

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par : MALACHE Mohammed El Amine & BENNADJI Rachad Abdelkader

Sujet

Conception d'un système de stockage hybride (batterie + supercondensateur) pour stabiliser les réseaux électriques alimentés par des énergies renouvelables

Soutenu publiquement, le 14 /06 /2026 , devant le jury composé de :

M. BRIKCI NIGASSA MA

MAA

Université de Tlemcen

Président

M. BENHABIB MC

Pr

Université de Tlemcen

Examineur

Mme BOURI S

MCA

Université de Tlemcen

Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Dedicaces-1

À mes chers parents, qui ont tout donné pour que je réussisse. Ce travail est le fruit de vos sacrifices et de votre amour.

À mes grands-parents bien-aimés, dont les prières et la tendresse ont toujours été ma force.

À mes frères et ma sœur, pour leur présence et leur soutien sans faille.

À mes tantes et mes oncles, pour chaque mot d'encouragement qui m'a aidé à continuer.

À mes amis fidèles, qui ont partagé avec moi les moments difficiles et les belles victoires.

À mes professeurs, sans exception, qui nous ont appris bien plus que l'ingénierie — ils nous ont appris à croire en nous.

À tous ceux qui ont cru en moi, je dédie ce modeste travail avec tout mon respect et ma gratitude.

Mohammed El Amine MALACHE
Tlemcen, le 14 Juin 2026

Dedicaces-2

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur amour, soutien et sacrifices.

Toute ma famille, qui m'a toujours soutenu dans les moments difficiles.

Mes enseignants pour leurs précieux conseils.

Notre encadreur «Mme S.Bouri» qui nous a accompagnés avec ses précieux conseils et son soutien.

Mes amis pour leur soutien, et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous.

Rachad Abdelkader BENNADJI
Tlemcen, le 14 Juin 2026

Remerciements

Ce mémoire représente bien plus qu'un simple travail académique : il incarne des années de curiosité, d'efforts, de doutes et de découvertes.

Nous tenons à exprimer nos plus profondes gratitudee à madame BOURI Sihem pour son accompagnement éclairé, sa patience et la confiance qu'elle nous a témoignée tout au long de cette recherche. Ses conseils avisés et son exigence scientifique ont façonné la rigueur de ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait M. Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA, Maître Assistant à l'Université Abou Bekr Belkaïd, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à Pr Mohammed Choukri BENHABIB, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Nous voudrions également exprimer toutes nos reconnaissances à notre ami OUAH-RANI HOUICINE. Toujours présent, toujours à l'écoute, il n'a jamais hésité à partager son expérience, à répondre à nos questions. Sa présence et son soutien constants ont été d'une aide précieuse.

Nous souhaitons remercier les enseignants de département génie électrique et électronique pour nous avoir offert un environnement propice à la réflexion, à la recherche et à l'épanouissement intellectuel.

*Mohammed El Amine MALACHE
Rachad Abdelkader BENNADJI
Tlemcen, le 14 Juin 2026*

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	x
GLOSSARY	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAIQUES	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES	4
I.2.1 Généralité sur les systèmes énergétiques renouvelables	4
I.2.1-a Énergie solaire	5
I.2.2 Intégration des énergies renouvelable	6
I.2.2-a Amélioration des infrastructures pour une meilleure intégration	6
I.2.3 Problèmes liés à l'intégration massive du photovoltaïque	7
I.3 SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	7
I.3.1 Définition d'un PV	7
I.3.2 Principe de fonctionnement d'un PV	8
I.3.3 Différents types des systèmes PV	9
I.3.3-a Systèmes photovoltaïques autonomes	9
I.3.3-b Systèmes photovoltaïques hybrides	9
I.3.4 Énergie solaire en Algérie	9
I.3.5 Modèle électrique d'une cellule PV	10
I.3.6 Caractéristique d'un système PV	11
I.3.6-a Courant de court-circuit (I_{cc})	12
I.3.6-b Tension de circuit ouvert (V_{co})	12
I.3.6-c Facteur de forme (FF)	13
I.3.7 Rendement	13
I.3.8 Influence de l'éclairement et de la température	13
I.3.9 Effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires	14
I.3.9-a Différents types d'ombrages	14

I.4	SYSTÈME DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE	14
I.4.1	Batteries	14
I.4.1-a	Principe de fonctionnement	15
I.4.1-b	Caractéristiques d'une batterie	15
I.4.1-c	Types de Batteries	16
I.4.1-d	Avantages / Inconvénients	17
I.4.1-e	BMS (système de gestion de batterie)	19
I.4.1-f	Vieillessement et dégradation des batteries	20
I.4.1-g	Les supercondensateurs	21
I.4.1-h	Principe de fonctionnement	21
I.4.2	Types et caractéristiques principales	22
I.4.3	Comparaison Batterie / Supercondensateur	23
I.5	LES CONVERTISSEURS STATIQUES	25
I.5.1	Les Hacheurs (DC/DC)	25
I.5.2	Onduleurs (DC/AC)	26
I.6	LES RÉGULATEURS MPPT	26
I.6.1	Régulateurs de charge solaire PWM	27
I.6.2	Régulateurs de charge solaire MPPT (P&O)	28
I.6.3	Avantages des régulateurs MPPT	29
I.7	SYSTÈME DE STOCKAGE HYBRIDE (HESS)	30
I.7.1	Définition d'un HESS	30
I.7.2	Intérêt de l'association batterie + supercondensateur	30
I.7.3	Principe de partage Puissance/Energie	31
I.8	CONCLUSION	31
II	CONCEPTION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME DU HESS	32
II.1	INTRODUCTION	33
II.2	ARCHITECTURE DU SYSTÈME ÉTUDIÉ	33
II.2.1	Schéma global du système	33
II.2.2	Rôle de chaque composant	34
II.3	MODÉLISATION DE LA BATTERIE	35
II.3.1	Modèle électrique équivalent de la Batterie	35
II.3.2	État de charge (SOC)	36
II.4	MODÉLISATION DU SUPERCONDENSATEUR	36
II.4.1	Modèle électrique	36
II.4.2	Courant, tension et énergie stockée	37
II.4.3	Réponse aux variations rapides de puissance	38
II.5	STRATÉGIE DE GESTION DE L'ÉNERGIE (EMS)	39
II.5.1	Principe général de gestion de l'énergie	39
II.5.2	Séparation des fréquences	40
II.5.2-a	Principe de la séparation fréquentielle	40
II.5.2-b	Applications de filtrage	41
II.5.3	Objectifs de la stratégie	41
II.5.3-a	Réduction des pics	41
II.5.3-b	Protection de la batterie	41

II.5.3-c	Stabilisation de réseau	42
II.6	DIMENSIONNEMENT DU HESS	42
II.6.1	Critères de dimensionnement	42
II.6.2	Réponse aux variations de charge	42
II.6.3	Réponse aux fluctuations PV	43
II.6.4	Impact sur la durée de vie de la batterie	43
II.7	CONCLUSION	43
III	SIMULATION ET RÉSULTATS	44
III.1	INTRODUCTION	45
III.2	MODÈLE DE LA SIMULATION	45
III.3	ANALYSE DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME	46
III.3.1	Charge fixe / Irradiance variable	46
III.3.1-a	Dimensionnement du PV	47
III.3.1-b	Dimensionnement de la charge	48
III.3.1-c	Choix de la batterie	48
III.3.1-d	Choix du supercondensateur	49
III.3.2	Charge variable / Irradiance fixe	49
III.3.2-a	Dimensionnement de la charge	50
III.4	SIMULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	50
III.4.1	Irradiation variable et charge fixe	50
III.4.2	Irradiation fixe et charge variable	60
III.5	CONCLUSION	68
	CONCLUSION GÉNÉRALE	69
	BIBLIOGRAPHIE	71
	ANNEXE	76

TABLE DES FIGURES

I.1	Énergies renouvelables et non renouvelable [1]	5
I.2	Énergie solaire [2]	6
I.3	Intégration des panneaux photovoltaïques dans le réseau [3]	6
I.4	Panneaux photovoltaïques [5]	8
I.5	Structure interne et anatomie en coupe d'une cellule photovoltaïque au silicium [6]	8
I.6	Énergie solaire en Algérie en 2021 [10]	10
I.7	Etude d'une cellule photovoltaïque [11]	11
I.8	Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque PV [11]	11
I.9	Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [12]	12
I.10	Une batterie [13]	15
I.11	Principe de charge / décharge d'une batterie [13]	15
I.12	Batteries au lithium-ion [14]	16
I.13	Batteries Nickel-Cadmium [14]	17
I.14	Batteries NiMH [14]	17
I.15	Différents types de Batteries NiMH	18
I.16	Batteries NiMH	18
I.17	Batteries NiMH	19
I.18	Système de gestion des Batteries	20
I.19	Supercondensateur [17]	21
I.20	Principe de fonctionnement d'un supercondensateur [18]	22
I.21	Supercondensateur électrochimique à double couche [19]	22
I.22	Pseudo super condensateur [19]	23
I.23	Supercondensateur hybride [19]	23
I.24	Comparaison Batterie / Supercondensateur	24
I.25	Convertisseur DC/DC(Hacheur)	25
I.26	Convertisseur DC/AC (onduleur)	26
I.27	Branchement d'un MPPT sur une batterie 12V en parallèle [21]	27
I.28	Régulateur PWM [23]	28
I.29	Régulateur MPPT [23]	29
I.30	Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) avec une source PV [25]	30
II.1	Diagramme d'architecture d'un Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) appliqué à une source photovoltaïque.	33
II.2	Rôle de chaque composant	34
II.3	Modèle R-C d'une batterie [26]	35

II.4	Schéma électrique d'un supercondensateur [19]	36
II.5	Comparaison graphique de la réponse dynamique entre le supercondensateur et la batterie [28]	38
II.6	Comportement lors de transitoire [28]	39
II.7	Comparaison graphique du comportement lors de transitoire entre le supercondensateur et la batterie	42
III.1	Modèle principal de la simulation	45
III.2	Appareils utilisés	46
III.3	Paramètres de PV array	47
III.4	Block paramètres de la batterie	48
III.5	Block paramètres du supercondensateur	49
III.6	Modèle de la simulation	50
III.7	L'irradiation et la température	51
III.8	Courbe de la puissance de PV	51
III.9	Courbe de la puissance de la batterie	52
III.10	Courbe de la puissance de supercondensateur	52
III.11	Courbe de la puissance de la charge	53
III.12	Tension de Bus DC	54
III.13	Tension V_{pv}	54
III.14	Tension V_{bat}	55
III.15	Tension V_{sc}	55
III.16	Tension V_{ch}	56
III.17	Courant I_{pv}	57
III.18	Courant I_{bat}	57
III.19	Courant I_{sc}	58
III.20	Courant I_{ch}	58
III.21	Etat de charge de la batterie	59
III.22	Etat de charge du supercondensateur	60
III.23	Modèle de la simulation	60
III.24	Puissance P_{pv}	61
III.25	Puissance P_{ch}	61
III.26	Puissance P_{bat}	62
III.27	Puissance P_{sc}	62
III.28	Tension V_{pv}	63
III.29	Tension V_{ch}	64
III.30	Tension V_{bat}	64
III.31	Tension V_{sc}	65
III.32	Courant I_{pv}	65
III.33	Courant I_{ch}	66
III.34	Courant I_{bat}	66
III.35	Courant I_{sc}	67
III.36	Etat de charge de la batterie	67
III.37	Etat de charge du supercondensateur	68

A.1	Bloc MPPT pour La génération de PWM	76
A.2	Convertisseur DC-DC (Boost)	77
A.3	Convertisseur bidirectionnel DC-DC	77
A.4	Bloc de contrôle de combinaison (batterie/supercondensateur)	78
A.5	Block paramètres de régulateur PI	78
A.6	Block paramètres de régulateur PI 1	79
A.7	Block paramètres de régulateur PI 2	79
A.8	Convertisseur connecté a une batterie	80
A.9	Convertisseur connecté à un supercondensateur	80
A.10	Chaine de régulation du bus DC	80

Nomenclature

Symbôle	Signification
Partie Photovoltaïque (PV)	
G	Éclairement solaire / Irradiation (W/m^2)
T_c	Température absolue
I_{pv}	Courant photonique
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension de circuit ouvert
I_s	Courant de saturation de la diode
R_s	Résistance série de la cellule
R_{sh}	Résistance shunt (parallèle) de la cellule
FF	Facteur de forme (Fill Factor)
P_{max}	Puissance maximale délivrée
P_{in}	Puissance lumineuse incidente
η	Rendement de conversion
λ	Longueur d'onde
$\phi(\lambda)$	Flux lumineux incident
q	Constante de charge de l'électron ($1.60210^{-19}C$)
K	Constante de Boltzmann ($1.3810^{-23}J/K$)
h	Constante de Planck
c	Vitesse de la lumière
E	Énergie du photon
Partie Batterie	
E_o	Tension à vide / Force électromotrice
R_s	Résistance interne de la batterie
C_{batt}	Capacité interne / équivalente de la batterie
V_{cbatt}	Tension aux bornes du condensateur de la batterie
I_{bat}	Courant de la batterie
V_{bat}	Tension totale aux bornes de la batterie
E_{bat}	Énergie nécessaire de la batterie (Wh)
SOC / EDC	État de charge / Énergie De Charge de la batterie
C_{bat}	Capacité nominale de la batterie (Ah)

Q_d	Quantité de charge manquante
Partie Supercondensateur	
R_s	Résistance série (pertes internes)
C_{sc}	Capacité du supercondensateur
R_p	Résistance parallèle (pertes par fuite)
i_{sc}	Courant total du supercondensateur
i_c	Courant dans la capacité pure
i_p	Courant de fuite à travers R_p
U_c	Tension aux bornes de la capacité pure
U_{SC}/V_{sc}	Tension totale aux bornes du supercondensateur
E_{sc}	Énergie stockée dans le supercondensateur
P_{sc}	Puissance du supercondensateur
Gestion de l'Énergie (EMS) et Système Global	
P_{load}/P_{ch}	Puissance demandée par la charge / la maison (W)
P_{pv}	Puissance produite par le générateur photovoltaïque
P_{bat}	Puissance fournie/absorbée par la batterie
E_{load}	Énergie journalière consommée par la charge (Wh)
V_{dc}/V_{DC}	Tension du Bus continu (Bus DC)
V_{dcref}	Tension de référence du Bus continu
I_{ref}	Courants de référence pour la régulation
τ	Durée d'autonomie du système
α_{21}, α_{22}	Rapports cycliques de commande des interrupteurs
R	Résistance de la charge variable (Ω)

Glossaire

Acronyme	Signification
HESS	Hybrid Energy Storage System (Système de stockage d'énergie hybride)
PV	Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Recherche du point de puissance maximale)
DC	Direct Current (Courant continu)
AC	Alternating Current (Courant alternatif)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation d'impulsion en largeur / MLI)
P & O	Perturb and Observe (Perturbation et observation - type d'algorithme MPPT)
BMS	Battery Management System (Système de gestion de batterie)
SEI	Solid Electrolyte Interphase (Couche d'électrolyte solide)
EDLC	Electric Double-Layer Capacitor (Condensateur à double couche électrique / Supercondensateur)
EMS / SGE	Energy Management System / Stratégie de Gestion de l'Énergie
LPF	Low Pass Filter (Filtre passe-bas)
HPF	High Pass Filter (Filtre passe-haut)
DoD	Depth of Discharge (Profondeur de décharge)
fem	Force électromotrice
CSP	Concentrated Solar Power (Centrale solaire thermodynamique)
EQE	Rendement quantique externe (External Quantum Efficiency)
IQE	Rendement quantique interne (Internal Quantum Efficiency)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée - composant électronique du hacheur)
PI	Proportionnel Intégral (type de régulateur)
C_dT_e	Cadmium Telluride (Tellure de cadmium)
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide (Sélénure de cuivre, indium et gallium)

Introduction Générale

Face au développement industriel rapide et à la croissance démographique mondiale, l'accès à l'énergie est devenu une nécessité impérieuse, exerçant une pression croissante sur les sources d'énergie fossiles traditionnelles. Or, ces dernières sont aujourd'hui confrontées à des défis majeurs, notamment l'épuisement rapide des réserves et leurs graves conséquences environnementales, en particulier les émissions de gaz à effet de serre qui menacent l'équilibre climatique de la planète. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme l'alternative optimale et une solution stratégique pour parvenir à un développement durable et garantir la sécurité énergétique à long terme.

L'énergie solaire photovoltaïque occupe une place prépondérante dans le paysage des énergies renouvelables, grâce à son abondance, sa propreté, sa facilité d'installation et d'entretien, ainsi qu'à la baisse significative des coûts de fabrication des panneaux solaires ces dernières années. Cependant, cette source d'énergie présente des limites fondamentales, notamment son caractère intermittent et irrégulier, lié aux variations du rayonnement solaire, de la température et de la couverture nuageuse. De ce fait, son utilisation exclusive est insuffisante pour garantir un approvisionnement énergétique continu et fiable. L'adoption de systèmes de stockage d'énergie s'avère donc une nécessité technologique incontournable.

Les batteries électrochimiques restent le choix traditionnel le plus courant pour le stockage de l'énergie solaire, mais elles présentent des limitations importantes en termes de densité de puissance, de temps de réponse et de sensibilité extrême aux cycles de charge-décharge répétés, ce qui accélère leur dégradation. À l'inverse, les supercondensateurs se caractérisent par une densité de puissance très élevée, un temps de réponse quasi instantané et une longue durée de vie. Cependant, leur capacité de stockage limitée empêche leur utilisation exclusive comme unique source de stockage. Par conséquent, la combinaison de ces deux technologies au sein d'un système de stockage hybride intégrant batteries et supercondensateurs constitue une solution technique viable. Ce système tire parti des avantages de chaque technologie tout en compensant leurs inconvénients, pour un rendement énergétique plus équilibré et plus efficace.

Notre travail s'intéresse à la conception d'un système de stockage hybride (batterie et supercondensateur) alimenté par un panneau photovoltaïque. Le but est d'étudier le système pour être capable de gérer efficacement les flux de puissance entre la source solaire,

les éléments de stockage et la charge, à travers une stratégie de gestion d'énergie adaptée. La mémoire se divise en trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre présente globalement des généralités sur les systèmes PV.
- Le deuxième chapitre présente les éléments nécessaires pour réaliser notre système de stockage, dans ce chapitre nous allons faire la conception et la modélisation du HESS.
- Le troisième chapitre s'intéresse à l'étude d'un système de stockage hybride pour l'alimentation d'une charge. L'objectif de ce travail, est de faire la simulation de notre HESS, qui combine entre deux éléments de stockage (Batterie, Supercondensateur) et une source d'énergie renouvelable(PV) conçu pour l'alimentation de la charge.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES	4
I.2.1	Généralité sur les systèmes énergétiques renouvelables	4
I.2.2	Intégration des énergies renouvelable	6
I.2.3	Problèmes liés à l'intégration massive du photovoltaïque	7
I.3	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	7
I.3.1	Définition d'un PV	7
I.3.2	Principe de fonctionnement d'un PV	8
I.3.3	Différents types des systèmes PV	9
I.3.4	Énergie solaire en Algérie	9
I.3.5	Modèle électrique d'une cellule PV	10
I.3.6	Caractéristique d'un système PV	11
I.3.7	Rendement	13
I.3.8	Influence de l'éclairement et de la température	13
I.3.9	Effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires	14
I.4	SYSTÈME DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE	14
I.4.1	Batteries	14
I.4.2	Types et caractéristiques principales	22
I.4.3	Comparaison Batterie / Supercondensateur	23
I.5	LES CONVERTISSEURS STATIQUES	25
I.5.1	Les Hacheurs (DC/DC)	25
I.5.2	Onduleurs (DC/AC)	26
I.6	LES RÉGULATEURS MPPT	26
I.6.1	Régulateurs de charge solaire PWM	27
I.6.2	Régulateurs de charge solaire MPPT (P&O)	28
I.6.3	Avantages des régulateurs MPPT	29
I.7	SYSTÈME DE STOCKAGE HYBRIDE (HESS)	30
I.7.1	Définition d'un HESS	30
I.7.2	Intérêt de l'association batterie + supercondensateur	30
I.7.3	Principe de partage Puissance/Energie	31
I.8	CONCLUSION	31

I.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter la structure globale d'un système hybride de stockage d'énergie (Batterie/Supercondensateur) associé à une source d'énergie renouvelable photovoltaïque (PV). Dans un premier temps, les systèmes énergétiques renouvelables et les défis liés à l'intégration massive de l'énergie photovoltaïque seront abordés. Ensuite, une étude descriptive des systèmes photovoltaïques sera présentée. Par la suite, les principaux composants du système hybride de stockage d'énergie seront examinés, notamment les batteries et les supercondensateurs, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs spécificités. Enfin, les différentes topologies de convertisseurs de puissance utilisées dans les systèmes hybrides de stockage d'énergie renouvelable (HESS) seront analysées.

Pour atteindre cet objectif principal, les sous-objectifs suivants sont définis :

- Présenter une analyse descriptive des systèmes énergétiques renouvelables et des enjeux associés à l'intégration à grande échelle de l'énergie photovoltaïque.
- Décrire les principes de fonctionnement, les caractéristiques et les principales architectures des systèmes photovoltaïques.
- Étudier les différentes technologies de stockage d'énergie, en particulier les batteries et les supercondensateurs, ainsi que leurs caractéristiques, avantages et limitations.
- Analyser les diverses configurations de convertisseurs de puissance utilisées dans les systèmes hybrides de stockage d'énergie (HESS) et leur rôle dans la gestion des flux énergétiques.
- Présenter l'architecture globale du système hybride de stockage Batterie/Supercondensateur associé à une source photovoltaïque ainsi que les interactions entre ses différents composants.

I.2 Systèmes énergétiques renouvelables

I.2.1 Généralité sur les systèmes énergétiques renouvelables

Les énergies renouvelables désignent les énergies issues de sources naturelles qui se régénèrent à une vitesse supérieure à celle de leur utilisation. Des sources d'énergie comme la lumière solaire et le vent sont constamment renouvelées. L'énergie renouvelable est omniprésente et foisonne autour de nous.

En revanche, les combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz sont des ressources non renouvelables qui nécessitent des centaines de millions d'années pour se former. Lorsque les énergies fossiles sont brûlées pour générer de l'énergie, elles entraînent des émissions de gaz à effet de serre nuisibles, comme le dioxyde de carbone.

La génération d'énergie renouvelable produit nettement moins d'émissions (CO_2) que la brûlure de combustibles fossiles. Pour lutter efficacement contre la crise climatique, il est essentiel de substituer les énergies fossiles, actuellement responsables d'une grande part

des émissions, par des sources d'énergie renouvelables [1].

Dans la majorité des pays, les énergies renouvelables sont désormais plus économiques et génèrent trois (03) fois plus d'emplois que les énergies fossiles [2].

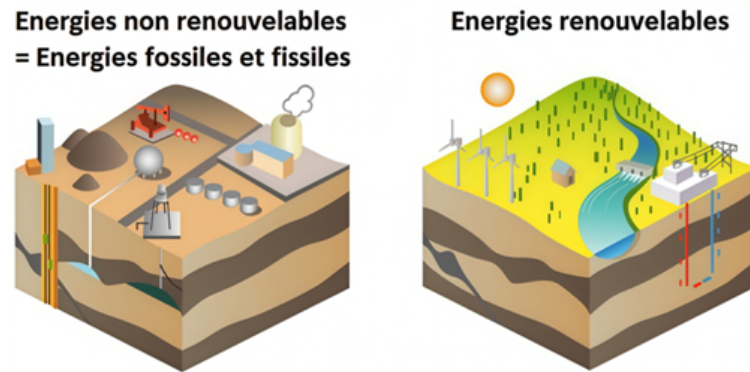


FIGURE I.1 – Énergies renouvelables et non renouvelable [1]

I.2.1-a Énergie solaire

La plus abondante des ressources énergétiques est l'énergie solaire, qui peut être utilisée même par temps nuageux. Le rythme auquel l'énergie solaire est captée par la Terre dépasse approximativement 10 000 fois le taux de consommation énergétique de l'humanité [5].

Les technologies solaires permettent de générer de la chaleur, du froid, de l'éclairage naturel, de l'électricité et des carburants pour diverses utilisations. Ces installations visent à transformer l'énergie solaire en électricité, que ce soit par le biais de panneaux photovoltaïques ou en utilisant des miroirs pour focaliser la lumière du soleil. Même si tous les pays ne disposent pas de la même quantité d'énergie solaire, l'énergie solaire directe peut contribuer de manière importante au bouquet énergétique de chaque pays.

Au cours de la dernière décennie, les frais de production des panneaux solaires ont connu une baisse spectaculaire : ils sont désormais non seulement accessibles financièrement, mais constituent souvent la source d'énergie la plus économique. La durée de vie des panneaux solaires est d'environ trois décennies, et ils sont disponibles en diverses couleurs en fonction du matériau utilisé pour leur production [2].



