



# ETUDE DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE D'UN GROUPE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET CONCEPTION D'UN NOUVEAU GROUPE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE  
OPTION : ENERGETIQUE

---

Présenté et soutenu publiquement le 15 Janvier 2018 par

**Sornaba Ismaël Arnold DJIEBRE**

**Travaux dirigés par : M. Moussa Kadri SANI**  
Enseignant à 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Daniel YAMEGUEU

Membres et correcteurs : Dr Sayon SIDIBE  
M. Moussa Kadri SANI

Promotion [2016/2017]

## Remerciements

Ce document n'est pas le fruit de nos seuls efforts. C'est le produit d'une collaboration étroite entre l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE et l'entreprise SysAid Faso. Nous tenons donc avant tout propos, à remercier M. François SODJI, Président Directeur General de SysAid Faso pour nous avoir ouvert les portes de son entreprise.

Nous disons aussi merci au Dr Moussa SORO, chef du département Génie Electrique et Energétique de 2iE qui nous a accompagné dans les démarches administratives et s'est assuré du bon déroulement de notre stage.

À M. Moussa Kadri SANI, notre encadreur qui nous a prodigué de précieux conseils et qui s'est toujours montré disponible tout au long du stage.

À M. Alfred AGODE, notre maitre de stage, qui s'est toujours montré ouvert à nos questions concernant l'entreprises et bien des aspects de la vie professionnelle.

Nous disons enfin merci à tout le personnel de SysAid qui nous a bien accueilli et permis de passer des moments très riches intellectuellement et humainement.

## Dédicaces

Je dédie ce document à ma mère, qui m'a toujours accompagné, soutenu et encouragé tout au long de mes études à 2iE. Merci maman de m'avoir permis de suivre une formation très riche dans l'un des centres d'excellence de la Banque Mondial.

Au corps professoral de 2iE.

À mes ami(e)s et camarades.

## Liste des abréviations

**A:** Ampère

**Ah:** Ampèreheure

**CA :** Courant Alternatif

**CC :** Courant Continu

**F CFA:** Franc Communauté Financière Africaine

**H :** Heure

**Hz :** Hertz

**I<sub>Bat</sub> :** Courant des batteries

**I<sub>cc</sub> :** Courant de court circuit

**I<sub>pv</sub> :** Courant du champ photovoltaïque

**I<sub>Pmax</sub> :** Courant au point de puissance maximale

**kA :** kilo Ampère

**kW<sub>c</sub> :** kilo Watt crête

**kWh :** kilo Watt heure

**m :** Mètre

**m<sup>2</sup> :** Mètre carré

**mm<sup>2</sup> :** millimètre carré

**MPPT :** Maximum Power Point Tracker

**P<sub>max</sub> :** Puissance maximale

**PV:** Photovoltaïque

**PWM:** Pulse With modulation

**STC:** Standard Test Condition

**V:** Volt

**V<sub>Bat</sub> :** Tension des batteries

**V<sub>co</sub> :** Tension de circuit ouvert

**V<sub>pv</sub> :** Tension du champ photovoltaïque

ETUDE DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE D'UN GROUPE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE  
ET CONCEPTION D'UN NOUVEAU GROUPE

---

$V_{pmax}$  : Tension au point de puissance maximale

$W$  : Watt

$W_c$  : Watt crête

## Résumé

Ce document traite de la performance énergétique d'un groupe solaire photovoltaïque de 5000 W et de la conception locale d'un nouveau groupe. Les analyses théoriques évaluent l'autonomie du groupe à 5 760 Wh et la production photovoltaïque à 7 200 Wh. Cependant, les analyses expérimentales infirment ces prévisions. L'autonomie s'avère être de 3 848 Wh et la production photovoltaïque de 4 350 Wh. Ces analyses ont également montré que certains éléments du groupe ont un rendement inférieur aux valeurs annoncées par les fiches techniques et que le groupe ne peut pas être utilisé comme source normale d'énergie pendant deux jours successifs. En termes d'adéquation énergétique, le groupe peut être utilisé 1 jour sur 2 par les personnes ayant une puissance de souscription de 5 A avec un besoin journalier moyen de 5 kWh. Pour ceux dont la puissance de souscription est comprise entre 10 et 20 A, le groupe peut être utilisé comme source de secours en cas de délestage. Au delà de 20 A, le groupe ne peut être utilisé que pour alimenter une partie de l'installation. A l'issue des analyses, des pistes d'amélioration du groupe ont été proposées. Il s'agit de l'ajout d'un inverseur automatique, du remplacement du régulateur de charge de type PWM par un régulateur MPPT et enfin de l'exploitation continue du champ pour ceux qui utilisent le groupe juste en cas de délestage. La dernière partie du document est consacrée à la conception du nouveau groupe. Ce dernier revient à 2 454 440 F CFA.

### Mots Clés :

---

- 1 – Groupe solaire photovoltaïque**
- 2 – Performance énergétique**
- 3 – Conception**
- 4 – Analyses théoriques**
- 5 – Analyses expérimentales**

## Abstract

This document deals with the energetic performance of a photovoltaic solar generator of 5 000 W and the local designing of a new one. The theoretical analyses estimate the autonomy of the generator at 5 760 Wh and the photovoltaic production at 7 200 Wh. However, the experimental analyses invalidate such estimates. The autonomy is but 3 848 Wh and the photovoltaic production is 4 350 Wh. These analyses also revealed that some components have an efficiency below the values stated on the specification sheet and that the generator cannot be used as a normal source of energy for 2 successive days. In term of energetic compliance, the generator can be used only one day out of two by people whose consumer circuit breaker diameter is 5 A with an average daily need of 5 kWh. For people whose consumer circuit breaker diameter is between 10 and 20 A, the generator can be used as a source of relay in the event of power cut. Above 20 A, the generator can be only used to supply part of electrical fittings. After analyses, improvements to the generator have been proposed. It mainly concerns the addition of an automatic reverser, the replacement of the PWM solar controller by an MPPT solar controller and finally the continuous exploitation of the solar field for those who only use the generator in the event of power cut. The last part of this document is dedicated to the designing of a new generator. The later completely made in Burkina costs CFA F 2,454,440.

### Key words:

---

**1 – Photovoltaic solar generator**

**2 – Energetic performance**

**3 – Designing**

**4 – Theoretical analyses**

**5 – Experimental analyses**

## Sommaire

Remerciements .....	i
Dédicaces .....	ii
Liste des abréviations .....	iii
Résumé .....	v
Abstract .....	vi
Liste des tableaux .....	2
Liste des figures .....	3
Introduction .....	4
Chapitre 1: GENERALITES .....	6
1.1. Présentation de la structure d'accueil .....	6
1.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques autonomes .....	7
1.3. Approche méthodologique .....	9
Chapitre 2: DESCRIPTION DU GROUPE ET CAHIER DE CHARGES .....	11
2.1. Description du groupe étudié.....	11
2.2. Cahier de charges .....	14
2.3. Hypothèses et objectifs.....	15
Chapitre 3: ETUDE DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU GROUPE .....	16
3.1. Analyses théoriques.....	16
3.2. Analyses expérimentales .....	21
3.3. Comparaison des analyses théoriques et expérimentales .....	29
3.4. Conclusions des analyses .....	30
3.5. Pistes d'amélioration .....	31
Chapitre 4: PROPOSITION D'UN NOUVEAU GROUPE .....	32
4.1. Conception et dimensionnement des différents éléments.....	32
4.2. Evaluation financière.....	38
Conclusion.....	40
Bibliographie.....	41
Sites internet.....	41
Annexes.....	42

## Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques techniques des modules photovoltaïques .....	13
Tableau 2: Caractéristiques techniques du régulateur de charge.....	13
Tableau 3: Caractéristiques techniques de l'onduleur/chargeur .....	14
Tableau 4: Caractéristiques techniques du parc de batteries .....	14
Tableau 5: Bilan de puissance .....	17
Tableau 6: Estimation du besoin énergétique journalier .....	18
Tableau 7: Analyse énergétique du parc de batteries .....	19
Tableau 8: Evaluation de la consommation par le type d'utilisateur .....	20
Tableau 9: Comparaison des analyses théorique et expérimentale .....	29
Tableau 10: Rendements expérimentaux des différents éléments du système .....	30
Tableau 11: Evaluation du besoin énergétique journalier .....	32
Tableau 12: Dispositifs de protection des différents éléments du système .....	35
Tableau 13: Détermination de la section des câbles.....	36
Tableau 14: Devis estimatif.....	38

## Liste des figures

Figure 1: Schéma type du couplage CC [3].....	7
Figure 2: Schéma type du couplage CA [3] .....	8
Figure 3: Schéma type du système hybride avec groupe électrogène [3] .....	8
Figure 4: Schéma type du système avec alimentation de secours et optimisation solaire [3] .....	9
Figure 5: Le groupe SysSolar 5000 et son schéma synoptique .....	11
Figure 6: Schéma électrique du groupe SysSolar 5000.....	12
Figure 7: Etapes clefs de l'étude .....	15
Figure 8: Aspect général du groupe solaire SysSolar 5000.....	16
Figure 9: Pince ampèremétrique avec ses accessoires .....	22
Figure 10: Schéma des différents points de mesure du courant .....	22
Figure 11: Schéma des différents points de mesure de la tension .....	22
Figure 12: Evolution de la tension pendant la charge du parc de batteries .....	23
Figure 13: Evolution du courant pendant la charge du parc de batteries .....	24
Figure 14: Evolution de la puissance du champ photovoltaïque pendant la charge du parc de batteries .....	24
Figure 15: Bilan énergétique de la charge du parc de batteries.....	25
Figure 16: Evolution de la puissance de la charge .....	26
Figure 17: Evolution de la tension pendant la décharge.....	26
Figure 18: Evolution du courant pendant la décharge du parc de batterie .....	27
Figure 19: Evolution de la puissance du champ photovoltaïque lorsque le système alimente une charge .....	28
Figure 20: Bilan énergétique lorsque le système alimente une charge.....	28
Figure 21: Façades avant et arrière.....	37
Figure 22: Façades latérales gauche et droite.....	37
Figure 23: Schéma synoptique du nouveau groupe solaire .....	38
Figure 24: Répartition du coût de revient.....	39

## Introduction

Au Burkina Faso, les besoins en énergie électrique sont de plus en plus croissants, surtout dans les grandes villes comme Ouagadougou et Bobo-Dioulasso. Cependant, à cause du déficit de production de la Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL), des délestages surviennent pendant la période de forte chaleur c'est-à-dire de mars à avril où le besoin en électricité est le plus important. Par ailleurs, les coupures d'électricité dues à des pannes sur le réseau électrique sont fréquentes. Ces indisponibilités de l'énergie électrique provenant de la SONABEL impactent négativement le secteur économique du pays car elles contribuent au ralentissement des activités professionnelles surtout celles du secteur informel.

Par ailleurs, le Burkina Faso est situé dans la ceinture solaire du globe terrestre avec un ensoleillement moyen de  $5,5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jr}^{-1}$  [1]. Il dispose donc d'un fort potentiel qui pourrait être exploité pour la production de l'énergie électrique, toute chose qui contribuerait à réduire le déficit électrique du pays. Cependant, le coût d'investissement élevé (allant de 850 000 et 1 300 000 de F CFA pour une installation de 1 kW<sub>c</sub> avec stockage [2]) ainsi que la faible durée de vie des batteries (5 ans en moyenne dépendant du mode d'utilisation et des fabricants), découragent plus d'un dans l'installation du solaire photovoltaïque comme source de production d'électricité.

L'une des alternatives à l'utilisation du soleil comme source de production d'électricité est le groupe électrogène. Ce dernier coûte moins cher à l'investissement en comparaison au système solaire photovoltaïque, même si à l'exploitation, il génère plus de dépenses notamment pour l'achat de carburant. Malgré cet état de fait, plusieurs entreprises et domiciles se dotent de ces groupes afin d'assurer la continuité du service énergétique pendant les périodes de délestage.

Dans un contexte mondial de limitation du réchauffement climatique, de tels systèmes devraient être utilisés le moins possible car ils sont des sources d'émission de dioxyde de carbone, l'un des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique.

L'entreprise SysAid a songé à une alternative plus respectueuse de l'environnement en commercialisant des groupes solaires photovoltaïques de différentes puissances. Seulement, ces groupes sont confectionnés entièrement en Chine puis livrés en un bloc à l'entreprise sans tenir compte des besoins énergétiques et des réalités climatiques des localités d'utilisation. Cet état de fait occasionne des insatisfactions chez les personnes ayant ces groupes car ces derniers ne répondent pas tout à fait à leurs attentes. Les raisons de ces insatisfactions portent essentiellement sur le mode de fonctionnement global des groupes (basculement manuel entre le groupe et le réseau de la SONABEL) et sur l'autonomie du parc de batteries. Le thème de ce mémoire a donc été formulé dans l'optique

d'apporter des réponses aux problèmes soulevés par les clients et de voir dans quelles mesures ces groupes pourraient être confectionnés au Burkina Faso.

Il sera donc question dans le présent document, d'étudier la performance énergétique d'un groupe solaire de 5000 W et son adéquation au contexte énergétique du Burkina. Ensuite nous proposerons des pistes d'amélioration et la conception locale d'un nouveau groupe solaire. L'étude prendra fin par l'évaluation financière du nouveau système.

