



**OPTIMISATION D'UN GENERATEUR HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE AVEC  
STOCKAGE SUR BATTERIE LITHIUM ION POUR SITE ISOLE OU CONNECTE  
AU RESEAU ELECTRIQUE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER D'INGENIERIE  
OPTION : Génie Energétique**

Présenté et soutenu publiquement le [16/10/2013 ] par

**Gabin Adantchédé KOUCOÏ**

**Travaux dirigés par : Dr Yao AZOUMAH (HDR)**  
Directeur du Centre Commun de Recherche et Energie  
et Habitats Durables (CCREHD/Fondation 2iE)

Et

**Ing Yannick BARAT**  
Chargé d'affaire Automatismes à SIREA-France

**Jury d'évaluation du stage :**

Président : **Dr Marie SAWADOGO**

Membres et correcteurs : **Dr Daniel YAMEGUEU**  
**Dr Moussa SORO**

**Promotion [2012/2013]**

***DEDICACES***

*A celui qui était, qui est et qui vient.....*

*A mon père Abel KOUCOÏ et à ma mère Edith DOSSOU pour leurs soutiens inconditionnels.*

*A mes frères et sœurs pour leurs encouragements.*

**REMERCIEMENTS**

*En premier lieu, je tiens à remercier particulièrement Mr **Bruno BOUTEILLE PDG de SIREA**, pour m'avoir accueilli ses 06 mois au sein de son entreprise à Castres en France, pour ses conseils et son soutien apportés tout au long du stage.*

*Ma reconnaissance et mes remerciements à **Yannick BARAT**, mon maître de stage pour avoir supervisé mes travaux ; ses conseils, son expérience et son savoir-faire m'ont permis de découvrir de nombreuses facettes des métiers d'ingénieur.*

*Je remercie toute l'équipe d'ingénieurs, de techniciens et d'administratifs de SIREA qui s'est toujours montrée disponible pour répondre à mes questions tout au long de mon stage. Ils m'ont apporté de nombreuses connaissances dans leur domaine de compétence.*

*Je tiens à remercier également **Prof. Yao AZOUMAH** : Directeur du "Centre Commun de Recherche Energie et Habitats Durables"- Fondation 2iE qui par la qualité de ses enseignements m'a insufflé le goût de l'ingénierie et de la recherche, l'expertise que requiert notre métier et la foi en nos capacités.*

*Enfin, Je ne saurais terminer sans avoir une pensée affectueuse à l'endroit de toute la promotion **Master d'ingénierie 2012-2013 du 2iE** et en particuliers les collègues énergéticiens, ces quelques années nous auront permis de fraterniser pour la vie.*

*Que tous ceux qui m'auront soutenu de près ou de loin trouvent en ces quelques mots, l'expression de mes sincères remerciements.*

**RESUME/ABSTRACT**

**RESUME**

Ce mémoire porte sur l'optimisation de générateurs hybrides photovoltaïques autonomes installé sur site isolé ou connecté au réseau électrique conçus à partir des alimentations électriques autonomes (AEA-SIREA). La première partie de l'étude a été consacrée à la caractérisation des batteries de type lithium ion utilisées comme dispositif de stockage au sein du système. Ainsi, seul le calcul instantané du **SOC** de la batterie permet un contrôle optimal de son état de charge et de décharge. La seconde partie entrant dans le cadre d'un projet d'installation de deux générateurs hybrides, l'un connecté au réseau électrique et l'autre en mode autonome connecté à un groupe électrogène a permis d'apporter des solutions d'optimisation à la gestion de flux d'énergie au sein de chaque générateur .

Un outil automatisé de simulation de charge a été également conçu afin de favoriser le pilotage des charges électriques du consommateur en fonction de ses besoins et de l'énergie disponible. Enfin, pour faciliter une meilleure exploitation de ces générateurs pour les utilisateurs, un système de supervision à distance a été mis en place.

**Mots-Clés:** Générateur hybride PV- Batterie Li ion – Automatisme – Supervision

**ABSTRACT**

This master thesis is based on the optimization of hybrid photovoltaic generators which can either be installed on stand-alone or connected to electrical grid designed from hybrid autonomous power supplies (AEA-SIREA). The first part of the study was dedicated to the characterization of lithium ion batteries used as a storage device. Thus, only the instantaneous calculation of the SOC of the battery enables an optimum control of its charging and discharging status. The second step within the framework of installation project of two (02) hybrids generators, one connected to the electrical grid and the other connected to a generator in stand-alone mode, has provided solutions for the optimization of energy flows management inside each generator. An automated load simulation tool was also designed to favour the control of the consumer's electrical charges according to its needs and its energy availability. Finally, to facilitate a better supervision of these generators by users, a remote monitoring system has been implemented.

**Key words:**

Hybrid Power Photovoltaic – Battery Li ion – Programmable logic controller – Monitoring

**LISTE DES FIGURES**

<i>Figure 1: Système PV raccordé au réseau avec vente du surplus de production PV</i> .....	5
<i>Figure 2: Système PV raccordé au réseau avec vente de la totalité de production PV</i> .....	6
<i>Figure 3: Performances de différents accumulateurs électrochimiques</i> .....	8
<i>Figure 4: Alimentation électrique autonome (AEA-SIREA)</i> .....	11
<i>Figure 5: Transducteurs de mesure SIREA</i> .....	14
<i>Figure 6: Automate gestionnaire d'énergie de l'AEA</i> .....	15
<i>Figure 7: Synoptique de l'alimentation électrique autonome</i> .....	15
<i>Figure 8: Configuration de la batterie Lithium ion</i> .....	16
<i>Figure 9: Evolution de la tension et du courant de charge de la batterie</i> .....	17
<i>Figure 10: Evolution du SOC batterie et du courant de charge de la batterie(a) et Evolution de la tension et du SOC batterie (b) en charge</i> .....	18
<i>Figure 11: Tension aux bornes de la batterie et du courant de charge à 12 A</i> .....	19
<i>Figure 12: Evolution du SOC batterie et du courant de charge (a) et Evolution de la tension aux bornes de la batterie et du SOC de la batterie à 12A</i> .....	19
<i>Figure 13: Tension aux bornes de la batterie en fonction du DOD à différentes régimes de décharges</i> .....	20
<i>Figure 14: Evolution de la tension de la batterie à différents courants de décharge</i> .....	20
<i>Figure 15: Seuils et plages de fonctionnement de la batterie</i> .....	22
<i>Figure 16: Générateur hybride connecté au réseau à Rancharia</i> .....	24
<i>Figure 17: Générateur hybride connecté au GE à Rio Branco</i> .....	24
<i>Figure 18: Courbe de la consommation spécifique d'un GE en fonction de la puissance nominale</i> .....	26
<i>Figure 19: Fonctionnement en sous charge du groupe électrogène</i> .....	26
<i>Figure 20: Fonctionnement en surcharge du groupe électrogène</i> .....	27
<i>Figure 21: Régulation du courant de charge maximal de la batterie</i> .....	28
<i>Figure 22: Organigramme de la simulation horaire</i> .....	29
<i>Figure 23: Automate "Esclave" (<math>\mu</math>ArmA4)</i> .....	30
<i>Figure 24: Architecture du simulateur de charge au sein du générateur hybride</i> .....	31
<i>Figure 25: Connexion de l'automate simulateur de charge sur la liaison Modbus de l'AEA</i> ..	31
<i>Figure 26: Principe d'exécution du script d'écriture des bits de commande</i> .....	32
<i>Figure 27: Architecture globale du système de supervision</i> .....	33
<i>Figure 28: Page d'accueil du poste de supervision</i> .....	37
<i>Figure 29: Page synoptique du générateur du site de Rio Branco</i> .....	37

Figure 30: Courbe de puissance PV visualisée par  $\mu$ Server pour le site de Rio Branco ..... 38

Figure 31: Courbe du SOC batterie visualisée par  $\mu$ Server pour le site de Rio Branco..... 39

### **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Comparaison des caractéristiques des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques..... 8

Tableau 2: Caractéristiques de l'automate " $\mu$ ArmA2" de l'AEA ..... 15

Tableau 3: Caractéristiques de la batterie Lithium ion de 1,3kW ..... 16

Tableau 4: Caractéristique de l'automate simulateur de charge électrique ..... 30

Tableau 5: Caractéristiques de la passerelle de communication " $\mu$ NPE" ..... 34

### **LISTE DES ABREVIATIONS**

**SIREA:** Solution, Ingénierie, Réalisation, Electricité et Automatismes

**AEA:** Alimentation Electrique Autonome

**SOC:** State Of Charge

**DOD:** Depth of discharge

**PV :** Photovoltaïque

**GE :** Groupe électrogène

**IP :** Internet Protocol

**GPRS:** General Packet Radio Service

**GSM:** Global System for Mobile

**SOMMAIRE**

<b>DEDICACES</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUME/ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>v</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>I. GENERALITES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>4</b>
1. Les systèmes solaires photovoltaïques .....	4
1.1. Les systèmes photovoltaïques en site isolé.....	4
1.2. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique .....	4
2. Technologies de stockage électrochimique d'énergie électrique.....	6
2.1. Principe de fonctionnement des batteries d'accumulateurs électrochimiques.....	7
2.2. Grandeurs caractéristiques des batteries d'accumulateurs .....	7
2.3. Différentes technologies de batterie d'accumulateurs électrochimiques .....	7
2.4. Technique de contrôle de l'état de charge des batteries électrochimiques .....	8
3. Synthèse bibliographique .....	9
<b>II. L'ALIMENTATION ELECTRIQUE AUTONOME (AEA-SIREA)</b> .....	<b>11</b>
1. Présentation de l'alimentation électrique autonome .....	11
2. Différents mode de fonctionnement d'une alimentation électrique autonome.....	12
3. Description des éléments d'une alimentation électrique autonome (AEA).....	13
3.1. Onduleur chargeur hybride .....	13
3.2. Batteries d'accumulateurs électrochimiques .....	13
3.3. Dispositifs de protection .....	13
3.4. Système de mesure des grandeurs électriques de l'AEA .....	14
3.5. Automate programmable industriel "µArm A2" de l'AEA.....	14

<b>III. ETUDE CARACTERISTIQUE DE LA BATTERIE LITHIUM ION .....</b>	<b>16</b>
1. Objectifs .....	16
2. Mode opératoire .....	16
3. Résultats des expérimentations .....	17
3.1. Courbes de charges à différents régimes .....	17
3.2. Courbes de décharge de la batterie .....	20
4. Discussions et conclusions .....	21
<b>IV. PROJET D'INSTALLATION DE 02 GENERATEURS HYBRIDES AU BRESIL ...</b>	<b>24</b>
4.1. Mesures d'optimisation apportées à chaque générateur hybride .....	24
4.1.1. Générateur hybride de Rancharia en mode "Réseau-Vente Surplus PV" .....	24
4.1.2. Générateur hybride de Rio Branco connecté au groupe électrogène .....	25
4.2. Conception d'un simulateur de charges électriques .....	29
4.2.1. Objectifs .....	29
4.2.2. Automate de pilotage du simulateur de charge électrique .....	30
4.2.3. Programme du simulateur de charge électrique .....	32
4.3. Système de supervision à distance des deux générateurs hybrides .....	33
4.3.1. Principe .....	33
4.3.2. Architecture du système de supervision des générateurs .....	33
4.3.3. Equipements du système de supervision des générateurs .....	34
4.3.4. Pages synoptique de l'interface de supervision des générateurs hybrides .....	37
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>41</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>43</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **1. Contexte de l'étude**

Les énergies renouvelables apparaissent de nos jours comme une des solutions aux problèmes d'énergie tant pour les pays développés que pour ceux en voie de développement. Dans les pays développés, le coût de l'énergie ne cesse de croître en même temps que les incitations fiscales favorisant le développement des énergies renouvelables. L'évolution des réseaux électriques (Smart Grids) et des offres tarifaires des fournisseurs (tarifs modulés en fonction de la consommation) incitent aussi les consommateurs à mieux gérer leurs consommations électriques les incitant à optimiser leurs dépenses d'énergies.

En Afrique, l'accès à l'électricité est un problème majeur qui freine considérablement son développement. C'est le cas particulier de l'Afrique subsaharienne où la situation apparaît plus catastrophique en zones rurales surtout où juste 12% de ces populations ont accès à l'énergie électrique[4]. Toutefois, l'électrification de ces régions par une extension du réseau électrique est en effet difficile voire impossible. Ceci est dû à la grande dispersion démographique de ces populations et à l'investissement encore très coûteux dans le transport et la distribution de cette énergie issue de centrales thermiques alimentées par les énergies fossiles. Le coût de l'énergie produite à partir de ces centrales est ainsi tributaire du coût des hydrocarbures qui ne cesse de croître sans oublier l'émission de gaz à effet de serre due à l'utilisation de ses hydrocarbures.

Paradoxalement, l'Afrique subsaharienne dispose d'un fort potentiel solaire allant de **4 à 6 kWh/m<sup>2</sup>/j** peu ou presque pas exploité[15]. Le développement de ce potentiel énergétique à travers le photovoltaïque permettra sans doute à ces pays d'accélérer leur développement économique.

Face à ces enjeux et dans le but de délivrer une énergie fiable, d'assurer une autonomie énergétique aux consommateurs et d'accroître le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque, SIREA a développé une **Alimentation Electrique Autonome (AEA)** qui connecté à une source d'énergie photovoltaïque et une source conventionnelle (Réseau /GE) est utilisée comme générateur hybride.

Ainsi, une optimisation de la gestion d'énergie au sein de ce générateur permettra d'améliorer ses performances, d'accroître son autonomie et de faciliter son pilotage et son exploitation à distance.

## **2. Objectifs de l'étude**

L'objectif général visé par notre étude est de contribuer à la gestion et à l'exploitation optimale de ce générateur hybride photovoltaïque destiné à alimenter en énergie électrique aussi bien les sites isolés que ceux connectés au réseau électrique.

Plus spécifiquement il s'agira :

- de caractériser la batterie lithium ion utilisée pour le stockage d'énergie ;
- d'optimiser la gestion des flux d'énergie au sein du générateur hybride ;
- de faciliter son exploitation à distance.

## **3. Méthodologie**

Pour atteindre les objectifs fixés, nous avons adopté la démarche suivante :

- Etude bibliographique sur les systèmes photovoltaïques en site isolé et connectés au réseau électrique et sur les différentes technologies de stockage électrochimique de l'énergie électrique ;
- Réalisation des tests de charge et de décharge sur la batterie lithium ion ;
- Proposition de mesures d'optimisation du gestionnaire d'énergie de deux générateurs hybrides ;
- Conception d'un outil automatisé pour le pilotage des charges électriques du consommateur alimenté par ce générateur hybride ;
- Mise en place d'un système de supervision à distance de ces générateurs hybrides PV.

#### **4. Présentation de l'entreprise**

**SIREA** ; Solution, Ingénierie, Réalisation Electrique et Automatismes est une entreprise créée en 1994 et reconnue pour son expertise technique et son savoir-faire dans les domaines de l'automatisme, de l'électronique, de l'informatique industrielle et de l'électricité. Elle conçoit et fabrique ses automates et cartes électroniques pour les applications dans ces domaines.

Localisée à CASTRES en France, elle se décline sous cinq (05) branches d'activités à savoir :

- **SIREA Energie** : Etude, réalisation, contrôle commande et supervision en local et à distance des systèmes énergétiques via les logiciels  $\mu$ Server et  $\mu$ View;
- **SIREA Industrie** : Etudes et réalisations électriques industrielles, poste de transformation HT/BT ; armoires de distributions, audit, contrôle et maintenance d'installation ;
- **SIREA Santé** : Contrôle et télégestion des fluides médicaux ;
- **SIREA Carrière** : Automatisation, électrification et exploitation de gravières et de carrières ;
- **SIREA Eau et environnement** : Télé-contrôle et surveillance des réseaux d'irrigation et d'assainissement ainsi que des équipements de traitement d'eau.

**SIREA** bénéficie d'un haut niveau de compétences, son équipe composée en majorité d'ingénieurs et de techniciens fortement expérimentés par de longues années d'expériences.

## **I. GENERALITES BIBLIOGRAPHIQUES**

Afin de mieux appréhender le fonctionnement du générateur photovoltaïque hybride qui fera l'objet de ce mémoire, une étude bibliographique sur les différentes configurations de systèmes solaires photovoltaïques et sur les technologies de stockages électrochimiques sera succinctement présentée dans cette partie.

### **1. Les systèmes solaires photovoltaïques**

Plusieurs typologies de systèmes solaires photovoltaïques existent de nos jours un peu partout dans le monde. Elles sont généralement classées en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.[3]

- **les systèmes photovoltaïques en site isolé (Stand-Alone)**
- **les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique (Grid-connected).**

#### **1.1. Les systèmes photovoltaïques en site isolé**

On distingue deux types de systèmes PV en site isolé.