FIGURE I.2 – Énergie solaire [2]

I.2.2 Intégration des énergies renouvelable

L'intégration des énergies propres au réseau électrique est un moteur prometteur de la transition énergétique. Cependant, cette approche soulève de nombreux défis, notamment en matière d'interconnexion et de complexité de la gestion du réseau. Il est donc crucial de moderniser les infrastructures existantes afin de gérer cet afflux croissant d'énergies renouvelables. Le raccordement de sources d'énergie diverses, telles que les énergies intermittentes, présente également des défis techniques qui exigent des solutions innovantes et efficaces. L'intégration à grande échelle des énergies renouvelables peut impacter la stabilité du réseau électrique, ce qui nécessite le développement de stratégies innovantes de gestion et de stockage de l'énergie. Des solutions technologiques émergent comme voie d'avenir, favorisant une interconnexion fluide du réseau et une gestion efficace. Les progrès technologiques et les technologies intelligentes jouent un rôle essentiel, apportant des solutions adaptées aux défis complexes posés par cette intégration [3].



FIGURE I.3 – Intégration des panneaux photovoltaïques dans le réseau [3]

I.2.2-a Amélioration des infrastructures pour une meilleure intégration

L'un des principaux défis réside dans l'inadéquation des infrastructures actuelles face aux fluctuations de la production d'énergie renouvelable. Les réseaux électriques tradition-

nels, conçus pour acheminer l'électricité de manière linéaire à partir d'une source centrale, doivent être transformés en une structure plus flexible et adaptable. Cela implique non seulement la modernisation des lignes de transport, mais aussi des investissements dans des technologies de pointe telles que les réseaux intelligents, qui permettent une gestion dynamique et réactive.

I.2.3 Problèmes liés à l'intégration massive du photovoltaïque

L'interconnexion efficace des sources d'énergie renouvelable pose plusieurs enjeux techniques. Par exemple, le couplage entre diverses unités de production peut être compliqué à cause de la variabilité intrinsèque aux conditions météorologiques qui affectent directement la production solaire ou éolienne. Par ailleurs, il est essentiel de concevoir des systèmes aptes à contrôler les variations rapides pour prévenir toute instabilité du réseau.

Pour surmonter ces défis, il est essentiel de mettre en œuvre une stratégie systémique qui englobe :

- L'élaboration de solutions de stockage d'énergie solides pour équilibrer les fluctuations de production.
- L'introduction de systèmes permettant une régulation précise et rapide.
- L'établissement d'algorithmes prédictifs fondés sur l'étude des conditions météorologiques pour prévoir les variations.

Donc, même si cela reste un défi de taille, ces efforts combinés pourraient révolutionner notre panorama énergétique en garantissant une transition aisée vers un futur durable où chaque KWh généré serait exploité de manière efficace.

I.3 Système photovoltaïque

I.3.1 Définition d'un PV

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est l'électricité produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux solaires ou des centrales photovoltaïques. Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable car le soleil est une ressource inépuisable à l'échelle humaine, bien que la fabrication des panneaux nécessite une quantité importante d'énergie potentielle, actuellement majoritairement non renouvelable. Un module PV est constitué d'un ensemble de cellules en silicium monocristallin ou polycristallin. Ces cellules sont connectées en série pour générer une tension adaptée à l'alimentation des appareils. Généralement, un panneau comporte entre 36 et 120 cellules connectées en série [5]



FIGURE I.4 – Panneaux photovoltaïques [5]

I.3.2 Principe de fonctionnement d'un PV

Un matériau comme le silicium possède la propriété de générer de l'électricité quand il reçoit la lumière du soleil, c'est l'effet photovoltaïque, découvert par Becquerel en 1839 [5]. Il est mis en application dans les cellules photovoltaïques, petits composants électroniques le plus souvent composés de silicium.

Les photons de la lumière solaire transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur qui se mettent en mouvement et créent un courant électrique transmis par une grille métallique très fine [6].

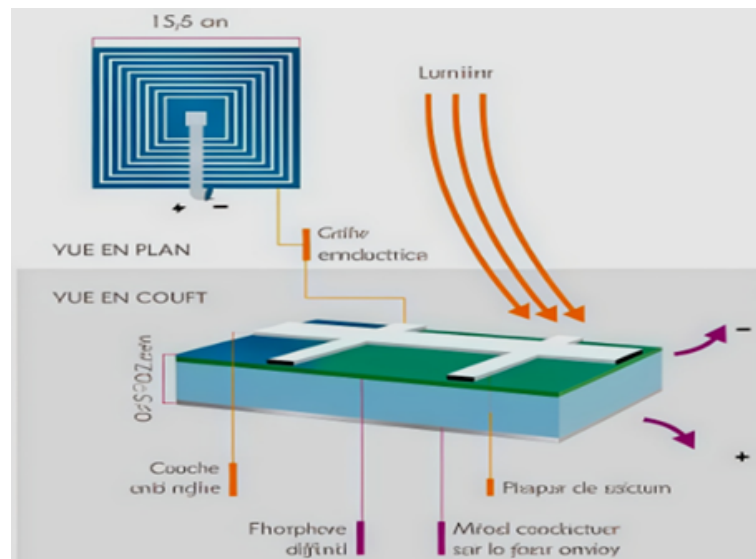


FIGURE I.5 – Structure interne et anatomie en coupe d'une cellule photovoltaïque au silicium [6]

Chaque cellule produit une petite quantité d'électricité ; les cellules sont donc connectées en série et en parallèle pour fournir la tension et le courant nécessaires.

Par conséquent, la production d'un système photovoltaïque dépend de l'ensoleillement et de la durée d'exposition. La production d'énergie d'un système photovoltaïque n'est pas la même à Tlemcen qu'à Tindouf, en raison des différences d'ensoleillement entre les deux

régions. La production annuelle moyenne est appelée « potentiel solaire », qui correspond à la production théorique d'un champ solaire de 1 000 W sur une année [7].

I.3.3 Différents types des systèmes PV

I.3.3-a Systèmes photovoltaïques autonomes

Ce type de système est totalement autonome et fournit de l'électricité à l'utilisateur sans aucun raccordement au réseau électrique.

Un système autonome nécessite des batteries pour stocker l'énergie. Il est généralement utilisé pour alimenter en électricité les consommateurs situés dans des zones isolées, comme les îles et les régions montagneuses, ainsi que pour d'autres applications telles que la télésurveillance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés là où la source d'électricité est la plus économique [8, 9].

I.3.3-b Systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes solaires hybrides intègrent une autre source d'énergie, comme une éolienne, un groupe électrogène ou une centrale hydroélectrique. Un système de batteries stocke généralement l'énergie, évitant ainsi les pertes provenant d'autres sources. La difficulté de ce type de système réside dans l'équilibrage des différentes sources d'énergie afin d'optimiser leur utilisation [8, 9].

I.3.4 Énergie solaire en Algérie

Afin de préserver ses réserves de pétrole et de gaz, l'Algérie s'est tournée vers le développement et l'utilisation de l'énergie solaire à travers des projets stratégiques et des partenariats internationaux. Parmi les initiatives les plus marquantes figurent la mise en service de la centrale hybride de HassiR'mel en 2011 et la signature d'un accord de coopération avec l'initiative Desertec pour l'échange de savoir-faire et l'accès aux marchés étrangers [10]. Malgré les difficultés et la lenteur des progrès rencontrés par certains programmes ambitieux de centrales solaires thermodynamiques (CSP), le pays a réalisé des avancées significatives dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. La première usine privée de fabrication de panneaux solaires est devenue opérationnelle avec un taux d'intégration locale de 90 %, et ces efforts ont abouti à la création de 24 centrales solaires à travers le pays en 2018 (dont d'importantes centrales sur le plateau de l'Adrar) et pour renforcer cette approche expansionniste, l'Algérie a lancé en 2023 un important appel d'offres pour la construction de 15 nouvelles centrales solaires d'une capacité totale allant jusqu'à 2000 mégawatts crête, les travaux devant débuter en 2024 [10].

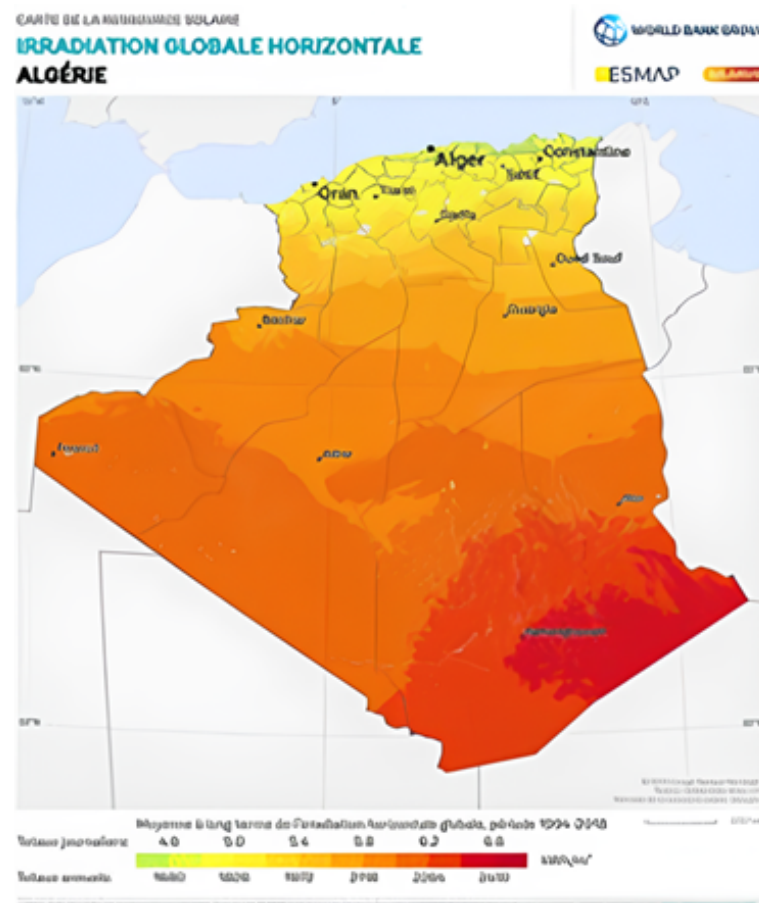


FIGURE I.6 – Énergie solaire en Algérie en 2021 [10]

I.3.5 Modèle électrique d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque (cellule solaire), est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente [a] et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (monocristallin ou polycristallin) et plus rarement d'autres semi-conducteurs (par exemple : CdTe, CIGS pour améliorer le rendement ou réduire le coût).

Les cellules sont souvent réunies dans des modules photovoltaïques ou panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de la puissance recherchée [11].

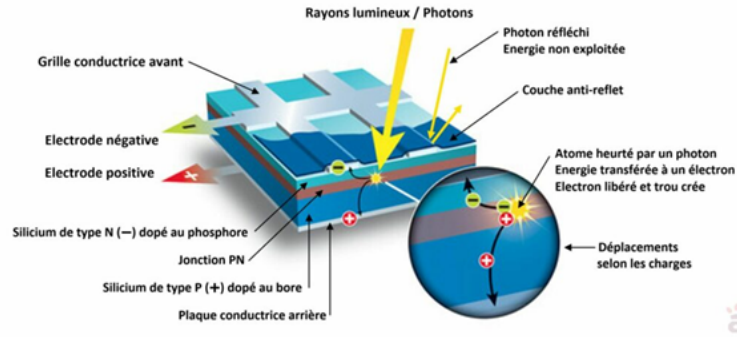


FIGURE I.7 – Etude d'une cellule photovoltaïque [11]

Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque (PV) est représenté par un circuit équivalent constitué d'une source de courant (I_{ph}), une diode (jonction P-N) et deux résistances (R_s série, R_{sh} shunt). Il modélise la conversion de la lumière en électricité, où le courant total I dépend de l'éclairement et la tension V .

La figure I.8 représente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

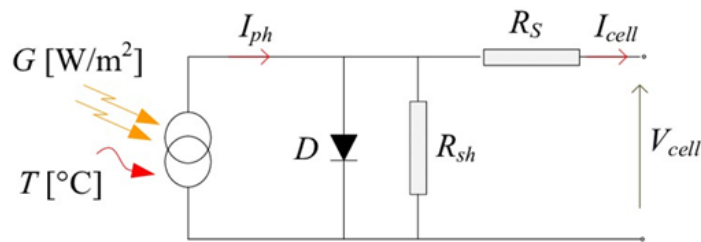


FIGURE I.8 – Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque PV [11]

I.3.6 Caractéristique d'un système PV

Il existe plusieurs paramètres pour caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique de la figure ci-dessus (la caractéristique courant-tension $I(V)$) [12].

Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant [12].

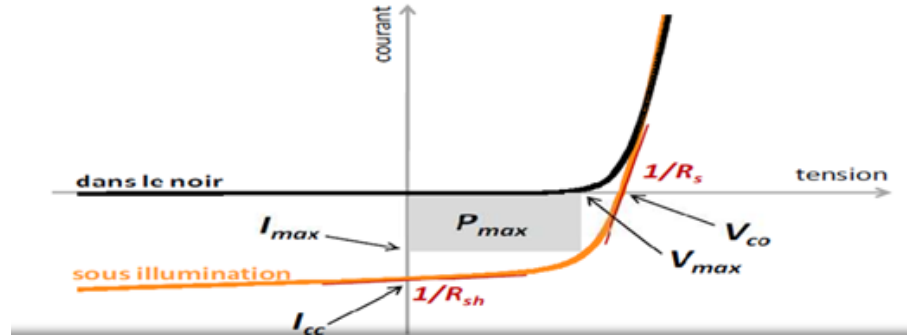


FIGURE I.9 – Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [12]

I.3.6-a Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [12].

I.3.6-b Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [12].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s + 1} \quad (I.1)$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$: Potentielle thermodynamique

T_c : Température absolue

q : Constante de charge d'électron $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

K : Constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

I_{ph} : Courant photonique

I_s : Courant de saturation

I.3.6-c Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.2)$$

I.3.7 Rendement

Le rendement (η) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.3)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.3.8 Influence de l'éclairement et de la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV [9].

I.3.9 Effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires

Les panneaux solaires photovoltaïques sont très sensibles à l'ombre. Les conditions d'ombrage totales ou partielles ont un impact important sur la capacité de production d'énergie et peuvent entraîner des pertes.

I.3.9-a Différents types d'ombrages

Ombrage temporaire : Par exemple : les nuages, les poussières [5].

Ombrage proche : Les ombres causées par les obstacles proches sont directes comme Les cheminées, antennes paraboliques, structures de bâtiment décalées [5].

Ombrage lointain : Par exemple : les bâtiments, les arbres, les câbles [5].

Auto-ombrage : Avec les systèmes de montage en tables, une rangée de modules peut entraîner un ombrage sur la rangée voisine [5].

Ombrage direct : Quand un objet fait de l'ombre sur le panneau, il reçoit moins de soleil, donc il produit moins d'électricité, parfois même beaucoup moins que prévu. [5].

I.4 Système de stockage de l'énergie

Un système de stockage d'énergie permet de conserver une forme d'énergie pour la consommer plus tard. Ces systèmes sont indispensables pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables et garantir l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Ce stockage se fait généralement avec des éléments principaux de stockage, les batteries et les supercondensateurs.

I.4.1 Batteries

De nos jours, les batteries sont devenues des éléments indispensables de notre quotidien. Ces composants sont désormais indissociables de nos appareils électroniques, qu'il s'agisse d'ordinateurs portables, de tablettes ou encore de Smartphones. Plusieurs types de batteries sont commercialisés dans cette optique, avec des caractéristiques et des rendements qui varient selon les modèles. Pour en savoir plus sur les types de batteries, nous verrons ici quels sont les différents produits existant sur le marché, leurs grandes caractéristiques et les modèles les plus utilisés.



FIGURE I.10 – Une batterie [13]

I.4.1-a Principe de fonctionnement

La batterie a révolutionné nos vies, et à juste titre : c'est l'un des dispositifs technologiques les plus omniprésents aujourd'hui. Elle est présente dans presque tous nos appareils mobiles, leur permettant de fonctionner sans source d'alimentation externe.

Une batterie stocke l'électricité pour une utilisation ultérieure. Elle possède toujours une électrode positive et une électrode négative, toutes deux immergées dans une solution électrolytique. Contrairement aux piles, les batteries sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent être rechargées après avoir été déchargées [13].

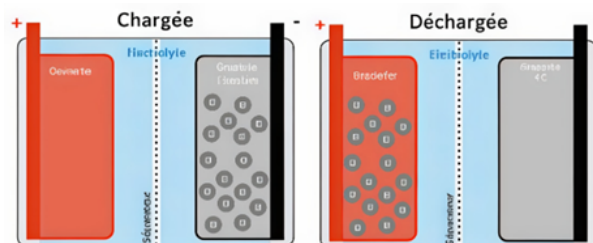


FIGURE I.11 – Principe de charge / décharge d'une batterie [13]

I.4.1-b Caractéristiques d'une batterie

Toutes les batteries, quelle que soit leur technologie, présentent des caractéristiques communes : leur tension, leur capacité et leur durée de vie.

1. Tension et capacité

La tension se mesure généralement en volts. Dans les systèmes de stockage, les batteries sont constituées de cellules élémentaires connectées en série afin d'obtenir la tension souhaitée. Par exemple, plusieurs cellules de tension nominale d'environ 2 V peuvent être assemblées pour atteindre des tensions de 12 V ou 48 V selon les applications.

La capacité de stockage, quant à elle, se mesure en ampères-heures (Ah.s). Cette unité indique la quantité d'énergie immédiatement disponible et peut être augmentée en connectant plusieurs batteries en parallèle.

Le produit de ces deux valeurs donne la quantité d'électricité stockée en kilowatt-heures (kWh). Par exemple, une batterie de 12 volts et 200 Ah possède théoriquement 2 400 wattheures, soit 2,4 kWh. Cependant, en pratique, toute cette énergie stockée n'est pas utilisable. Le taux de décharge ne doit pas dépasser 10 à 15 % de la capacité de la batterie afin d'éviter une dégradation rapide [13].

2. Durée de vie

Les batteries peuvent se recharger certes, mais cette opération ne peut être réalisée à l'infini. Après un certain nombre de cycles (période de charge et de décharge), les batteries finissent par perdre de leur capacité et nécessitent d'être remplacées. Ce nombre de cycles est donc une métrique importante relative au fonctionnement d'une batterie.

3. Température

TABLE I.1 – Tableau des températures des batteries

Température	0	10	15	20	25	Au-delà de 30°C
Capacité	80 %	92%	95 %	100 %	103 %	C % diminue

I.4.1-c Types de Batteries

Au fil des ans, plusieurs modèles de batteries ont été mis au point par les fabricants. Aujourd'hui, trois grands types sont présents sur le marché :

1. Batteries au lithium-ion :

Les batteries au lithium-ion (Li-ion)'sont les plus populaires. Elles ont l'avantage de combiner une grande densité énergétique et une durée de vie très satisfaisante. Leurs applications sont nombreuses, allant des ordinateurs portables aux smartphones en passant par les véhicules électriques et le stockage d'énergie [14].



FIGURE I.12 – Batteries au lithium-ion [14]

2. Batteries nickel-cadmium :

Les batteries nickel-cadmium (NiCd) sont moins courantes que ces dernières mais demeurent encore employées. Leur fiabilité, leur excellente résistance aux hautes températures tout comme leur capacité à délivrer un courant élevé avec une grande stabilité sont autant d'atouts à mettre en avant. Ces batteries souffrent néanmoins de deux défauts importants : un effet mémoire marqué qui manque de praticité et la présence de cadmium, une substance qui peut être toxique pour la santé et l'environnement [14].



FIGURE I.13 – Batteries Nickel-Cadmium [14]

3. Batteries NiMH :

Ces batteries ont une densité énergétique supérieure à celle des batteries nickel-cadmium et sont parfois utilisées dans les appareils électroniques et les appareils photo numériques. Cependant, deux inconvénients limitent leur utilisation : leur coût de production plus élevé que celui des deux types précédents et leur durée de vie plus courte [14].

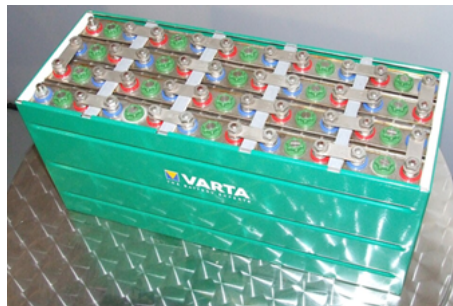


FIGURE I.14 – Batteries NiMH [14]

I.4.1-d Avantages / Inconvénients

Les batteries offrent les avantages indispensables énergétique qui permettant d'alimenter nos appareils, mais elles ont aussi des inconvénients de fiabilité par exemple et d'influence sur environnement. La figure I.15 montre les différents types de batterie et les avantages / inconvénients de chaque type.

Type de batterie	Avantages	Inconvénients	Durée de vie moyenne
Lithium-ion (Li-ion)	- Recharge rapide - Grande capacité - Légère - Pas d'effet mémoire	- Très chère (coût élevé) - Faible fiabilité - Sensible à la chaleur	2 à 5 ans (500 – 1500 cycles)
Nickel-Cadmium (NiCd)	- Très robuste - Forte contre les températures - Longue durée de vie	- La pollution - Toxique à cause du Cadmium - Effet mémoire	5 à 10 ans (1000-2000 cycles)
Nickel-Métal Hydrure (NiMH)	- Prix raisonnable - Bonne capacité - Moins polluante par rapport au NiCd	- Sensible à la chaleur - Faible fiabilité - Rapide déchargement	3 à 5 ans (500-1000 cycles)

FIGURE I.15 – Différents types de Batteries NiMH

Les spécifications de la batterie :

Batterie capacité (25C, 0.2C)	10Ah	20Ah	30Ah
La tension de la batterie	12.8V	12.8V	12.8V
Charge maximale / Courant de décharge	10A	25A/30A	25A/30A
Plage de température de charge	0-55C	0-55C	0-55C
Plage de température de décharge	-20-55C	-20-55C	-20-55C
La tension de charge de décharge	14.5V	14.5V	14.5V
La tension de coupure de décharge	10V	10V	10V
Terminale	F2	M5	M5
La taille de la batterie (L*W*H) inch	5.9x3.7x2.6inch	7.1x6.3x3.0inch	7.1x6.3x3.0inch
La taille de la batterie (L*W*H) cm	15.0x6.6x9.4cm	18.0x8.0x17.0cm	18.0x8.0x17.0cm
Le poids de la batterie (lbs)	2.4lbs	4.9lbs	7.2lbs
Le poids de la batterie (kg)	1.1kg	2.2kg	3.3kg

FIGURE I.16 – Batteries NiMH

Batterie capacité	50Ah	100Ah	150Ah
La tension de la batterie	12.8V	12.8V	12.8V
Charge maximale /Courant de décharge	40A/60A	80A/100A	80A/100A
Plage de température de charge	0-55C	0-55C	0-55C
Plage de température de décharge	-20-55C	-20-55C	-20-55C
La tension de charge de décharge	14.5V	14.5V	14.5V
La tension de coupure de décharge	10V	10V	10V
Terminale	M6	M8	M8
La taille de la batterie (L*W*H) inch	8.8X5.3X7.0 inch	13.0x6.8.5 inch	13.0x6.9x8.5 inch
La taille de la batterie (L*W*H) cm	22.3x13.5x17.8cm	33.0x17.3x21.6cm	33.0x17.5x21.6cm
Le poids de la batterie (lbs)	11.9lbs	22.9lbs	36.7lbs
Le poids de la batterie (kg)	5.4kg	10.4kg	16.6kg

FIGURE I.17 – Batteries NiMH

I.4.1-e BMS (système de gestion de batterie)

Le BMS est un ensemble électronique qui surveille et gère toutes les performances de la batterie. Plus important encore, il empêche la batterie de fonctionner en dehors de ses marges de sécurité.

Le système de gestion de la batterie est essentiel au fonctionnement sûr, aux performances globales et à la longévité de la batterie. De plus, il protège l'environnement dans lequel la batterie au lithium est installée (bateau, camping-car, etc.) ainsi que les personnes qui l'utilisent.

Et la batterie au plomb n'a pas de BMS et a besoin d'une protection supplémentaire régulière [15].

Le tableau [I.18](#) montre le système de gestion des batteries :

Nom	Condition de protection	Délai de détection	Récupération
Protection contre les surcharges	$3.75 \pm 0.03V$	1000ms	$3.6 \pm 0.05V$
Tension d'égalsation	$\approx 3.6V$	Courant d'égalsation 20-30mA	
Protection contre les surtensions de décharge	$2.1 \pm 0.08V$	100ms	$2.3 \pm 0.1V$
Protection contre les surintensités de décharge	2*(courant de décharge maximum)	200ms	Déconnecter la charge
Protection contre les courts-circuits	Court-circuit de charge	200us	Déconnecter la charge
Protection contre le contrôle de la température	$75 \pm 5C$	/	53C

FIGURE I.18 – Système de gestion des Batteries

I.4.1-f Vieillessement et dégradation des batteries

Le terme vieillissement (ou dégradation) des batteries désigne la perte progressive de leurs performances et de leur capacité au fil du temps, due à des processus chimiques, mécaniques et thermiques qui se produisent pendant leur utilisation et leur stockage. Il s'agit d'un facteur majeur limitant la durée de vie, l'efficacité et la sécurité des batteries utilisées dans les véhicules électriques, les appareils électroniques grand public et les systèmes de stockage d'énergie [16].

