 durant les deux jours d'essais est comprise entre 220 et 213 volts. V1 et V2 par contre reste dans une plage de valeur presque constante depuis la première charge de 1,8kW entre 234 et 225 volts ; le déséquilibre de tension entre la phase V3 et les deux autres V1 et V2 à cette charge est relativement importante; la baisse continue des tensions lorsqu'on augmente la charge pourrait confirmer l'hypothèse selon laquelle la tension baisse lorsque la charge augmente.

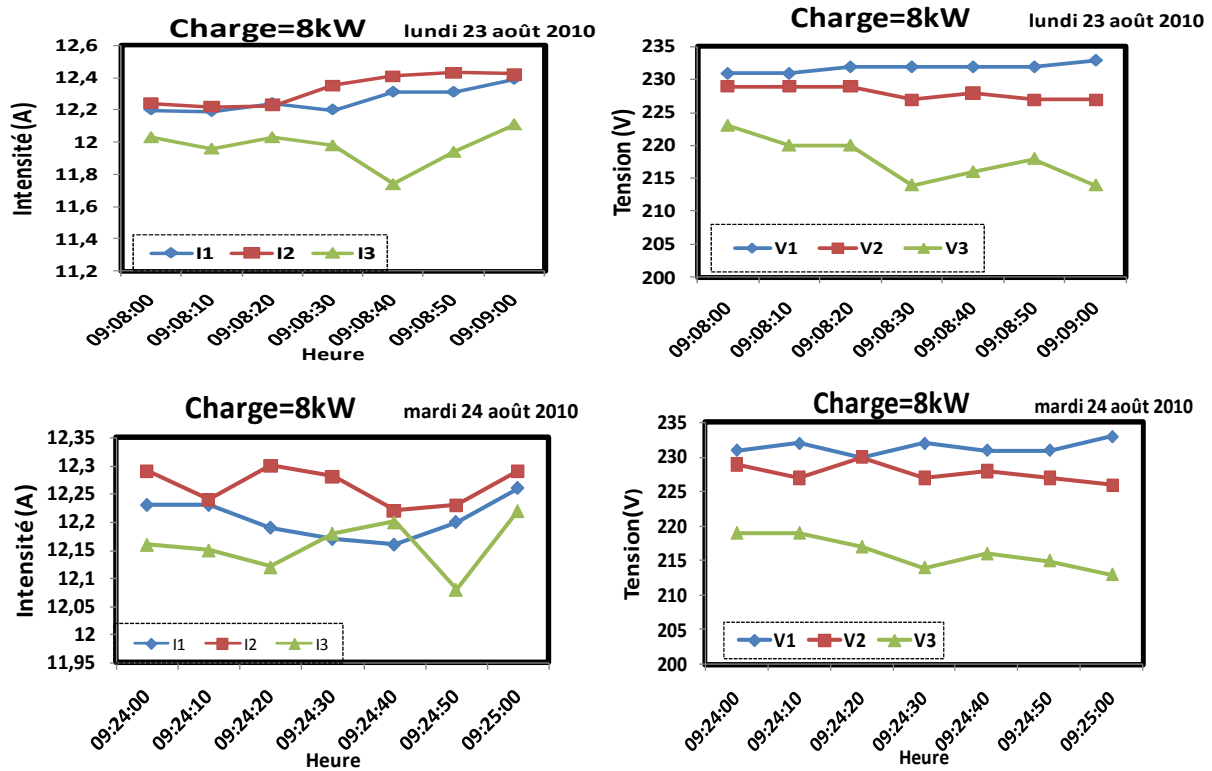


Figure 30: allure des intensités délivrées en fonction d'une charge =8kW

### III-2-5 Influence de la poussière sur l'intensité des PV

La figure 32 montre l'écart d'intensité délivrée en un jour (a) et en plusieurs jours (b) causé par le dépôt des poussières sur les panneaux, ce qui entraîne la différence de puissance délivrée entre un panneau propre et sale (c). Il ressort de cette analyse que l'intensité délivrée par les panneaux propres ( $I_{pv \text{ propre}}$ ) est supérieure à celle délivrée par les panneaux sales ( $I_{pv \text{ sale}}$ ). En prenant comme référence le panneau propre, et en tenant compte du fait que les deux panneaux dans les mêmes conditions aient une légère différence de 4%, qui pourrait être due au défaut de fabrication et à la précision au niveau des mesures, nous avons aussi pris en compte cette erreur pour calculer le pourcentage moyen de perte =  $[(puissance \text{ panneau propre} - puissance \text{ panneau sale}) / puissance \text{ panneau propre}] - 4\% \times 100$ . Nous avons donc enregistré une perte moyenne d'énergie d'environ 5% en 6 jours.