- ❖ Si l'énergie photovoltaïque est l'unique source d'énergie du système, on parle de **système PV autonome**.
- ❖ Si une autre source de production de nature conventionnelle est utilisée en appui de la production PV, on parle de **système PV autonome hybride**.

Ces systèmes PV sont principalement utilisés dans les régions où le réseau électrique est très peu dense ou quasi inexistant en raison des coûts de raccordement prohibitifs. Ils sont conçus pour répondre aux besoins de consommation des habitations isolées du réseau électrique : les refuges de montagne, les îles, les villages isolés, les relais de télécommunication où l'énergie produite est consommée sur place.

Un dispositif de stockage est souvent ajouté. L'idée étant de faire appel à l'énergie de cette source lorsque le système n'est plus en mesure de subvenir aux besoins du consommateur et/ou que l'état de charge de l'accumulateur est trop faible. [3]

#### **1.2. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique**

Dans ces types systèmes PV, le générateur photovoltaïque est connecté à un réseau de distribution d'énergie électrique. La production d'énergie photovoltaïque peut être injectée sur le réseau électrique et de même le réseau électrique fournit l'énergie électrique à la charge lorsque la production photovoltaïque devient insuffisante pour alimenter la charge.

Ainsi on distingue trois catégories de systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.

### **1.2.1. Système PV raccordé au réseau sans injection (Auto Consommation)**

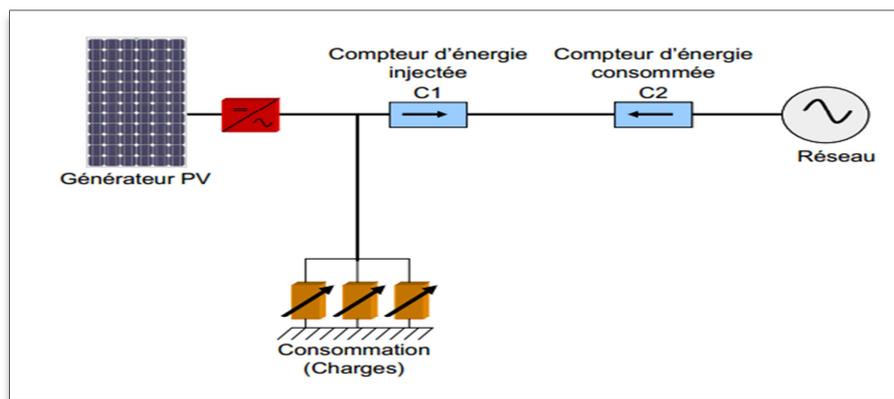
Dans ce type de système, toute la production PV est utilisée pour alimenter les charges et le réseau électrique est utilisé en appoint pour combler le déficit en surconsommation.

La présence d'un dispositif de stockage d'énergie permettra au mieux d'utiliser l'énergie PV produite en la stockant aux heures de fortes productions.

### **1.2.2. Système PV raccordé au réseau avec injection du surplus de production PV**

L'énergie produite par le générateur est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production PV par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau électrique[6]. Deux (02) compteurs d'énergie sont utilisés :

- un compteur pour comptabiliser l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (EDF par exemple) et
- un second compteur pour mesurer l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production PV dépasse la consommation. [6]

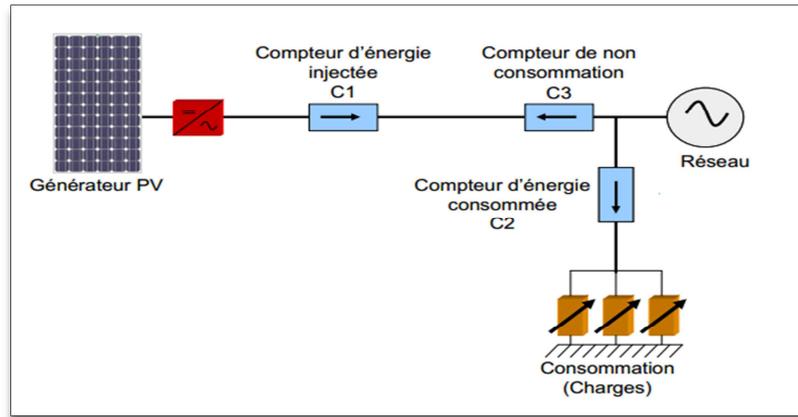


**Figure 1: Système PV raccordé au réseau avec vente du surplus de production PV**

### **1.2.3. Système PV raccordé au réseau avec injection de la totalité de la production PV**

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Dans cette configuration, trois (03) compteurs d'énergie sont installés :

- Un compteur d'énergie produite par le consommateur ;
- Un compteur d'énergie pour comptabiliser l'énergie achetée par le consommateur au fournisseur ;
- Un compteur de non consommation afin que le fournisseur d'énergie s'assure que le client ne consomme pas l'énergie PV produite. [6]



**Figure 2: Système PV raccordé au réseau avec vente de la totalité de production PV**

Néanmoins, les installations PV raccordées au réseau aussi présentes des limites à savoir:

- L'intermittence de la production d'énergie solaire qui ne permet pas le contrôle des périodes d'injections ;
- Le flux d'énergie dans sur les lignes électriques lors de l'injection qui peut provoquer des surtensions et engendrer d'importants dégradations du réseau. [6]

Ainsi quel que soit le type de système photovoltaïque, un dispositif de stockage est souvent utilisée afin d'assurer une continuité d'alimentation des charges en mauvais temps d'ensoleillement ou en défaillance du réseau électrique.

La partie suivante est consacrée à la description des accumulateurs électrochimiques. Une présentation du fonctionnement de ces accumulateurs électrochimiques sera faite, puis on définira les principales grandeurs caractéristiques des différentes technologies de batteries ainsi que leurs performances comparées et enfin les différentes méthodes de contrôle de leur état de charge.

## **2. Technologies de stockage électrochimique d'énergie électrique**

Dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes, en particulier les systèmes photovoltaïques, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie afin de lisser la production à la consommation. [9]

Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à confiner, telle l'énergie chimique par exemple. Le stockage électrochimique est largement employé dans les applications solaires photovoltaïques. Après un bref rappel du fonctionnement de ce type de stockage, nous détaillerons les principales caractéristiques des différentes technologies.

### **2.1. Principe de fonctionnement des batteries d'accumulateurs électrochimiques**

Une **batterie** est un ensemble d'accumulateurs placés en série, qui stocke de l'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer en fonction du besoin.

En charge, l'énergie électrique est convertie et stockée sous forme d'énergie chimique, via des réactions d'oxydoréduction. La batterie d'accumulateur se comporte ainsi comme un récepteur. Lorsque la batterie fonctionne en mode générateur, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique. [10]

### **2.2. Grandeurs caractéristiques des batteries d'accumulateurs**

Une batterie d'accumulateur électrochimique est principalement caractérisée par :

- ✓ Sa **densité d'énergie massique** (énergie spécifique), en **Wh/kg** correspondant à la quantité d'énergie stockée par unité de masse d'accumulateur.
- ✓ Sa **densité de puissance massique** (W/kg).
- ✓ Sa **capacité** qui représente la quantité d'électricité (**en Ah**) délivrée au cours d'une décharge complète.
- ✓ Sa **durée de vie** exprimée en nombre de cycle (nombre de cycles charge/décharge). [10]

### **2.3. Différentes technologies de batterie d'accumulateurs électrochimiques**

Les technologies de batteries d'accumulateurs sont très diversifiées. On peut citer les principaux types :

- **Les accumulateurs au plomb**
- **Les accumulateurs au Nickel-Cadmium**
- **Les accumulateurs au Nickel-Métal Hydrure**
- **Les accumulateurs au Lithium ion**

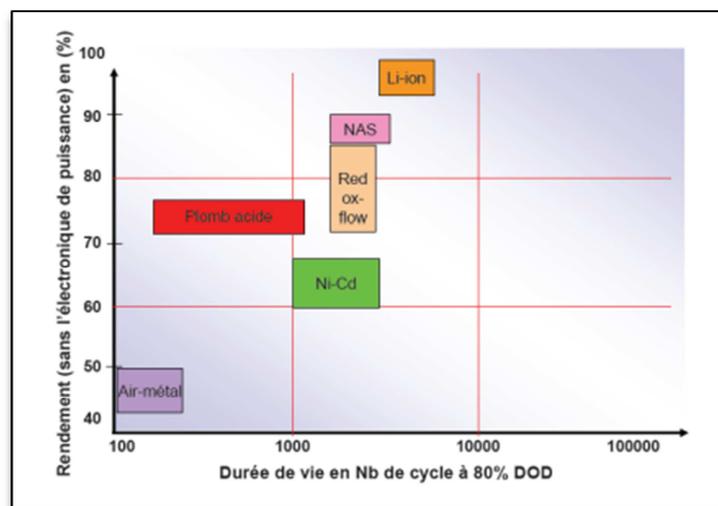
Le choix d'une technologie d'accumulateur dépend principalement du coût d'investissement (Euro/kWh) et de la durée de vie des batteries dans les conditions de fonctionnement correspondant à l'application choisie. [10]

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de ces différentes technologies de batteries d'accumulateurs. [7]

**Tableau 1: Comparaison des caractéristiques des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques**

Technologies d'accumulateurs électrochimiques	Energie spécifique (Wh.kg <sup>-1</sup> )	Rendement énergétique (%)	Plage d'utilisation en température	Profondeur de décharge tolérée (DOD)	Durée de vie (Nombre de cycles)	Coût (€.kWh <sup>-1</sup> )
Plomb (Pb)	30-40	> 80	-20°C à 50°C	50%	400-600	150-250
Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	45-80	75	-40°C à 60°C	75%	800	600
Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)	60-90	75	-20°C à 60°C	75%	750-1000	500-1000
Lithium ion (Li-ion)	120-200	>90	-20°C à 60°C	80%	>1500	1000-2000

La figure ci-dessous illustre encore plus clairement les performances énergétiques des batteries lithium ion comparées aux autres technologies.



**Figure 3: Performances de différents accumulateurs électrochimiques**

Les principaux avantages et inconvénients de chacune des technologies sont présentés en annexe 1.

#### 2.4. Technique de contrôle de l'état de charge des batteries électrochimiques

Les batteries d'accumulateurs électrochimiques sont les éléments les plus sensibles dans les systèmes solaires PV autonomes et représentent souvent plus de 40% de l'investissement dans

ces systèmes. Une longévité raisonnable n'est atteinte que pour une régulation et un contrôle rigoureux de son état de charge.

En effet, plusieurs techniques de régulation et de contrôle de l'état de charge ont été développées [8] à savoir :

- **La méthode de mesure de la tension à vide de la batterie**
- **La méthode coulombmétrique**

#### ***2.4.1. Méthode de mesure de la tension à vide de la batterie***

Cette méthode, la plus simple et la plus répandue consiste à utiliser la mesure de la tension aux bornes de la batterie à vide. Une tension de fin de charge fixe est ainsi définie. Lorsque cette tension est atteinte, le chargement de la batterie est terminé. Un seuil de décharge profonde fixe est également défini. Le consommateur est déconnecté lorsque la tension de la batterie passe en dessous de cette valeur. Cette méthode est certes simple parce qu'il est facile de mesurer avec précision la tension de la batterie. En revanche, elle ne convient pas à la plupart des types de batterie dont l'état de charge ne varie pas en fonction de la tension. Elle est souvent utilisée pour déterminer l'état de charge des batteries plomb car leur tension à vide en est le reflet. [8]

#### ***2.4.2. Méthode coulombmétrique***

Cette méthode considère que l'état de charge d'une batterie "SOC" est le rapport entre la quantité d'énergie disponible et la capacité maximale de la batterie. Ainsi ce calcul est effectué à partir des valeurs d'énergies mesurées sur le système.

**SOC** ou « **State of Charge** » souvent exprimé en pourcentage(%), désigne l'état de charge instantané de la batterie. Il représente le rapport de l'énergie disponible dans la batterie sur l'énergie totale de la batterie.

$$\text{SOC}_{\text{Batterie}} = \frac{\text{Energie diponible dans la batterie}}{\text{Energie maximale de la batterie}}$$

Un **SOC** de **100 %** correspond à une batterie totalement chargée. Sa valeur la plus basse admise varie entre **50% et 20 %** selon la technologie de batterie utilisée afin d'éviter des décharges profondes à la batterie. [8]

### ***3. Synthèse bibliographique***

Après avoir fait une étude bibliographique des systèmes de production et de stockage de l'énergie d'origine photovoltaïque, il apparaît que l'utilisation de l'énergie solaire

photovoltaïque disponible gratuitement et inépuisable à notre échelle temporelle mixée à d'autres sources d'énergies conventionnelles permettrait de répondre au défi énergétique actuel avec un moindre impact sur notre écosystème pour un utilisateur en site isolé ou connecté au réseau électrique.

Pour un besoin de stockage d'énergie, la technologie des accumulateurs lithium ion pourrait être envisagée. Elle s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse de la technologie Plomb qui est restée la plus utilisée de nos jours vue sa maturité et son coût assez bas. La durée de vie et le rendement de ces batteries Li ion sont les meilleurs parmi les différents accumulateurs électrochimiques. Son coût encore élevé par rapport à la technologie Plomb sera rapidement amorti sur sa durée de vie qui reste très élevée par rapport autres technologies.

## **II. L'ALIMENTATION ELECTRIQUE AUTONOME (AEA-SIREA)**

### **1. Présentation de l'alimentation électrique autonome**

L'Alimentation Electrique Autonome développée par **SIREA** est une armoire électrique conçue pour délivrer une alimentation électrique fiabilisée à partir de sources d'énergies d'origine renouvelables (Photovoltaïque) et conventionnelles (Groupe électrogène pour les sites isolés et le réseau électrique pour les sites connectés).

Il est mixé d'un stockage énergétique sur des batteries lithium pilotables par un automate programmable industriel intégré. Ainsi une fois qu'elle est connectée aux sources d'énergie on nomme le système énergétique ainsi réalisé générateur électrique autonome hybride.



**Figure 4: Alimentation électrique autonome (AEA-SIREA)**

SIREA propose deux principales gammes d'alimentation électrique autonome à savoir :

- La gamme d'AEA constituée principalement de modules de 3 kW de puissances. L'association de modules de 3 kW grâce à l'adjonction d'un module de couplage permet de fournir une alimentation électrique en **230VAC/50Hz monophasé** avec des puissances de 6kW et 9kW.
- La gamme d'AEA également composée de modules de **3 kW associables** entre eux grâce à un module de couplage permet de délivrer une alimentation électrique en **400VAC/50Hz triphasée** avec ou sans neutre pour des puissances de **6kW et 9kW**.

La gamme d'alimentation électrique autonome de **3kW en monophasé** qui fera l'objet de notre étude est habituellement employée pour des utilisations aussi bien en sites isolés ou mal desservies qu'en sites connectés au réseau électrique. Son alimentation nécessite juste un raccordement du **champ PV** et du **groupe électrogène** pour les sites isolés ou d'un raccordement **réseau** pour les sites connectés au réseau.

## **2. Différents modes de fonctionnement d'une alimentation électrique autonome**

Cette alimentation présente quatre modes de fonctionnement qui regroupent toutes les configurations de système photovoltaïques existantes de nos jours.

### **2.1.1. Mode "Réseau- Autonome"**

Ce mode de fonctionnement permet de se connecter au réseau sans possibilité de vente de l'énergie photovoltaïque produite. Il autorise prioritairement l'alimentation des charges électriques de l'utilisateur à partir de la production PV et/ou des batteries.

La charge de la batterie qui est effectuée par la source photovoltaïque se fait en permanence. Le réseau électrique est utilisé comme une source d'appoint pour charger les batteries à état de charge bas.

### **2.1.2. Mode "Réseau - Vente surplus de la production PV"**

Cette configuration priorise l'alimentation du consommateur c'est-à-dire ses charges électriques par la production photovoltaïque. Lorsque la production PV est supérieure à la consommation électrique, une partie permet de charger les batteries et l'éventuel surplus PV est injecté dans le réseau électrique.

Le soutirage d'énergie du réseau est effectué pour charger les batteries lorsqu'elles atteignent un état de charge bas.

### **2.1.3. Mode "Réseau - Vente totalité de la production PV"**

Pour ce mode de fonctionnement, la consommation d'énergie électrique à partir du système est interdite ( $P_{consommée} = 0 W$ ). En présence de tension réseau, l'AEA injecte toute la production PV dans le réseau électrique. Une partie de la production peut servir à charger les batteries. Le soutirage d'énergie depuis le réseau électrique est effectué quand la batterie atteint un niveau de charge bas.

