



DEVELOPPEMENT D'UNE UNITE DE GESTION ET CONVERSION D'ENERGIE POUR CENTRALE HYBRIDE PV/GE BASEE SUR UNE NOUVELLE ARCHITECTURE PRODUIT

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

Présenté et soutenu publiquement le 03 Novembre 2015 par

Aminata Pignon TRAORE

Travaux dirigés par : Dr Daniel YAMEGUEU

Chef du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie
(LESEE)

Et

Ing Tanguy CADIN

Chargé des projets à SIREA-FRANCE

Jury d'évaluation du stage:

President du jury:

Dr. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE

Membres et correcteurs:

-Dr. Marie SAWADOGO

-Dr. Daniel YAMEGUEU

Promotion [2014/2015]

DEDICACES

*A mon défunt beau-frère Harouna MONE, pour ton inconditionnel accompagnement et la
motivation que tu avais toujours su inculquer en moi.*

*A mes tendres et très chères mères Téné SANOGO, Bibata SANOGO, Settou SANOGO
pour votre bienveillance et vos conseils précieux.*

*A mon papa Mamourou TRAORE, mes oncles Issa KONATE, Issouf KONATE, Blaise
DABIRE, Djibril SANOGO et Jean BONOU pour vos soutiens inconditionnels et pour cette
grande confiance que vous avez toujours eu à mon égard.*

*A mes frères et sœurs Djéné, Emmanuelle, Camille, Bienvenu, Dimitri, Martinien pour vos
encouragements*

REMERCIEMENT

Le présent mémoire est le fruit de 06 mois de travail. Il a été réalisé avec la contribution de plusieurs personnes à qui je tiens à exprimer tous mes sincères remerciements.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Bruno BOUTEILLE, Directeur Général de l'entreprise SIREA pour la confiance qu'il m'a accordée et de m'avoir accueilli une seconde fois au sein de son entreprise. Merci pour le soutien, et la supervision que vous m'avez apporté tout au long de ce stage.

Toute ma reconnaissance à Monsieur Tanguy CADIN, mon maitre de stage pour son encadrement, sa patience et pour le temps qu'il a accepté me consacrer lors du stage malgré son emploi de temps chargé. Son expérience et son savoir-faire m'ont permis de découvrir de nombreuses facettes du métier d'ingénieur.

Je témoigne également toute ma reconnaissance au Dr Daniel YAMEGUEU, mon directeur de Mémoire pour avoir dirigé mes travaux et la confiance dont il a fait preuve à mon égard.

Je remercie spécialement Marie-Claude RIBELLES. Vous n'avez cessé de mettre tout en œuvre afin de faciliter notre intégration à SIREA et en France en général.

Merci à tout le personnel de SIREA pour leurs collaborations ainsi que pour leurs disponibilités lors de tous les échanges effectués durant ces 06 (six) mois de stage. Vous m'avez apporté de nombreuses connaissances dans vos domaines de compétences.

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

L'accès à l'énergie électrique est gage de tout développement économique. Cependant l'approvisionnement en électricité des petites îles isolées, des régions rurales de l'Afrique notamment restent encore une préoccupation à gérer. Par ailleurs, avec l'épuisement des sources d'énergie conventionnelles, des alternatives pour la fourniture d'électricité sont toujours en train d'être développées et optimisées. Les systèmes hybrides apparaissent comme une solution optimale face à cette situation. Ainsi notre travail s'inscrit dans le cadre du développement et de l'optimisation des unités pour des centrales hybrides photovoltaïques dénommées « armoire AEA » conçues et développées par la société SIREA il y'a quelques années. Ces armoires délivrent une alimentation électrique fiabilisée à partir de différentes sources d'énergies d'origine conventionnelles (Réseau ou GE) et renouvelables (PV). Ce développement a consisté à élaborer une nouvelle architecture de ces armoires AEA avec tous les équipements qui lui sont compatibles. Par ailleurs il s'est agi de donner aussi une nouvelle dynamique à la supervision des paramètres de fonctionnement de l'armoire et des paramètres de consommation à travers le développement d'un nouvel IHM via le logiciel μ IHM.

Mots-clés : Unités pour centrales hybrides PV- Nouvelle architecture-Développement-Optimisation

ABSTRACT

Access to electric power stands as a guarantee for any economic development. Yet the electric supply of the small and isolated islands and particularly Africa rural areas still remains a preoccupation to tackle. In addition, the depletion of conventional energy sources demands alternatives for the supply of electricity that are still being developed and optimized. Hybrid systems stand as an optimal solution to handle that. Thus this work is part of the development and optimization of units for hybrid photovoltaic power plants called "autonomous power supplies" (AEA-SIREA) ongoing at SIREA. These units supply a smart power source deriving from various sources of conventional energy origin (Grid or GE) and renewable (PV). This development had as objective to design a new architecture for the AEA units and all the facilities that fit it. Moreover, it aims at giving a new impetus to the supervision of both the unit operating and the consumption parameters through the development of a new HMI via μ HMI software.

Key words: unit for Hybrid PV power plants -New architecture-Development-Optimization

LISTE DES ABREVIATIONS

AC	: Courant Alternatif
AEA	: Alimentation Electrique Autonome
AEH	: Alimentation Electrique Hybride
DC	: Courant continu
DDR	: Dispositif Différentiel Résiduel
EDM	: Electricité De Martinique
GE	: Groupe Electrogène
IHM	: Interface Homme Machine
PV	: Photovoltaïque
LCOE	: Levelized Cost of Energy
N_{MP}	: Nombre de module en parallèle
N_{MS}	: Nombre de module en série
P_c	: Puissance Crête
PR	: Ratio de Performance
SARL	: Société A Responsabilité Limitée
SIREA	: Solution, Ingénierie, Réalisation Electrique et Automatisation
V_{gen}	: Tension nominale du générateur photovoltaïque
V_M	: Tension Nominale d'un module PV

**Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride
PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit**

SOMMAIRE

DEDICACES	i
REMERCIEMENT	ii
RESUME/ABSTRACT.....	iii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
TABLE DES TABLEAUX.....	vii
TABLE DES FIGURES.....	viii
I. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte de l'étude.....	1
1.2. Objectif.....	2
1.3. Méthodologie.....	2
1.4. Présentation de la structure d'accueil	3
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
2.1. Différents types d'unité de conversion.....	4
2.2. Différents types de systèmes hybrides.....	5
2.3. Différentes configurations de systèmes solaires photovoltaïques	6
2.3.1. Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau	6
2.3.2. Systèmes solaires photovoltaïques isolés	7
2.4. Les systèmes de stockage d'énergie électrique	8
2.5. Présentation du système hybride développé par SIREA	8
2.5.1. Onduleur réseau.....	8
2.5.2. Batteries de stockage	9
2.5.3. Dispositifs de protection.....	10
2.5.4. Equipements de mesure des grandeurs électriques	10
2.5.5. Automate programmable.....	10
2.6. La notion du LCOE	12
III. DESCRIPTION DE LA NOUVELLE GAMME AEA/ AEH	13
3.1. Synoptique de la nouvelle architecture des AEA/ AEH.....	13
3.1.1. Caractéristiques de l'onduleur hybride	14
3.1.2. Caractéristiques de l'onduleur Off-Grid	17
3.2. Principe de fonctionnement de la nouvelle gamme des AEA	17

**Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride
PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit**

3.3.	Protection de l'armoire AEA	18
3.3.1.	Protection de la partie photovoltaïque.....	18
3.2.2.	Protection de la partie AC IN	24
3.2.3.	Protection de la partie AC OUT	27
3.2.4.	Protection de la partie batterie.....	27
3.4.	Logique de programmation de l'armoire pour la gestion du flux d'énergie	28
3.4.1.	Options de gestion du flux	28
3.4.2.	Interface graphique.....	32
IV.	DEVELOPPEMENT DU PROTOTYPE.....	35
V.	TEST FONCTIONEL	37
VI.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	39
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40
	ANNEXES	42

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison des caractéristiques de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques [3]	9
Tableau 2: Caractéristique de l'automate μ Arm4	16
Tableau 3: Calcul de l' Uocmax pour différentes regions	21
Tableau 4: Calcul de l' Iscmax pour différentes régions	22
Tableau 5: Caractéristiques de l'automate " μ ArmA2" de l'AEA de base	32
Tableau 6: Caractéristiques de l'automate μ ArmA8 de la nouvelle architecture de l'AEA	32

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Formes d'énergie et moyens de conversion [www.energieplanete.fr]	5
Figure 2: Système PV couplé au réseau avec injection totale	6
Figure 3: Système PV couplé au réseau avec injection du surplus de production PV	7
Figure 4: Performances de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques [3].	9
Figure 5: Transducteurs de mesure SIREA	10
Figure 6: Alimentation Electrique Autonome (AEA)	11
Figure 7: Architecture de l'AEA de base	11
Figure 8: Hypothèse N°1 de la nouvelle architecture des AEA	13
Figure 9: Hypothèse N°2 de la nouvelle architecture des AEA	14
Figure 10: Carte modbus de l'onduleur hybride	15
Figure 11: Automate μ Arm4	16
Figure 12: Automate μ ArmA2	32
Figure 13: Automate μ ArmA8	32
Figure 14: synoptique de l'IHM de l'AEA DE BASE	33
Figure 15: synoptique de l'IHM de la nouvelle architecture de l'AEA	34
Figure 16: Armoire de 9 kW d'EDM	35
Figure 17: Schéma unifilaire d'EDM	36
Figure 18: Maquette pour test de la nouvelle gamme AEA	37

I. INTRODUCTION

1.1. Contexte de l'étude

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se reconstitue plus rapidement qu'elle n'est consommée. Elle est de ce fait considérée comme une source inépuisable. Ces dernières années, les énergies renouvelables font l'objet d'un regain d'intérêt. La cause principale de cet essor se cache derrière les pronostics d'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la Planète : pétrole, gaz naturel, charbon et même l'uranium. En outre, en plus de la pollution qu'elle génère, la production d'électricité à partir des énergies conventionnelles se fait généralement de façon centralisée. La fourniture de cette électricité aux consommateurs impose une mise en place de réseaux de transport et de distribution qui nécessitent de lourds coûts d'investissement surtout dans les zones rurales [1]. Ainsi, les techniques de production d'électricité étant jusque-là principalement basées sur les énergies conventionnelles, une partie considérable de l'humanité notamment l'Afrique sub-saharienne n'a pas accès à l'électricité et cela constitue un problème majeur à leur développement [2].

Par ailleurs, les énergies renouvelables comme le soleil et le vent, offrent plus de flexibilité à une production autonome et décentralisée de l'électricité. Cependant, elles sont intermittentes. Une combinaison de l'utilisation de ces deux types d'énergie paraît être une solution adéquate. En effet elle permet d'assurer une production continue de l'électricité en tenant compte de l'épuisement des sources d'énergies conventionnelles, de l'augmentation de leur coût et des émissions polluantes dues à leur utilisation. Elle tient également compte du caractère intermittent des sources d'énergies renouvelables susmentionnées ainsi que de leur flexibilité à la production autonome. C'est ainsi que sont nés des systèmes hybrides. On peut citer : le système éolien-photovoltaïque-groupe électrogène, éolien-photovoltaïque-réseau, éolien-réseau, photovoltaïque-groupe électrogène, photovoltaïque-réseau, etc. Les deux derniers sont davantage les plus développés car d'une part, l'installation des panneaux photovoltaïques n'est pas confrontée aux polémiques environnementales en Europe contrairement à l'implantation des éoliennes. D'autre part, l'Afrique subsaharienne a un fort potentiel solaire allant de 4 à 6 kWh/m²/j [3]. Les centrales hybrides photovoltaïque-groupe électrogène ou photovoltaïque-réseau paraissent donc être le système qui peut répondre à la fois à une part des besoins énergétiques de la plupart des pays européens et africains.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

C'est dans cette vision que SIREA a développé une gamme de produits d'alimentation électrique autonome et hybride (AEA/ AEH) qui permet de fournir une électricité fiable en utilisant à la fois le PV et le groupe électrogène ou le réseau. Des travaux d'optimisation antérieurs sur les AEA/AEH ont permis de caractériser la batterie lithium-ion pour le stockage de l'énergie, d'optimiser la gestion du flux d'énergie et enfin de faciliter l'exploitation à distance de ces alimentations. C'est dans le but d'optimiser toujours ces alimentations autonomes que s'inscrit notre thème d'étude intitulé : « Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit ».

1.2.Objectif

Depuis sa mise en œuvre, les armoires AEA (Alimentation Electrique Autonome) / AEH (Alimentation Electrique Hybride) sont conçues en fonction de chaque client. De ce fait, l'objectif visé par notre étude a été de développer la gamme de base des AEA/ AEH en la standardisant selon une nouvelle architecture de produit. Spécifiquement il s'agissait de :

- Concevoir un bloc fonctionnel d'armoire adaptable à toute utilisation ;
- Valider techniquement les fonctionnalités des nouveaux équipements qui seront utilisés ;
- Mettre à jour les protections des armoires AEA selon les normes ;
- Donner plus de fonctionnalité au niveau de l'IHM de l'armoire en faisant évoluer la gamme de la carte automate pour une gestion plus optimale du flux d'énergie ;
- Mettre en place un prototype de la nouvelle architecture de la gamme AEA proposée afin de valider le modèle.

1.3.Méthodologie

Dans le souci de bien mener cette étude et d'atteindre les différents objectifs fixés, la démarche suivante a été suivie :

- Une étude bibliographique sur les systèmes de conversion et de stockage de l'énergie, sur les différents types de centrales hybrides et sur le concept du LCOE ;
- Des propositions de configuration de la nouvelle architecture avec toutes les protections requises ;

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

- La validation de la communication et de la table d'adresse des onduleurs utilisés;
- L'élaboration d'une logique de programmation pour la gestion optimale du flux d'énergie et la réalisation de test fonctionnel du programme établi;
- La mise en place d'un prototype de la configuration adoptée ;

Cette méthodologie nous a conduits à des résultats qui ont été par la suite analysés. Enfin des recommandations et quelques perspectives ont été formulées.

1.4.Présentation de la structure d'accueil

SIREA (Solution, Ingénierie, Réalisation Electrique et Automatismes) est une SARL (Société À Responsabilité Limitée). Elle est domiciliée au 69 Rue de l'Industrie, ZI de Mélou 81100 à Castres en France avec Monsieur Bruno BOUTEILLE comme Directeur Général.

Créé en 1994 par Monsieur Bruno BOUTEILLE et ayant développé des projets dans plus de vingt pays pour plus de deux cents clients, SIREA est reconnu pour son expertise technique et son savoir-faire professionnel dans les domaines de l'électricité, de l'automatisme, de l'électronique et de l'informatique.

Dans le but d'étendre le plus possible ses services, SIREA a créé plusieurs branches d'activité que sont : SIREA énergie, SIREA carrière, SIREA santé, SIREA environnement et SIREA industrie. Respectivement pour chacune de ces branches ci-dessus, plusieurs produits ont été développés à savoir :

- des produits pour le contrôle, la maîtrise des consommations énergétiques et pour le suivi de la performance des installations photovoltaïques,
- la réalisation d'installations d'automatismes, parfaitement adaptées aux métiers de la carrière et des mines, pour l'industrie minière,
- Le contrôle et la télégestion des fluides médicaux,
- la mise en œuvre de solutions de télémétrie, de supervision, d'automatismes ou de contrôle à distance avec des capteurs,
- des installations et des raccordements sur site avec des maintenances périodiques sur les équipements livrés, des études et des réalisations d'équipements pour la protection des installations contre la foudre.

En somme, SIREA s'investit dans le développement des énergies renouvelables telles que le photovoltaïque ou les installations solaires hybrides, dans la conception, la fabrication des capteurs et des automates programmables ainsi que dans le développement des équipements de supervision ou de télégestion de systèmes industriels.