## Chapitre 1: GENERALITES

### 1.1. Présentation de la structure d'accueil

SysAid Faso Sarl est une société d'ingénierie burkinabè située à Ouagadougou. Accessible depuis l'avenue de l'hôtel de ville, elle occupe le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> étage de l'immeuble NOURIA HOLDING situé à 100 m du grand marché côté Ouest.

La Société SysAid Faso appartient au groupe SODJI HOLDING GmbH qui, créé en août 2002 à Berlin, s'est rapidement imposé comme un leader mondial dans le développement de l'énergie, des télécommunications, de la transmission de données, du traitement des données numériques (cartes à puce), des logiciels bancaires et des solutions de e-gouvernement.

La force du groupe réside dans la richesse de son réseau. Un service sans reproche qui garantit la satisfaction des clients est offert par ses 5 filiales : IMET TOGO (1998), SysAid Sénégal (2002), SysAid Faso (2005), SysAid France (2007), SysAid Côte d'Ivoire (2008).

Le groupe SODJI HOLDING GmbH a également su nouer des partenariats forts avec d'importantes sociétés internationales que sont :

- WAPCOS, constructeur renommée de système d'électrification en Asie ;
- TELEMENIA Ltd, constructeur de centrales électriques de renommée mondiale (Israël) ;
- AGREETECH, constructeur et fournisseur de groupes électrogènes (Chine) ;
- RISEN, constructeur et fournisseur de panneaux solaires ;
- AASTRA (Suisse), SIEMENS (Allemagne), KRONE (Allemagne), HITEC POWER (Hollande), 3M (France), Denso (Allemagne), AF Electrification (France) ; Samex (France), RADWIN (Israël), WAVEIP (Israël), etc.

Aujourd'hui, la filiale SysAid Faso offre de nombreux services dans le domaine de l'énergie tel que la fourniture et l'installation de groupes électrogènes, la construction de centrale thermique, la conduite de projets d'électrification rurale, la vente et l'installation de systèmes solaires photovoltaïques.

Afin d'œuvrer de façon synchrone dans l'atteinte de ses objectifs, la société s'organise autour de différentes directions et départements. Il s'agit de la Direction Générale, du Département Finances et Comptabilité, de la Direction Commerciale, du Département Marchés & Affaires Juridiques, du Département Télécommunication, du Département Energie.

## 1.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont les plus courants et les plus anciens. L'énergie produite est stockée en partie pour une utilisation ultérieure. Quatre configurations peuvent être rencontrées dans ces systèmes.

### 1.2.1. Les systèmes avec couplage courant continu (CC) du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est raccordé au bus CC généré par les batteries via un régulateur de charge. Ce système permet de fournir une source d'énergie stable à la charge. C'est le système le plus économique à mettre en œuvre pour les installations de petites puissances alimentant des appareils CC [3]. Cette configuration reste la classique des installations solaires et s'est faite tout naturellement puisque le champ photovoltaïque produit du courant continu. L'alimentation des charges CA par ce système peut se faire par l'intermédiaire d'un onduleur autonome/chargeur. La figure ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du couplage CC.

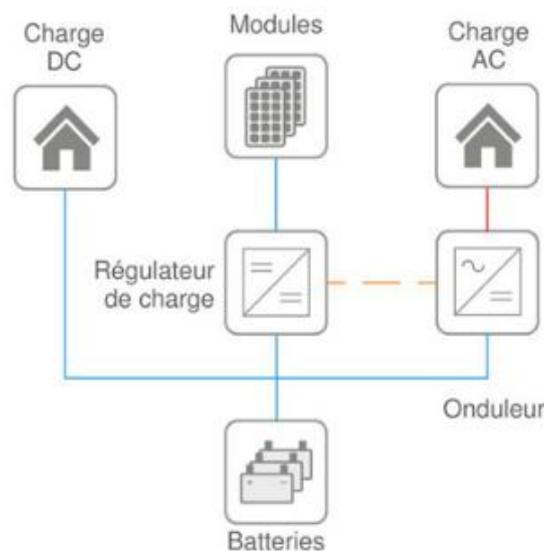


Figure 1: Schéma type du couplage CC [3].

### 1.2.2. Les systèmes avec couplage courant alternatif (CA) du générateur photovoltaïque

Dans un système avec couplage CA, le parc de batteries et l'onduleur autonome/chargeur offrent une source CA autonome sur laquelle se connecte le générateur photovoltaïque via un onduleur réseau. Chez certains constructeurs comme SMA, la régulation de puissance sur le bus CA de l'ensemble du système est assurée par l'onduleur autonome/chargeur qui contrôle l'injection d'énergie en fonction du niveau de charge du parc de batteries et de la consommation. Le couplage CA n'est rentable que

lorsque plus de 60% des besoins énergétiques sont à satisfaire en journée [4]. Le schéma type du système est présenté par la figure suivante :

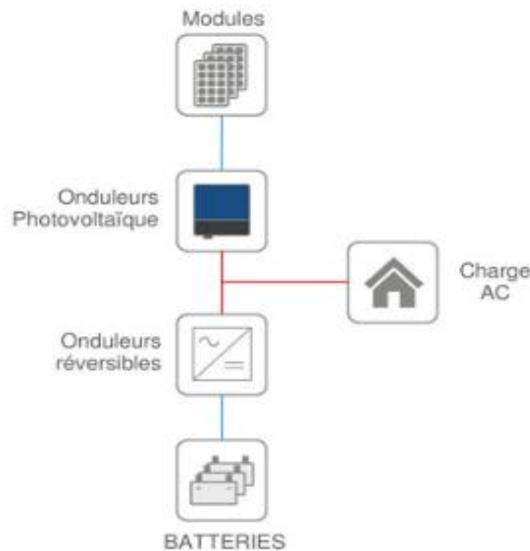


Figure 2: Schéma type du couplage CA [3]

### 1.2.3. Systèmes hybride avec groupe électrogène

Ce système peut se réaliser indépendamment du type de couplage du générateur photovoltaïque. Un groupe électrogène permet de faire l'appoint d'énergie et de protéger le parc de batteries de la décharge profonde. La gestion du groupe électrogène est assurée par un onduleur réversible par lequel transitent également les flux de puissances. La figure ci-dessous illustre le principe de fonctionnement de ce système.

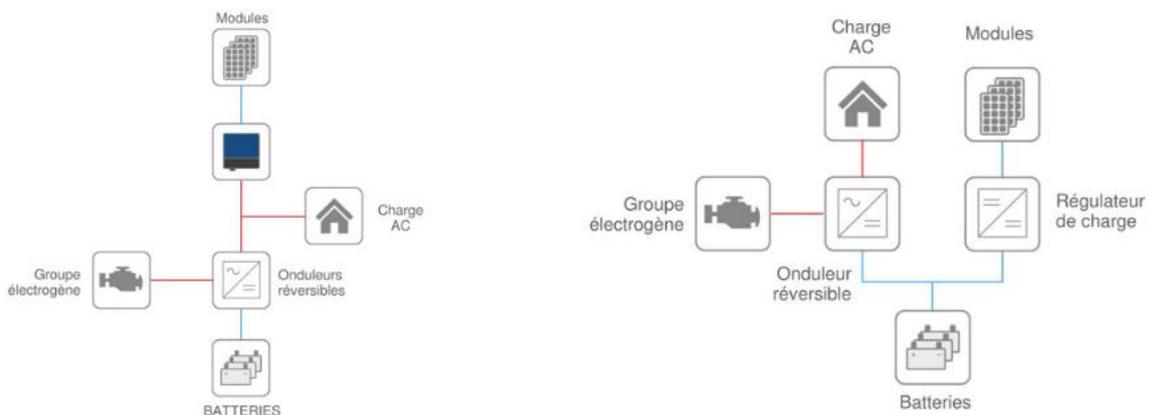


Figure 3: Schéma type du système hybride avec groupe électrogène [3]

#### 1.2.4. Système avec alimentation secours et optimisation solaire

Dans cette configuration, les charges sont alimentées par le réseau public et le solaire vient en appoint via un onduleur chargeur. En cas de défaillance du réseau, le système bascule automatiquement sur les batteries avec le soutien du générateur photovoltaïque si le soleil est présent. Ce système présente un double avantage. Il permet la réduction des factures d'électricité grâce à la production solaire et permet d'assurer la continuité du service énergétique grâce aux batteries. Le principe de fonctionnement du système est illustré par la figure ci-après.

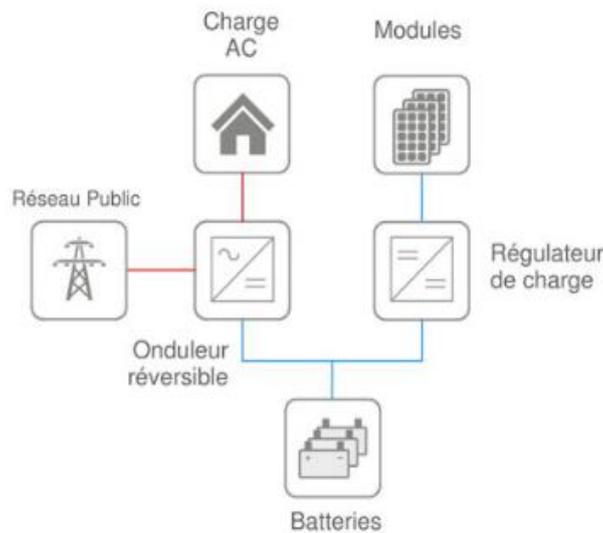
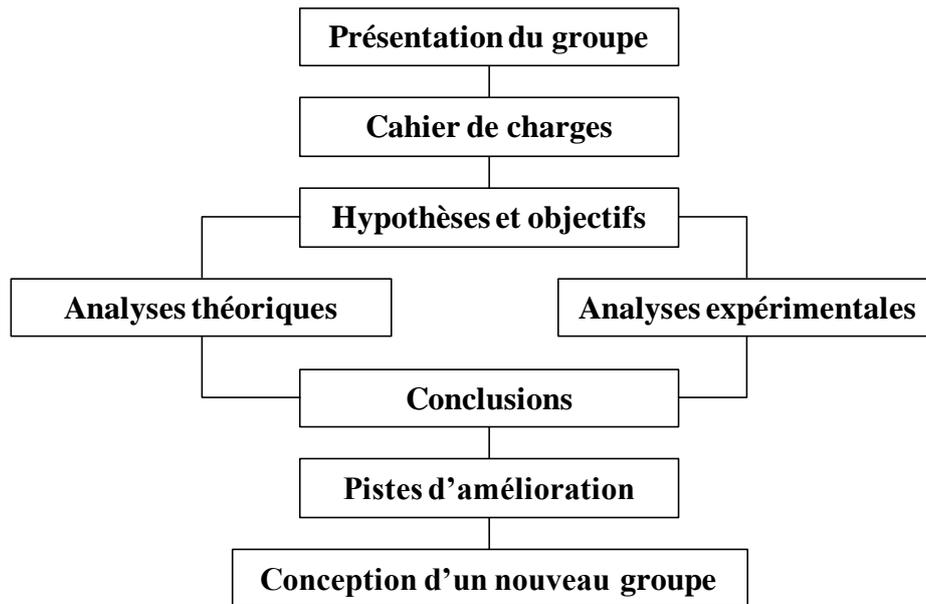


Figure 4: Schéma type du système avec alimentation de secours et optimisation solaire [3]

### 1.3. Approche méthodologique

L'approche méthodologique mise en place pour mener cette étude est présentée par l'organigramme ci-dessous :



## Chapitre 2: DESCRIPTION DU GROUPE ET CAHIER DE CHARGES

### 2.1. Description du groupe étudié

#### 2.1.1. Présentation générale du groupe SysSolar 5000

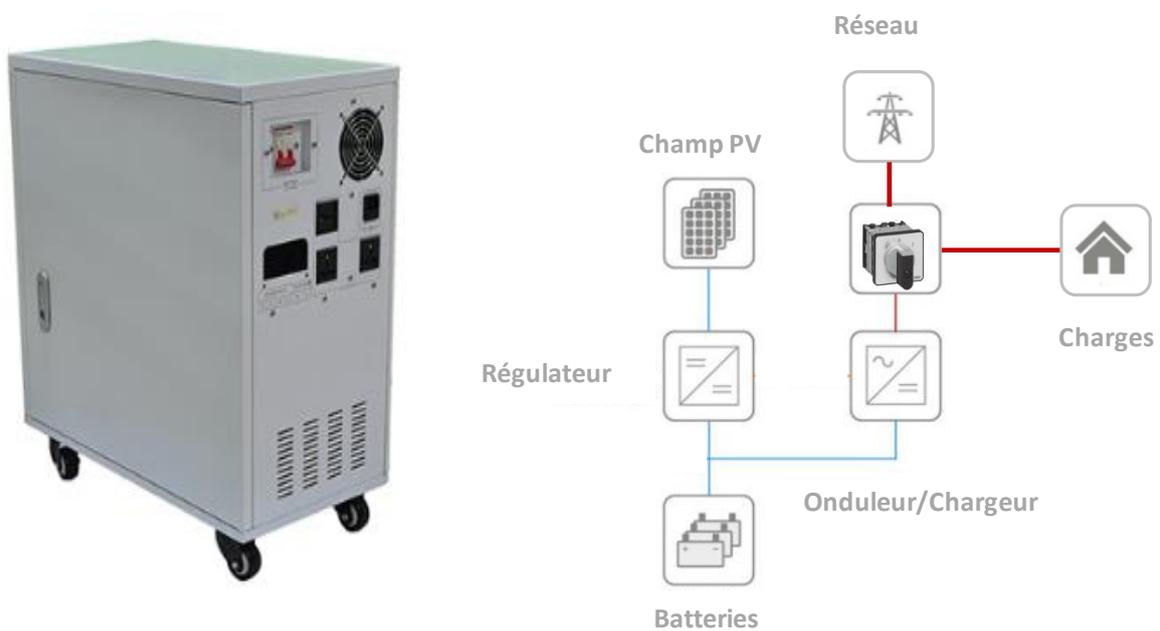


Figure 5: Le groupe SysSolar 5000 et son schéma synoptique

Le groupe solaire SysSolar 5000 se présente sous la forme d'un ensemble compact à l'intérieur duquel se trouvent les éléments suivants :

- un onduleur de 5000 W/48 V ;
- un régulateur de charge PWM 48 V/ 50 A ;
- un chargeur CA 230 V/15 A ;
- quatre batteries de 200 Ah ;
- un ventilateur CC.

