



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2025



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER

Filière : Génie électrique.

Spécialité : Automatique et informatique industrielle.

Présenté Par :

- Mr. Bouferma Lakehal
- Melle Bengueddach Imene

Thème :

**Étude d'un système automatisé de gestion de stockage
d'énergie.**

Soutenu le 30/06/2025 devant le jury composé de :

Président :	Dr. Daoud Mohamed	MCA	Université de Mostaganem.
Examineur :	Dr. Rebhi Mustapha	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Dr. Larbi Beklaouz Hadj	MCB	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2024/2025

Année Universitaire 2024/2025



Remerciements


Avant toute chose, nous remercions le grand Dieu, source de toute force et de sagesse, qui nous a accordé le courage, la volonté, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce présent travail.

Nous adressons nos chaleureux remerciements à notre encadreur, Monsieur Larbi Beklaouez, dont l'expertise, les conseils avisés, les critiques constructives ont été d'un apport inestimable tout au long de la réalisation de ce projet, il a su nous guider tout en nous permettant de développer une plus grande autonomie dans notre travail.

Nous voudrions également exprimer notre reconnaissance à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de l'évaluer.

Que nos très chers parents trouvent ici l'expression de notre reconnaissance infinie, pour leur amour inébranlable, leur soutien sans faille, leurs sacrifices constants, et pour avoir toujours cru en nous.

Enfin, nous ne manquons pas de remercier nos frères et sœurs, ainsi que nos proches et amis, pour leur présence rassurante, leurs encouragements et leur écoute attentive durant toute cette période.



Résumé

Ce mémoire présente l'étude et la mise en œuvre d'un système automatisé de stockage d'énergie, basé principalement sur des panneaux photovoltaïques, un contrôleur MPPT, des batteries, un onduleur et un système de gestion intelligente de l'énergie. L'objectif est d'optimiser la production, la distribution et le stockage de l'énergie, en utilisant des techniques. Le système permet d'alimenter des charges en courant continu et alternatif, tout en tenant compte des variations de la production solaire, de la demande en énergie et des contraintes du réseau et des batteries.

Summary

This thesis presents the study and implementation of an automated energy storage system, mainly based on photovoltaic panels, an MPPT controller, batteries, an inverter, and an intelligent energy management system. The goal is to optimize energy production, distribution, and storage using advanced techniques. The system is capable of supplying both DC and AC loads while considering solar production fluctuations, energy demand, and the constraints of the grid and batteries.

الملخص

قدم هذا البحث دراسة وتنفيذ نظام آلي لتخزين الطاقة، يعتمد بشكل أساسي على الألواح الكهروضوئية ووحدة تحكم والبطاريات، والعاكس، ونظام ذكي لإدارة الطاقة. يهدف هذا النظام إلى تحسين إنتاج وتوزيع وتخزين الطاقة باستخدام تقنيات متقدمة. يتيح النظام تغذية الأحمال بالتيار المستمر والمتناوب، مع مراعاة تقلبات الإنتاج الشمسي، واحتياجات الطاقة، والقيود المتعلقة بالشبكة والبطاريات.

Mot clé : Automatisation, MPPT, PV, Onduleur, Gestion intelligente, Stockage d'énergie

Table des matières

Introduction Générale.....	2
CHAPITRE I : Etat de l'art sur les systèmes d'énergie	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Principales énergies Renouvelables	5
I.2.1. Énergie Solaire.....	5
I.2.2 Énergie éolienne.....	6
I.2.3. Énergie Hydraulique	7
I.3. Le Stockage d'Énergie dans les Systèmes Renouvelables	7
I.3.1. Importance du stockage dans les systèmes solaires et hybrides	8
I.3.2. Technologies de stockage utilisées.....	8
I.4. Contrôle et Automatisation des Systèmes.....	9
I.4.1. Le réseau électrique (Grid)	9
I.4.2. Les contrôleurs.....	10
I.4.3. Gestion de l'Énergie (EMS).....	13
I.5. Conclusion	14
CHAPITRE II : Généralités sur le système électrique hybride.....	15
II. Introduction	16
II.2. Types d'installations photovoltaïques.....	16
II.2.1 Installations photovoltaïques autonomes (off-grid).....	17
II.2.2 Installations photovoltaïques hybrides (on-grid).....	17
II.2.3 Présentation d'un système hybride avec stockage par batterie.....	17
II.3. Principaux composants du système hybride (PV-Grid)	19
II.3.1 Panneaux photovoltaïques	19
II.3.2 Système de stockage	21
II.3.3. Onduleurs.....	23
II.3.4 . Charges	25
II.4 Méthodes de gestion du stockage d'énergie.....	25
II.4.1 Priorisation de la consommation locale (Autoconsommation maximale).....	25
II.4.2 Gestion prédictive basée sur des algorithmes de contrôle (MPC).....	26
II.4.3 Contrôle Automatisé par Automate Programmable Industriel	27
II.5 Commande MPPT	28
II.5.1 Principe de fonctionnement.....	29
II.5.2 Méthodes de la commande MPPT.....	30

II.6	. Comparaison des techniques MPPT	33
II.7	. Contrôleur PWM	34
II.8	Analyse comparative des technologies PWM et MPPT	35
II.9	Conclusion	35
CHAPITRE III : Partie expérimentale		37
III.	Introduction	38
III.2	Présentation du système expérimentale.....	38
III.2.1	Schéma global de l'installation réelle	38
III.2.2	. Matériel et instruments de mesure utilisés	39
III.3	Définition dimensionnement du système	42
III.3.1	. Consommation énergétique	43
III.3.2	Calcul de l'énergie stockable dans la batterie	44
III.4	. Tests expérimentaux et évaluation des performances	45
III.5	. Interprétation des résultats	54
III.6	. Conclusion	55
Conclusion générale		57
Références		59

Liste des figures

<i>Figure 1 : Panneaux solaires photovoltaïques.</i>	6
<i>Figure 2: Eoliennes terrestres.</i>	7
<i>Figure 3 : L'énergie hydraulique.</i>	7
<i>Figure 4 : Smart grid.</i>	10
<i>Figure 5 : Contrôleur modulaire ON/OFF multi-applications.</i>	11
<i>Figure 6 : Contrôleur de charge solaire PWM.</i>	11
<i>Figure 7 : Contrôleur de charge solaire MPPT.</i>	12
<i>Figure 8 : Smart contrôleur.</i>	12
<i>Figure 9 : Energy Management System.</i>	13
<i>Figure 10 : Installations photovoltaïques autonome.</i>	17
<i>Figure 11 : Schéma bloc du système étudié.</i>	18
<i>Figure 12 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [7].</i>	19
<i>Figure 13 : Montage en série des PV [8].</i>	20
<i>Figure 14 : Montage en parallèle des PV [8].</i>	21
<i>Figure 15 : Schéma électrique équivalent d'un BMS.</i>	23
<i>Figure 16 : Programme national d'énergie renouvelable-Algérie (2015-2030) [11].</i>	26
<i>Figure 17 : Stratégie de la commande prédictive [12].</i>	26
<i>Figure 18 : Automate Programmable Industriel Didactisé API Siemens [14].</i>	27
<i>Figure 19 : Caractéristique du principe de fonctionnement de la commande MPPT [19].</i>	29
<i>Figure 20 : Organigramme de l'algorithme P&O [19].</i>	31
<i>Figure 21 : Organigramme de l'algorithme INC.</i>	32
<i>Figure 22 : Organigramme de l'algorithme FCO.</i>	33
<i>Figure 23 : Régulateur de Charge Solaire PWM [24].</i>	34
<i>Figure 24 : Schéma global du système étudié.</i>	38
<i>Figure 25 : Cellules solaires didactiques.</i>	39
<i>Figure 26 : Panneau solaire.</i>	40
<i>Figure 27 : Régulateur de charge solaire PWM</i>	41
<i>Figure 28 : Onduleur 500VA.</i>	42
<i>Figure 29 : Convertisseur DC/DC.</i>	42
<i>Figure 30 : Moteur DC.</i>	43
<i>Figure 31 : Schéma bloc du système étudié.</i>	46
<i>Figure 32 : Variation de tension avec $P= 75W$.</i>	46
<i>Figure 33 : Variation de courant avec $P= 75 W$.</i>	47
<i>Figure 34 : Variation de tension avec $P= 120W$.</i>	47
<i>Figure 35 : Variation de tension avec $P= 120W$.</i>	48
<i>Figure 36 : Schéma pour le cas de deux charges AC en parallèle.</i>	48
<i>Figure 37 : Variation de tension avec $P= 195W$.</i>	49
<i>Figure 38 : Variation de courant avec $P=195W$.</i>	49
<i>Figure 39 : variation de tension avec $P=150W$.</i>	50
<i>Figure 40 : variation de courant avec $P=150W$.</i>	50
<i>Figure 41 : courbe de caractéristique avec $P=150W$.</i>	51
<i>Figure 42 : Schéma pour le cas de deux charges AC en parallèle avec 2 batteries.</i>	51
<i>Figure 43 : Variation de tension avec $P=195W$.</i>	52

<i>Figure 44 : variation de courant avec $P=195W$.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 45 : courbe caractéristique avec $P=196W$.</i>	<i>53</i>
<i>Figure 46 : Variation de tension pour une charge DC.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 47 : Variation de courant pour une charge DC.</i>	<i>54</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Types d'onduleurs.</i>	24
<i>Tableau 2 : Comparaison des méthodes MPPT [21].</i>	34
<i>Tableau 3 : Principales différences entre le PWM et le MPPT.</i>	35
<i>Tableau 4 : Caractéristiques techniques du PV.</i>	40
<i>Tableau 5 : Consommation énergétique du système.</i>	43
<i>Tableau 6 : Résultats du test et de mesure pour $P=75W$.</i>	46
<i>Tableau 7 : Résultats du test et de mesure pour $P=120W$.</i>	47
<i>Tableau 8 : Résultats du test pour $P=195W$.</i>	49
<i>Tableau 9 : Résultats du test pour $P=150W$.</i>	50
<i>Tableau 10 : Résultats du test pour $P=195W$ avec deux batteries.</i>	52

Nomenclature

Grandeur	symbole	unité
La puissance	p	Watt
La tension	v	Volt
Le courant	A	Ampère
La durée	t	Heur
L'énergie	E	Watt heur
La capacité de la batterie	c	Ampère heur
La profondeur	DOD	Pourcentage
Le temps d'enseuillement	Ir	Heure/jour
Le rendement	η	Pourcentage
La résistance	R	Ohm

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un monde en constante mutation, la question énergétique occupe une place centrale dans les débats scientifiques, politiques et sociétaux. L'augmentation continue de la consommation mondiale d'énergie, couplée à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux effets du changement climatique, pousse la communauté internationale à repenser ses modes de production et de consommation. Dans ce contexte, les énergies renouvelables, et plus particulièrement l'énergie solaire, s'imposent comme des alternatives durables, propres et stratégiques pour assurer la transition énergétique. En Algérie, la priorisation des énergies renouvelables « solaire et éolienne » constitue aujourd'hui un défi majeur et un objectif national.

L'énergie solaire, largement exploitée dans de nombreux pays, présente plusieurs avantages majeurs : accessibilité, caractère inépuisable et respect de l'environnement. Toutefois, son principal inconvénient réside dans son intermittence et sa dépendance aux conditions climatiques. Pour compenser cette variabilité, l'intégration de systèmes de stockage d'énergie, notamment des batteries, s'avère indispensable. Ces dispositifs permettent d'emmagasiner l'excédent énergétique produit durant les périodes d'ensoleillement pour le redistribuer lorsque la production devient insuffisante ou s'interrompt. Cependant, la simple capacité de stockage ne suffit pas. L'efficacité globale du système dépend principalement de la qualité de sa gestion énergétique. Actuellement au cœur des recherches en automatisme et en informatique industrielle, la gestion automatique de l'énergie remplit plusieurs fonctions cruciales :

- Optimisation de l'utilisation des ressources disponibles.
- Protection des composants électriques
- Prolongation de la durée de vie des batteries
- Garantie d'une alimentation électrique stable (que les charges soient en courant continu [DC] ou alternatif [AC]).

L'intelligence du système se manifeste particulièrement par sa capacité à effectuer des commutations automatiques entre les différentes sources d'énergie (panneaux photovoltaïques, batteries, réseau électrique) en fonction des conditions opérationnelles et des besoins énergétiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'études, axé sur l'étude d'un système hybride de stockage d'énergie intégrant :

Introduction Générale

- Des panneaux solaires photovoltaïques,
- Un système de stockage par batteries,
- Un régulateur de charge PWM (modulation par largeur d'impulsion),
- Un onduleur DC/AC,
- Une interface de connexion au réseau électrique.

Ce système polyvalent a été conçu pour alimenter simultanément des charges en courant continu (DC) et alternatif (AC), garantir une autonomie énergétique partielle et assurer une gestion intelligente et automatique des flux énergétiques. L'objectif principal de cette étude consiste en une analyse complète du système, intégrant ses : Contraintes techniques intrinsèques, conditions réelles d'exploitation et l'environnement opérationnel.

Notre mémoire se structure selon une approche méthodologique en trois chapitres : Le premier chapitre 'Fondements théoriques' c'est une recherche bibliographique couvrant les systèmes photovoltaïques, les technologies de stockage d'énergie et les principes de gestion automatique. Dans le chapitre 2 'Modélisation du système de la gestion de stockage d'énergie' s'articule aux points suivants : Étude approfondie du système hybride, Justification des choix technologiques et dimensionnement des composants. Le chapitre 3 c'est une 'validation expérimentale' nous effectuant l'implémentation physique du système, fixer les protocoles de tests et méthodologie, l'acquisition et traitement des données et finalement l'analyse des résultats.

Ce projet nous a offert l'opportunité de concrétiser nos connaissances théoriques en automatique, l'électronique et l'électricité de puissance, tout en développant une vision pragmatique des enjeux réels de la gestion énergétique. Cette expérience nous a surtout appris à concevoir un système intelligent caractérisé par :

- Une adaptabilité à son environnement,
- Une capacité d'évolution dynamique,
- Un processus décisionnel autonome basé sur les ressources disponibles.

CHAPITRE I : Etat de l'art sur les systèmes d'énergie

I.1. Introduction

La montée en puissance des énergies renouvelables ne reflète pas seulement une tendance actuelle, mais incarne une transition essentielle vers un avenir énergétique durable. Face à l'épuisement des ressources fossiles – non seulement limitées, mais aussi génératrices d'externalités négatives (pollution, changements climatiques) –, les énergies renouvelables s'imposent comme une alternative à la fois viable et prometteuse. Leur principal atout réside dans leur abondance : le soleil, le vent, l'eau et la biomasse constituent des gisements d'énergie quasi inépuisables [1].

Cependant, ces sources présentent des caractéristiques spécifiques nécessitant des adaptations techniques majeures des infrastructures. En effet, les énergies renouvelables sont souvent dispersées géographiquement et soumises à une intermittence de production. Cette variabilité rend leur intégration au réseau électrique conventionnel complexe, car elle exige une gestion dynamique de l'équilibre entre offre et demande. Pour relever ces défis, les systèmes renouvelables doivent impérativement s'appuyer sur des solutions de stockage d'énergie. Ces dernières permettent de compenser les fluctuations de production et de garantir une alimentation continue, même en l'absence de production naturelle. Par ailleurs, des infrastructures modernes, intégrant automatisation, contrôle intelligent et interconnexion avec le réseau électrique, sont indispensables pour optimiser la performance globale de ces systèmes [1]. Ainsi, les systèmes énergétiques renouvelables ne se réduisent plus à la simple production d'électricité ; ils s'inscrivent dans une vision intégrée de gestion énergétique durable, où le stockage et l'automatisation occupent une place centrale.

I.2. Principales énergies Renouvelables

I.2.1. Énergie Solaire

Actuellement, l'énergie solaire est exploitée selon deux principales filières :

a) Photovoltaïque : Cette technologie produit de l'électricité par conversion directe d'une partie du rayonnement solaire au sein d'une cellule photovoltaïque. Ces cellules (Figure 1) sont constituées de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, nécessitant une matière première d'une très haute pureté. Le photovoltaïque bénéficie d'un potentiel prometteur, porté par :

- des progrès technologiques constants,
- une réduction continue des coûts,

- sa modularité et sa polyvalence d'usage.

Cette solution peut en effet fonctionner en mode autonome (sans raccordement au réseau) ou en injection réseau, couvrant ainsi des besoins variés : de l'alimentation d'un foyer (via des panneaux en toiture) à des applications industrielles [2].



Figure 1: Panneaux solaires photovoltaïques.

b) Thermique : Cette filière exploite l'énergie solaire pour produire de la chaleur ou, indirectement, de l'électricité. Elle repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique, utilisable selon deux modes principaux :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires,
- En usage indirect de la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement [3].

I.2.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne représente l'exploitation par l'homme de l'énergie cinétique du vent, comme illustré sur la Figure 2. Cette source d'énergie renouvelable présente plusieurs caractéristiques fondamentales :

- Elle est inépuisable à l'échelle humaine
- Sa production est variable, dépendant des conditions climatiques
- Son exploitation ne génère aucune émission directe de gaz à effet de serre [4].