Causes de la dégradation des batteries :

1. **Dégradation temporelle** : Dégradation de la batterie au fil du temps due à des réactions chimiques secondaires, même lorsqu'elle n'est pas utilisée.
2. **Dégradation cyclique** : Usure de la batterie due aux cycles de charge et de décharge répétés.
3. **Réactions électrochimiques secondaires** : Par exemple, la croissance de la couche d'électrolyte solide (SEI), le dépôt de lithium ou la formation de gaz.
4. **Contraintes mécaniques** : Gonflement des électrodes, fissuration ou détérioration du séparateur.
5. **Effets thermiques** : L'exposition à des températures élevées ou basses accélère la

dégradation de la batterie.

I.4.1-g Les supercondensateurs

L'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie électrique est essentielle dans de nombreuses applications modernes (communications, mémoires, véhicules électriques et hybrides, etc.). Les spécifications de ces dispositifs sont déterminées par leur énergie stockée et leur puissance maximale, ainsi que par leur poids, leur taille, leur durée de vie et leur coût. Dans les systèmes compacts, les besoins en puissance et en énergie sont souvent incompatibles avec les contraintes de poids et de taille, d'où la nécessité de recourir à des sources d'énergie hybride. Cette hybridation repose sur la séparation des fonctions de puissance et d'énergie par la combinaison de différentes technologies de stockage : batteries ou piles à combustible sont utilisées pour fournir l'énergie (autonomie), Bien que les supercondensateurs soient utilisés pour fournir une puissance instantanée, ils constituent la technologie la plus adaptée aux durées supérieures à une seconde. Ce composant est connu sous plusieurs appellations, notamment supercondensateur ou condensateur à double couche électrique, et son stockage repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre une électrode solide et poreuse et une solution électrolytique liquide [17].



FIGURE I.19 – Supercondensateur [17]

I.4.1-h Principe de fonctionnement

Le supercondensateur (EDLC) est un système de stockage d'énergie à polarité spécifique, dont la densité énergétique et la capacité se situent entre celles des batteries et des condensateurs conventionnels. Il est constitué de deux cellules en série (anode et cathode) composées de charbon actif et d'électrolyte, séparées par une membrane diélectrique. Grâce à sa masse élevée et à son fonctionnement efficace à basse température, il est intégré en réseaux pour assurer une décharge rapide, ce qui en fait un composant complémentaire idéal pour les batteries et les piles à combustible [18].

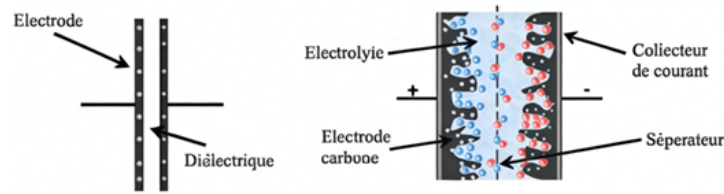


FIGURE I.20 – Principe de fonctionnement d'un supercondensateur [18]

I.4.2 Types et caractéristiques principales

Pour parler des types de supercondensateurs, il faut retenir qu'il existe plusieurs types, chacune a ses propres caractéristiques et applications. Les plus couramment utilisées sont :

1. Les condensateurs électrochimiques à double couche :

Les supercondensateurs à double couche électrique (EDLC) sont constitués de deux électrodes séparées par une membrane diélectrique et une solution électrolytique riche en ions positifs et négatifs. Le principe de stockage d'énergie de ces condensateurs repose sur l'application d'un potentiel électrique qui provoque une accumulation de charges à la surface des électrodes. Cette accumulation stimule la diffusion des ions de l'électrolyte à travers la membrane et leur insertion dans les pores des électrodes de charges opposées par attraction électrostatique. Cette double couche, formée à chaque interface, associée à la grande surface des électrodes et à la faible distance qui les sépare, confère à ces condensateurs une densité d'énergie nettement supérieure à celle des condensateurs conventionnels [19]

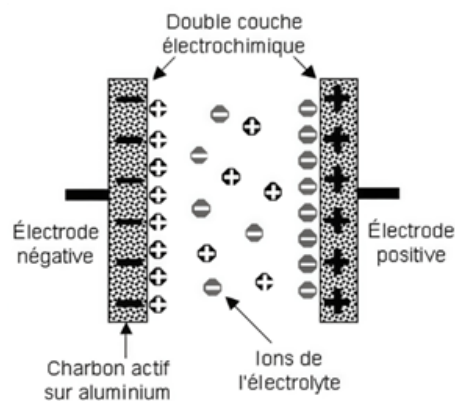


FIGURE I.21 – Supercondensateur électrochimique à double couche [19]

2. Pseudo super condensateur :

Contrairement au condensateur à double couche ce type de condensateur stocke l'énergie par le transfert des charges entre l'électrode et l'électrolyte.

Cela peut être fait par réaction de réduction -oxydation communément appelée réaction redox [19].

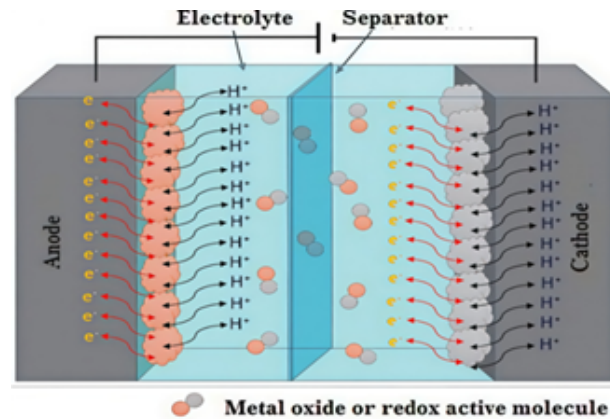


FIGURE I.22 – Pseudo super condensateur [19]

3. Supercondensateur hybride :

Les condensateurs hybrides tentent d'exploiter les avantages relatifs (supercondensateurs à double couche et des pseudocondensateurs) et d'atténuer les Inconvénients relatifs des condensateurs a double couche et des pseudo condensateurs pour obtenir de meilleures performances caractéristiques.

Dans ces composants, des électrodes aux caractéristiques différentes sont utilisées. Une électrode avec la capacité d'afficher une capacité électrostatique et l'autre électrode avec une capacité électrochimique [19].



FIGURE I.23 – Supercondensateur hybride [19]

I.4.3 Comparaison Batterie / Supercondensateur

La comparaison entre les supercondensateur et les batteries c'est comme comparer un sprinteur (petite distance / une grande vitesse) à un marathonien (grand distance / petite

grande vitesse). Ils font tous les deux la même chose, à savoir, stocker de l'énergie mais ont des forces et des faiblesses différentes qui rendent chacun idéal pour son application prévue. Le tableau ci-dessous explique la différence entre les deux.

Les éléments de comparaison	Les supercondensateurs	Les batteries
Densité énergétique	Les supercondensateurs stockent beaucoup moins d'énergie par unité de volume ou de poids comparé aux batteries conventionnelles.	Les batteries sont plus adaptées dans les applications nécessitant un grand stockage d'énergie.
Densité de puissance	Les supercondensateurs peuvent délivrer beaucoup d'énergie en peu de temps, les rendant idéaux pour des applications nécessitant une utilisation rapide de puissance	Les batteries sont utilisables pour la délivrance d'énergie dans le long terme
Auto-décharge	Les supercondensateurs ont un taux d'auto-décharge plus fort comparé aux batteries	Les batteries ont un taux d'auto-décharge beaucoup plus faible comparé aux supercondensateurs. Elles sont plus adaptées pour des applications nécessitant un stockage d'énergie à long terme sans recharge fréquente.
Durée de vie	Les supercondensateurs peuvent supporter plus de 1 000 000 cycles de charge/décharge	Dans les batteries, la réaction chimique corrode les composants, donc une batterie normale ne peut résister qu'à environ 2 000 à 3 000 cycles.
Coût	Les supercondensateurs ont généralement un coût plus élevé par watt, en raison du coût des composants et du fait que la puissance est déchargée très rapidement et donc parfois de manière inefficace.	Les batteries ont un coût moins faible par rapport au supercondensateur
Durabilité	L'extraction du lithium, du nickel, et du cobalt nécessaire pour une batterie Li-ion soulève des préoccupations environnementales concernant les déchets et la pollution	Les supercondensateurs peuvent utiliser des matériaux plus durables, tels que le carbone activé provenant de sources de biomasse qui sont plus renouvelables, moins nocives pour

FIGURE I.24 – Comparaison Batterie / Supercondensateur

Le choix entre les supercondensateurs et les batteries dépend de l'application. Les deux apportent une valeur substantielle, et parfois, ils fonctionnent mieux en équipe (combinaison)! Par exemple, un bus équipé des deux peut utiliser ses condensateurs pour accélérer lorsque nécessaire, les batteries prenant le relais une fois une vitesse constante à maintenir.

Cependant, beaucoup reste à explorer tant dans les batteries que dans les supercondensateurs. C'est pourquoi il y a tant de recherche pour découvrir et perfectionner de nouveaux matériaux et chimies qui peuvent améliorer la densité énergétique, la capacité de décharge, la durabilité des cycles et la sécurité des deux.

I.5 Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors... les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques [20].

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

- Continu / Continu (Hacheur)
- Continu / Alternatif (Onduleur)
- Alternatif / Alternatif (Gradateur)
- Alternatif / Continu (Redresseur)

I.5.1 Les Hacheurs (DC/DC)

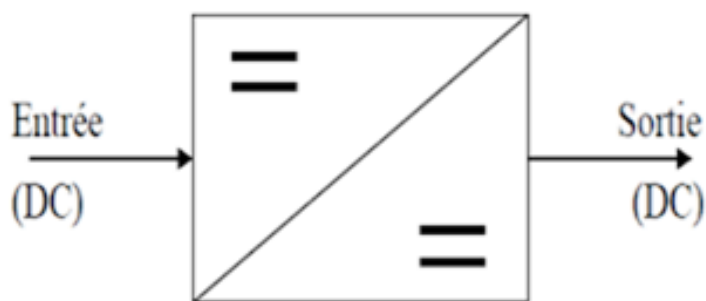


FIGURE I.25 – Convertisseur DC/DC(Hacheur)

- **Hacheur série (convertisseur Buck) :**

Un convertisseur «Buck» permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension [20].

- **Hacheur parallèle (convertisseur Boost) :**

Un convertisseur «Boost» permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée .C'est un élévateur de tension. Il est utilisé dans les systèmes PV dans le but de diminuer le nombre de cellules car ce dernier permet d'atteindre le niveau de tension souhaité [20].

— **Convertisseur Buck-Boost :**

Un convertisseur «Buck-Boost» est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [20].

I.5.2 Onduleurs (DC/AC)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie [20].

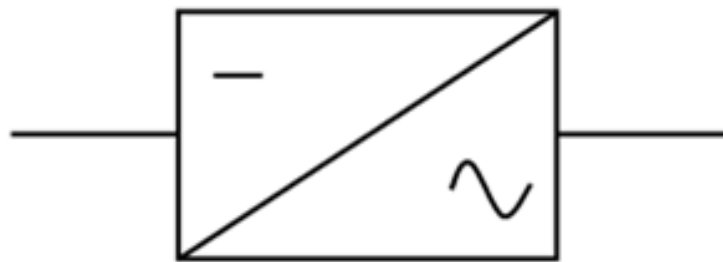


FIGURE I.26 – Convertisseur DC/AC (onduleur)

La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources d'entée et de sortie entre lesquelles il est monté. On distingue dans ce cas deux types d'onduleurs :

1. Onduleurs de tension : il impose une tension alternative à partir d'une source continue (ex : Batterie)
2. Onduleurs de courant : il impose un courant alternatif à partir d'une source de courant continue (ex : source de tension avec une grande inductance série)

I.6 Les régulateurs MPPT

Le régulateur de charge solaire est un chargeur de batterie solaire connecté entre les PV et la batterie. Il règle le processus de charge de la batterie et de s'assurer que la batterie est correctement chargée, et qu'elle n'est pas surchargée.

Les MPPT sont classés en fonction de la tension d'entrée maximale (V_{oc}) et du courant de charge maximal (A). Ces deux valeurs déterminent le nombre de panneaux solaires pouvant être connectés au régulateur de charge [21, 22].

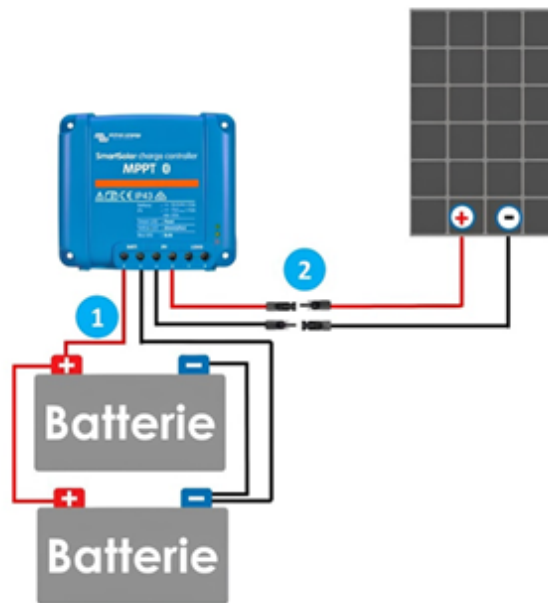


FIGURE I.27 – Branchement d'un MPPT sur une batterie 12V en parallèle [21]

Il existe deux principaux types de régulateurs de charge solaire, le PWM et le MPPT.

I.6.1 Régulateurs de charge solaire PWM

Les régulateurs de charge solaire simples PWM ont une connexion directe entre PV et la batterie. Ils utilisent un interrupteur rapide de base pour contrôler la charge de la batterie. Quand la batterie atteint la tension de charge d'absorption l'interrupteur s'ouvre. Après elle commence à s'ouvrir et se fermer plus vite pour moduler le courant et maintenir une tension constante de la batterie.

Les régulateurs de charge solaire PWM sont une bonne option à faible coût pour les petits systèmes 12V. Ils sont efficaces lorsqu'un ou deux panneaux solaires sont utilisés. Il convient de noter que si plus d'un panneau est utilisé, ils doivent être connectés en parallèle et non en série [21].

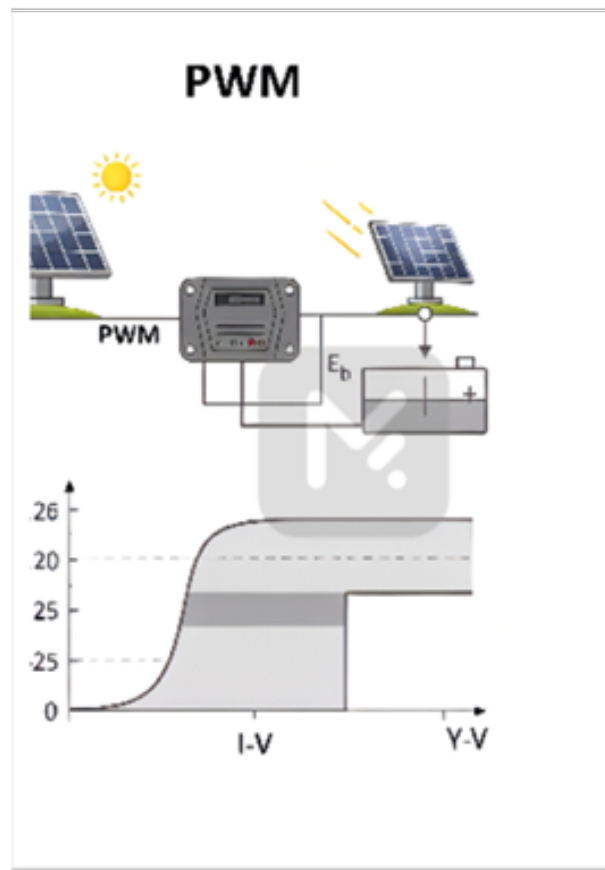


FIGURE I.28 – Régulateur PWM [23]

I.6.2 Régulateurs de charge solaire MPPT (P&O)

Les MPPT sont beaucoup plus modernes que les régulateurs PWM. Ils aident le panneau solaire à fonctionner à son point de puissance maximale, ou plus exactement, à la tension idéale pour une puissance de sortie maximale. Quand la luminosité change pendant la journée, la tension et le courant produits par les panneaux solaires changent aussi.

Les régulateurs MPPT effectuent un scan constant de la courbe de puissance des panneaux solaires pour trouver le point où la puissance de sortie est la plus élevée. Ils modifient ensuite la tension et le courant de charge pour garder le système à ce point optimal. Grâce à cette technologie intelligente, les régulateurs de charge solaire MPPT peuvent être jusqu'à 30 % plus efficaces, selon la tension de la batterie et la tension de fonctionnement (V_{mp}) du panneau solaire.

L'algorithme (P & O) est un calculateur qui mesure dans chaque cycle la tension et le courant du panneau pour calculer la puissance $P(k)$ et la comparer avec la puissance précédente $P(k-1)$ [23].

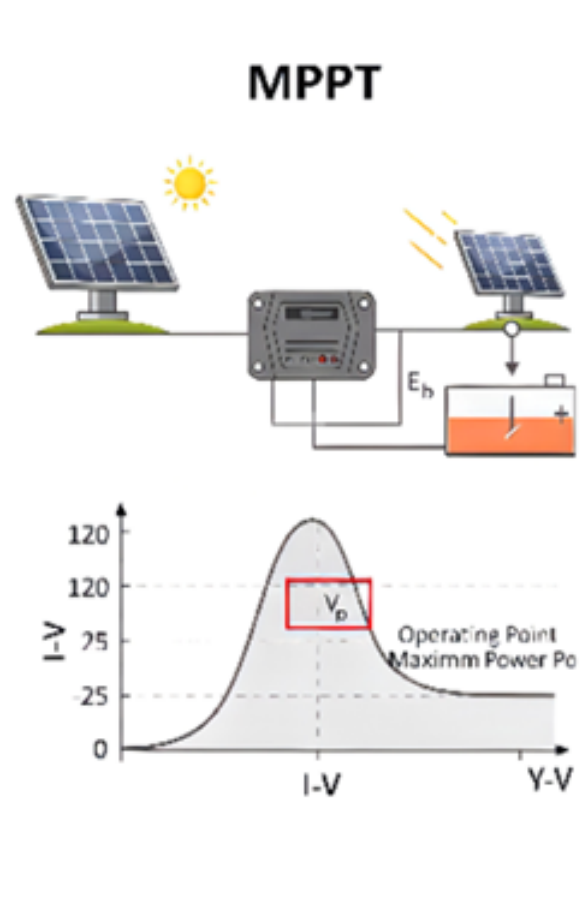


FIGURE I.29 – Régulateur MPPT [23]

I.6.3 Avantages des régulateurs MPPT

Les régulateurs de charge solaire MPPT présentent plusieurs avantages notables par rapport aux régulateurs PWM.

Grâce à leur capacité à suivre le point de puissance maximale d'un panneau solaire, même lorsque les conditions d'ensoleillement changent, ils sont beaucoup plus efficaces. Cela signifie que même dans des lieux partiellement ombragés, les régulateurs MPPT peuvent améliorer la production d'énergie, contrairement aux régulateurs PWM qui perdent beaucoup d'efficacité en présence d'ombres. En effet, en maintenant simplement la tension à un niveau fixe, les régulateurs PWM peuvent subir des pertes d'énergie importantes dans des conditions variables.

Les régulateurs MPPT offrent également plus de souplesse dans la conception du système. Ils peuvent en effet être utilisés sur des systèmes de puissance plus élevée, impliquant deux panneaux solaires ou plus. Cette capacité à gérer des systèmes plus compliqués en fait un choix essentiel pour les embarcations de grande taille.

De plus, en tant que source d'énergie propre, l'énergie solaire joue un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique. La capacité des régulateurs MPPT à améliorer

la production d'énergie solaire leur garantit donc un avenir prometteur [22].

I.7 Système de stockage hybride (HESS)

I.7.1 Définition d'un HESS

Un système de stockage d'énergie hybride (HESS) se définit par la combinaison d'au moins deux technologies de stockage d'énergie au sein d'un même système. Ceci permet de tirer parti des avantages des différentes technologies et de résoudre les problèmes propres à chaque solution. Un système de stockage d'énergie doit être réactif et flexible afin de s'adapter à la demande, qui peut varier considérablement. Par conséquent, un système HESS performant comprend des composants dédiés aux fortes demandes de puissance, tels que les supercondensateurs(Performances de charge/décharge rapides pour la gestion des charges de pointe), et d'autres dédiés aux fortes demandes d'énergie, tels que les batteries(Batterie lithium-ion : densité énergétique élevée et stockage d'énergie de longue durée). Un HESS bien équilibré améliore les performances globales, l'efficacité et la durée de vie du système, tout en réduisant les coûts d'exploitation [24].

I.7.2 Intérêt de l'association batterie + supercondensateur

L'hybridation de stockage (Batterie/Supercondensateur) est une combinaison entre la haute densité énergétique des batteries (stockage à long terme) et la haute densité de puissance des supercondensateurs (réponse rapide).

Les batteries assurent l'alimentation de base et de stockage statique et les supercondensateurs gèrent les appels de puissance dynamique (pics de charge/décharge). Cette architecture améliore la durée de vie des batteries et assure la stabilité du réseau face aux fluctuations solaires [25].

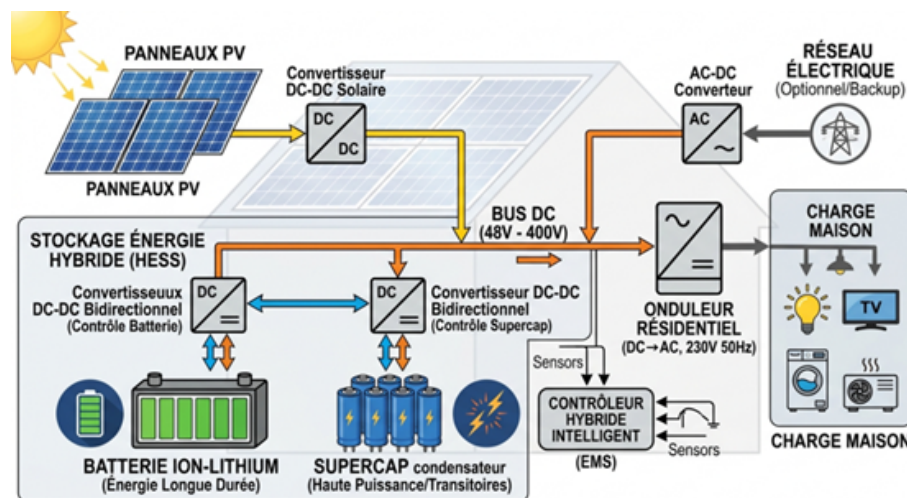


FIGURE I.30 – Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) avec une source PV [25]

I.7.3 Principe de partage Puissance/Energie

Le principe de partage de puissance associe deux technologies de puissance, la première est de la haute énergie (Batterie) et l'autre est de la haute puissance (Supercondensateur) pour les pics d'appel de courant.

La source d'énergie (Batterie) : Elle est caractérisée par une forte densité d'énergie mais une dynamique lente (faible densité de puissance). Elle fournit ou absorbe la composante moyenne et lente de la puissance (charge de base, variations progressives).

La source de Puissance (Supercondensateur) : Elle offre une densité de puissance élevée et un temps de réponse très rapide, mais stocke peu d'énergie. Elle prend en charge la composante dynamique et rapide (pics de démarrage, freinage régénératif, transitoires) [25].

I.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir les fondements contextuels et techniques essentiels à la compréhension de notre étude.

L'intégration à grande échelle de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique est devenue un pilier indispensable de la transition énergétique actuelle. Cependant, le caractère intermittent et aléatoire de la production d'énergie solaire, ainsi que sa forte dépendance aux conditions climatiques (illustrée par les variations géographiques du rayonnement et les différents types d'ombrage, qu'ils soient proches, lointains ou temporaires), posent des défis techniques majeurs liés à la stabilité du réseau électrique, à ses méthodes d'interconnexion et à son exploitation.