Sur la carcasse métallique peuvent être distingués :

- cinq disjoncteurs C63 ;

- des bornes d'entrées et de sorties CA monophasées ;
- des bornes d'entrées et de sorties CC ;
- un afficheur numérique.

D'un point de vue électrique, le groupe peut être schématisé comme suit :

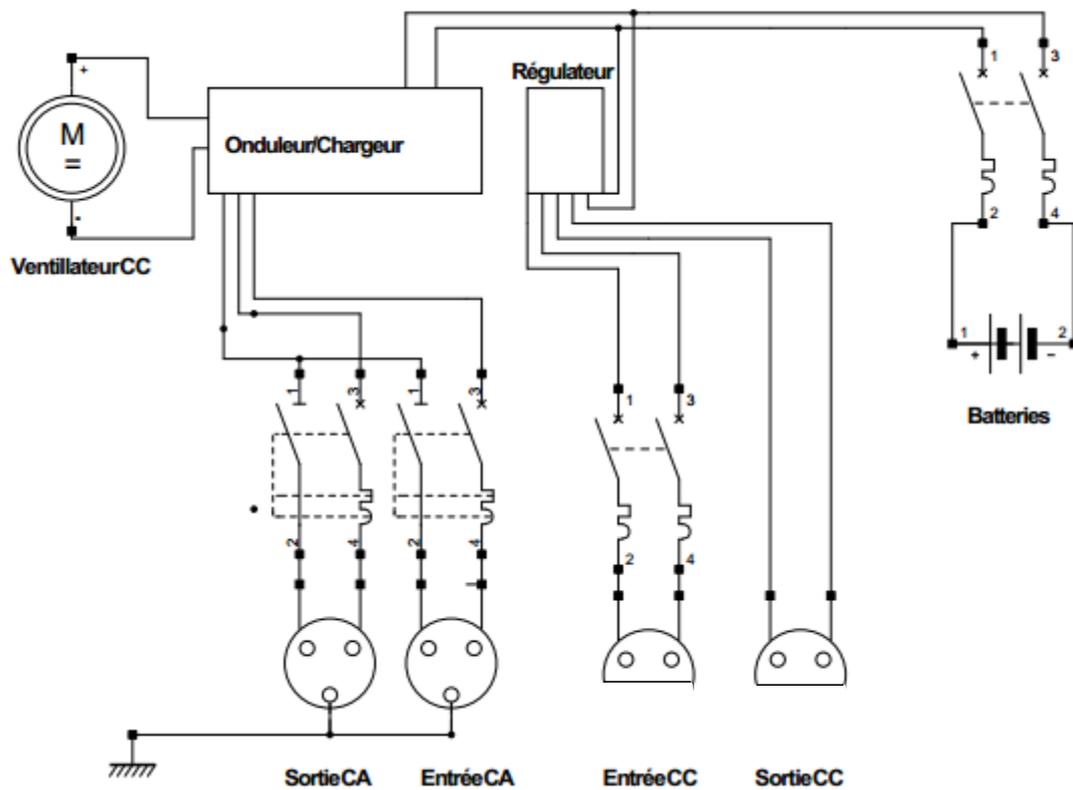


Figure 6: Schéma électrique du groupe SysSolar 5000

### 2.1.2. Caractéristiques techniques des différents éléments

Les tableaux 1 à 4 font la synthèse des caractéristiques techniques du champ photovoltaïque, du régulateur de charge, de l'onduleur chargeur et du parc de batteries.

**Tableau 1: Caractéristiques techniques des modules photovoltaïques**

Champ PV : 2 000 W <sub>c</sub> (4 branches de 2 modules)	
Type de module	Polycristalin
Marque	Xindun
P <sub>max</sub> (W) sous STC	250
V <sub>pmax</sub> (V)	30
I <sub>pmax</sub> (A)	8,33
V <sub>co</sub> (V)	36,3
I <sub>cc</sub> (A)	8,91

**Tableau 2: Caractéristiques techniques du régulateur de charge**

Régulateur de charge	
Type	PWM
Marque	Xindun
Tension nominale (V)	48
Courant de charge maximum (A)	50
Puissance maximum du champ (W)	2 000
Protection décharge profonde (V)	42
Protection surcharge (V)	68

**Tableau 3: Caractéristiques techniques de l'onduleur/chargeur**

Onduleur/chargeur	
Marque	Xindun
Tension d'entrée CC (V)	48
Puissance de sortie (W)	5 000
Tension de sortie (V)	220/240
Fréquence (Hz)	50/60
Forme du signal de sortie	Sinusoïdale pure
Taux de distorsion harmonique	<3%
Rendement	> 85%
Tension d'entrée du chargeur (V)	230
Courant maximum du chargeur (A)	15

**Tableau 4: Caractéristiques techniques du parc de batteries**

Parc de batteries (4 batteries de 200 Ah 12 V)	
Type	Gel
Marque	Xindun
Electrolyte	Plomb-Acide
Tension du parc (V)	48
Capacité (Ah)	200

## 2.2. Cahier de charges

Les groupes SysSolar sont commercialisés sur le marché burkinabè depuis un moment. Ces systèmes ont été facilement adoptés par les populations car ils constituent une solution tout en un, ce qui les rend plus ergonomiques que les systèmes classiques. Cependant, un retour d'expérience permet d'affirmer que ces systèmes ne répondent pas tout à fait aux exigences des clients. Ces derniers se plaignent des points suivants :

- l'autonomie des batteries ;
- l'absence d'une inversion automatique ;
- la non réduction de leurs factures d'électricité.

Ces problèmes n'ayant pas été résolus, et compte tenu du manque d'intérêt des clients pour ces groupes, l'entreprise a suspendu leur commercialisation. Quels sont les raisons pouvant expliquer les problèmes soulignés ? Est-il possible de fabriquer de tels systèmes au Burkina ? Ces questions nous poussent à étudier la performance énergétique des groupes dans l'espoir de trouver des éléments de réponse pouvant expliquer les problèmes observés. L'étude va porter sur un modèle de 5 000 W se trouvant dans les locaux de l'entreprise et qui sert de source secours en cas de délestage.

### 2.3. Hypothèses et objectifs

L'étude de la performance énergétique du groupe sera réalisée sur la base des hypothèses suivantes :

- l'autonomie du parc de batterie est faible ;
- le champ photovoltaïque n'arrive pas à charger le parc de batteries tout en alimentant la charge ;
- Les éléments du système présentent des défaillances.

Deux objectifs sont globalement poursuivis à travers cette étude. Premièrement, il sera question de déterminer la performance énergétique du groupe. Ensuite, un nouveau groupe solaire sera conçu. Le synoptique ci-dessous décline les étapes clés de notre étude.

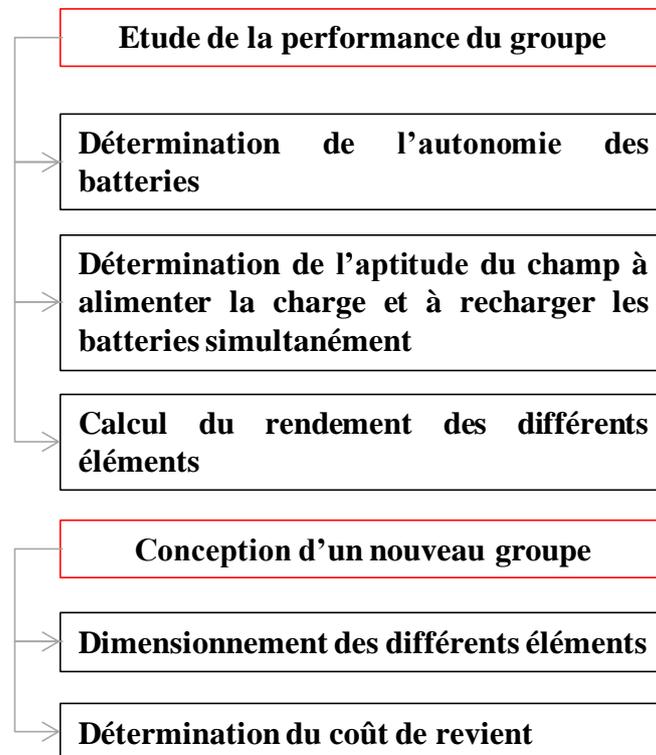


Figure 7: Etapes clés de l'étude

## Chapitre 3: ETUDE DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU GROUPE

Les différentes analyses ont été menées sur le groupe SysSolar de 5 000 W installé dans les locaux de l'entreprise. Il alimente toutes les charges électriques du 2<sup>e</sup> étage à l'exception des climatiseurs. Le groupe n'est utilisé que pendant les délestages.

### 3.1. Analyses théoriques

#### 3.1.1. Analyses sommaires

Le groupe solaire étudié se présente sous la forme d'un ensemble compact. Les batteries sont logées à l'intérieur de ce dernier et juste au-dessus se trouvent l'onduleur et le régulateur de charge. Une porte referme la façade du groupe rendant les batteries invisibles au premier abord. La figure ci-dessous présente l'aspect global du groupe.



Figure 8: Aspect général du groupe solaire SysSolar 5000

Comme le montre la figure, l'espace occupé par les batteries n'est pas assez aéré. Ainsi, la chaleur dégagée par l'onduleur risque d'être transmise par conduction et d'entraîner une augmentation de

température de l'environnement immédiat des batteries. Cette situation pourrait réduire la durée de vie des batteries.

Un autre manquement relevé est l'absence d'une protection contre les surtensions atmosphériques. Aucun parafoudre n'a été placé pour protéger l'onduleur.

### 3.1.2. Analyse des besoins

L'évaluation de la charge se fait à deux niveaux. D'une part il y a le besoin en puissance des appareils que l'onduleur doit satisfaire et d'autre part il y a le besoin en énergie que le champ et les batteries devront satisfaire.

#### Bilan de puissance

Tableau 5: Bilan de puissance

Appareils	Bilan de puissance		
Désignation	Puissance (W)	Nombre	Puissance totale (W)
Réglettes 60	22,5	33	742,5
Réglettes 120	45	9	405
Brasseur d'air	75	3	225
Ordinateur bureau	90	6	540
Ordinateur portable	65	4	260
Imprimante 1	515,2	1	515,2
Imprimante 2	644	1	644
Serveur	193,2	1	193,2
Réfrigérateur	75	1	75
Cafetière	850	1	850
<b>Puissance totale</b>			<b>4 449,9</b>

La charge totale devant être secourue en cas de délestage est donc de 4 449,9 W soit 89% de la puissance nominale de l'onduleur.

#### Estimation du besoin énergétique journalier

A défaut d'avoir un profil de charge, l'évaluation du besoin journalier s'est faite sur la base d'une observation des habitudes de consommation de l'entreprise. Cela nous a permis de déterminer les temps de fonctionnement des différents appareils et d'évaluer le besoin énergétique journalier qui est présenté dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 6: Estimation du besoin énergétique journalier**

Désignation	Puissance (W)	Nombre	Puissance totale	Nombre	Temps (H)	Nombre	Temps (H)	Jour	Nuit	Totale
Réglette 6011	22,5	33	742,5	33	10	33	1	7425	743	8168
Réglette 120	45	9	405	9	10	9	1	4050	405	4455
Brasseur d'air	75	3	225	3	5	1	1	1125	75	1200
Ordi. bureau	90	6	540	6	5	1	0,5	2700	45	2745
Ordi. portable	65	4	260	4	5	1	0,5	1300	32,5	1333
Imprimante 1	515,2	1	515,2	1	0,2	1	0	100	0	100
Imprimante 2	644	1	644	1	0,2	0	0	107	0	107
Serveur	193,2	1	193,2	1	10	1	14	1932	2705	4637
Réfrigérateur	75	1	75	1	8	1	8	600	600	1200
Cafetière	850	1	850	1	0,25	0	0	213	0	213
<b>Energie totale jour (Wh)</b>								<b>19 551</b>		
<b>Energie totale nuit (Wh)</b>								<b>4 605</b>		
<b>Besoin journalier (Wh)</b>								<b>24 156</b>		

### 3.1.3. Capacité du champ à recharger le parc de batterie

La détermination de l'aptitude du champ à charger le parc de batteries passe d'abord par l'évaluation de l'énergie que ce parc peut stocker. Ensuite, la production du champ doit être évaluée puis comparée à la capacité de stockage des batteries afin de juger de son aptitude à les charger.