### **2.1.4. Mode "Groupe électrogène"**

Cette option est utilisée pour les sites isolés utilisant généralement un groupe électrogène comme source d'énergie conventionnelle. Le groupe électrogène est utilisé pour charger les batteries lorsqu'elles atteignent un niveau de charge bas.

Ainsi cette alimentation électrique autonome, une fois connectée aux sources d'énergie intègre toutes les configurations existantes de systèmes solaires photovoltaïques. Elle satisfait aux besoins de tous types d'utilisation quelques soient la situation géographique.

Ces différents modes de fonctionnement décrits sont pilotés au sein de l'AEA grâce à différents équipements dont leur description fera l'objet de la suite de cette partie.

### ***3. Description des éléments d'une alimentation électrique autonome (AEA)***

Comme toutes les gammes d'AEA développées, une alimentation électrique autonome est composée comme suit :

#### ***3.1. Onduleur chargeur hybride***

Il assure la conversion de l'énergie électrique entre les différentes sources d'énergie.

Cet onduleur fait office de bloc d'aiguillage de puissance entre l'énergie photovoltaïque, la source d'appoint (Groupe électrogène ou Réseau électrique), la batterie et la consommation. Il est intégré de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de faire fonctionner le générateur PV au point optimal dans les conditions météorologiques et de charge stable. Il assure également la fonction du régulateur pour la charge et la décharge des batteries.

#### ***3.2. Batteries d'accumulateurs électrochimiques***

Pour le stockage d'énergie dans cette alimentation électrique, la technologie d'accumulateurs électrochimiques utilisés est celle des **Lithium ion** dû à leurs hautes performances énergétiques présentées plus haut.

La capacité du dispositif de stockage varie en fonction du temps d'autonomie spécifique à chaque consommateur. Les capacités de stockage proposées sont de **2,7 kWh ; 5,4 kWh à 10kWh**. Un contrôle et un suivi des niveaux de charge et de décharge sont effectués instantanément afin de garantir un bon fonctionnement des batteries qui constituent l'un des composants les plus sensibles du système.

#### ***3.3. Dispositifs de protection***

Afin d'assurer la protection des personnes et des biens et dans le souci de respecter les normes de sécurité dans les installations électriques et surtout photovoltaïque, l'AEA dispose des dispositifs de protection à savoir :

- Disjoncteurs
- Des fusibles
- Des parafoudres DC et AC
- Un sectionneur servant de coupure d'urgence pour isoler toute l'alimentation en cas de danger.

Il faut ajouter que tous les équipements de l'AEA sont mis à la terre.

### **3.4. Système de mesure des grandeurs électriques de l'AEA**

La mesure des grandeurs énergétiques (Tension, courant, puissance active et réactive, facteur de puissance, énergie etc. ....) au sein du système est effectuée par les **transducteurs de mesure** de type multi-paramètres (AC ou DC) développés par SIREA.

Ils délivrent en sortie des valeurs numériques proportionnelles aux grandeurs mesurées sur un bus de communication de type “**Modbus RS485/RS432**”.

Chaque transducteur de mesure est configuré avec un numéro d'esclave représentant les différentes sources et la consommation comme détaillés ci-dessous.

- **Transducteurs Production PV**
- **Transducteurs Réseau/GE**
- **Transducteurs Consommation**
- **Transducteurs Batterie**



*Figure 5: Transducteurs de mesure SIREA*

Ils sont reliés sur ce bus de communication avec un automate “Maître” qui fait office de gestionnaire d'énergie du système. Les caractéristiques de ces transducteurs de mesure sont présentées en **annexe 3**.

### **3.5. Automate programmable industriel “ $\mu$ Arm A2” de l'AEA**

Un automate programmable industriel appelé “ **$\mu$ Arm A2**” fabriqué par **SIREA** définit comme “Automate Maître” au sein de l'alimentation assure :

- La lecture et la mise à l'échelle des mesures effectuées par les transducteurs l'affichage des mesures sous forme de courbes sur son écran IHM intégré.
- la commande et le pilotage des différents équipements grâce à son programme.
- la gestion des défauts de fonctionnement et communication de l'AEA
- L'historisation sur carte SD des données de l'alimentation.

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.

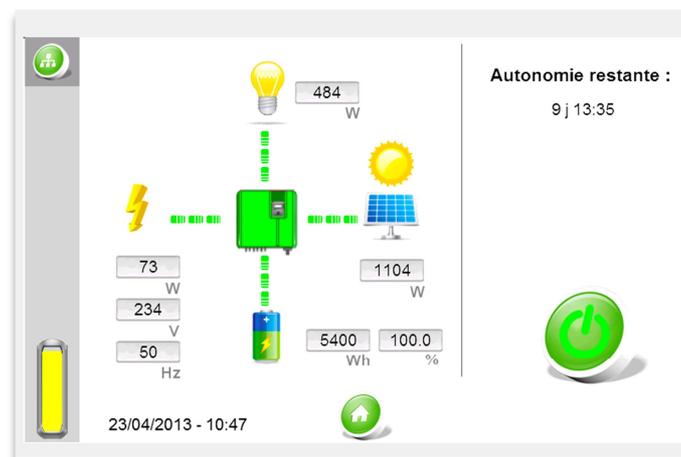
**Tableau 2: Caractéristiques de l'automate "µArmA2" de l'AEA**

Port de communication	2 ports RS232 ; 2 ports RS485 1 port USB ; 1 port Ethernet
Entrées	20 Entrées logiques 8 Entrées analogiques 0-10V 0-20 mA ou PT100
Sorties	16 sorties logiques à relais 2 sorties logiques à transistor 2 sorties analogiques 0-10V
Alimentation	24 VCC
Affichage	Ecran tactile



*Figure 6: Automate gestionnaire d'énergie de l'AEA*

La figure ci-dessous présente le synoptique de fonctionnement de l'AEA tel qu'il s'affiche sur l'écran IHM de l'automate 'µArmA2'.



**Figure 7: Synoptique de l'alimentation électrique autonome**

Cette description de l'alimentation électrique autonome hybride SIREA nous permet de comprendre l'architecture de cette alimentation, ces différents équipements constitutifs et leur rôle ainsi que les différents modes de fonctionnement qu'offrent cette alimentation électrique aussi bien pour un utilisateur en site isolé que connecté au réseau électrique. La partie suivante est consacrée à l'étude expérimentale du fonctionnement des batteries de type lithium ion en charge et en décharge au sein de l'AEA.

### **III. ETUDE CARACTERISTIQUE DE LA BATTERIE LITHIUM ION**

#### **1. Objectifs**

L'alimentation électrique autonome (AEA-SIREA) comporte une batterie d'accumulateurs électrochimiques de type lithium ion qui assure le stockage d'énergie au sein du système et permettent pour subvenir aux besoins énergétiques pendant les horaires sans ensoleillement et de mauvaises conditions climatiques.

Cette batterie d'accumulateurs reste l'élément le plus sensible du système. Sa durée de vie est étroitement liée à ses cycles de charge et décharge[9]. Vu cette importance, et face à l'absence de données expérimentales de la part des fabricants sur ces types de batteries, nous avons décidé d'effectuer des tests de charge et de décharge sur celle choisie afin de mieux étudier son fonctionnement et de définir les paramètres essentiels pour optimiser son utilisation au sein de cette alimentation électrique hybride.

Ainsi l'objectif de ces expérimentations est la détermination de la technique de régulation et de contrôle appropriée de l'état de charge de ces batteries afin :

- de les protéger contre des surcharges exagérées et les décharges profondes
- d'assurer leur pilotage et leur gestion efficace au sein des AEA.

Dans la suite de cette partie, nous présenterons le mode opératoire, ensuite les résultats issus des différents tests et enfin les conclusions tirées.

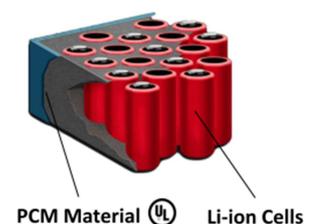
#### **2. Mode opératoire**

La technologie de batterie choisie est celle des Lithium ion compte tenu de leurs nombreux avantages (densité énergétique, profondeur de décharge autorisée, température d'utilisation, durée de vie etc.....) présentés plus hauts. En plus de ces performances énergétiques, la batterie Lithium ion utilisée dispose d'un emballage constitué de matériaux à changement de phase (PCM) favorisant sa régulation thermique afin de minimiser les influences de la température sur les cycles de charge et de décharge.

Les caractéristiques de cette batterie sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 3: Caractéristiques de la batterie Lithium ion de 1,3kW**

<b>Technologie</b>	Li ion
<b>Capacité nominale</b>	<b>26 Ah</b>
<b>Energie</b>	<b>1300 Wh</b>
<b>Tension nominale</b>	<b>51,8 V</b>
<b>Tension maximale</b>	<b>58,8 V</b>
<b>Courant maximal de charge</b>	<b>13 A</b>



**Figure 8: Configuration de la batterie Lithium ion**

Pour la réalisation des expériences une alimentation électrique autonome a été utilisée comme banc d'expérimentation afin d'alimenter la batterie au cours des régimes de charge et d'autoriser la décharge de la batterie dans les équipements électriques utilisés à cet effet.

La charge de la batterie a été réalisée à différents régimes (à courant de charge différents) afin de faire une étude comparative de ces régimes de charge.

En ce qui concerne la décharge de la batterie, elle a été réalisée à l'aide d'équipements électriques plus précisément des lampes et des radiateurs à puissances variables. Ce qui nous a permis de réaliser les courbes de décharge de la batterie à différentes puissances de décharges. Les tests ont été réalisés à une température ambiante moyenne de **20°C**.

L'analyse des données issues de différentes expériences ont permis de déduire plusieurs résultats.

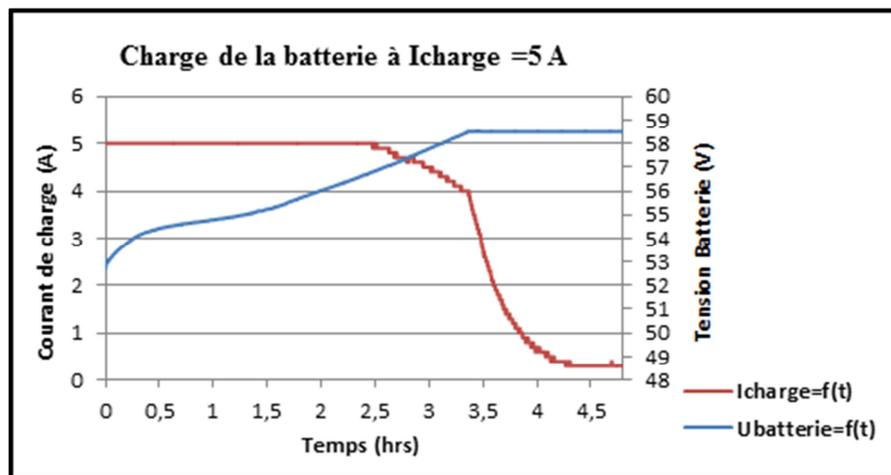
### **3. Résultats des expérimentations**

Cette partie présente les résultats issus des différentes expérimentations de charge et de décharge de la batterie sous forme de courbes.

#### **3.1. Courbes de charges à différents régimes**

##### **3.1.1. Courbes de charge de la batterie à 5A**

La figure ci-dessous nous présente l'évolution de la tension et du courant charge de la batterie.



**Figure 9: Evolution de la tension et du courant de charge de la batterie**

Ce régime de charge est caractérisé par deux phases importantes à savoir :

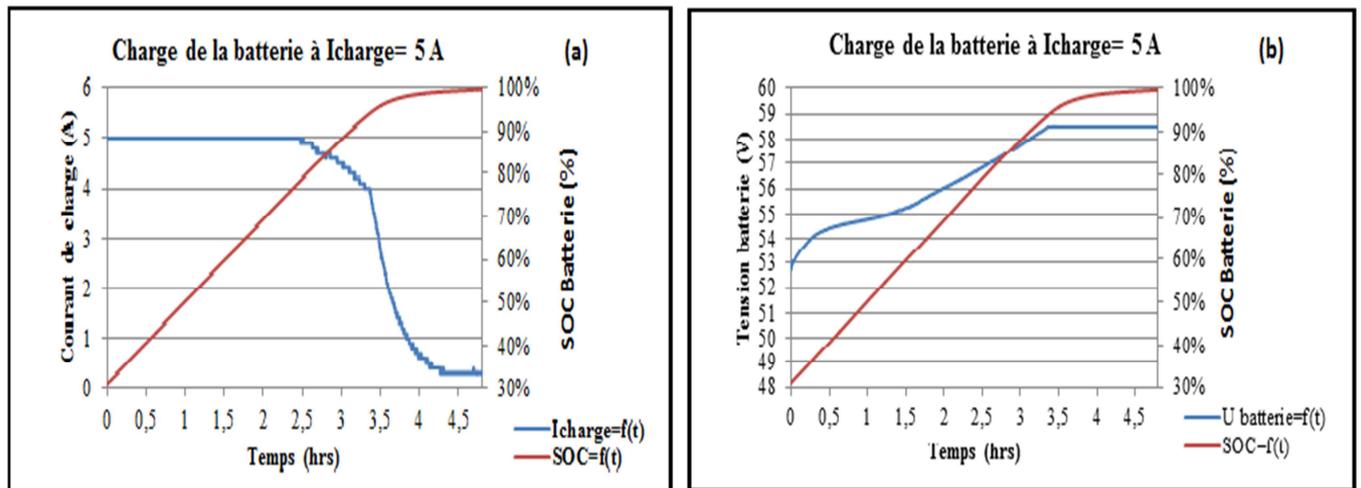
- La première phase se traduit par l'alimentation de la batterie avec un courant constant.

Durant toute cette période, on observe une augmentation progressive de la tension de la batterie (Figure 9). La durée de cette phase dépend de l'état de décharge initial de la batterie et du courant de charge.

- La deuxième phase commence à l'instant où la tension de la batterie atteint sa valeur maximale et reste constante à cette valeur tout au long de cette phase. Le courant de charge au cours de cette phase devient donc une fonction décroissante du temps. Il tend vers 0 asymptotiquement. Il se stabilise à une valeur faible mais non nulle qui n'accroît plus l'état de charge.

A ce niveau on observe l'état de de charge (SOC) qui est égale à **100%**. Figure 10 (a)

La figure 10 (b) ci-dessous nous montre que pour une tension aux bornes de la batterie égale à sa valeur maximale à laquelle elle reste constante, on se retrouve à un état de charge égale **92%**.



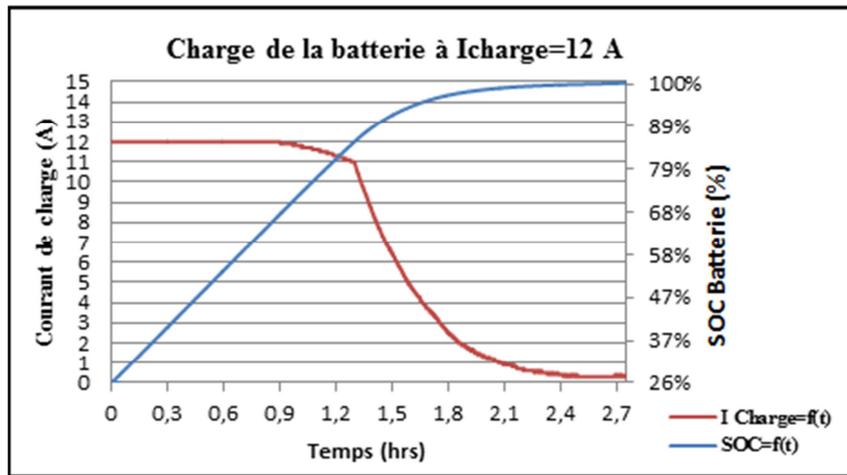
**Figure 10: Evolution du SOC batterie et du courant de charge de la batterie(a) et Evolution de la tension et du SOC batterie (b) en charge**

### 3.1.2. Courbes de charge à 12 A

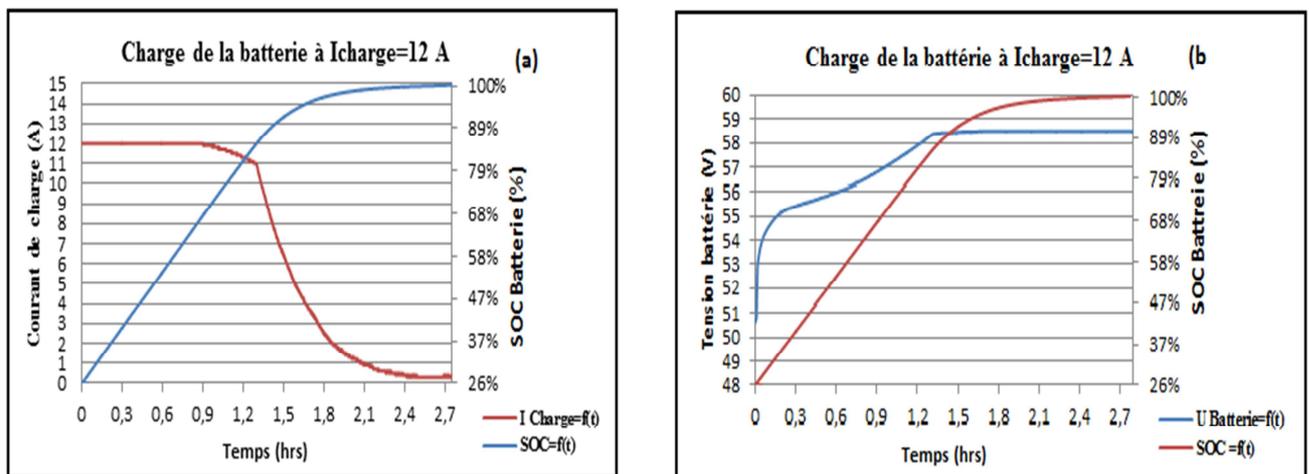
Les expériences précédentes ont été réalisées également à un autre régime de charge c'est-à-dire pour un courant de charge de 12 A.