II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le but de mieux cerner les principaux aspects du thème mentionné ci-dessus et qui a fait l'objet de notre étude, une synthèse bibliographique a été élaborée. Dans une première partie, une présentation de quelques types d'unité de conversion a été faite. Ensuite une énumération de quelques centrales a précédé les différentes configurations des systèmes solaires. Enfin, les systèmes de stockage d'énergie, les générateurs hybrides de SIREA et le concept du LCOE (coût moyen actualisé de l'électricité) ont été présentés.

2.1. Différents types d'unité de conversion

L'énergie existe sous plusieurs formes qui sont notamment : énergie rayonnante, énergie chimique, énergie mécanique, énergie électrique, énergie thermique, énergie nucléaire.

Pour passer d'une forme à une autre, on utilise des systèmes de conversion d'énergie (Figure 1). Par exemple, pour passer de l'énergie nucléaire à l'énergie thermique, on utilise des réacteurs nucléaires. L'énergie électrique peut être obtenue entre autre en convertissant de l'énergie rayonnante via les convertisseurs photovoltaïques ou en convertissant de l'énergie mécanique par un générateur électrique. Cette énergie mécanique résulte de la transformation de l'énergie chimique, thermique ou hydraulique respectivement par explosions, par des turbines ou moteurs thermiques et par des turbines électriques.

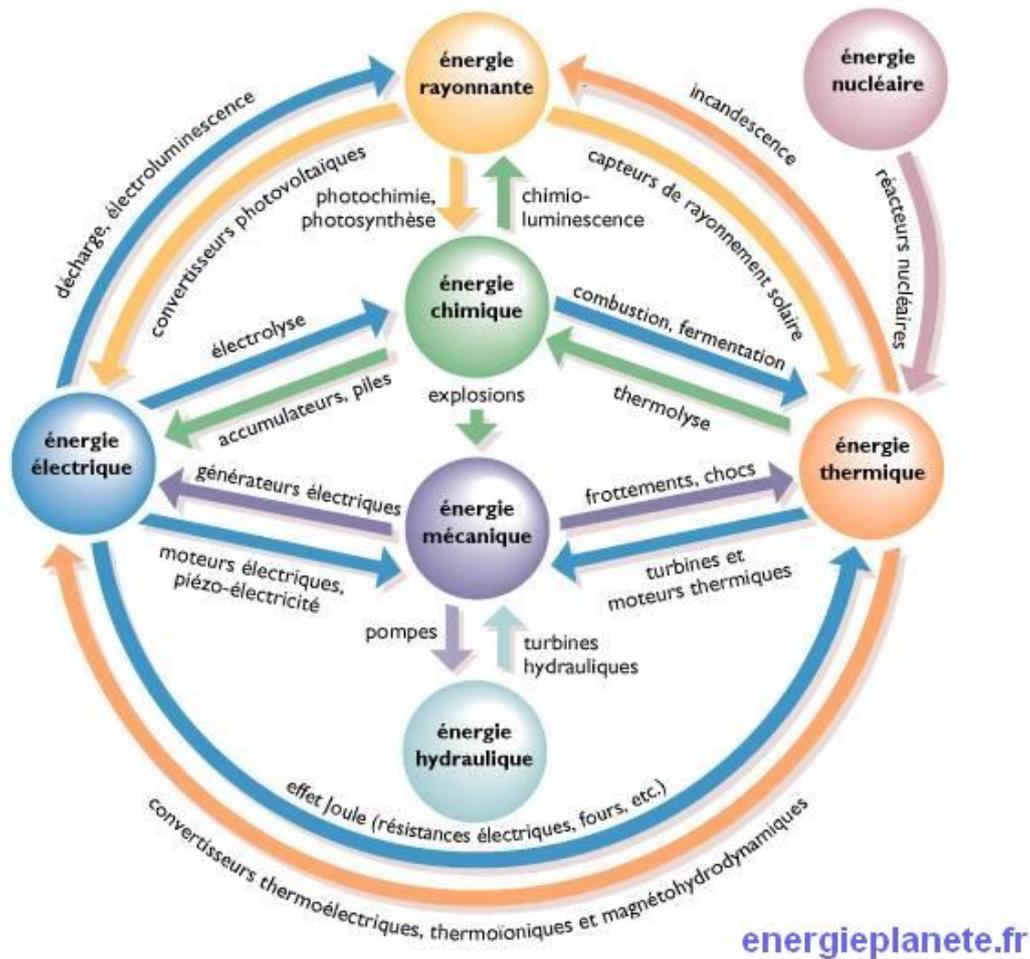


Figure 1: Formes d'énergie et moyens de conversion [www.energieplanete.fr]

Dans le système qui est soumis à notre étude, trois formes d'énergie sont converties pour fournir une énergie finale qu'est l'énergie électrique. Ces trois formes d'énergie sont :

- L'énergie rayonnante issue du soleil ;
- L'énergie chimique provenant des batteries ;
- et l'énergie mécanique provenant des groupes électrogènes.

Utilisant à la fois une source d'énergie renouvelable (le soleil) et une source d'énergie conventionnelle (pétrole) pour la production d'électricité, notre unité de gestion et de conversion est donc qualifiée d'unité hybride de production d'électricité.

2.2. Différents types de systèmes hybrides

Un système hybride de production d'électricité est un système qui combine et exploite plusieurs sources d'énergie de différents types, disponibles et facilement mobilisables. Plusieurs combinaisons de sources d'énergie sont possibles à savoir: éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, et éolien-photovoltaïque-diesel. Ces mêmes sources d'énergie peuvent être combinées avec d'autres sources telles que l'énergie hydraulique. Le système auquel nous

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

nous sommes intéressés est la combinaison du photovoltaïque avec un groupe électrogène ou avec le réseau national d'électricité en passant par un stockage électrochimique. Ce type de combinaison suscite de plus en plus une attention croissante car les systèmes PV sont à la fois un complément rentable et écologique aux systèmes diesels.

2.3. Différentes configurations de systèmes solaires photovoltaïques

Un système solaire photovoltaïque est un ensemble qui produit de l'énergie électrique grâce à des modules solaires photovoltaïques exposés au soleil [11]. Les systèmes photovoltaïques se divisent en deux groupes:

- Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) couplés au réseau ;
- Les systèmes solaires photovoltaïques isolés.

2.3.1. Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau

Les systèmes PV connectés au réseau sont les systèmes qui sont reliés en parallèle au réseau d'électricité publique. Ils peuvent soutirer de l'électricité du réseau tout comme ils peuvent aussi injecter ou pas leur production. L'injection de la production peut être totale ou partielle.

a. Systèmes photovoltaïques couplés au réseau avec injection totale

Dans cette option, toute la production PV est directement injectée sur le réseau et trois compteurs d'énergie sont utilisés :

- Un compteur de production d'énergie pour comptabiliser l'énergie PV produite par le consommateur ;
- Un compteur de consommation d'énergie pour comptabiliser l'énergie achetée par le consommateur au fournisseur ;
- Et un compteur de non consommation pour que le fournisseur d'énergie s'assure de la non consommation par le client de l'énergie PV produite.

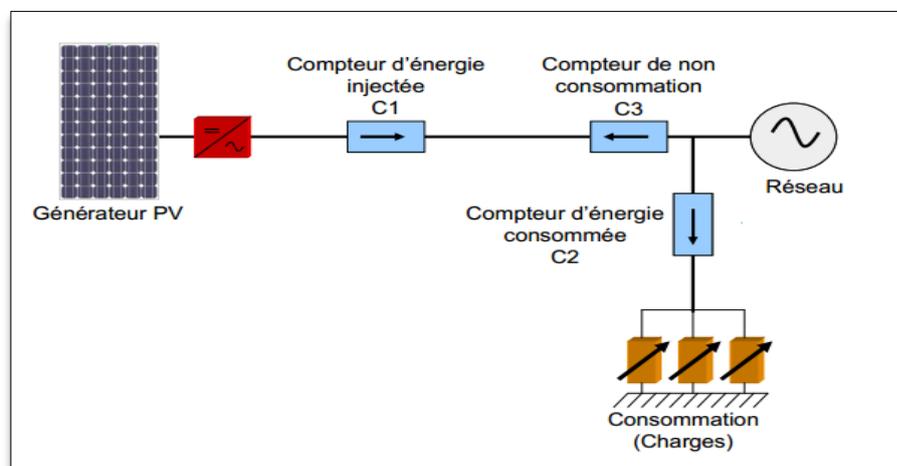


Figure 2: Système PV couplé au réseau avec injection totale

b. Systèmes photovoltaïques couplés au réseau avec injection du surplus de production PV

Pour ce système, l'énergie PV produite alimente prioritairement les charges. Lorsque la production est supérieure à la consommation, le surplus est injecté sur le réseau. Mais lorsque la consommation est supérieure à la production, le réseau sert d'appoint. Deux compteurs sont alors utilisés :

- Un compteur de consommation d'énergie ;
- Un compteur de production d'énergie PV.

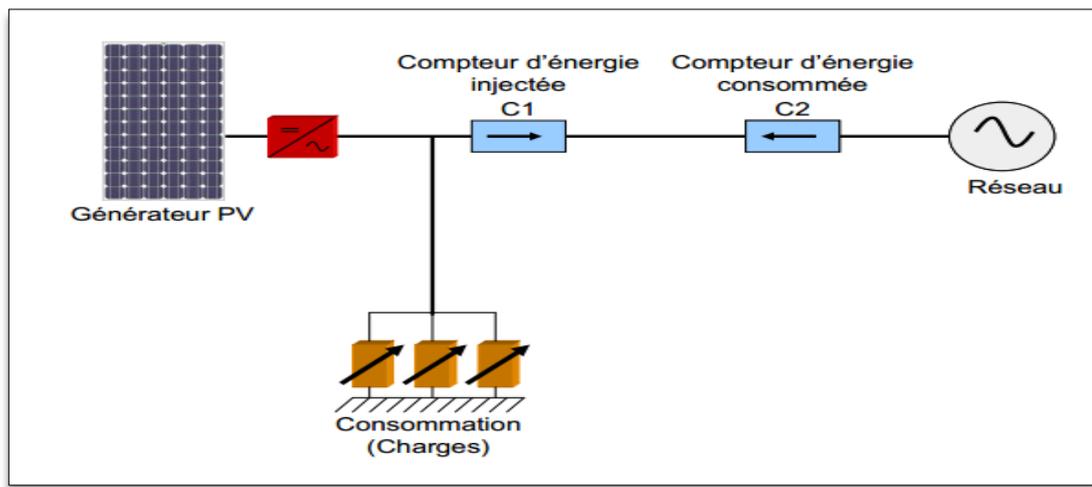


Figure 3: Système PV couplé au réseau avec injection du surplus de production PV

c. Systèmes photovoltaïques couplés au réseau sans injection

Encore appelé système d'auto consommation, ce système utilise toute la production PV pour alimenter les charges. Il intègre un dispositif de stockage d'énergie permettant de gérer au mieux l'énergie PV produite aux heures de fortes productions. Aucune injection sur le réseau n'est faite mais ce dernier est utilisé comme appoint en cas de déficit de la production PV.

2.3.2. Systèmes solaires photovoltaïques isolés

Ce sont des systèmes qui sont conçus pour l'alimentation des sites isolés du réseau électrique. Ces systèmes constituent donc une solution au problème de non accès à l'électricité dans certaines régions dû à une faible présence des infrastructures de réseaux électriques. Ces régions sont entre autres les villages dispersés, les montagnes, les îles où la construction des lignes électriques nécessite des coûts exorbitants.

En plus de l'utilisation du PV comme la seule source d'énergie (systèmes solaires photovoltaïques isolés autonomes), un groupe électrogène peut être associé. Dans ce cas, on parle de systèmes solaires photovoltaïques autonomes hybrides. Des dispositifs de stockage d'énergie sont également utilisés dans ces systèmes afin de mieux gérer la production d'énergie PV.

2.4. Les systèmes de stockage d'énergie électrique

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie qui ne peuvent être stockées facilement sous sa forme électrique. Pour ce faire, il est indispensable de passer par des formes d'énergie intermédiaires de stockage qui sont déjà technologiquement matures [15]. Ce sont notamment:

- Energie gravitaire pour un système de pompage ;
- Energie thermique pour un système de chaleur latente ou sensible ;
- Energie chimique dans un système d'accumulateurs électrochimiques.

Le stockage électrochimique est la technique de stockage la plus largement employée dans les applications solaires photovoltaïques. Il permet de lisser les pointes et les creux de production de l'énergie photovoltaïque qui est une énergie renouvelable à source intermittente.

Les principales technologies utilisées actuellement pour le stockage électrochimique sont les technologies plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-métal hydrure et lithium-ion. Selon les résultats de quelques travaux d'optimisation qui ont été réalisés sur les générateurs hybrides PV/GE et plus spécifiquement sur la caractérisation des batteries d'accumulateurs, il ressort que la technologie Lithium-ion est celle qui offre jusque-là plus de performance énergétique par rapport aux autres technologies citées ci-dessus [3].

2.5. Présentation du système hybride développé par SIREA

Les Alimentations Electriques Autonomes (AEA) et les Alimentations Electriques Hybrides (AEH) sont les générateurs autonomes et hybrides développés par SIREA. Ils utilisent à la fois la source d'énergie conventionnelle : le réseau ou le groupe électrogène, et une source d'énergie renouvelable qui est le photovoltaïque, le tout mixé avec stockage d'énergie par des batteries de technologie Lithium-ion.

Les AEA assurent une alimentation en monophasé 230 V/ 50 Hz pour des puissances allant de 3 à 9 kW. Quant aux AEH, ils fournissent une alimentation en triphasé 400 V / 50 Hz pour des puissances pouvant être beaucoup plus élevées. Les AEH sont généralement obtenues par l'association de plusieurs AEA. Les AEA sont composées de :

2.5.1. Onduleur réseau

Les onduleurs réseaux utilisés dans les générateurs AEA sont des onduleurs à quatre bornes de connexion :

- Une borne *connexion entrée PV* ;
- Une borne *connexion batterie* ;
- Une borne *connexion réseau électrique* ;
- Une borne *connexion charge*.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

2.5.2. Batteries de stockage

Les batteries utilisées dans les AEA pour le stockage de l'énergie sont de type lithium ion. Le choix s'est porté sur cette technologie à cause de sa haute performance énergétique (Figure 4 et Tableau 1).

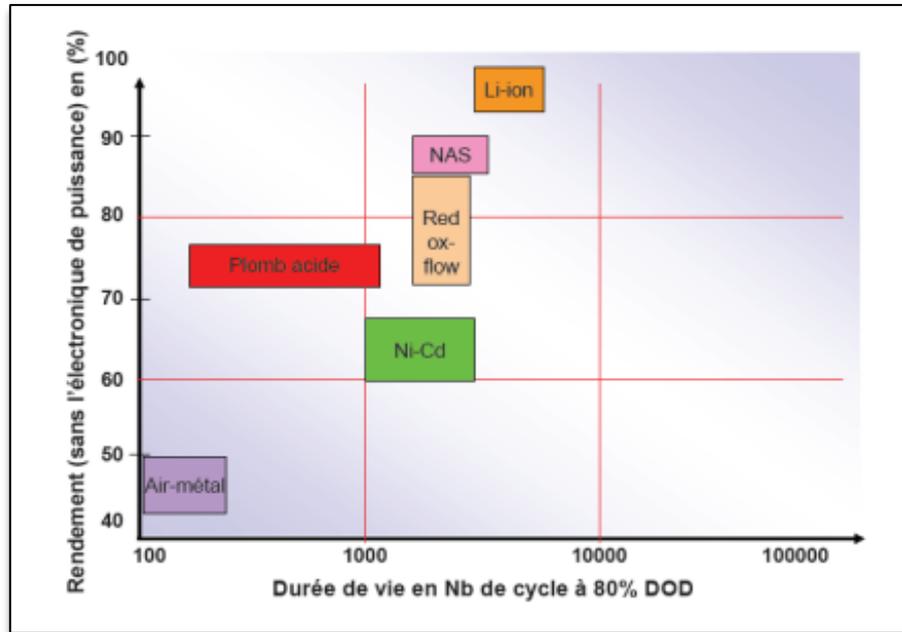


Figure 4: Performances de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques [3].