#### Estimation de l'énergie pouvant être stockée par le parc de batteries

Pour évaluer l'aptitude du champ à charger le parc de batterie, l'énergie que ce dernier peut stocker a été évaluée par la formule suivante :

$$E_{bat} = C_{bat} \times V_{bat} \tag{1}$$

Avec :

$E_{bat}$  : énergie stockable par le parc de batteries (Wh)

$C_{bat}$  : capacité du parc de batteries (Ah)

$V_{bat}$  : tension du parc de batteries (V)

Le tableau ci-dessous fait la synthèse du bilan énergétique du parc de batteries.

Tableau 7: Analyse énergétique du parc de batteries

<b>Bilan énergétique du parc de batteries (Wh)</b>	
Energie stockable	9600
Energie utilisable	7200
Energie restituée	5760

L'énergie stockable est l'énergie totale stockée par les batteries une fois charge. Elle est déterminée donc en faisant le produit de la tension du parc de batteries (48 V) par la capacité totale du parc (200 Ah).

L'énergie utilisable est l'énergie disponible dans les batteries en tenant compte de la profondeur de la décharge. Elle représente donc une fraction de l'énergie stockable. Elle est déminée en multipliant l'énergie stockable par la profondeur de la décharge (0,75).

Enfin, l'énergie restituée est celle réellement fournie par les batteries à la charge. Elle tient donc compte du rendement des batteries. Elle est déterminée en faisant le produit de l'énergie utilisable par le rendement des batteries (0,8).

### **Estimation de la production du champ photovoltaïque**

La puissance crête du champ étant connue, l'énergie que ce dernier peut produire en une journée peut se calculer par la formule suivante :

$$E_{pv} = P_{pv} \times H_i \times PR \quad (2)$$

Avec :

$E_{pv}$  : énergie totale que peut produire le champ en une journée (Wh)

$P_{pv}$  : puissance crête du champ (W<sub>c</sub>)

$H_i$  : ensoleillement moyen (kWh · m<sup>-2</sup> · j<sup>-1</sup>)

$PR$  : ratio de performance du système (%)

La puissance crête du champ est de 2 000 W<sub>c</sub>, l'ensoleillement moyen du Burkina vaut 5,5 kWh · m<sup>-2</sup> · j<sup>-1</sup> [1] et le ratio de performance du système est évalué à 70%. L'énergie moyenne fournie par le champ photovoltaïque vaut alors 7 700 Wh.

La production énergétique du champ photovoltaïque est inférieure à la capacité de stockage du parc de batteries (9 600 Wh) mais supérieure à l'énergie utilisable de ce dernier (7 200 Wh). Etant donné que c'est cette énergie qui devra être restituée à chaque charge, la puissance du champ est suffisante pour recharger le parc de batteries en une journée.

### 3.1.4. Capacité du groupe à satisfaire une charge

Afin d'évaluer l'aptitude du groupe à alimenter une charge donnée, les factures d'électricité sur un an de trois ménages ainsi que celles de l'entreprise (Annexe 1) ont été utilisées. Le tableau ci-dessous présente les différents besoins en énergie en fonction du type d'utilisateur.

Tableau 8: Evaluation de la consommation par le type d'utilisateur

	Ménage A	Ménage B	Ménage C	Entreprise
Puissance de souscription (A)	5	5	15	30
Besoin journalier maximum (kWh)	4,77	5,83	16,07	81,91
Besoin journalier minimum (kWh)	2,80	1,93	7,30	17,23
Besoin journalier moyen (kWh)	3,69	4,75	11,96	45,86

Les ménages A et B ont la même puissance de souscription mais des besoins énergétiques différents. Il convient de noter que l'entreprise n'utilise pas le groupe pour secourir toute son installation électrique. Ainsi, le besoin énergétique qui sera utilisé pour l'évaluation est celui déterminé plus haut (24,2 kWh).

#### Cas de l'entreprise

Le besoin journalier de l'entreprise est estimé à 24 156 Wh. Cependant, l'entreprise n'utilisant le groupe qu'en cas de délestages pour assurer la continuité du service énergétique, le besoin à couvrir pendant ces moments doit être évalué. Ce besoin peut être estimé en faisant le produit de la puissance moyenne de la charge par le temps moyen de délestage au Burkina. Avec donc un temps de coupure moyen estimé à 3,8 heures [5] et une puissance moyenne de 2 196 W le besoin à couvrir en cas de délestage est de 8 345 Wh. Cependant, la production du champ (7 700 Wh) et la capacité de stockage du parc de batteries (5 760 Wh) prises individuellement sont inférieures à ce besoin. Trois cas sont alors possibles : soit le délestage survient pendant la journée et le parc de batteries est chargé ou déchargé, soit il survient la nuit et le parc de batteries est chargé.

- Premier cas : délestage en journée et batteries chargées

Dans ce cas de figure, même si le champ seul ne peut pas satisfaire la charge, le parc de batteries pourra fournir l'énergie manquante afin d'assurer la continuité du service énergétique.

- Deuxième cas : délestage en journée et batteries non chargées

Si le parc de batteries n'est pas complètement chargé, la charge pourra être alimentée pendant un temps inférieur au temps moyen de délestage. La continuité du service énergétique ne pourra donc pas être assurée. Le temps de couverture dépendra dès lors du niveau de charge des batteries. Plus ce dernier est inférieur à 100%, plus le temps de couverture sera bref.

- Troisième cas : délestage la nuit et batteries chargées

Le besoin énergétique nocturne a été évalué à 4 605 Wh. L'énergie disponible dans le parc de batteries (5 760 Wh) est à même de satisfaire cette demande.

### **Cas des ménages**

En se référant aux données de consommation, les ménages ayant une puissance de souscription de 5 A peuvent utiliser le groupe comme source normale d'énergie. L'énergie fournie par le groupe peut couvrir le besoin journalier et la puissance de l'onduleur peut supporter la puissance des charges. Cependant, l'autonomie du parc de batteries ne permet pas de satisfaire la demande pendant deux jours successifs. Les ménages ayant une puissance de souscription supérieure à 5 A sans dépasser 20 A peuvent utiliser le groupe comme source secours en cas de délestage. Pour ceux dont la puissance de souscription est supérieure à 20 A, le groupe peut être utilisé pour secourir une partie de l'installation comme le fait l'entreprise.

## **3.2. Analyses expérimentales**

### **3.2.1. Matériels et méthodologie**

Le matériel utilisé pour réaliser cette étude se compose d'une pince ampèremétrique CHOUVIN ARNOUX F09 à plusieurs fonctions. Cet appareil permet de mesurer le courant, la tension, la résistance et la puissance en CC ou en CA. La figure ci-dessous présente la pince utilisée ainsi que ses accessoires.



Figure 9: Pince ampèremétrique avec ses accessoires

L'analyse expérimentale a été réalisée à partir des données collectées lors de deux expériences menées sur le groupe. Ces expériences ont consisté en la mesure du courant et de la tension à différents niveaux comme le montre les figures suivantes.

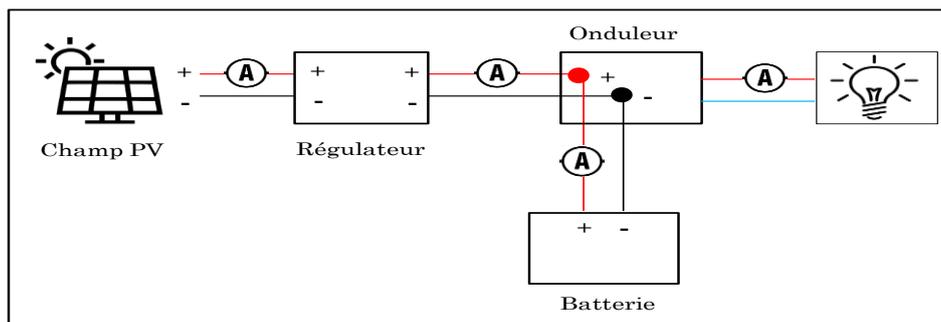


Figure 10: Schéma des différents points de mesure du courant

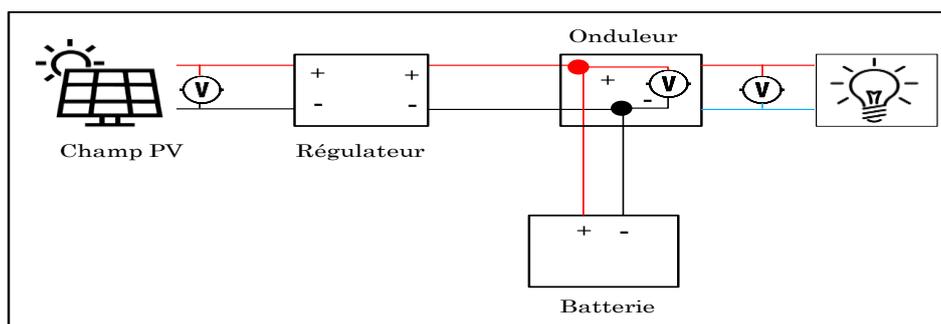


Figure 11: Schéma des différents points de mesure de la tension

### Expérience 1 : Charge du parc de batteries

Les batteries étant déchargées, et l'inverseur manuel en position SONABEL, les valeurs du courant et de la tension entre les points suivants ont été mesurées chaque 10 minutes :

- le champ photovoltaïque et régulateur de charge ;
- le régulateur et le point de jonction sur la carte de l'onduleur ;
- le point de jonction et les batteries.

### Expérience 2 : Alimentation d'une charge

Les batteries étant chargées et l'inverseur manuel placé en position solaire, les valeurs du courant et de la tension entre les points suivants ont été mesurées chaque 10 minutes :

- le champ photovoltaïque et régulateur le charge ;
- le régulateur et la batterie ;
- la batterie et l'onduleur ;
- l'onduleur et la charge.

#### 3.2.2. Charge du parc de batteries

##### Evolution de la tension

La figure ci-dessous illustre les variations de la tension aux bornes du parc de batteries et du champ photovoltaïque. Les mesures ont été effectuées par intervalle de 10 minutes.

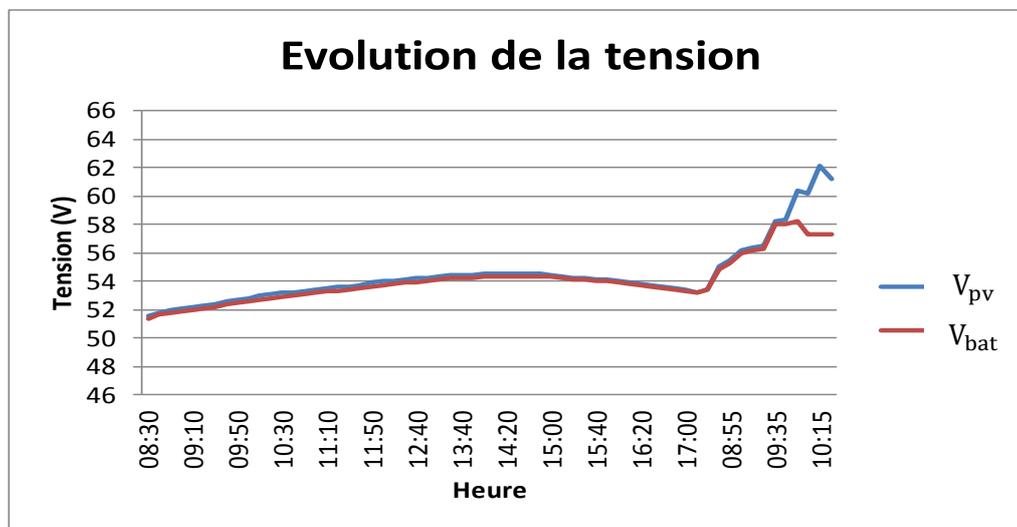


Figure 12: Evolution de la tension pendant la charge du parc de batteries

La tension aux bornes du parc de batteries évolue au même rythme que celle du champ photovoltaïque à une constante près. La tension du champ est toujours supérieure à celle aux bornes des batteries. Comme le montre la figure, la charge du parc de batteries s'est faite sur deux jours. Le premier jour de 8h30 à 17h10 et le second jour de 8h35 à 10h25, soit 10h10 mn de temps de charge.

##### Evolution du courant

La figure ci-dessous illustre la variation du courant pendant la charge du parc de batteries.

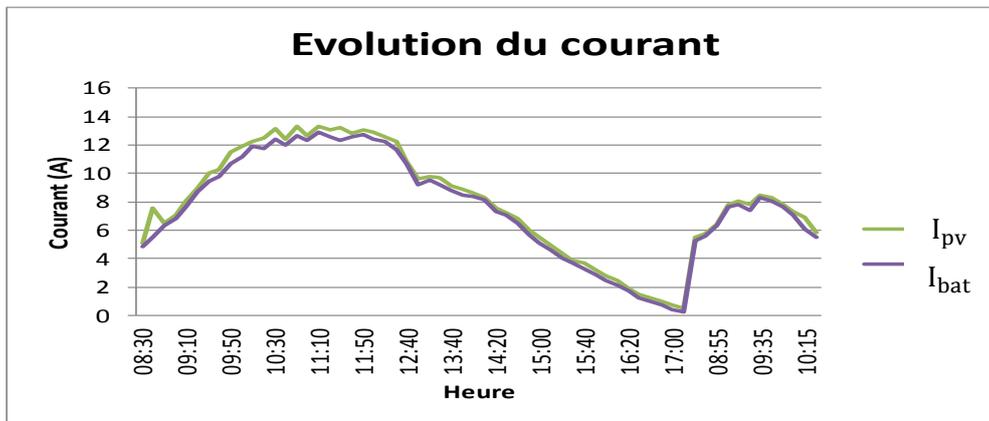


Figure 13: Evolution du courant pendant la charge du parc de batteries

L'évolution des courants est similaire. Le courant du champ semble dépendre de deux facteurs : le niveau de charge des batteries et la course du soleil. La phase de décroissance le premier jour de charge et la phase de croissance le second jour en témoignent. Ainsi, lorsque l'ensoleillement est suffisamment élevé, le régulateur tire le maximum de courant du champ pour charger les batteries. Ensuite, lorsque les batteries sont chargées, il élève la tension du champ, provoquant la diminution du courant de charge.