Les courbes représentant ces résultats sont présentés ci-dessous.

On observe sur celle-ci-dessous l'évolution de la tension aux bornes de la batterie et du courant de charge au cours du processus de charge de la batterie



**Figure 11: Tension aux bornes de la batterie et du courant de charge à 12 A**



**Figure 12: Evolution du SOC batterie et du courant de charge (a) et Evolution de la tension aux bornes de la batterie et du SOC de la batterie à 12A**

Nous remarquons que les courbes de charge de la batterie à un courant de charge égal à 12 A suivent les mêmes évolutions qu'avec un courant plus faible 5A.

Juste à noter que pour un courant de charge élevé, la tension aux bornes de la batterie atteint rapidement sa valeur maximale.

Par contre il faudra attendre encore plus de 02 heures en charge pour avoir un courant de charge autour de 0A avant que l'état de charge de la batterie soit égal à **100%**. **Figure 12(b)**.

### 3.2. Courbes de décharge de la batterie

La figure 13 montre l'évolution de la tension aux bornes de la batterie à différentes puissances de décharge.

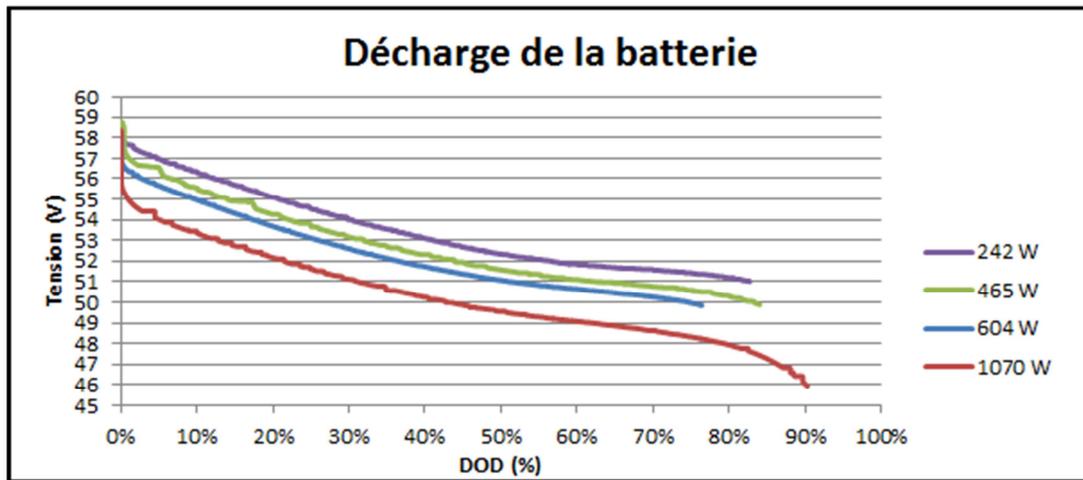


Figure 13: Tension aux bornes de la batterie en fonction du DOD à différentes régimes de décharges

Pour un  $DOD = 80\%$  admissible pour les batteries lithium ion, on observe que la tension limite correspondant à cette profondeur de décharge varie en fonction de la puissance déchargée. Ainsi, dans une application où la puissance déchargée varie en fonction des besoins de l'utilisateur, donc n'est pas fixe, une valeur limite de tension bas n'est pas optimale.

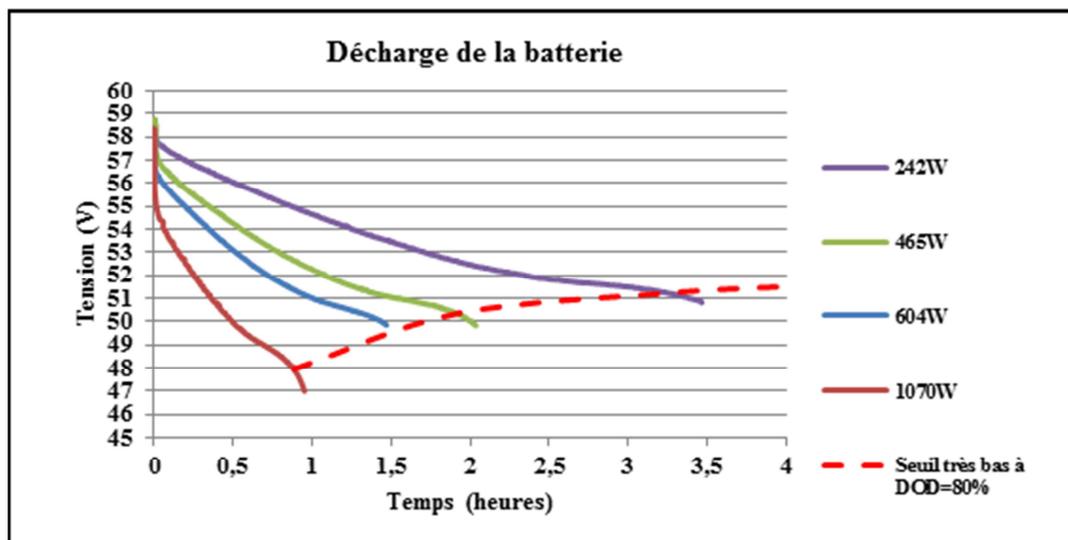


Figure 14: Evolution de la tension de la batterie à différents courants de décharge

On observe également sur la figure 14 que la tension limite de décharge de la batterie varie en fonction de la puissance de décharge imposée à la batterie pour un  $DOD=80\%$  (pointillé en rouge).

Ce qui veut dire que si l'on définit une tension de fin de décharge fixe de  $50\text{ V}$  par exemple quelle que soit la puissance de décharge, cela signifie qu'une batterie pleine soumise à la

décharge sous une puissance supérieure à **465W** est déconnectée pour une profondeur de décharge inférieure à **80%**.

Dans ce cas de figure, une grande partie de la capacité restante disponible n'est donc pas utilisée.

Lorsque cette même batterie est déchargée à une puissance de décharge inférieure à **465W**, le système se déconnecte à la même tension limite de **50V** indiquant la fin décharge. Ce qui correspond dans ce cas à une profondeur de décharge supérieure au **80%** tolérée voire à **100%**.

Ces profondeurs de déchargées élevées sur les batteries engendrent une perte en capacité, donc une réduction de sa durée de vie.

Alors une régulation avec mesure de la tension aux bornes de la batterie n'est pas adaptée à cette technologie contrairement aux technologies de batteries plomb (**Annexe 4**).

#### **4. Discussions et conclusions**

A l'issue des résultats obtenus des expérimentations, nous avons tiré les conclusions suivantes.

- Les batteries de type lithium ion ont un profil de charge de type "CC-CV" c'est-à-dire une phase de charge à courant constant jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne sa valeur maximale et une seconde phase où la tension de la batterie devient constant jusqu'à une valeur presque nulle du courant de charge.
- Pour la régulation de charge et de la décharge de la batterie, la méthode adaptée est à ces batteries d'accumulateurs de type lithium ion est **la méthode coulombmétrique**.

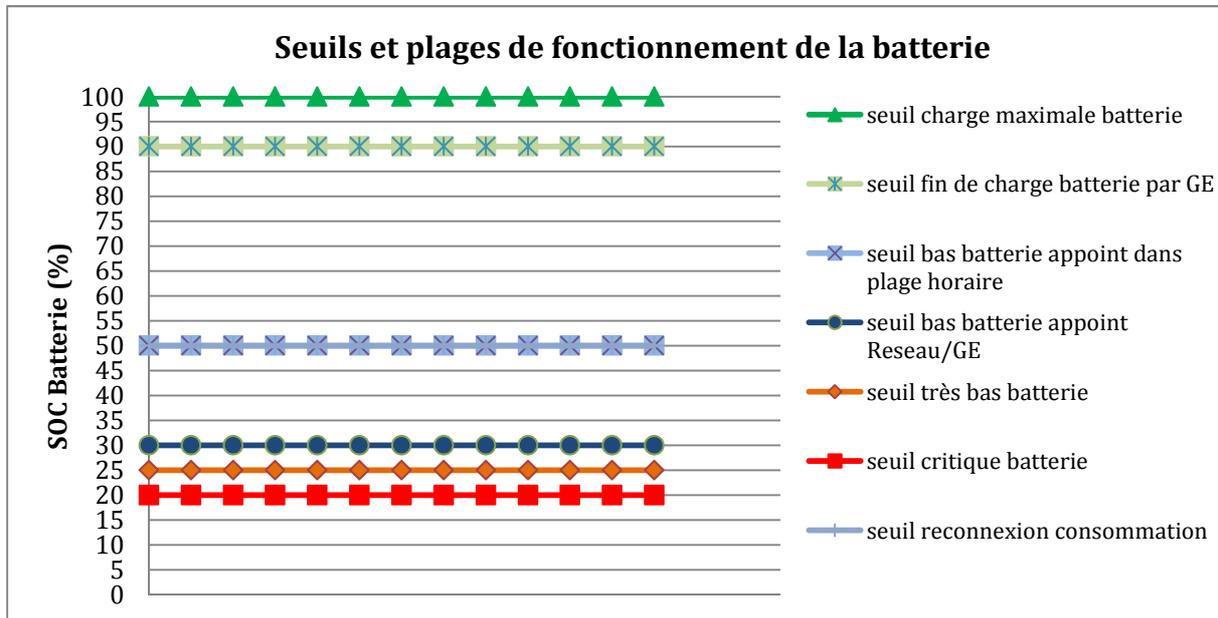
Un calcul instantané de l'état de charge (SOC) de la batterie sera effectué afin de déterminer de manière instantanée la capacité disponible dans la batterie à partir des formules suivantes :

$$SOC(t + 1) = SOC(t) - \frac{Q_{déchargée}(t) * 100}{Q_{maximale\ batterie}} + \frac{Q_{chargée}(t) * 100}{Q_{maximale\ batterie}}$$

Avec

$$SOC(t) = \frac{Q_{Batterie}(t) * 100}{Q_{maximale\ batterie}}$$

- Pour une gestion plus efficace de l'énergie au sein des AEA surtout pour le pilotage de la batterie en charge et en décharge, les plages et seuils de fonctionnement suivants ont été définis à partir des résultats expérimentaux.



**Figure 15: Seuils et plages de fonctionnement de la batterie**

Ces différents seuils de fonctionnement définis sont décrits comme suit :

- **Seuil de charge maximale de batterie**

Ce seuil correspond à un  $SOC=100\%$  où l'onduleur chargeur de l'AEA indique la fin de la charge de la batterie par la source photovoltaïque.

- **Seuil fin de charge de la batterie par GE**

Ce seuil égal à  $SOC= 90\%$  correspond au point optimal de fin de charge de la batterie par les sources d'appoint (Réseau/GE). Ce seuil est défini à cette valeur car à partir des résultats présentés, cette capacité correspond au 10% restant pour atteindre 100% sont fournis à l'issue de plusieurs heures. Donc cette fin de charge favorise, un fonctionnement à taux de charge optimale et des gains économiques en consommation de carburant du groupe électrogène.

- **Seuil d'appoint réseau/GE dans une plage horaire réglable ( $SOC=50\%$ )**

A ce seuil on effectue l'appel d'énergie depuis la source d'appoint dans une plage horaire qui est définie par l'utilisateur. Cette plage horaire peut correspondre aux heures creuses pendant lesquelles le coût du kWh électrique est bas dans certains pays.

- **Seuil bas batterie d'appoint réseau ou groupe électrogène (SOC=30%)**

La charge batterie par le réseau ou le groupe électrogène se fait pour ce seuil bas batterie atteint indépendamment de la période de la journée. Cela permet d'approvisionner la batterie en énergie et une mise en sécurité du système avant l'atteinte d'un seuil très bas.

- **Seuil Très bas batterie**

Pour un seuil très bas de batterie atteint (SOC= 25%) , en absence de PV et de source conventionnelle (Réseau/GE), l'AEA interdit la consommation (déconnecte l'utilisateur) afin de protéger la batterie d'une décharge profonde. Les équipements de sécurité et de mesure sont quant à eux toujours alimentés.

- **Seuil critique batterie**

Si l'état de charge de la batterie atteint ce seuil correspondant à SOC=20%, en absence de PV et de la source conventionnelle, toute l'installation (AEA) est mise hors tension afin de protéger la batterie d'une décharge profonde.

- **Seuil Reconnexion consommation (SOC = 50%)**

Lorsque le SOC est inférieur au seuil très bas batterie où l'utilisateur est déconnecté, en présence de PV ou bien du réseau/GE pour qui charge la batterie, il faudra attendre que la batterie retrouve un état de charge égal à ce seuil reconnexion consommation pour connecter l'utilisateur à la batterie à nouveau. Celui minimise les cycles de charge/décharge sur la batterie est optimise sa durée de vie.

Toutes ces conclusions ont été introduites dans le programme du gestionnaire d'énergie de l'alimentation électrique autonome et constituent les nouvelles méthodes de régulation de la charge et la décharge de la batterie Lithium ion.

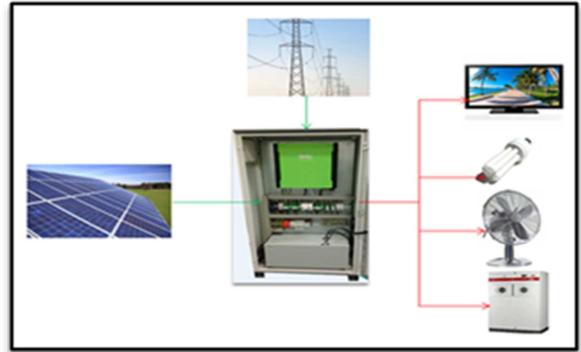
#### **IV. PROJET D'INSTALLATION DE 02 GENERATEURS HYBRIDES AU BRESIL**

Dans le cadre d'un partenariat entre SIREA et INES (Institut National d'Energie Solaire) deux (02) alimentations électriques autonomes (AEA-SIREA) qui seront installés comme générateurs hybrides PV pour la production d'électricité dans deux régions au Brésil.

Une alimentation électrique autonome installée sur le site de Rancharia sera connecté au réseau électrique pour un fonctionnement en mode "Réseau-vente Surplus PV".

Ces caractéristiques sont :

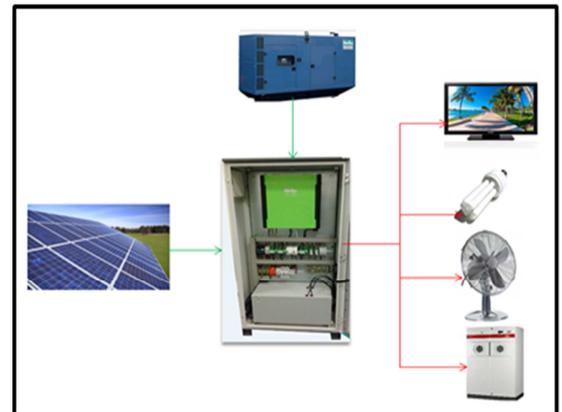
- ✓ **Puissance crête PV : 3 kWc**
- ✓ **Puissance Réseau : 15 A/220V/60Hz**
- ✓ **Capacité Batterie Lithium ion : 5400 Wh**



*Figure 16: Générateur hybride connecté au réseau à Rancharia*

Une seconde sera installée en site isolé à Rio Branco donc connecté à un groupe électrogène et dont les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Puissance crête PV : 3 kWc**
- ✓ **Puissance GE : 3kVA/220V**
- ✓ **Capacité Batterie Lithium ion : 5400 Wh**



*Figure 17: Générateur hybride connecté au GE à Rio Branco*

Afin de répondre aux différentes spécifications de ce projet des solutions d'optimisation ont été apportées à la gestion des flux d'énergie au sein de chaque générateur.