Chapitre II

Conception et modélisation du système du HESS

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	33
II.2	ARCHITECTURE DU SYSTÈME ÉTUDIÉ	33
II.2.1	Schéma global du système	33
II.2.2	Rôle de chaque composant	34
II.3	MODÉLISATION DE LA BATTERIE	35
II.3.1	Modèle électrique équivalent de la Batterie	35
II.3.2	État de charge (SOC)	36
II.4	MODÉLISATION DU SUPERCONDENSATEUR	36
II.4.1	Modèle électrique	36
II.4.2	Courant, tension et énergie stockée	37
II.4.3	Réponse aux variations rapides de puissance	38
II.5	STRATÉGIE DE GESTION DE L'ÉNERGIE (EMS)	39
II.5.1	Principe général de gestion de l'énergie	39
II.5.2	Séparation des fréquences	40
II.5.3	Objectifs de la stratégie	41
II.6	DIMENSIONNEMENT DU HESS	42
II.6.1	Critères de dimensionnement	42
II.6.2	Réponse aux variations de charge	42
II.6.3	Réponse aux fluctuations PV	43
II.6.4	Impact sur la durée de vie de la batterie	43
II.7	CONCLUSION	43

II.1 Introduction

Le deuxième chapitre de ce mémoire est d'une importance capitale, car il porte principalement sur les aspects techniques et mathématiques d'un système de stockage hybride composé d'une batterie et d'un supercondensateur. L'intégration des énergies renouvelables, notamment de l'énergie solaire photovoltaïque, aux réseaux électriques se heurte au problème de l'instabilité et de l'intermittence due aux changements climatiques soudains, ce qui exige un système de stockage intelligent et efficace capable de gérer ces fluctuations.

Ce chapitre sera donc divisé en sections clés, en commençant par l'étude de l'architecture et de la conception structurelle du système hybride. Nous présenterons ensuite une modélisation électrique détaillée de la batterie au lithium et du supercondensateur, en nous concentrant sur les équations mathématiques régissant leur état dynamique et le calcul du niveau de charge (SOC). Enfin, nous examinerons la stratégie de gestion de l'énergie (SGE) basée sur le filtrage de fréquence, qui assure une répartition des tâches en bloquant les hautes fréquences provenant de la batterie et en le dirigeant vers le supercondensateur. L'objectif est de protéger la batterie, d'allonger sa durée de vie et de garantir une alimentation électrique stable à la charge.

II.2 Architecture du système étudié

II.2.1 Schéma global du système

Notre installation se compose d'un système de stockage hybride (batterie et un supercondensateur) comme montre la figure II.1. Le régulateur de charge assure la protection de la batterie contre les charges. Aussi il assure l'optimisation du régime de charge de la batterie et il est nécessaire pour prolonger la durée de vie de la batterie.

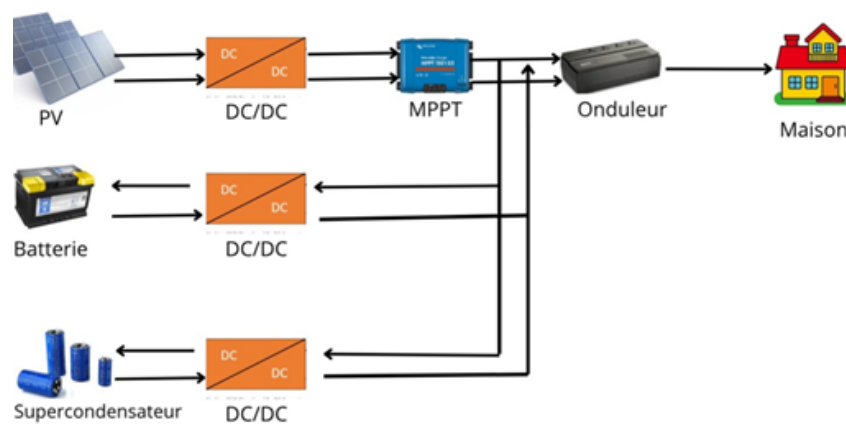


FIGURE II.1 – Diagramme d'architecture d'un Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) appliqué à une source photovoltaïque.

II.2.2 Rôle de chaque composant

Dans le cadre de l'intégration des énergies renouvelables (PV), les HESS jouent un rôle essentiel pour améliorer la fiabilité de l'alimentation électrique. La combinaison entre les batteries et les supercondensateurs permet de répondre aux besoins énergétique à long (batterie) terme et aux variations rapides de puissance (supercondensateur). Et pour mieux comprendre le fonctionnement de ce système, il faut présenter le rôle de chaque composant constituant cette architecture (Figure II.1). Le tableau ci-dessous explique le rôle de chaque composant de système :

Le composant	Le rôle
Source photovoltaïque (PV)	❖ Une source principale du système ❖ Convertir l'énergie solaire en DC
Convertisseur DC/DC (coté PV)	❖ Interface entre le PV et le MPPT ❖ Adapte la tension des panneaux vers le niveau de bus DC ❖ Permet d'optimiser le fonctionnement des panneaux
Contrôleur MPPT	❖ Maximise l'énergie extraite de PV ❖ Stabilise la puissance injectée dans le bus DC ❖ Cherche en temps réel le point de puissance maximale des panneaux
Batterie	❖ Stocke l'énergie à moyenne/long terme ❖ Fourni l'énergie quand le PV est insuffisant (nuages ou nuit) ❖ Lente réponse mais une bonne capacité énergétique
Convertisseur DC/DC (coté Batterie)	❖ Une protection contre les surcharges/décharges profonde ❖ Régulation de flux d'énergie vers le bus DC ❖ Il gère le charge/décharge de la batterie
Supercondensateur	❖ Stocke peu d'énergie mais délivre beaucoup de puissance instantanée. ❖ Réagit très vite aux variations (pics de charge). ❖ Protège la batterie contre les fluctuations rapides.
Convertisseur DC/DC (coté supercondensateur)	❖ Assure la stabilité de bus DC ❖ Permet au supercondensateur d'absorber ou fournir les pics ❖ Contrôle les échanges rapides d'énergie
Bus DC	❖ Il est un point de connexion entre PV, Batterie et le supercondensateur ❖ Assure l'équilibre énergétique du système
Onduleur	❖ Convertit le DC en AC ❖ Aliment les charges domestiques
La charge (Maison)	❖ Consomme l'énergie produit

FIGURE II.2 – Rôle de chaque composant

II.3 Modélisation de la batterie

II.3.1 Modèle électrique équivalent de la Batterie

Ce modèle constitue une source de tension E_o qui représente la force électromotrice (fem) où la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R_s) traduisant les pertes ohmiques [26].

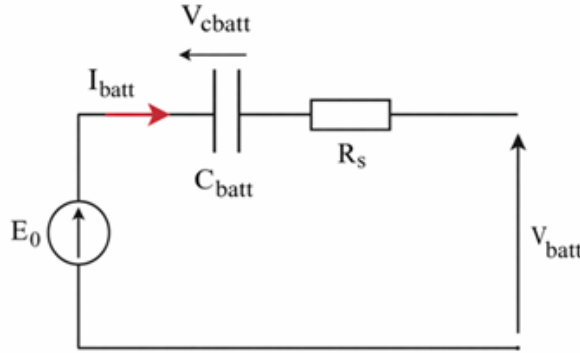


FIGURE II.3 – Modèle R-C d'une batterie [26]

Avec :

E_o : Tension à vide

R_s : Résistance interne

C_{bat} : Capacité équivalente

V_{bat} : Tension aux bornes de condensateur

I_{bat} : Courant

1. La capacité énergétique nécessaire :

$$E_{bat} = P_{load} \cdot t_{aut} \quad (II.1)$$

Avec :

E_{bat} : Energie nécessaire (Wh)

P_{load} : Puissance de la charge (W)

t_{aut} : Durée d'autonomie (h)

2. Capacité en Ampère-heure(Ah) :

$$C_{bat} = \frac{E_{bat}}{V_{bat}} \quad (II.2)$$

II.3.2 État de charge (SOC)

L'état de charge se mobiliser par des équations mathématiques [27] suivantes :

$$SOS(t) = SOS(t_o) - \frac{1}{Q_{bat}} \int_{t_o}^t I_{bat}(t) dt \quad (II.3)$$

La forme différentielle :

$$\frac{dSOS(t)}{dt} = -\frac{I_{bat}}{Q_{bat}} \quad (II.4)$$

Nous avons :

$$V_{bat} = E_o - R_s \cdot I_{bat} - V_{bat} \quad (II.5)$$

On définit l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II.6)$$

Avec :

C_{bat} : Capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d :Quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

II.4 Modélisation du supercondensateur

II.4.1 Modèle électrique

Le supercondensateur est modélisé par un circuit électrique équivalent qui permet de représenter ses propriétés dynamiques et ses pertes internes. La figure II.4 représente le schéma électrique d'un supercondensateur [19] :

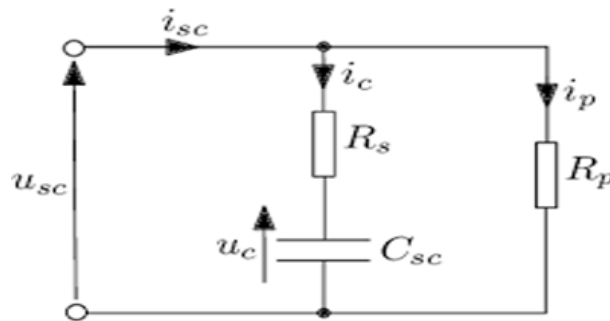


FIGURE II.4 – Schéma électrique d'un supercondensateur [19]

Avec :

R_s : Résistance série représentant les pertes internes

C_{sc} : Capacité représentant le stockage d'énergie

R_p : Résistance parallèle modélisant les pertes par fuite.

Le courant i_{sc} se devise en deux parties :

$$i_{sc} = i_c + i_p \quad (\text{II.7})$$

Avec :

i_c : Courant dans le condensateur

i_p : Courant de fuit de R_p

II.4.2 Courant, tension et énergie stockée

1. Courant stocké

Le courant dans le condensateur (i_{sc}) :

$$i_{sc}(t) = C_{sc} \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Le courant dans la résistance parallèle (i_p) :

$$i_p(t) = \frac{U_C(t)}{R_p} \quad (\text{II.9})$$

Equation du courant totale :

$$i_{sc}(t) = C_{sc} \frac{dU_C(t)}{dt} + (U_C(t))/R_p \quad (\text{II.10})$$

2. Tension stockée

La tension totale est donnée par :

$$U_{sc}(t) = U_c(t) + R_s \cdot i_{sc}(t) \quad (\text{II.11})$$

3. Energie stockée

L'énergie stockée dans le supercondensateur est donnée par l'équation suivante :

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} U_c^2(t) \quad (\text{II.12})$$

L'énergie est directement proportionnelle avec le carré de la tension (une petite diminution de la tension $\longrightarrow$ grande perte d'énergie)

II.4.3 Réponse aux variations rapides de puissance

Le supercondensateur est particulièrement adapté aux variations rapides de puissance grâce à ses caractéristiques physiques [28].

1. Réponse dynamique rapide :

La réponse dynamique rapide précise la capacité du supercondensateur pour réagir instantanément aux variations brusques de courant ou de puissance de système grâce à ses trois caractéristiques :

- (a) Faible résistance interne R_s (cela permet le courant de passer rapidement)
- (b) Grande capacité C_{sc} (fournir le courant élevé en peu de temps)
- (c) Stockage électrostatique

$$i_c(t) = C_{sc} \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (\text{II.13})$$

D'après cette équation :

Si la valeur de la tension ($U_c(t)$) change $\rightarrow$ Le courant ($i_c(t)$) augmente directement

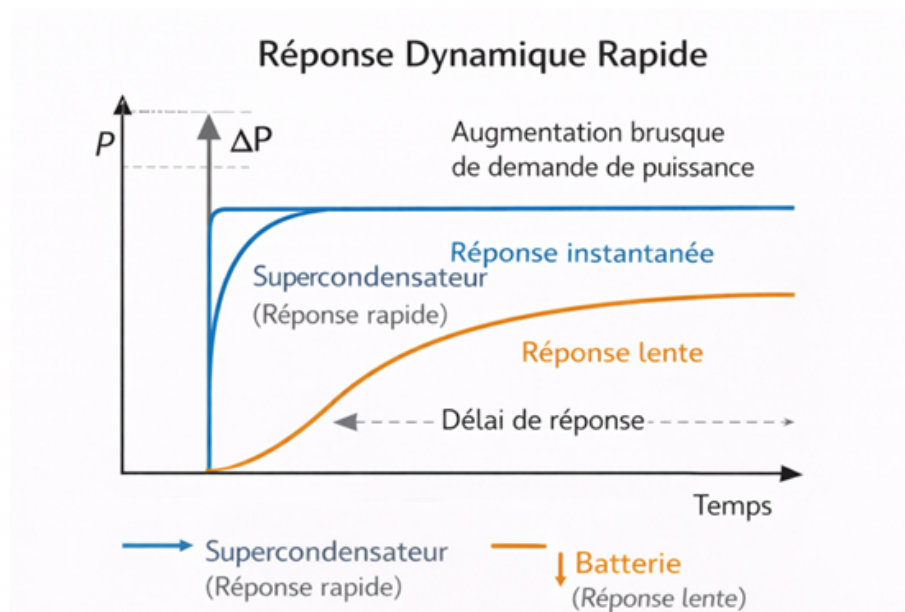


FIGURE II.5 – Comparaison graphique de la réponse dynamique entre le supercondensateur et la batterie [28]

2. Comportement lors des transitoires :

Le comportement lors des transitoires explique la réponse (réaction) du supercondensateur avec les changements brusque dans le système, comme : les chutes de tension, la variation rapide de puissance et le démarrage soudain de la charge. Lors d'un transitoire, le supercondensateur fait :

- (a) La fourniture rapide de courant (si la charge demande d'une puissance)
- (b) L'absorption des pics de puissance (s'il y'a surplus d'énergie)'
- (c) La stabilisation de la tension (il diminue les chutes de tension/les oscillations et stabilisation de bus DC)

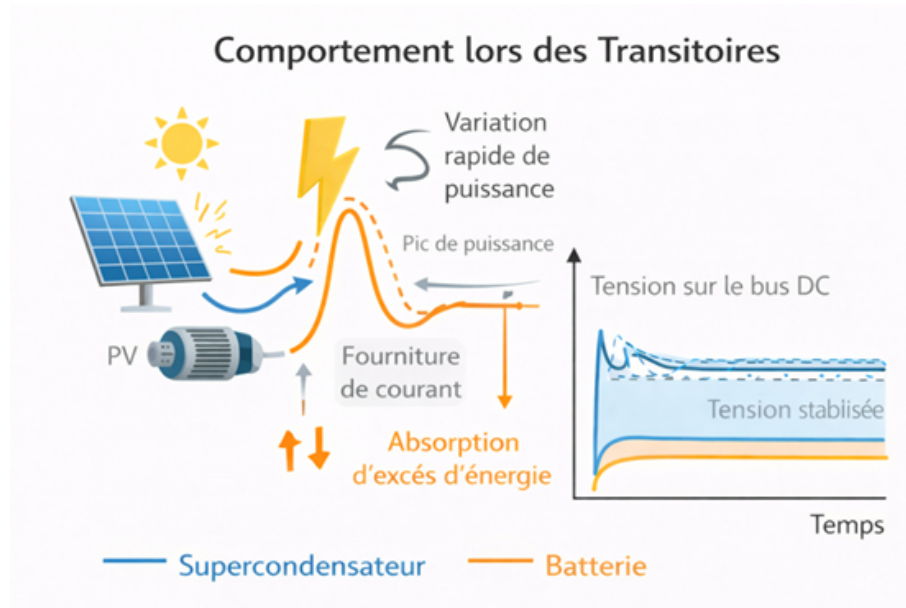


FIGURE II.6 – Comportement lors de transitoire [28]

3. Expression de la puissance :

$$P_{sc}(t) = U_{sc}(t) \cdot i_s(t) \quad (\text{II.14})$$

II.5 Stratégie de gestion de l'énergie (EMS)

II.5.1 Principe général de gestion de l'énergie

Le principe général de la gestion de l'énergie (EMS) dans un HESS cela dépend de la coordination intelligente des flux de puissance pour assurer l'équilibre entre production, stockage et consommation. Le but principale de l'EMS est de garantir un fonctionnement optimal du système en tenant compte les variations de la production photovoltaïque et les fluctuations de la charge [29].

1. Equilibre énergétique de système :

Le bon fonctionnement de système est basé sur l'équation fondamentale de l'équilibre énergétique suivante :

$$P_{load}(t) = P_{pv}(t) + P_{bat}(t) + P_{sc}(t) \quad (\text{II.15})$$

Cette formule explique la relation d'équilibre direct entre la puissance demandée par la charge (P_{load}) et la puissance produite par le PV (P_{pv}) et aussi les puissances fournies par les éléments de stockage (P_{bat} , P_{sc}).

2. Fonctionnement globale de l'EMS :

Le principe de gestion de l'énergie dépend de la relation entre la production de panneau photovoltaïque et la demande de la charge. Il existe trois (03) cas principaux permettant de déterminer quel élément de système va fournir de l'énergie en fonction de l'équilibre entre la production et la consommation.

(a) 1^{er} cas : Production suffisante

$$P_{pv} \geq P_{load}$$

Dans ce cas, le PV alimente directement la charge (P_{pv} est suffisante) et l'excédent d'énergie est utilisé pour charger la batterie. Le supercondensateur reste en repos ou stabilise le bus DC.

(b) 2^{ème} cas : Production insuffisante

$$P_{pv} \leq P_{load}$$

Dans ce cas, le déficit d'énergie (P_{pv} est insuffisante) est compensé par la batterie comme une énergie principale, et le supercondensateur pour les variations rapides.

(c) 3^{ème} cas : Variations rapides de la charge

Dans ce cas, la puissance demandée explique les changements brusques (courte durée) comme les pics de démarrage et les fluctuations instantanées. Le supercondensateur réagit quasi instantanément pour compenser ces variations (fournir ou absorber la puissance) ce qui permet de maintenir la stabilité de la tension de bus DC, tandis que la batterie assure uniquement la partie lente. Cette répartition permet de d'améliorer la réponse dynamique de système et de protéger la batterie contre les contraintes liées aux variations rapides.

II.5.2 Séparation des fréquences

La séparation des fréquences est une approche de gestion de l'énergie utilisée dans les systèmes de stockage hybride. Elle consiste à décomposer la puissance demandée en plusieurs composantes fréquentielles [17].

II.5.2-a Principe de la séparation fréquentielle

Le principe consiste à déviser la puissance demandée par la charge (P_{load}) en deux parties :

1. Une composante lente (basse fréquence) → La batterie
2. Une composante rapide (haute fréquence) → Le supercondensateur

$$P_{load} = P_{bat} + P_{sc} \quad (II.16)$$

Où :

P_{bat} : Puissance fournie par la batterie (basse fréquence)

P_{sc} : Puissance fournie par le supercondensateur (haute fréquence)

Cette décomposition est réalisée généralement à l'aide de filtre :

1. Filtre Passe-bas (LPF – LowPassFilter) : Extrait les variations lentes
2. Filtre Passe-haut (HPF – HighPassFilter) : Extrait les variations rapides

II.5.2-b Applications de filtrage

Pour obtenir la puissance de la batterie (P_{bat}), il faut appliquer un filtre passe-bas (LPF) sur le signal de puissance (P_{load}), et on obtient la formule suivante [30] :

$$P_{bat} = LPF(P_{load})$$

Ensuite, la puissance de supercondensateur est obtenue par [30] :

$$P_{sc} = P_{load} - P_{bat} \quad (II.17)$$

Et donc :

$$P_{sc} = P_{load} - LPF(P_{load}) \quad (II.18)$$

Cette méthode est simple et efficace pour la séparation des fréquences car elle utilise des filtres faciles à implémenter, et elle permet une répartition optimale d'énergie entre les deux éléments de stockage.

II.5.3 Objectifs de la stratégie

La stratégie de gestion de l'énergie (EMS) dans le system de stockage hybride (HESS) assure une répartition optimale de la puissance entre la batterie et le supercondensateur. Les objectifs principaux de cette stratégie sont :

II.5.3-a Réduction des pics

La stratégie de (EMS) limite les pics de puissance demandée par la charge grâce au supercondensateur qui est utilisé pour fournir ou absorber ces pics, cela permet de lisser la puissance fournie par la batterie et d'éviter les fluctuations brusques. Ainsi la réduction des pics améliore la stabilité de système.

II.5.3-b Protection de la batterie

La stratégie (EMS) vise à protéger la batterie, car ce dernier est un élément sensible aux variations rapides de courant et aux cycles charge/décharge intenses.

Cette approche permet d'améliorer la durée de vie et de limiter les vieillissements de la batterie (Protège les performances de la batterie).

II.5.3-c Stabilisation de réseau

La stratégie (EMS) vise à assurer la stabilité de bus DC et du réseau alimenté par le système hybride. Grâce à la contribution stable de la batterie et l'intervention rapide du supercondensateur, la stratégie de gestion d'énergie (EMS) permet de maintenir une tension stable et de garantir une alimentation continue et fiable contre les fluctuations de puissance qui peuvent perturber le fonctionnement globale.

II.6 Dimensionnement du HESS

II.6.1 Critères de dimensionnement

Le dimensionnement du système de stockage hybride inclut plusieurs critères essentiels permettant une d'assurer une gestion optimale, une bonne durée de vie des composantes et la stabilité de système [31, 17].

1. **Puissance** : La puissance est un critère fondamental pour dimensionner le système HESS, elle représente la capacité de système à fournir ou absorber l'énergie.
2. **Energie** : L'énergie stockée correspond à la quantité totale de l'électricité qu'un système peut accumuler et restituer.
3. **Temps de réponse** : Le temps de réponse c'est la durée nécessaire pour que le système réagisse à ses variations. Il est un critère important pour assurer la stabilité de système.

La figure II.7 montre comment les deux éléments de stockage (Batterie / Supercondensateur) fonctionnent avec les critères de dimensionnement.

Critères\Eléments	Batterie	Supercondensateur
Puissance	Durée longues et réponse lente	Pics de puissance élevées et courtes durées
Energie	Elle est dimensionnée en fonction des besoins énergétique	Faible densité énergétique pour compenser les fluctuations rapides
Temps de réponse	Temps de réponse plus lent	Temps de réponse plus rapide (ms)

FIGURE II.7 – Comparaison graphique du comportement lors de transitoire entre le supercondensateur et la batterie

II.6.2 Réponse aux variations de charge

Les changements de puissance demandée par la charge peuvent être rapides ou progressifs. Lors d'une augmentation brusque de la charge, le supercondensateur fournit directement (rapidement) la puissance grâce à son temps de réponse (très rapide), et il absorbe l'excès de l'énergie dans le cas de la diminution de la charge pour éviter les surtensions. La batterie intervient progressivement pour assurer l'alimentation dans la longue durée.

II.6.3 Réponse aux fluctuations PV

La production des panneaux photovoltaïques est variable et dépend généralement aux conditions climatiques. Ces conditions entraînent des fluctuations rapides de la puissance de plusieurs façons.

Dans le cas de l'absence de l'énergie solaire (nuit), la production de l'énergie par le PV devient nulle. La batterie assure l'alimentation principale dans la longue durée, et le supercondensateur intervient pour compenser les variations rapides.

Pour le cas d'une soudaine chute de la production (passage des nuages), le supercondensateur compense rapidement le déficit de puissance, ensuite la batterie fournit l'énergie nécessaire pour maintenir l'équilibre de système. Lors d'une augmentation de la production, le supercondensateur absorbe l'énergie et puis stockée progressivement dans la batterie.

II.6.4 Impact sur la durée de vie de la batterie

Le supercondensateur a un rôle très important dans la protection de la batterie dans le système de stockage hybride, il prend en charge les variations rapides de la puissance ce qui réduit le cycle de charge/décharge et les pics de courant imposé à la batterie. Ce qui réduit fortement son vieillissement électrochimique et augmente sa durée de vie.

II.7 Conclusion

En conclusion, l'étude et la modélisation des composants du système de stockage hybride (HESS) présentées dans ce chapitre ont constitué une étape cruciale pour garantir la stabilité des réseaux électriques alimentés par des énergies renouvelables. La modélisation électrique précise de la batterie et du supercondensateur nous a permis de comprendre le comportement dynamique de chaque composant et de déterminer les constantes mathématiques nécessaires à un suivi très précis de l'état de charge (SOC).

En développant une stratégie de gestion de l'énergie (SGE) basée sur le filtrage fréquentiel, nous avons pu établir un mécanisme intelligent de distribution d'énergie. La batterie absorbe les fluctuations lentes et de basse fréquence afin de préserver son potentiel énergétique, tandis que le supercondensateur intervient immédiatement pour absorber ou dissiper les pics de puissance brusques et de haute fréquence. Cette intégration réduit non seulement les contraintes dynamiques sur la batterie et prolonge sa durée de vie, mais garantit également une réponse dynamique rapide aux variations soudaines de la production ou de la consommation photovoltaïques. Ceci ouvre la voie à la simulation de ce système et à la vérification de ses performances en conditions réelles d'utilisation, qui seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Simulation et résultats

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	45
III.2 MODÈLE DE LA SIMULATION	45
III.3 ANALYSE DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME	46
III.3.1 Charge fixe / Irradiance variable	46
III.3.2 Charge variable / Irradiance fixe	49
III.4 SIMULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	50
III.4.1 Irradiation variable et charge fixe	50
III.4.2 Irradiation fixe et charge variable	60
III.5 CONCLUSION	68

III.1 Introduction

Après avoir examiné les aspects théoriques d'un système de stockage hybride (batterie /supercondensateur), ce chapitre applique ces concepts en construisant un modèle de simulation sous MATLAB/Simulink. Cette simulation vise à évaluer les performances du système proposé et à analyser son comportement dans diverses conditions de fonctionnement, en se concentrant sur les flux d'énergie entre le générateur photovoltaïque, les unités de stockage et la charge.