La figure ci-après permet de voir l'évolution de la puissance du champ photovoltaïque tout au long de la charge des batteries. Cette puissance a été obtenue en faisant le produit de la tension aux bornes du champ et du courant qu'il produit.

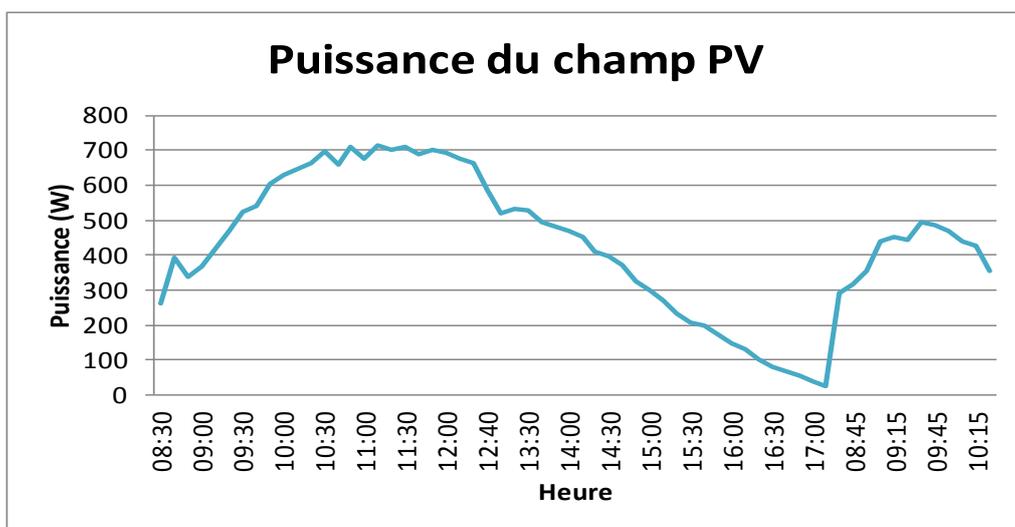


Figure 14: Evolution de la puissance du champ photovoltaïque pendant la charge du parc de batteries

L'évolution de la puissance est similaire à celle du courant produit par le champ. Les pics de puissance s'observent entre 10h30 et 12h40 avec une puissance maximale de 713,7 W relevée à 11h10. Cela prouve que la régulation du champ est faite sur la base du niveau de charge des batteries lors de la charge. Il est très important de souligner que le temps était très poussiéreux le jour où cette expérience a été menée. Cela pourrait expliquer les faibles valeurs de puissance relevées.

Afin d'analyser la performance du système pendant la charge, un bilan énergétique a été réalisé. L'énergie reçue par le champ a été estimée en considérant les valeurs moyennes d'irradiation journalière du jour de l'expérience fournie par le logiciel PVsol (Annexe 4) et la surface totale du champ photovoltaïque (13,09 m<sup>2</sup>). La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus.

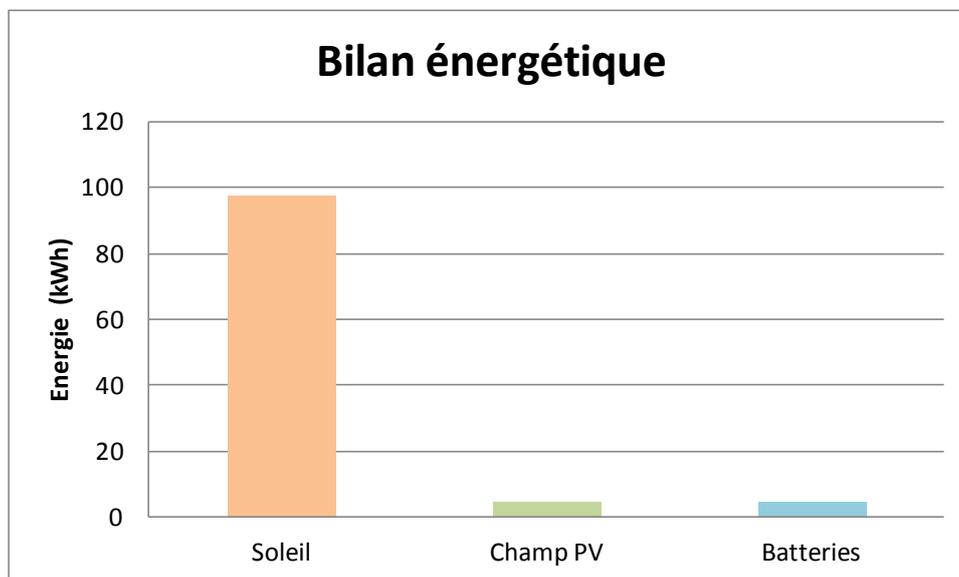


Figure 15: Bilan énergétique de la charge du parc de batteries

Avec une production totale de 4 743 Wh contre une énergie reçue de 97 309 Wh le rendement du champ photovoltaïque est de 4,9%. Le parc de batteries a reçu une énergie de 4 482 Wh sur l'énergie totale produite par le champ. Le régulateur a donc un rendement de 94,5%.

### 3.2.3. Alimentation d'une charge

#### Courbe de charge du système

La courbe de charge permet de suivre l'évolution de la charge tout au long de l'expérience. Elle permet aussi de déterminer la puissance de pointe de la charge. La figure ci-dessous illustre l'évolution de la charge tout au long de l'expérience.

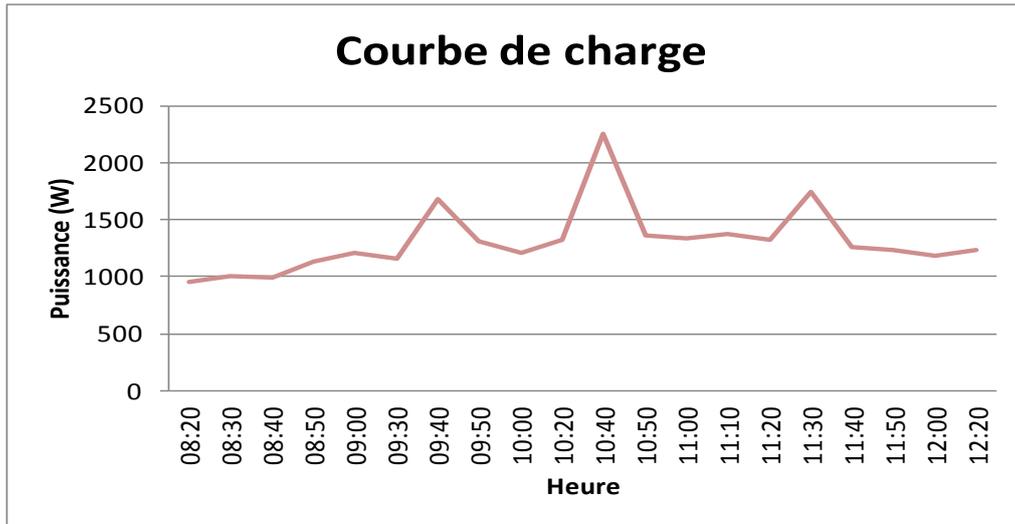


Figure 16: Evolution de la puissance de la charge

La charge est assez variable du début à la fin de l'expérience. Les plus faibles valeurs s'observent tôt dans la matinée et le pic de puissance a lieu vers 10h40. La charge minimale est de 961 W et la charge maximale vaut 2 256 W.

### Evolution de la tension

Les mesures de tension ont été effectuées dans les mêmes conditions que celles de la charge. Les valeurs ont donc été relevées chaque 10 min. la figure suivante illustre l'évolution de la tension aux bornes du parc de batteries et du champ photovoltaïque.

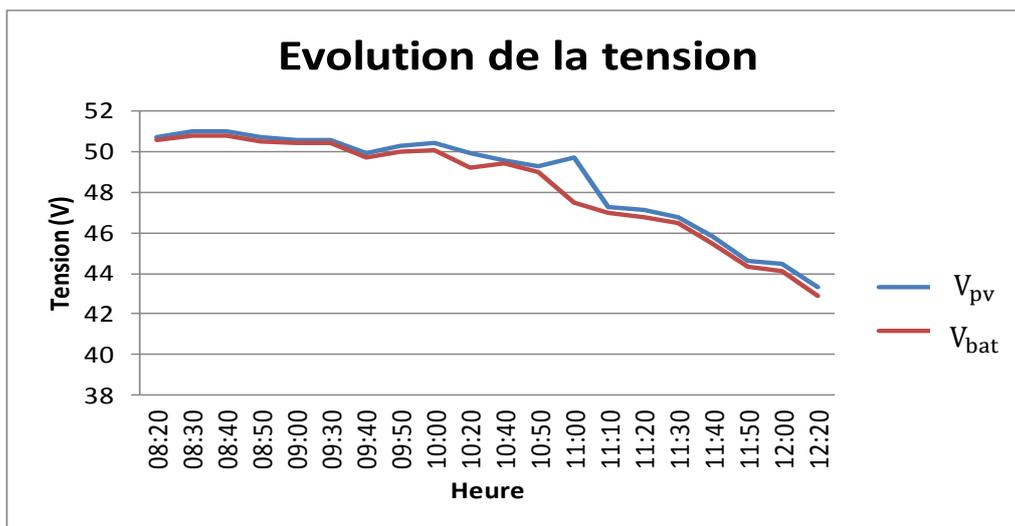


Figure 17: Evolution de la tension pendant la décharge

Les tensions du champ et du parc de batterie chutent régulièrement du début à la fin de l'expérience. Elles passent de 50,7 V à 43,3 V pour le champ PV et de 50,6 V à 42,9 V pour le parc de batteries. Les

batteries se sont déchargées au bout de 4h de fonctionnement. Dès que le seuil de décharge profonde a été atteint (42,9 V), le groupe s'est éteint.

L'évolution des tensions indique clairement que le bus CC est stabilisé par la tension du parc de batteries et l'extinction de tout le système lorsque le parc de batteries est déchargé laisse croire que le champ ne peut pas recharger le parc de batteries et alimenter la charge simultanément.

### Evolution du courant

La figure ci-après illustre les variations du courant du champ photovoltaïque et celui du parc de batteries lorsque le système alimente une charge.

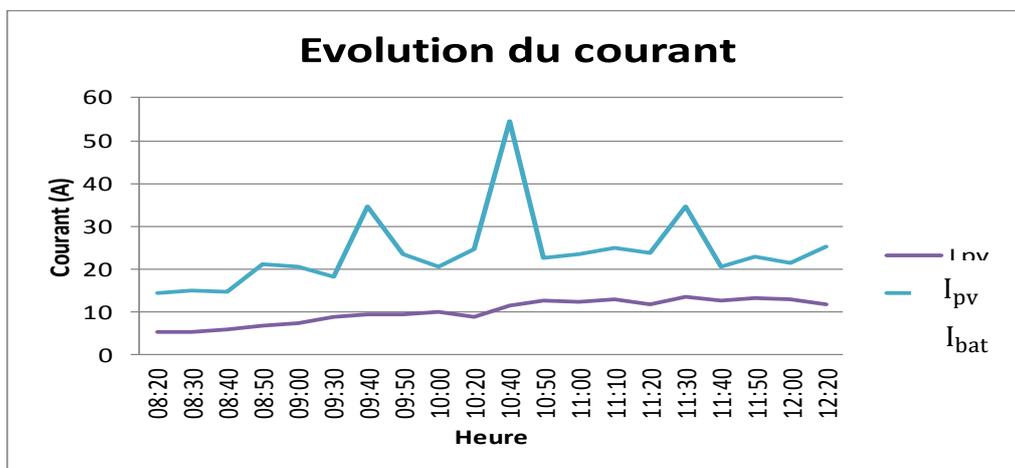


Figure 18: Evolution du courant pendant la décharge du parc de batterie

Comme le montre la figure, le courant du champ reste inférieur à celui que fournissent les batteries du début à la fin de l'expérience. Les batteries auront donc le plus contribué à l'alimentation de la charge.

### La puissance

L'évolution de la puissance du champ est illustrée par la figure ci-après.