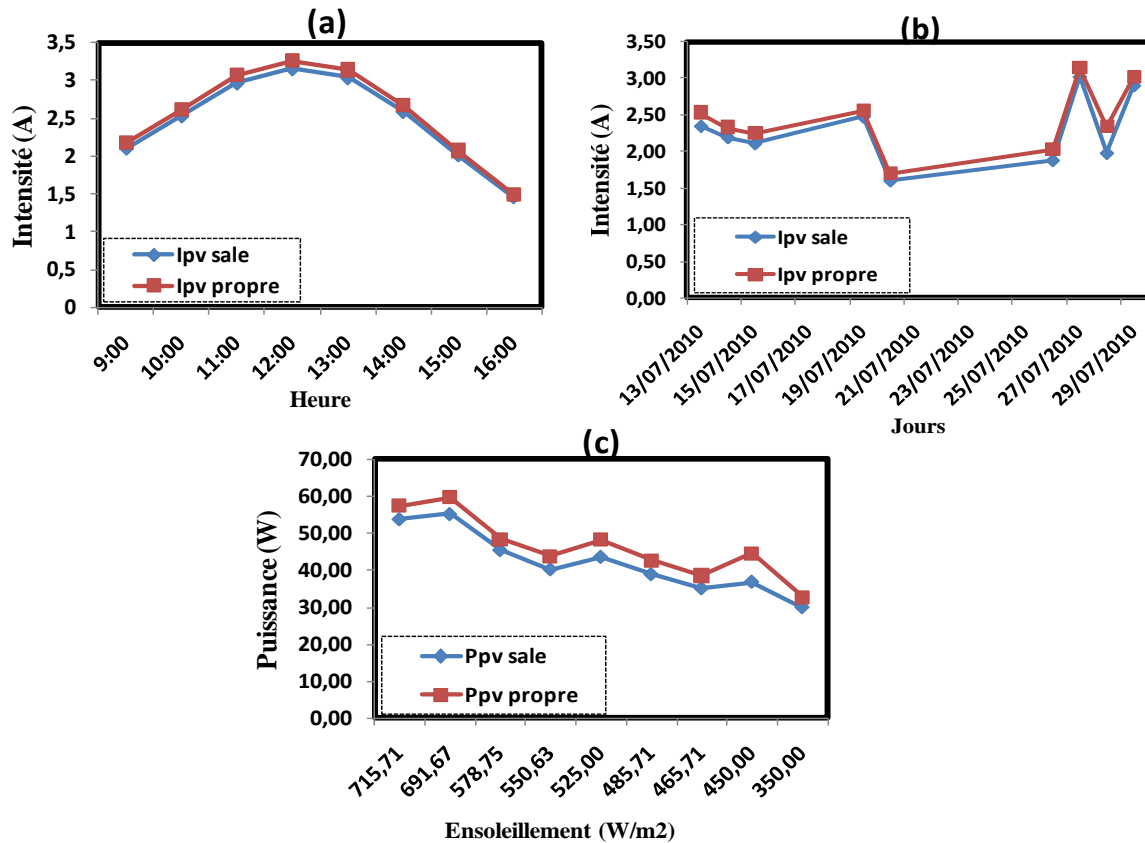


Figure 31: Influence des dépôts de poussière sur la performance des

### III-2-6 Nettoyage des panneaux

Pour le nettoyage de notre panneau qui devait rester toujours propre, mes camarades qui m'ont aidé dans cette tâche car le terme de leur stage de fin d'année pourtant sur cette étude, utilisait 480 mL d'eau par jour pour une surface de panneau égale à  $0,513 \text{ m}^2$ . Si nous extrapolons ce résultat à la dimension des panneaux du « Flexy Energie » qui est de  $18 \text{ m}^2$ , nous utiliserons donc environ 17L d'eau par jour soit 6205L d'eau par an pour le nettoyage des panneaux.

Pour mieux apprécier la quantité d'eau utilisée extrapolons à nouveau à un système de PV pouvant délivrer jusqu'à  $100 \text{ kWc}$  et utilisant le même type de PV que ceux de notre prototype. Dans ce cas, nous aurons besoin d'une surface d'environ  $632 \text{ m}^2$ ; pour le nettoyage, nous utiliserons environ 592L d'eau par jour, soit 216 080L d'eau par an.

### III-2-6-1 Est –il avantageux d'utiliser de l'énergie pour le nettoyage des panneaux ?

Pour que notre système soit performant, il ressort des différentes analyses que les panneaux PV doivent être propres pour fournir le maximum de puissance en fonction de l'ensoleillement. Installer une pompe qui pourrait pomper de l'eau pour le nettoyage des panneaux paraît évident, mais nous devons être certain que l'énergie dépensée pour le nettoyage est très inférieure à l'énergie perdue à cause des dépôts de poussière. Pour ce faire, nous avons choisi le mois de juillet qui est moins favorable pour l'ensoleillement et les dépôts de poussière pour évaluer la quantité d'énergie moyenne produite par le PV qui équivaut à 1,12kW avec 8h25min d'ensoleillement par jour.

Les tests de dépôts de poussière effectués par les stagiaires de bachelor et M1 sur les panneaux décrits dans le paragraphe II-7-6 nous montrent que nous perdons au minimum 2% au maximum 7% et en moyenne 5% de l'énergie produite par les PV en un jour ; ceci à cause des dépôts de poussière sur les panneaux.

Nous avons appliqué ces pourcentages de perte à la puissance moyenne de juillet produite par les PV du prototype « Flexy Energy » pour évaluer la quantité d'énergie qu'on perdrait en un jour.

**Tableau 2: pertes de puissance dues aux dépôts de poussière**

pourcentage de perte journalier		Puissance moyenne journalière-juillet (kW)	temps d'ensoleillement en un jour (h)	Energie perdue en un jour (kWh)
min=	2%	1,12	8,25	0,1848
max=	7%			0,6468
moy=	5%			0,462

Les résultats représentés dans le tableau 2 indiquent l'énergie perdue par les PV engendrée par les dépôts de poussière.

Compte tenu du fait que nous avons besoin de 17L d'eau pour nettoyer nos 18m<sup>2</sup> de panneaux posés sur le toit de notre prototype, nous avons calculé la quantité d'énergie qu'une pompe aurait besoin pour fournir cette quantité d'eau en un jour.

Connaissant tous les paramètres nécessaires pour notre dimensionnement en dehors du rendement de notre pompe et le rendement électrique, nous avons utilisé le logiciel WINCAPS pour trouver les caractéristiques de notre pompe (voir annexe 3). A partir de l'équation 1 le logiciel détermine la puissance électrique de la pompe nécessaire.

$$P_a = \frac{\varpi \times Q \times HMT}{\eta_p}$$
$$P_e = \frac{\varpi \times Q \times HMT}{\eta_p \eta_e}$$

**Équation 1 : Puissance de la pompe**

Où :

- Q est le débit horaire

-HMT est la hauteur manométrique totale

-W est le poids volumique

-  $\eta_p \eta_e$  Sont respectivement le rendement de la pompe et le rendement électrique.

Notre pompe ne pouvant pas avoir exactement la quantité d'eau nécessaire, 17L d'eau dans son réservoir, nous avons dimensionné avec une quantité de 20L, pour une durée de nettoyage de 5 minutes en un jour, nous avons donc un débit horaire de 0,24m<sup>3</sup>/h. Tenant compte de la hauteur du Flexy, nous avons adopté une HMT= 4m. A l'issus de la compilation via le logiciel, et en tenant compte du surplus d'énergie que la pompe aura besoin au démarrage dont nous avons fixé le temps à 30s, il ressort que la pompe à besoin au total de 0,077kWh en un jour pour produire la quantité d'eau nécessaire pour le nettoyage les panneaux.