Tableau 1: Comparaison des caractéristiques de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques [3]

Technologies d'accumulateurs électrochimiques	Energie spécifique (Wh.kg-1)	Rendement énergétique (%)	Plage d'utilisation en température	Profondeur de décharge tolérée (DOD)	Durée de vie (Nombre de cycles)	Coût (€.kWh-1)
Plomb (Pb)	30-40	> 80	-20°C à 50°C	50%	500-1000	150-250
Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	45-80	75	-40°C à 60°C	75%	800	600
Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)	60-90	70	-20°C à 60°C	75%	750-1000	500-1000
Lithium ion (Li-ion)	120-200	>90	-30°C à 60°C	80%	>2000	500-1000

2.5.3. Dispositifs de protection

Les principaux dispositifs de protection intégrés dans les AEA sont : des disjoncteurs, des fusibles, des parafoudres, des sectionneurs.

2.5.4. Equipements de mesure des grandeurs électriques

Les équipements de mesures utilisés dans les AEA sont des transducteurs multi paramètres AC et DC (Figure 5). Ce sont des produits qui sont développés par SIREA elle-même. Ils mesurent les grandeurs électriques de la consommation et de chacun des sources d'énergie de l'AEA que sont :

- Le PV ;
- Le réseau ou le GE ;
- La batterie.



Figure 5: Transducteurs de mesure SIREA

2.5.5. Automate programmable

L'automate programmable est l'équipement qui, à partir des données de mesures des transducteurs et des paramètres des onduleurs, des batteries, du groupe électrogène ou du réseau, permet d'assurer le pilotage de tous les équipements des générateurs AEA. Ce pilotage favorise une gestion optimale du flux d'énergie ainsi qu'un fonctionnement optimal des différentes sources d'énergie.

C'est en partant de la configuration de base des gammes AEA (Figure 6 et Figure 7) qu'une nouvelle architecture des produits de gamme AEA a été envisagée. Dans cette nouvelle architecture également, plusieurs options de gestions du flux ont été envisagées. Ces options sont à valider par une étude technico-économique. La validation technique doit découler des tests fonctionnels et des dispositions réglementaires notamment la norme UTE C15-712-2 relative aux installations photovoltaïques. Quant à l'étude économique, elle est basée sur le LCOE.



Figure 6: Alimentation Electrique Autonome (AEA)

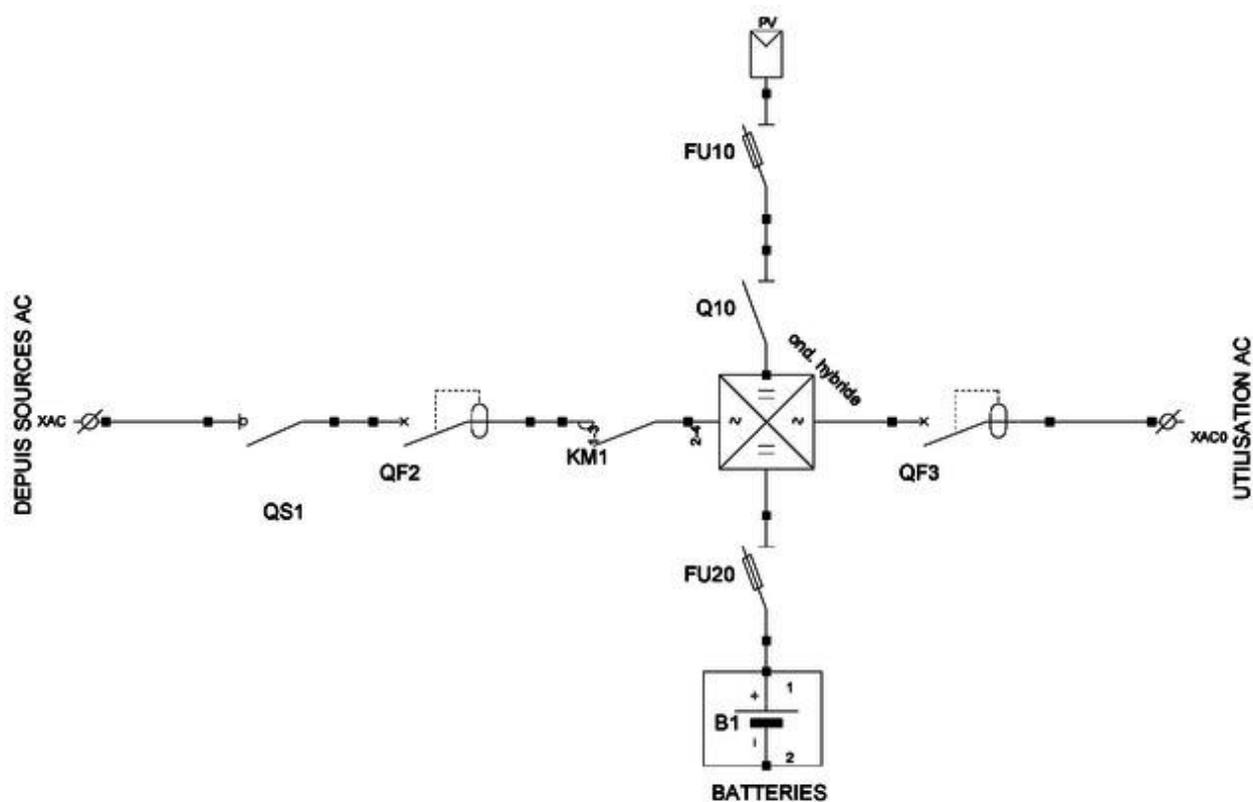


Figure 7: Architecture de l'AEA de base

2.6. La notion du LCOE

Levelized Cost of Energy (LCOE), ou coût moyen actualisé de l'électricité, est l'un des indicateurs les plus utilisés pour évaluer l'aspect économique des différentes technologies de production d'énergie notamment les centrales hybrides. Il se base sur un calcul du coût de production d'électricité pendant toute la durée de vie des systèmes contrairement aux autres modèles qui ne font qu'une estimation annuelle des coûts. Il est obtenu en divisant le coût total de cycle de vie du projet par l'énergie totale générée par l'installation au cours de la durée du projet. Le LCOE est équivalent au revenu minimum qui est attendu par kWh d'énergie générée par le système et qui égalise les revenus de la vente aux dépenses faites dans le système.

Les différents facteurs du LCOE sont très variables. Le calcul du LCOE intègre principalement les paramètres que sont :

- La durée de vie du système ;
- Le cout d'investissement ;
- La valeur résiduelle des équipements à la fin de la durée du projet ;
- Le coût de maintenance et d'opération ;
- Le coût de remplacement des équipements ;
- Le taux d'actualisation réel prenant en compte le taux d'intérêt, le taux d'inflation et l'indexation.

L'expression générale du LCOE est la suivante [12] :

$$LCOE = \frac{\text{Coût total de cycle de vie}}{\text{Energie totale produite}} \quad (1)$$

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^N \left[\frac{OPEX}{(1+r)^t} \right]}{\sum_{t=1}^N \left[\frac{Q_t}{(1+r)^t} \right]} \quad (2)$$

Avec :

CAPEX: Capitaux d'investissement

OPEX: Coût d'investissement annuel

Q_t: Production annuelle d'énergie

r: taux d'actualisation

N: durée de vie du système

III. DESCRIPTION DE LA NOUVELLE GAMME AEA/ AEH

3.1. Synoptique de la nouvelle architecture des AEA/ AEH

La particularité de la nouvelle gamme des armoires AEA se situe principalement au niveau de la partie conversion de l'énergie. Contrairement à la gamme AEA de base où la conversion d'énergie est assurée par un seul onduleur, dans la nouvelle architecture c'est plutôt deux. Il s'agit d'un onduleur hybride et d'un onduleur Off-Grid. Des hypothèses de montage des deux onduleurs ont été émises au fur et à mesure de l'avancement de notre étude. Les Figure 8 et Figure 9 illustrent les différentes hypothèses de montage. Dans l'hypothèse N°1, l'injection de la production énergétique issue de l'onduleur hybride sur le réseau est prévue en aval de l'onduleur Off-Grid. Dans l'hypothèse N°2, cette injection est plutôt prévue en amont.

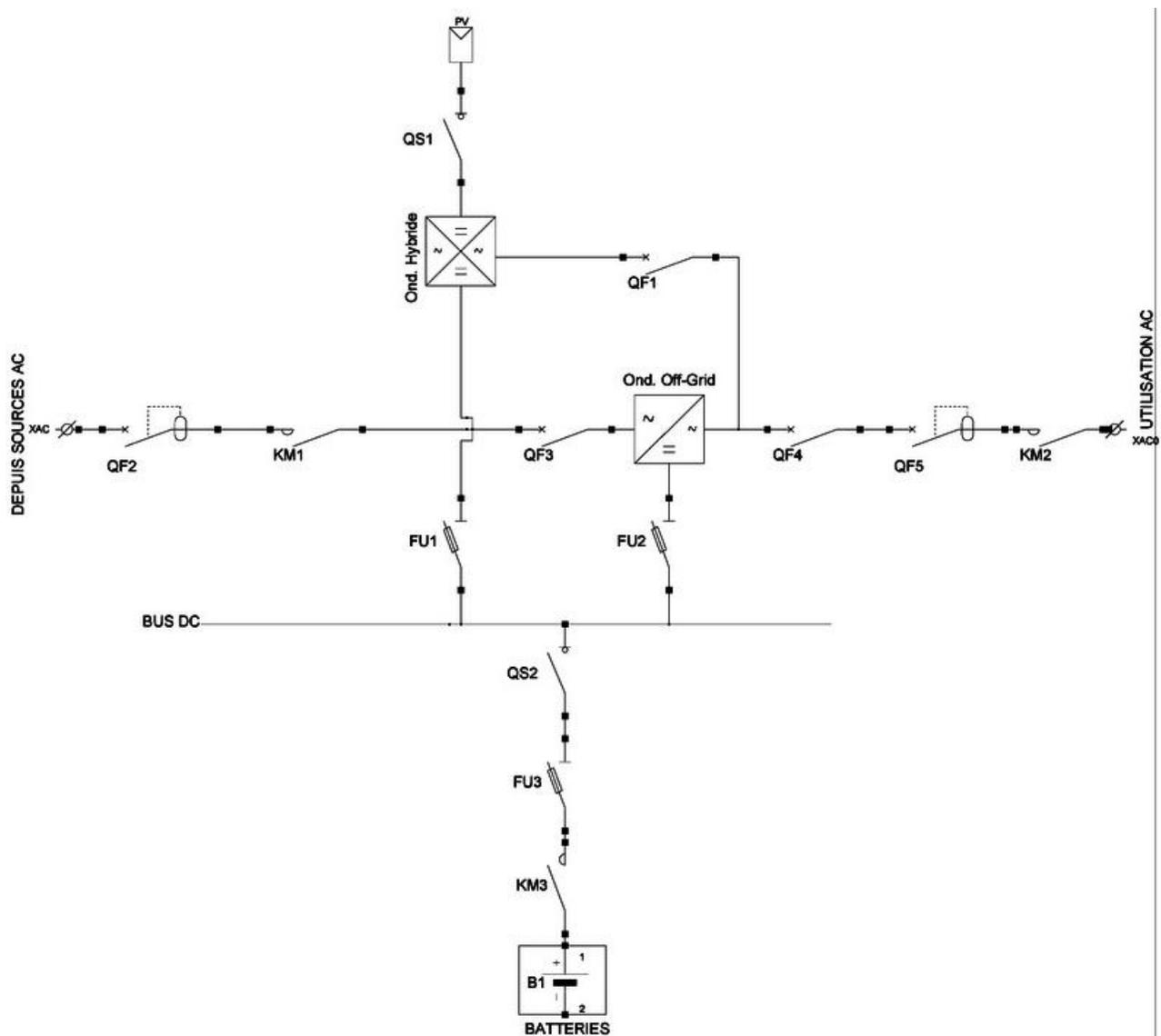


Figure 8: Hypothèse N°1 de la nouvelle architecture des AEA

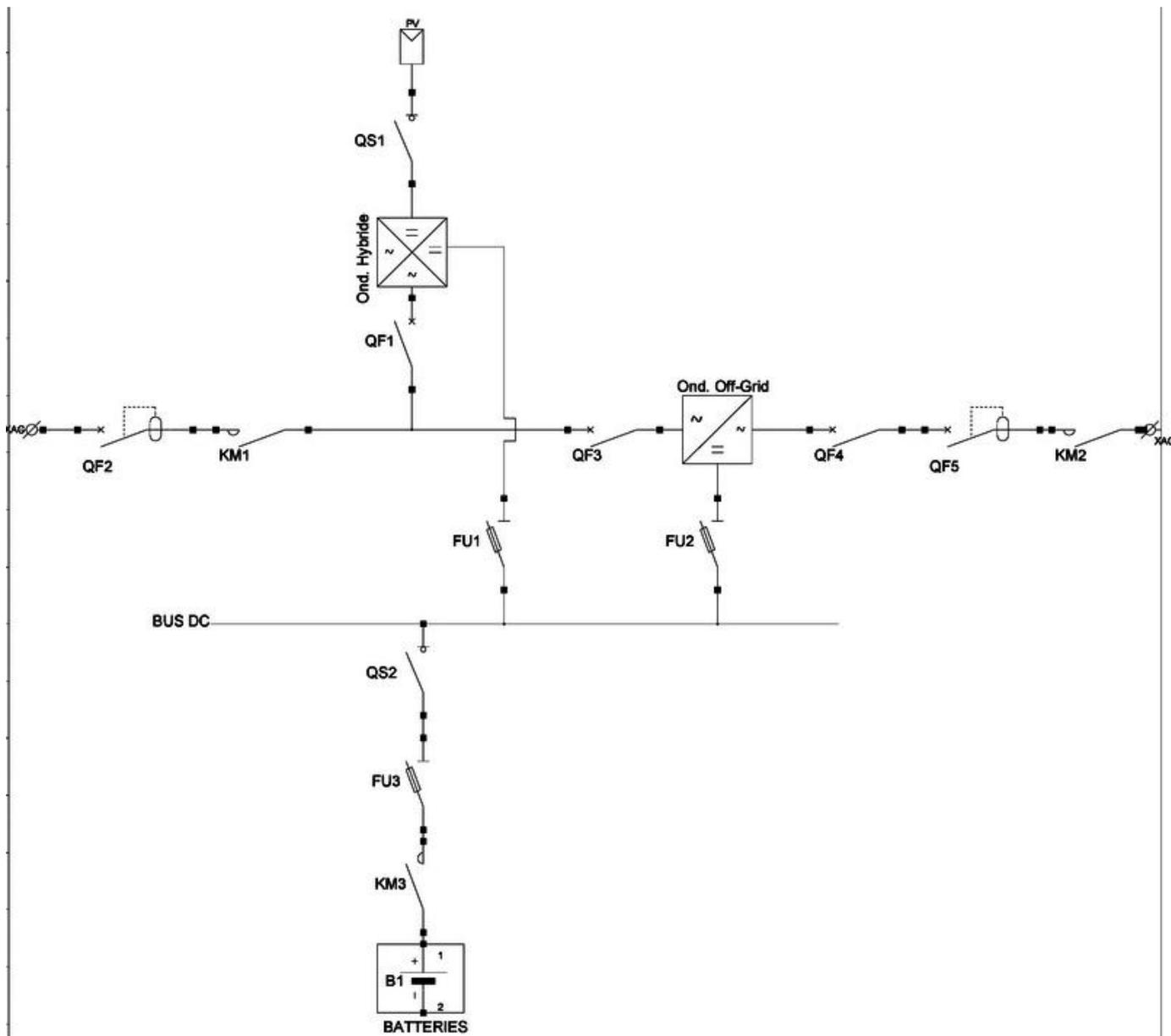


Figure 9: Hypothèse N°2 de la nouvelle architecture des AEA

3.1.1. Caractéristiques de l'onduleur hybride

Un onduleur hybride de 3 kW de puissance électrique est l'un des deux onduleurs qui sont utilisés dans la nouvelle architecture des AEA. C'est un onduleur réseau et chargeur à quatre points de connexion :

- Connexion PV ;
- Connexion réseau ;
- Connexion batterie ;

- Et la connexion charge.