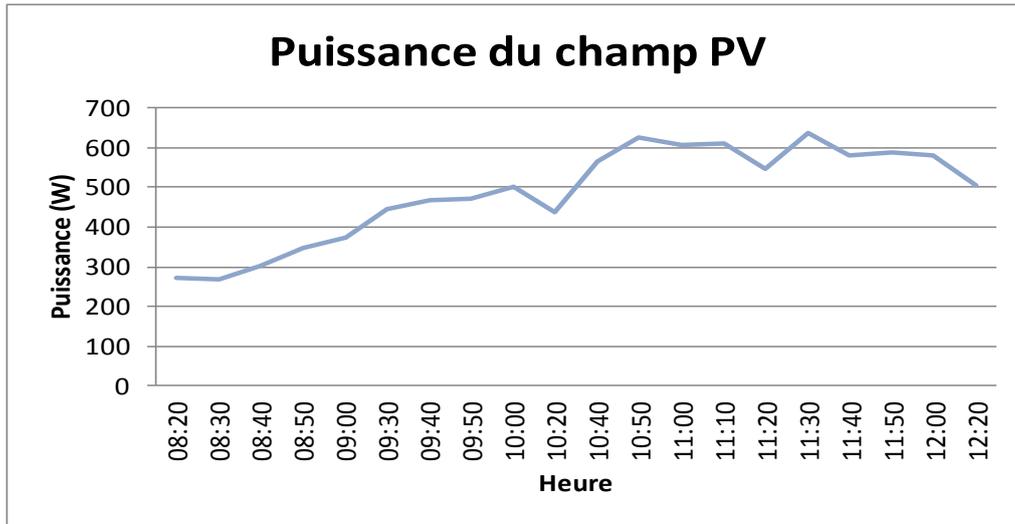


Figure 19: Evolution de la puissance du champ photovoltaïque lorsque le système alimente une charge

La puissance du champ augmente du début à la fin de l'expérience. La puissance minimale est de 272 W et la puissance maximale, relevée à 11h30 vaut 636 W.

Comme pour la charge, le bilan énergétique, lorsque le système alimente une charge, a été réalisé. L'énergie lumineuse reçue a été estimée en utilisant les valeurs moyennes journalières de l'irradiance du jour où l'expérience a été menée (Annexe 4) pendant un intervalle de temps correspondant à la durée de l'expérience et la surface du champ. Les résultats sont illustrés par la figure ci-dessous.

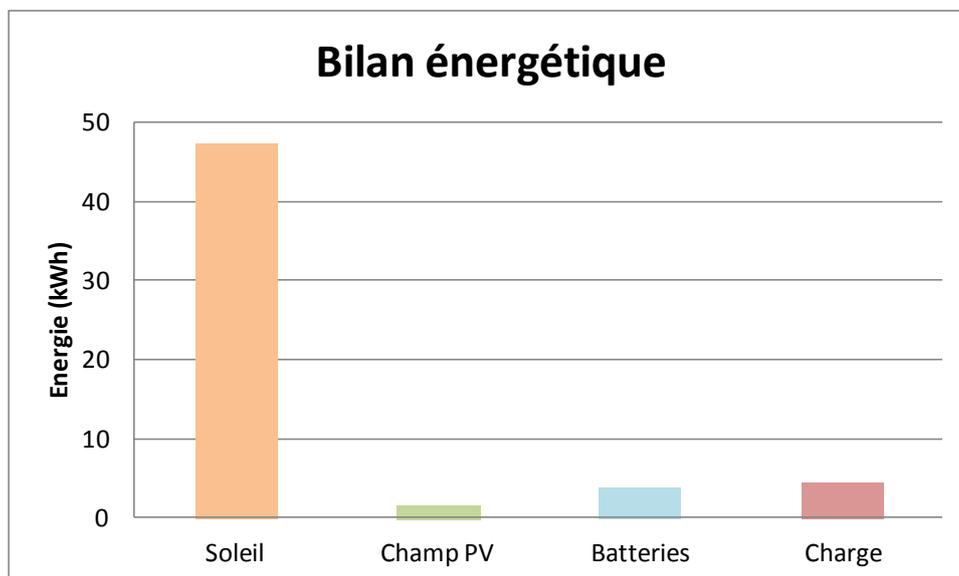


Figure 20: Bilan énergétique lorsque le système alimente une charge

L'énergie reçue par le champ s'élève à 47 351 Wh contre une production de 1 622 Wh. Le rendement de conversion est alors de 3,4%. Les batteries ont restitué une énergie de 3 868 Wh sur les 4 482 Wh reçues lors de la charge. Le parc de batterie a donc un rendement de 86%. En sommant l'énergie

produite par le champ et les batteries (5 490 Wh) et en faisant le rapport avec l'énergie consommée par la charge (4 390 Wh), le rendement de l'onduleur peut être estimé à 80%.

### 3.3. Comparaison des analyses théoriques et expérimentales

En comparant les résultats des deux analyses, l'on se rend compte que les analyses théoriques sont très optimistes par rapport à ce qui s'observe réellement. Le tableau ci-dessous fait le récapitulatif des résultats des deux analyses.

Tableau 9: Comparaison des analyses théorique et expérimentale

Eléments	Théorie	Expérience	erreur
Charge (W)	4449,9	2256	49%
Champ PV (Wh)	7 700	4754	38%
Batterie (charge) (Wh)	7200	4482	38%
Batterie (décharge) (Wh)	5760	3868	33%

L'erreur la plus grande est commise pour l'évaluation de la charge de pointe et la plus faible pour l'estimation de l'énergie restituée par le parc de batteries. Les raisons pouvant expliquer ces écarts varient d'un composant à l'autre. Pour ce qui est de la charge, les puissances considérées pour réaliser le bilan de puissances sont celles indiquées par les fiches techniques des appareils. Une explication plausible serait donc que les puissances annoncées sont les puissances maximales et non les puissances en fonctionnement normale. Cela est surtout vrai pour les appareils informatiques. S'agissant du champ photovoltaïque, il convient de souligner que les puissances annoncées par les fiches techniques ne sont observées que sous les conditions STC. Ces dernières sont difficilement réunies en situation réelle. La poussière peut également affecter le rendement des modules. Etant donné que lors des deux expériences le ciel était couvert par la poussière, une autre expérience a été menée cette fois-ci en ciel clair (de 8h45 à 17h29) afin d'analyser la production du champ de manière plus efficace. Cela a démontré que la puissance maximale observée ne franchit pas le seuil des 1 000 W. La pointe est observée à 10h46 et valait 870,9 W. L'énergie produite par le champ s'élevait à 4 754 Wh pour une irradiation de 70 848 Wh soit un rendement de 6,6%.

### 3.4. Conclusions des analyses

#### 3.3.1. L'autonomie du parc de batteries

Comme le montre les analyses théoriques et expérimentales, le maillon faible du système reste la capacité du parc de batteries (200 Ah). Avec une charge moyenne de 1 317 W, le système s'est arrêté après 4 heures de fonctionnement et ce, malgré la présence du soleil. Une telle capacité ne permet pas d'exploiter l'onduleur à pleine puissance car l'autonomie se verrait davantage réduite.

#### 3.3.2. Capacité du champ à charger le parc de batteries et à alimenter la charge

Pendant l'expérience 2, la tension du parc de batteries a chuté de façon régulière jusqu'à atteindre la tension de décharge profonde provoquant ainsi l'extinction du groupe. Le système n'a donc plus été en mesure d'alimenter la charge et ce, malgré la présence du soleil. Cela démontre l'incapacité du champ à charger le parc de batteries tout en alimentant la charge.

#### 3.3.3. Performance des éléments du groupe

Avec les résultats des deux expériences, les rendements des différents éléments du groupe ont pu être calculés. Le tableau ci-dessous fait la comparaison des rendements obtenus après les expériences et les rendements standards.

Tableau 10: Rendements expérimentaux des différents éléments du système

Eléments	Rendements expérimentaux	Rendements standards
Champ	3,4 – 6,6%	10 - 15%
Régulateur	94%	85%
Batteries	86%	80%
Onduleur	80%	90%

Les batteries et le régulateur ont des rendements supérieurs aux valeurs standards. L'onduleur présente un rendement inférieur au rendement standard et au rendement prévu par le constructeur ( $\geq 85\%$ ). Le champ photovoltaïque est l'élément dont le rendement est le plus éloigné des valeurs standards. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le régulateur de charge étant de type PWM, ne permet pas d'extraire la puissance maximale du champ. Les pertes dues à ce type de régulateur varient entre 15-35% [6]. Ainsi, les rendements calculés sont ceux au point de fonctionnement des modules et non au point de puissance maximale. D'autre facteur comme l'ensoleillement, n'a pas été mesuré directement à la surface des modules, ainsi que les conditions climatiques réelles qui sont différentes des conditions STC représentent une limite quant aux valeurs expérimentales trouvées.

### 3.5. Pistes d'amélioration

Après avoir étudié et observé le comportement global du système, trois pistes d'amélioration peuvent être dégagées. Ces pistes concernent la commande du système, le régulateur de charge solaire et l'utilisation du champ photovoltaïque.

Concernant la commande du système, un inverseur automatique peut être intégré. Cela est d'autant plus important pour les ménages vu que les utilisateurs sont absents en journée et que les délestages peuvent subvenir à ces moments.

En ce qui concerne le régulateur de charge, au regard de la puissance du champ et des pertes d'énergie annuelles qui sont importantes, il peut être remplacé par un régulateur MPPT afin d'optimiser la production du champ. Cette solution est envisageable uniquement si le constructeur est présent lors des modifications afin de s'assurer que la communication interne du système reste intacte.

Enfin, nous avons remarqué que lorsque les batteries sont chargées et qu'il n'y a pas de délestage, le champ n'est pas exploité. Ce qui est aberrant vu la taille du champ (2 000 W<sub>c</sub>). Le champ pourrait être utilisé en complément du réseau pour alimenter les charges une fois le parc de batteries chargé et le soleil disponible. Ce mode de fonctionnement nécessite une bonne régulation qui tient compte de la tension du parc de batteries et d'un onduleur qui accepte le réseau en entrée. Cependant, le système étudié même s'il possède un chargeur, ne permet pas l'utilisation du solaire et du réseau simultanément.

## Chapitre 4: PROPOSITION D'UN NOUVEAU GROUPE

### 4.1. Conception et dimensionnement des différents éléments

Le groupe étudié est très limitant en terme de modification. En effet, les éléments se présentant sous forme de cartes électroniques avec le système de communication déjà établi, il est très difficile de procéder au remplacement de ces derniers sans jouer sur la performance globale du système. En outre, en cas de défaillance d'un de ces éléments, il est difficile de trouver les pièces de rechange sur le marché local. L'une des alternatives serait donc de concevoir un nouveau groupe qui sera mieux adapté aux réalités climatiques et énergétiques du Burkina tout en offrant la possibilité d'offrir des services après ventes.

Le nouveau groupe devra assurer la satisfaction des besoins énergétiques d'une habitation ayant un revenu moyen. Ce choix se justifie par le fait que ces ménages sont l'une des cibles commerciales de l'entreprise.

#### 3.1.1. Evaluation du besoin énergétique

Afin d'évaluer le besoin énergétique des futurs utilisateurs du système, une étude sur les factures d'électricité a été réalisée. Les factures étudiées sont celles de deux familles dont la puissance de souscription est de 5 A en branchement monophasé (Annexe 1). Le tableau ci-après présente les consommations minimales, maximales et moyennes des deux ménages pris individuellement, puis ensemble.

Tableau 11: Evaluation du besoin énergétique journalier

Consommations	Ménage A		Ménage B		Moyennes journalières
	Mensuelle	Journalière	Mensuelle	Journalière	
Minimale (kWh)	84	2,80	58	1,93	2,37
Moyenne (kWh)	115	3,84	142	4,75	4,29
Maximale (kWh)	143	4,77	175	5,83	<b>5,30</b>

Afin de permettre l'adaptabilité du produit au plus un grand nombre de ménages, le besoin qui sera considéré pour le dimensionnement sera celui de la moyenne des consommations maximales soit 5,3 kWh par jour.

### 3.1.2. Dimensionnement des différents éléments du système

#### Le champ photovoltaïque

La puissance du champ photovoltaïque peut être évaluée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{B_j}{H_i \times \eta_{syst}} \quad (3)$$

Avec :

$P_c$  : puissance crête du champ ( $W_c$ )

$B_j$  : besoin énergétique journalier (Wh)

$H_i$  : ensoleillement moyen du mois le mois ensoleillé ( $kWh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ )

$\eta_{syst}$  : rendement du système (%)

Le besoin journalier a été estimé à 5 300 Wh. L'ensoleillement considéré est de  $5,5 kWh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$  (ensoleillement moyen du Burkina) avec un rendement du système de 70%.

La puissance crête minimale du champ est de 1 376,6  $W_c$ . Les modules qui seront utilisés sont ceux de 250  $W_c$ . Le nombre de modules nécessaires s'obtient alors en divisant la puissance minimale du champ par la puissance d'un module. Ainsi, le champ sera constitué de 6 modules de 250  $W_c$ . La puissance installée sera fonction des caractéristiques de l'onduleur/chargeur et des modules utilisés.

#### L'onduleur/chargeur

L'appel de puissance des appareils peut être évalué par la formule suivante :

$$P = U \times I \times \cos\varphi \quad (4)$$

Avec :

$P$  : puissance totale des équipements (W)

$U$  : tension simple du réseau de la SONABEL (V)

$I$  : calibre du disjoncteur d'abonné (A)

$\cos\varphi$  : facteur de puissance de l'installation

La tension monophasée du réseau électrique national est de 230 V. Le calibre du disjoncteur d'abonné des ménages considérés est de 5 A et le facteur de puissance considéré est de 0,8. La puissance des équipements peut donc être estimée à 920 W.

L'onduleur/chargeur devra donc avoir une puissance supérieure ou égale à 920 W. Le choix s'est porté sur un onduleur/chargeur Hybride V de MPP Solar d'une puissance de 2 000 W dont la fiche technique est jointe en annexes (Annexe 5). Ce choix se justifie d'une part par la puissance que peut supporter le régulateur de charge qui doit au moins être égale à la puissance minimale du champ photovoltaïque. D'autre part, cet onduleur offre plusieurs configurations programmables, ce qui le rend très pratique.