**Tableau 3: récapitulatif, pertes dues aux dépôts de poussière, quantité d'énergie pour le nettoyage**

Pourcentage de perte en un jour	Energie perdue en un jour (kWh)	Energie nécessaire pour le nettoyage en un jour (kWh)	Gain en énergie réalisé en un jour (kWh)
min=2%	0,1848	0,077	0,11
max=7%	0,6468		0,57
moy=5%	0,462		0,39

Une étude sur la possibilité d'utiliser une pompe, nous montre qu'on gagnerait en moyenne 0,39 kWh en faisant nettoyer les panneaux car l'énergie dont aurait besoin la pompe pour fournir la quantité d'eau nécessaire, est inférieure à la quantité d'énergie qu'on perd, même le jour où on a le moins de perte dû aux dépôts de poussière qui est de 2%. Néanmoins, nous tenons à souligner qu'il serait important de refaire cette étude dans une période plus poussiéreuse et ensoleillée (avril, mai, juin) car il pourrait s'avérer que le pourcentage de perte total soit dépendant de l'ensoleillement ; cependant, quasi certain qu'il y aura un dépôt de poussière plus important en ces mois, d'où un besoin d'énergie plus important pour le nettoyage des panneaux, la production d'énergie PV sera-t-elle assez importante pour pouvoir compenser l'énergie utilisée par la pompe ? Nous pensons qu'à l'issue de cette deuxième analyse, on pourra tirer une conclusion presque définitive en ce qui concerne le nettoyage des panneaux PV en utilisant une pompe.

### III-3 ANALYSES ET DISCUSSIONS

Nous avons enregistré un ensoleillement maximal de 790 W/m<sup>2</sup> pour une puissance de PV de 2,1 kW sur la période de nos essais. Ses valeurs sont non loin des valeurs maximales à savoir 2,85 kWc pour la puissance maximale délivrée par le PV et 1000W/m<sup>2</sup> comme ensoleillement maximal. Tout ceci confirme que notre site est approprié pour ce système d'énergie hybride, PV/GE sans stockage et peut fonctionner de façon optimale sur presque toute l'année car la période d'essais étant la plus défavorable de l'année.

Sachant que nous avons choisi une charge purement résistive, le déphasage entre le courant dans une phase et la tension simple correspondante est zéro. Les essais effectués sur

la centrale entre la période allant du mois de mars à mai [34] où les intensités délivrées par les différentes phases du GE ont été mesurées en fonctionnement établi, comparées à celles que nous avons mesurées en des intervalles de temps de 10 secondes, nous poussent à dire que lorsqu'on fait varier la charge, le régime permanent de fonctionnement de notre centrale est instantanément établi. Pour confirmer nos résultats nous aurons aimé avoir des données d'intensité et de tension à des intervalles de temps de l'ordre de milliseconde car il se pourrait que ces variations pendant la phase transitoire de fonctionnement de notre système se produisent en une fraction de seconde, ce qui serait impossible de mesurer manuellement.

En ce qui concerne le décalage de I3 par rapport à I1,I2 ainsi que V3 par rapport à V1 et V2 observé sur les figures allant de 26 à 30, cela est en partie dû au fait que notre onduleur soit monophasé. Certes que la tension baisse lorsque les charges augmentent mais dans ce cas précis, l'écart entre les phases serait dû à la pénétration de l'énergie produite par les PV. Néanmoins, une étude sur le déséquilibre de tension sur notre système hybride pourra apporter plus d'éclaircissements.

En régime dynamique, on enregistre généralement des fluctuations d'intensité et de tension ; dans la littérature il ressort que ces fluctuations sont importantes quelques millisecondes après la variation de la charge. Cependant, lors de nos manipulations, nous avons enregistré de très faible fluctuation de courant et tension, qui, d'ailleurs reste toujours fluctuante durant tout le fonctionnement du système. Certes nos mesures ont été faites à des intervalles de temps relativement grands, mais compte tenu du fait que le régime transitoire puisse aller au-delà d'une minute dans certains cas d'après certaines littératures, nous aurons pu observer un léger changement de l'allure de l'intensité de la charge pendant les intervalles de 10 secondes par rapport à celles de 30 minutes réalisées entre mars et mai. Nous nous demandons si cette stabilité ne serait pas due au fait que nous ayons utilisés lors de nos simulations uniquement des charges résistives. Un autre essai avec des charges selfiques et capacitives aurait apporté un éclaircissement, malheureusement nous n'avons pas pu aborder cet aspect de l'étude.

Les pertes dues à un fonctionnement à faible charge ne sont pas négligeables, comme nous pouvons observer sur la figure 33, pour un ensoleillement presque égal, la puissance délivrée par le PV à une charge de 1,8kW est très faible (176W pour 355,2 W/m<sup>2</sup> d'ensoleillement) par rapport à des charges plus grandes comme 7,2 kW où on a 368 W/m<sup>2</sup> et 1291,5 W de puissance. En comparant donc ces deux données nous constatons que nous avons une perte en

puissance de près de 1115,6W. Nous perdons aussi de l'énergie lorsque ni le GE, ni le réseau électrique n'est en fonctionnement, car l'onduleur n'injecte l'énergie délivrée par les PV que lorsque ce dernier détecte la présence d'une tension (venant du GE ou du réseau local). Une recommandation serait donc de stocker cette énergie dans des batteries.