Figure 2: Eoliennes terrestres.

I.2.3. Énergie Hydraulique

L'énergie hydraulique représente une source renouvelable d'énergie qui utilise la puissance de l'eau pour générer de l'électricité (Figure 3). C'est l'une des formes d'énergie les plus anciennes et les plus utilisées à travers le monde, jouant un rôle crucial dans la production d'énergie propre et décarbonée. Le grand hydraulique, comprenant les centrales à grande et moyenne chute, et le petit hydraulique, qui fonctionne au fil de l'eau. De plus, les énergies marines, telles que les centrales marémotrices, les hydroliennes et les systèmes houlomotrices, exploitent également la force motrice de l'eau pour produire de l'énergie [5].



Figure 3 : L'énergie hydraulique.

I.3. Le Stockage d'Énergie dans les Systèmes Renouvelables

Le stockage de l'énergie consiste à conserver l'excédent d'énergie produite pour la restituer au moment voulu pour une utilisation ultérieure. Il existe différentes méthodes de stockage de l'énergie tout au long de la chaîne d'approvisionnement. L'idée est d'assurer

l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie, de réduire les pertes et ainsi d'optimiser les coûts.

Le stockage rend plus flexible l'intermittence à laquelle est soumise une grande partie de la production d'énergie renouvelable. En effet, cela permet de libérer l'énergie lorsque la demande est élevée et la stocker lorsque la demande est plus faible [6].

I.3.1. Importance du stockage dans les systèmes solaires et hybrides

Le stockage d'énergie joue un rôle fondamental dans les systèmes basés sur les énergies renouvelables, notamment dans les configurations solaires et hybrides. En effet, ces systèmes reposent sur des sources naturelles dont la production est souvent fluctuante et dépendante des conditions environnementales (par exemple, le soleil ou le vent). Le stockage permet de surmonter ces limitations en assurant une gestion optimale de l'énergie produite et en répondant aux besoins des utilisateurs de manière continue et fiable.

Le système de stockage constitue un élément fondamental dans une installation photovoltaïque, tant sur le plan technique qu'économique. En effet, il représente entre 40 % et 50 % du coût total de l'installation. Compte tenu de l'importance cruciale du stockage électrochimique pour l'énergie solaire, une étude théorique approfondie des différents types de batteries a été réalisée.

I.3.2. Technologies de stockage utilisées

Le choix de la technologie de stockage est un facteur déterminant pour garantir le bon fonctionnement des systèmes solaires et hybrides. Parmi les solutions disponibles, les batteries occupent une place prédominante en raison de leur polyvalence et de leur capacité à s'adapter aux besoins spécifiques de ces systèmes. Toutefois, d'autres technologies de stockage existent, chacune présentant des avantages et des limites en termes de coût, de durée de vie et d'efficacité.

a) Batteries : Les batteries constituent la solution la plus répandue pour le stockage d'énergie dans les systèmes solaires et hybrides. Elles permettent de stocker l'énergie électrique sous forme chimique et de la restituer en fonction des besoins. Les principales technologies incluent :

- *Batteries lithium-ion* : Haute densité énergétique et longue durée de vie, mais coût élevé.
- *Batteries au plomb-acide* : Économiques et robustes, mais moins performantes en termes de capacité et de durée de vie.

- *Batteries nickel-cadmium* : Résistantes aux températures extrêmes, mais moins écologiques.

Le choix des batteries, dépend des exigences du système en matière de puissance, d'autonomie et de budget.

b) Systèmes mécaniques : Ces technologies reposent sur des principes physiques pour stocker l'énergie. Aussi, sont particulièrement adaptés aux besoins de la stabilisation du réseau électrique.

- Volants d'inertie : Stockent l'énergie sous forme cinétique via un rotor en rotation rapide, idéal pour les applications nécessitant des décharges rapides.
- Pompage hydraulique (STEP) : Transfère l'eau entre deux réservoirs à différentes altitudes, permettant un stockage à grande échelle avec une bonne efficacité.

c) Stockage thermique : Cette méthode consiste à accumuler de la chaleur ou du froid dans des matériaux (sels fondus, céramiques, etc.) pour une utilisation ultérieure. Elle est principalement utilisée dans :

- Centrales solaires thermodynamiques (stockage par sels fondus pour prolonger la production nocturne).
- Systèmes de chauffage/refroidissement (ballons d'eau chaude, stockage géothermique).

Cette technologie améliore l'efficacité énergétique en réduisant les pertes et en permettant une gestion flexible de la demande.

I.4. Contrôle et Automatisation des Systèmes

Le contrôle et l'automatisation, ces deux notions jouent un rôle crucial dans l'optimisation, la gestion et la fiabilité des systèmes énergétiques modernes, notamment ceux basés sur les énergies renouvelables comme les systèmes solaires hybrides. Parmi les fonctions clés du contrôle et de l'automatisation.

I.4.1. Le réseau électrique (Grid)

Le réseau électrique (*Grid*) est un système complexe chargé de transporter et de distribuer l'électricité depuis les centres de production (centrales électriques, parcs solaires, éoliennes, etc.) jusqu'aux consommateurs finaux (ménages, industries, infrastructures publiques, etc.). Il constitue l'épine dorsale des systèmes énergétiques modernes.

Structure du réseau électrique : Le réseau se décompose en trois segments principaux :

- **Production :** Génération de l'électricité à partir de différentes sources (fossiles, renouvelables, nucléaire).
- **Transport :** Acheminement de l'électricité haute tension sur de longues distances via des lignes THT (Très Haute Tension).
- **Distribution :** Dernière étape vers les utilisateurs finaux, avec une réduction de la tension pour un usage domestique ou industriel.

Cette architecture permet une alimentation stable et adaptée aux besoins variés des consommateurs.



Figure 4 : Smart grid.

I.4.2. Les contrôleurs

Un contrôleur est un dispositif électronique conçu pour gérer et réguler le flux d'énergie entre une source d'énergie (par exemple, un panneau solaire) et un système de stockage (par exemple, une batterie). Son objectif principal est de garantir que l'énergie produite soit transférée efficacement et en toute sécurité vers la batterie, tout en protégeant les composants du système des surcharges ou des dysfonctionnements.

a) Type des contrôleurs

- **Contrôleur ON /OFF (ou Shunt) :** Fonctionne en coupant simplement le courant lorsque la batterie est chargée. Il est simple à utiliser et économique mais moins performant que les autres contrôleurs.



Figure 5 : Contrôleur modulaire ON/OFF multi-applications.

▪ **Contrôleur PWM (Pulse Width Modulation) :** Les contrôleurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM) fonctionnent en allumant et en éteignant très rapidement l'alimentation du moteur. La puissance moyenne produite par cette fréquence de commutation affecte la vitesse à laquelle le moteur tourne, il utilise une modulation de largeur d'impulsion pour ajuster progressivement le courant vers la batterie lorsqu'elle approche de sa capacité maximale. Il est caractérisé par son coût inférieur, sa simplicité d'utilisation et son adaptation aux petits systèmes solaires. Le PWM est plus efficace que le contrôleur ON/OFF, mais moins avancé que le MPPT [7].



Figure 6 : Contrôleur de charge solaire PWM.

▪ **Contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :** Un contrôleur de charge MPPT, ou bien régulateur de charge, est bien plus performant qu'un contrôleur PWM classique, car il permet non seulement de surveiller l'état des batteries, mais aussi d'évaluer le potentiel énergétique des panneaux solaires.

Grâce à son fonctionnement avancé, le régulateur MPPT optimise en temps réel la tension produite par les panneaux pour extraire leur maximum d'énergie, ce qui s'avère particulièrement efficace dans des conditions météorologiques défavorables. En ajustant constamment la tension des panneaux, ce type de contrôleur offre une bien meilleure efficacité que les régulateurs PWM classiques.

En somme, le régulateur de charge solaire MPPT agit comme un lien intelligent entre les panneaux solaires et les batteries, maximisant ainsi l'utilisation de l'énergie

solaire disponible à tout moment. Cette technologie peut même améliorer le rendement global de l'installation jusqu'à 30 % par rapport à un système équipée d'un régulateur PWM.



Figure 7 : Contrôleur de charge solaire MPPT.

L'évolution des systèmes énergétiques, notamment ceux basés sur les énergies renouvelables, a conduit à une transformation significative des technologies de contrôle. Avec la complexification des systèmes énergétiques modernes, intégrant plusieurs sources d'énergie (solaire, éolienne, réseau électrique), des besoins plus avancés sont apparus. La gestion globale de ces systèmes hybrides nécessite non seulement une régulation précise de la batterie, mais aussi une coordination intelligente entre toutes les composantes du système. C'est dans ce contexte que les smart contrôleur sont venus révolutionner le domaine.

b) Smart Contrôleur

Un smart Controller est un contrôleur intelligent conçu pour superviser, gérer et optimiser les flux d'énergie dans un système énergétique. Il combine plusieurs fonctions avancées pour offrir une gestion autonome et adaptative du système. On cite quelques exemples concrets de smart contrôleurs utilisés dans le domaine des systèmes énergétiques, notamment pour les installations solaires hybrides et autres applications basées sur les énergies renouvelables : 'Tesla Powerwall', 'SMA Sunny Home Manager', 'Victron SmartSolar'.



Figure 8 : Smart contrôleur.

I.4.3. Gestion de l'Énergie (EMS)

Un EMS (Energy Management System) est un ensemble de technologies logicielles et matérielles qui permettent de gérer efficacement l'énergie dans un système énergétique. Il agit comme le "cerveau" du système en prenant des décisions en temps réel pour distribuer l'énergie entre les différentes sources (panneaux solaires, générateurs, réseau électrique), le stockage (batterie) et les charges finales [3].

L'objectif principal d'un EMS est d'optimiser l'utilisation de l'énergie tout en garantissant une fourniture continue et fiable, même en présence de fluctuations dans la production ou la demande.

Il fonctionne en collectant des données en temps réel provenant de divers capteurs (état de charge de la batterie, production solaire, consommation des charges, conditions environnementales) et en prenant des décisions automatiques pour distribuer l'énergie de manière optimale entre les sources (panneaux solaires, générateurs, réseau), le stockage (batterie) et les charges finales. Les technologies utilisées incluent des algorithmes avancés comme le MPPT pour maximiser la production solaire, des systèmes de communication via des protocoles industriels (Modbus, CAN Bus, Ethernet/IP) pour interconnecter les équipements, et des bases de données pour stocker et analyser les données historiques. Certains EMS intègrent également des techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour anticiper les besoins énergétiques et ajuster dynamiquement les stratégies de gestion.

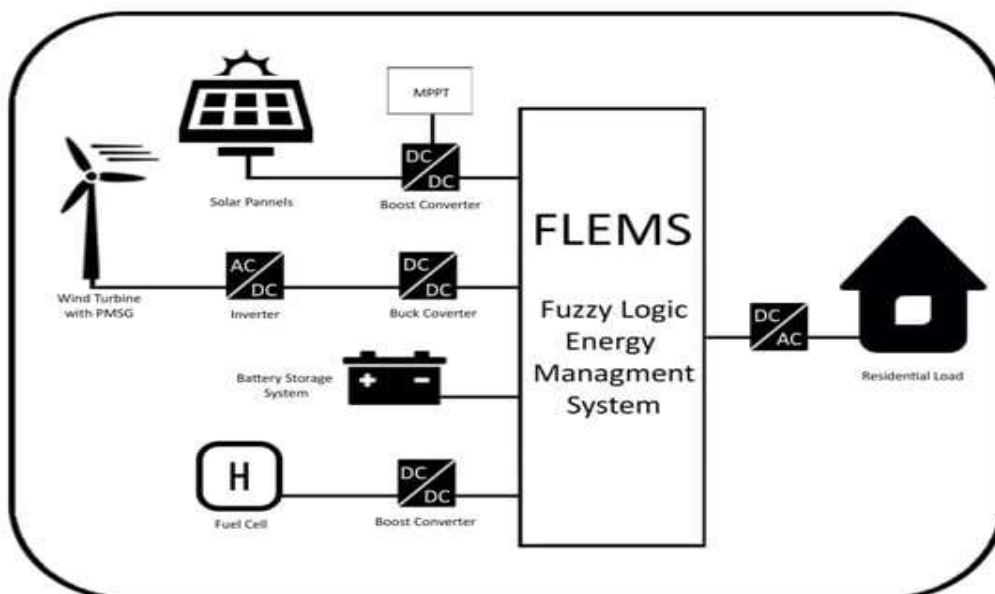


Figure 9 : Energy Management System.[8]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique des principales sources d'énergie renouvelables en se basant sur l'énergie solaire. Nous avons également détaillé l'importance du stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques et hybrides, ainsi que les technologies de stockage les plus courantes telles que les batteries. Ensuite, nous avons abordé les dispositifs de régulation et de contrôle indispensables au bon fonctionnement de ces systèmes, en mettant en lumière le rôle essentiel des contrôleurs intelligents, du système de gestion d'énergie (EMS) et de l'automatisation dans les installations modernes. Cette base théorique nous permettra d'introduire, dans le chapitre suivant, l'étude détaillée d'un système automatique de stockage d'énergie.

CHAPITRE II : Généralités sur le système électrique hybride

II. Introduction

L'objectif de ce deuxième chapitre est d'introduire les problématiques liées à la gestion automatisée de l'énergie dans un système hybride combinant une production d'énergie renouvelable, un réseau électrique (grid) et un système de stockage. Ce type de système repose sur une interaction optimale entre plusieurs composants clés : les panneaux photovoltaïques (PV), le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking), la batterie, et le réseau électrique.

Nous allons présenter dans un premier temps les différents types d'installations photovoltaïques avant de passer à l'architecture globale du système et expliquer comment ses composants interagissent pour garantir une gestion automatique efficace de l'énergie. Ensuite, nous explorerons les principales méthodes utilisées pour gérer les flux d'énergie, notamment la priorisation de la consommation locale, gestion prédictive basée sur des algorithmes de contrôle (MPC) et le Contrôle Automatisé par un automate programmable industriel. Ces stratégies sont illustrées à travers des schémas fonctionnels et des organigrammes qui mettent en lumière les critères d'optimisation employés.

Enfin, nous allons aborder les différents algorithmes de poursuite du point maximal de puissance (PPM) en passant par les méthodes de commande MPPT puis nous allons également comparer les différents types de contrôleurs afin de faciliter le dimensionnement de notre système.

II.2. Types d'installations photovoltaïques

Les installations photovoltaïques se classent principalement en deux grandes catégories :

- **Installations photovoltaïques autonomes** : Ces systèmes fonctionnent indépendamment du réseau électrique (off grid). Ils sont conçus pour alimenter des applications spécifiques sur place en utilisant uniquement l'énergie solaire comme source d'énergie.
- **Installations photovoltaïques hybrides** : est une installation énergétique qui combine l'énergie solaire issue des panneaux photovoltaïques ainsi qu'une autre source d'énergie. Cette autre source peut être un groupe électrogène ou une éolienne particulièrement.

II.2.1 Installations photovoltaïques autonomes (off-grid)

Dans une installation autonome (Figure 10), l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques est soit directement consommée pour alimenter des équipements tels que des systèmes de pompage ou de ventilation, soit stockée dans des batteries afin d'être utilisée ultérieurement.

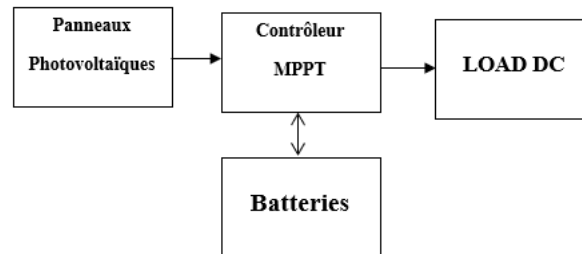


Figure 10 : Installations photovoltaïques autonome.

II.2.2 Installations photovoltaïques hybrides (on-grid)

Dans un système hybride photovoltaïque connecté au réseau, l'énergie produite par les panneaux solaires peut être utilisée localement, stockée dans des batteries, ou injectée dans le réseau électrique. Lorsque la production solaire ne suffit pas à couvrir la demande, le réseau électrique prend le relais pour assurer une alimentation continue des charges.

Dans notre cas, une charge en courant continu est alimentée directement après le contrôleur MPPT, tandis qu'une charge en courant alternatif est alimentée via l'onduleur. Un onduleur bidirectionnel (ou réversible) est requis pour permettre la gestion intelligente des flux d'énergie entre les panneaux, les batteries, les charges et le réseau.

Pour l'étude de notre système, qu'on va présenter par la suite, on va opter pour l'installation hybride combinant deux sources d'énergies, l'énergie solaire des panneaux photovoltaïques ainsi que le réseau électrique.

II.2.3 Présentation d'un système hybride avec stockage par batterie

Dans un contexte où les énergies renouvelables jouent un rôle croissant dans la transition énergétique, les systèmes photovoltaïques associés à des solutions de stockage par batterie représentent une solution clé pour garantir une production d'énergie propre, fiable et autonome. Ces systèmes permettent non seulement de capter l'énergie solaire grâce aux panneaux photovoltaïques, mais aussi de la stocker temporairement dans des batteries pour une utilisation ultérieure, notamment lorsque la production est insuffisante ou en cas de coupure réseau.