##### **4.1. Mesures d'optimisation apportées à chaque générateur hybride**

###### **4.1.1. Générateur hybride de Rancharia en mode "Réseau-Vente Surplus PV"**

Pour ce générateur, on s'est intéressé à la commande de pilotage de l'autorisation de la vente du surplus de production PV a intégré dans le gestionnaire d'énergie.

Une analyse du bilan énergétique au sein du générateur a été effectuée.

Avant l'injection PV pour la vente du surplus PV on a :

$$\mathbf{Puissance_{PV} = Puissance_{Consommée} + Puissance_{Batterie} + Puissance_{commande} \quad (1)}$$

Avec  $\mathbf{Puissance_{commande}}$  la puissance d'alimentation du système de contrôle-commande du générateur et les pertes de l'onduleur.

Ainsi pour autoriser l'injection PV il faudra que la production PV soit principalement supérieure à la consommation et à la puissance de la partie commande, vu que la batterie fonctionne soit en récepteur soit en générateur.

Alors la puissance PV doit être supérieure à :

$$\mathbf{Puissance_{PV} \geq Puissance_{consommée} + Puissance_{commande} \quad (2)}$$

La  $\mathbf{Puissance_{commande}}$  n'étant pas prise en compte par le système de mesure du générateur, elle a été mesurée directement.

Elle est égale à la puissance PV lorsque :

- Absence de consommation ( $\mathbf{Puissance_{Consommée} = 0W}$ )
- Batterie chargée ( $\mathbf{Puissance_{charge\ batterie} = 0W}$ )

Ces deux conditions intégrées dans l'équation 1 nous donnent :

$$\mathbf{Puissance_{Commande} = Puissance_{PV}}$$

La mesure de la  $\mathbf{Puissance_{PV}}$  dans ces conditions sur le générateur est égale à **116W**.

Par conséquent les conditions d'autorisation de l'injection de surplus PV sur le réseau à remplir simultanément sont :

- ✚ **Présence de tension sur le réseau ( $U_{réseau} = 220V$ )**
- ✚ **Etat de charge batterie supérieur au seuil d'appoint ( $SOC_{Batterie} > SOC_{Appoint}$ )**
- ✚ **Production PV suffisante ( $Puissance_{PV} \geq Puissance_{consommée} + 116W$ )**

Cette commande de pilotage de l'injection du surplus PV a été intégrée dans le gestionnaire d'énergie du générateur via le programme élaboré présenté en annexe 3.

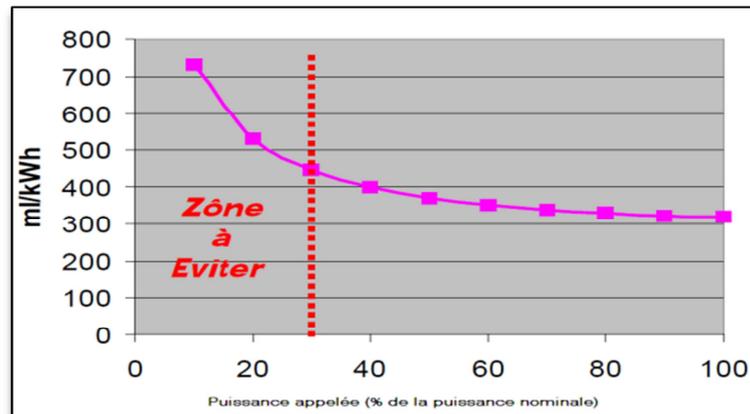
#### **4.1.2. Générateur hybride de Rio Branco connecté au groupe électrogène**

Le groupe électrogène est utilisé comme une source d'appoint dans ce système, son démarrage est effectué si la batterie atteint un seuil bas de charge donné.

Il est mis à l'arrêt lorsque la batterie atteint un état de charge supérieure au seuil maximal de charge batterie par le groupe électrogène. Son fonctionnement est lié à certaines contraintes.

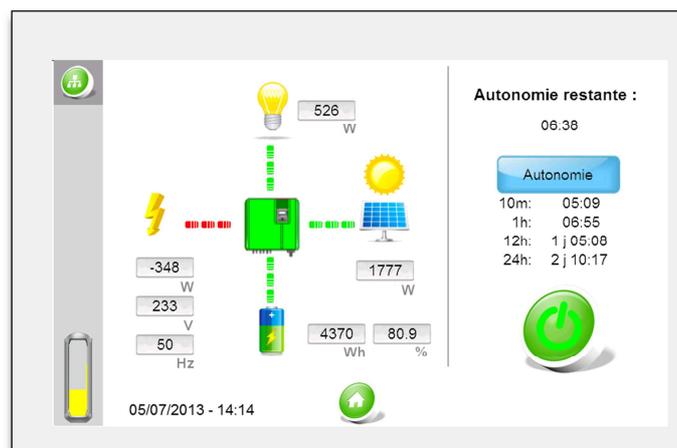
❖ **Première mesure d'optimisation : Arrêt du GE en sous charge**

On observe sur la figure ci-dessous[11] une augmentation de la consommation spécifique du GE en dessous d'une plage de fonctionnement donnée[50% $P_{GE}$ ;  $P_{GE}$ ]. Ce qui se traduit par un fonctionnement du GE hors de sa plage optimale de fonctionnement donc une consommation spécifique en carburant élevée signe de mauvais rendement.



**Figure 18: Courbe de la consommation spécifique d'un GE en fonction de la puissance nominale**

Un fonctionnement du générateur hors de cette plage optimale peut être observé lorsqu'on effectue un démarrage du groupe pour charger la batterie. Au cours de cette charge, une présence de production PV importante assure donc l'alimentation de la consommation et charge la batterie. Ce qui maintient la puissance soutirée du groupe électrogène hors de la plage optimale (figure 19). Il faudra attendre que l'état de charge de la batterie atteigne le seuil maximal de charge pour noter l'arrêt du GE.



**Figure 19: Fonctionnement en sous charge du groupe électrogène**

Il s'impose donc une commande permettant d'arrêter le groupe électrogène quand la puissance soutirée du GE ( $P_2$ ) est inférieure à  $50\%P_{GE}$ , et que l'état de charge de batterie est supérieur au seuil bas batterie.

La commande élaborée et présentée en annexe favorisant ce pilotage autorise l'arrêt du GE si :

- ✚  $P_2 < 50\%P_{GE}$  pendant une durée d'une minute pour s'assurer de la stabilité de la production PV.
- ✚  $SOC_{Batterie} > SOC_{Appoint\ batterie}$  ( $SOC_{Batterie} > 50\%$ ).

❖ **Deuxième mesure d'optimisation :**

On note un fonctionnement en surcharge du groupe électrogène lorsque la batterie est en charge et que la consommation électrique est supérieure à une certaine valeur.

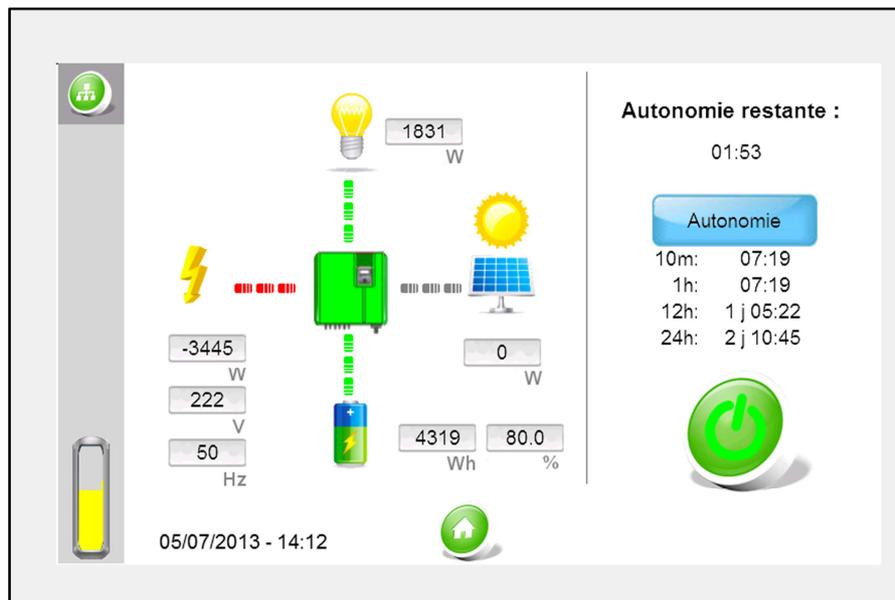
De façon plus claire, la puissance maximale de charge des batteries étant égale à :

$$P_{Max\ charge\ Batt} = U_{max\ Batterie} * I_{Charge\ Max\ Batt} = 58,8 * 25 = 1470W \quad (3)$$

Quand la consommation électrique devient supérieure à  $1500W$ , et en intégrant la puissance de la partie commande dans le bilan d'énergie du générateur on obtient :

$$P_2 > 1470W + 1500W + 116W \text{ donc } (P_2 > 3000W > P_{Max\ GE}).$$

Donc la puissance soutirée au GE pour charger les batteries et alimenter la consommation devient supérieure à sa puissance maximale du GE comme le montre la figure ci-dessous.



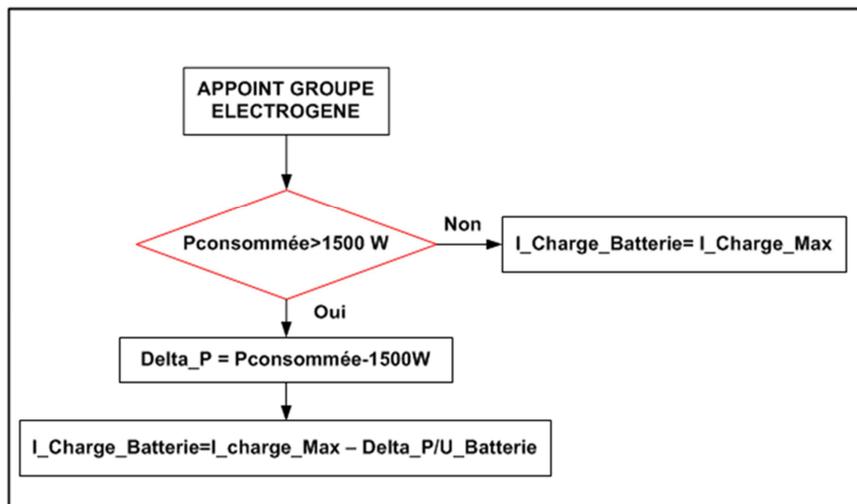
**Figure 20: Fonctionnement en surcharge du groupe électrogène**

Cet état du système impose au GE un fonctionnement en surcharge, ce qui engendre sa surchauffe du moteur et son arrêt fréquent. Il s'avère donc important de limiter la puissance à

soutirer du groupe électrogène à sa valeur maximale tout en assurant la charge de la batterie et l'alimentation du consommateur.

Cette régulation du courant de charge proposée comme présentée à la figure 22 permettra de réduire progressivement le courant de charge de la batterie donc sa puissance de charge afin que la somme de la puissance consommée et de la puissance en charge de la batterie ajoutée aux pertes du générateur soit toujours inférieure ou égale à la puissance maximale du GE.

$$P_{consommée} + P_{charge\ batterie} + P_{commande} \leq P_{GE} \quad (4)$$



**Figure 21: Régulation du courant de charge maximal de la batterie**

Cette régulation a aussi été intégrée au sein du générateur de Rancharia connecté au réseau vue que la puissance souscrite correspond à 3000W afin d'éviter un déclenchement fréquent du disjoncteur.

Ces différentes mesures ont été intégrées dans le gestionnaire d'énergie de chaque générateur via des codes programmes élaborés.

## 4.2. Conception d'un simulateur de charges électriques

### 4.2.1. Objectifs

Dans le but de répondre à un besoin de pilotage des charges électriques de l'utilisateur de ces générateurs hybrides en fonction de ses besoins, un simulateur de charges électriques a été conçu dans le cadre de ce projet.

Il s'agit donc de concevoir un outil automatisé intégrable dans chaque générateur pour piloter les départs AC out 1 et AC out 2 selon :

✚ un **programme de simulation horaire** qui impose l'alimentation des équipements du circuit électrique 1 (**départ AC out 1**) en fonction des besoins de l'utilisateur pendant la plage horaire de fonctionnement défini.

Deux plages horaires de fonctionnement sont proposées et constituent les données d'entrées pour l'exécution du programme.

#### Plage horaire 1 de fonctionnement

- **Heure de début 1**
- **Heure de fin 1**

#### Plage horaire 2 de fonctionnement

- **Heure de début 2**
- **Heure de fin 2**

Le fonctionnement de cette simulation horaire est décrit par l'organigramme ci-dessous :

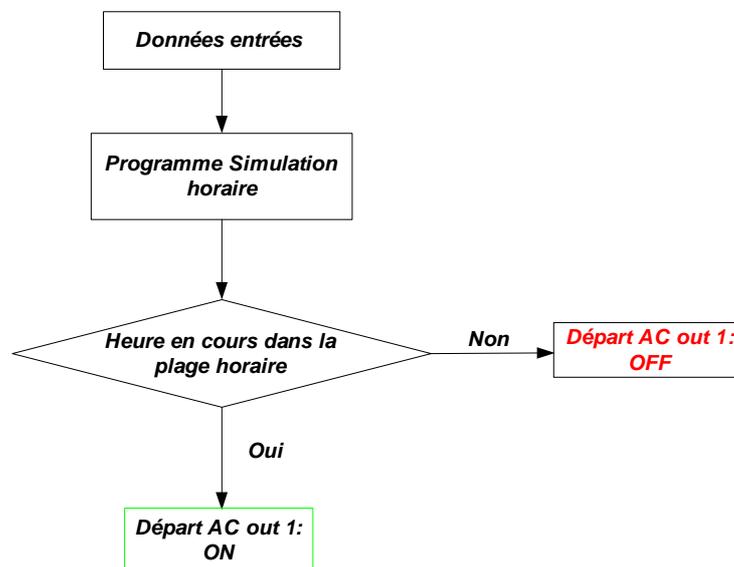


Figure 22: Organigramme de la simulation horaire

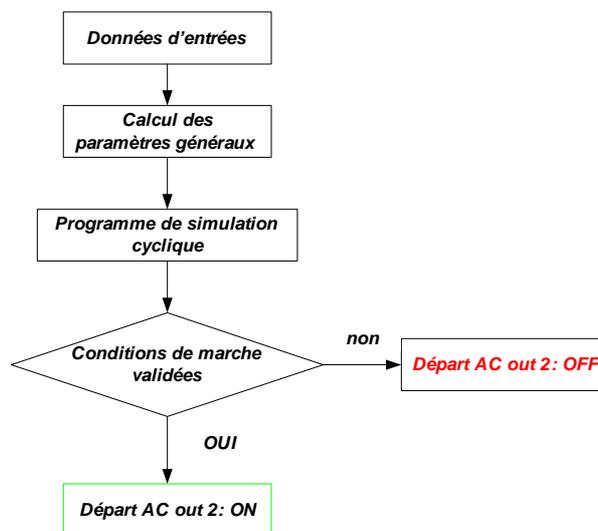
✚ Un second programme appelé **programme de simulation cyclique** permettant d'imposer des temps de marche et des temps d'attente de fonctionnement aux équipements électriques installés sur le circuit électrique 2 (**départ AC out 2**) et cela pendant un nombre

donné de cycle précis. Un cycle de fonctionnement correspond donc à un temps de marche et un temps d'attente consécutif.

Pour l'exécution de ce programme, les données d'entrées introduites dans le simulateur par l'utilisateur sont :

- **Heure du début du cycle**
- **Durée de la marche au cours d'un cycle**
- **Durée de l'attente au cours d'un cycle**
- **Nombre de cycle total**

L'organigramme ci-dessous présente l'architecture du fonctionnement de ce programme.



Ces différents programmes seront exécutés par un automate programmable industriel qui assure le pilotage des différents départs.

#### 4.2.2. Automate de pilotage du simulateur de charge électrique

Le module d'automatisme choisit pour le pilotage de ces programmes de simulation de charge électrique est un automate développé par SIREA appelé 'µARM A4'.