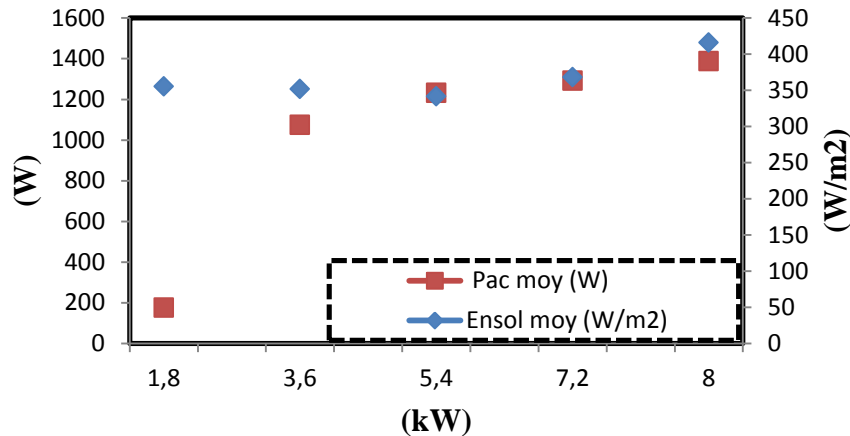


Figure 32: puissance moyenne PV par rapport à l'ensoleillement

Il ressort de la littérature que les dépôts de poussière peuvent causer de 0 à 15% (voir tableau 2, annexe 1) de pertes d'énergie. Les études faites sur nos deux panneaux nous ont conduit à une perte moyenne de 5%, or l'expérience se déroule à une période pluvieuse où il y a moins de poussière. Certes que l'inclinaison des panneaux participe au nettoyage des poussières et feuilles sur les PV, mais vu le pourcentage moyen de perte enregistré en 6 jours (5%) dans une saison pluvieuse de surcroît, il est clair qu'un système de nettoyage des PV doit être mis en place pour optimiser les performances du PV. Pour le nettoyage des panneaux du « Flexy Energie », nous avons besoin de 6,205 m<sup>3</sup> d'eau par an. La construction d'un forage pourrait résoudre le problème d'eau; une étude réalisée en une saison moins poussiéreuse et ensoleillée sur deux panneaux que nous avons ensuite extrapolés à la dimension des panneaux du « Flexy Energie », nous montre qu'il serait bénéfique de nettoyer nos panneaux, même à l'aide d'une pompe car la différence entre l'énergie perdue à cause des dépôts de poussière et celle utilisée par la pompe pour fournir la quantité d'eau dont on aura besoin pour le nettoyage n'est pas négligeable. En un jour nous gagnerons en moyenne 0,39kWh; Pour un générateur PV à grande échelle, ce gain en énergie pourrait être plus important.

### III-4 Recommandations

Pour une centrale de grande puissance il est clair qu'un problème d'eau pourrait se poser, car où le soleil est ardent au point d'utiliser pour en faire une source d'énergie, la ressource en eau est rare. Une solution serait donc d'utiliser le surplus d'énergie fourni par la centrale pour pomper de l'eau qui serait ensuite utilisée pour le nettoyage. Un système de récupération d'eau pour réutiliser, pourra permettre de limiter les pertes en eaux. Nous pouvons installer aussi un capteur qui pourra signaler la baisse de la puissance des PV avec un niveau d'ensoleillement élevé.

Une charge électrique triphasée non-équilibrée ou des charges monophasées alimentées par un SEH triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension entre les phases. Pour résoudre ce problème, nous pouvons prendre des mesures suivantes : [3]

- Un onduleur à quatre bras et une stratégie de commande spéciale sont utilisés pour équilibrer la tension en condition de charge déséquilibrée ;
- Le bus à courant continu (l'entrée de l'onduleur) est régulé à une valeur constante pour assurer l'amplitude de la tension aux bornes de la charge et par conséquent, pour équilibrer les flux de puissance.

### III-5 Conclusion et quelques pistes d'optimisation

Le premier volet de cette partie a révélé un bon comportement du SEH aux variations climatiques. Les essais effectués dans la première période située entre les mois les plus ensoleillés, et la deuxième située entre ceux les moins ensoleillés, nous montrent que durant toute l'année, nous pouvons toujours tirer une quantité importante d'énergie via les panneaux photovoltaïques. Le deuxième volet nous montre la stabilité du système en régime transitoire par rapport au régime permanent, ainsi que les pertes d'énergie causées par le fonctionnement à faible charge et les dépôts de poussière sur les panneaux PV.

Pour optimiser notre système, il serait important de trouver une stratégie de gestion des charges, par exemple en suivant un diagramme de priorité des charges (figure 11), prévoir des charges de délestage pour empêcher au SEH de fonctionner à faible charges.

Le point de fonctionnement optimal de notre GE est de 7,32 kW, la puissance maximale délivrée par l'onduleur durant les deux périodes d'essai est de 2,5kW, pour que le fonctionnement de notre système d'énergie hybride PV/GE sans stockage soit optimal sachant

que la puissance moyenne du PV relevée sur les deux périodes est d'environ 1,8kW, il faudrait que le point de fonctionnement optimal de la centrale hybride soit autour de 9kW. Pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables, le dimensionnement et le choix du fonctionnement des composants doivent être réalisés en tenant compte de la charge et de la disponibilité des ressources renouvelables.

Ce type de système étant conçu généralement pour une utilisation domestique, on ne saurait le faire fonctionner à des charges constantes. L'une des solutions d'optimisation serait donc de monter plusieurs groupes électrogènes de puissances différentes en parallèles, et d'installer un système de commande qui ferait varier ces GE en fonction de la puissance appelée par la charge. Ainsi, tous les GE fonctionneraient à leur puissance optimale et on économiserait non seulement beaucoup en carburant, mais aussi on maximiserait l'utilisation de l'énergie propre qui nous permettra de limiter les émissions de CO<sub>2</sub>.



## IVème PARTIE : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE DU PROJET

### IV-1 Introduction

Le réchauffement planétaire et la récession mondiale exigent que le monde adopte un nouveau modèle de développement. La survie écologique et le succès économique ne pourront être assurés sans une révolution de la croissance des énergies propres. Pour instaurer une économie mondiale durable, il est indispensable d'encourager des activités non seulement rentables d'un point de vue financier, mais également susceptibles de susciter un renouveau et une renaissance écologiques. C'est dans cette optique que l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) c'est engagé à construire des centrales de production d'énergie renouvelable, qui pourront non seulement être rentable économiquement, mais aussi contribuer à éviter des émissions de gaz à effet de serre.