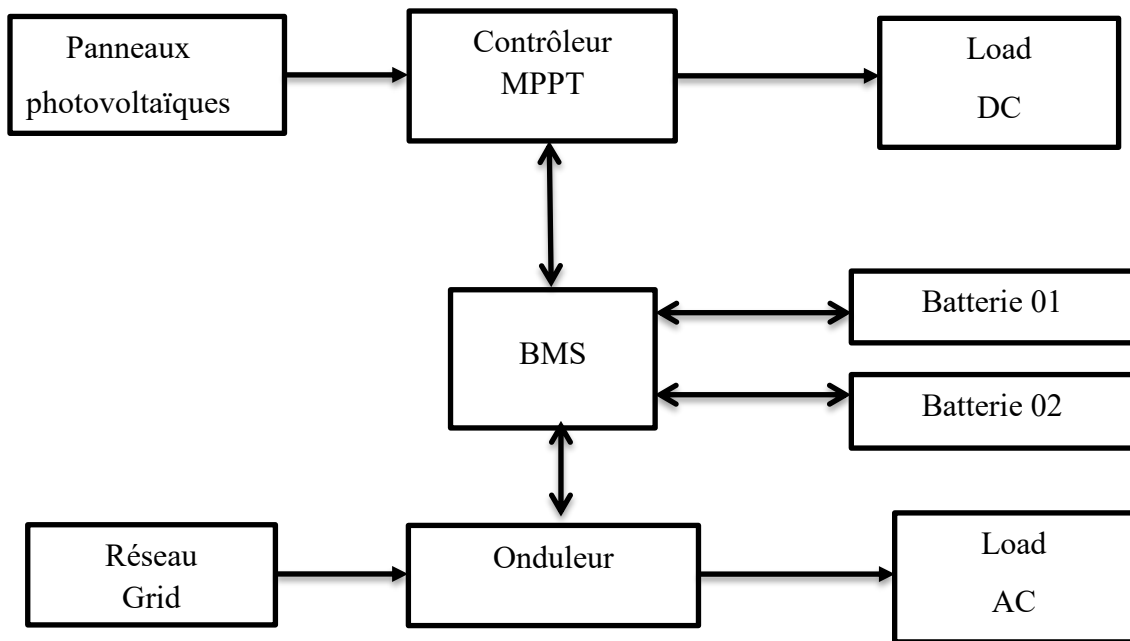


Figure 11 : Schéma bloc du système étudié.

La figure 11, illustre clairement et systématiquement le fonctionnement d'un système photovoltaïque conçu pour atteindre une efficacité énergétique maximale. Notre système combine une source d'énergie renouvelable, issue des panneaux photovoltaïques (PV), avec l'électricité provenant du réseau pour assurer une alimentation fiable et optimisée. Les panneaux PV captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité continue (DC) qui est ensuite dirigée vers un contrôleur MPPT, un élément clé du système, qui garantit que les panneaux fonctionnent toujours à leur point de sortie maximal, quelles que soient les variations de lumière ou de température. Le contrôleur agit comme un « gestionnaire intelligent », ajustant les paramètres électriques en temps réel pour optimiser la puissance de sortie. Afin d'extraire en continu le maximum d'énergie disponible des PV. La puissance régulée est ensuite transférée à la charge (par exemple, des appareils électriques), garantissant une utilisation fluide et efficace. Lorsque le soleil se couche ou que l'intensité du courant souhaitée diminue, le système passe à l'alimentation d'une batterie management système qui gère un groupe d'autres batteries, contrôlant la charge et la décharge de ces batteries séparément pour assurer une consommation de qualité et un fonctionnement fluide. Ici, nous devons utiliser une batterie à deux entrées car dans la deuxième partie du système, le contrôleur (Onduleur) est directement connecté à l'alimentation principale pour assurer la présence d'une autre sortie qui nous fournit du courant alternatif et également pour remplir son rôle de base de charge des batteries. Ce schéma montre donc non seulement les composants techniques, mais aussi leur rôle essentiel dans la conversion et la gestion de

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

l'énergie solaire, mettant en évidence l'ingéniosité et la précision de ce type de système. Ensuite, nous détaillerons également les interactions entre ces éléments et expliquerons comment ils contribuent à une gestion efficace de l'énergie au sein du système.

II.3. Principaux composants du système hybride (PV-Grid)

II.3.1 Panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est un élément clé d'un système solaire photovoltaïque, constitué de plusieurs cellules photovoltaïques. Ces cellules utilisent l'effet photoélectrique de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, pour transformer l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Cette conversion génère un courant électrique continu. La tension et l'intensité de ce courant varient en fonction de plusieurs paramètres, notamment le type de matériau utilisé, les dimensions du panneau, les conditions d'ensoleillement, la température ambiante, ainsi que d'autres facteurs liés au panneau lui-même [9].

a) Modèle d'une cellule photovoltaïque

Dans la littérature, divers modèles mathématiques ont été proposés pour représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque. Ces modèles varient en termes de complexité, de précision et du nombre de paramètres nécessaires à l'établissement de la caractéristique courant-tension (I-V).

Parmi ces modèles, le modèle à une seule diode est couramment utilisé en raison de son bon équilibre entre simplicité de mise en œuvre et précision des résultats. Il constitue la structure de base pour la modélisation du générateur photovoltaïque.

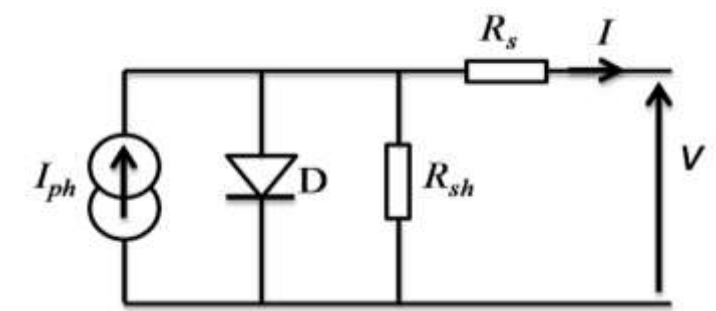


Figure 12 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [10].

Ce modèle (Figure 12) est dit à cinq paramètres dont : le photo-courant (I_{PH}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) due

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

aux contacts entre les semiconducteurs, et la résistance shunt (parallèle) (R_p) exprimant un courant de fuite.

a.1) Équations de la cellule PV

En appliquant la loi de Kirchoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_0 - I_P$$

Avec :

- I_{PV} : est le courant délivré par la cellule (A).
- I_{PH} : est le photocourant (A).
- I_0 : est le courant de seuil de la diode (A).
- I_P : est le courant qui parcourt la résistance R_p (A).

a.2) Montage des PV : Les PV peuvent être soit montés en série ou en parallèle :

- **Branchement en série :** Le montage en série des panneaux photovoltaïques est incontestablement la configuration la plus couramment utilisée, notamment lorsqu'il s'agit de produire de l'électricité à une tension de 230 V.

Ce type de raccordement est simple à mettre en œuvre : il consiste à relier les panneaux les uns après les autres, en branchant la sortie d'un panneau sur l'entrée du suivant. Plus précisément, le fil positif (+) d'un panneau se connecte au fil négatif (-) du panneau suivant, et ainsi de suite (Figure 13). Le résultat est une chaîne de panneaux interconnectés, d'où le terme anglais « String » qui désigne cette configuration.

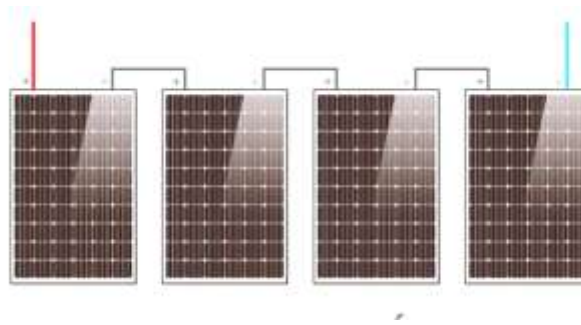


Figure 13 : Montage en série des PV [11].

Le principal avantage du montage en série des panneaux photovoltaïques réside dans la possibilité d'atteindre des tensions élevées, nécessaires pour produire, par exemple, du 230 V, alors qu'un seul panneau génère généralement moins de 30 V. Pour ce faire, il suffit de connecter les panneaux en série, c'est-à-dire en reliant la sortie d'un panneau à l'entrée du suivant. D'un point de vue physique, le modèle équivalent d'un ensemble de modules photovoltaïques branchés en série se caractérise par une tension totale correspondant à la

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

somme des tensions individuelles de chaque panneau, tandis que le courant reste identique à celui d'un seul panneau. Cette configuration permet ainsi d'adapter la production électrique aux besoins spécifiques d'une installation.

- **Branchement en parallèle :** Contrairement au branchement en série, le premier avantage du montage en parallèle est de permettre de rester dans la gamme de la basse tension (Figure 14). En effet, lorsque tous les modules photovoltaïques sont connectés en parallèle, la tension globale du système reste identique à celle d'un seul panneau. En revanche, le courant total fourni est égal à la somme des courants individuels produits par chaque module [11].

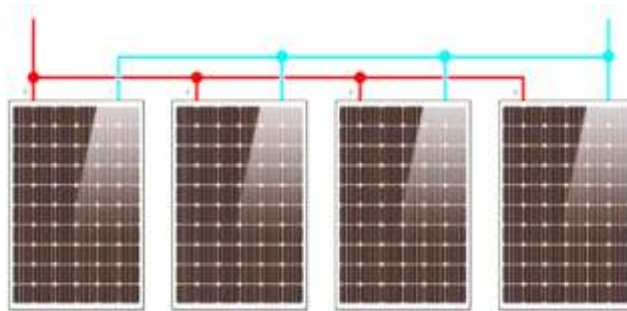


Figure 14 : Montage en parallèle des PV [8].

II.3.2 Système de stockage

Le stockage d'énergie est couramment employé dans les petits systèmes hybrides afin de garantir l'alimentation de la charge pendant une période prolongée, pouvant aller de plusieurs heures à plusieurs jours. Il peut également être intégré aux systèmes hybrides connectés à de grands réseaux isolés en courant alternatif, où il sert à compenser les fluctuations de puissance à court terme.

a) Rôle des batteries dans un système PV : La batterie est généralement nécessaire lorsque le réseau PV ne peut pas fonctionner, par exemple la nuit ou par temps nuageux. Les principales fonctions d'une batterie de stockage dans un système PV sont les suivantes :

- Capacité de stockage d'énergie et autonomie.
- Stabilisation de la tension et du courant.

b) Principe de Branchement des batteries : Les batteries peuvent être soit montés en série ou en parallèle :

- **Branchement en série :** Lorsque des batteries sont connectées en série, deux paramètres électriques sont à prendre en compte :

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

- **Tension totale** : La tension globale du système est la somme des tensions individuelles de chaque batterie. Par exemple, si vous reliez deux batteries de 12 V en série, la tension résultante sera de 24V.
- **Capacité (Ah)** : Contrairement à la tension, la capacité reste inchangée. Elle correspond à celle d'une seule batterie. Ainsi, si chaque batterie a une capacité de 100 Ah, le système global conservera également une capacité de 100 Ah.
Pour décider si un raccordement en série est adapté à votre système, il faut :
- **Déterminer la tension nécessaire** : Si votre application exige une tension supérieure à celle d'une batterie individuelle (par exemple 24 V), alors le montage en série devient indispensable, en associant plusieurs batteries de 12 V.
- **Assurer une gestion optimale de la charge/décharge** : Lorsqu'on branche des batteries en série, il est crucial d'utiliser un contrôleur de charge compatible pour surveiller et équilibrer les tensions entre les éléments.

Le montage en série est choisi lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une tension plus élevée pour alimenter des appareils ou des systèmes exigeant un niveau de tension supérieur. Cela permet notamment de répondre aux besoins d'équipements fonctionnant à 24 V, 48 V ou davantage, on retrouve ceci dans les installations solaires où les panneaux photovoltaïques ainsi que les systèmes de stockage utilisent fréquemment cette configuration pour augmenter la tension globale du système.

- **Branchement en parallèle** : Comme pour les batteries connectées en série, il faut également vérifier deux paramètres pour les batteries en parallèle :
 - **Tension totale** : Lorsque des batteries sont connectées en parallèle, la tension globale du système reste identique à celle d'une seule batterie. Par exemple, deux batteries de 12V branchées en parallèle fourniront toujours une tension totale de 12V.
 - **Capacité** : En revanche, la capacité énergétique (exprimée en ampères-heures, Ah) s'additionne. Ainsi, si l'on relie deux batteries de 12V–100Ah en parallèle, le système résultant aura une capacité totale de 200Ah, tout en maintenant une tension de 12V.

Le montage en parallèle est utilisé lorsque l'objectif est d'augmenter la capacité ou l'autonomie d'un système, sans modifier sa tension. Cela permet notamment d'étendre la durée d'utilisation de l'énergie stockée. Comme dans les systèmes de stockage d'énergie, tels que ceux utilisés dans les installations solaires. Dans ces cas, il est fréquent de relier plusieurs batteries en parallèle afin d'augmenter la capacité totale du système, tout en maintenant la même tension, ce qui permet de

prolonger le temps de stockage sans nécessiter de changement dans les composants électriques associés [12].

c) Système de gestion de batteries (BMS)

Un BMS (Battery management system) assure la surveillance des paramètres essentiels des batteries, notamment le voltage total et individuel des cellules pour garantir un fonctionnement uniforme, la température afin d'éviter les conditions extrêmes pouvant endommager la batterie, ainsi que le courant entrant et sortant pour ajuster les cycles de charge et de décharge. Le BMS protège contre la surcharge, la décharge profonde, les courts-circuits et les connexions inversées, assurant ainsi la sécurité de l'ensemble. Il estime l'état de charge SoC (System on a Chip) pour indiquer l'énergie restante et l'état de santé SoH (System on a Hip) pour détecter toute dégradation. Par ailleurs, il communique les données à d'autres systèmes pour faciliter le diagnostic et la gestion efficace. Grâce à ces fonctions, le BMS garantit la sécurité en prévenant les risques liés à la surcharge ou à la surchauffe, prolonge la durabilité des batteries en réduisant les coûts de remplacement, et optimise leurs performances en maintenant des conditions de fonctionnement idéales (voir figure 15).

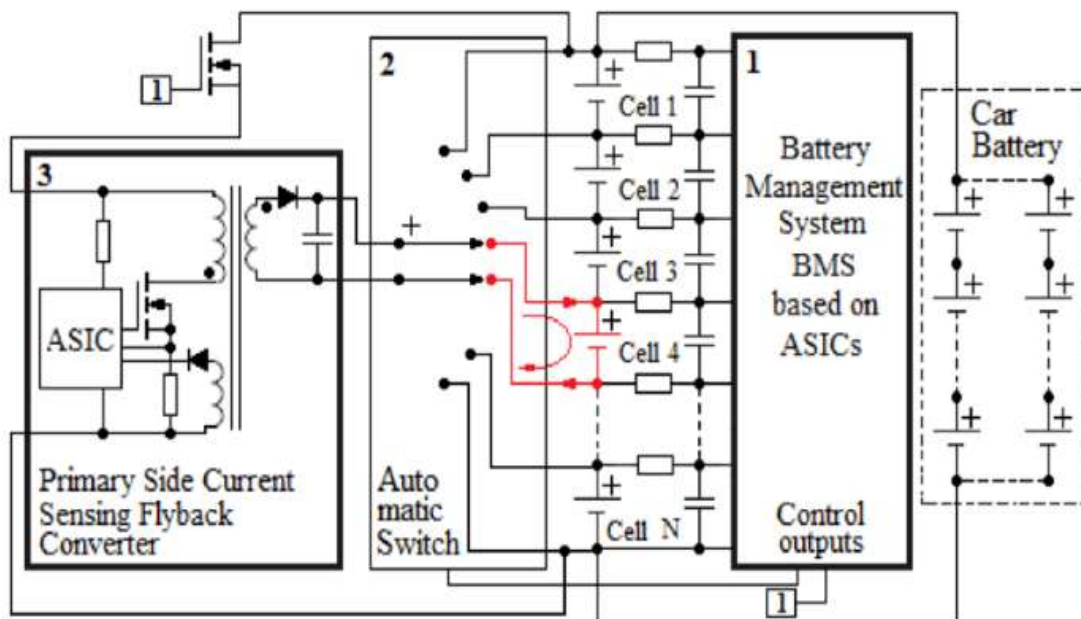


Figure 15 : Schéma électrique équivalent d'un BMS.

II.3.3. Onduleurs

L'onduleur a pour fonction principale de convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux photovoltaïques ou les batteries en courant alternatif (AC) utilisable par les

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

équipements domestiques ou injecté dans le réseau électrique. Il joue également un rôle de protection, notamment en surveillant le courant de charge afin de prévenir les surtensions.