Il est très adapté pour l'injection réseau. Cependant son courant de charge batterie n'est pas très élevé (25 A). De plus il n'est pas possible d'en mettre plusieurs en parallèle pour l'alimentation des charges.

En plus des informations collectées à partir du document technique de l'onduleur hybride, des tests ont été effectués afin de cerner les différentes options possibles de pilotage de cet onduleur ainsi que les moyens pour le faire. La communication avec cet onduleur peut se faire via son port USB, son port RS-232 ou via la carte modbus (Figure 10) comportant un port RS-485. La carte modbus permet de configurer le numéro d'esclave et aussi de définir le format de communication de l'onduleur.



Figure 10: Carte modbus de l'onduleur hybride

a. Communication par le port USB

La communication avec l'onduleur à travers le port USB se fait en passant par un logiciel nommé « SolarPower » initialement installé sur un ordinateur. Grâce au câble USB de l'onduleur, une connexion est établie entre l'ordinateur et l'onduleur. Ainsi depuis le logiciel « SolarPower » des requêtes peuvent être envoyées à l'onduleur et les différents paramètres notamment le courant et la tension de charge de la batterie, la tension du champ PV, la tension du réseau, le mode de fonctionnement du système (système connecté au réseau ou pas, système d'autoconsommation ou de revente etc.) sont visualisés. Ci-joint en annexe 1 quelques interfaces du logiciel SolarPower.

b. Communication par le port RS-232

Dans notre étude, la communication à travers le port RS-232 a permis essentiellement de mettre à jour le firmware des onduleurs sur lesquels nous avons effectué nos tests. Un firmware est un logiciel constitué d'un ensemble d'instructions et de structure de données qui sont intégrées dans du matériel informatique pour qu'il puisse fonctionner. La mise à jour a été faite à l'aide du logiciel « ReflashTool » installé sur l'ordinateur, via un câble droit DB9, et d'un convertisseur USB/Série.

c. Communication à travers le port RS-485

Afin d'envisager le pilotage de l'onduleur hybride avec un automate pour différentes applications possibles, une validation fonctionnelle du protocole modbus s'est avérée indispensable. Ainsi à l'aide de l'automate μ ArmA4 (Figure 11) et des logiciels μ ladder et mControl le registre d'adresses de l'onduleur déclaré dans sa documentation a été testé afin de valider sa fonctionnalité. La communication via le port RS-485 a essentiellement permis à établir la communication entre l'onduleur et l'automate μ ArmA4. Elle a aussi servi à finaliser la mise à jour du protocole modbus des onduleurs. μ ArmA4 est l'un des automates de la gamme μ Arm conçus et développés par SIREA. Ses caractéristiques sont les suivants :

Tableau 2: Caractéristique de l'automate μ Arm4

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

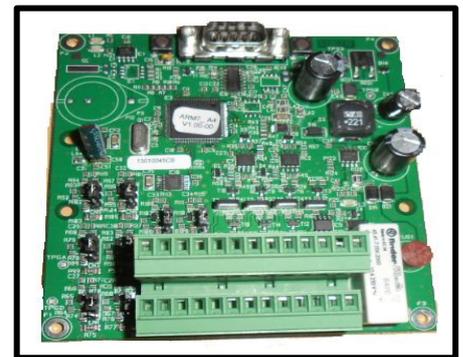


Figure 11: Automate μ Arm4

Quant au logiciel μ ladder, il permet de faire de la programmation en langages ladder et C. Tout comme le logiciel mControl, il sert aussi à la visualisation dynamique et au forçage des variables.

Les variables en lecture ont été vérifiées à l'aide du logiciel μ ladder. Pour ce faire, dans un premier temps un programme Ladder a été créé dans lequel toutes les variables de l'onduleur ont été déclarées. Après l'avoir compilé, il a été chargé dans l'automate qui connecté à l'onduleur a permis de remonter toutes les données échangées dans ce dernier. Ces données ont été visualisées avec le logiciel μ ladder par une simple connexion à l'automate via ce logiciel.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

L'automate et l'onduleur ayant des registres d'adresses différents, la validation des variables à écriture s'est faite à travers leur forçage avec μ control en se connectant directement sur le port RS-485 de l'onduleur par un câble RJ45 dédié à ce dernier sans passer par un automate. Le forçage des variables a permis d'observer le comportement de l'onduleur en fonction de différents paramétrages.

3.1.2. Caractéristiques de l'onduleur Off-Grid

L'onduleur Off-Grid de 4 kW monophasé est le second onduleur qui est utilisé dans la nouvelle gamme des AEA. Il a trois points de connexion :

- Connexion réseau ;
- Connexion Batterie ;
- Et connexion charge.

L'avantage de cet onduleur est qu'il a un courant de charge élevé (70 A) et peut être mis en parallèle jusqu'à sept unités. Cependant, comme son nom l'indique, il ne peut pas injecter sur le réseau.

Tout comme l'onduleur hybride, les variables de la table d'adresse de l'onduleur Off-Grid ont été vérifiées. La communication avec ce dernier se fait via le protocole de communication série MODBUS RS-485. Ainsi en suivant les mêmes procédures que celles adoptées dans la communication avec l'onduleur hybride via le port RS-485, la table d'adresse de l'onduleur Off-Grid a été validée.

Au regard des caractéristiques de ces deux onduleurs, leur combinaison pourrait permettre à la fois d'assurer une bonne injection réseau et d'effectuer une bonne charge des batteries ainsi qu'une alimentation des charges de puissance élevée aussi bien en monophasé qu'en triphasé.

3.2. Principe de fonctionnement de la nouvelle gamme des AEA

Pour chacune des hypothèses de configuration, est associé un mode de fonctionnement donné. Des deux hypothèses de configuration, le modèle retenu comme configuration de la nouvelle gamme des AEA sous réserve des tests fonctionnels a été décidé en priorisant l'option de concevoir un produit optimal. Les principaux facteurs ayant été pris en compte en plus du facteur «conception d'un produit optimal» ont été: le souci d'assurer une alimentation fiable par les armoires AEA/ AEH et les caractéristiques des onduleurs. Ainsi comme on pourrait le percevoir dans le principe de fonctionnement du système dans les deux configurations, la deuxième semble être l'option la plus envisageable.

Des Figure 8 et Figure 9, nous constatons que la borne « AC Out» de l'onduleur hybride pour l'alimentation des charges n'a pas été utilisée. C'est plutôt celle de l'onduleur Off-Grid qui sert à assurer cette alimentation. Ce choix a été adoptée afin de fournir des armoires de grandes puissances aussi bien en monophasé qu'en triphasé. En effet comme spécifié ci-dessus, des deux onduleurs utilisés, seuls les onduleurs Off-Grid peuvent être mis en parallèle

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

et ce jusqu'au nombre de sept (07). Cette capacité de mise en parallèle offre ainsi une flexibilité à la réalisation des armoires de grandes puissances en monophasé.

Dans les deux configurations, lors du fonctionnement, l'onduleur hybride injecte la production photovoltaïque sur le réseau et / ou charge les batteries en fonction de la présence ou non du réseau et du mode de gestion du flux d'énergie qui est détaillé dans la section 3.4.1. Cette injection se fait en aval de l'onduleur Off-Grid dans la configuration 1 et en amont dans la configuration 2.

Contrairement à la seconde configuration, la première à l'avantage d'engendrer moins de perte de conversion de l'énergie photovoltaïque pour l'alimentation des charges. Cependant elle présente un risque de détérioration de l'onduleur Off-Grid dû aux puissances de retour en cas d'un surplus de production photovoltaïque. L'injection se faisant en amont de ce dernier dans la configuration 2, cela élimine les risques liés aux puissances de retour. En présence de réseau, l'onduleur Off-Grid se met en bypass pour alimenter les charges. En absence du réseau, il soutire de l'énergie des batteries pour satisfaire la demande.

3.3. Protection de l'armoire AEA

La protection de l'armoire est réalisée conformément aux normes en vigueur concernant les installations électriques en générales et les installations photovoltaïques en particulier (UTE-C15-712-2 Version juillet 2013). L'armoire peut être divisée en quatre (04) grandes parties que sont :

- La partie photovoltaïque ;
- La partie réseau ou groupe électrogène ;
- La partie batterie ;
- Et enfin la partie utilisation.

3.3.1. Protection de la partie photovoltaïque

La protection de la partie photovoltaïque est basée sur la configuration du champ photovoltaïque et sur la norme UTE-C15-712-2 relative aux installations photovoltaïques. Pour cela, dans un premier temps, le champ photovoltaïque a été dimensionné puis a suivi le choix des protections.

Dimensionnement du champ photovoltaïque

Données :

- Caractéristiques de l'onduleur connecté au champ PV : l'onduleur hybride. (cf. annexe 2)
- Caractéristiques des modules PV utilisés. (cf. annexe 3).

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

Hypothèse :

Le ratio de performance du système PV a été pris égal à 0,8.

Tension du générateur photovoltaïque est égale à la tension nominale DC de l'onduleur à son entrée PV.

$V_{gen} = 360 \text{ V}$.

- La puissance crête du champ PV

$$P_c(Wc) = \frac{P_{el}}{PR} \quad (3)$$

Avec:

P_c : la puissance crête du champ PV ;

P_{el} : la puissance électrique en Watt;

PR : le ratio de performance .

AN: $P_c = \frac{3000}{0,8}$

$$P_c = 3750 \text{ Wc}$$

- Le nombre de module en série

$$N_{Ms} = \frac{V_{gen}}{V_M} \quad (4)$$

Avec:

N_{Ms} : Nombre de module en serie

V_M : la tension du module en Volt

V_{gen} : la tension du générateur photovoltaïque en Volt

AN: $N_{Ms} = \frac{360}{37,12}$

$$N_{Ms} = 9,7$$

Le nombre de module total en série est de dix (10).

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

- Nombre de module en parallèle

$$N_{MP} = \frac{P_c}{N_{MS} * P_M} \quad (5)$$

Avec:

N_{MS} : Nombre de module en parallèle

P_M : la puissance du module en Watt

AN:
$$N_{MP} = \frac{3750}{10 * 250}$$

$$N_{MP} = 1,5$$

Le nombre de branche totale du système est de deux (02).

- Vérification des contraintes de tension et de courant vis-à-vis de l'onduleur

Il s'agit de la tension maximale à circuit ouvert (U_{ocmax}) du champ PV en prenant en compte la température ambiante minimale T_{min} du site d'installation PV, de la tension du champ à une température maximale des modules et du courant de court-circuit maximal du générateur PV.

- La vérification des contraintes liées à la tension (U_{ocmax}) du champ PV a été faite pour trois zones (A, B, et C) de températures ambiantes minimales différentes: Calcul de U_{ocmax}

$$U_{ocmax} = K_U * U_{ocSTC} \quad (\text{Norme UTE C 15-712-2}) \quad (6)$$

Avec :

U_{ocmax} : La tension à circuit ouvert du système PV à une température ambiante donnée

K_U : est le facteur de correction prenant en compte l'augmentation de la tension en circuit ouvert . Il est donné par la norme UTE C 15-712-1 et peut être calculé suivant la formule ci-dessous.

$$K_U = 1 + \left(\frac{\beta U_{oc}}{100} \right) * (T_{min} - 25) ;$$

βU_{oc} est un facteur négatif, qui est fourni par le constructeur de module en mV/°C ou en %/°C.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

U_{ocSTC} : tension du champ dans les conditions de test standard ($T = 25^{\circ}C, AM = 1,5$)

$$U_{ocSTC} = U_{ocSTC/module} * N_{Ms}$$

Tableau 3: Calcul de l' U_{ocmax} pour différentes regions

	A	B	C
Tmin (°C)	17	-5	-30
K_U	1.04	1.12	1.21
U_{ocmax} (V) (avec $N_{Ms} = 10$)	389,69	419,66	453,39
U_{ocmax} (V) (avec $N_{Ms} = 11$)	428,66	461,63	498,73
U_{ocmax} (V) (avec $N_{Ms} = 12$)	467,62	503,6	544,06

NB : Tension de l'onduleur est de 500V

Au regard de la tension max de l'onduleur qui doit être impérativement respectée et dans le souci de se rapprocher d'une puissance de champ de 3750 W, nous avons retenu un nombre de onze (11) modules en séries de 250 W chacun.

- Vérification de la contrainte de tension du champ PV liée à une température maximale des modules.

Cette vérification nous a permis de nous assurer d'une présence de tension suffisante du champ PV pour le fonctionnement des onduleurs pour une température maximale des modules.

La température maximale des modules PV retenue est de 70°C.

$$U_{70} = U_{mpp} - \Delta V \tag{7}$$

Avec:

U_{70} : la tension du système pour une température des modules de 70°C

U_{mpp} : la tension du système PV à puissance maximale

ΔV : la variation de tension

$$\Delta V = \%K * U_{mpp} * (T - T_{STC})$$

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

%K est un facteur négatif, qui est fourni par le constructeur de module en mV/°C ou en %/°C.

(%K = $-0,53/100$; cf. fiche technique des modules)

$T_{STC} = 25^{\circ}\text{C}$; $T=70^{\circ}\text{C}$

$$\underline{AN}: U_{70} = (37,12 - \left(\left(-0,53/100 * 37,12 \right) * (70 - 25) \right)) * 11$$

$$\underline{U_{70} = 282,7V}$$

Choix: La tension de démarrage des onduleurs est de 116VDC et $U_{70} > 116 \text{ VDC}$.

- Vérification du courant de court-circuit maximal du générateur

$$I_{scmax} (A) = K_i * I_{scSTC} \text{ (Norme UTE C 15-712-2)} \quad (8)$$

Avec:

I_{scmax} : le courant de court circuit maximal du générateur

K_i doit être choisi au minimum égal à 1,25. (Norme UTE C 15-712-2)

I_{scSTC} : Courant de court – circuit du générateur . Il est calculé par cette formule :

$$I_{scSTC} = I_{scSTC/string} * N_{Mp}$$

Tableau 4: Calcul de l' I_{scmax} pour différentes régions

	$N_{Mp} = 1$	$N_{Mp} = 2$
$I_{scSTC}(A)$	8,7	
K_i	1,25	
$I_{scmax} (A)$	10,88	21,75

NB : le courant de court-circuit maximal que peut supporter nos onduleurs est de 13 A.

Choix: Nous avons retenu une seule branche de modules en séries.

Choix des protections

➤ Partie DC (partie entre le champ PV et la borne connexion PV)

- Dimensionnement des dispositifs de protection contre les surintensités

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

$N_c=1$;

Selon la norme UTE C 15-712-2, pour $N_c=1$, il n'est pas indispensable d'installer les appareils de protection contre les surintensités que sont les fusibles et disjoncteurs car le courant de retour I_{RM} est nul.

- Dimensionnement du dispositif de sectionnement (Interrupteur-Sectionneur QS1)

L'interrupteur sectionneur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ $U_e \geq 1,2 * U_{ocSTD}$
- ✓ $I_{max} \geq 1,25 * I_{ccSTD}$

D'où $U_e \geq 494,6 \text{ V}$

$I_{max} \geq 13,6 \text{ A}$

Choix : Un interrupteur sectionneur application photovoltaïque de 600 V et de 25 A a été retenue.

- Dimensionnement du parafoudre

Le parafoudre de type 2 est le type de parafoudre utilisé car il assurera la protection de tête sans présence de paratonnerre. Les paramètres de choix sont les suivants :

- ✓ $I_n \geq 5 \text{ kA}$
- ✓ $U_p \geq 0,8 * U_w$

Avec U_w la tension de tenue au choc d'un champ PV pour une tension U_{ocmax} de 600 V:

$U_w \text{ (kV)} = 6$

d'où $U_p \text{ (kV)} \geq 5$

- ✓ $U_{CPV} \geq 1,2 * U_{ocstc}$
- ✓ $I_{scpv} \geq 1,25 * I_{scstc}$

$U_{ocstc} \text{ (V)} = 498,73$

$I_{scstc} \text{ (A)} = 10,88$

Choix :

$$U_p \text{ (kV)} \geq 5$$

$$I_n \text{ (kA)} \geq 5$$

$$UCPV \text{ (V)} \geq 600$$

$$I_{scpv} \text{ (A)} \geq 14$$

➤ **Partie AC (partie entre l'onduleur hybride et le bus AC)**

- Choix du Disjoncteur (QF1)

Le courant maximal délivré par la borne AC de l'onduleur hybride est :

$$I \text{ (A)} = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} \quad (9)$$

Avec :

P: la puissance active en W de l'onduleur.