### IV-2 Aspect économique

Notre centrale hybride fonctionne depuis le 10 octobre 2009, notre travail de recherche qui a été fait durant la période de mai à août nous a permis d'évaluer l'économie financière qu'on pourrait réaliser en utilisant une centrale d'énergie hybride PV/ diesels sans stockage.

#### IV-2-1 Energie totale produite par le PV

Du premier jour du fonctionnement de la centrale le 10 octobre 2009, jusqu'à la fin de mes travaux de recherches sur la centrale le 27 août 2010, nous avons enregistré une quantité d'énergie totale produite par le PV de 3773kWh. En considérant le prix du kWh au Burkina qui est de 125 FCFA, nous constatons qu'en plus de nous permettre de faire nos expérimentations, le prototype a permis au 2ie d'économiser du 10 octobre 2009 au 27 août 2010, une somme de 471 625 FCFA.



**Figure 33: Afficheur Sunny Matrix : énergie totale produite**

**Tableau 4: Energie moyenne journalière produite par le PV chaque mois**

Période	Energie moyenne produite par jour (kWh)	Energie moyenne produite par jour en 4 mois (kWh)	Gain réalisable du 27-08-10 au 10-10-10 (FCFA)
Mai	10,47	9,66	53 158
Juin	10,04		
Juillet	9,22		
Août	8,93		

En adoptant la moyenne de l'énergie produite par les PV en 4 mois 9,66 kWh comme étant celle qu'on pourrait avoir chaque jour durant les 44 jours restant pour que notre centrale ait un an de fonctionnement, en 44 jours nous aurons économisé 53 158 FCFA, additionner au montant économisé durant les 11 mois passé, en total notre système PV permet de réaliser une économie de **524 783 FCFA** soit 801,2 Euro par an. En 20 ans on économiserait 10.495.660 FCFA. Vu le coût d'investissement des panneaux uniquement qui est de 10.940.175, nous dirons que notre projet bien qu'il soit environnementalement promoteur, n'est pas économiquement rentable.

#### ***IV-2-2 Réduction de la consommation du groupe électrogène***

Les essais réalisés au cours des mois de mars, avril et mai nous ont montré que le groupe électrogène seul consomme en moyenne 16,87L de gasoil par jour et le système hybride PV/GE sans stockage en moyenne 14,6L par jour pour un même profil de charge [34].

Partant sur cette base d'économie de 2,27L de gasoil par jour, nous déduisons une économie annuelle de 829L soit une économie de 559.575 FCFA par an. Notons qu'à une production à grande échelle avec des GE de grande puissance, cette somme serait plus importante. Notons

également que cette économie est légèrement différente de celle calculée via l'énergie produite par les PV du fait que l'ensoleillement ne soit pas constant.

### IV-3 Aspect environnemental

Les phases du concept « Flexy Energy » nous montre l'importance de l'aspect environnemental lors de la mise sur pied de notre centrale hybride PV/ groupe électrogène sans stockage.

#### IV-3-1 Mesures d'atténuations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) sur le prototype « Flexy Energy »

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

Bien que nous soyons encore à la première phase du projet, le fonctionnement de notre SEH permet déjà d'éviter les émissions de CO<sub>2</sub> pas négligeable. Du 10 octobre 2009, date du début du fonctionnement du SEH jusqu'au 27 août date de la fin de mon stage, nous avons enregistré une quantité de CO<sub>2</sub> évité de 3396,3 kg.



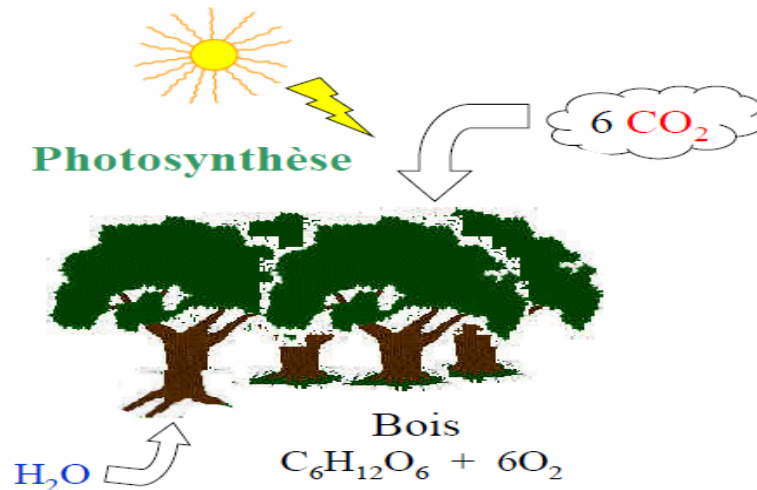
Figure 34: Afficheur Sunny Matrix : CO<sub>2</sub> évité

La réalisation des phases 2 et 3 de notre concept permettra de réduire d'avantage les émissions de CO<sub>2</sub> et nous permettra d'atteindre rapidement les 5000 tonnes qu'il faut pour que notre projet soit éligible.

#### *IV-3-2 Avantages environnementaux des biocarburants*

La protection de l'environnement est l'un des enjeux majeurs du développement durable. A même quantité d'énergie produite, les biocarburants permettent d'émettre moins de Gaz à Effet de Serre (GES).

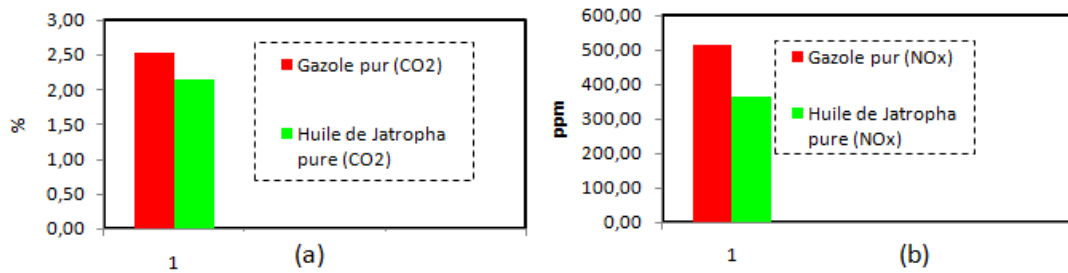
Le CO<sub>2</sub> émis pendant la combustion des biocarburants est recyclé par photosynthèse par les plantes, ce qui limite l'émission des GES.