Un onduleur est généralement composé de trois parties principales : un circuit de conversion (onduleur proprement dit), un circuit de charge (si le système inclut une batterie rechargeable), et la batterie elle-même.

a) Types d'onduleurs : Le choix du type d'onduleur (Voir tableau1), dépend de plusieurs paramètres liés à l'installation photovoltaïque, tels que :

- Le mode de câblage des modules (série, parallèle ou mixte).
- Les différences d'orientation ou d'inclinaison des panneaux.
- La tension de sortie souhaitée pour l'ensemble de l'installation,
- Le niveau d'ensoleillement global,
- Les variations de puissance entre les différents modules.
- Ces facteurs influencent le dimensionnement et la technologie de l'onduleur à utiliser (centralisé, multi-string, micro-onduleur, etc.).

Tableau 1 : Types d'onduleurs.

Type	Description	Paramètres	Avantages
Onduleur centralise	Un onduleur pour la totalité du générateur. Utilisation d'un boîtier de raccordement entre le Générateur et l'onduleur.	Pour les montages combinât. Branchement en série et en parallèle. Flux lumineux identique pour tous les modules.	Faibles tolérances de puissance entre les modules. Possibilité de grimper a une puissance de plusieurs MW. Installation possible de parafoudres dans le BRG.
Onduleur « string »	Modules branches en série dans un string (rangée). Un onduleur pour chaque string.	Flux lumineux différents entre les rangées. Rangées branchées au réseau via son onduleur.	MPP tracking personnalisé pour chaque rangée. Adapter pour les rangées a degrés d'inclinaison différents. Adapter aux installations de grande puissance.
Onduleur « multi string»	Association d'onduleurs centralises et « string ». Onduleur centralise du côté du branchement au réseau. Onduleur string du côté des générateurs.	Types de modules différents Orientation de modules variées. Ombres partielles sur l'installation. Nombre de modules différents par rangée.	Meilleur rendement que pour un onduleur centralise grâce à la possibilité d'un MPP tracking pour chaque rangée. Modularité de l'installation.
Onduleur modulaire	Branchement direct des modules sur le réseau. Un onduleur pour chaque Module ou l'onduleur est directement installe sur le module en usine.	Pour les installations de petite puissance.	Pas de câblage de courant continu. Un module ombrage n'influe pas sur le reste de l'installation.

II.3.4. Charges

Existe 2 types de charges DC et AC :

a) Charge en courant continu (DC) : Une charge DC est un dispositif ou un ensemble d'appareils alimentés directement en courant Continu. Dans notre système, elle est généralement connectée en sortie du contrôleur MPPT avant l'onduleur. Elle peut être un : éclairage LED DC, des moteurs à courant continu, systèmes de télécommunication ou des pompes DC. L'Avantage c'est qu'on n'aura pas besoin de conversion DC-AC, donc y aura moins de pertes [13].

b) Charge en courant alternatif (AC) : Une charge AC est alimentée en courant alternatif, généralement après la conversion par l'onduleur. Ces charges sont les plus courantes dans les bâtiments résidentiels, industriels ou commerciaux. Elle peut être : un réfrigérateur, un téléviseur, un climatiseur ou des équipements industriels.

II.4 Méthodes de gestion du stockage d'énergie

Dans le cadre d'un système hybride combinant des panneaux photovoltaïques (PV), un réseau électrique (grid), une ou plusieurs batteries avec BMS, et des charges locales, il existe plusieurs méthodes de gestion automatisée du stockage d'énergie. On cite trois méthodes couramment utilisées :

II.4.1 Priorisation de la consommation locale (Autoconsommation maximale)

Cette méthode consiste à prioriser l'utilisation de l'énergie produite localement par les panneaux PV pour alimenter directement les charges locales. L'objectif est de minimiser l'achat d'électricité depuis le réseau tout en maximisant l'autoconsommation solaire qui permet à une entreprise de produire et consommer sa propre électricité grâce à une installation photovoltaïque. Cette technologie repose sur la transformation de l'énergie solaire en électricité via des panneaux photovoltaïques. L'installation comprend généralement les panneaux, des onduleurs ainsi que des dispositifs de protection électrique, et elle est directement raccordée au réseau électrique interne du site. De ce fait, le site dispose de deux sources d'approvisionnement en électricité : le réseau public classique et l'installation photovoltaïque. Cette dernière est toujours privilégiée pour répondre aux besoins énergétiques du site. Lorsque la production excède la consommation, l'électricité supplémentaire peut être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure ou injectée dans le réseau public afin d'être revendue.



Figure 16 : Programme national d'énergie renouvelable-Algérie (2015-2030) [14].

La figure 16, montre le programme adopté par le ministère de l'énergie en février 2011. Ce programme a comme pour l'année 2030 objectif, la maximisation de l'utilisation des énergies renouvelables et a fixé comme priorité l'énergie solaire photovoltaïque [14].

II.4.2 Gestion prédictive basée sur des algorithmes de contrôle (MPC)

Dans le domaine industriel, il existe une demande croissante pour des systèmes de régulation capables de dépasser les performances des contrôleurs classiques. C'est dans ce contexte que la commande prédictive MPC (Model Predictive Control) a émergé comme une solution innovante pour répondre à cette nécessité. Grâce à sa capacité à anticiper les comportements futurs du système et à optimiser les actions de contrôle en temps réel, l'approche MPC permet d'atteindre des performances supérieures, notamment en termes de précision, de stabilité et d'efficacité énergétique [15].

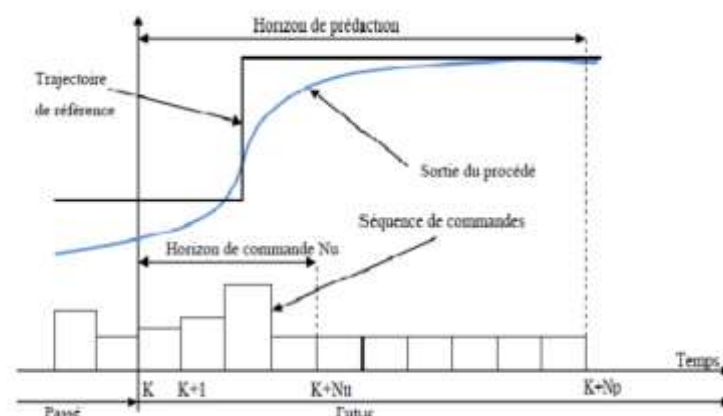


Figure 17 : Stratégie de la commande prédictive [15].

La figure 17, est un diagramme explicatif de la commande MPC, Il montre comment le système évalue et ajuste ses commandes en temps réel pour suivre une trajectoire de

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

référence. Le temps est divisé en deux horizons principaux : l'horizon de commande (N_u) et l'horizon de prédiction (N_p). L'horizon de commande correspond à la durée pendant laquelle les commandes sont appliquées au processus, tandis que l'horizon de prédiction couvre une période plus longue dans le futur, permettant d'évaluer les conséquences des actions futures sur la sortie du système. À chaque instant K , le contrôleur calcule une séquence optimale de commandes pour minimiser l'écart entre la sortie du procédé et la trajectoire de référence sur l'horizon de prédiction. Les commandes sont ensuite appliquées progressivement, avec un décalage temporel (un pas de temps à la fois), tout en actualisant continuellement les prédictions et les commandes à mesure que le système évolue.

Dans le contexte de notre système hybride photovoltaïque avec stockage d'énergie, le MPC peut être utilisé pour optimiser la gestion énergétique en tenant compte des variations de la production solaire, des besoins en charge, et des contraintes liées au réseau ou à la batterie.

II.4.3 Contrôle Automatisé par Automate Programmable Industriel

Les Automates Programmables Industriels (API), également appelés PLC (Programmable Logic Controller) présentés sur la figure 18, sont employés pour superviser, gérer et contrôler automatiquement les systèmes de gestion au sein des installations électriques industrielles [16].



Figure 18 : Automate Programmable Industriel Didactisé API Siemens [17].

Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un API, qui joue le rôle de chef d'orchestre pour gérer dynamiquement le flux d'énergie entre les différents éléments du système : les panneaux photovoltaïques (PV), le réseau électrique, le système de gestion des batteries (BMS), et la consommation locale. L'API agit comme un contrôleur centralisé capable de prendre des décisions en temps réel, en se basant sur des règles préétablies et les informations fournies par des capteurs placés stratégiquement dans l'installation [18].

a) Principe de fonctionnement

– **Surveillance en temps réel** : L'automate collecte en permanence des données provenant de chaque composant du système afin de "prendre le pouls" de l'installation. Ces données incluent :

- La quantité d'énergie produite par les panneaux solaires grâce à l'algorithme MPP.
- L'état de charge (SOC) des batteries, surveillé via le BMS.
- La demande énergétique locale, c'est-à-dire ce que consomment les appareils connectés au système.
- Les conditions actuelles du réseau électrique (grid).

– **Prise de décision automatisée** : En fonction des informations recueillies, l'API prend des décisions intelligentes pour optimiser l'utilisation de l'énergie :

- Si les panneaux solaires produisent plus d'énergie que ce dont on a besoin localement, l'API donne la priorité au stockage de cette énergie excédentaire dans les batteries.
- Si les batteries sont déjà pleines et qu'il reste encore de l'énergie excédentaire, l'API peut choisir de l'injecter dans le réseau électrique public ou de réduire temporairement la production des panneaux PV pour éviter toute surcharge.
- En revanche, si la production solaire est insuffisante ou si la demande locale augmente brusquement, l'API active un délestage progressif des charges non prioritaires ou puise dans l'énergie stockée dans les batteries pour compenser le déficit.

– **Communication avec les dispositifs** : Pour coordonner tous ces processus, l'API communique directement avec les convertisseurs DC-AC/DC-DC, le BMS, ainsi que les relais qui gèrent les transferts d'énergie. Cette communication repose sur des protocoles industriels robustes tels que Modbus, CAN bus, ou Ethernet/IP, qui garantissent une intégration fluide et fiable entre les différents composants du système [19].

Dans les méthodes de gestion automatisée du stockage d'énergie que nous venons de présenter, l'un des aspects fondamentaux réside dans l'efficacité avec laquelle l'énergie est produite par les panneaux photovoltaïques. En effet, maximiser la production d'énergie solaire est essentiel pour garantir un flux énergétique optimal vers les batteries, le réseau électrique ou la charge locale. C'est ici qu'intervient la technique de commande MPPT, qui joue un rôle crucial dans l'extraction maximale de la puissance disponible en fonction des conditions météorologiques fluctuantes [20].

II.5 Commande MPPT

Dans un système photovoltaïque incluant une source solaire et une charge, l'identification du point de fonctionnement optimal grâce à des techniques d'optimisation

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

constitue une étape cruciale. Cette méthode de contrôle est couramment désignée dans la littérature sous le terme de « Recherche du Point de Puissance Maximum ».

Par définition, une commande MPPT, couplée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet au générateur photovoltaïque de fonctionner en permanence à son niveau de puissance maximal. Ainsi, indépendamment des conditions météorologiques (telles que la température et l'ensoleillement) ou de la tension de la batterie, la commande du convertisseur ajuste le système pour maintenir son fonctionnement au point de puissance maximale [21].

II.5.1 Principe de fonctionnement

De nombreuses techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées afin d'optimiser l'extraction de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques. La puissance maximale est atteinte lorsque le produit de la tension (V) et du courant (I) aux bornes du panneau est maximal, la puissance (P) générée par un panneau PV est donnée par la relation suivante :

$$P = V \cdot I$$

Avec :

V : La tension aux bornes du panneau (en volts).

I : Le courant délivré par le panneau (en ampère).

Pour maximiser cette puissance, il est nécessaire de trouver le point où la dérivée de P par rapport à V s'annule, c'est-à-dire :

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Ce point correspond au Point de Puissance Maximale (PPM), comme illustré dans la figure 19 [16].

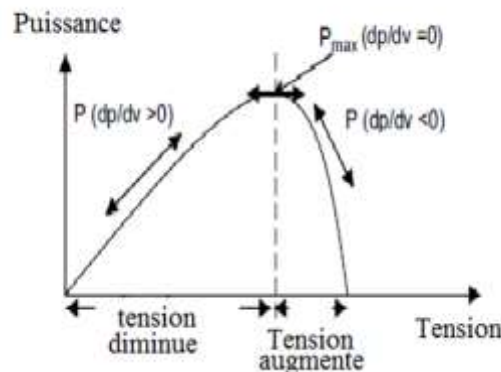


Figure 19 : Caractéristique du principe de fonctionnement de la commande MPPT [22].

Ils existent plusieurs méthodes de commande MPPT, chacune étant évaluée selon différents critères tels que la précision de la recherche, la rapidité de convergence, la complexité d'implémentation, le nombre et les types de capteurs requis, ainsi que les contraintes matérielles [23].

Ces Méthodes peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

- **Méthodes directes** : Telles que la perturbation et observation (P&O) et l'incrément de conductance. Ces approches ajustent dynamiquement le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque en analysant les variations de tension et de courant.
- **Méthodes indirectes** : Court-circuit ou la tension de circuit ouvert pour estimer le point de puissance maximale.
- **Méthodes basées sur l'intelligence artificielle** : Elles exploitent des algorithmes avancés tels que la logique floue, les réseaux neuronaux, les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim particulaire (PSO). Ces approches permettent une adaptation plus flexible et performante dans des conditions variables.
- **Autres méthodes** : Ce groupe inclut des méthodes innovantes telles que le mode glissant, le théorème de bisection et les approches hybrides, qui combinent plusieurs stratégies pour améliorer les performances globales.

Cette classification met en évidence la diversité des solutions disponibles pour optimiser l'extraction de puissance des systèmes photovoltaïques. Par la suite on va découvrir quelques-unes de ces méthodes afin de mieux comprendre le principe de chacune et choisir la plus robuste et celle qui est le mieux adaptée à notre système.

II.5.2 Méthodes de la commande MPPT

a) Méthode Perturbation & Observation (P&O) : Le principe de cet algorithme repose sur l'introduction d'une perturbation dans la tension du panneau photovoltaïque (PV) en ajustant le rapport cyclique α . Après avoir appliqué cette perturbation, la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k est calculée et comparée à celle de l'instant précédent ($k-1$).

- Si la puissance augmente, cela signifie que l'on se rapproche du PPM, et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens.
- En revanche, si la puissance diminue, cela indique que l'on s'éloigne du PPM. Dans ce cas, le sens de variation du rapport cyclique est inversé afin de corriger la trajectoire vers le point optimal. La figure 20, montre une version simplifiée de l'algorithme MPPT basé sur la méthode Perturb and Observe (P&O) [24].

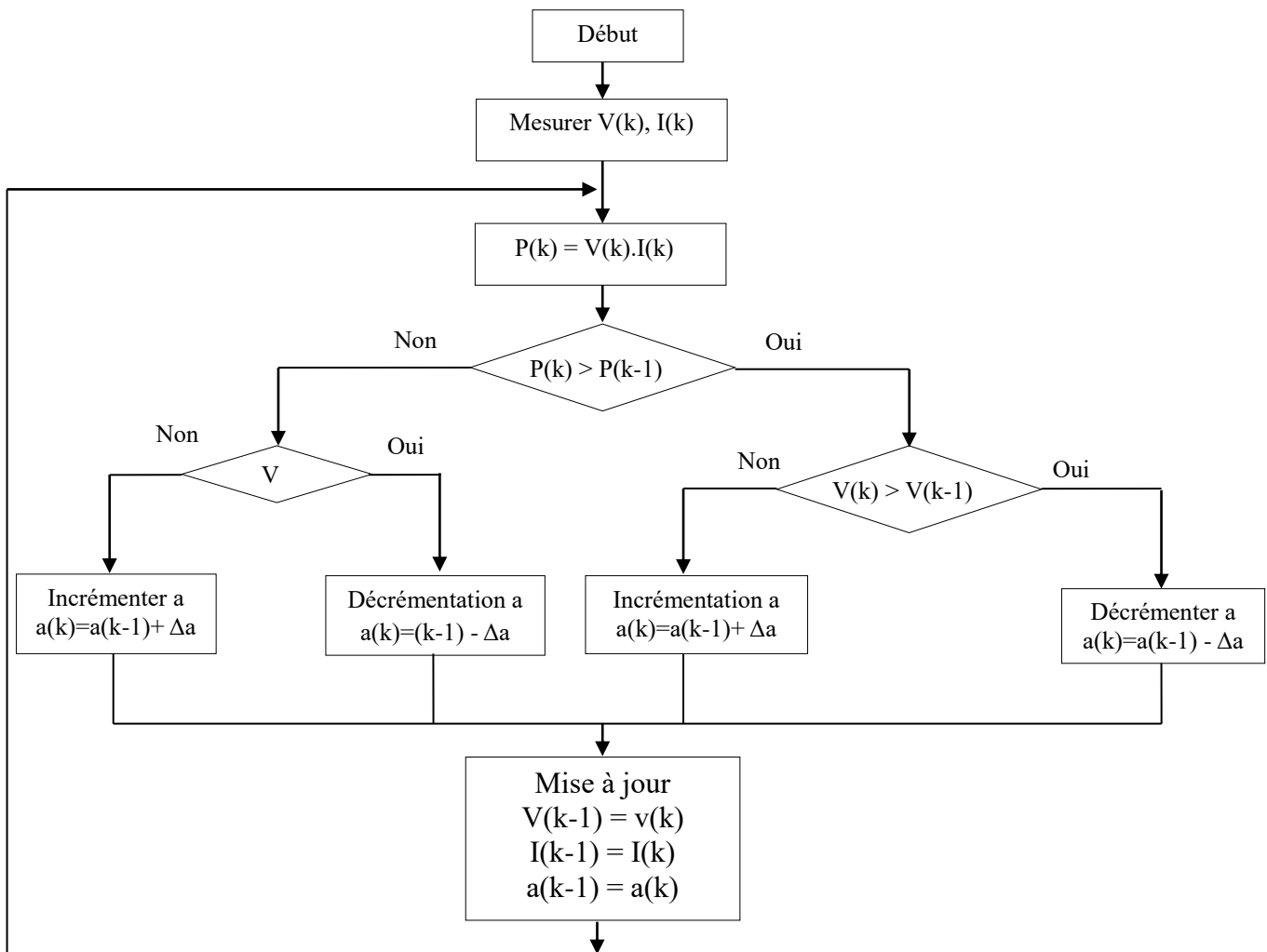


Figure 20 : Organigramme de l'algorithme P&O [22].

b) Méthode incrément de la conductance (INC) : L'algorithme INC repose sur une comparaison entre l'incrément de conductance et la conductance instantanée dans un système photovoltaïque (PV). Cette méthode exploite la relation mathématique entre la tension (V) et le courant (I) pour localiser avec précision le point de puissance maximale (MPP) [25]. Le principe consiste à analyser la variation de la conductance ($\Delta G = \Delta I / \Delta V$) par rapport à la conductance instantanée ($G = I / V$). Si l'incrément de conductance est supérieur à la conductance instantanée, cela signifie que le système est en train de s'éloigner du PPM. À l'inverse, si l'incrément de conductance est inférieur ou égal à la conductance instantanée, le système se rapproche du PPM. En fonction du résultat de cette comparaison, l'algorithme ajuste dynamiquement la tension du panneau PV :

- Si la condition $\Delta I / \Delta V > -I / V$ est vérifiée, la tension est augmentée pour se rapprocher du PPM.