**Tableau 4: Caractéristique de l'automate simulateur de charge électrique**

<b>Port de communication</b>	<b>1 port RS232</b> <b>1 port RS485</b>
<b>Entrées</b>	8 Entrées configurables logiques ou analogiques : 0-10V ou 4-20 mA
<b>Sorties</b>	7 sorties TOR dont 4 configurables en en analogique
<b>Alimentation</b>	12-24V
<b>Mémoire</b>	512 Ko Flash 32 Ko RAM

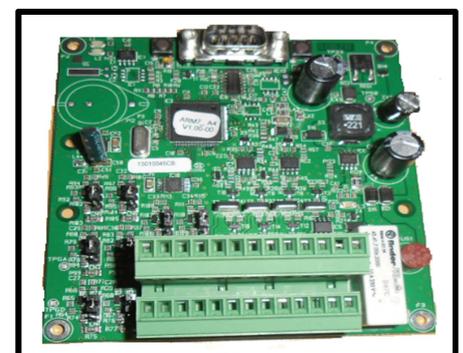
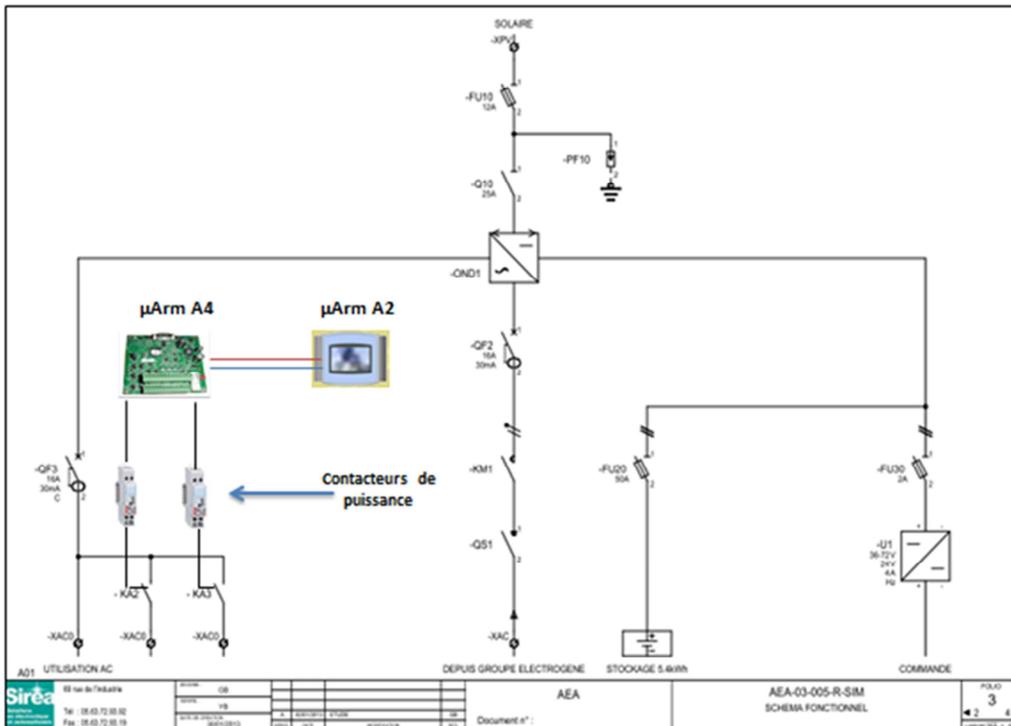


Figure 23: Automate "Esclave" (µArmA4)

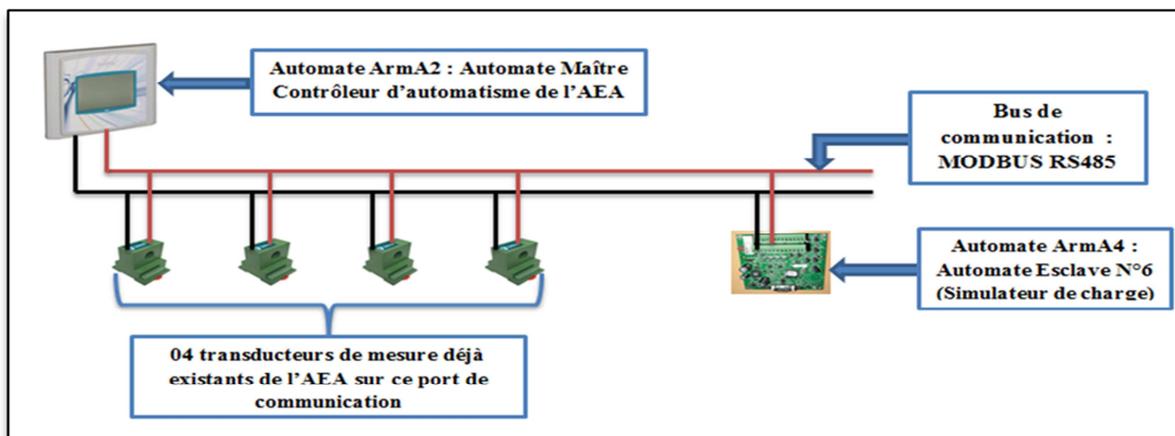
La figure ci-dessous présente l'architecture de fonctionnement du simulateur de charge au sein de charge générateur hybride.



*Figure 24: Architecture du simulateur de charge au sein du générateur hybride*

Cette architecture présente l'automate "µArm A2" qui fonctionne en "Maître" connecté à l'automate d'Esclave "µArm A4" qui grâce à ses sorties de type TOR assure le pilotage des contacteurs de puissance pour l'ouverture ou la fermeture du **départ 1** pour la simulation horaire et du **départ 2** pour la simulation cyclique.

La figure ci-dessous présente la connexion de l'automate "µArm A4" sur la liaison de communication de type Modbus déjà existant au sein des générateurs.



*Figure 25: Connexion de l'automate simulateur de charge sur la liaison Modbus de l'AEA*

Pour établir la communication entre les automates “ $\mu$ ArmA2” et “ $\mu$ ArmA4”, il est indispensable de configurer le port de communication de l’automate “Esclave” ( $\mu$ ArmA4).

Le protocole de communication de la liaison existante est le **protocole de type Modbus RTU** basé sur du **port série RS485/232**.

Les paramètres du **port Série RS485** de l’automate “Esclave” doivent être conformes aux paramètres de cette liaison de communication déjà existant sur laquelle cet automate est câblé. Ces paramètres de configuration du port série de cet automate sont présentés en annexe 10.

#### **4.2.3. Programme du simulateur de charge électrique**

Le programme de pilotage du simulateur de charge a été élaboré à l’aide du logiciel “ **$\mu$ Ladder**” de SIREA .Il intègre les langages de programmation C et Ladder.

On distingue alors deux parties de codes programmes pour le pilotage complet du simulateur à savoir :

- ❖ un code programme intégré dans l’automate “Maître” qui à partir des différentes données d’entrées définies par l’utilisateur envoient l’état des bits de commandes des départs 1 et 2 à l’automate “ Esclave”.
- ❖ Le code programme intégré dans l’automate “Esclave” assure le pilotage des contacteurs de puissance à partir des bits de commandes qu’il reçoit du maître.

Le programme de la figure présente le code de pilotage des sorties de type TOR (**Q\_Départ1**) et (**Q\_départ2**) correspondant respectivement aux simulations de charges horaire et cyclique intégré dans l’automate “Esclave”. On observe que ces sorties TOR sont enclenchées ou déclenchées à partir des bits de commandes envoyées par l’automate “Maître” et qui correspondent aux contacts (**A\_Départ1**) et (**A\_Départ2**) sur la figure ci-dessous.

Pour l’écriture des bits de commandes du simulateur de charge de l’automate “Maître” dans l’automate “Esclave”, un script d’écriture de trame a été élaboré (**Annexe 11**) et s’exécute comme présenté sur la figure 28.



**Figure 26: Principe d'exécution du script d'écriture des bits de commande**

A l’issue de la conception et de l’intégration du simulateur de charge au sein de chacun des deux générateurs hybrides, des tests ont été réalisés et ont permis de valider le bon fonctionnement de cet outil.

### **4.3. Système de supervision à distance des deux générateurs hybrides**

#### **4.3.1. Principe**

Afin de favoriser une meilleure exploitation et un suivi du fonctionnement de ces deux générateurs hybrides installés aux utilisateurs distants, un système de supervision à distance été mise en place.

Ce système de supervision permet :

- L'archivage des données de chaque générateur sur un serveur ;
- La visualisation de ces données par une simple connexion à internet ;
- Le suivi, le contrôle et l'analyse instantanée du fonctionnement de chaque équipement;
- De prévenir des défauts sur chaque générateur par report d'alarme via e-mail.

#### **4.3.2. Architecture du système de supervision des générateurs**



**Figure 27: Architecture globale du système de supervision**

### **4.3.3. Equipements du système de supervision des générateurs**

#### **4.3.3.1. Passerelle de communication ‘ $\mu$ NPE-SIREA’**

Afin de remonter les informations de chaque générateur sur le serveur, une passerelle de communication appelée ‘ $\mu$ NPE-SIREA’ a été connecté à chacun d’eux par liaison Ethernet. Elle permet de sauvegarder des informations acquises à partir du système de mesure et de contrôle intégré dans chaque générateur et de les transférer sur le serveur de données soit par :

- Une liaison Ethernet pour un serveur en local
- Une liaison GSM/GPRS pour un serveur distant

Dans le cadre de notre supervision, la passerelle est munie d’une carte SIM configurée pour communiquer en mode **GSM/GPRS** avec le serveur de données vu que celui-ci n’est pas sur le site des générateurs.

Le **GSM/GPRS** est une technologie complémentaire du GSM qui exploite le réseau cellulaire déjà en place. Orientée vers les architectures IP, elle permet notamment le transfert à distance de données par paquets et propose une facturation à la quantité de données échangées.

Les caractéristiques d’une passerelle de communication sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 5: Caractéristiques de la passerelle de communication ‘ $\mu$ NPE’**

<b>Port de communication</b>	<b>1 port RS485 3 ports RS232 1 port Ethernet</b>
<b>Entrées</b>	<b>8 entrées logiques TOR 4 Entrées analogiques 0-10V</b>
<b>Sorties</b>	<b>2 sorties logiques statiques</b>
<b>Alimentation</b>	<b>12-24VCC</b>
<b>Mémoire</b>	<b>Mémoire RAM sauvegardée Connecteur pour SDcard Connecteur pour Carte SIM</b>
<b>Accessoires</b>	<b>Antenne pour la communication GPRS</b>
<b>Affichage</b>	<b>3 Leds de signalisation</b>

La mise en service des passerelles pour assurer la communication entre les générateurs et le serveur nécessite l’intégration de certains paramètres de configuration présentés dans le tableau ci-dessous.

Type de communication avec le serveur	<b>GSM/GPRS</b>
Access Point Internet (APN) attribué par le fournisseur d'accès GPRS	
Nom d'hôte ou IP du serveur	
Port de communication du serveur	<b>13214</b>
Adresse IP des générateurs	<b>192.168.0.123 pour les AEA-SIREA</b>
Nom des générateurs	<b>123 : Générateur Rio Branco 124 : Générateur Rancharia</b>
Type d'équipement	<b>AEA - SIREA</b>

#### **4.3.3.2. Serveur de données**

Outre les générateurs et la passerelle de communication, le système de supervision comprend également un serveur de centralisation des données transférées par la passerelle de communication.

Pour le système de supervision mise en place, le serveur de données utilisé appelé "**Server FOX - SIREA**" est un produit de SIREA et présente les caractéristiques suivantes :

- Une base de données de type MySQL,
- Les langages de programmation PYTHON, JAVASCRIPT,
- Une centralisation et un horodatage des mesures,
- Possibilité d'exportation des mesures sous formats CSV,
- L'historisation des événements (mesures et états).
- Un serveur de messagerie pour la diffusion des alarmes de défauts via SMS ou E-mails,
- Une capacité de stockage de 500 Go

Ce serveur de donnée doit être accessible et en permanence connecté sur internet.

Pour rendre ces données sauvegardées sur le serveur accessible à l'utilisateur pour la supervision, l'utilisation d'un logiciel de supervision s'impose.

Pour cette application, le logiciel utilisé est appelé "**µServer-SIREA**". Il est un logiciel de supervision et d'exploitation d'installations et d'équipements énergétique développés par SIREA.

Il offre deux applications spécifiques :

- Une supervision sur serveur central d'un grand nombre d'équipement distants.
- Une supervision en local sur site pour la gestion d'automates et d'équipements.

Vue que nos deux générateurs hybrides sont situés sur différents sites et distants du serveur, ‘**μServer**’ est utilisé en mode serveur central et permet par une simple connexion à internet via un navigateur web l'accès au poste de supervision (PC, Tablette, etc ...).

#### ***4.3.3.3. Poste de supervision***

Le poste de supervision représenté par l'interface web permet l'accès aux différentes pages synoptiques de supervision. Grâce au logiciel ‘**μSERVER**’ ; les vues synoptiques ont été éditées pour chacun selon le cahier de charge suivant :

- Mise sous forme de courbe des mesures suivantes :
  - Puissance PV
  - Puissance Réseau/GE
  - Puissance consommée
  - SOC batterie
- Table des autres grandeurs mesurées (Tension, Courant,..... etc)
- Gestion des alarmes
  - Affichage de tous les défauts (défaut de communication entre les composants, défaut de surtension et de court-circuit,.....) de chaque générateur et de leur état
  - Alerte de défaut par l'affichage d'une image d'alarme sur l'interface web
  - Affichage de l'historique des défauts
  - Possibilité d'acquiescer ou d'inhiber les alarmes de défauts
  - Report des alarmes de défaut par envoi d'email à l'utilisateur

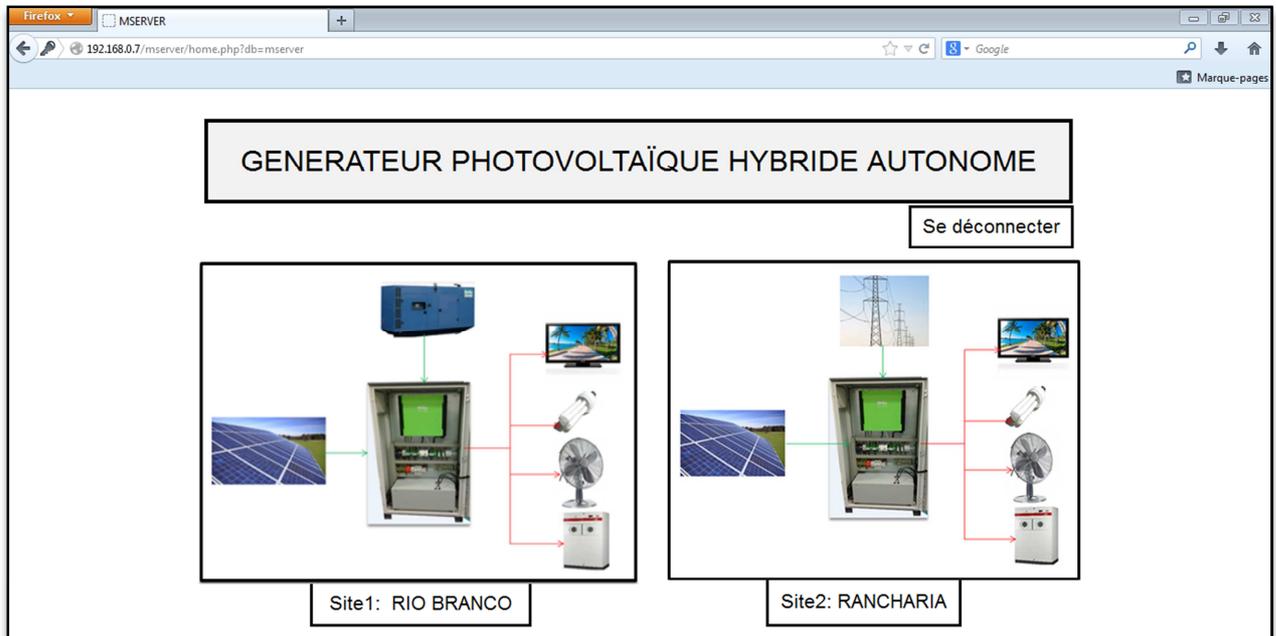
Une fois connecté à **μServer** via le navigateur web, la sécurité des données de supervision nécessite une demande d'authentification.

Ainsi, la gestion des accès au poste de supervision est basée un compte utilisateur défini pour l'utilisateur. Il s'agit d'une combinaison de ‘Nom d'utilisateur’ et de ‘Mot de passe’.

Quand l'utilisateur s'identifie, il a automatiquement accès aux différentes pages synoptiques du poste de supervision.