**Figure 35: photosynthèse des plantes**

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 CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> (figure 36).



**Figure 36: comparaison émissions de CO2 et NOx**

(Source: travaux de S. SIDIBE, LBEB)

#### **IV-4 Responsabilité sociétale et importance de l'accès aux services énergétiques.**

➤ **L'accès des personnes en situation de précarité aux services essentiels.**

L'énergie, surtout l'électricité, est un bien de première nécessité. En être privé entraîne l'exclusion, sociale pour les plus démunis, économique pour les pays en développement. Par ses multiples actions de recherche, le 2ie à travers le LESEE travaille à favoriser l'accès aux services essentiels et à aider les plus vulnérables à maîtriser leur consommation.

➤ **Le lien énergie-pauvreté**

L'énergie facilite la provision de besoins vitaux comme la cuisson des aliments, le fait de pouvoir se chauffer ou s'éclairer, ou aussi la possibilité d'avoir accès à des services de santé fiables, de pouvoir communiquer ou se déplacer. L'énergie est, par ailleurs, un élément qui permet des activités de production, comme la production agricole et la transformation de ces produits, le commerce, la production industrielle ou manufacturière. A l'inverse, ne pas avoir accès à l'énergie appauvrit une communauté rurale ou un individu et participe à la dégradation du système économique auquel il appartient.

➤ **Energie et condition des femmes [36]**

Parmi les populations vivant dans la pauvreté et dans la pauvreté énergétique, une composante est encore plus fragile que les autres : les femmes et les jeunes filles. Quatre éléments influencent la nature du lien entre l'énergie et la fragilité de cette composante :

- le type de carburant consommé ;

- les caractéristiques économiques et sociales de la communauté rurale ;
- la politique énergétique menée dans le pays ;
- la position sociale des femmes au sein du ménage et de la communauté.

La survie d'une partie importante de la population rurale en Afrique subsaharienne dépend du bois, du fumier et des déchets de culture disponibles pour cuisiner et se chauffer. Malheureusement la disponibilité de la biomasse est largement amoindrie depuis quelques années. En conséquence le temps et les efforts nécessaires pour permettre à des ménages ruraux de disposer d'un minimum de ressources de ce type augmente considérablement années après années; et la charge supplémentaire de travail est presque toujours supportée par les femmes et les jeunes filles en termes de temps et d'efforts, engendrée par la raréfaction de la biomasse.

## V) CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Des améliorations dans la conception et le fonctionnement des SEH sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des systèmes globaux de production d'énergie. Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans ce mémoire de fin d'étude est l'évaluation des performances techniques d'une centrale hybride photovoltaïque et groupe électrogène sans stockage.

Dans ce mémoire, notre démarche a été développée en trois étapes pour atteindre ces objectifs :

- ✓ L'évaluation de la pénétration de l'énergie PV par rapport à un profil de charge,
- ✓ L'étude du comportement du GE en fonctionnement dynamique
- ✓ L'étude de l'impact de la poussière sur les panneaux PV et évaluation de la quantité d'eau utilisée pour le nettoyage des panneaux.

Après un rappel sur les SEH en général, leur configuration et les différents composants, nous nous sommes intéressés au SEH du type photovoltaïque/diesel sans stockage. La connaissance des puissances délivrées par l'onduleur à des charges précises ont permis d'évaluer le pourcentage de pénétration de l'énergie renouvelable. Le groupe électrogène étant le composant le plus exposé aux péricépéties pouvant subvenir lors d'un appel brusque de puissance, nous avons également étudié son fonctionnement en régime dynamique pour des différentes charges allant de 1,8kW à 8kW.

Le fonctionnement d'une centrale hybride PV/GE à grande échelle pourrait avoir des problèmes de temps de réponse du GE pendant le régime transitoire, or nous savons que lorsque le GE est trop sollicité, non seulement sa durée de vie diminue, mais la qualité de l'énergie n'est pas garantie, d'où, une possibilité d'adjoindre à notre système des batteries de stockage qui pourraient aider le GE à cette période en lui apportant le surplus d'énergie nécessaire pour réduire le temps de réponse à la charge demandée au GE .

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Barozzi and D. Guidi, '*Prospects for the Expansion of Solar PV Technology in the Developing Country*', Rapport WWF, 1993.
- [2] The World Bank, '*Rural Energy and Development, Improving Energy Supplies for Two Billions People*', 1996.
- [3] Ionel VECHIU « Modelisation et analyse de l'integration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » 2005
- [4] Vaughn C. Nelson, Ken L. Starcher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, « Wind hybrid systems technology characterization », West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland, Vista University, May 2002.
- [5] E. Ian Baring-Gould, L. Flowers, P. Lundsager, « Worldwide status of wind-diesel applications », Pre-Workshop Wind-Diesel 101, 2004, Anchorage, Alaska.
- [6] M. Huart, « Guide des énergies renouvelables », Association pour la promotion des Energie Renouvelable, Ministère de la région Wallonne éditeur, 1994.
- [7] J. Muller, R. Desserrières, « Conversion photovoltaïque », publié par : Club CRIN, 2002.
- [8] C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, « l'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables », ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, paris, 2002
- [9] A. Hoque, K.A. Wahid, « New Mathematical Model of a photovoltaic generator », Journal of Electrical Engineering, vol. EE 28, No. 1, June 2000
- [10] G. Walker, « Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model », Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IEAust, vol.21, No.1 , pp.49-56, 2001
- [11] D.P. Hohm, M. E. Ropp, « Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms », Progress in photovoltaics, vol 11, p. 47-62, January 2003
- [12] C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, « l'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables », ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, paris, 2002
- [13] ( J. A. M .Bieijs et al., « Wear Implications of intermittent Diesel Operation in Wind/Diesel Systems », Wind Energy, vol. 17 n°4, 1993, pp. 206-219)