- Si la condition $\Delta I/\Delta V < -I/V$ est satisfaite, la tension est réduite afin de converger vers le PPM.

Ce processus itératif représenté dans la figure 21, permet de maintenir le système au point où la puissance générée est maximale, quelles que soient les variations des conditions environnementales, telles que l'ensoleillement ou la température. L'avantage principal de cette méthode réside dans sa capacité à minimiser les oscillations autour du PPM, offrant ainsi une meilleure stabilité et une convergence plus rapide par rapport à d'autres techniques comme la méthode Perturb and Observe (P&O).

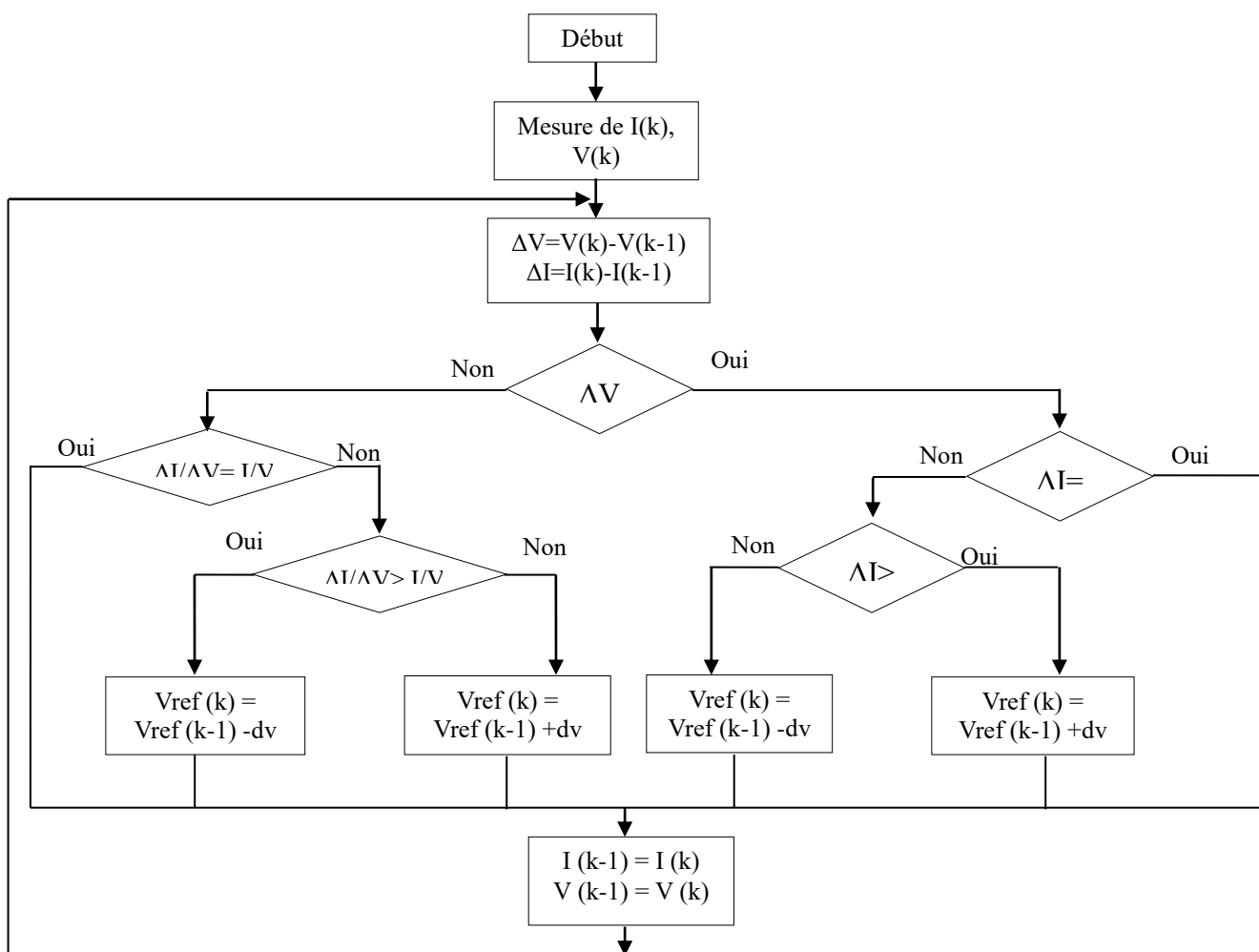


Figure 21 : Organigramme de l'algorithme INC.

c) Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension (FCO) : Cet algorithme repose sur une relation linéaire entre la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et la tension optimale (V_{mp}), qui est exprimée par l'équation suivante :

$$V_{mp} = K \times V_{oc}$$

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

Où k est un facteur de tension spécifique aux caractéristiques de la cellule photovoltaïque (PV). Ce facteur varie généralement entre 0,73 et 0,8.

Pour déterminer la tension optimale (V_{mp}), il est nécessaire de mesurer la tension de circuit ouvert (V_{oc}) du panneau PV. Une fois cette mesure effectuée, le système ajuste la tension de fonctionnement du panneau pour la maintenir proche de la valeur calculée de V_{mp} , correspondant au PPM.

Ce processus consiste à agir cycliquement sur le rapport cyclique (α) d'un convertisseur DC-DC afin de réguler la tension du panneau et garantir qu'elle converge vers la tension optimale. Cette approche permet ainsi de maximiser la puissance extraite en maintenant le point de fonctionnement aussi proche que possible du PPM, même en présence de variations des conditions environnementales comme l'ensoleillement ou la température.

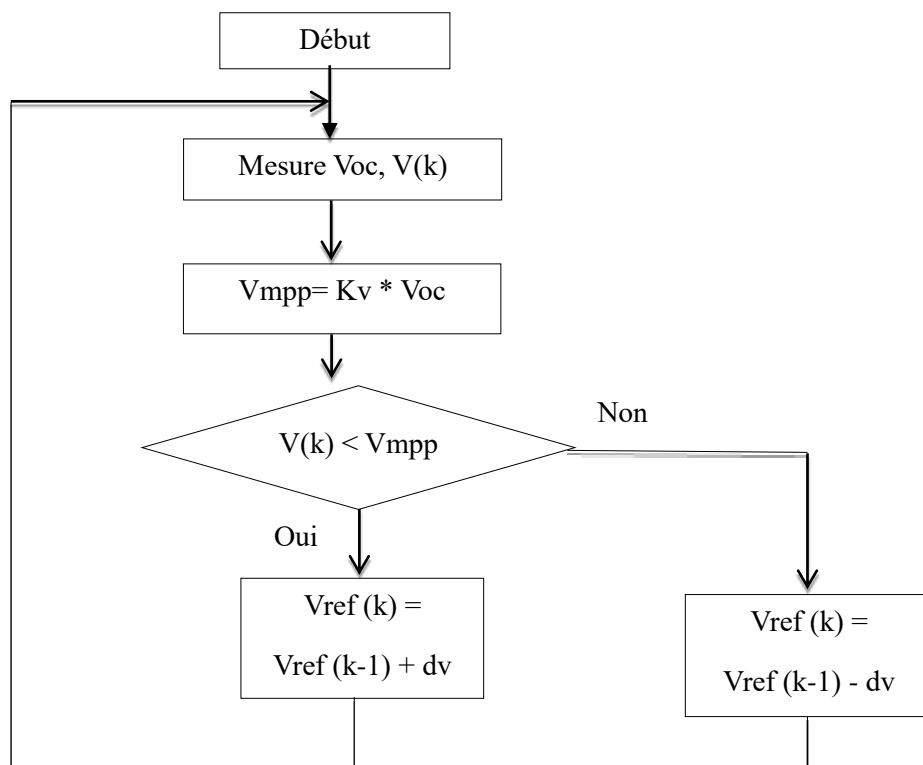


Figure 22 : Organigramme de l'algorithme FCO.

II.6. Comparaison des techniques MPPT

Le tableau suivant montre une étude comparative des différents MPPT.

Tableau 2 : Comparaison des méthodes MPPT [24].

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FCO
Type de Capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse
Nb itérations	45	48	35
Vit. Convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide
Précision	95 %	98 %	94 %

II.7. Contrôleur PWM

Les régulateurs PWM (Pulse Width Modulator) modulent le courant de charge en utilisant une technique de hachage : la durée des impulsions de courant ainsi que leur fréquence varient en fonction de la tension mesurée aux bornes des batteries. Au début de la charge, lorsque la batterie est faiblement chargée, les impulsions sont plus larges et plus fréquentes. À mesure que la tension de la batterie s'approche de la tension d'absorption, la largeur des impulsions diminue, tout comme leur occurrence, ce qui réduit progressivement le courant de charge.

Les régulateurs solaires de type PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion) fonctionnent selon un principe TOR (Tout Ou Rien). En pratique, cela signifie qu'ils coupent complètement le courant lorsque la tension dépasse un seuil critique, afin de protéger la batterie contre toute surtension. Ainsi, si la tension provenant des panneaux solaires excède celle de la batterie, le régulateur bloque le passage du courant et se comporte comme un circuit ouvert [26].

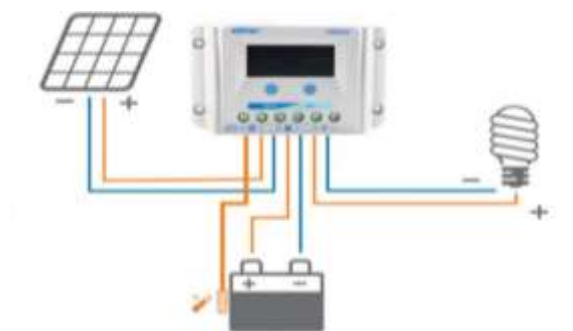


Figure 23 : Régulateur de Charge Solaire PWM [27].

II.8 Analyse comparative des technologies PWM et MPPT

Deux technologies dominent le marché : les régulateurs PWM et les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking). Voici leurs principales différences :

- **Rendement énergétique :** Le MPPT a un rendement compris entre 90 % et 95 %, les régulateurs MPPT maximisent l'énergie captée par les panneaux, même sous faible ensoleillement. Tandis que les régulateurs PWM sont moins efficaces, ils affichent généralement un rendement inférieur à 80 %.
- **Gestion de la tension :** Le PWM nécessite que la tension des panneaux soit proche de celle des batteries (ex. : panneau 18–24V pour batterie 12V). Cela limite les configurations possibles. Le MPPT supporte des tensions d'entrée beaucoup plus élevées (jusqu'à 450V) tout en maintenant une haute efficacité pour charger des batteries basse tension.
- **Coût :** Les contrôleurs MPPT sont plus chers en raison de leur technologie avancée, alors que les régulateurs solaires PWM sont plus abordables, mais moins adaptés aux installations exigeant une haute performance [28].

Ci-dessous on présente un tableau qui résume les principales différences entre le MPPT et le PWM.

Tableau 3 : Principales différences entre le PWM et le MPPT.

Critère	PWM	MPPT
Rendement	<80%	90-95%
Plage de tension	Proche de celle des batteries	Très large (jusqu'à 450V)
Coût	Faible	Elevé

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons posé les bases nécessaires à la compréhension de notre système hybride de stockage d'énergie. Nous avons commencé par explorer les différents types d'installations photovoltaïques, en distinguant notamment les systèmes autonomes, connectés au réseau et hybrides. Ensuite, nous avons pris le temps de détailler chacun des composants essentiels du système, tels que les panneaux solaires, le contrôleur MPPT, les batteries, l'onduleur, ainsi que les charges en courant continu et alternatif.

Nous avons également abordé les méthodes de gestion de l'énergie, qui sont au cœur du bon fonctionnement et de l'optimisation du rendement d'un tel système. Une attention

Chapitre II : Généralités sur le système hybride

particulière a été portée aux méthodes de poursuite du point de puissance maximale, indispensables pour exploiter efficacement l'énergie solaire disponible. Enfin nous avons discuté les principales différences entre les deux contrôleurs les plus connus, le PWM et le MPPT.

Ce travail théorique nous a permis de mieux cerner les enjeux techniques et énergétiques de notre système. Dans le chapitre suivant, nous passerons à une phase plus concrète, en nous concentrant sur les mesures nécessaires au suivi du système et en décrivant la mise en œuvre expérimentale qui soutiendra notre étude.

CHAPITRE III : Partie expérimentale

III. Introduction

Après avoir abordé tous les aspects théoriques de notre système dans le chapitre 2, le chapitre 3 sera consacré à l'étude expérimentale de notre système intelligent de stockage d'énergie. Nous allons mettre en œuvre notre montage, en détaillant l'architecture physique du système. Chaque composant utilisé (panneau PV, contrôleur PWM, batterie, onduleur, charges, etc.) sera présenté, ainsi que les instruments de mesure employés.

L'objectif de cette partie est de tester le comportement réel du système, d'observer le basculement entre les sources d'énergie (PV et réseau), et de vérifier l'efficacité de la gestion automatique. Des tests pratiques seront réalisés afin d'évaluer les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement.

III.2 Présentation du système expérimentale

III.2.1 Schéma global de l'installation réelle

La figure suivante, illustre l'installation finale de notre système. Dans ce qui suit, chaque composant sera présenté et décrit en détail.

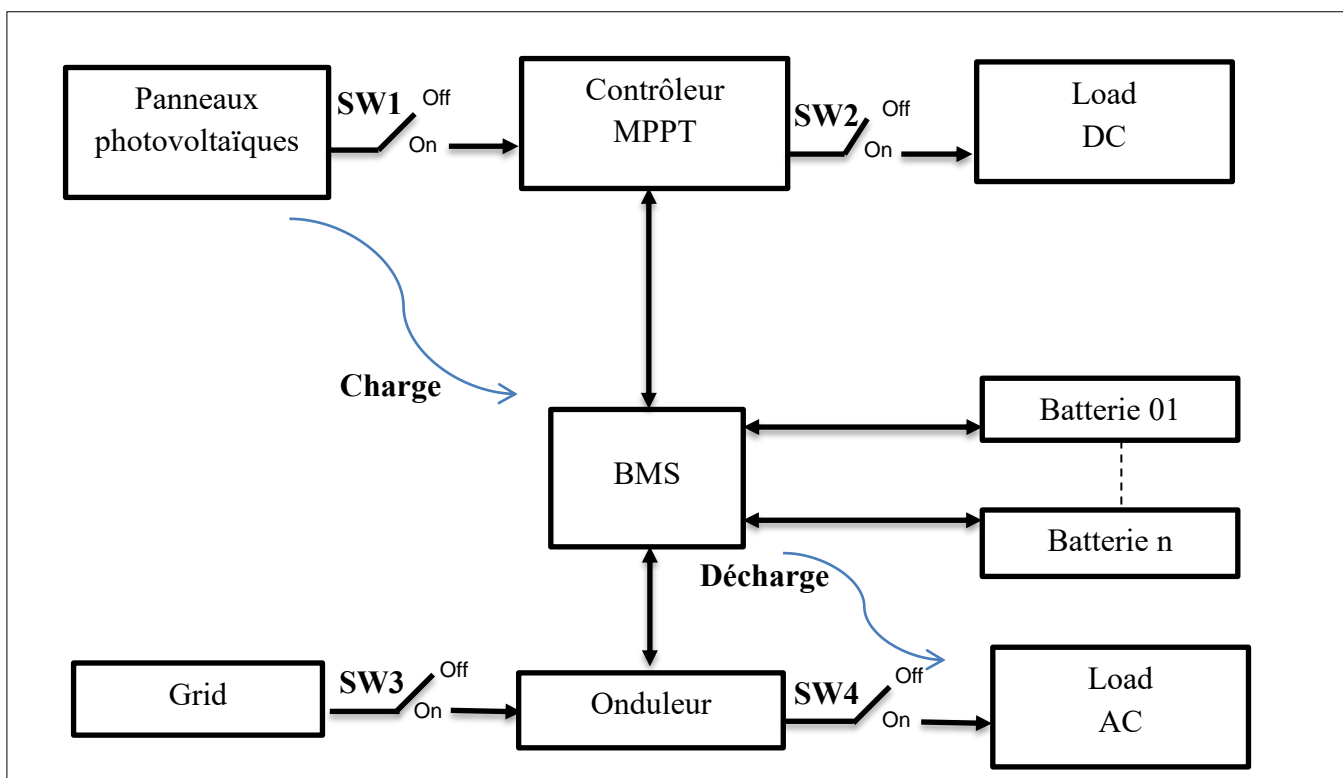


Figure 24 : Schéma global du système étudié.