Ce chapitre présentera le modèle adopté et ses différents composants, puis les résultats de la simulation, qui seront ensuite présentés et discutés. L'analyse portera sur l'évolution des tensions, des courants et des échanges de puissance entre les éléments du système. L'efficacité du système de gestion de l'énergie (SGE) pour garantir la stabilité du bus DC et assurer l'équilibre entre production et consommation sera également étudiée.

Enfin, les résultats obtenus permettent de valider le modèle proposé et mettent en évidence la contribution du système hybride à l'amélioration des performances dynamiques et à l'augmentation de la fiabilité du système photovoltaïque.

III.2 Modèle de la simulation

Le modèle de simulation présenté sur la figure III.1 illustre un supercondensateur et une batterie, alimentés par un module photovoltaïque, qui entraîne une charge à courant continu. Le système proposé comprend plusieurs composants clés, notamment un module photovoltaïque produisant une tension de sortie élevée par un convertisseur élévateur DC-DC. De plus, le système intègre une batterie et un supercondensateur connectés en parallèle pour le stockage de l'énergie. La tension de sortie du convertisseur élévateur est acheminée vers ce système de stockage avant d'être fournie à la charge.

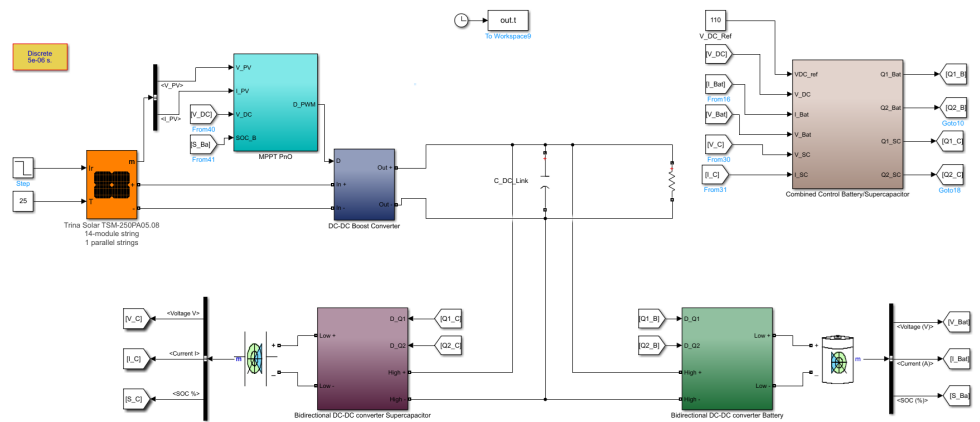


FIGURE III.1 – Modèle principal de la simulation

III.3 Analyse du comportement du système

Afin d'analyser le comportement dynamique du système et d'évaluer son efficacité énergétique, deux cas de simulation ont été sélectionnés. Cette analyse vise à mettre en évidence l'impact des variations de l'irradiation solaire et de la charge sur le fonctionnement global du système. Les résultats obtenus permettront de vérifier la robustesse et l'efficacité de la stratégie de gestion de l'énergie adoptée.

III.3.1 Charge fixe / Irradiance variable

On considère une irradiation variable et une charge fixe (maison) avec les appareils suivants :

Appareil	Puissance (W)	Nombre	Temps d'utilisation (h/j)
Lampes LED	6	12	4
Télévision	72	3	2
Ventilateur	30	3	5
Chargeur	10	1	5
PC	100	1	2
Veilleuse	6	3	7
Réfrigérateur	250	1	7

FIGURE III.2 – Appareils utilisés

1. Calcul de la puissance totale :

$$P_{ch} = (6 \times 12) + (72 \times 3) + (30 \times 3) + 10 + 100 + (6 \times 3) + 250$$

$$P_{ch} = 756W$$

Calcul de l'énergie journalière :

$$E_{load} = \sum (P_i \times t_i)$$

$$E_{load} = (72 \times 4) + (216 \times 2) + (90 \times 5) + (10 \times 5) + (100 \times 2) + (18 \times 7) + (250 \times 7)$$

$$E_{load} = 3296Wh/jour$$

III.3.1-a Dimensionnement du PV

Le dimensionnement du générateur photovoltaïque (PV) constitue une étape importante dans la conception du système de stockage énergétique hybride. Il permet de déterminer la puissance nécessaire de soleil pour satisfaire le besoin énergétique de la charge [31].

On a :

$$E_{load} = 3296Wh/jour$$

1. Calcul de l'énergie E_{pv} :

Le rendement global dans les systèmes photovoltaïques est :

$$\eta = 0.8$$

Car dans notre système l'énergie passe par plusieurs éléments (convertisseurs, batterie, onduleur, câbles...).

$$E_{pv} = \frac{E_{load}}{\eta} = \frac{3296}{0.8} = 4120Wh/jour$$

2. Calcul de la puissance P_{pv} :

On suppose une durée moyenne d'ensoleillement de 5 heures par jour (ensoleillement en Algérie), donc la puissance de PV nécessaire est donnée par :

$$P_{pv} = \frac{E_{pv}}{H} = \frac{4120}{5} = 824W/jour$$

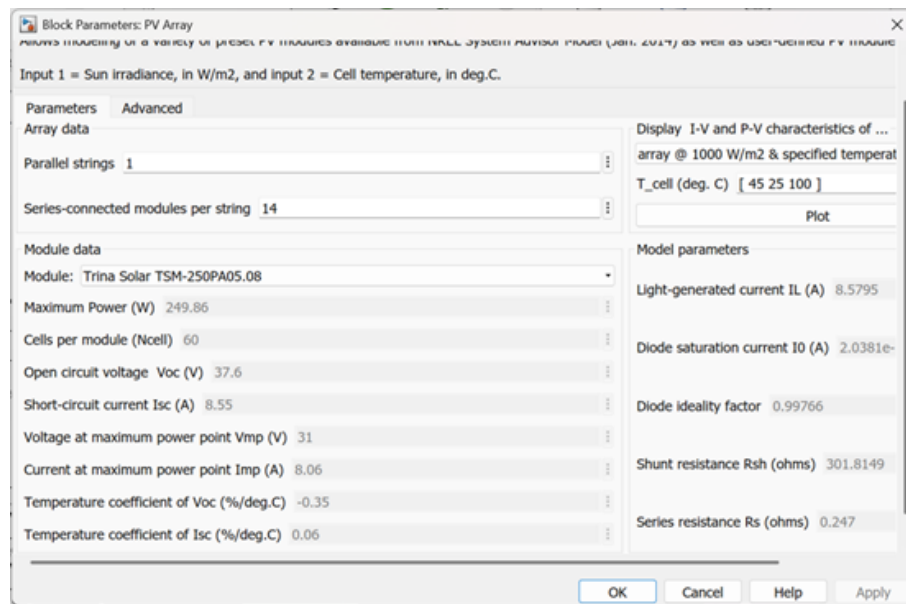


FIGURE III.3 – Paramètres de PV array

III.3.1-b Dimensionnement de la charge

$$P_{ch} = \frac{V_{ch}^2}{R}$$

Alors :

$$R = \frac{V_{ch}^2}{P_{ch}} = \frac{110^2}{756}$$

$$R = 16\Omega$$

III.3.1-c Choix de la batterie

Il existe plusieurs types des batteries, le choix le plus adapté dans le système de stockage hybride (HESS) (batterie + supercondensateur) avec une source d'énergie renouvelable (PV) est : La batterie lithium-ion (LiFePO4) grâce a ses performances élevées et de ça compatibilité avec les applications de stockage d'énergie renouvelable.

Ce type de batterie présente plisseur avantages :

1. Longue durée de vie : (jusqu'à 3000-6000 cycles)
2. Grande profondeur de décharge (DoD) :(80 % - 90 %)
3. Haute efficacité : ($\eta \approx 95\%$)
4. Bonne sécurité : (faible risque de surchauffe)
5. Réponse rapide

Nous avons choisit :

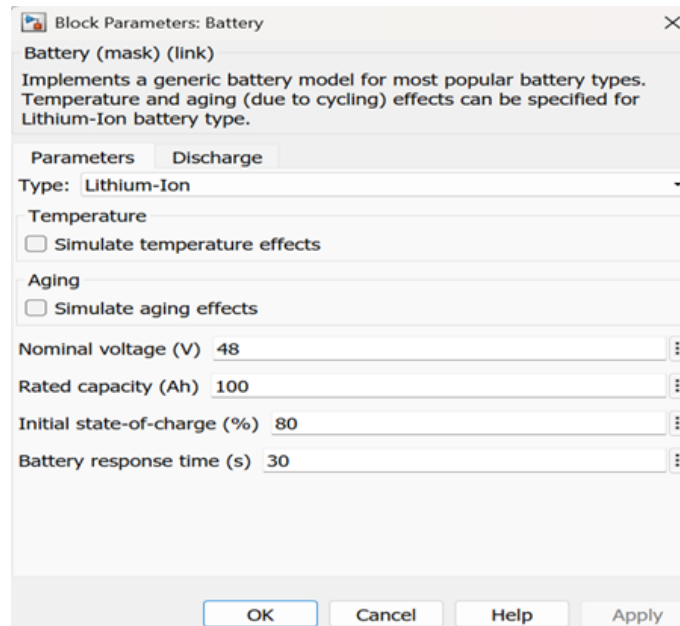


FIGURE III.4 – Block paramètres de la batterie

III.3.1-d Choix du supercondensateur

Dans les systèmes de stockage hybride (HESS), le supercondensateur est un élément essentiel pour le bon fonctionnement de système et dans la gestion des variations rapides de puissance et les transitoires.

Le type de supercondensateur choisi dans ce système est : Le supercondensateur électrochimique à double couche (EDLC). Ce type a le pouvoir de stocker l'énergie sous forme électrostatique, cette caractéristique donne une capacité de charge/décharge très rapide qui aide le supercondensateur pour faire son rôle dans le système (absorption des pics des puissances et stabilisation de bus DC).

Nous avons choisi :

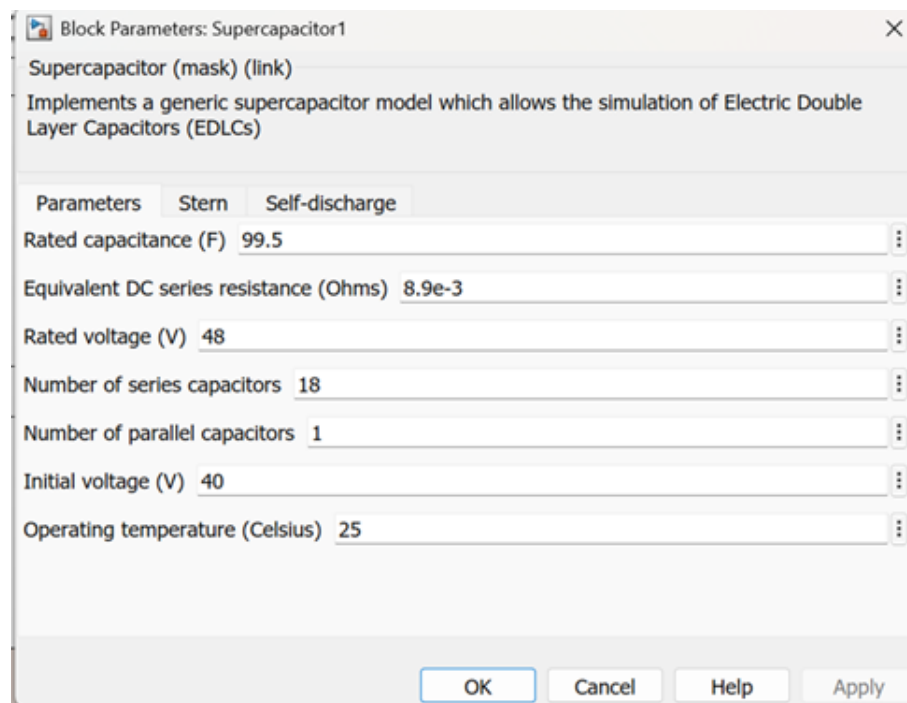


FIGURE III.5 – Block paramètres du supercondensateur

III.3.2 Charge variable / Irradiance fixe

On considère une irradiation fixe ($G=600 \text{ W/m}^2$) et une charge variable.

En utilisant les mêmes :

1. Cellules photovoltaïques que celles utilisées dans le premier cas, l'irradiation ($G = 600 \text{ W/m}^2$) nous donne une puissance constante ($P_{pv} = 500 \text{ W}$).
2. Éléments de stockage (Batterie/Supercondensateur)

III.3.2-a Dimensionnement de la charge

La tension au niveau de bus DC est stable ($V_{dc} = 110V$) qui est la même tension de la charge (V_{ch}).

Nous avons utilisé une charge variable (R) qui varie de ($R_1 = 90\Omega$) à ($R_2 = 16\Omega$).

On a :

$$P_{ch} = \frac{V_{ch}^2}{R}$$

Alors :

$$P_{1ch} = \frac{V_{ch}^2}{R_1} = \frac{110^2}{90} = 134.44W$$

Et :

$$P_{2ch} = \frac{V_{ch}^2}{R_2} = \frac{110^2}{16} = 756.25W$$

III.4 Simulation et interprétation des résultats

III.4.1 Irradiation variable et charge fixe

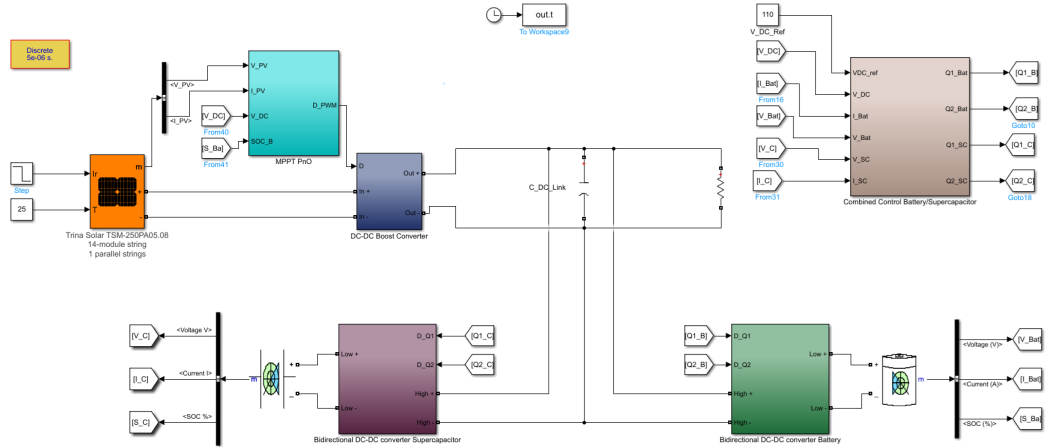


FIGURE III.6 – Modèle de la simulation

Les résultats de la simulation réalisée sous MATLAB simulink ont été obtenus en appliquant un profil de fonctionnement caractérisé par des variations de l'éclairement solaire (l'irradiation) et une température fixe (figure III.7).

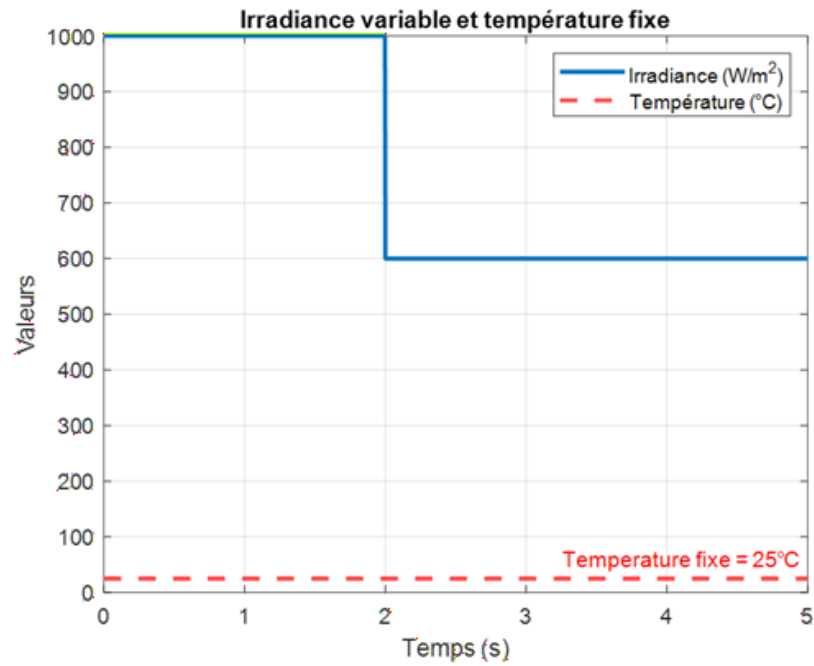


FIGURE III.7 – L'irradiation et la température

Les simulations permettant d'évaluer le comportement du système :

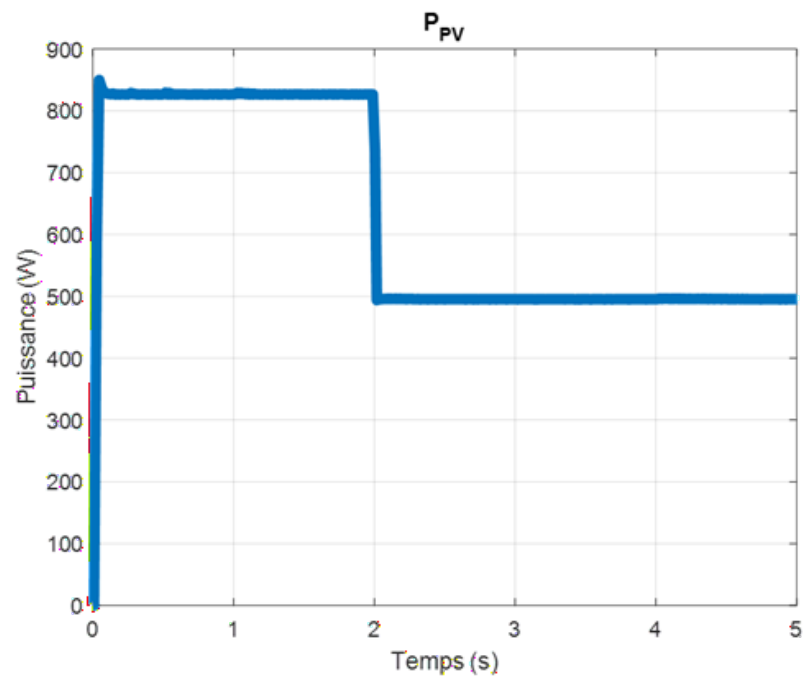


FIGURE III.8 – Courbe de la puissance de PV

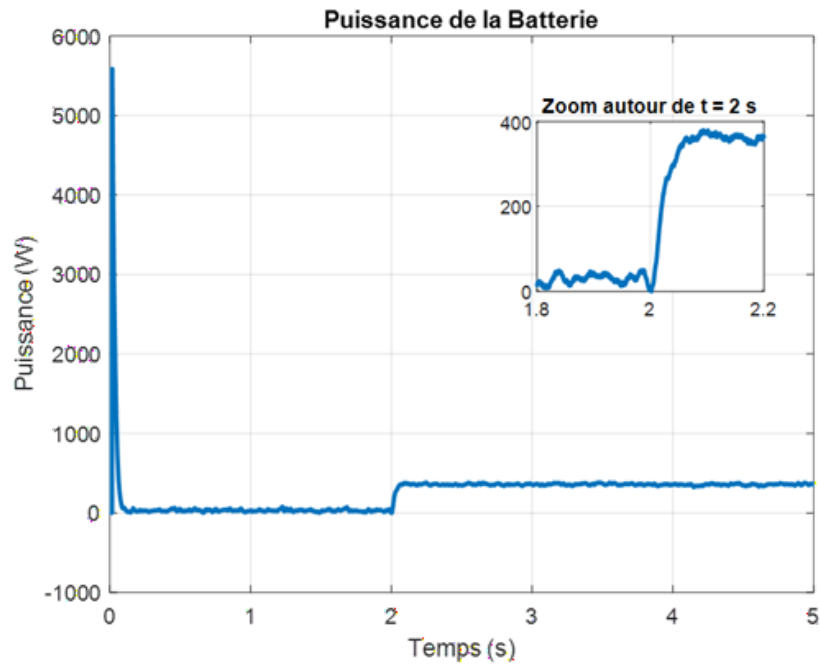


FIGURE III.9 – Courbe de la puissance de la batterie

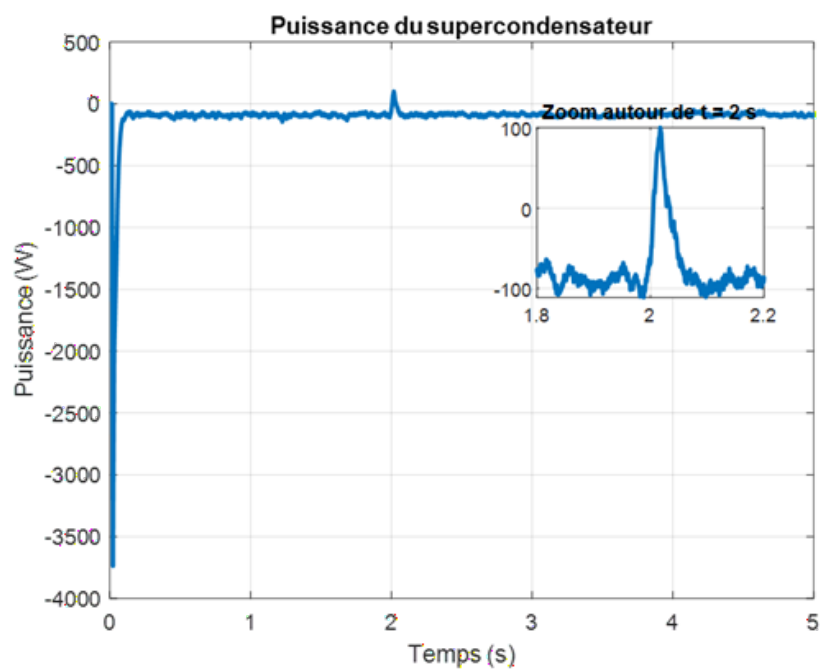


FIGURE III.10 – Courbe de la puissance de supercondensateur

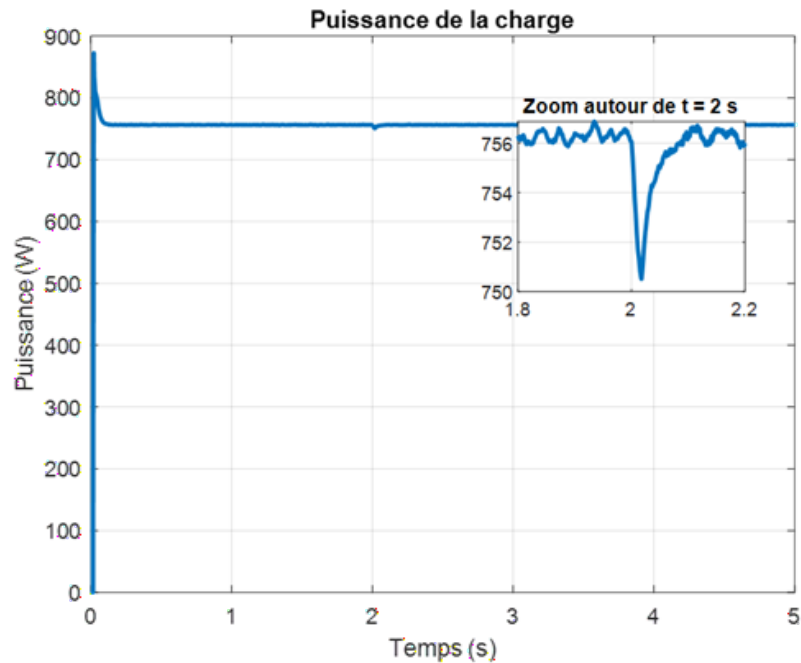


FIGURE III.11 – Courbe de la puissance de la charge

Interprétation

Les courbes des puissances montrent que, lors des périodes de forte irradiance ($t < 2$ s), le générateur photovoltaïque couvre intégralement les besoins de la charge statique, en utilisant l'excédent pour charger la batterie et le supercondensateur.

Lorsqu'une chute brutale d'irradiance survient à $t = 2$ s, le supercondensateur intervient immédiatement en fournissant une impulsion de puissance positive rapide afin de compenser le déficit momentané et de protéger la batterie des contraintes dynamiques.

Une fois la transition stabilisée, la batterie prend le relais en douceur pour fournir la puissance continue nécessaire et assurer la stabilité de la charge à sa valeur cible pendant toute la durée de la simulation.

Le signe (-) de la puissance du supercondensateur signifie que ce dernier se charge et le signe (+) qu'il se décharge.