U: la tension d'alimentation en V. U=230V.

cosφ: le facteur de puissance

$$I \text{ (A)} = 14.5$$

Le calibre retenu pour ce disjoncteur est de 16 A.

3.2.2. Protection de la partie AC IN

La puissance maximale à fournir étant de 4 kVA (puissance apparente de l'onduleur Off-Grid), le courant transité depuis le réseau jusqu'à l'entrée AC in de l'onduleur Off-Grid est obtenu par cette formule:

$$I \text{ (A)} = S/U \quad (10)$$

Avec :

S: la puissance apparente en VA.

U: la tension d'alimentation en V. U=230V.

$$I = 17.4 \text{ A}$$

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

- Choix du disjoncteur différentiel (QF2)

Un disjoncteur différentiel est un équipement de protection qui assure à la fois la protection des biens et des personnes. Selon la norme NFC 15-100, tous les circuits de l'installation doivent être protégés par des DDR assignés au plus égal à 30 mA. Ainsi, en aval du disjoncteur différentiel de branchement ayant une sensibilité de 500 mA, a été placé un disjoncteur différentiel de classe AC de haute sensibilité de 30 mA et d'un calibre de 20 A avec une tension d'emploi de 230V. Jouant également un rôle de protection de bien, son choix tient aussi compte des paramètres que sont le pouvoir de coupure et le courant de réglage. La tension assignée d'emploi et le courant assigné ayant été respectivement déduits de la tension de service (230 V) et du courant de service (17,4 A), quant au pouvoir de coupure et au courant de réglage, ils sont déterminés respectivement à partir des courants de court-circuit maximal et minimal. Ces courants sont calculés comme suit :

$$I_{cc1\ max}(A) = \frac{C_{max} * m * U_n}{Z_L + Z_N} \quad (11)$$

$$I_{cc1\ min}(A) = \frac{C_{min} * m * U_n}{Z_L + Z_N} \quad (12)$$

Avec :

$C_{max} = 1,05$, le facteur tension pour le calcul du courant de court-circuit maximal

$C_{min} = 0,95$, le facteur tension pour le calcul du courant de court-circuit minimal

$m = 1,05$, le facteur de charge à vide

$U_n = 230\ V$; la tension nominale au point du calcul du court circuit

Z_L : l'impédance de la phase au point du calcul du court circuit.

Z_N : l'impédance du neutre au point du calcul du court circuit

Les sections de câble étant uniforme pour le neutre et la phase, nous allons donc poser que

$$Z_L = Z_N$$

$$Z_L = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

$$\sum R = R_{\text{reseau Amont}} + R_{\text{câble}}$$

$$\sum X = X_{\text{reseau Amont}} + X_{\text{câble}}$$

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

Pour une puissance de court-circuit du réseau amont, $P_{cc}=500$ MVA :

$$R_{\text{reseau Amont}}(m\Omega) = 0,017$$

$$X_{\text{reseau Amont}}(m\Omega) = 0,111$$

$$R_{\text{câble}}(\Omega) = (\rho * L)/S$$

Avec :

ρ : la resistivité du câble. Pour le cuivre:

$$\rho = 0,0225 (\Omega\text{mm}^2)/\text{m pour le calcul du courant de court circuit maximal}$$

$$\rho = 0,027 (\Omega\text{mm}^2)/\text{m pour le calcul du courant de court circuit minimal}$$

L : la longueur du câble en m

S : la section du câble en mm^2 .

Selon la norme NFC 15-100, pour chaque calibre des protections entrée / sortie d'une armoire, est associée une section de câble de l'âme en cuivre. Ainsi pour un calibre de 20A, la section de câble en cuivre utilisé doit être au minimum de 4 mm^2 .

$$X_{\text{câble}}(m\Omega) = 0,08 * L$$

Après calcul :

$$I_{cc1 \text{ max}} = 4,5 \text{ kA}$$

$$I_{cc1 \text{ max}} = 3,4 \text{ kA}$$

Cette démarche a été adoptée pour le dimensionnement des autres disjoncteurs de l'armoire qui sont tous de courbe C.

Caractéristiques retenues :

- ✓ Sensibilité : 30 mA
- ✓ Tension assignée d'emploi U_e : 230 V
- ✓ Courant assigné I_n : 20 A.
- ✓ Le pouvoir de coupure : 6 kA

- Choix du contacteur KM1
 - ✓ La catégorie d'emploi: AC1
 - ✓ Le courant d'emploi: 20 A
 - ✓ La tension d'emploi: 230 V
 - ✓ La puissance: 4 kVA
 - ✓ La tension de commande: 24 V

- Choix du disjoncteur QF3
 - ✓ Tension assignée d'emploi Ue: 230 V
 - ✓ Courant assigné In: 20 A.
 - ✓ Le pouvoir de coupure: 6 kA

3.2.3. Protection de la partie AC OUT

- Choix du contacteur KM2

Le contacteur KM2 choisi a les mêmes caractéristiques que celles du contacteur KM1.

- Choix du disjoncteur QF4
 - ✓ Tension assignée d'emploi Ue : 230 V
 - ✓ Courant assigné In : 20 A.
 - ✓ Le pouvoir de coupure : 6 kA

- Choix du disjoncteur différentiel QF5
 - ✓ Sensibilité : 30 mA
 - ✓ Tension assignée d'emploi Ue : 230 V
 - ✓ Courant assigné In : 20 A.
 - ✓ Le pouvoir de coupure : 6 kA

3.2.4. Protection de la partie batterie

La protection côté batterie se compose d'un contacteur, des sectionneurs porte-fusibles entres les bornes connexion batterie de chacun des deux onduleurs et le bus DC, d'un interrupteur sectionneur et enfin d'un sectionneur porte-fusible juste à l'entrée des batteries.

- Choix du contacteur KM3
 - ✓ Le courant d'emploi maximal : 65A
 - ✓ La tension d'emploi : 48 V

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

✓ La tension de commande : 24 V

- Choix des sectionneurs porte-fusible côté onduleur hybride (FU1)

Le courant de charge maximal des batteries par l'onduleur hybride étant de 25 A, des sectionneurs-porte fusibles de calibre 25 A ont été choisis.

- Choix des sectionneurs porte-fusible côté onduleur Off-Grid (FU2)

Le courant maximal de charge des batteries par les onduleurs Off-Grid est de 75 A. des sectionneurs porte fusibles d'un calibre de 100 A ont donc été choisis.

- Choix de l'interrupteur sectionneur (QS3)

Selon les études antérieures sur l'optimisation des armoires AEA, pour une armoire de 3 kW, il faudrait des batteries de stockage de technologie Lithium-ion d'une capacité de stockage d'énergie de 5 kWh. Utilisant des unités de 1,3 kWh (annexe 4), deux interrupteurs-sectionneurs de calibre 63 A seront utilisés à raison d'un interrupteur-sectionneur par bloc de deux éléments de batteries mis en parallèle.

- Choix des sectionneurs-porte fusible à l'entrée des batteries (FU3)

Ces sectionneurs porte-fusibles sont également choisis par bloc de deux éléments par batterie. Les calibres retenus sont identiques à ceux des interrupteurs sectionneurs.

3.4. Logique de programmation de l'armoire pour la gestion du flux d'énergie

L'une des spécificités des armoires AEA réside dans la gestion automatique durant leur fonctionnement. Cette gestion automatique a un poids considérable dans l'optimisation du système notamment dans l'utilisation adéquate des batteries de stockage. Elle permet un contrôle et un suivi des niveaux de charge et de décharge de façon instantanée afin de garantir un bon fonctionnement des batteries qui constituent l'un des composants les plus sensibles du système. Dans ce qui suit, les nouvelles options de gestion de flux envisagées dans la nouvelle gamme sont détaillées en rapport avec les options de la gestion du flux dans l'AEA de base.

3.4.1. Options de gestion du flux

Tout comme les AEA de base, la nouvelle gamme des AEA présente aussi les quatre modes de fonctionnement reflétant les quatre configurations générales des systèmes photovoltaïques présentés ci-dessus dans la synthèse bibliographique. Ce sont le système connecté au réseau avec autoconsommation, avec injection du surplus de production ou injection totale de la

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

production et le système isolé avec parfois utilisation d'un groupe électrogène. Pour chacune de ces configurations, la nouvelle gamme y intègre certaines options pour plus d'optimisation des armoires AEA. Ce sont:

- L'option «lissage de la consommation» ;
- L'option «équilibre des phases» ;
- L'option « charge pilotable » ;
- L'option « lissage de la production » ;
- L'option « secours batterie » ;

Chacune de ces options sera présentée après la description de la gestion du flux pour chacun des quatre modes.

a. Mode « Autoconsommation »

En mode « Autoconsommation », les priorités d'utilisations des différentes sources pour l'alimentation des charges, la recharge de la batterie et l'appoint à la source renouvelable sont respectivement les suivantes :

- Energie photovoltaïque-Batterie-Réseau ;
- Energie photovoltaïque-Réseau ;
- Batterie-Réseau.

Notons qu'aucune injection de la production photovoltaïque sur le réseau n'est autorisée. Cette production photovoltaïque alimente prioritairement les charges puis les batteries.

b. Mode « injection du surplus de production »

Les priorités d'utilisation des différentes sources pour l'alimentation des charges, pour la recharge de la batterie ainsi que pour l'appoint à la source d'énergie renouvelable sont similaires à celles du mode « Autoconsommation ». La production PV alimente également en priorité les charges puis les batteries. Cependant en cas de surplus de la production PV, celui-ci est injecté sur le réseau.

c. Mode « injection de la totalité de la production »

Pour ce mode de fonctionnement, la consommation d'énergie photovoltaïque à partir du système est interdite. En présence de tension au niveau du réseau, toute la production PV est injectée sur le réseau. Une partie de la production PV peut servir à charger les batteries en cas d'une intégration de celles-ci au système. Le réseau peut être aussi utilisé pour recharger des batteries lorsque le PV n'est pas disponible et que le taux de charge des batteries est inférieur au seuil de réserve défini à 30%.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

d. Mode « système isolé avec utilisation d'un GE »

Dans ce mode, le groupe électrogène est utilisé en appui à la production PV. Lorsque la production PV n'est pas suffisante et que la batterie a atteint un certain taux de décharge défini par le gestionnaire afin de garantir une durée de vie plus élevée à celle-ci, le groupe électrogène fournit le complément et peut éventuellement charger la batterie.

e. Mode « système isolé sans utilisation d'un GE »

L'énergie photovoltaïque est la seule source d'énergie utilisée dans ce mode pour alimenter les charges et charger la batterie.

Les différentes options intégrées sont définies comme suit ;

- Option « Lissage de la consommation »

Intégrable à chacun des différents modes décrits ci-dessus à l'exception du mode « Système isolé sans utilisation du GE », l'option « lissage de la consommation » permet d'avoir une consommation globalement uniforme de l'énergie fournie par le réseau ou le Groupe électrogène durant la non disponibilité du champ photovoltaïque. Ceci se fait grâce aux batteries qui doivent avoir une réserve suffisante afin de répondre aux pics de consommation. Ce mode évite au réseau ou GE de supporter les pics de consommation et évite donc la souscription à de fortes puissances auprès des gestionnaires de réseau.

- Option « équilibrage des phases »

Ce mode est applicable aux systèmes d'alimentation triphasés. Les onduleurs utilisés étant monophasés, l'alimentation triphasée est obtenue par l'utilisation de trois onduleurs pour chacun des deux types d'onduleur. Afin d'assurer une injection ou un soutirage de puissances sensiblement équitables sur chacune des phases du réseau pour les systèmes connectés et un fonctionnement équilibré du groupe électrogène pour les systèmes isolés, des consignes de puissances sont données à chacun des onduleurs en fonction de l'état de charge des batteries ainsi que de la puissance demandée. Notons qu'une gestion optimale de la batterie intervient également car cette dernière constitue l'élément régulateur du système. Elle absorbe non seulement le surplus de la production d'énergie mais aussi fournit le déficit pour l'alimentation des charges. Cette option est intégrable à tous les modes de gestion des AEA excepté le mode « système isolé sans utilisation du GE ».

$$P_{\text{injectée/soutirée}} = P_{\text{charge}} / 3 \quad (13)$$

- Option « lissage de la production »

Ce mode permet de palier à l'intermittence des énergies renouvelables dont le photovoltaïque. C'est également les batteries de stockage qui constituent l'élément régulateur pour ce mode. Elles présentent un avantage important de rapidité de réaction non seulement pour la fourniture mais aussi pour le stockage de façon instantanée de la puissance électrique

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

permettant de compenser les fluctuations de production photovoltaïque. Pour chacun des modes définis, cette option est incontournable pour un fonctionnement optimal des AEA.

- Option « secours batterie »

Ce mode assure une continuité de service au niveau de la fourniture d'énergie en cas d'éventuelle perte du réseau pour les systèmes connectés au réseau en mode « autoconsommation » ou mode « vente du surplus de production ». Le principe de cette option consiste à définir un taux de décharge limite des batteries de stockage. Ce taux est défini en fonction du temps moyen d'indisponibilité du réseau.

$$SOC(t)_{limite} = \frac{Q_{reserve}(t) * 100}{Q_{maximale\ batterie}} \quad (14)$$

Avec :

$$Q_{reserve}(t) = P_{charge} * T_{aut}$$

Avec :

P_{charge} : la puissance des charges à alimenter

T_{aut} : le temps moyen d'indisponibilité du réseau en heure

- Option « charge pilotable »

Applicable aussi bien aux systèmes connectés que isolés, le mode « charge pilotable » consiste à alimenter des charges dites charges pilotables avec le surplus de production d'énergie. Comme charges pilotables nous pouvons citer le chauffage électrique, le pompage solaire. Cette option présente un réel avantage en mode « autoconsommation » pour les systèmes connectés et en mode « système isolé avec utilisation d'un groupe électrogène » pour les systèmes isolés.

La combinaison de l'option « charge pilotable » au mode « autoconsommation » favorise une gestion optimale du surplus de production d'électricité photovoltaïque qui ne peut être injecté sur le réseau. Pour ce qui est du système isolé avec utilisation d'un groupe électrogène, le mode « charge pilotable » contribue à la gestion optimale des groupes électrogènes. En effet, un groupe électrogène, qu'il soit synchrone ou asynchrone doit supporter une charge minimale donnée lors de son fonctionnement afin que celui-ci soit optimal. Selon quelques fabricants de groupes électrogènes, cette charge doit être au minimum égale à 30% de la puissance nominale du groupe. En effet lorsqu'il doit être mis en marche pour un appoint ou relayer le PV, il est primordial de s'assurer que les charges qu'il devra supporter sont supérieures ou égales aux 30%. Ainsi les charges pilotables constituent l'élément régulateur du taux de charge des groupes électrogènes.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

3.4.2. Interface graphique

L'interface graphique est le biais par lequel l'utilisateur des armoires AEA est informé de l'état de fonctionnement de son système et des paramètres généraux et spécifiques de sa consommation. Pour cela, des outils sont mis en place. L'outil principal est un automate programmable. Dans l'AEA de base, l'automate utilisé est du type μ ArmA2. Doté d'un écran, l' μ ArmA2 a les caractéristiques suivantes :

Tableau 5: Caractéristiques de l'automate " μ ArmA2" de l'AEA de base

Port de communication	de	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
Mémoire		512 Ko Flash ; 16 Mo de RAM 512 Ko de RAM sauvegardée Connecteur pour SDCard



Figure 12: Automate μ ArmA2

Dans la nouvelle architecture de l'AEA, le μ ArmA2 est remplacé par l'automate μ ArmA8. Egalement doté d'un écran, il présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 6: Caractéristiques de l'automate μ ArmA8 de la nouvelle architecture de l'AEA

Port de communication		1 port RS232 ; 1 port RS485
Entrées		05 Entrées IHM 02 Entrées analogiques
Sorties		2 sorties logiques 1 sortie analogique
Alimentation		24 VCC
Affichage		Ecran Non tactile
Mémoire		512 Ko Flash ; 16 Mo de RAM Vidéo 512 Ko de RAM sauvegardée

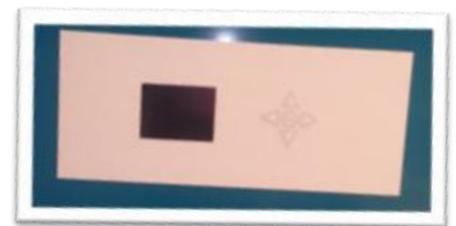


Figure 13: Automate μ ArmA8

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

L'automate est le principal gestionnaire des énergies. Assurant le pilotage des différents équipements de l'AEA en fonction des différents modes et options de gestions de l'énergie, l'automate, grâce à son écran sert aussi d'Interface Homme Machine (IHM).