- [14] ( J.F. Manwell et al., « An Investigation of Variable Speed Operation of Diesel Generators in Hybrid Energy Systems » *Renewable Energy*, vol. 2 n°6, 1992, pp. 563-571)
- [15] I. Cruz, F. Arias, F. Avia, L. M. Arribas, R. P. Fiffe, « Assessment of different energy storage systems for wind energy integration », *European Wind Energy Conference 2001*
- [16] B. Wickert, C.V. Nayar and W.B. Lawrance, '*Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification*', *International Journal of Renewable Energy Engineering*, Vol. 1, N°1, pp. 7 - 17, 1999.)
- [17] M.A. Elhadidy, S.M. Shaahid, « parametric study of hybrid (wind+solar+diesel) power generating systems », *Renewable Energy*, vol.66, No.1,pp. 129-139, Elsevier science 2000
- [18] M. Muselli, G. Notton, A. Louche, « Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management », *Solar Energy*, vol.65, No.3,pp. 143-157, Elsevier science 1999
- [19] W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez, "Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system", *Electric Power Systems Research* , Vol.39, No. 1, pp.35-38, 1996
- [20] L. H. Hansen, P. Lundsager, « Review of relevant studies of isolated systems », Riso-R-1109 (EN) 2000
- [21] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff, « Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools : status and needs », *PV Horizon : Workshop on photovoltaic hybrid systems*, Montreal, 2001
- [22] H. Bindner, « power control for wind turbines in weak grids : concepts development », Riso-R-1118 (EN) 1999
- [23] S. Drouilhet, M. Shirazi, « Wales, Alaska high-penetration wind-diesel hybrid power system. Theory of operation », NREL/TP-50031755, mai 2002
- [24] H. G. Beyer, T. Degner, »Assessing the maximum fuel savings obtainable in simple wind-diesel systems », *Solar Energy*, Vol.61,No.1, pp. 5-10, Elsevier Science 1997 [21]
- [25] S. Ruin, O. Carlson, « Wind-hybrid systems with variable speed and DC- link » *Wind power for the 21 century*, Kassel, Germany, 25-27 Septembre 2000.

- [26] B. Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation- A review of current practice and future developments », Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209-228, Elsevier Science 1997
- [27] M. Ashari, C.V. Nayar, « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system », Renewable Energy, vol.66, No.1, pp. 1-9, Elsevier science 1999
- [28] C. D. Barley and C. B. Winn, « Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems », Solar Energy Vol. 58, No. 4-6, pp. 165-179, 1996
- [29] M. Pipattanasomporn, « A study of remote area internet access with embedded power generation », Etd-12272004-141318, Virginia Polytechnic Institute, 2004
- [30] A. Pereira, « Modular supervisory controller for hybrid power systems », Riso-R-1202 (EN) 2000
- [31] J. F Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C. T. Avelar, J. G. McGowan, « hybrid2-A hybrid system simulation model. Theory manual », NREL Scontract XL-11126-1, 1998
- [32] A. Larsson, « The power quality of wind turbines », Thesis, CHALMERS, ISBN91-7197-970-0, Sweden 2000
- [33] (Ministère de l'énergie, des mines et des carrières. [www.mines.gov.bf](http://www.mines.gov.bf). [En ligne] )
- [34] ZONGO Judicaël, « étude et analyse expérimentale d'une centrale hybride pv/groupe électrogène (diesel ou biocarburant) sans stockage », mémoire de fin d'étude de master d'ingénierie, juin 2010.
- [35]. **Blin, J.** *cours biocarburants*. s.l. : institut internationale de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.
- [36] François Simporté. « *Cours accès aux services énergétiques* » institut internationale de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), 2009.

## SITES

- ✓ <http://www.bati-depot.fr/actualite/volotek-invente-le-panneau-solaire-autonettoyant-2627.html>