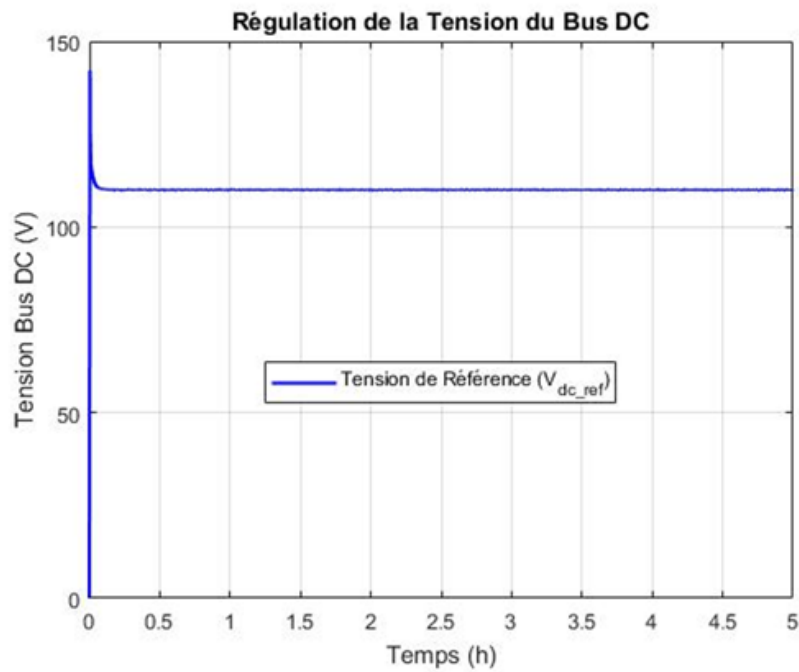
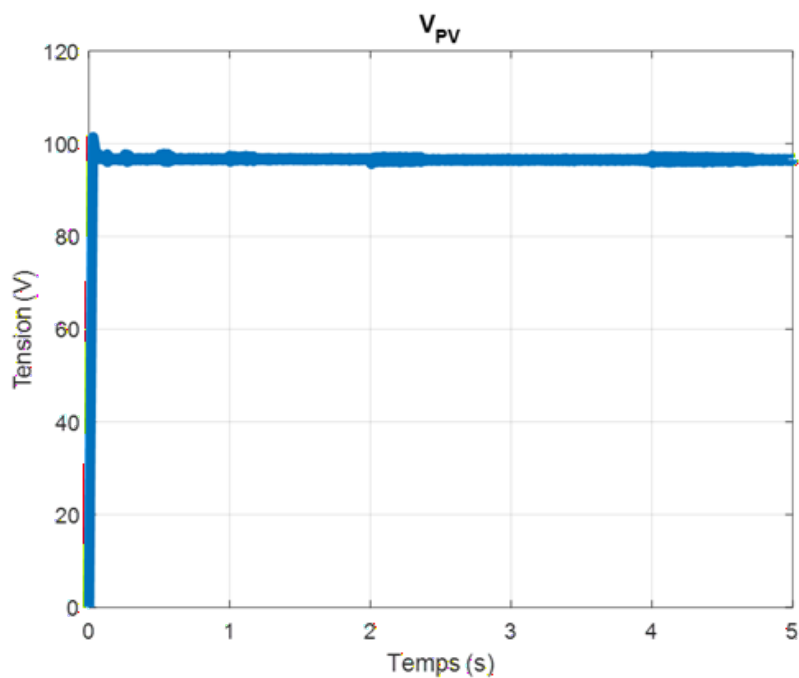
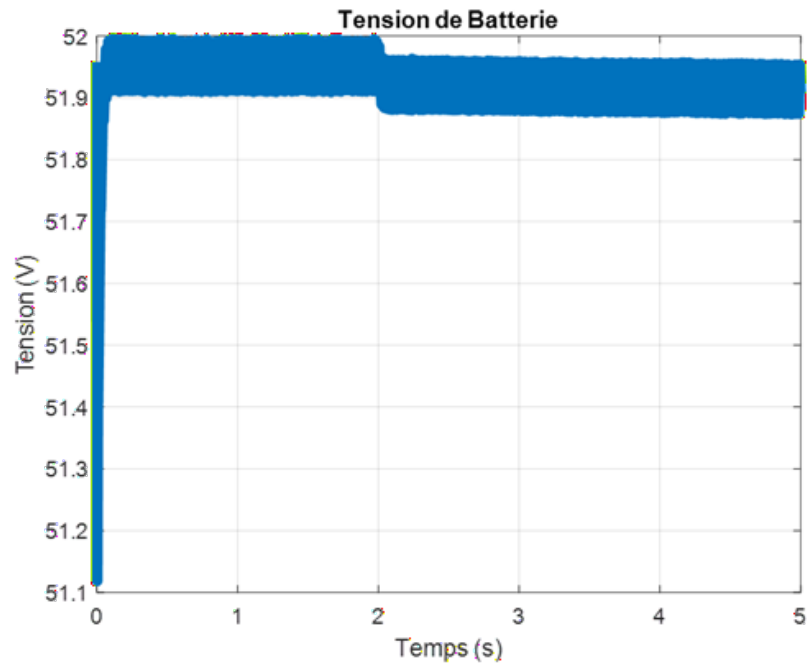
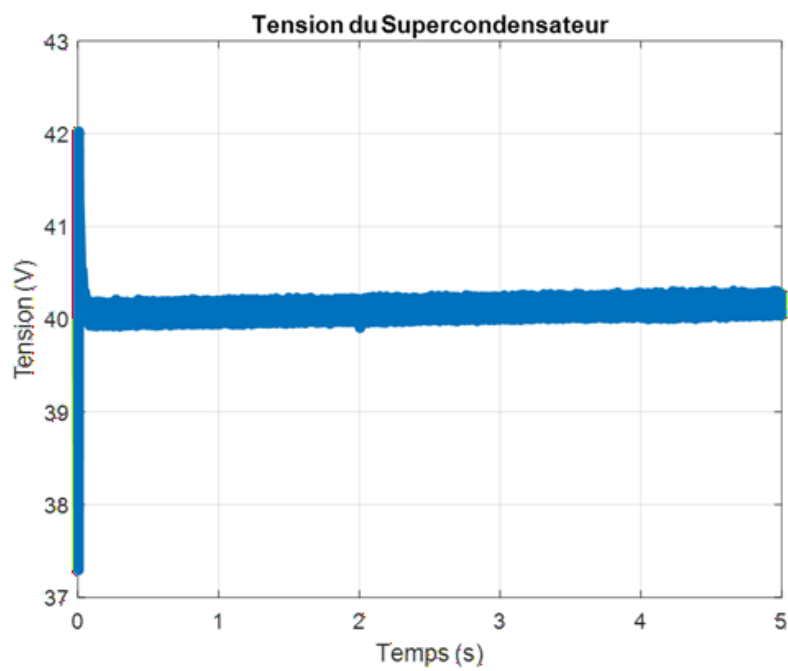


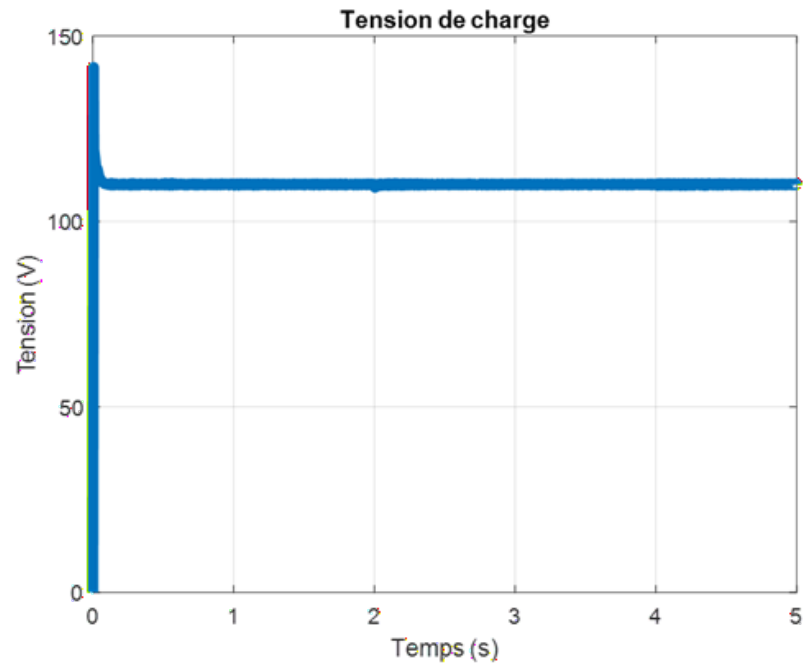
FIGURE III.12 – Tension de Bus DC

Interprétation

La courbe montre une stabilité complète et rapide de la coordination de la tension du bus DC à la valeur de 110 V, sans être affectée par le changement soudain de rayonnement, ce qui confirme l'efficacité et la qualité du système de contrôle proposé.

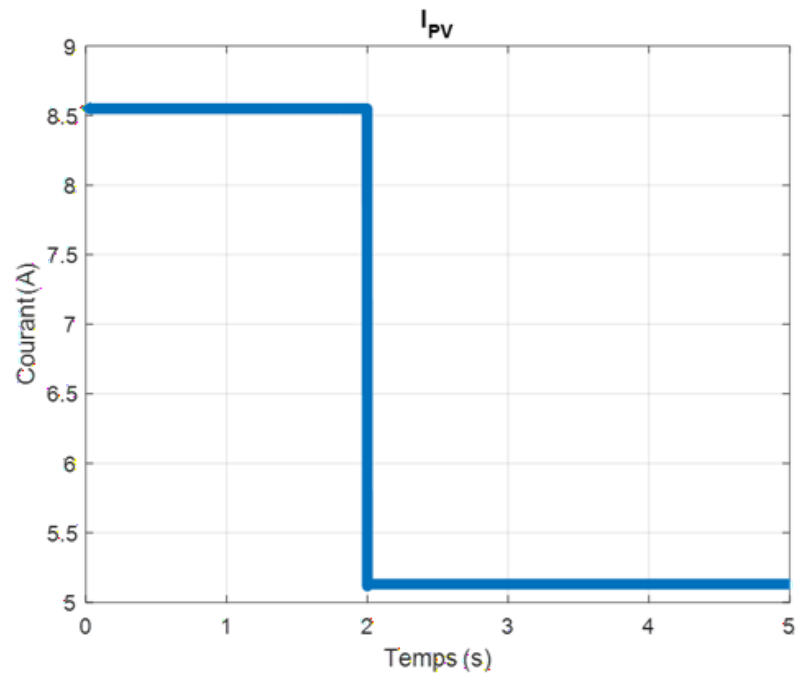
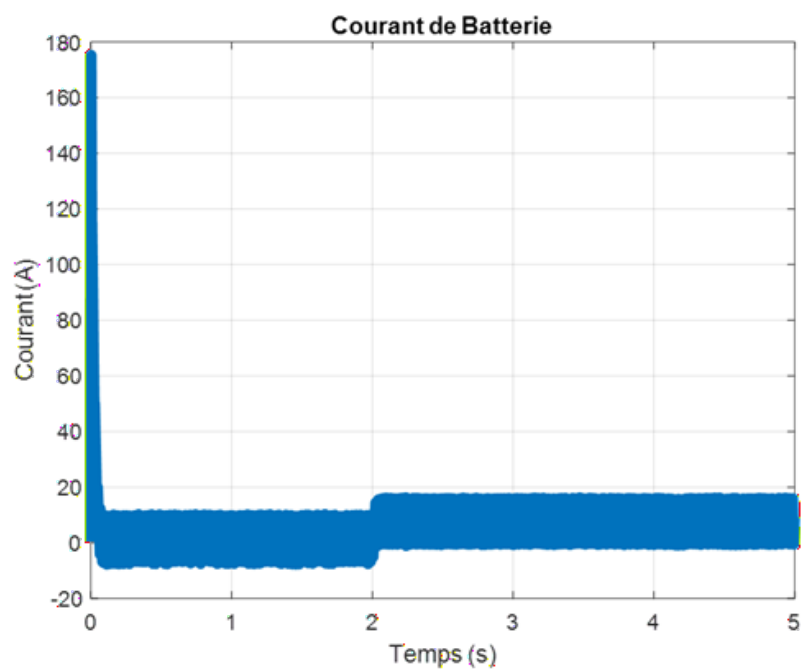
FIGURE III.13 – Tension V_{pv}

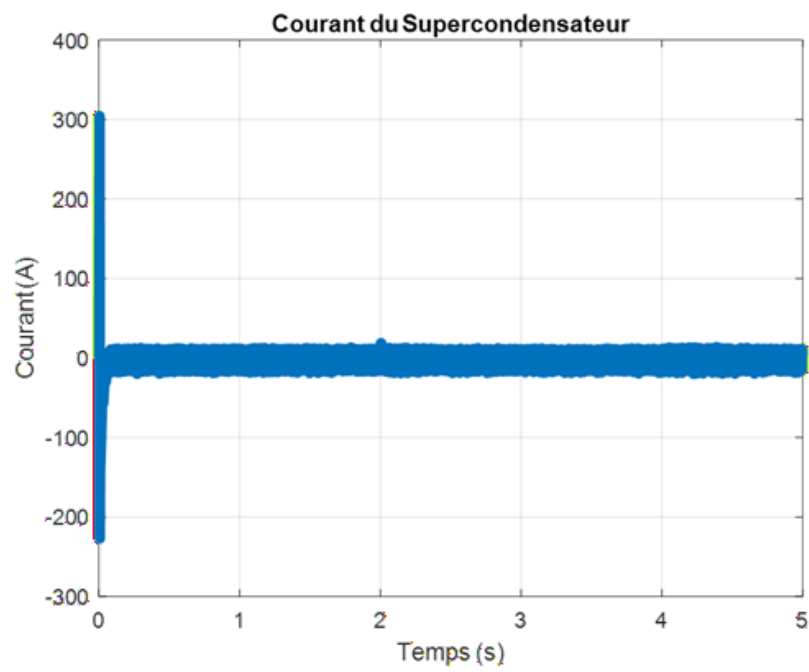
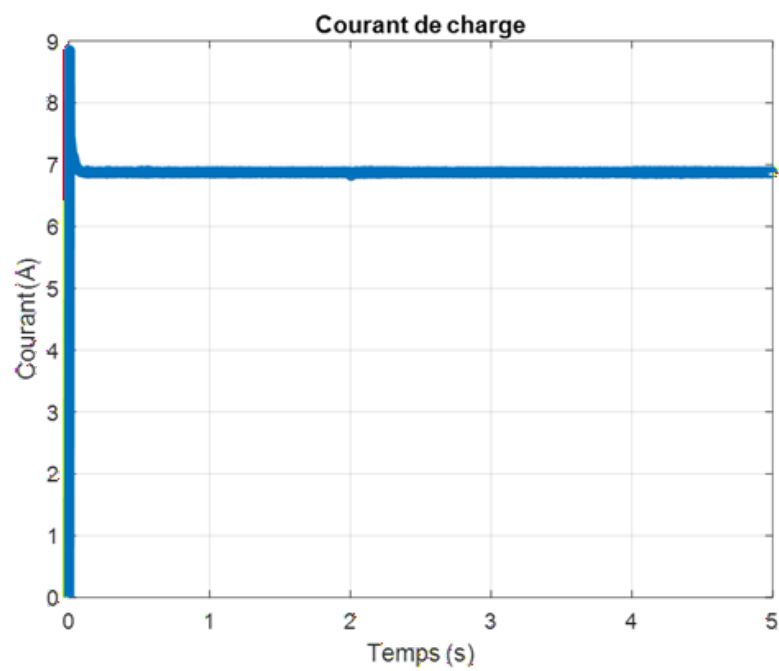
FIGURE III.14 – Tension V_{bat} FIGURE III.15 – Tension V_{sc}

FIGURE III.16 – Tension V_{ch} **Interprétation :**

Les deux courbes (V_{pv} , V_{ch}) illustrent la stabilité de la tension du panneau photovoltaïque grâce à la technologie MPPT, tandis que la tension de la charge reste parfaitement constante à 110 V, confirmant ainsi l'efficacité du système de stockage hybride pour protéger et isoler la charge de toute perturbation climatique.

La tension de la batterie fluctue légèrement entre la charge ($t < 2$ s) et la décharge ($t > 2$ s). Enfin, la tension du supercondensateur reste stable autour de sa valeur nominale, enregistrant une réponse transitoire très précise lors du changement d'éclairement ($t = 2$ s).

FIGURE III.17 – Courant I_{pv} FIGURE III.18 – Courant I_{bat}

FIGURE III.19 – Courant I_{sc} FIGURE III.20 – Courant I_{ch}

Interprétation :

Le courant du panneau photovoltaïque (I_{pv}) chute brutalement de 8,5 A à 5,1 A à l'instant $t = 2$ s en raison d'une diminution de l'éclairement.

Le courant de charge (I_{ch}) reste stable et constant à 6,9 A tout au long de la simulation.

Le courant de la batterie (I_{bat}) passe de la charge -5 A à la décharge +10 A pour compenser le déficit continu.

Le courant du supercondensateur (I_{sc}) intervient par une impulsion positive instantanée à l'instant $t = 2$ s afin d'absorber les variations dynamiques rapides.

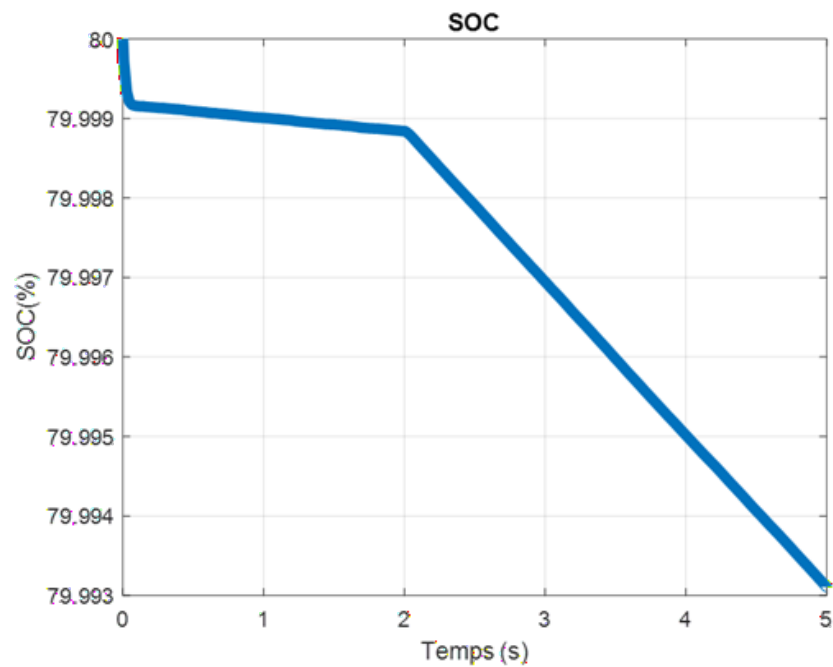


FIGURE III.21 – Etat de charge de la batterie

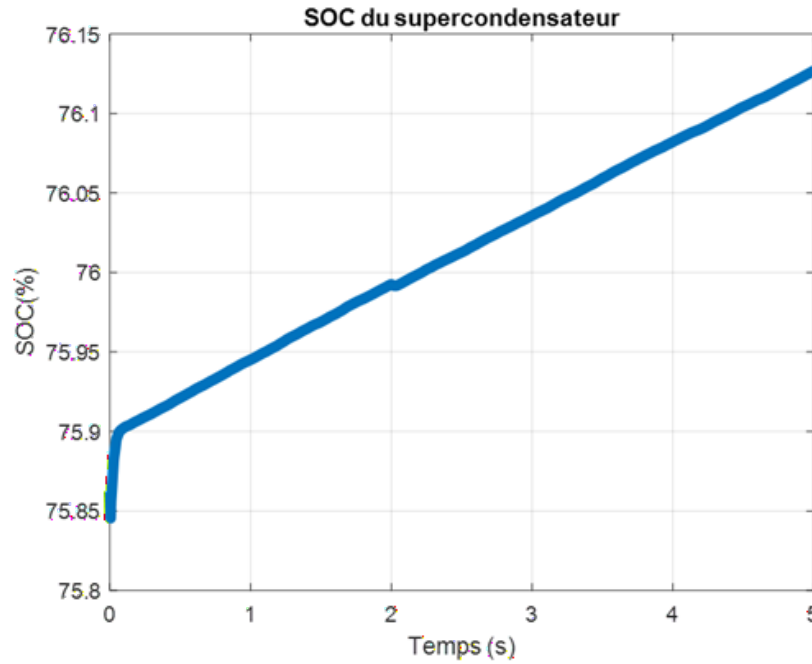


FIGURE III.22 – Etat de charge du supercondensateur

Interprétation :

La courbe illustre le taux de décharge de la batterie, qui augmente (diminution de SOC(%)) après le moment $t = 2$ s pour compenser la perte de puissance du générateur photovoltaïque.

La courbe montre une augmentation linéaire continue de l'état de charge du supercondensateur (SOC) de 75,85 % à 76,13 % en raison de sa charge continue tout au long de la période de simulation, avec une légère rupture de pente au moment $t=2$ s en raison de sa réponse transitoire momentanée au manque de rayonnement.