L'onduleur étant choisi, la configuration du champ s'obtient en calculant le nombre de modules à mettre en série et le nombre de branches parallèles. La tension et le courant maximal du régulateur de charge de l'onduleur/chargeur sont alors à considérer. Il faut s'assurer que la tension de circuit ouvert d'une branche de modules ne dépasse pas 145 V et que le courant total en provenance du champ ne dépasse pas 17,4 A. le champ sera donc organisé en deux branches de trois modules soit une puissance totale installée de 1 500 W<sub>c</sub>.

### **Le parc de batteries**

La détermination de la capacité du parc de batteries peut se faire suivant la formule suivante :

$$C_{bat} = \frac{B_j \times Jr_{aut}}{DM \times V_{bat} \times \eta_{bat}} \quad (5)$$

Avec :

$C_{bat}$  : capacité du parc de batteries (Ah)

$B_j$  : besoin énergétique journalier (Wh)

$Jr_{aut}$  : nombre de jour d'autonomie

$DM$  : profondeur de la décharge (%)

$V_{bat}$  : tension du parc de batteries (V)

$\eta_{bat}$  : rendement du parc de batteries (%)

Le besoin journalier a été évalué à 5 300 Wh pour un jour d'autonomie. La tension du parc de batteries est imposée par le contrôleur de charge solaire de l'onduleur/chargeur soit 24 V. La

profondeur de la décharge et le rendement des batteries valent respectivement 75% et 80%. La capacité minimale du parc de batteries vaut alors 368 Ah. Le parc de batteries sera donc constitué de deux batteries de 200 Ah/12 V en série (contrainte de tension) et de deux branches (contrainte de capacité), soit un total de 4 batteries ayant une capacité de 400 Ah sous 24 V.

### Les organes de protection

Les organes de protection sont destinés à protéger le champ PV, les batteries, l'onduleur et l'installation en aval du système contre les courts-circuits mais également contre les surtensions. Ils permettent en outre d'isoler chaque élément du système en cas de maintenance.

Ainsi, la protection du champ, respectivement du parc de batteries, sera assurée par un disjoncteur ou un sectionneur porte fusible CC de calibre supérieur au courant de court-circuit totale du champ (17,8 A), respectivement au courant de décharge maximale des batteries (83,3 A). Etant donné que le nombre de chaînes de modules est inférieur à 4, leur protection par fusibles n'est pas obligatoire [6]. Quant à l'installation en aval du système, un disjoncteur CA de calibre supérieur au courant maximal de sortie de l'onduleur chargeur (10,9 A) sera utilisé pour la protéger. Enfin, l'entrée CA de l'onduleur/chargeur sera protégée par un disjoncteur réglable de 6 à 10 A. Ce choix a été guidé par un souci d'adaptabilité du groupe aux différents types d'installation qu'il devra alimenter.

La protection contre les surtensions sera quant à elle assurée par des parafoudres. Leur dimensionnement tient compte du niveau céraunique de la zone, des caractéristiques de l'installation mais aussi de la probabilité d'occurrence de la foudre. D'après la carte céraunique mondiale (Annexe 2) [7], le niveau céraunique du Burkina est compris entre 60 et 100. En se référant aux indications du tableau de protection contre les surtensions (Annexe 3) [6], les côtés CC et CA de l'onduleur peuvent être protégés par des parafoudres de type 2. Leurs intensités nominales dépendront de l'appréciation du niveau de risque d'occurrence de la foudre. A titre indicatif, pour un niveau de risque faible, moyen et élevé, les calibres de parafoudre sont respectivement de 20 kA, 40 kA et 65 kA [8].

Le tableau ci-dessous présente les différents organes de protection et leurs calibres respectifs.

**Tableau 12: Dispositifs de protection des différents éléments du système**

Eléments	Type de protection	Calibre
Champ photovoltaïque	Disjoncteur CC	20 A
Parc de batteries	Sectionneur porte fusible CC	100 A
Installation CA	Disjoncteur CA	16 A
Onduleur/chargeur	Parafoudre type 2	40 kA
	Parafoudre type 2	40 kA

### Les câbles

La section des câbles en CC est fonction du courant qui doit y transiter, de la longueur du câble et de la chute de tension. La formule suivante permet de calculer cette section.

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta U} \quad (6)$$

Avec :

**S** : section du câble (mm<sup>2</sup>)

**ρ** : résistivité linéique du câble (μΩ.m)

**L** : longueur du câble aller-retour (m)

**I** : intensité du courant transitant dans le câble (A)

**ΔU** : valeur de la chute de tension maximale (V)

La valeur maximale de chute de tension tolérée est de 5%. La résistivité du câble dépend du type de matériau utilisé. Elle est de 0,017 μΩ.m pour le cuivre et 0,028 μΩ.m pour l'aluminium. Le tableau suivant fait la synthèse des calculs et des résultats obtenus.

**Tableau 13: Détermination de la section des câbles**

Circuit	I (A)	U (V)	L (m)	Section du câble en cuivre (mm <sup>2</sup> )	
				Section minimale	Section retenue
Modules-Boîte de dérivation	8,91	72	10	0,42	4
Boîte de dérivation-Onduleur	17,82	72	30	2,52	4
Batterie - Onduleur	50	24	2	0,49	4

### La carcasse

La carcasse du système sera constituée de deux blocs détachables. Le premier abritera le parc de batteries et le second l'onduleur chargeur, les éléments de protection et les différentes bornes de connexions. Cet agencement a été ainsi pensé afin d'avoir un système tout en un qui soit modulable. Les images suivantes présentent l'architecture du nouveau système.

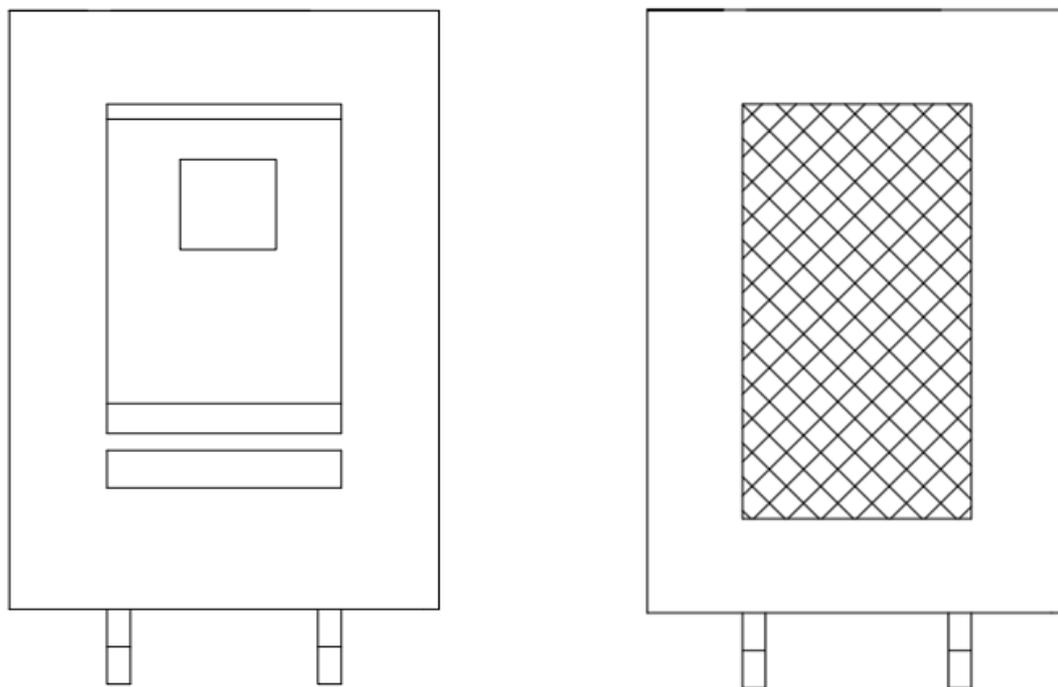


Figure 21: Façades avant et arrière

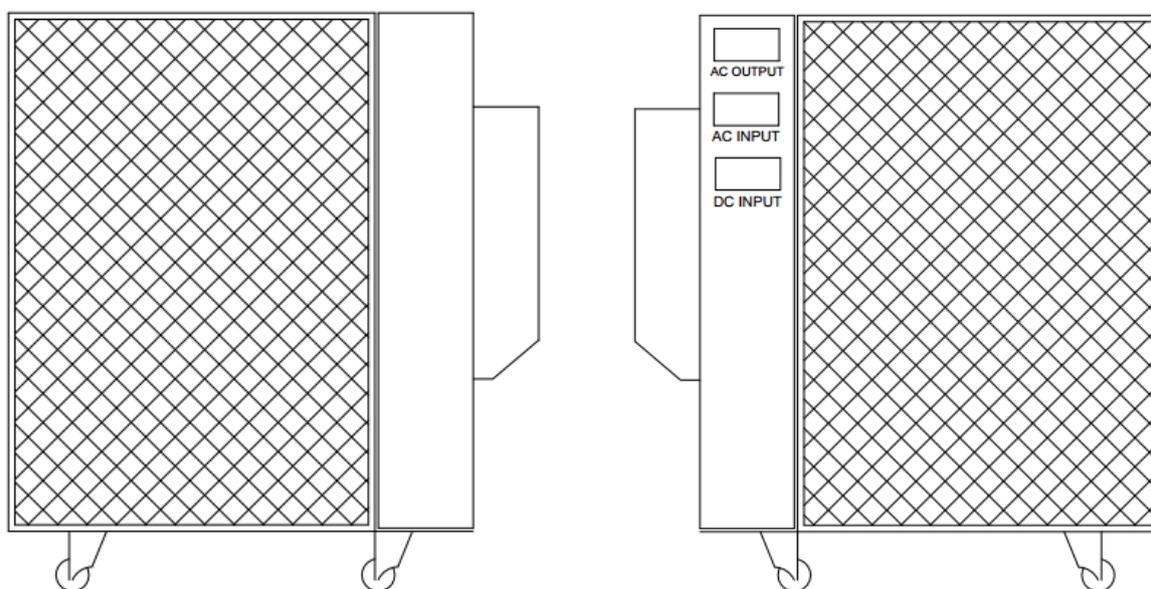


Figure 22: Façades latérales gauche et droite

Le schéma synoptique du groupe est présenté ci-après.

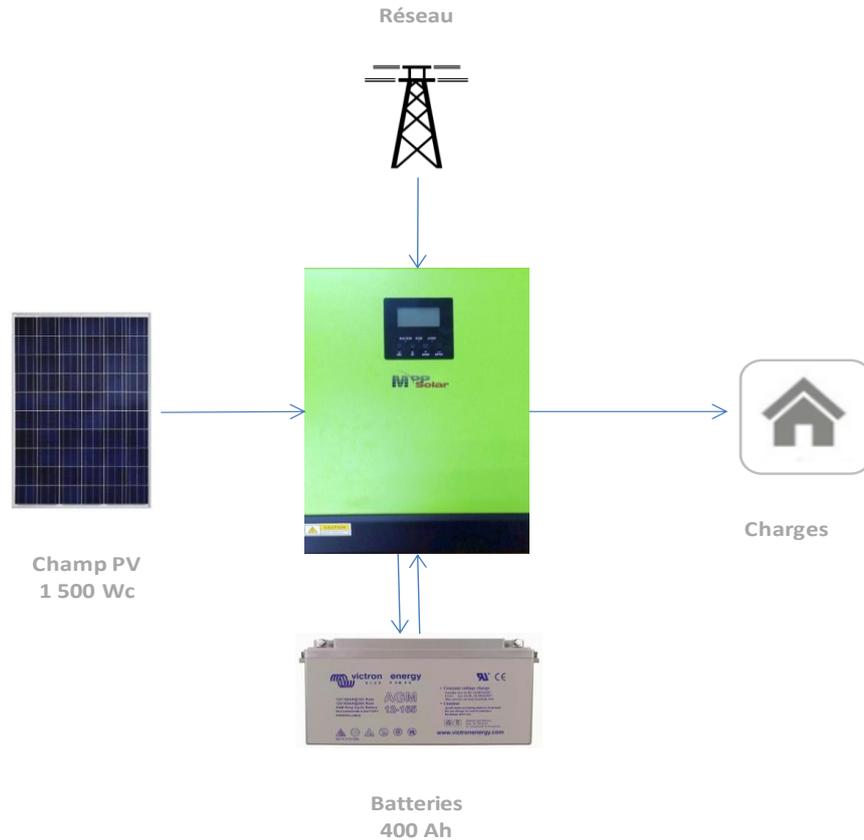


Figure 23: Schéma synoptique du nouveau groupe solaire

## 4.2. Evaluation financière

Le coût de revient du nouveau groupe solaire a été évalué en considérant les prix locaux des différentes composantes. Le tableau ci-dessous en fait la synthèse.

Tableau 14: Devis estimatif

DESIGNATION	Quantité	Prix unitaire	Totale
Module PV 250	6	135 000	810 000
Onduleur/Chargeur 2000 W 24 V	1	475 000	475 000
Batterie 200 Ah 12 V	4	170 000	680 000
Disjoncteur réglable 6-10 A	1	30 000	30 000
Disjoncteur CA 16 A	1	6 975	6 975
Sectionneur porte fusible CC 100 A	1	63 000	63 000
Disjoncteur CC 20 A	1	17 500	17 500
Parafoudre 40 kA CC	1	81 000	81 000
Parafoudre 40 kA CA	1	55 000	55 000
Câbles et accessoires de montage	1	185 965	185 965
Main d'oeuvre	1	50 000	50 000
<b>TOTAL GENERAL</b>			<b>2 454 440</b>

Le coût de revient du nouveau système est donc évalué à 2 454 440 F CFA. Ce montant est réparti comme le montre la figure ci-après.