## ANNEXES

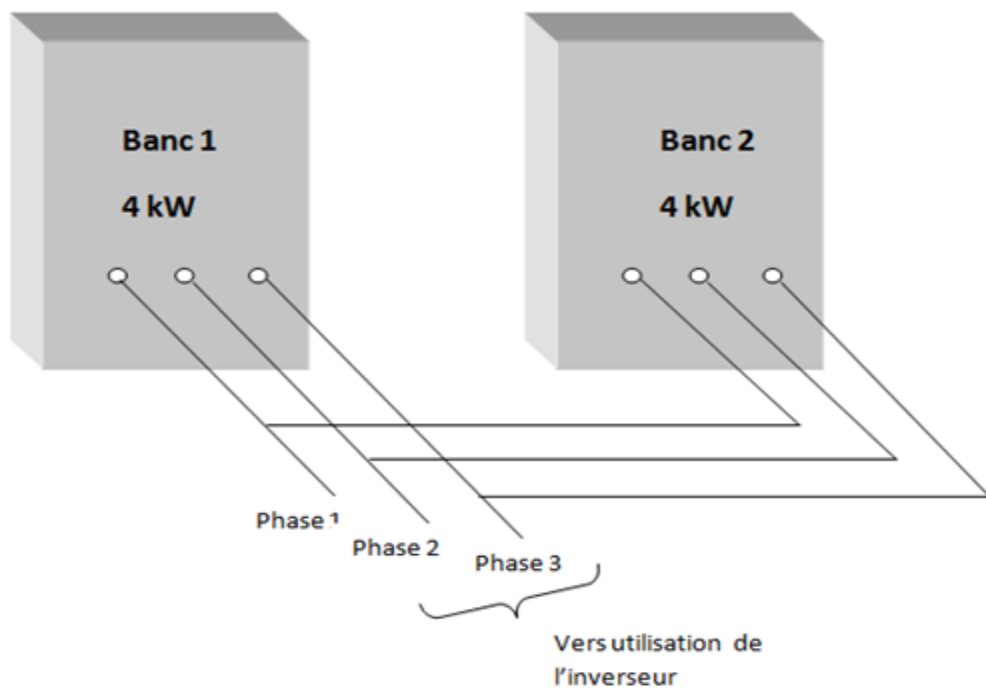
**Annexe 1 : Bancs de charge utilisés**

**Annexe 2 : Fiche technique du sunny boy**

**Annexe 3 : Caractéristiques de la pompe**

**Annexe 4 : Relevés d'intensité et tension avec un profil de charge aléatoire**

*Annexe 1 : Bancs de charge utilisés*



**Tableau 1 : Données sur les bancs de charge**

puissance inscrite sur le banc (W)	valeur de la résistance équivalente (ohm)	valeur de la résistance unitaire (ohm)	tension appliquée (Volt)	puissance calculée (W)
<u>BANC</u>				
<u>N°1</u>				
200	1507	753,5	230	210,62
400	713	356,5	230	445,16
600	514	257	230	617,51
800	414	207	230	766,67
1000	292,5	146,25	230	1085,13
1000	291,1	145,55	230	1090,35
<b>TOTAL</b>				
<b>4000</b>				<b>4215,43</b>
<u>BANC</u>				
<u>N°2</u>				
200	1461	730,5	230	217,25
400	717	358,5	230	442,68
600	482	241	230	658,51
800	360,3	180,15	230	880,93
1000	293,1	146,55	230	1082,91
1000	288,5	144,25	230	1100,17
<b>TOTAL</b>				
<b>4000</b>				<b>4382,45</b>

**Tableau 2: 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
vieillessement	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%

**Annexe 2 : Fiche technique du sunny boy**

➤ **Fiche technique du sunny boy**

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

### Annexe 3 : Caractéristiques de la pompe

#### ➤ Caractéristiques de la pompe

##### **CRN 1S-2 A-P-G-E HQQE**

Pompe centrifuge multicellulaire verticale "in-line", non auto-amorçante. Installation directe sur tuyauterie ou montage sur embase.

Caractéristiques :

- Roues, chambres intermédiaires et chemise externe en Acier inoxydable DIN W.-Nr. 1.4401 DIN W.-Nr..

- Couvercle de tête et pied de pompe en Acier inoxydable DIN W.-Nr. 1.4408 DIN W.-Nr..
- Garniture mécanique selon norme EN 12756.
- Puissance de transmission via accouplement fonte.
- Raccordement tuyauterie via PJE brides/accouplements.

Moteur alternatif 3-phasé.

**Liquide:**

Plage température liquide: -20 .. 120 °C

**Technique:**

Vitesse pour donnée pompe:	2873 rpm
Débit nominal:	0.9 m <sup>3</sup> /h
Débit calculé:	0.343 m <sup>3</sup> /h
Pression nominale:	8.6 m
Pression fournie par la pompe:	11.8 m
Garniture mécanique:	HQQE
Certifications sur la plaque signalétique:	CE
Tolérance de courbe:	ISO 9906

**Matériaux:**

Corps de pompe: Acier inoxydable

1.4408 DIN W.-Nr.

A 351 CF 8M ASTM

Roue mobile: Acier inoxydable

1.4401 DIN W.-Nr.

316 AISI

**Installation:**

Température ambiante maximum:	40 °C
Pression système:	25 bar
Pression maximum à la température indiquée:	25 / 120 bar / °C
	25 / -20 bar / °C
Pression d'entrée min.:	-0.7 bar
Bride standard:	PJE
Raccordement tuyauterie:	42,4 mm
Taille de bride pour moteur:	FT85

**Donnée électrique:**

Type moteur:	71A
Nombre de pôles:	2

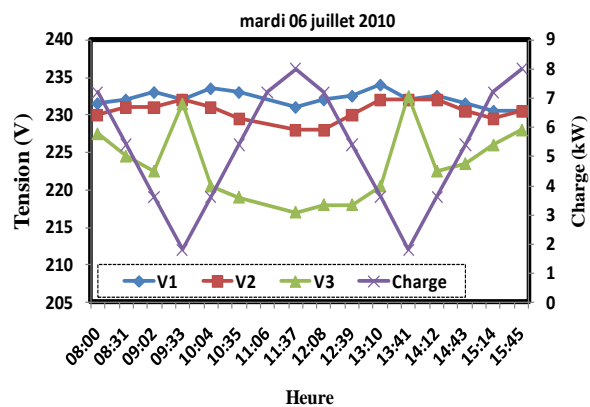
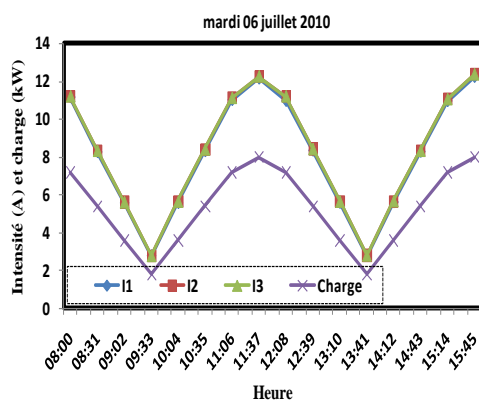
Puissance nominale - P2:	0.37 kW
Puissance (P2) requise par pompe:	0.37 kW
Fréquence d'alimentation:	50 Hz
Tension nominale:	3 x 220-240 D / 380-415 Y V
Courant nominal:	1.74 / 1 A
Intensité démarrage:	490-530 %
Cos phi - facteur de puissance:	0,80-0,70
Vitesse nominale:	2850-2880 rpm
Rendement moteur à pleine charge:	78,5 %
Rendement moteur à 3/4 charge:	79,0-76,5 %
Rendement moteur à 1/2 charge:	75,5-71,5 %
Indice de protection (IEC 34-5):	IP55
Classe d'isolement (IEC 85):	F

**Autres:**

Poids net: 16.2 kg  
Poids brut: 18.8 kg  
Colisage: 0.04 m<sup>3</sup>

**Annexe 4 : Relevés d'intensité et tension avec un profil de charge aléatoire**

➤ **Charge définie**



➤ **Charge aléatoire**