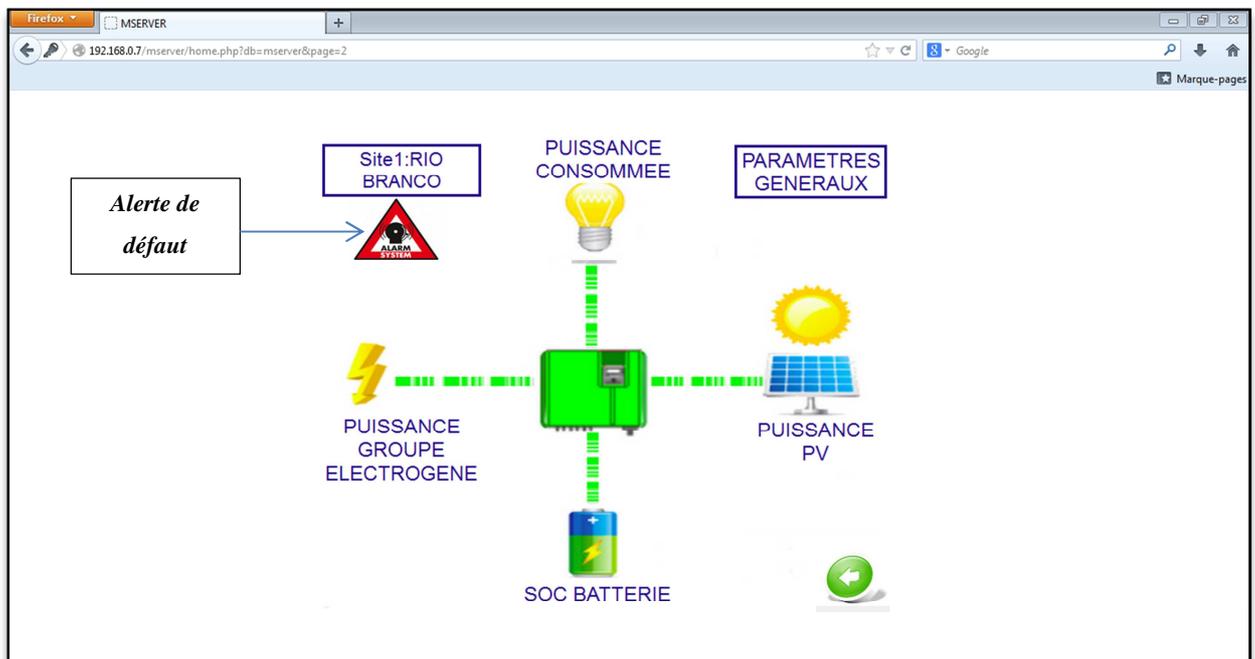
**4.3.4. Pages synoptique de l'interface de supervision des générateurs hybrides**

La page présentée ci-dessous donne à l'utilisateur un aperçu des deux générateurs installés sur les différents sites. Elle constitue la page d'accueil du poste de supervision.



**Figure 28: Page d'accueil du poste de supervision**

L'utilisateur pourra alors par un simple click choisir le générateur dont il souhaite observer les données de la supervision. Pour le choix du générateur de Rio Branco par exemple, il a accès respectivement à leurs pages synoptiques comme présentés à la figure 29.



**Figure 29: Page synoptique du générateur du site de Rio Branco**

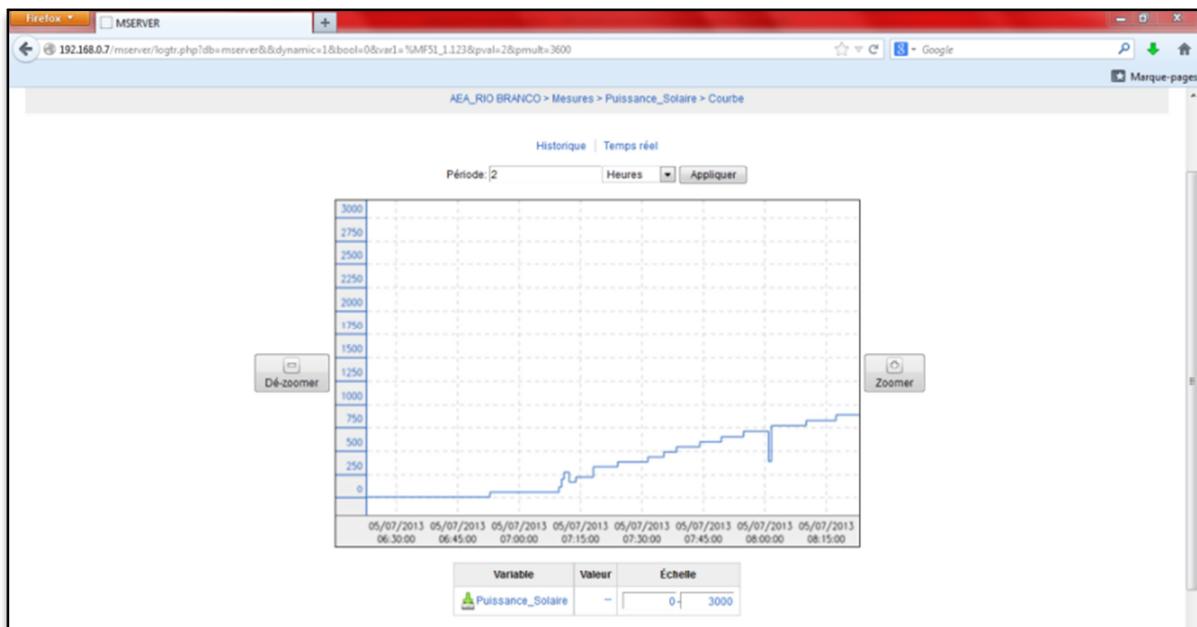
L'icône "Paramètres Généraux" donne accès aux autres paramètres de la supervision à savoir :

- La valeur numérique des autres mesures (Tension, courant, fréquence, facteur de puissance etc..). une visualisation de chacune de ces mesures sous forme de courbe est également possible.
- La liste de tous les défauts relatifs à chaque générateur hybride ainsi que leur état.
- La liste des événements survenus (date et heure d'apparition et de disparition des alarmes de défaut).

Il en est de même pour le second générateur du site de Rancharia.

L'image "Alarm Sytem" en forme de panneau de danger présente sur le synoptique (figure 29) du poste de supervision apparaît sur la page d'accueil et sur la page synoptique d'un générateur hybride lorsqu'un défaut survient sur le générateur en question. Ceci alerte l'utilisateur qui pourra à cet effet consulter la liste des défauts du générateur concerné afin de l'acquitter et de prévoir une intervention sur le générateur.

L'icône de la puissance PV et du SOC batterie par exemple donne accès respectivement aux courbes relatives à ces grandeurs présentées respectivement à la figure 30 et 31. L'accès aux autres courbes est également possible via leur icône.



**Figure 30: Courbe de puissance PV visualisée par  $\mu$ Server pour le site de Rio Branco**

# OPTIMISATION D'UN GENERATEUR HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE SUR BATTERIE LITHIUM ION



Figure 31: Courbe du SOC batterie visualisée par  $\mu$ Server pour le site de Rio Branco

### **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Ce travail a porté sur l'optimisation du générateur hybride PV installé à partir des alimentations électriques autonomes développées par SIREA.

Une partie de nos travaux a été consacré à l'étude expérimentale des batteries d'accumulateurs de type Lithium ion à travers des cycles de charges et de décharges qui a permis de définir la méthode coulombmétrique comme celle appropriée de contrôle de l'état de charge des batteries lithium ion contrairement au batteries plomb.

La seconde partie entrant dans le cadre d'un projet d'installation de deux générateurs hybrides PV au Brésil a permis d'apporter des solutions au pilotage optimale de l'injection de la production PV dans une configuration de "Vente Surplus PV", d'optimiser la gestion d'énergie au sein de ces générateurs pour un pilotage plus efficace des différentes sources d'énergie et de faire fonctionner les équipements en plage optimale.

Le système de supervision à distance de deux générateurs hybrides PV installés favorisent l'archivage des données de chaque générateur pour une exploitation plus efficace ce qui favorise l'amélioration des performances des générateurs.

Les résultats ainsi que les solutions de gestion et d'exploitation efficace apportés aux générateurs hybrides autonomes PV nous amène à définir des perspectives pour ces travaux.

En premier lieu, une étude complémentaire sur les batteries lithium et ceci sous différentes températures d'usage afin d'analyser leur impact sur les cycles de charge et de décharge ainsi que sur la durée de vie de ces accumulateurs.

Ensuite, favoriser l'intégration des différentes mesures d'optimisation proposées et validées dans les configurations d'AEA de 6kW, 9kW.

Enfin, une étude technique et économique de l'alimentation pourrait permettre d'évaluer le prix de revient du kWh produit à partir d'un tel système énergétique pour une optimisation complémentaire de l'alimentation.

A titre personnel, ces mois de stage au sein de l'entreprise SIREA en France, m'ont permis de développer la rigueur au travail que demande le métier d'ingénieur et aussi d'approfondir mes connaissances en automatisme, en technologie solaire photovoltaïque et surtout en suivi des systèmes énergétiques.

**BIBLIOGRAPHIES**

1. Y.Azoumah, D. Yamegueu et al, "Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-saharan Africa: The 'flexy-energy' concept", 2011.
2. Fathia KAROUI "Optimisation de stratégies de gestion des batteries au plomb utilisées dans les systèmes photovoltaïques", Thèse INP Grenoble, 2007.
3. <http://www.aros-solar.com/fr/classification-des-installations-photovoltaïques>
4. Daniel YAMEGUEU.N, "Expérimentation et optimisation d'un prototype de centrale hybride solaire PV/Diesel sans batteries de stockage : Validation du concept FLEXY ENERGY", Thèse, Fondation 2iE, 2011.
5. Mathieu URBAIN, "Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-Ion, Estimation en ligne du SOC et du SOH", Thèse, Nancy-Université, INPL, 2009.
6. Yann RIFFONNEAU, "Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïques avec stockage connecté au réseau : Application à l'habitat", Thèse, Université Joseph Fourier, 2009.
7. Christophe DARRAS, "Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïques/Hydrogène : Applications site isolé, micro réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)", Thèse, Université de CORSE-PASCAL PAOLI, 2011.
8. M. Drif et Al, "Expérimentation d'un contrôleur de l'Etat de charge de la batterie dans un système photovoltaïque autonome.", *Revue Energ.Ren*, 1999.
9. N.Achaïbou, "Introduction à l'Etude du système de stockage dans un système photovoltaïque" *Revue. Energ.Ren*, 1999.
10. DEKKICHE Abdelillah, "Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge", *Maîtrise en Génie de la production automatisée, Université de Québec*, 2008.
11. Bébé M. N. NEUWOUH, "Analyse, Modélisation et simulation des systèmes hybrides PV/Diesel" *Mémoire de Master 2iE*, 2011.
12. HJ Bergveld et al, "Batterie : Adaptive State of Charge Determination", Elsevier B.V, 2009.
13. S.S.Zhang et al, "Charge and discharge characteristics of a commercial LiCoO<sub>2</sub>-based 18650 Li-ion battery", *Journal of power Sciences*, 2006.
14. D. Yamegueu, Y. Azoumah, X. Py, , "Experimental analysis of a solar PV/diesel hybrid system without storage : Focus on its dynamic behavior", 2013.

15. *D.Yamegueu et al, Experimental study of electricity generation by solar PV/diesel systems without battery storage for off-grid areas*’, 2011.
16. *Hoang Anh DANG et al, “Gestion de l’énergie électrique dans l’habitat, cas du stockage électrochimique”*, 2012.
17. *Majid Zandi, “Contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique”*, Thèse, Nancy-Université, INPL, 2010.
18. *Jérémy LAGORSE, “Modélisation, Dimensionnement et Optimisation des systèmes d’alimentation décentralisés à énergie renouvelable-Application des systèmes multi-agents pour la gestion de l’énergie”*, Thèse, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011.
19. *Mohamed Ansoumane CAMARA, “Modélisation du stockage de l’énergie photovoltaïque par supercondensateurs”*, Thèse, Université Paris Est Creteil, 2011.
20. *Dariga MEEKHUN, “Réalisation d’un système de conversion et de gestion de l’énergie d’un système PV pour l’alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l’application aéronautique”*, Thèse, Institut National des Sciences appliquées-Toulouse, 2011.

*Logiciels :*

- *μLadder-SIREA*
- *μControl-SIREA*
- *μConfig-NPE-SIREA*
- *μIHM-SIREA*
- *μServer-SIREA*

**ANNEXES**

*Annexe 1: Avantages et inconvénients des technologies d'accumulateurs électrochimiques [10]*

<b>Technologies d'accumulateurs électrochimiques</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Plomb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible coût</li> <li>- Recharge facile</li> <li>- Autodécharge faible</li> <li>- Recyclage simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très sensibles aux décharges</li> <li>- Densité énergétique faible</li> <li>- Durée de vie faible</li> <li>- Pollution par le plomb en cas de destruction</li> </ul>
<b>Nickel-Cadmium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charge rapide et simple après une longue période de stockage</li> <li>- Performant à basse température</li> <li>- Résistance interne très faible</li> <li>- Faible coût</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité énergétique</li> <li>- Autodécharge assez rapide</li> <li>- Sensibilité à l'effet mémoire</li> <li>- Assez polluant à cause du cadmium</li> </ul>
<b>Nickel-Métal hydrure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité énergétique supérieure au Nickel-Cadmium</li> <li>- Peu d'effet mémoire</li> <li>- Facile à stocker et à transporter</li> <li>- Ne pollue pas comme le Ni-Cd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne supporte pas le dépassement de charge</li> <li>- Détection de fin de charge difficile</li> <li>- Durée de vie plus faible que le Ni-Cd</li> <li>- Coût élevé</li> <li>- Tension faible</li> </ul>
<b>Lithium ion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute densité énergétique</li> <li>- Pas d'effet mémoire</li> <li>- Faible autodécharge (5% par mois)</li> <li>- Grande durée de vie</li> <li>- Large plage d'utilisation en température</li> <li>- Peu de pollution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé</li> <li>- Sensible aux chocs</li> <li>- Nécessite un contrôle de la recharge</li> <li>- Recyclage très technique</li> </ul>

**Annexe 2: Data sheet of Battery Lithium ion**

## Technical Datasheet



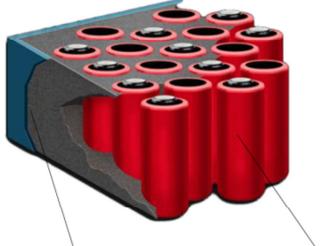
1.3 kWh Li-ion Module

High Energy (HE) and High Power (LFP) Module Data

Specifications	HE-52026	HE-26052	LFP-48026
Nominal Voltage	51.8 V	25.9 V	48.0 V
Nominal Capacity	26 Ah	52Ah	25.6 Ah
Energy	1.3 kWh	1.3 kWh	1.2 kWh
Size*	11 x 9 x 3" 28 x 23 x 8 cm	11 x 9 x 3" 28 x 23 x 8 cm	14.6 x 10.3 x 3" 37 x 26 x 8 cm
Weight*	7.8 kg	7.8 kg	11 kg
Energy Density*			
Volumetric	276 Wh/L	276 Wh/L	180 Wh/L
Gravimetric	170 Wh/kg	170 Wh/kg	109 Wh/kg
Cell Chemistry	NCM	NCM	LiFePO <sub>4</sub>
Operating Specifications			
Operating Voltage	58.8 ~ 40 V	29.4 ~ 20 V	54.0 ~ 37.5 V
Charge Voltage	58.8V	29.4 V	54.0 V
Temperature Range			
Discharge	-20 ~ +60°C	-20 ~ +60°C	-20 ~ +60°C
Charge	0 ~ + 60°C	0 ~ + 60°C	0 ~ + 60°C
Maximum Discharge			
Continuous	26A	52A	52A
Pulse (10ms)	52A	104A	104A
Maximum Charge	13A	26A	26A
Storage Specifications			
Temperature Range	-20 ~ +40°C	-20 ~ +40°C	-20 ~ +32°C
Voltage Range	50.4~53.2V	25.2 ~ 26.6V	47 ~ 49V
Integrated BMS Features			
Overcurrent Cutoff	Overcharge Protection	Overdischarge Protection	
Cell Balancing	High Temperature Cutoff	Short Circuit Protection	



**PCM Material**



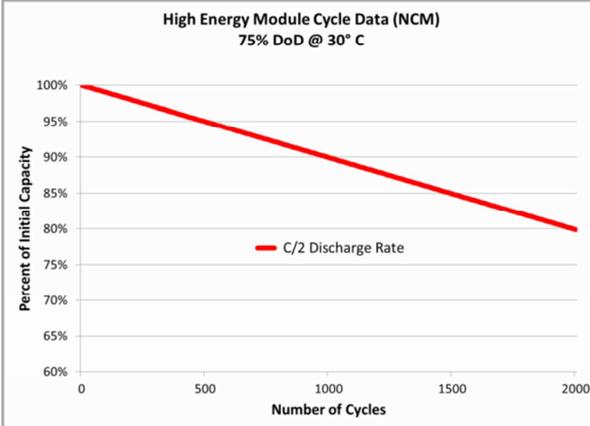
**Li-ion Cells**

AllCell batteries are protected by our proprietary Phase Change Material (PCM). The PCM absorbs waste heat ensuring uniform pack temperature, and has passed the UL 94 V-0 flammability test. The result is industry leading energy density and safety with extended cycle life.