Le synoptique de fonctionnement de l'AEA qui est affiché sur l'écran de l'automate μ ArmA2 comme IHM de l'AEA de base se présente comme suit :

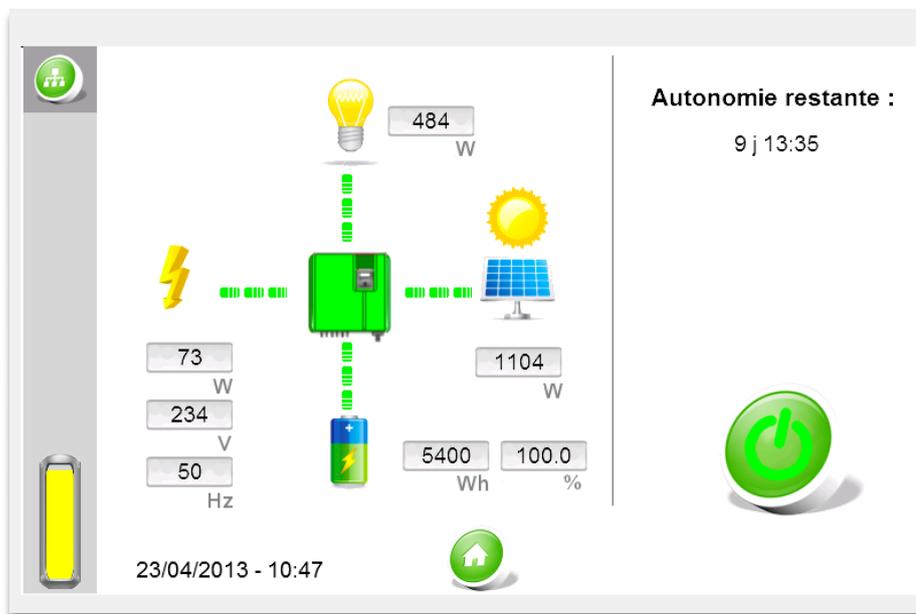


Figure 14: synoptique de l'IHM de l'AEA DE BASE

Il fournit les paramètres généraux du réseau ou GE (puissance, tension et fréquence), la capacité et le taux de charge de la batterie, la puissance produite par le PV, la puissance des charges à alimenter et enfin l'autonomie restante de la batterie.

L'IHM n'est pas en marge concernant le développement de la nouvelle architecture de l'AEA. Pour cette nouvelle architecture, Le synoptique de fonctionnement de l'AEA qui est affiché sur l'écran de l'automate μ ArmA8 comme IHM est illustré par la Figure 15.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

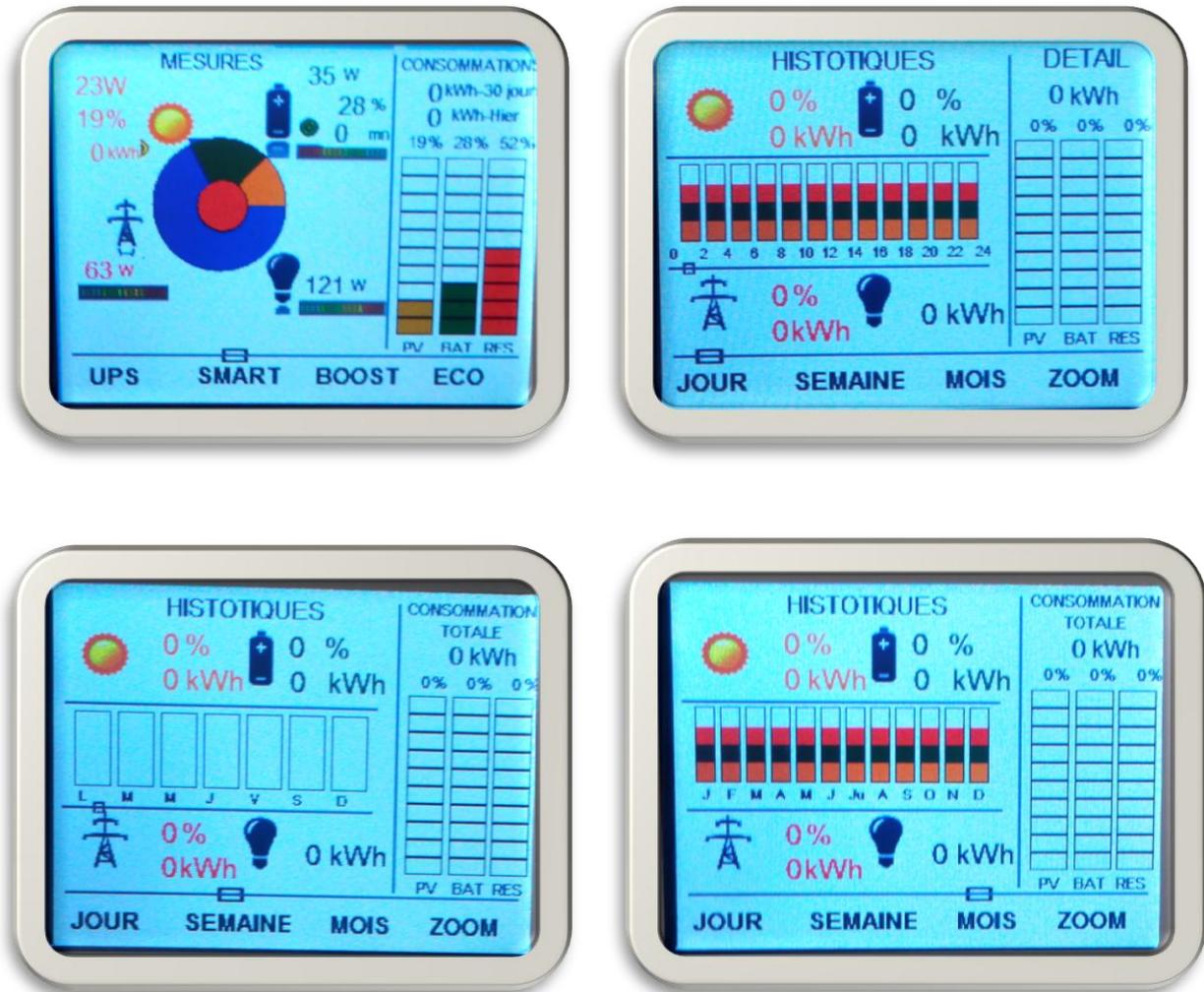


Figure 15: synoptique de l'IHM de la nouvelle architecture de l'AEA

Le synoptique de l'IHM de la nouvelle architecture présente les informations sur l'état de fonctionnement de l'AEA et sur la consommation en six (06) rubriques que sont :

- La rubrique « UPS »
- La rubrique « SMART »
- La rubrique « BOOST »
- La rubrique « JOUR »
- La rubrique « SEMAINE »
- Et la rubrique « MOIS »

La rubrique « SMART » renseigne la puissance de la charge à alimenter et les contributions de chacune des sources d'énergie (réseau / GE, PV et la batterie) pour satisfaire la demande. Les rubriques « JOUR », « SEMAINE », « MOIS », fournissent respectivement la

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

consommation totale à chaque tranche de deux heures, chaque jour, et chaque mois, avec une spécification de la quantité d'énergie fournie par chacune des trois sources.

Les rubriques « UPS » et « BOOST » restent à définir. Aussi en plus de la supervision locale des informations liées au fonctionnement de l'armoire à travers l'écran de l'automate, une supervision à distance est aussi envisagée.

IV. DEVELOPPEMENT DU PROTOTYPE

Durant les études sur le développement de la gamme AEA de base, nous avons eu à intervenir parallèlement sur une préoccupation de la société EDM. Cette préoccupation consistait en la réalisation d'une armoire hybride qui entrant dans la nouvelle gamme des armoires AEA nous a servi d'une part de prototype. D'une puissance électrique de 9 kW, cette armoire alimente des charges de 9 kW de puissance en monophasé. La puissance des deux onduleurs étant de 3 kW et 4 kW, trois onduleurs de chacun des deux types d'onduleur ont été mis en place afin de satisfaire la demande du client en termes de puissance. Les entrées AC IN des six (06) onduleurs sont connectées au réseau monophasé du distributeur d'énergie et leurs bornes connexion-Batterie à un bus DC d'où sont connectées les batteries. Les sorties AC out des onduleurs Off-Grid sont mises en parallèle et raccordées à un bus AC d'où part l'alimentation des charges. (Figure 16 et Figure 17).



Figure 16: Armoire de 9 kW d'EDM

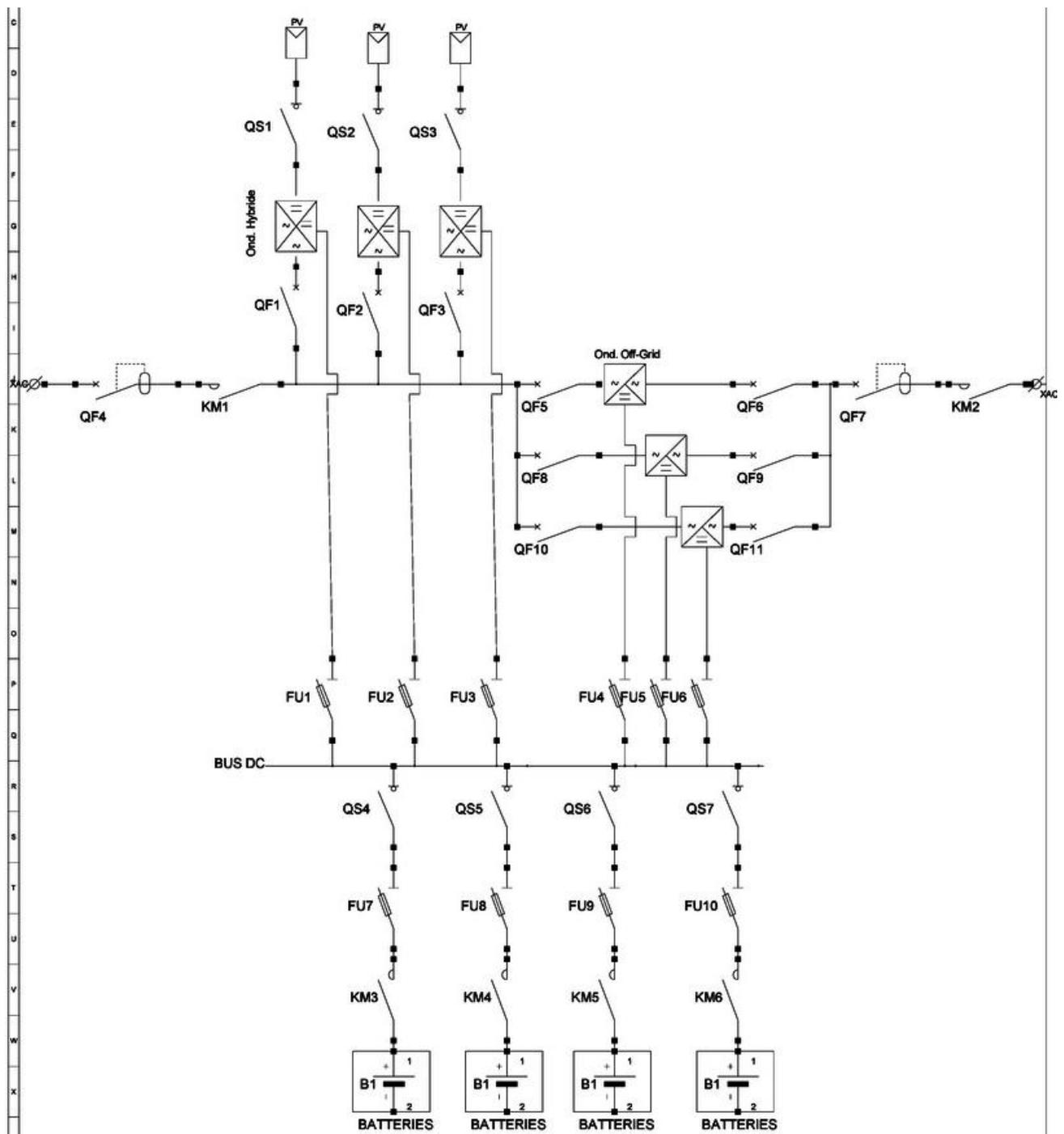


Figure 17: Schéma unifilaire d'EDM

D'autre part, différents tests pour la validation technique complète du produit ont été effectués sur un banc de test monté dans l'atelier de SIREA selon la même configuration que l'armoire de 9 kW afin de trouver de façon rapide et concrète les difficultés enregistrées au cours du fonctionnement de l'armoire d'EDM sur site. Par ailleurs, une maquette a été minutieusement réalisée afin de réaliser des tests dans des conditions plus ergonomiques. (Figure 18).

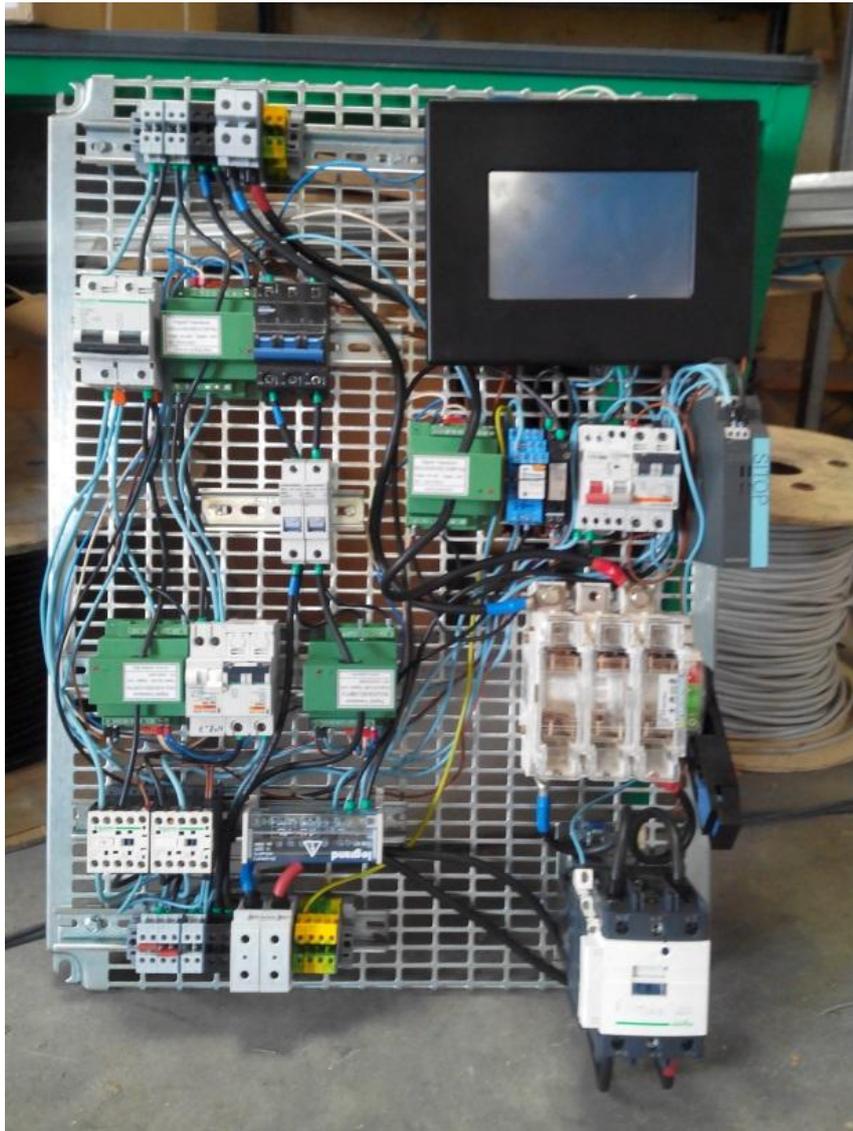


Figure 18: Maquette pour test de la nouvelle gamme AEA

V. TEST FONCTIONNEL

Les tests réalisés sur le banc de test avant le câblage de l'armoire d'EDM visant à tester l'aspect « pilotage automatique », ont révélé un principal dysfonctionnement. Ces tests consistaient à piloter automatiquement les différents équipements de l'armoire à l'aide d'un automate dans lequel est inséré un code-programme. Lors de ces tests, nous avons été confrontés à un souci de communication en protocole modbus avec les onduleurs Off-Grid dès qu'ils sont montés en parallèle. Il a en effet été confirmé par le constructeur de cet onduleur de la non existence jusqu'au moment des tests de l'option « communication avec les onduleurs Off-Grid en parallèle via le protocole de communication modbus ».