III.2.2. Matériel et instruments de mesure utilisés

a) **Panneaux solaires photovoltaïques** : Parmi les composants utilisés dans cette étude, deux petits panneaux photovoltaïques didactiques ont été intégrés à la maquette intérieure du système. Il s'agit de modules de faible puissance conçus pour des expérimentations pédagogiques ou des tests à petite échelle. Le premier, référencé **CNC170X220-18** (modèle Azava), mesure environ 170 mm 220 mm et contient 18 cellules solaires. Le second, référencé **GH125X195**, mesure 125 mm × 195mm. Ces modules sont capables de fournir une puissance comprise entre **2 W et 6W**, selon l'irradiation reçue, et sont principalement utilisés pour simuler une source solaire en environnement de laboratoire (sous lampe artificielle). Leur tension est adaptée à l'alimentation de régulateurs de charge de type PWM, ainsi qu'à des charges très faibles comme des LEDs ou des microcontrôleurs. Contrairement aux panneaux PV extérieurs utilisés pour l'alimentation réelle des charges, ces modules intérieurs permettent des démonstrations contrôlées dans des conditions fixes, indépendamment de la météo.

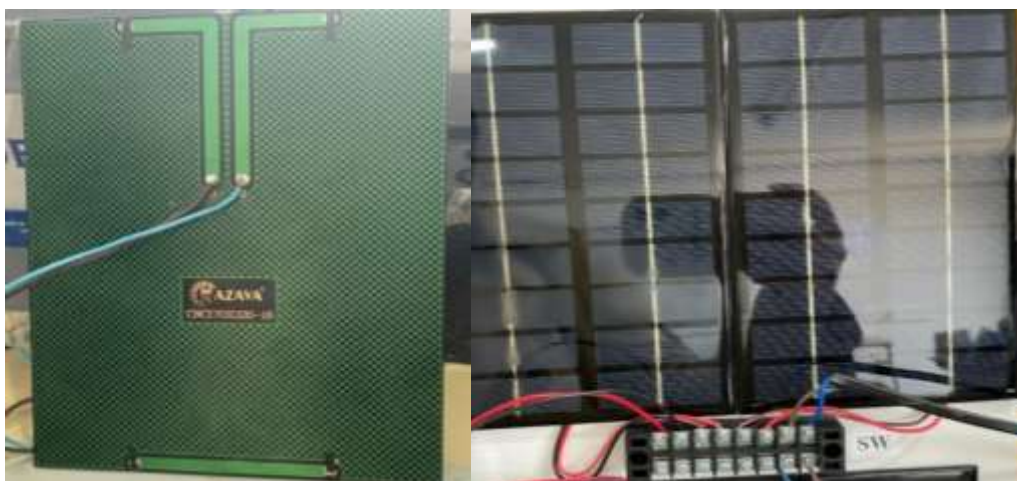


Figure 25 : Cellules solaires didactiques.

En complément des petits modules solaires utilisés en intérieur pour les tests de base et les démonstrations à faible puissance, un panneau photovoltaïque de puissance nominale 20 W a été intégré au système pour les essais réels de charge et de stockage. Ce panneau, destiné à une utilisation en extérieur, permet d'alimenter une batterie 12 V à travers le régulateur PWM. Il présente une tension à puissance maximale de 18 V et un courant de 1,11 A, ce qui le rend compatible avec notre configuration expérimentale. Ce type de panneau est idéal pour les petites applications autonomes, telles que la recharge de batteries ou l'alimentation de lampes

ou ventilateurs. Ses caractéristiques techniques présentées dans le tableau ci-dessous sont adaptées à notre banc de test :

Tableau 4 : Caractéristiques techniques du PV.

Paramètre	Symbole	Valeur
Puissance nominale	p_{max}	20W
Tension à vide	V_{oc}	21,8V
Courant de court-circuit	I_{sc}	1,23A
Tension à puissance max	V_{mp}	17,8V
Courant à puissance max	I_{mp}	1,13A
Température de test (STC)	-	25°C
Irradiance standard	-	1000W/m ²
Température de cellule (NOCT)	T_{moc}	±50°C
Types de spectre	-	AM 1,5
Normes	-	CE, RoHS

Le panneau photovoltaïque utilisé à l'extérieur est de type monocristallin, reconnaissable à ses cellules de couleur noire uniforme et à leurs coins coupés caractéristiques.



Figure 26 : Panneau solaire.

b) Contrôleur PWM : On utilise un régulateur solaire de type PWM compatible avec des tensions de batterie de 12 V ou 24 V, avec une capacité de courant maximale de 60A. Ce contrôleur est relié directement aux panneaux photovoltaïques et assure la gestion de la charge de la batterie, ainsi que la protection contre les surtensions et les surintensités. Il peut accepter une tension d'entrée jusqu'à 50 V DC. Il est également doté de sorties pour charges DC et souvent d'un port USB intégré pour des charges faibles.



Figure 27 : Régulateur de charge solaire PWM

c) **Batterie 12V-40ah** : La figure suivante présente une batterie plomb-acide de 40AH.



FigureIII.5 : Batterie 12V-420ah.

d) **Onduleur 12V** : L'onduleur utilisé dans notre système est un modèle à conversion **DC/AC**, dont la carte de commande et de puissance est visible sur la figure X. Il permet de transformer la tension continue fournie par la batterie (12 V ou 24 V) en une tension alternative **220V – 50Hz**, compatible avec les charges domestiques AC. Il intègre plusieurs composants essentiels : des relais de commutation, des transistors de puissance, des circuits de filtrage, ainsi qu'une carte de commande basée sur un microcontrôleur.



Figure 28 : Onduleur 500VA.

e) **Convertisseur DC/DC** : Le système intègre également un **convertisseur DC/DC de type buck (abaisseur)** basé sur le régulateur **LM2596**. Ce module permet de réduire la tension continue fournie par les panneaux solaires ou la batterie (ex. 12 V ou 24 V) vers une **tension plus basse réglable** (entre 1,25 V et 35 V), nécessaire pour alimenter des composants sensibles tels que des **plaques LED, circuits logiques, ou microcontrôleurs**. Il est également équipé d'un **afficheur digital** qui permet de surveiller en temps réel la tension de sortie.



Figure 29 : Convertisseur DC/DC.

III.3 Définition dimensionnement du système

Dans une approche classique, le dimensionnement d'un système de stockage photovoltaïque se fait en partant des besoins énergétiques des charges à alimenter. Toutefois, dans notre cas, le choix méthodologique est inversé : nous avons adapté le dimensionnement en fonction des composants réellement disponibles dans le laboratoire. Cette démarche est appelée dimensionnement contraint, car elle repose sur les ressources existantes, et non sur un cahier des charges théorique. L'objectif de ce dimensionnement est d'estimer :

- L'énergie maximale stockable dans la batterie,
- La quantité d'énergie produite quotidiennement par le panneau solaire,
- L'autonomie que peut assurer notre système selon différents scénarios de charge,

- Les limites réelles de fonctionnement, notamment les seuils critiques liés au courant, à la tension et aux pertes.

III.3.1. Consommation énergétique

Afin de déterminer l'autonomie du système, on a essayé de faire quelques tests et d'alimenter des charges AC et DC (TabIII.2) :

Tableau 5 : Consommation énergétique du système.

Charge	Type de Courant	Type de Charge	Puissance Nominale (Watt)
Lampe 1	AC	Résistif	75
Lampe 2	AC	Résistif	120
Moteur	DC	Inductif	30,66

a) **Remarque sur le choix du moteur DC :** Dans un premier temps, nous avons tenté d'alimenter un moteur à courant continu de 220 V – 100 W que nous avons à disposition. Même après avoir connecté deux batteries 12 V – 40 Ah en parallèle, le test s'est soldé par un échec : le moteur ne s'est jamais mis en marche. Ce résultat était prévisible, car la tension nécessaire (220 V) était bien au-dessus de ce que notre système pouvait fournir, et aucun convertisseur DC-DC adapté n'était disponible pour compenser cette différence.

Face à cette contrainte, nous avons fait le choix d'utiliser un autre moteur DC (Figure30), plus simple et surtout compatible avec notre tension de 12 V. Ce moteur s'est révélé parfaitement adapté à nos tests : il a démarré sans difficulté, a tourné de manière stable, et surtout, il a consommé très peu d'énergie. Les résultats de ces tests seront présentés dans la suite de ce chapitre.



Figure 30 : Moteur DC.

La Figure 30, représente un moteur à courant continu didactique à aimants permanents, monté sur un bâti rigide avec une tension nominale maximale de 42 V et un courant de 0,73A

Chapitre III : Etude et dimensionnement du système hybride PV-Grid

mesuré à vide ce qui nous permis de calculer sa puissance équivalente à 30,66W. Dans notre montage, une seule partie du moteur a été utilisée.

Calcul de l'énergie consommée : L'énergie consommée par les charges est exprimée par a relation :

$$E_c = P \times t$$

Avec :

- E_c : énergie quotidienne consommée (Wh/jour).
- P : Puissance de la charge (Watt).
- t : Durée d'utilisation quotidienne (h).

L'énergie totale d'une installation est la somme des énergies consommées par chaque équipement tel que :

$$E_{totale} = \sum P_i \times t_i$$

Avec :

- P_i et t_i représentent la puissance et la durée de fonctionnement de chaque appareil.

III.3.2 Calcul de l'énergie stockable dans la batterie

Pour Le premier paramètre fondamental est la capacité de stockage utile de la batterie. Notre batterie est de type plomb-calcium, d'une capacité nominale de 40 Ah sous 12 V. Pour préserver sa durée de vie, on adopte un DOD (profondeur de décharge) de 50 %, ce qui signifie qu'on n'utilisera que la moitié de sa capacité énergétique. La formule est la suivante :

$$E_{batt} = V \times C \times DOD$$

$$E_{batt} = 12 \times 40 \times 0,5 = 240Wh$$

On peut ainsi dire que notre système peut fournir au maximum 240Wh avant que la batterie ne soit déchargée.

III.3.3 Énergie journalière produite par le panneau solaire

Le panneau photovoltaïque utilisé a une puissance nominale de 20 W, une tension à puissance maximale de 18 V, et un courant de 1.11 A. La production d'énergie dépend de

Chapitre III : Etude et dimensionnement du système hybride PV-Grid

l'ensoleillement local, exprimé en heures de soleil. En tenant compte des pertes (chauffe, câbles, rendement du PWM), on applique un rendement global de 75 %.

$$E_{pv} = P_{pv} \times Ir \times \eta$$

Avec :

- P_{pv} : Puissance nominale du PV (W).
- Ir : Irradiation ou le temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour), en Algérie $2 \leq Ir \leq 8$, donc on prend une moyenne de 5 heures d'ensoleillement par jour.
- η : Rendement global (%).

$$E_{pv} = 20 \times 5 \times 0,75 = 75Wh/Jour$$

Ce résultat signifie que notre panneau ne peut recharger que 75Wh par jour ce qui représenté environ 30% de la capacité totale de la batterie.

III.4. Tests expérimentaux et évaluation des performances

La représentation schématique ci-dessous illustre l'architecture globale de notre système hybride de stockage d'énergie avec une charge AC ayant une puissance de $P=75W$:

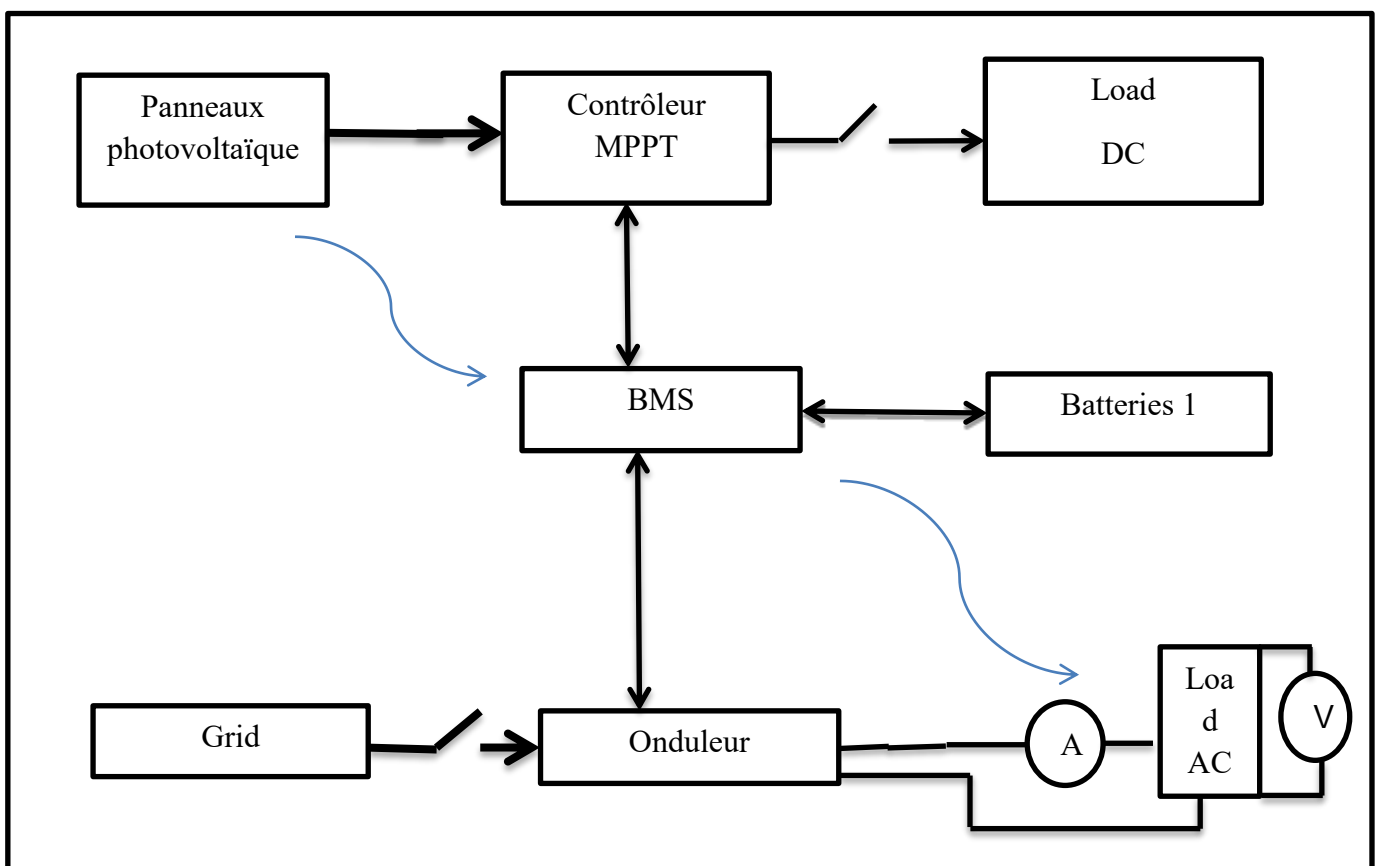


Figure 31 : Schéma bloc du système étudié.

III.4.1 Cas d'une charge résistive

a) Une charge AC de $P=75W$

Le tableau ci-dessous représente un test permettant de surveiller l'alimentation de la charge AC à 75W :

Tableau 6 : Résultats du test et de mesure pour $P=75W$.

date	SW1	SW2	SW3	SW4	charge	Tension (v)	courant (A)	durée (min)	Observation
04/04/2025 À 10 :15	On	Off	Off	On	75W	219	0,3	4	
						231,8	0,3	8	
						221	0,32	11	
						233	0,32	14	

Discussion du résultat obtenu :

- La tension de la batterie est initialement de 12,4 V.
- Lorsque la tension d'entrée augmente, la tension de la batterie diminue jusqu'à 10,5 V, tandis que la consommation d'énergie reste dans la plage normale.
- Lors d'un pic de demande, la consommation d'énergie atteint son maximum et la tension d'entrée continue d'augmenter jusqu'à ce que la batterie descende à 9,8V.
- Cette valeur est trop basse, l'onduleur arrête donc d'alimenter la charge AC afin d'en assurer la protection.
- La tension de la batterie remonte ensuite jusqu'à 11,8 V, ce qui signifie que le système a recommencé le processus de recharge de la batterie.