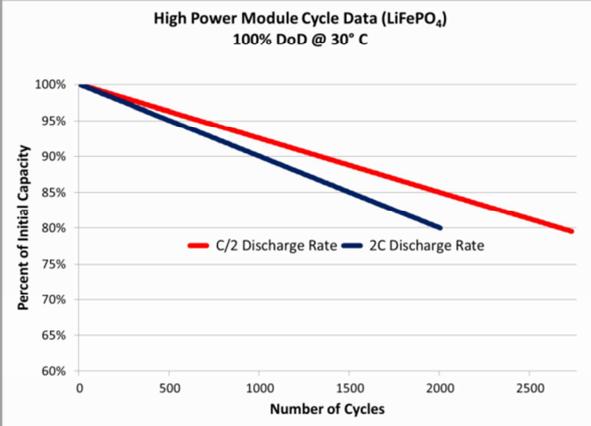



\*Size, weight, and energy density figures calculated without case or enclosure. Customized geometries and case options available upon request.

**High Energy Module Cycle Data (NCM)**  
75% DoD @ 30° C



**High Power Module Cycle Data (LiFePO<sub>4</sub>)**  
100% DoD @ 30° C

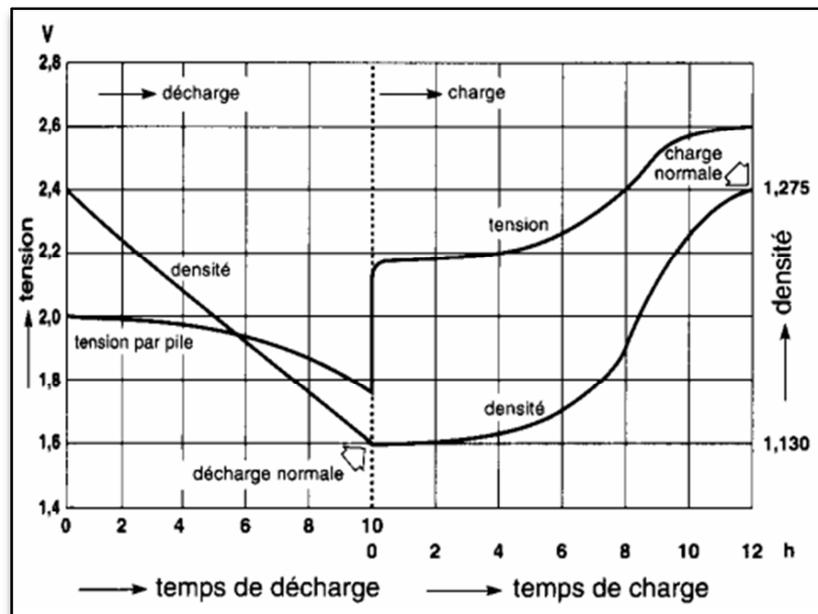


ALL CELL TECHNOLOGIES | 2321 W. 41<sup>st</sup> St. Chicago, IL 60609 | www.allcelltech.com | +1.773.922.1155

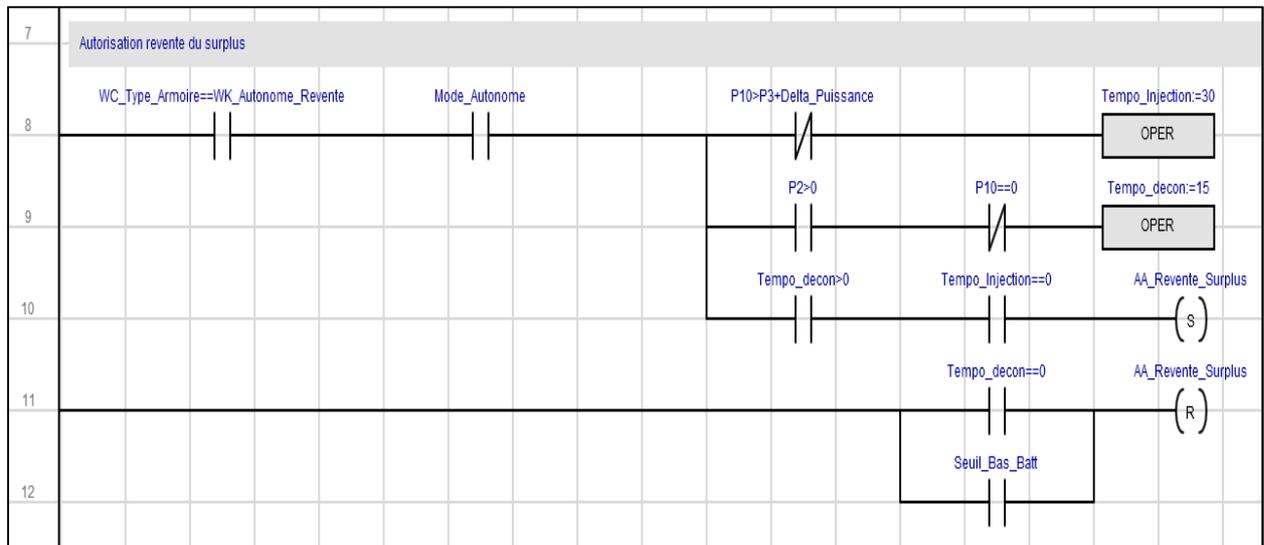
*Annexe 3 : Caractéristiques des transducteurs de mesure des grandeurs de l'AEA*

Type de transducteurs	Multi-paramètres
Valeurs mesurées	U,I,P,Q,F,Cos phi,W
Signal de sortie	RS232 ; RS485
Précision	0,5%
Alimentation	12-24V
Support de communication	Modbus RTU Vitesse : 9600 Bauds Format : 8N1

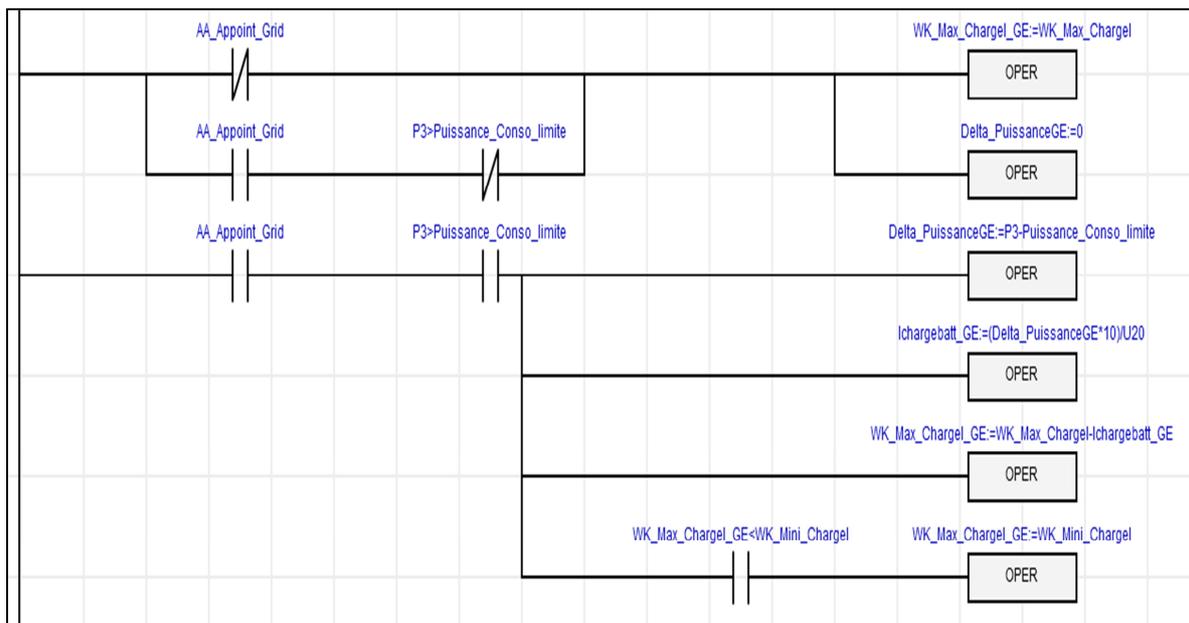
*Annexe 4 : Courbe de charge et de décharge d'accumulateur plomb*



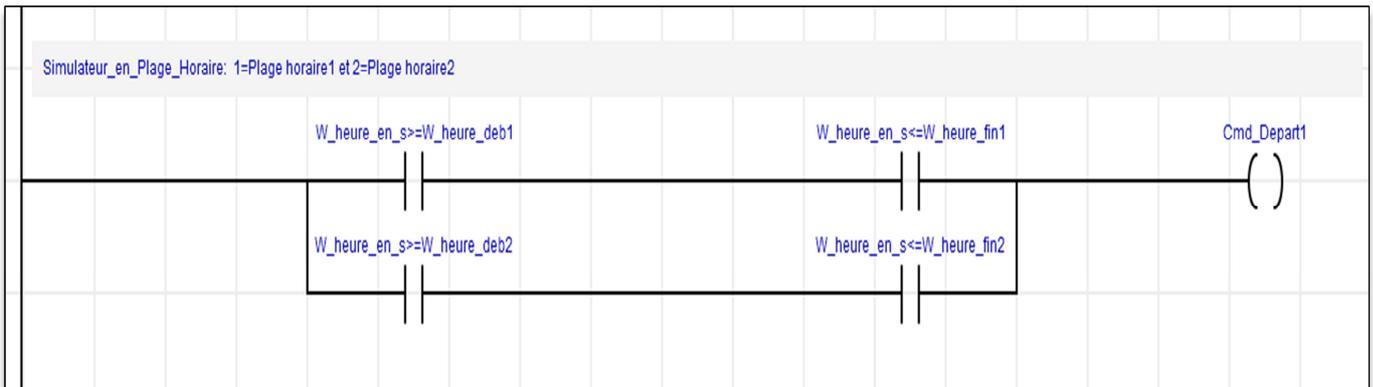
**Annexe 5 : Code programme de pilotage de la vente du surplus de production PV**



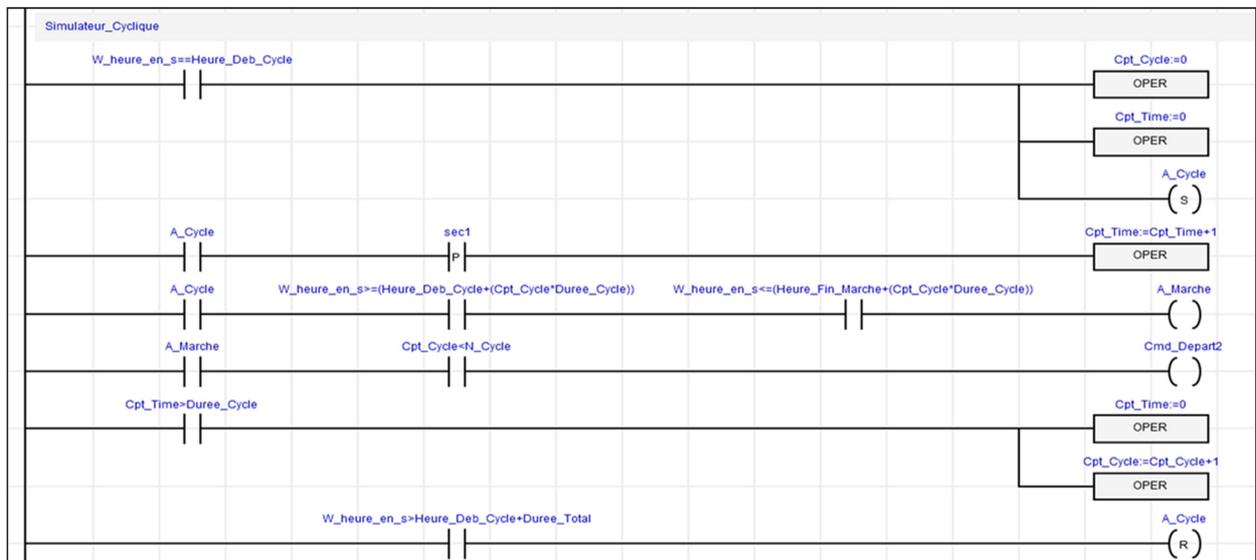
**Annexe 6 : Code programme de régulation du courant maximal de charge de la batterie en mode "Groupe Electrogène"**



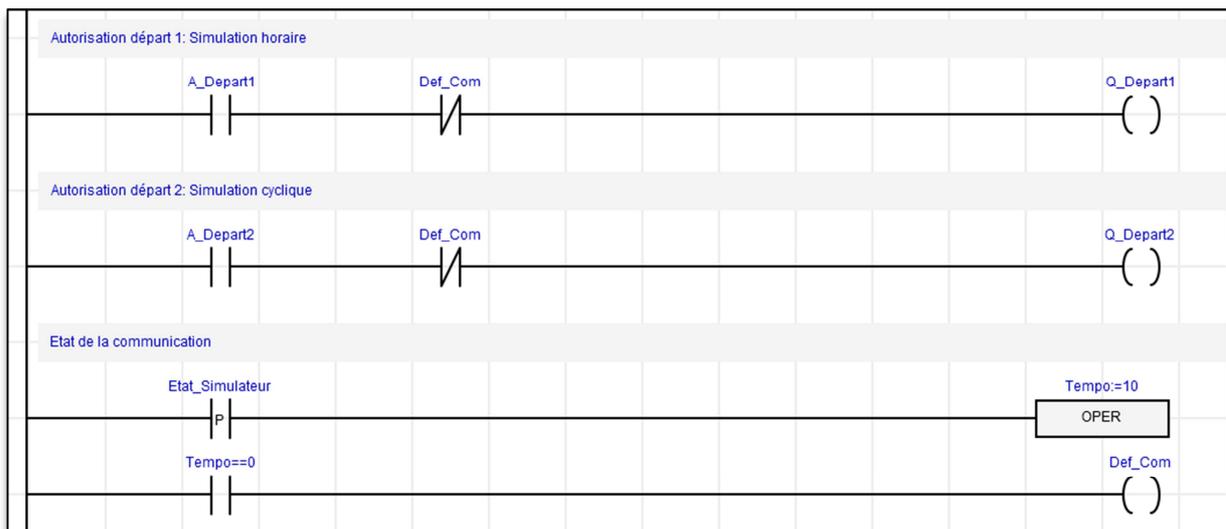
**Annexe 7: Programme de la simulation horaire**



**Annexe 8 : Programme de la simulation cyclique**



**Annexe 9: Programme de la simulation de charge dans l'automate "Esclave" µArm A4**



**Annexe 10: Configuration du port de communication de l'automate "µArma4"**

<b>Numéro d'esclave</b>	<b>6</b>
<b>Port de communication</b>	<b>Port série RS485</b>
<b>Baudrate (Vitesse de la liaison série)</b>	<b>9600</b>
<b>Nombre de bit de données de la liaison série</b>	<b>8</b>
<b>Bit de parité de la liaison série</b>	<b>N</b>
<b>Nombre de bit de stop de la liaison série</b>	<b>1</b>

**Annexe 11 : Script de communication entre les automates "µArma2" et "µArma4"**

```

//Esclave N°6:Simulateur de charge
case 48:
    if (RES_SER2==COM_STATE_READY || RES_SER2>=COM_STATE_ERROR)
    {
        Bit_Vie_Simulateur=!Bit_Vie_Simulateur;
        ModbusWrite(COM_PORT_SER2,0,6,MODBUS_TYPE_MW,1010,3,0,0);
        W_CadCom_2:=49;
    }
    else
    {W_CadCom_2:=0;}
    break;
case 49:
    if (RES_SER2==COM_STATE_READY) {W_CptErr_R2_E6:=0;W_CadCom_2:=0;W_WaitCom_2:=WK_WaitCom_2;}
    if (RES_SER2>=COM_STATE_ERROR) {W_CptErr_R2_E6:=W_CptErr_R2_E6+1;W_CadCom_2:=0;W_WaitCom_2:=WK_WaitCom_2;}
    break;

```

**Annexe 12: Tables des variables de mesures de chaque générateur pour la supervision**

Adresse	Commentaire
%MF51	Puissance PV
%MF120	Tension PV
%MF121	Courant PV
%MF50	Puissance Réseau/GE
%MF100	Tension AC in
%MF101	Courant AC in
%MF105	Fréquence AC in
%MF104	Facteur de puissance AC in
%MF52	Puissance AC out
%MF111	Tension AC out
%MF115	Fréquence AC out
%MF114	Facteur de puissance AC out