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

A la mise en service de l'armoire d'EDM, d'autres difficultés ont été rencontrées. Dans un premier temps, un mauvais pilotage des onduleurs hybrides a été constaté. Pour une requête donnée, des actions bien précises doivent être exécutées et dans un ordre bien défini. Par exemple pour passer du fonctionnement mode « priorité réseau » au mode « priorité batterie » de l'onduleur hybride, il faut dans un premier temps désactiver la charge de la batterie par le réseau avant de donner l'ordre d'écriture pour le changement de la priorité. Dans un second temps, la non compatibilité du mode « standby » des onduleurs Off-Grid avec les équipements de l'armoire. Ceci entraîne une consommation de 15% de la capacité de la batterie par chaque onduleur pour leur propre fonctionnement interne.

Les tests fonctionnels ont également révélé une lenteur de communication entre les onduleurs hybrides et l'automate ainsi qu'entre les transducteurs et l'automate. Cette lenteur a un impact sur le fonctionnement optimum de l'armoire notamment au niveau de l'exécution de la consigne de la puissance à injecter instantanément. Pour remédier à cela, une autre logique de programmation a été adoptée par rapport à celle de l'AEA de base (Annexe 5). De ce fait le pilotage automatique de l'onduleur hybride selon les modes de gestion de flux définis plus haut a été maîtrisé.

Au delà des limites constatées, les aspects fonctionnels suivants ont été validés. Premièrement l'injection de la production issue de l'onduleur hybride en amont de l'onduleur Off-Grid a été validée. Ensuite les paramètres de consommation et de l'état de fonctionnement de l'armoire ont pu également être visualisés à travers la nouvelle interface graphique développée. Enfin le fonctionnement des équipements de protections comme les contacteurs et des équipements de mesures (transducteurs) est parfait.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les systèmes hybrides restent jusque-là une solution optimale pour l'approvisionnement en électricité de petites îles, des régions rurales ainsi que des relais de télécommunication. Des améliorations dans leur conception et leur fonctionnement sont toujours nécessaires pour les rendre plus compétitifs. C'est ainsi que notre travail a porté sur le développement d'une nouvelle architecture des armoires à centrales hybrides de SIREA (AEA).

Des deux hypothèses émises sur le synoptique de la nouvelle architecture, la première a été infirmée suite à une limite de fonctionnalité des onduleurs Off-Grid. Quant à la deuxième hypothèse, c'est à partir d'elle que le prototype nous ayant servi à effectuer nos différents tests a été réalisé. Indépendamment des différents synoptiques proposés pour la nouvelle architecture des AEA, un nouveau IHM a été mis en place en passant par l'utilisation d'un nouvel automate. Au regard des différents dysfonctionnements constatés lors du test fonctionnel, quelques apports restent à faire en plus des corrections que nous avons pu apporter durant le déroulement de notre stage afin d'arriver à la validation technique complète de la nouvelle architecture des AEA. L'ampleur du travail restant à effectuer peut être justifiée. En effet la durée minimale d'un développement variant de 12 à 18 mois, nous n'étions qu'à cinq (06) mois de travail de développement. La partie perspective à la suite de ce document fera l'objet de ces quelques tâches restantes qui devront être envisagées pour une éventuelle validation technique du produit.

En premier lieu, après le développement de la fonctionnalité « communication modbus avec les onduleurs Off-Grid en parallèle » par le constructeur prévu au mois de septembre 2015 des tests devront être effectués avec un pilotage automatique de ces onduleurs. Ceci permettrait de palier au problème de non compatibilité du mode standby de ces onduleurs avec les autres équipements de l'armoire.

Par ailleurs, chacun des modes avec les options qui y sont associables doivent être testés pour éventuellement encore plus d'optimisation.

Ensuite, la définition des rubriques « UPS » et « BOOST » enrichirait plus l'IHM.

Enfin l'étude économique reste une étape incontournable à effectuer après la maturation complète du produit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

- [1] SMA, SMA fuel save solution : Systèmes SMA hybrides photovoltaïque/groupe électrogène industriels.
- [2] Ludmil Stoyanov, Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, thèse de doctorat, Université Pascal Paoli, (2011).
- [3] Gabin Adantchédé Koucoï, Optimisation d'un générateur hybride photovoltaïque avec stockage sur batterie lithium ion pour site isolé ou connecté au réseau électrique, mémoire de Master 2, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), (2013).
- [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 de doctorat, Fondation 2iE, (2012).
- [5] Grégoire Léna, Mini-réseaux hybrides PV-diesel pour l'électrification rurale, Tâche 9 de l'AIE-PVPS, Sous-Tâche 4, Rapport AEI-PVPS T9-13:2013 CLUB-ER, Publication Thématique (Juillet 2013).
- [6] H. Colin, C. Duvauchelle, Y. Tanguy, B. Gaidon, T. Tran-Quoc, Ilotage des installations photovoltaïques raccordées aux réseaux : réglementation, méthodes de détection et retour de terrain, (2011).
- [7] H. Colin, C. Duvauchelle, G. Moine, Y. Tanguy, B. Gaidon, T. Tran-Quoc, Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension : Cadre réglementaire, impacts et préconisations, (2010).
- [8] Thi Minh Chau Le, Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle /commande et rejet de perturbations, thèse de doctorat, Université de Grenoble, (2012).
- [9] Hybrid PV Inverter: User Manual, Version 2.0
- [10] Hybrid Solar Inverter: Operating Manual.
- [11] Norme UTE C-15-712-2, Version Juillet 2013.

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

[12] Yann Riffonneau, Gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecter au réseau : application à l'habitat, thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, (2009).

[13] Sidiki Simporé, Etude comparative de la viabilité des technologies de production d'électricité en Afrique de l'ouest en utilisant le LCOE : cas du Burkina Faso, mémoire de Master 2, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), (2014)

Sites internet

[14] www.energieplanete.fr , consulté le 16 avril 2015

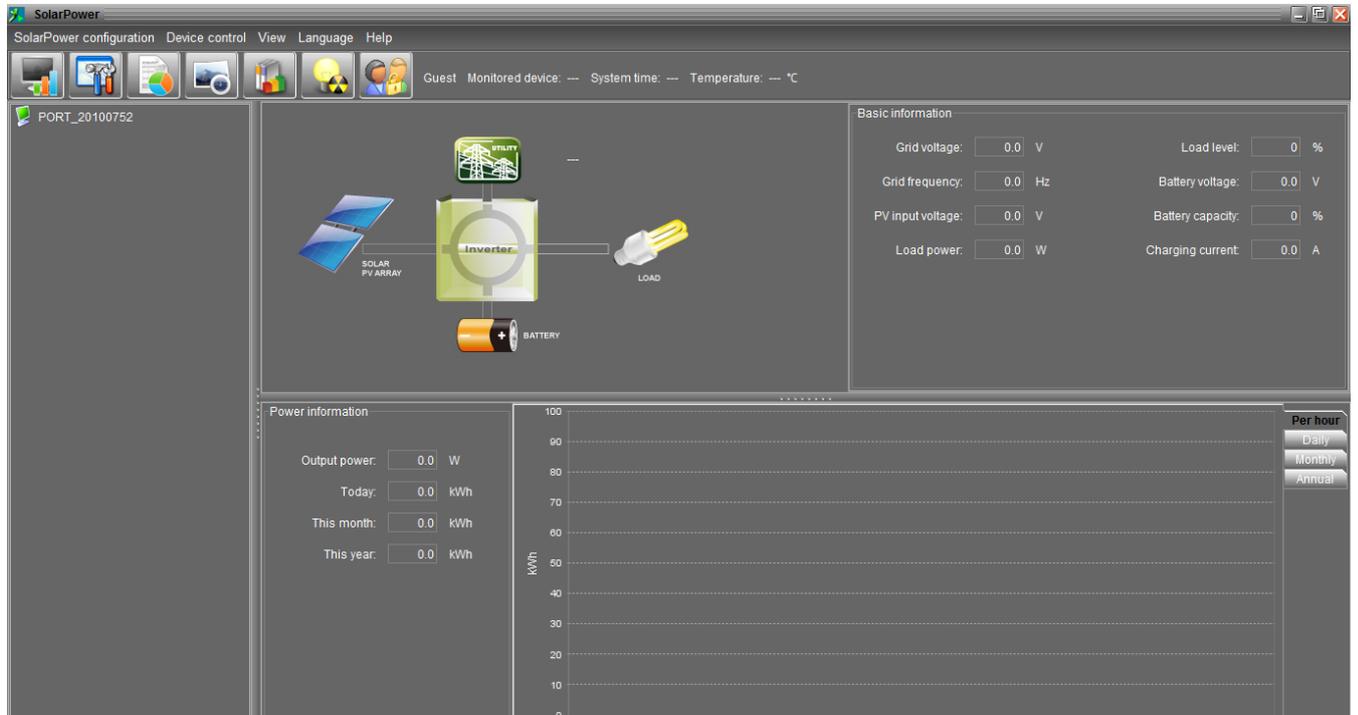
[15] <http://www.aros-solar.com/fr/classification-des-installations-photovoltaïques>, consulté le 11 mars 2015

[16] <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page13.html> , consulté le 16 avril 2015

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

ANNEXES

Annexe 1: interface du logiciel SolarPower



**Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride
PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit**

Annexe 2:Fiche technique de l'onduleur hybride

MODEL	2KW	3KW	3KW Plus
RATED POWER	2000 W	3000 W	
PV INPUT (DC)			
Maximum DC Power	2250 W	3200 W	4500 W
Nominal DC Voltage	300 VDC	360 VDC	
Maximum DC Voltage	350 VDC	500 VDC	
Start-up Voltage / Initial Feeding Voltage	80 VDC / 120 VDC	116 VDC / 150 VDC	
MPP Voltage Range	150 VDC ~ 320 VDC	250 VDC ~ 450 VDC	
Maximum Input Current	15 A	13 A	18 A
Isc PV (absolute maximum)	15 A	13 A	18 A
Max. inverter backfeed current to the array	0 A	0 A	
GRID OUTPUT (AC)			
Nominal Output Voltage	101/110/120/127 VAC	208/220/230/240 VAC	
Output Voltage Range	88 - 127 VAC	184 - 265 VAC	
Output Frequency Range	47.5 ~ 51.5 Hz or 57.5 ~ 61.5 Hz	47.5 ~ 51.5 Hz or 59.3~ 60.5Hz	
Nominal Output Current	18 A*	13 A*	
Inrush Current	23 A	17 A	
Maximum Output Fault Current	69 A	51 A	
Maximum output Overcurrent Protection	69 A	51 A	
Power Factor Range	0.9 lead – 0.9 lag		
AC INPUT			
AC Start-up Voltage	60-70 VAC	120-140 VAC	
Auto Restart Voltage	85 VAC	180 VAC	
Acceptable Input Voltage Range	80-130 VAC/80-150VAC	170 - 280 VAC	
Nominal Frequency	50 Hz / 60 Hz		
AC Input Power	2400VA/2400W	5100VA/5100W	
Maximum AC Input Current	30 A	30 A	30 A
Inrush Input Current	30 A	30 A	30 A
BATTERY MODE OUTPUT (AC)			
Nominal Output Voltage	101/110/120/127 VAC	208/220/230/240 VAC	
Output Frequency	50 Hz / 60 Hz (auto sensing)		
Output Waveform	Pure sine wave		
Output Power	2000VA/2000W	3000VA/3000W	
Output Current	19.8A/18.2A/16.7A/15.7A	14.4A/13.6A/13A/12.5A	
Efficiency (DC to AC)	90%	92%	
BATTERY & CHARGER			
Nominal DC Voltage	48 VDC		
Maximum Battery Discharging Current	65 A	92 A	
Maximum Charging Current	25 A		

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

Annexe 3: Fiche technique du module PV

Poids	19 kg
Boîtier de raccordement	IP 65 - IEC 60529
Type de connecteur	MC4 ou compatible
Surface du verre frontal	Texturé
Classe de puissance	250 W
Tolérance de puissance	-0/+3 W
Cellules monocristallines	60 au format de 156x156 mm
Encapsulation des cellules	Ethylène Vinyl Acétate
Caractéristiques électriques avec des conditions de test standard (STC) (1)	
P _{mpp}	250 W
U _{mpp}	37,12 V
I _{mpp}	8,30 A
U _{oc}	37,47 V
I _{sc}	8,70 A
résistance au courant inverse I _r	17 A
Réduction du rendement du module en cas de diminution de la puissance de rayonnement de 1 000 W/m ² à 200 W/m ² (avec 25 °C) : -0,32 % (absolu); tolérance de mesure P _{mpp} ±3 %	
résistance au courant inverse I _r	17 A
Réduction du rendement du module en cas de diminution de la puissance de rayonnement de 1 000 W/m ² à 200 W/m ² (avec 25 °C) : -0,32 % (absolu); tolérance de mesure P _{mpp} ±3 %	
Caractéristiques électriques avec NOCT (1)	
P _{mpp}	250 W
U _{mpp}	37,12 V
U _{oc}	37,47 V
I _{sc}	8,70 A
(1) NOCT : Normal Operation Cell Temperature 44,4 °C : intensité d'irradiation de 1000 W/m ² , masse d'air AM de 1,5, température de 25 °C, vitesse du vent 1 m/s, marche à vide électrique	
Caractéristiques thermiques	
Coefficient de température	
P _{max}	- 0,38 %
U _{oc}	- 0,53 %
I _{sc}	0,045 %
(1) Les caractéristiques électriques sont des moyennes typiques fondées sur des données de production historiques.	