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour une charge AC de puissance $P=75W$:

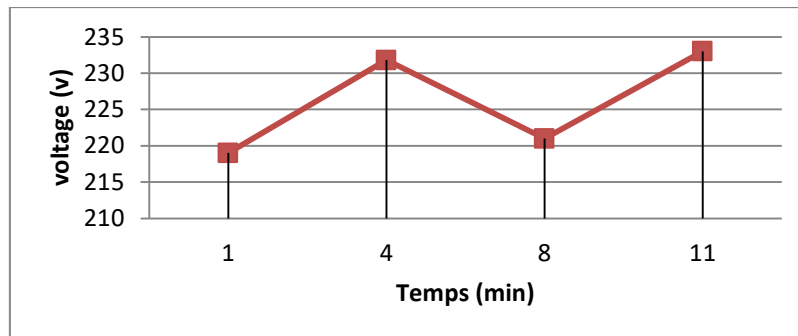


Figure 32 : Variation de tension avec $P= 75W$.

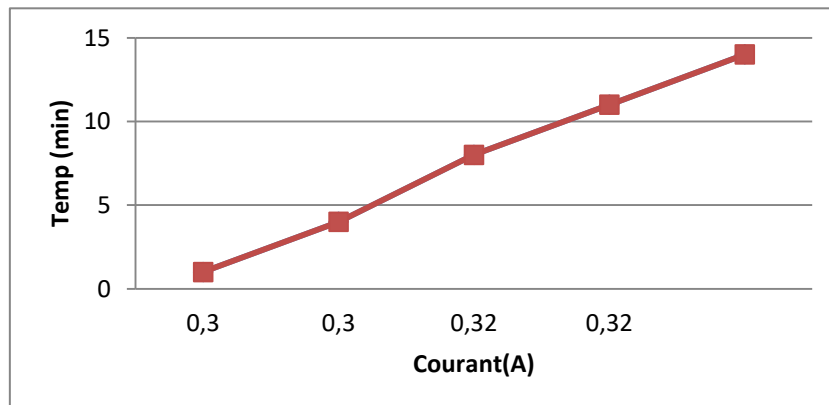


Figure 33 : Variation de courant avec $P= 75 W$.

b) Une charge AC de $P=120W$

Le Tableau ci-dessous représente un test permettant de surveiller l'alimentation de la charge AC à 120W :

Tableau 7 : Résultats du test et de mesure pour $P=120W$.

Date	SW1	SW2	SW3	SW4	Charge (w)	Tension (v)	courant (A)	durée (min)	Observation
04/04/2025	On	Off	Off	On	120w	243	0,53	6	
À 10 :45						247	0,57		

Discussion du résultat obtenu : Initialement, la tension de la batterie est de 12,4 V. L'onduleur coupe l'alimentation de la charge AC lorsque la tension de la batterie descend jusqu'à 10,8 V. Par la suite, la tension de la batterie remonte graduellement jusqu'à retrouver son niveau initial. Cette observation souligne que l'énergie consommée par la charge est supérieure à l'énergie produite par le système.

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour $P=120W$:

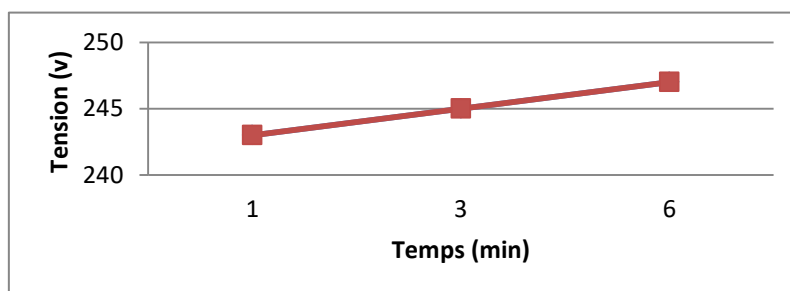


Figure 34 : Variation de tension avec $P= 120W$.

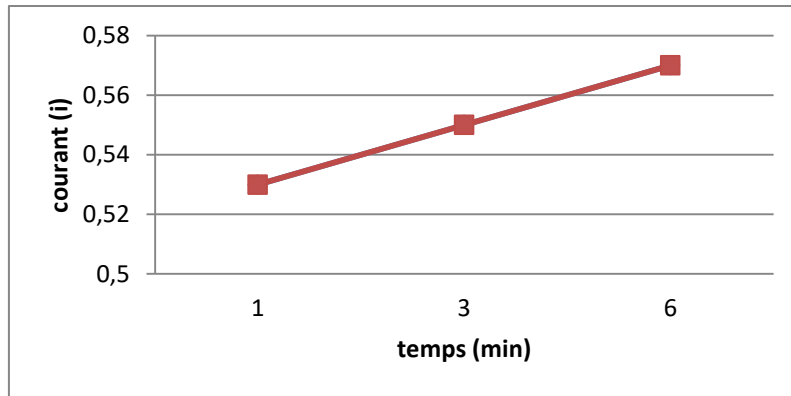


Figure 35 : Variation de tension avec $P= 120W$.

c) Cas de deux charges résistives AC branchées en parallèle $P1 = 75W, P2=120W$

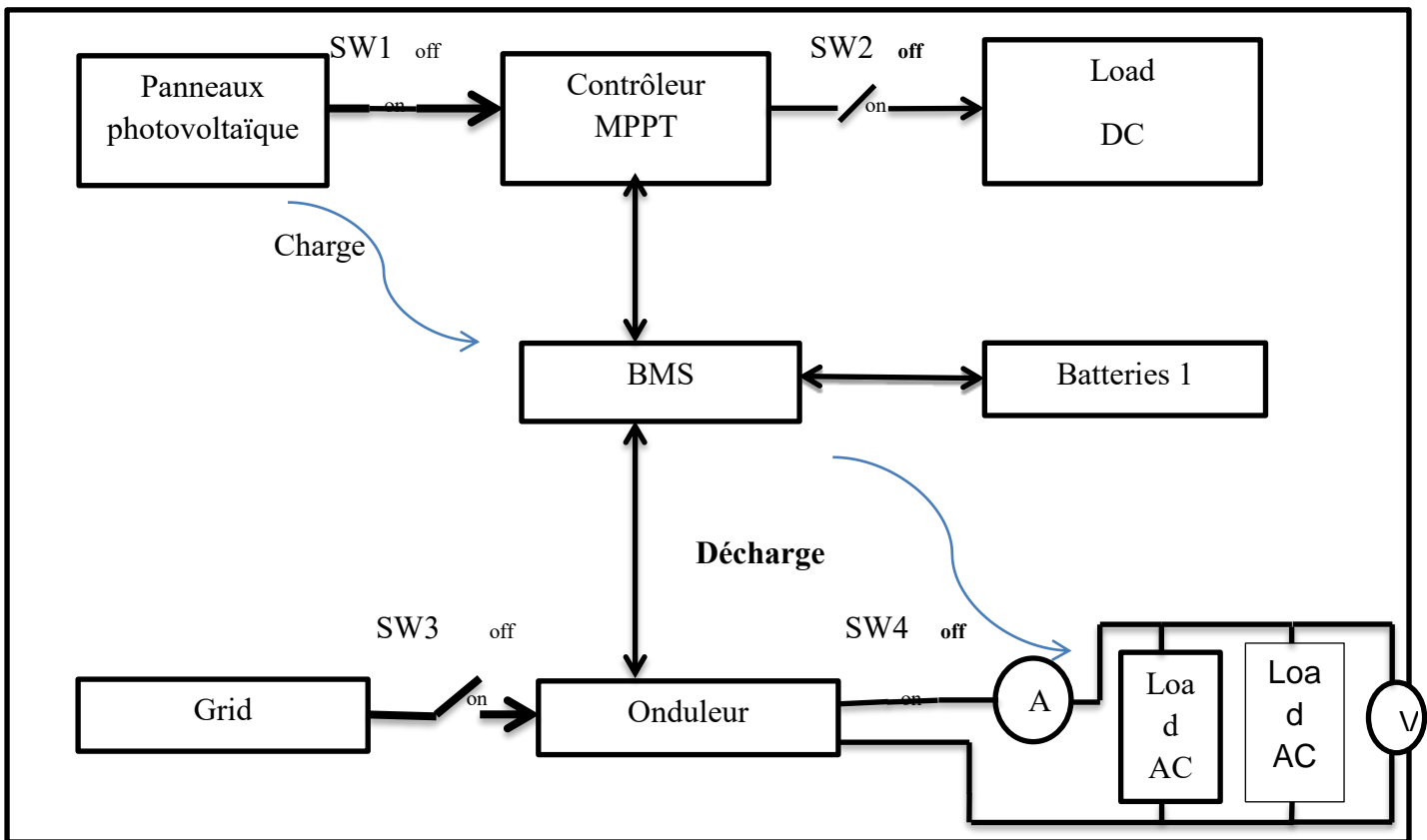


Figure 36 : Schéma pour le cas de deux charges AC en parallèle.

Le tableau 8 suivant représente un test permettant de surveiller l'alimentation de deux charges résistives avec $P1=120W, P2=75Watt$:

Chapitre III : Etude et dimensionnement du système hybride PV-Grid

Tableau 8 : Résultats du test pour $P=195W$.

Date	SW1	SW2	SW3	SW4	Charge (w)	Tension (v)	courant (A)	durée (min)	Observation
07/05/2025 À 11 : 00	On	Off	Off	On	(120W+	219	0,3	4	
					75W)	231,8	0,3	8	
					En	221	0,32	11	
					parallèle	233	0,32	14	

Discussion du résultat obtenu : La lampe de 75W s'allume individuellement, tandis que l'onduleur coupe l'alimentation de la charge de 120 watts lorsque l'énergie consommée est supérieure à l'énergie produite ($E_c > E_p$). Cette situation se produit lorsque les deux charges, de nature différente, sont connectées en parallèle, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance globale.

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour $P=195W$:

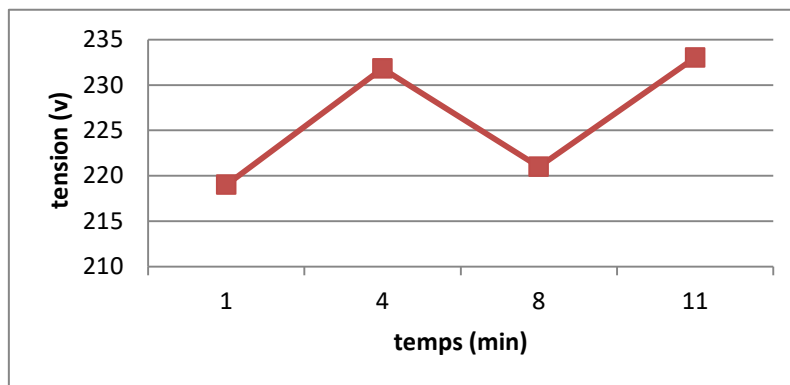


Figure 37 : Variation de tension avec $P= 195W$.



Figure 38 : Variation de courant avec $P=195W$.

- d) Cas de 02 charges résistives AC identiques branchées en parallèle $P1 = P2=75W$.

Chapitre III : Etude et dimensionnement du système hybride PV-Grid

Le tableau suivant représente un test permettant de surveiller l'alimentation de deux charges AC avec $P_1=75W$ et $P_2=75W$:

Tableau 9 : Résultats du test pour $P=150W$.

date	SW1	SW2	SW3	SW4	Charge (w)	Tension (v)	courant (A)	durée (min)	Observation
07/05/2025					(75W + 75W)	242	0,7	1	
À	On	Off	Off	On	en parallèle	248	0,72	5	
11 :30						250	0,73		

Discussion du résultat obtenu : Les deux charges s'allument simultanément. Par rapport au cas où l'on n'avait que deux charges différentes, la résistance globale diminue, puisque $R_{eq} = R/2$. Cette baisse de résistance a pour conséquence une diminution de la tension de la batterie, qui descend jusqu'à 10,1 V. La relation est donnée par la formule :

$$U = (R / 2) * I$$

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour $P=150W$:

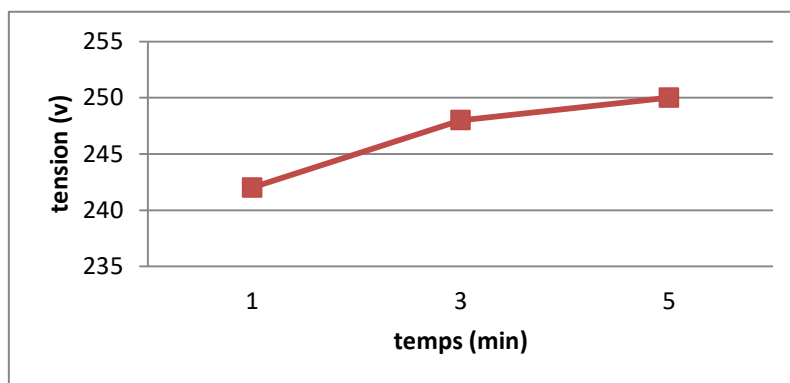


Figure 39 : variation de tension avec $P=150W$.

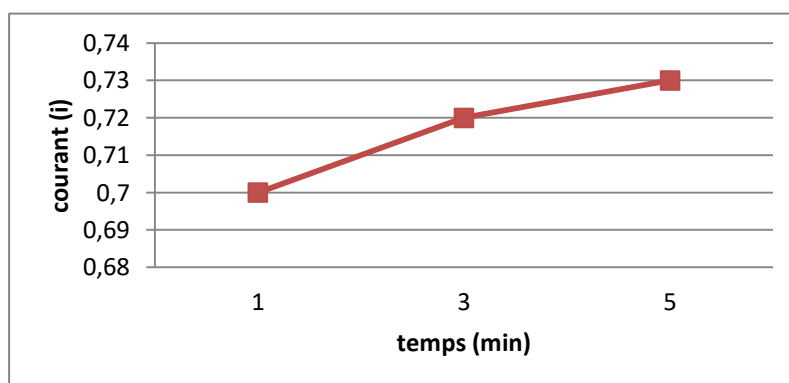


Figure 40 : variation de courant avec $P=150W$.

La courbe suivante représente la caractéristique $U=f(i)$ sachant que $P_1=P_2=75W$:

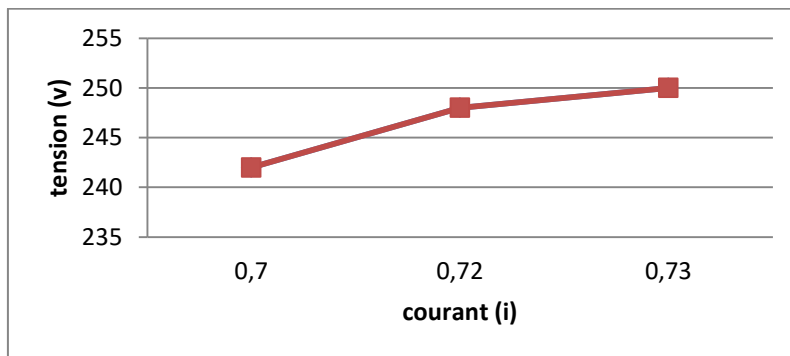


Figure 41 : courbe de caractéristique avec $P=150W$.

La figure 41, illustre la caractéristique tension-courant de notre système. Cette représentation montre l'évolution de la tension en fonction de l'intensité du courant lorsque la charge varie. D'après le graphe, lorsque le courant passe de 0,7 A à 0,73 A, la tension augmente de 242 V jusqu'à environ 249 V. Cette variation souligne que le système garde une tension relativement stable

e) cas de deux charges résistives AC branchées en parallèle avec $P_1=120W$ et $P_2=75W$ avec deux batteries branchées en parallèle.