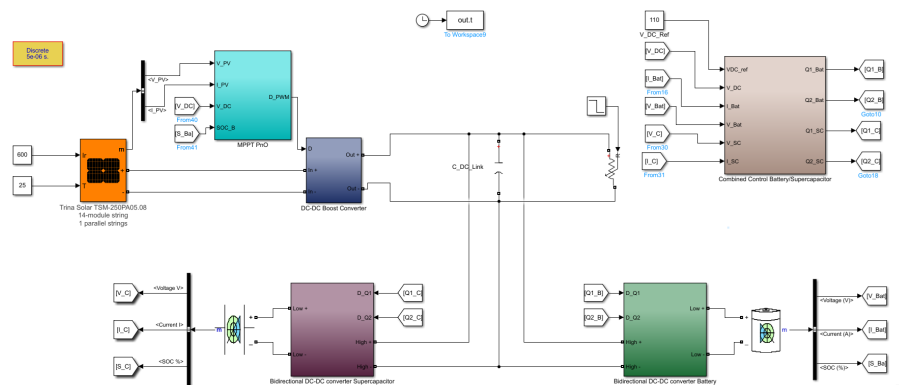
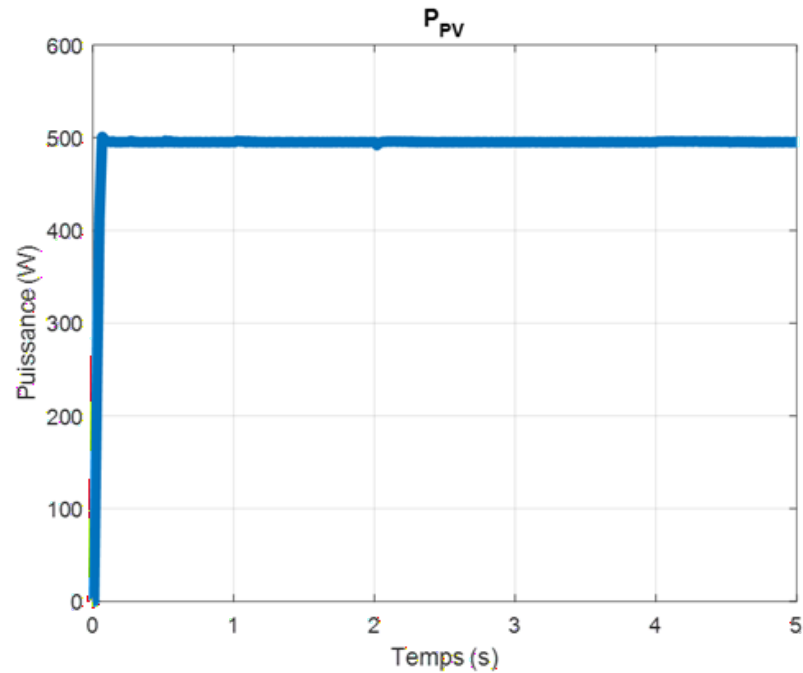
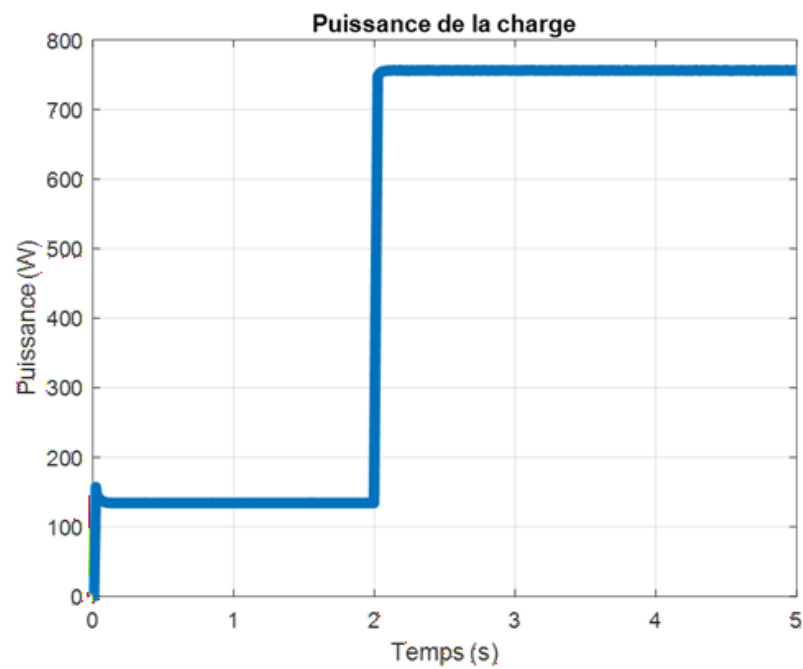
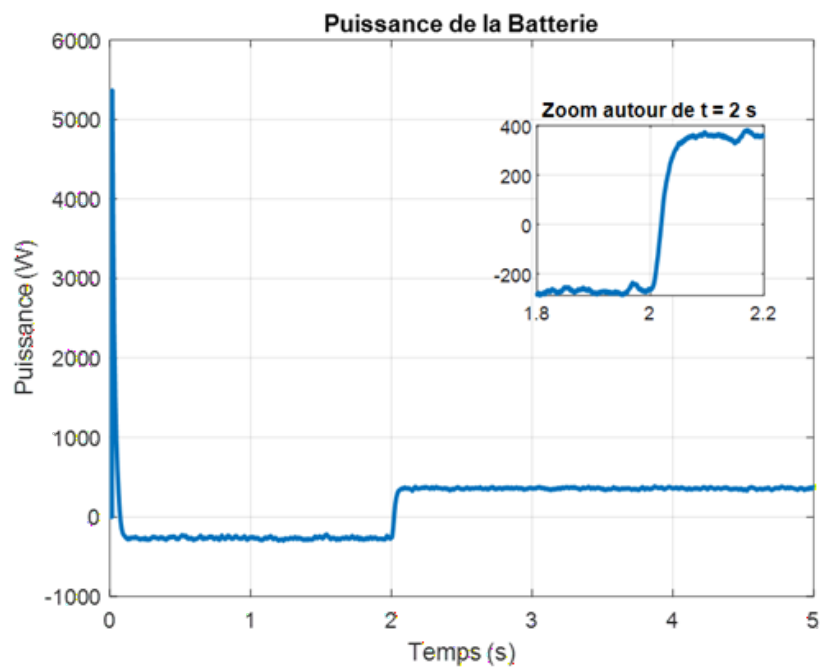
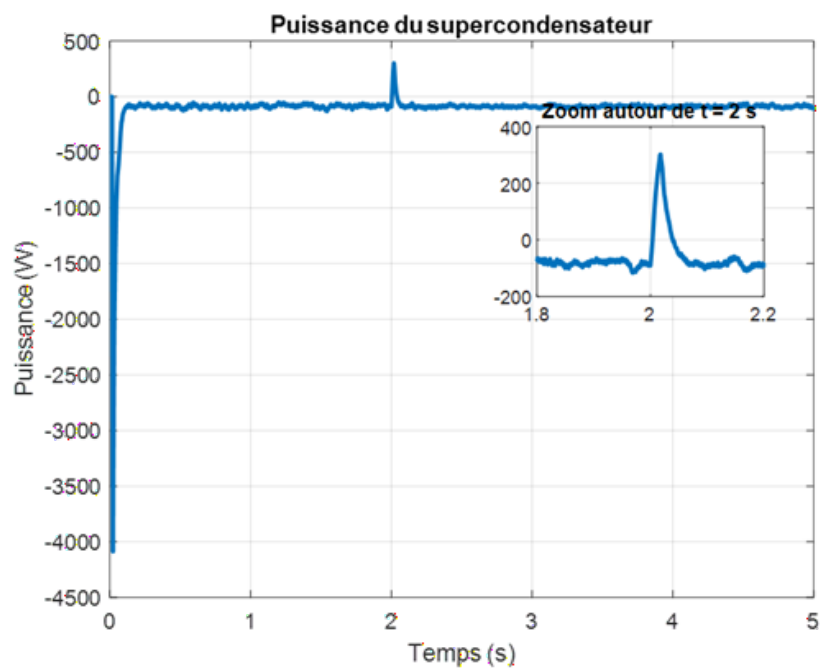
III.4.2 Irradiation fixe et charge variable

FIGURE III.23 – Modèle de la simulation

Les résultats de la simulation réalisée sous MATLAB simulink ont été obtenus en appliquant un profil de fonctionnement caractérisé par des variations de la charge et un éclairement (irradiance) fixe.

FIGURE III.24 – Puissance P_{pv} FIGURE III.25 – Puissance P_{ch}

FIGURE III.26 – Puissance P_{bat} FIGURE III.27 – Puissance P_{sc}

Interprétation :

En raison du rayonnement constant, la puissance du générateur photovoltaïque se stabilise à 500 W.

La charge excédentaire alimente la batterie à hauteur de -270 W durant la période initiale de faible charge 135 W. Lorsque la charge atteint soudainement 750 W à $t = 2$ s, le supercondensateur intervient momentanément avec une impulsion de 360 W afin d'adoucir la transition dynamique, avant que la batterie ne se décharge de manière continue (+250 W) pour compenser le déficit et garantir une stabilité de charge totale.

Le signe (-) de la puissance du supercondensateur et de la batterie signifie que ces derniers se chargent et le signe (+) qu'ils se déchargent.

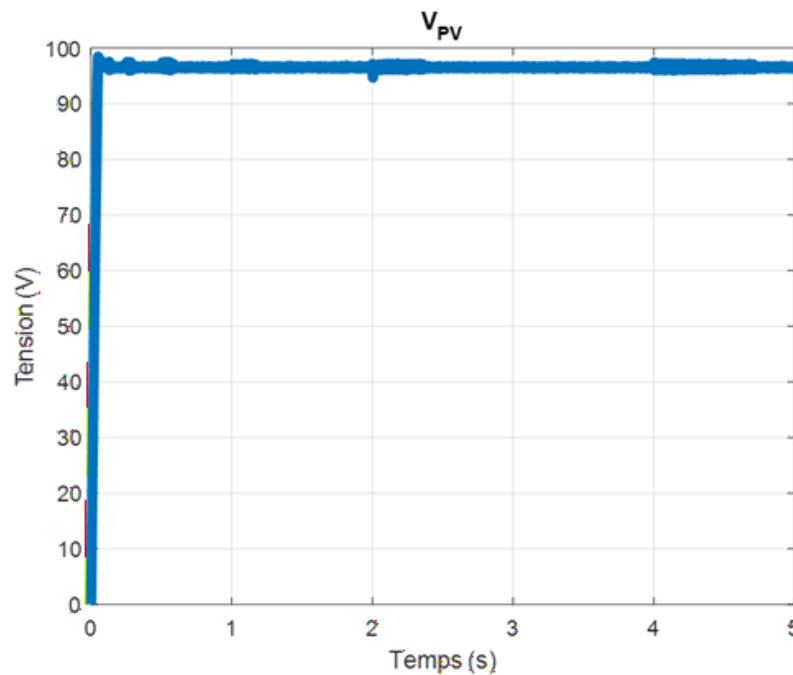


FIGURE III.28 – Tension V_{pv}

Interprétation :

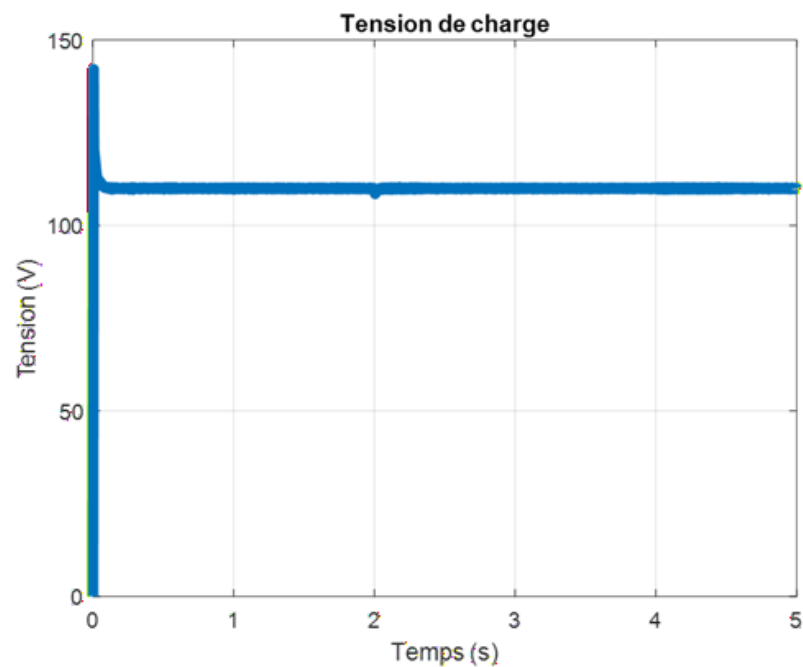
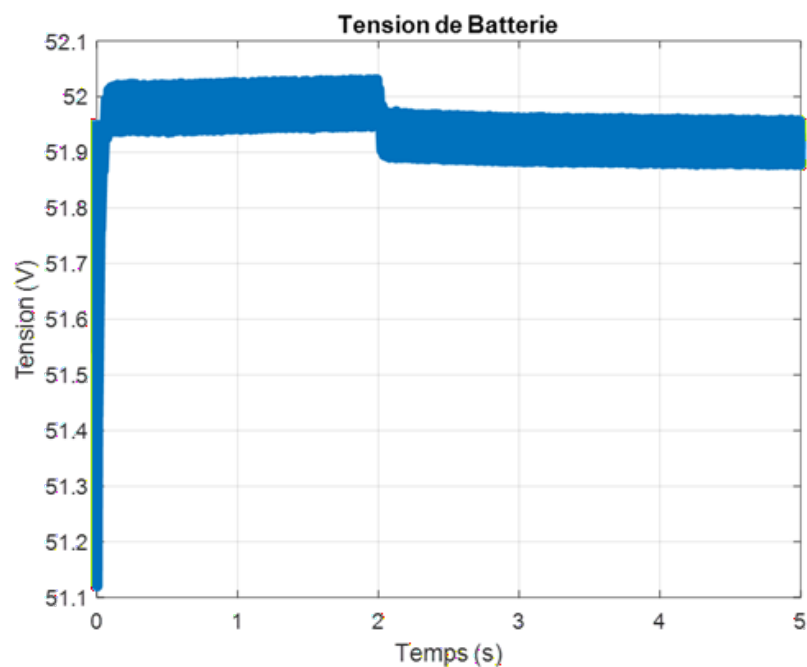
En raison du rayonnement constant, la tension du PV reste stable à 97.46 V, tandis que la tension de la batterie fluctue légèrement, elle augmente pendant la charge ($t < 2$ s) puis diminue lentement lors de la commutation pour couvrir la surcharge ($t > 2$ s).

De même, la tension du supercondensateur reste stable autour de 40 V avec une réponse transitoire très instantanée à $t = 2$ s, garantissant ainsi que la tension de charge reste constante et totalement protégée à la valeur de référence de 110 V pendant toute la durée de la simulation.

Interprétation :

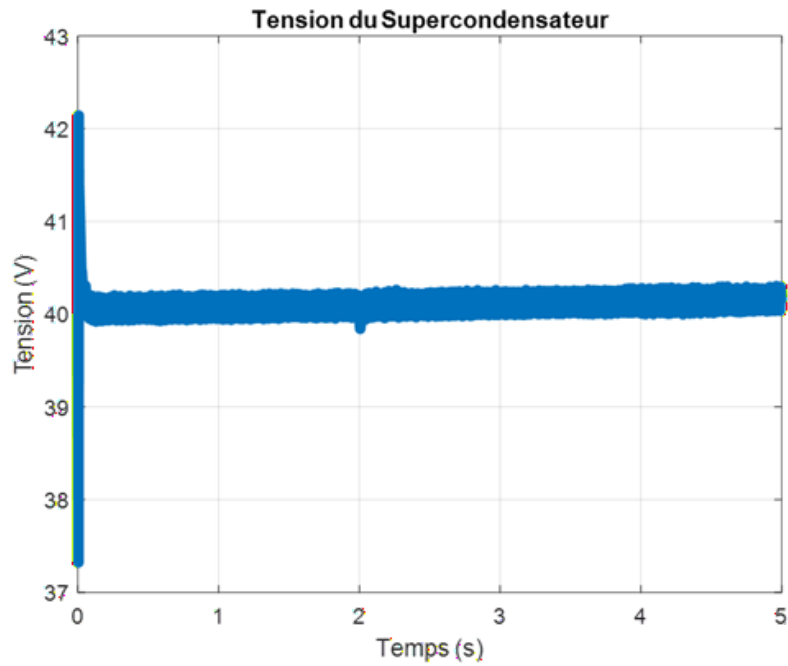
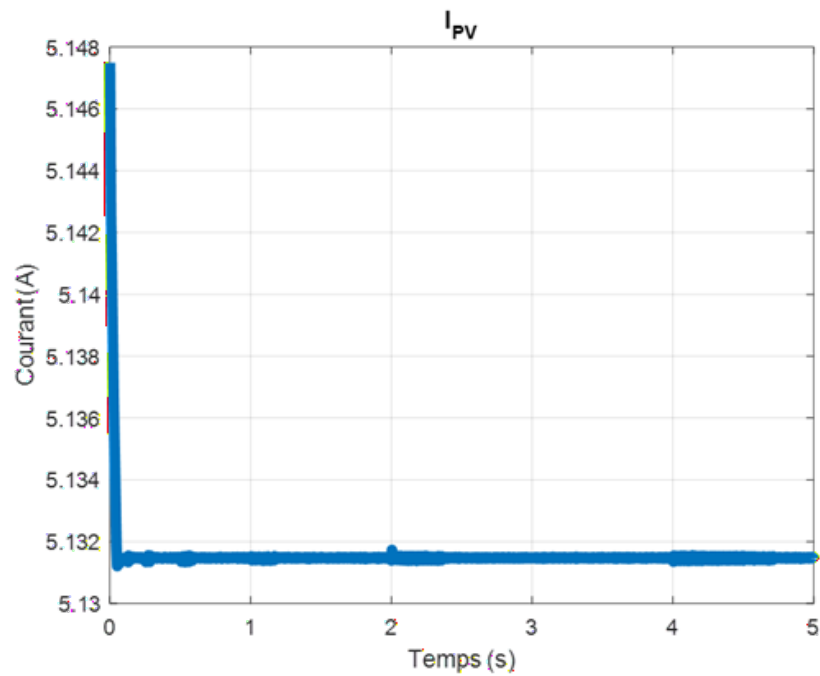
Le courant du générateur photovoltaïque I_{pv} apparaît parfaitement stable à 5,13 A grâce à l'irradiance solaire constante.

Durant la première période ($t < 2$ s), le courant de charge est faible, à 1,2A, ce qui rend le courant de la batterie négatif, avec des valeurs fluctuantes autour de -5 A, témoignant

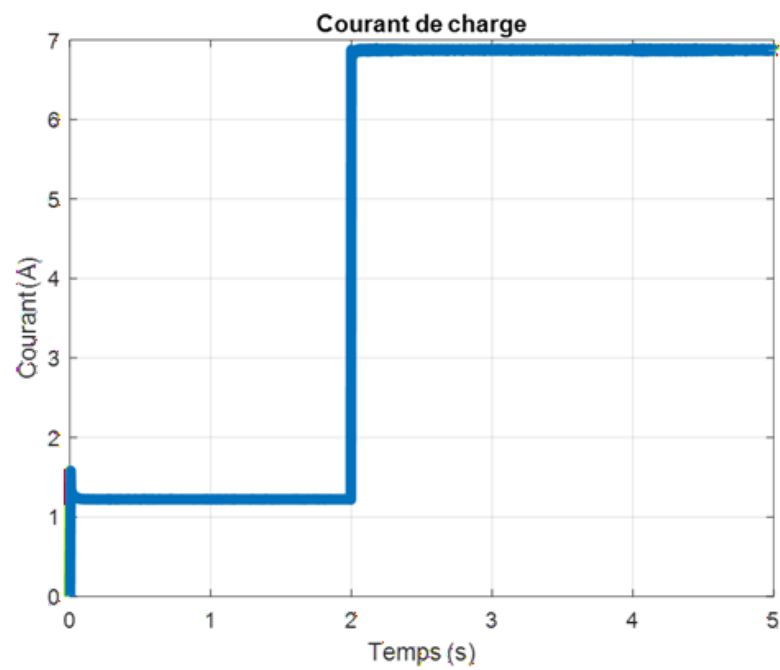
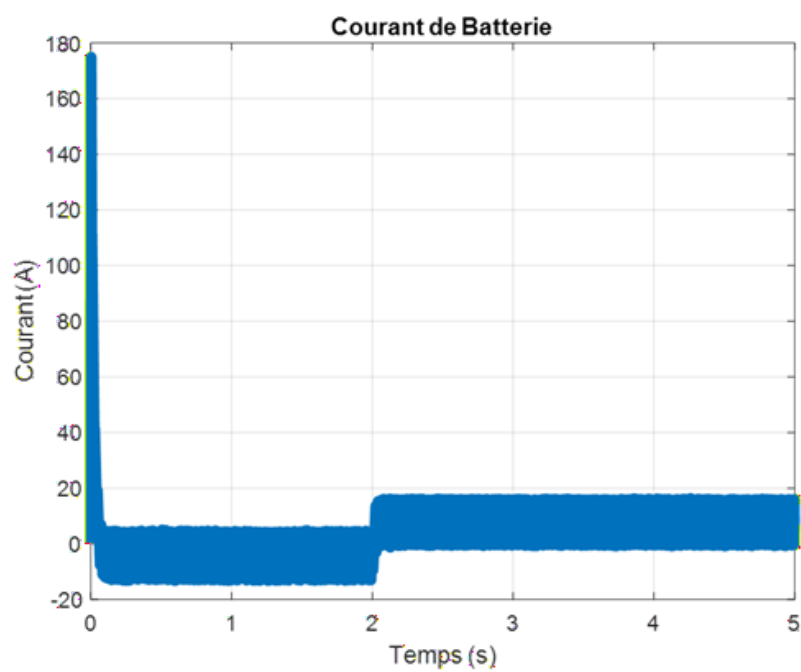
FIGURE III.29 – Tension V_{ch} FIGURE III.30 – Tension V_{bat}

de sa charge par excédent photovoltaïque.

Le courant du supercondensateur reste quant à lui nul en régime permanent. Au moment $t = 2$ s, le courant de charge monte soudainement à 6.9 A, où le supercondensateur intervient momentanément en pompant une impulsion de courant positive rapide pour ab-

FIGURE III.31 – Tension V_{sc} FIGURE III.32 – Courant I_{pv}

sorber ce changement soudain, ensuite la batterie passe en douceur à la phase de décharge avec un courant positif d'environ $+7.5A$, assurant ainsi la stabilité idéale de l'alimentation de la charge à sa nouvelle valeur.

FIGURE III.33 – Courant I_{ch} FIGURE III.34 – Courant I_{bat}

Interprétation :

La courbe illustre l'augmentation de l'état de charge (SOC) de la batterie à 80,002 % avant le moment $t=2$ s en raison de la surcharge, suivie d'une diminution linéaire continue lors de la transition vers la phase de décharge pour couvrir la surtension de surcharge.

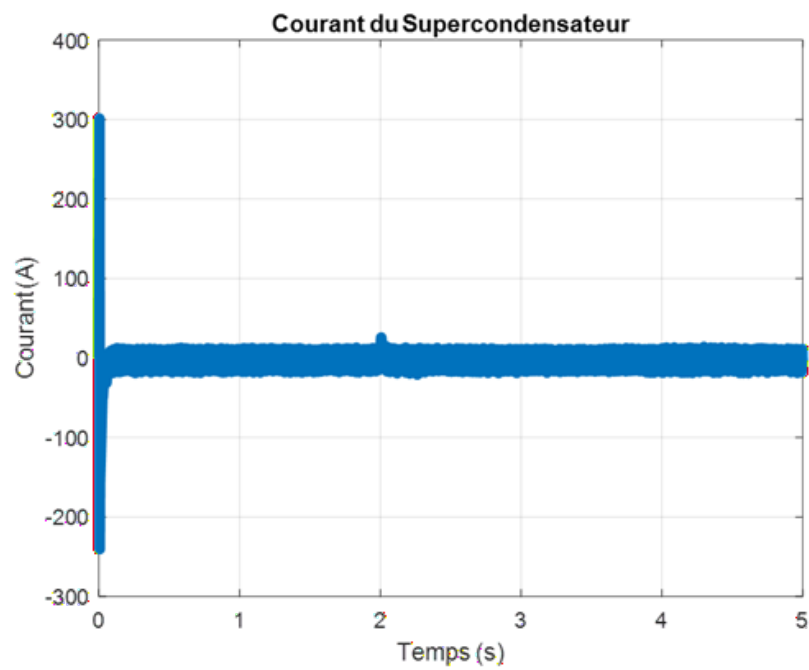
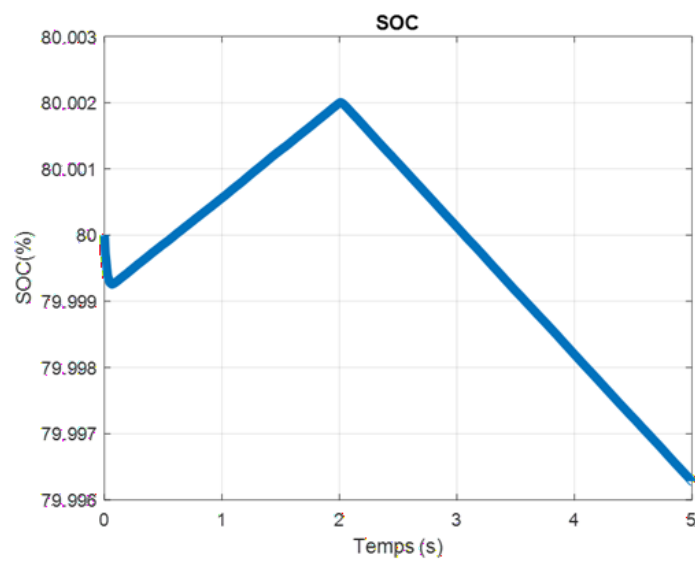
FIGURE III.35 – Courant I_{sc} 

FIGURE III.36 – Etat de charge de la batterie

La courbe montre une augmentation continue de l'état de charge du supercondensateur (SOC), avec une chute momentanée soudaine au temps $t=2$ s représentant sa décharge rapide pour absorber la surtension de charge dynamique avant la recharge.

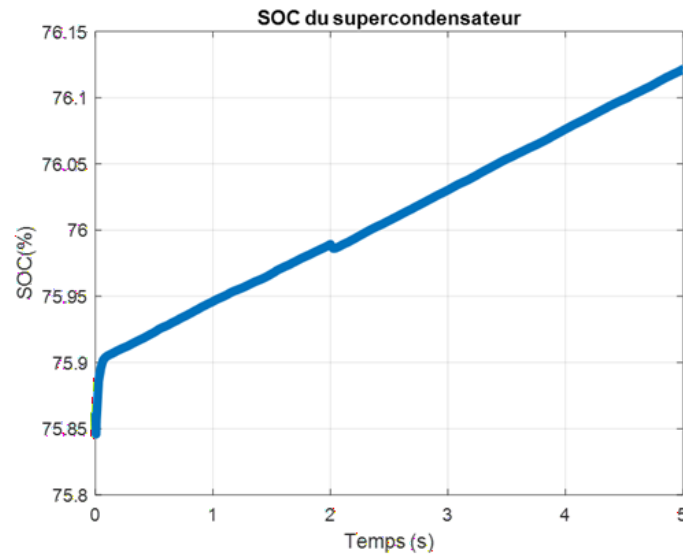


FIGURE III.37 – Etat de charge du supercondensateur

III.5 Conclusion

Les résultats de la simulation obtenus avec Matlab/Simulink ont permis de vérifier l'efficacité de notre système étudié et sa capacité à assurer une alimentation stable à la charge. Les résultats ont montré que le PV fournit la majeure partie de l'énergie produite, tandis que les éléments de stockage compensent le déficit énergétique et absorbent les fluctuations rapides de la puissance.

Les résultats également démonté que la stratégie de contrôle adoptée contribue au maintien de la tension de DC bus à sa valeur malgré les variations des conditions de fonctionnement. Les courbes de puissance de la batterie et le supercondensateur ont confirmé l'efficacité du système de gestion de l'énergie pour une distribution optimale de la puissance entre les différentes sources.

Finalement, les résultats de la simulation confirment le succès de notre modèle proposé pour améliorer la stabilité du système et assurer la continuité de l'alimentation électrique.

Conclusion générale

En conclusion, ce travail a porté sur l'étude, la conception et la simulation d'un système de stockage d'énergie hybride (HESS) composé d'une batterie au lithium et d'un supercondensateur, intégré à un générateur photovoltaïque. Ce système vise à améliorer la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique des charges, notamment compte tenu de la variabilité constante de l'ensoleillement.