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

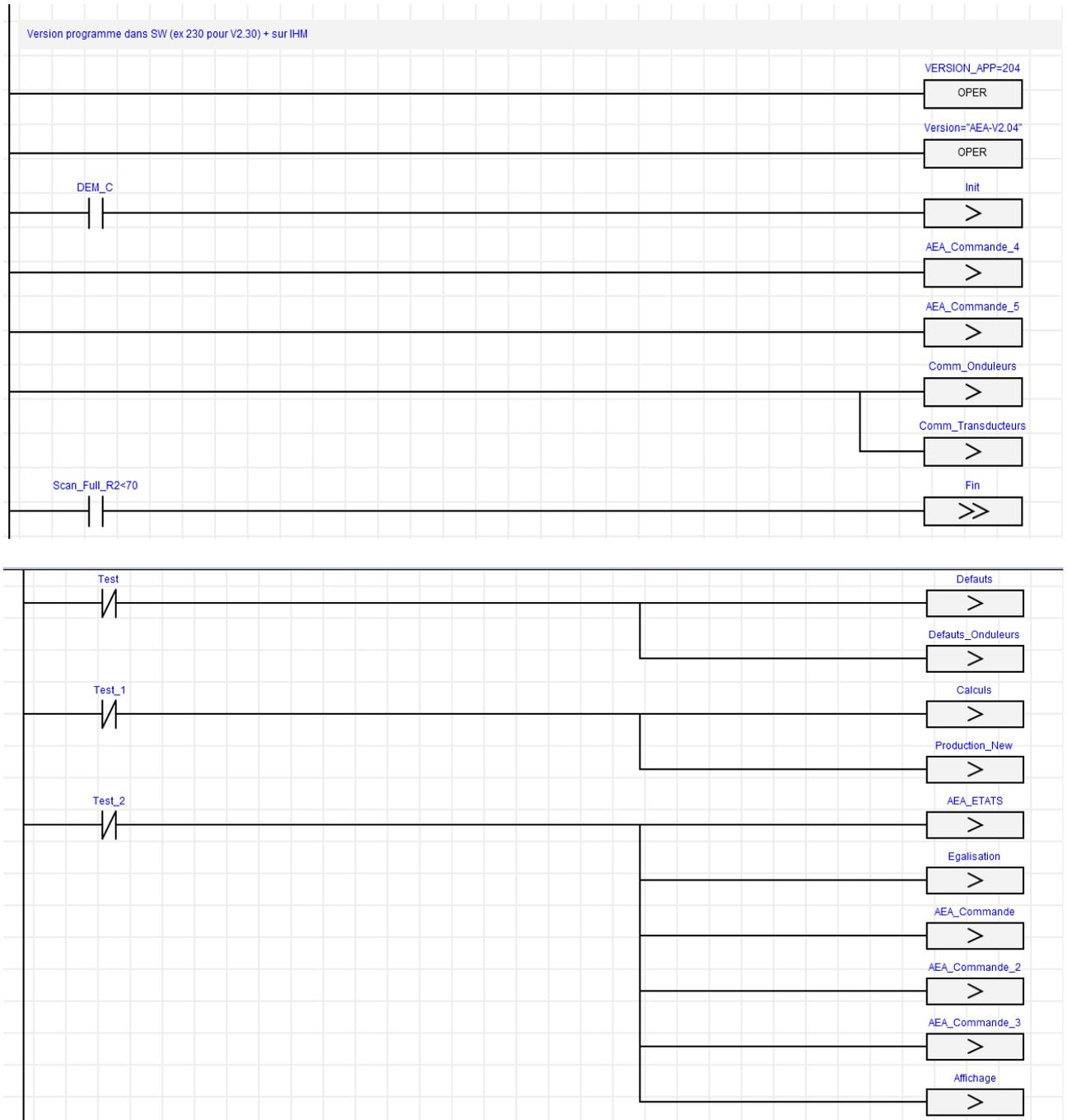
Annexe 4: Fiche technique des batteries

+ Specifications	HE-52026	HE-26052	HE-52104	HE-26208
Nominal Voltage	51.8 V	25.9 V	51.8 V	25.9 V
Nominal Capacity	26 Ah	52 Ah	104 Ah	208 Ah
Nominal Energy	1.3 kWh	1.3 kWh	5.4 kWh	5.4 kWh
Size*	12 x 10 x 4" 30 x 25 x 10 cm	12 x 10 x 4" 30 x 25 x 10 cm	24 x 12 x 6" 61 x 30 x 15 cm	24 x 12 x 6" 61 x 30 x 15 cm
Weight*	12 kg	12 kg	46 kg	46 kg
+ Operating Specifications				
Operating Voltage	58.8 ~ 42.0V	29.4 ~ 21.0 V	58.8 ~ 42.0 V	29.4 ~ 21.0 V
Charge Voltage	58.8 V	29.4 V	58.8 V	29.4 V
Maximum Charge	13 A	26 A	26 A	52 A
Temperature Range** Discharge (Charge)	-20 to 60°C (0 to 60°C)			
Maximum Discharge Continuous Peak	26 A 52 A	52 A 104 A	52 A 104 A	104 A 208 A
+ Storage Specifications				
Voltage Range	51 ~ 53 V	25 ~ 27 V	51 ~ 53 V	25 ~ 27 V
Temperature Range	-20° ~ 40°C	-20° ~ 40°C	-20° ~ 40°C	-20° ~ 40°C

Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

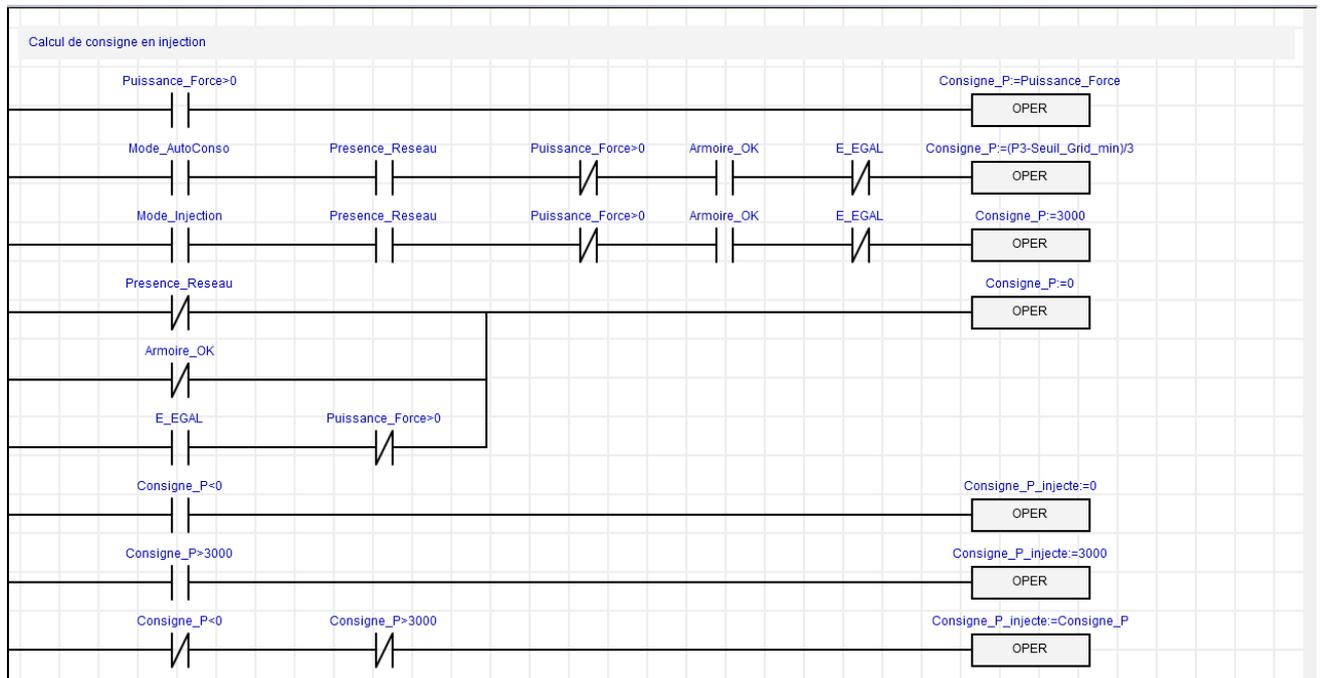
Annexe 5: Quelques codes de programmation

➤ Page cyclique

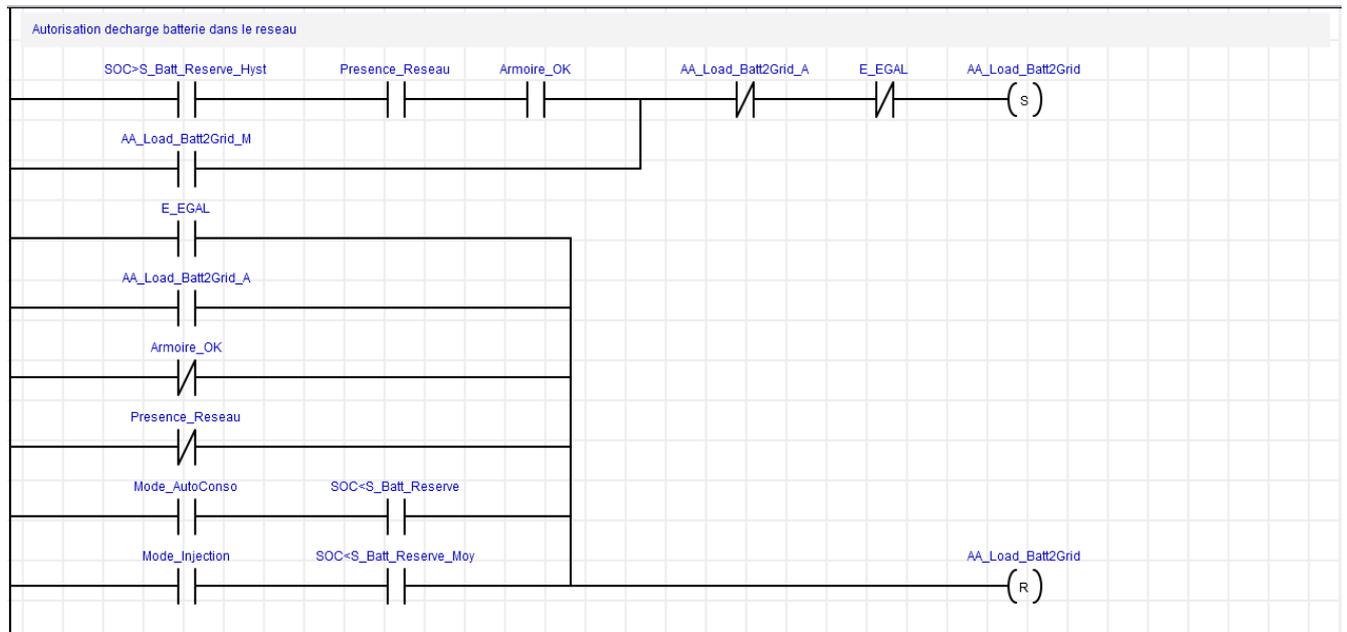


Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

➤ Code de programmation pour calcul de la consigne de la puissance à injecter

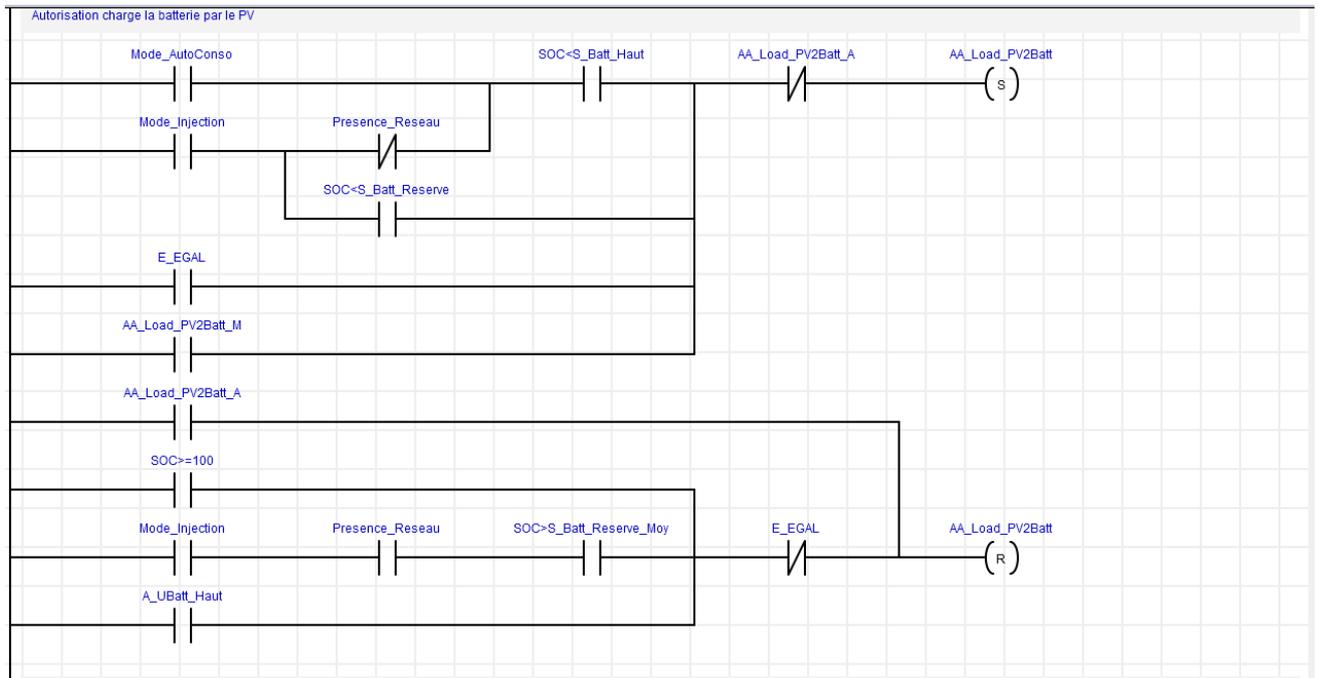


➤ Code de programmation pour autorisation de la décharge de batterie sur le réseau

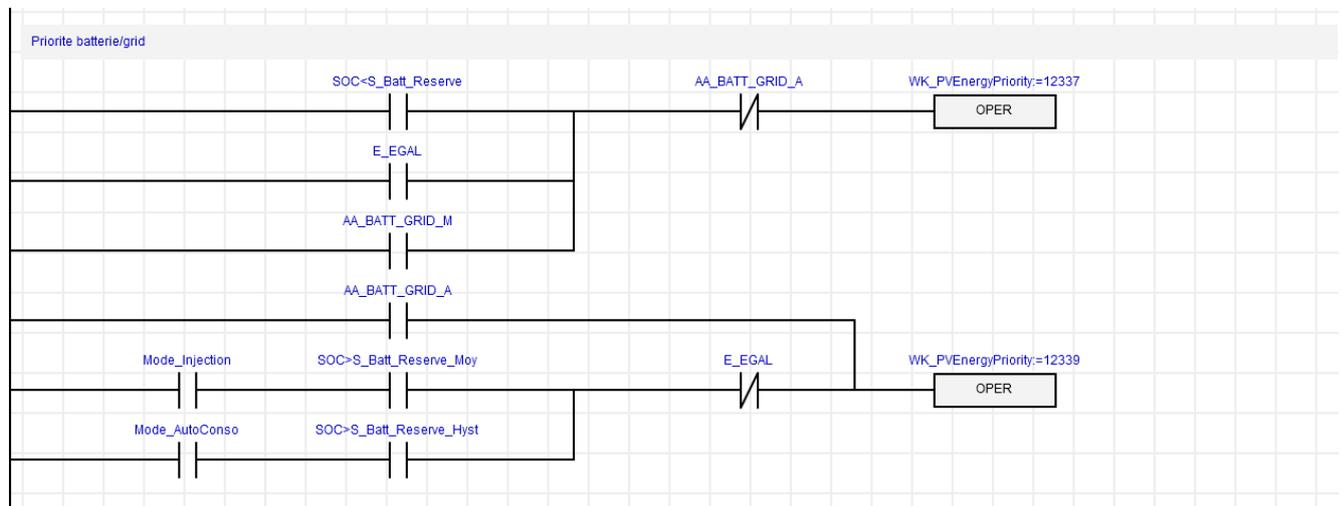


Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

➤ Code de programmation pour autorisation de la charge de la batterie par le PV



➤ Code de programmation pour le changement de la priorité entre la batterie et le réseau



Développement d'une unité de gestion et conversion d'énergie pour centrale hybride PV/GE basée sur une nouvelle architecture produit

➤ Code de programmation pour la charge de la batterie par le réseau