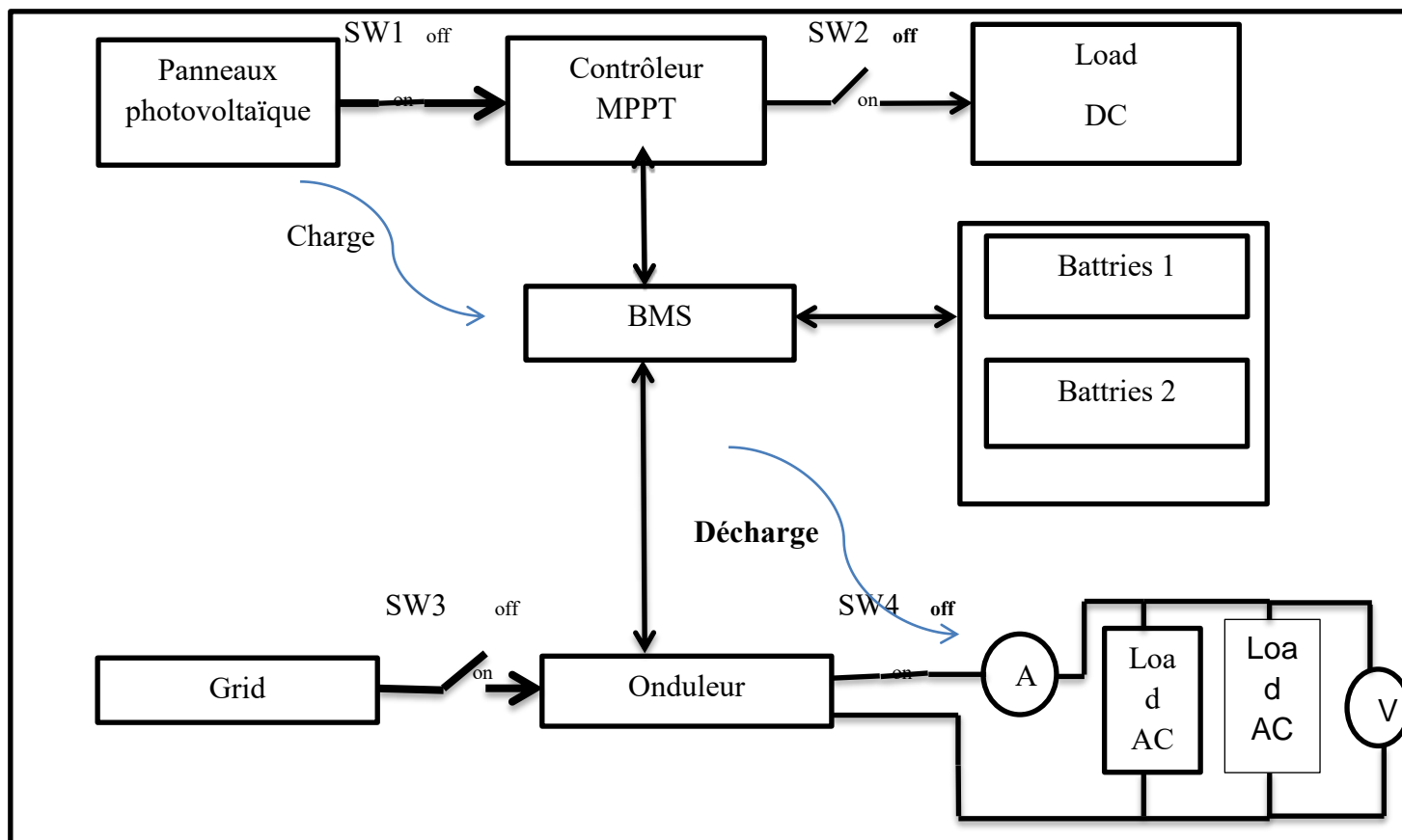


Figure 42 : Schéma pour le cas de deux charges AC en parallèle avec 2 batteries.

Chapitre III : Etude et dimensionnement du système hybride PV-Grid

Le tableau suivant représente un test permettant de surveiller l'alimentation de deux charge résistives AC branchées en parallèle avec $P_1=120W$ et $P_2= 75W$ avec deux batteries de 12V branchées en parallèle.

Tableau 10 : Résultats du test pour $P=195W$ avec deux batteries.

date	SW1	SW2	SW3	SW4	Charge (w)	Tension (v)	courant (A)	durée (min)	Observation
21/05/2025 À 9 :15	On	Off	off	on	(120W+75W) en parallèle	245	0,92	0	
						248	0,95	5	
						247	0,96	12	
						238	0,94	24	
						234,6	0,93	27	
						232,4	0,93	30	
						229,2	0,92	33	
								34	

Discussion du résultat obtenu : La tension de la batterie est de 12,7 V et l'énergie produite (E_p) est supérieure à l'énergie consommée (E_c).

Cette valeur diminue ensuite jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne 10,8 V.

À cet instant, les deux charges s'éteignent, car l'énergie consommée (E_c) dépasse l'énergie produite (E_p).

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour $P=195W$:

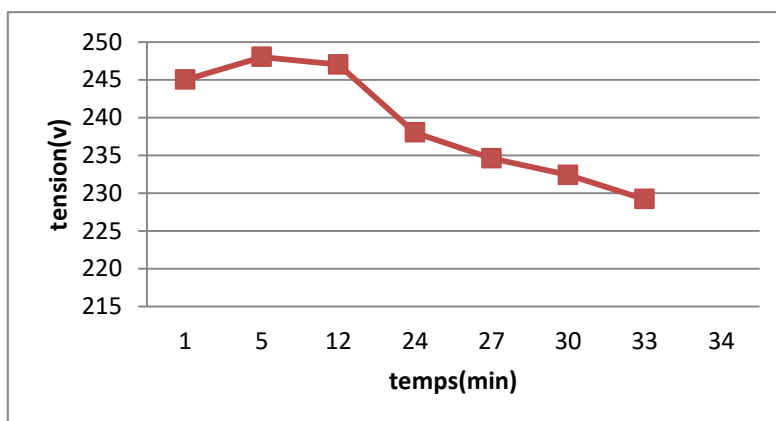


Figure 43 : Variation de tension avec $P=195W$.

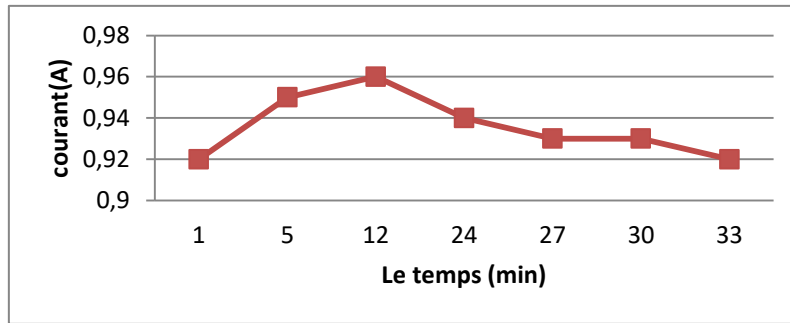


Figure 44 : variation de courant avec $P=195W$.

La courbe suivante représente la caractéristique $U=f(i)$ sachant que $P=150W$:

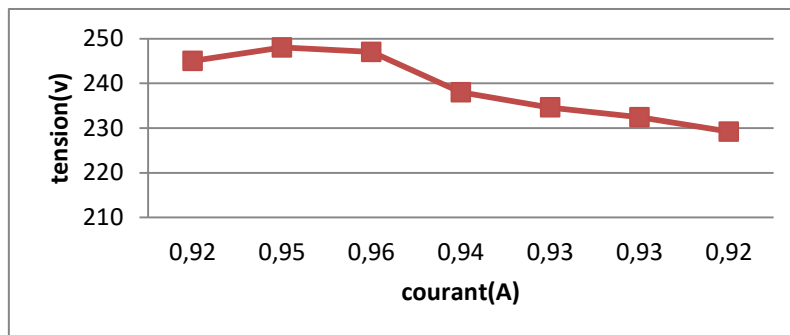


Figure 45 : courbe caractéristique avec $P=196W$.

f) Cas d'une charge résistif AC de 250W

L'énergie consommée est supérieure à l'énergie produite ($P=250W$), ce qui empêche l'allumage de la lampe.

g) Le cas d'une charge inductive (Moteur DC)

Le tableau suivant représente un test permettant de surveiller l'alimentation d'une charge inductive DC avec $P \cong 30,66W$, avec deux batteries de 12V branchées en parallèle :

Tableau III.8 : Résultats du test avec moteur DC.

La date	SW1	SW2	SW3	SW4	Charge (w)	Tension (V)	Courant (A)	La durée (min)	Observation
11/06/2025	On	On	Off	Off	Moteur	12,6	0,12	1	
					DC	12,5	0,11	2	
					Avec	12,4	0,13	5	
					$P=30,66W$	12,3	0,1	10	
						12,3	0,13	12	
						12,3	0,15	15	
						12,2	0,13	19	
						12,3	0,13	29	
						12,1	0,19	35	
						12,1	0,16	48	
						12,1	0,22	59	

Discussion du résultat obtenu : On a effectué cette mesure jusqu'à ce qu'on a atteint 1 heure de fonctionnement sachant que le moteur tournait toujours, on remarque donc que cette charge a fonctionné plus longtemps à cause de sa faible puissance.

Les courbes ci-dessous représentent la variation de tension et de courant pour un moteur DC :

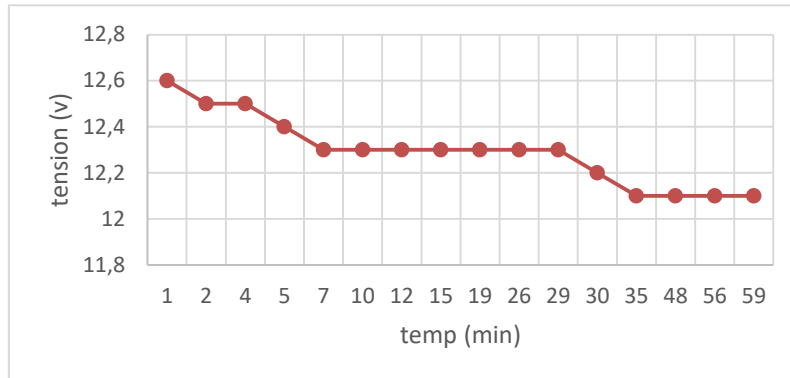


Figure 46 : Variation de tension pour une charge DC.

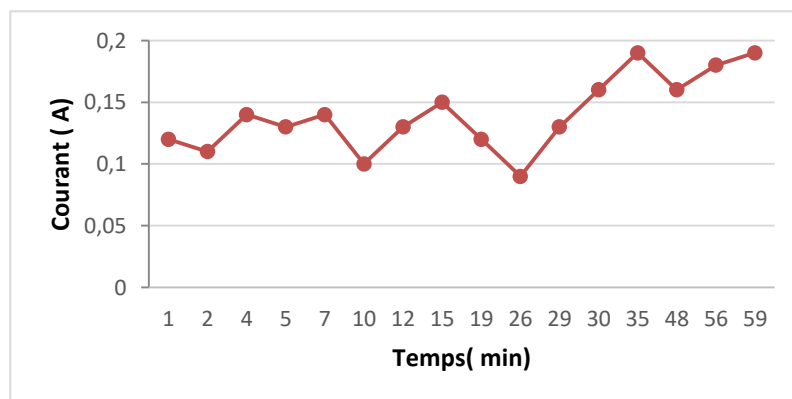


Figure 47 : Variation de courant pour une charge DC.

III.5. Interprétation des résultats

Dans cette étude, différents cas de charges ont été testés sur un système hybride (solaire + batteries, après l'analyse des courbes on dit que :

- Pour les charges résistives (lampes de 75 W, 120 W ou combinées), la batterie se décharge progressivement, et l'onduleur coupe l'alimentation quand la tension devient trop basse, pour protéger les batteries.
- Plus la puissance de la charge est élevée, plus la décharge est rapide.
- Lorsque deux charges sont en parallèle, la répartition du courant dépend de leur résistance.

- Si la puissance totale dépasse la capacité du système, certaines lampes ne s'allument pas.
- Le moteur DC (charge inductive à faible courant) fonctionne longtemps, car il consomme peu d'énergie.

Globalement, le système fonctionne bien avec des charges faibles et équilibrées, mais il limite ou coupe les charges trop élevées pour protéger les batteries.

III.6. Conclusion

Dans Ce chapitre, nous avons mené une étude pilote de Notre système de stockage d'énergie. Nous avons tout rassemblé et détaillé l'architecture physique du système. Nous avons fourni une explication détaillée des composants de ce système (panneau solaire, contrôleur PWM, batterie, onduleur, charges, etc.), après on a réalisé des tests pratiques réels pour évaluer les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement et surveiller la commutation entre les sources d'énergie (solaire et réseau) ainsi qu'en utilisant les équipements disponibles, dont la qualité fixe des limites aux performances des expériences. On a utilisé des charges AC et on a raccorde les charge en serie et en parallèle dans la phase initiale en utilisant une seul batterie, puis utilisé deux batteries en raccord parallèle pour augmenter la capacité, puis effectué des tests avec des charges DC pour voir les différences entre elles.

Nous avons obtenu des résultats satisfaisants en utilisant ce système pour alimenter des charges à capacité limitée pendant des périodes de temps spécifiques dans le cadre de Hors réseau, en tenant compte de notre engagement envers la capacité limitée de certains des équipements utilisés, tels que (onduleur et contrôleur PWM).

Conclusion Générale

Conclusion générale

Tout au long de ce travail, nous avons eu l'opportunité d'étudier, de dimensionner et d'expérimenter un système hybride de stockage d'énergie, combinant l'énergie solaire, une batterie, un régulateur PWM, un onduleur et une connexion au réseau. Cette expérience nous a permis de voir concrètement comment chaque élément prend place et interagit afin d'assurer l'alimentation des charges.

Au-delà de l'aspect théorique, ce projet a été l'occasion d'une véritable expérience pratique, nous confrontant tant aux contraintes physiques des dispositifs que, parfois, aux aléas liés à leur mise en service. Cette étape expérimentale nous a offert un regard plus réel sur leur fonctionnement, renforçant notre compréhension des principes fondamentaux de l'électronique de puissance et de l'automatique.

Ainsi, le système que nous avons mis en place a atteint ses objectifs : démontrer la pertinence d'une gestion autonome de l'énergie, assurer l'alimentation des charges de manière continue et sans coupure, et tirer le maximum de l'énergie produite par le panneau photovoltaïque tout en intégrant le réseau lorsque c'est nécessaire.

Toutefois, ce projet n'en est pas l'aboutissement, mais plutôt le point de départ de futures améliorations. Il serait par exemple intéressant d'optimiser le dimensionnement des batteries, d'implémenter un suivi de leur état de charge ou d'intégrer d'autres sources d'énergie afin d'accroître l'autonomie et la pertinence de l'installation. Cette expérience souligne donc toutes les possibilités d'évolution que peuvent offrir de telles solutions, dans le contexte de la transition énergétique et de l'efficacité de l'utilisation des énergies renouvelables. À l'avenir, on pourrait envisager d'intégrer des éoliennes ou d'autres sources d'énergie, d'automatiser encore davantage le système avec de l'intelligence embarquée ou de le rendre communicant afin d'assurer une surveillance et une maintenance à distance, ce qui renforcerait son efficacité et son adaptabilité.

Références bibliographiques

Références

- [1] <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energies-renouvelables/energies-renouvelables-defis-transition-complete/>
- [2] Récupéré sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>
- [3] **AIE (Agence Internationale de l'Énergie)**. (2023). *World Energy Outlook*.
- [4] Récupéré sur <https://www.energie-renouvelable.tv/transition-energetique-5-atouts-majeurs-du-solaire/>
- [5] **REN21**. (2023). *Renewables Global Status Report*.
- [6] Récupéré sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-lenergie>
- [7] Récupéré sur <https://www.parvalux.com/fr/resources/faqs/quest-ce-quun-controlleur-pwm/>
- [8] https://www.mdpi.com/energies/energies_12_01457/article_deploy/html/image/energies_12_01457_g001.png
- [9] Récupéré sur <https://www.raggienergy.com/fr/news/what-is-the-difference-between-solar-panels-and-solar-generators/>
- [10] Récupéré sur Nascimento, V. do, et al. (2016). "Mathematical Modeling of Photovoltaic Modules Based on Single Diode Model". *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3253–3260.
- [11] Récupéré sur <https://lesolairepourtous.fr/branchement-serie-ou-parallele/>.
- [12] Récupéré sur <https://www.batterie-solaire.com/content/129-le-branchement-en-serie-et-parallele>.
- [13] Récupéré sur <https://deye.com/fr/solar-power-ac-or-dc-understanding-your-systems-current>.
- [14] Récupéré sur ministère de l'Énergie et des Mines – Algérie (2011), Programme National des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNERE).
- [15] Récupéré sur Mémoire : Commande Avancée d'une Éolienne par DOUH Nacer.
- [16] Récupéré sur <https://www.se.com/fr/fr/work/products/product-launch/guides/plc.js>.
- [17] Récupéré sur <https://www.siemens.com>.
- [18] Récupéré sur <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-mecanique/automates-programmables/>.
- [19] Récupéré sur <https://www.opc-router.com/rest-api-5-practical-examples/>.
- [20] Récupéré sur

Références bibliographiques

379717571_Integration_of_MPPT_Controller_and_Battery_Energy_Storage_System_for_Enhanced_Performance_of_a_PV_System_in_PMDC_Motor.

[21] Récupéré sur Mémoire : modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant par Bouchareb Khalil et Touati Ayyoub.

[22] Récupéré sur <http://dSPACE.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11514/5/chapitre%203.pdf>.

[23] Récupéré sur Mémoire : Conception d'un régulateur solaire avec la commande MPPT par Saidi Sirine.

[24] Récupéré sur Revue des Energies Renouvelable Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445 Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.

[25] Récupéré sur <https://fr.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>.

[26] Récupéré sur <https://www.batterie-solaire.com/content/98-regulateur-pwm>.

[27] Récupéré sur <https://www.objetsolaire.com/catalogue/regulateur-de-charge/regulateur-de-charge-solaire-pwm-12-24v-10a-vs1024.html>.

[28] Récupéré sur <https://allo.solar/base-de-connaissances/quelles-differences-entre-pwm-et-mppt.html>.