On a commencé au début par un rappel des concepts fondamentaux de l'énergie solaire photovoltaïque et des différentes technologies de stockage, en mettant l'accent sur les caractéristiques des batteries et des supercondensateurs et sur les avantages de leur intégration dans un système de stockage hybride. Des modèles mathématiques et électriques des composants du système ont également été présentés, ainsi qu'une stratégie de gestion de l'énergie par séparation de fréquences pour la répartition de la puissance entre la batterie et le supercondensateur.

Les résultats de la simulation ont démontré l'efficacité du système proposé pour assurer la stabilité de la tension du bus CC et améliorer la réponse dynamique du système lors de variations soudaines de la demande ou de la production du générateur photovoltaïque. Ces résultats ont également montré que le supercondensateur contribue à absorber et à conserver l'énergie lors de transitions rapides, tandis que la batterie prend en charge les besoins énergétiques à moyen et long terme, réduisant ainsi sa sollicitation et prolongeant sa durée de vie.

D'après les résultats obtenus, il est possible de confirmer que la combinaison d'une batterie et d'un supercondensateur au sein d'un système de stockage hybride représente une solution efficace pour améliorer les performances et accroître la fiabilité des systèmes photovoltaïques, ce qui soutient la tendance à une dépendance accrue aux énergies renouvelables et à la réalisation d'un développement énergétique durable.

Perspectives :

Dans le cadre de ces travaux en cours, une stratégie de gestion de l'énergie à fréquence séparée peut être perfectionnée grâce à des algorithmes plus avancés afin d'optimiser la répartition de l'énergie entre la batterie et le supercondensateur. L'impact des variations

climatiques et des conditions d'utilisation réelles sur les performances du système hybride peut également être étudié. Une autre proposition importante consiste à intégrer des modèles de vieillissement plus précis pour les batteries et les supercondensateurs afin d'évaluer leur durée de vie opérationnelle et d'optimiser leur utilisation. De plus, un modèle pilote en conditions réelles peut être mis en œuvre pour valider les résultats de la simulation, avec un champ d'application étendu aux réseaux intelligents, aux bornes de recharge pour véhicules électriques et aux systèmes d'énergies renouvelables de grande capacité, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité des systèmes de stockage d'énergie hybrides.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Goran Strbac. Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Goran Strbac. Londres (Royaume-Uni) : The Institution of Engineering and Technology (IET), 2018.
- [2] IEA), Agence Internationale de l'Énergie (AIE /. World Energy Outlook (Rapport annuel sur les perspectives énergétiques mondiales). Paris, France : Éditions OCDE / IEA Publications, 2021.
- [3] Renouvelables, France. Intégration dans le réseau électrique : défis d'interconnexion et de gestion (Section : Guide stockage d'énergie). Paris, France : France Renouvelables, 2026.
- [4] al, Nouha Mansouri et. Large Photovoltaic Power Plants Integration : A Review of Challenges and Solutions. Bâle, Suisse : Energies (MDPI), 2019.
- [5] Anne Labouret, Michel Villos. Énergie solaire photovoltaïque : Le manuel de référence de la technologie photovoltaïque (5e Édition). Paris, France : Dunod, 2017.
- [6] écologique), ADEME (Agence de la transition. Le solaire photovoltaïque (Guide pratique sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire). Angers (France) : Éditions de l'ADEME, 2019.
- [7] Renouvelables), CDER (Centre de Développement des Énergies. Atlas Solaire de l'Algérie : Évaluation du Gisement Solaire et Cartographie de la Production Photovoltaïque Théorique. Alger, Algérie : Éditions du CDER, 2017.
- [8] Roger A. Messenger, Jerry Ventre. Photovoltaic Systems Engineering. Boca Raton, Floride, États-Unis : CRC Press, 2010.
- [9] Masters, Gilbert M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. Hoboken, New Jersey, USA : 2nd Edition, 2013.
- [10] (Algérie), Ministère de l'Énergie et des Mines. Bilan des réalisations et perspectives de développement des énergies renouvelables en Algérie. Alger : Éditions du Ministère de l'Énergie et des Mines (Direction Générale de l'Énergie), 2023.
- [11] Luis Castañer, Santiago Silvestre. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice. Chichester, Royaume-Uni : Wiley, 2002.
- [12] Xiao, Weidong. Photovoltaic Power System : Modeling, Design and Control. Hoboken, New Jersey, USA : Wiley, 2017.

- [13] SirEnergies. Le stockage de l'énergie et l'optimisation des systèmes photovoltaïques (Section : Guides Énergie). Lyon, France : SirEnergies Média, 2024.
- [14] Reddy, David Linden et Thomas B. Handbook of Batteries (5th Edition). New York : McGraw-Hill, 2019.
- [15] al, K. W. See et. Critical Review and Functional Safety of a Battery Management System for Large-Scale Lithium-Ion Battery Pack Technologies. s.l. : International Journal of Coal Science Technology, 2022.
- [16] J. Vetter, P. Novák, W. Carbon. "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries" (Journal of Power Sources, Vol. 147). Lausanne (Suisse) : Elsevier Sequoia SA, 2005.
- [17] Rufer, Alfred. Energy Storage : Systems and Components for Hydrogen and Hybrid Applications. Lausanne : CRC Press / EPFL Press, 2022.
- [18] Coquelet, Christophe. Les supercondensateurs : Composants actifs pour le stockage de l'énergie. Paris : Éditions Techniques de l'Ingénieur., 2018.
- [19] Béguin, François et Frackowiak, Elzbieta. Supercapacitors : Materials, Systems, and Applications. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2020.
- [20] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. Power Electronics : Converters, Applications, and Design. Hoboken, New Jersey, USA : John Wiley Sons, 2003.
- [21] Rashid, Muhammad H. Power Electronics Handbook. Burlington, USA : Elsevier, 2011.
- [22] Trishan Esum, Patrick L. Chapman. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. s.l. : IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007.
- [23] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo. "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method" (IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4). Piscataway, New Jersey (États-Unis) : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2005.
- [24] Jinrong Qian, Yuanli Zhu, Haibin Sun. Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles Based on Battery and Ultracapacitor. s.l. : IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011.
- [25] Ali Khaligh, Zhihao Li. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems. . . State of the Art. s.l. : IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010.
- [26] Plett, Gregory L. Battery Management Systems, Volume I : Battery Modeling. Boston, Massachusetts (États-Unis) : Artech House, 2015.
- [27] Zhang, L., Wang, Y. et Li, X. A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation methods for grid support applications. Amsterdam : Journal of Energy Storage - Elsevier, 2023.
- [28] S. Buller, E. Karden, R. W. De Doncker. "Dynamic modeling of supercapacitors using impedance spectroscopy" (IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 6). Piscataway, New Jersey (États-Unis) : IEEE, 2002.
- [29] Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg, Toshihisa Funabashi. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids – A General Approach Toward Standardization. s.l. : IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.

-
- [30] J. Li, X. Jin, R. Xiong. "Multi-objective optimization of a frequency-splitting power management strategy for a continuous-power hybrid energy storage system" (Energy Conversion and Management, Vol. 148). Oxford (Royaume-Uni) : Elsevier Ltd., 2017.
 - [31] Kouchachvili, L., Yaïci, W. et Entchev, E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system modeling for photovoltaic applications. Oxford (Royaume-Uni) : Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier), 2021.
 - [32] Karl Johan Åström, Tore Hägglund. PID Controllers : Theory, Design, and Tuning.

ANNEXES

Schémas blocs de la simulation

Schéma bloc MPPT

Les impulsions sont générées par un contrôleur basé sur un algorithme MPPT. La figure A.1 illustre le bloc MPPT proposé dans la simulation. Ce bloc collecte les paramètres d'entrée tels que la tension et le courant provenant du module photovoltaïque, l'état de charge (SOC) de la batterie et la tension de sortie nominale du convertisseur DC-DC.

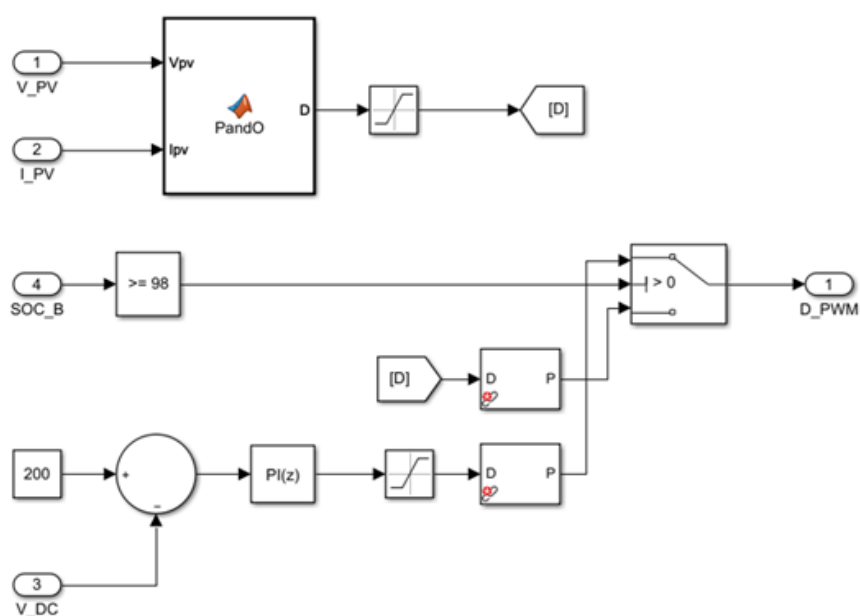


FIGURE A.1 – Bloc MPPT pour La génération de PWM

Schéma bloc des convertisseurs

Le convertisseur élévateur illustré dans la figure A.2 est utilisé pour augmenter le niveau de tension fourni par le module photovoltaïque. La figure A.3 présente le convertisseur bidirectionnel utilisé dans le modèle hybride simulé pour charger et décharger la batterie et le supercondensateur.

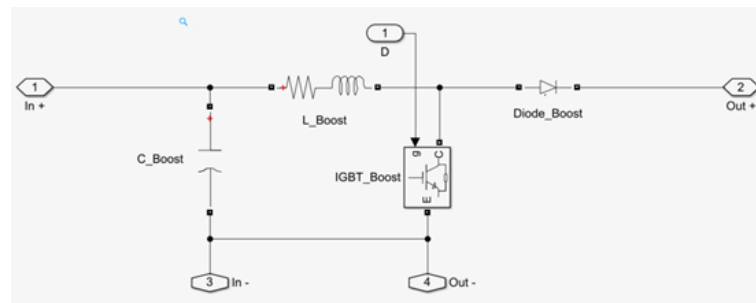


FIGURE A.2 – Convertisseur DC-DC (Boost)

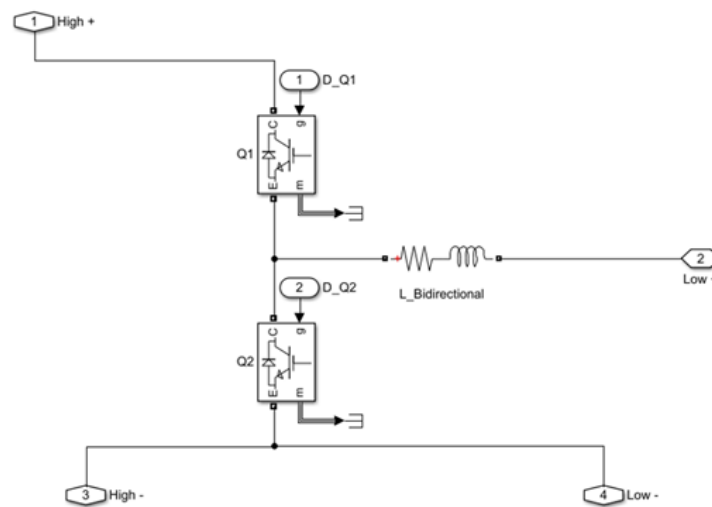


FIGURE A.3 – Convertisseur bidirectionnel DC-DC

Bloc de contrôle de combinaison

La figure A.4 présente le bloc de contrôle de combinaison entre les deux éléments de stockage, ce bloc fait la régulation de trois (03) systèmes :

1. Boucle de système de batterie
2. Boucle de système de supercondensateur
3. Boucle de Bus DC

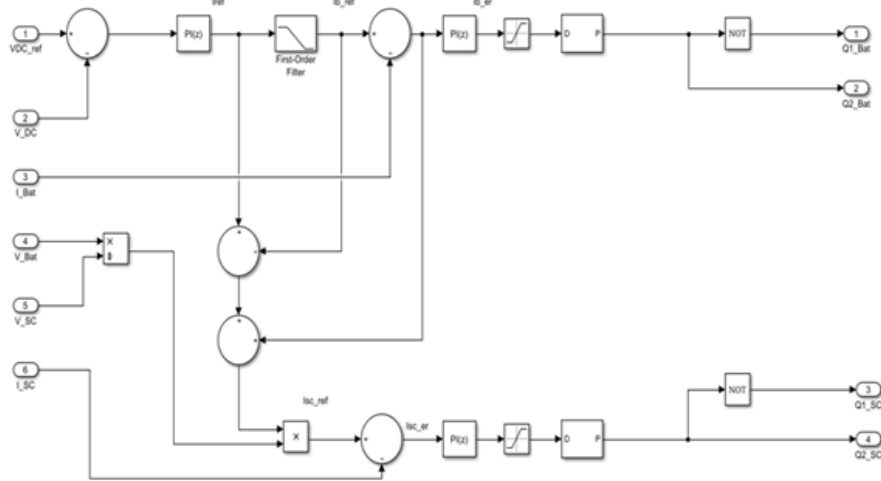


FIGURE A.4 – Bloc de contrôle de combinaison (batterie/supercondensateur)

α_{21} et α_{21} sont des rapports cycliques de la source de tension qui commandent les interrupteurs K_1 et K_2 (figure A.5).

Bloc régulateur PI

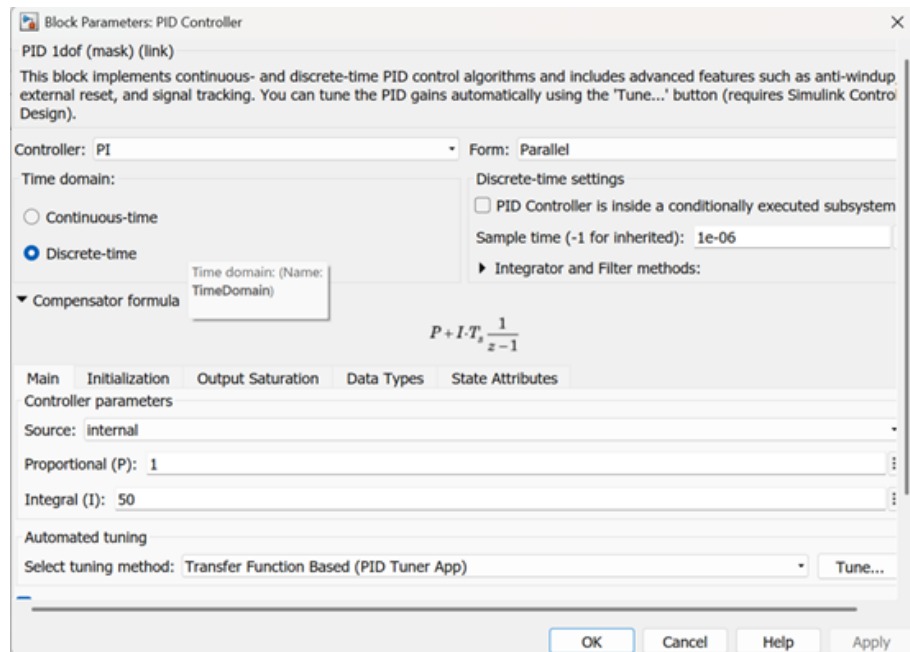


FIGURE A.5 – Block paramètres de régulateur PI

La régulation se fait par une double chaîne de régulation type PI (figure A.6) [32].

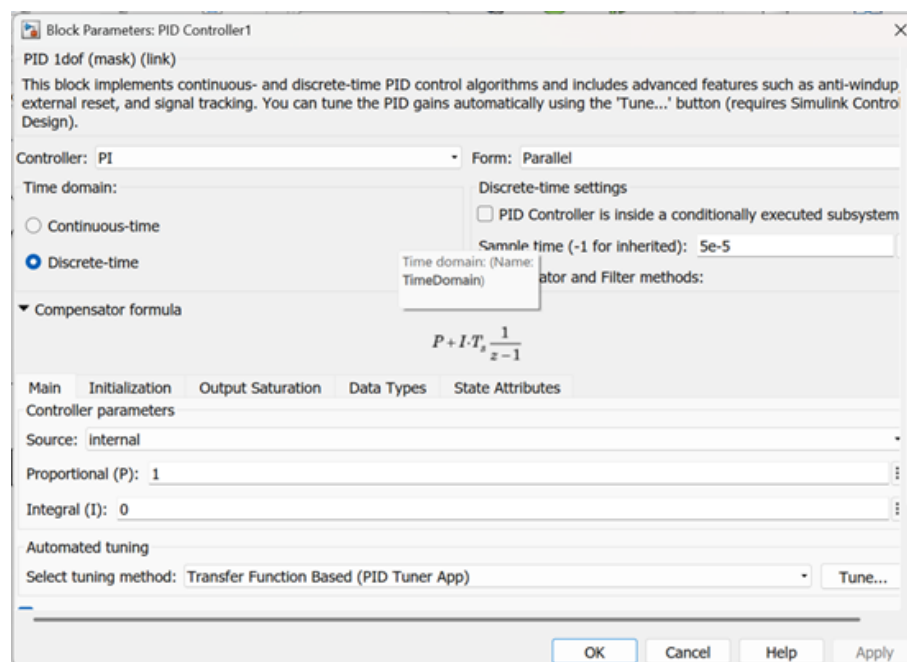


FIGURE A.6 – Block paramètres de régulateur PI 1

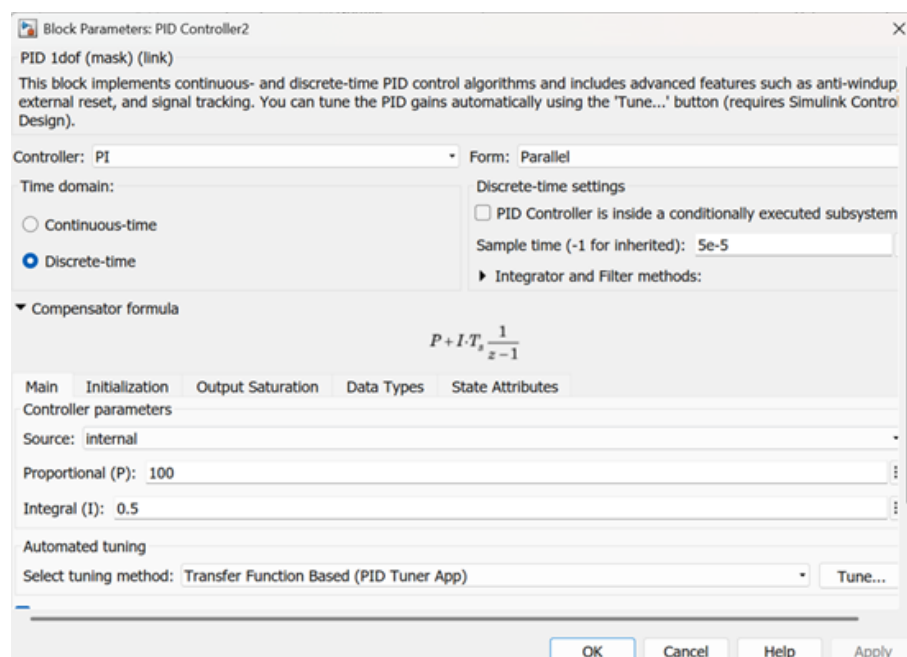


FIGURE A.7 – Block paramètres de régulateur PI 2

Dans l'objectif de la régulation de la tension V_{dc} du DC bus :

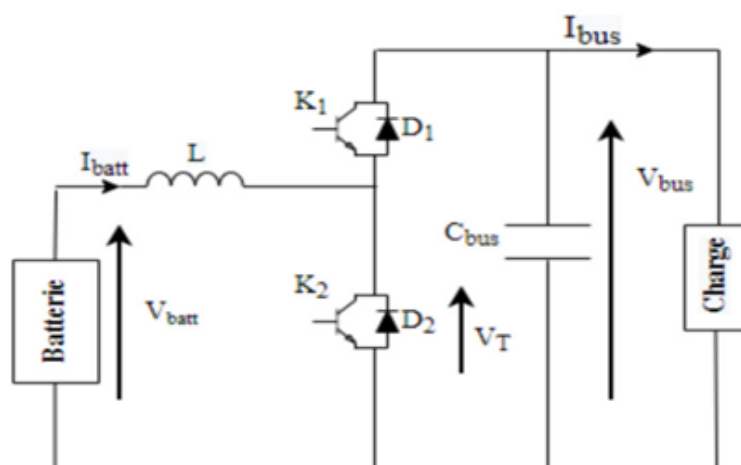


FIGURE A.8 – Convertisseur connecté a une batterie

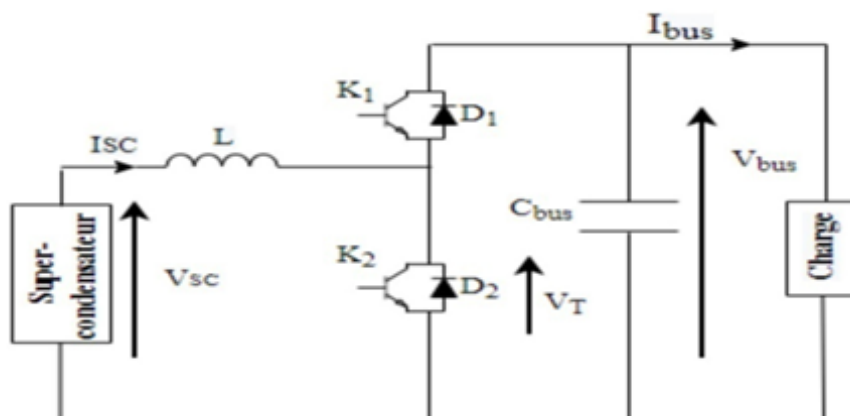


FIGURE A.9 – Convertisseur connecté à un supercondensateur

Le courant de référence I_{sc} est obtenu à partir de l'erreur entre le DC bus et la tension mesurée. Aussi la référence I_{sc} est générée à l'aide de deux régulateurs PI [32].

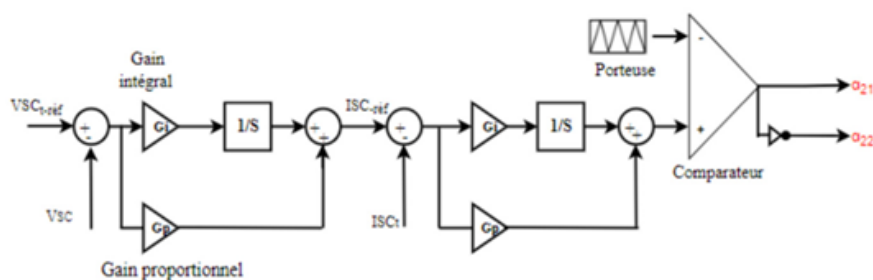


FIGURE A.10 – Chaîne de régulation du bus DC

الملخص:

يُدير نظام التخزين الهجين، الذي يجمع بين البطاريات والمكثفات الفائقة، الطاقة على المدى الطويل والطاقة على المدى القصير بشكل منفصل. يعمل هذا النظام على تخفيف تقلبات الطاقة الناتجة عن التغيرات السريعة وغير المنتظمة في إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية. ونتيجة لذلك، يقل إجهاد البطاريات وتدهورها المتسارع، مما يُطيل عمرها الافتراضي بشكل فعال. علاوة على ذلك، يُسهم تطبيق هذه الاستراتيجية الهجينة بشكل كبير في الحفاظ على استقرار شبكة الكهرباء وضمانه

الكلمات المفتاحية:

التخزين، البطارية، المكثف الفائق، الاستقرار، الطاقات المتجددة

Résumé :

Le système de stockage hybride, qui combine batteries et supercondensateurs, gère l'énergie à court et à long terme séparément. Ce système atténue les fluctuations énergétiques dues aux variations rapides et irrégulières de la production d'énergie solaire photovoltaïque. De ce fait, la sollicitation des batteries et leur dégradation accélérée sont réduites, prolongeant ainsi leur durée de vie. Par ailleurs, la mise en œuvre de cette stratégie hybride contribue significativement au maintien et à la garantie de la stabilité du réseau électrique.

Mots clés :

Stockage, Batterie, Supercondensateur, Stabilité, Energies renouvelables

Summary:

The hybrid storage system, which combines batteries and supercapacitors, manages short- and long-term energy separately. This system mitigates energy fluctuations caused by rapid and irregular variations in solar photovoltaic energy production. As a result, battery stress and accelerated degradation are reduced, thus extending their lifespan. Furthermore, the implementation of this hybrid strategy contributes significantly to maintaining and ensuring the stability of the electrical grid

Keywords :

Storage, Battery, Supercapacitor, Stability, Renewable energies