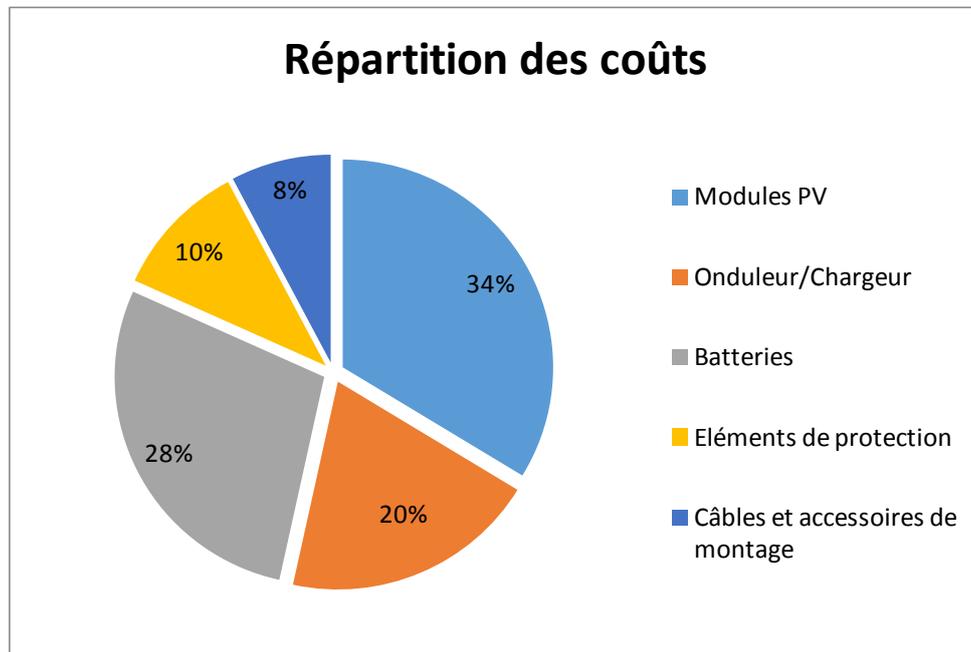


Figure 24: Répartition du coût de revient

Les éléments les plus budgétivores restent le champ photovoltaïque et le parc de batteries qui représentent ensemble plus de la moitié de l'investissement.

Le coût de revient du groupe étudié est de 2 584 471 F CFA. Ce dernier coûte donc plus cher que le nouveau. Il est important de souligner que la puissance du champ et de l'onduleur de l'ancien système sont plus élevées que celles du nouveau. Toutefois, le nouveau système présente des innovations intéressantes. Le système dispose en effet de plusieurs modes de fonctionnement paramétrables, d'un inverseur automatique intégré et d'une gestion intelligente des sources d'énergie. En outre, il est modulable et la capacité de son parc de batteries est le double de l'ancien système.

## Conclusion

L'étude des systèmes solaires photovoltaïques reste assez complexe et dépend de la disponibilité et la fiabilité des appareils de mesures. Au cours de cette étude, les données d'ensoleillement n'ont pas pu être mesurées directement à la surface des modules faute d'absence d'un pyranomètre. Les rendements estimés pour le champ restent donc indicatifs.

Par ailleurs, l'utilisation des données théoriques lors de l'étude d'un système photovoltaïque peut engendrer des erreurs de jugement car elles sont souvent éloignées des valeurs réelles. Toutefois, ces données permettent d'avoir une idée globale et une base scientifique de discussion.

L'idée d'une conception locale du système étudié revêt un double avantage. Elle permet de mettre en place des systèmes adaptés aux réalités des futurs utilisateurs et, en cas de dysfonctionnement, de trouver rapidement des pièces de rechange sur le marché local. Cela facilite la prestation des services après-vente.

Le nouveau système paraît donc très intéressant tant sur les éléments nouveaux qu'il apporte que sur la possibilité d'offrir des services après-vente. Les différentes étapes suivies pour sa conception pourront servir de base pour la création de systèmes plus puissants. Cependant, il conviendrait de passer à la phase de réalisation pour permettre la mise en place d'un canevas de reproduction à plus grande échelle.

## Bibliographie

- [1] Fondation Energie pour le monde, «De l'électricité verte pour cent mille ruraux au Burkina Faso».
- [2] ARSE Burkina, «Burkina Faso - Assistance à la mise en place des conditions technico-économiques pour le soutien au développement de la filière photovoltaïque raccordée au réseau,» Ouagadougou, 2017.
- [4] System off grid, «Système photovoltaïque autonome : Couplage DC ou AC ?,» 2014.
- [5] Sonabel, «Rapport d'activié 2015,» Ouagadougou, 2016.

## Sites internet

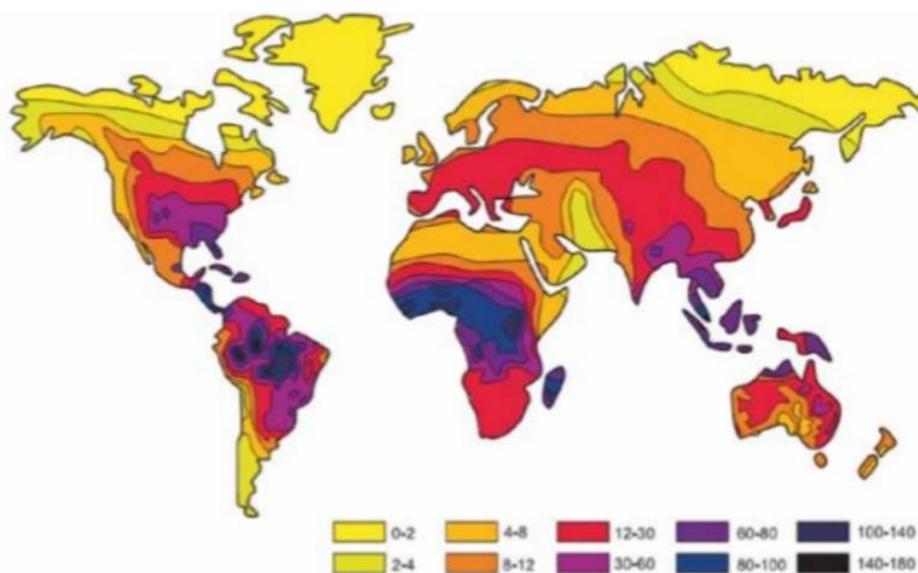
- [3] «Eolane Solar,» [En ligne]. Available: [www.eolane-solar.com/solutions-phtovoltaique-avec-batteires/](http://www.eolane-solar.com/solutions-phtovoltaique-avec-batteires/) . [Accès le 28 Novembre 2017].
- [6] Photovoltaïque guide, [En ligne]. Available: [www.photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr). [Accès le 17 Novembre 2017].
- [7] Slideshare, [En ligne]. Available: [www.fr.slideshare.net](http://www.fr.slideshare.net) . [Accès le 17 Novembre 2017].
- [8] Schneider-electric, [En ligne]. Available: [www.schneider-electric.fr](http://www.schneider-electric.fr) . [Accès le 17 Novembre 2017].
- [9] MPP Solar, [En ligne]. Available: <https://www.mppsolar.com>. [Accès le 07 Decembre 2017].

## Annexes

Annexe 1: Consommations mensuelles par type d'abonné

Mois	Consommation (kWh)			
	Ménage A (5 A)	Ménage B (5 A)	Ménage C (15 A)	Entreprise (30 A)
Janvier	84	NP	275	379
Février	106	129	228	395
Mars	88	158	219	1046
Avril	143	144	353	1802
Mai	128	141	NP	1678
Juin	137	140	482	886
Juillet	117	142	NP	1463
Août	119	175	NP	946
Septembre	139	152	NP	669
Octobre	111	175	447	1031
Novembre	111	152	475	797
Décembre	100	58	392	1014

Annexe 2: Carte kéraunique du monde [7]



Annexe 3: Protection contre les surtensions [6]

Caractéristique de l'installation	Nk ≤ 25		Nk > 25	
	Côté DC	Côté AC	Côté DC	Côté AC
Bâtiment ou structure équipé d'un paratonnerre	Obligatoire Type 2	Obligatoire Type 1 <sup>(1)</sup>	Obligatoire Type 2	Obligatoire Type 1 <sup>(1)</sup>
Alimentation BT par une ligne entièrement ou partiellement aérienne	Peu utile Type 2	Recommandé Type 2	Recommandé Type 2	Obligatoire Type 2 <sup>(2)</sup>
Alimentation BT par une ligne entièrement souterraine	Peu utile Type 2	Peu utile Type 2	Recommandé Type 2	Recommandé Type 2

Annexe 4: Irradiations moyennes (source PVsol)

Heure	Irradiation (kWh/m <sup>2</sup> )		
	22 Novembre	23 Novembre	29 Novembre
05:00	0	0	0
06:00	0,01065	0,00946	0,00875
07:00	0,20482	0,2038	0,20731
08:00	0,43127	0,42537	0,43989
09:00	0,63958	0,61905	0,64802
10:00	0,78664	0,76833	0,79647
11:00	0,87257	0,84151	0,8688
12:00	0,88733	0,86477	0,87202
13:00	0,81847	0,7697	0,80773
14:00	0,68375	0,62904	0,67432
15:00	0,48679	0,46016	0,47655
16:00	0,25497	0,23327	0,24806
17:00	0,02516	0,01913	0,0204
18:00	0	0	0

Annexe 5: Fiche technique de l'onduleur chargeur [9]

# HYBRID V SERIES

## Hybrid Solar Inverter

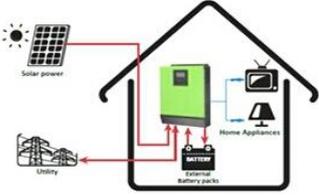


**MAIN FEATURES**

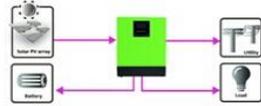
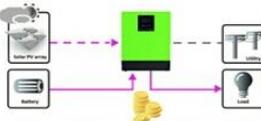
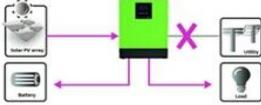
- Pure sine wave output 1-5KW
- Hybrid Mode, Off-Grid Mode available
- Max PV input power from 1 up to 6KW
- Max PV input volt 145V
- Max solar charging up to 80A (1-4KW), 120A (5kw)
- Dual MPPT tracker on 5KW model
- Parallel operation up to 6 units (48V models only)
- Selectable grid feedback range (2 modes)
- Timer charging control
- Supports generator use (grid-tie disabled)\*
- Programmable parameters
- Max up to 60A utility charging
- Wide AC input range
- Lightweight, easy to install
- FREE monitoring software
- LCD Display + LED indicators
- USB, RS232 communication interface

\*\*requires inverter-type generator of acceptable output quality

sales@mppsolar.com | www.mppsolar.com

### Three Major Operating Modes

- Feed-in to Grid + Load + Battery Charging**  
 With enough solar power, Hybrid V will convert solar power to power the load and charge the battery. The extra power will feed-in to Grid.
 
- Pay Less Electricity Bill**  
 With sufficient solar power Hybrid V will convert solar power and get the battery energy to power the load by disconnect Grid automatically. Reduce dependence on Grid and your electricity bill.
 
- Battery Backup when AC Fail**  
 If Grid is not available, Hybrid V will direct power the load from the solar power and the extra solar energy would be used to charge the battery.
 

HYBRID V SERIES	1012V	2024V	3048V	4048V	5048V
<b>STANDARD RATING</b>					
Continuous Output	1000W	2000W	3000W	4000W	5000W
System DC Volt	12V	24V	48V		
Parallel Ready	NO	No	Yes, up to 6 units max		
<b>PV INPUT / SOLAR CHARGING</b>					
Max PV Input Power	1000W	2000W	4000W	4000W	6000W
Max PV Input Volt	145VDC (open circuit Voc)				
MPPT Range	15 - 115VDC	30 - 115VDC	60 - 115VDC		
Number of PV Input	1	1	1	1	2
Max Charging Current	80A	80A	80A	80A	120A
<b>GRID TIE MODE</b>					
Nominal Output Volt	220/230/240VAC, Single Phase				
Feed-in Volt Range	184 - 264.5VAC				
Feed-in Volt Frequency	47.5 - 51.5Hz				
Max DC/AC Efficiency	>90%				
<b>OFF-GRID, HYBRID MODE</b>					
Output Waveform	Pure Sine Wave				
Nominal Output Volt	220/230/240VAC, Single Phase				
Frequency	50 / 60Hz, auto-sensing				
AC Input Transfer Relay	30A		40A		
Max Efficiency	>93%				
Max Utility Charging	60A				
Max Utility + Solar Charging	140A	140A	140A	140A	180A
<b>ENVIRONMENTAL / MECHANICAL SPECIFICATIONS</b>					
Communication Port	USB / Dry Contact		RS232 or USB / Dry Contact		
Operating Temp.	0 - 50°C				
Operating Humidity	0 - 90% RH (No Condensing)				
Dimension	440*300*100	440*300*100	468*295*120	468*295*120	483*295*190
Net Weight	8Kg	8Kg	11Kg	11Kg	16Kg

MPP Solar Inc. reserves the right to change product specification without notice. MPP Solar is a registered trademark.



Buying Solar should be this easy