



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande Electrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Kharchi Ishak-Benchouia Mondhir

Le : jeudi 8 mai 2025

Commande et Gestion d'énergie d'un système Hybride PV-Batterie

Jury :

Dr.	NAIMI Djemai	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	BETKA Achour	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	ABDEDDAIM Sabrina	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr.	MOHAMMEDI Messaoud	MCA	Université de Biskra	Invité



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Présenté et soutenu par :
Kharchi Ishak-Benchouia Mondhir

Le : jeudi 8 mai 2025

Commande et Gestion d'énergie d'un système Hybride PV-Batterie

Avis favorable de l'encadreur :

BETKA Achour

signature

Avis favorable du Président du Jury

NAIMI Djemai

Signature

Cachet et signature

Dédicace

À nos parents, frères, sœurs et amis proches

Votre soutien indéfectible, votre amour et vos encouragements ont été de notre parcours pour achever ce mémoire. Votre confiance en nos capacités et votre présence constante nous ont donné la motivation nécessaire pour surmonter les défis et atteindre nos objectifs.

Nous vous dédions ce travail, en signe de notre profonde gratitude pour votre soutien inlassable et votre compréhension tout au long de cette aventure. Votre présence dans nos vies a fait toute la différence, et nous vous sommes éternellement reconnaissants pour votre amour et vos encouragements.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements sincères à toute la promotion **Master 2 Électrotechnique** de l'année **2024 / 2025**.

Merci d'avoir toujours été là pour nous.

Avec toute notre reconnaissance

Kharchi Ishak-Benchouia Mondhir

REMERCEMENT

Au début de cette section, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, **le Professeur Betka Achour**, pour ses orientations avisées, son expertise remarquable, et son précieux accompagnement tout au long de notre parcours de recherche.

Ses remarques pertinentes, ses encouragements constants et sa grande confiance en nos capacités ont joué un rôle fondamental dans l'élaboration et l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à tous les participants qui ont généreusement contribué à cette étude, en particulier **le Dr. Bettahar Farès**, pour son implication et sa disponibilité.

À nos parents, nos frères et sœurs, nos amis proches et à tous ceux que nous aimons, votre amour et votre soutien ont été une source d'inspiration et de force tout au long de ce projet.

Nous souhaitons aussi exprimer notre profonde reconnaissance aux **membres du jury**, à savoir : **Pr. NAIMI Djemai** et **Pr. ABDEDDAIM Sabrina** Et l'invité **Dr. MOHAMMEDI Messaoud**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer et de juger ce travail.

À toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire, nous vous disons : merci du fond du cœur pour votre précieux soutien

Kharchi Ishak-Benchouia Mondhir

Résumé

Avec la demande mondiale croissante d'énergie et le besoin urgent de solutions durables, ce mémoire se concentre sur la conception d'un algorithme de gestion de l'énergie dans un système hybride photovoltaïque (PV)-batterie. Le système est constitué d'un module photovoltaïque, soutenu par une batterie pour répondre aux besoins de charge. Ce système utilise un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basé sur l'IA, alors que le partage adéquat des puissances entre les deux sources, tout en respectant leurs natures, a été obtenu via l'implémentation d'un contrôleur robuste régulant la tension de bus ; ce qui a fait déduire un ensemble de modes de fonctionnement. Les performances du flux de puissance sont ensuite vérifiées par simulation en temps réel, via l'approche PIL et HIL. Les résultats démontrent la robustesse, la stabilité et la capacité à réagir rapidement aux changements. Les résultats de cette étude contribuent à fournir des connaissances scientifiques approfondies qui soutiendront les recherches futures et amélioreront le développement de systèmes énergétiques hybrides.

Mots-clés : Gestion de l'énergie, Système hybride, photovoltaïque, batterie, Apprentissage automatique, Régression linéaire (MPPT), Convertisseur élévateur DC/DC, Convertisseur DC/DC bidirectionnel, Énergies renouvelables, Simulation en temps réel, PIL, HIL, MIL.

Abstract

With the growing of the global demand for energy and the urgent need for sustainable solutions, this thesis focuses on energy management in a photovoltaic (PV)-battery hybrid system. The system consists of a photovoltaic module supported by a battery to meet the load demand. It employs a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm based on artificial intelligence, along with a DC bus control using the Lyapunov method, which regulates the battery's charging and discharging processes. This concept allows distinguishing various operating modes. The power flow performance is then verified through real-time simulation, such as the PIL, and the HIL. The results demonstrate the system's robustness, stability, and ability to respond rapidly to changes. A smooth permutation between the operating modes is obtained, where a power sharing was successfully obtained. This study provides valuable scientific insights that will support future research and enhance the development of hybrid energy systems

Keywords: Energy management – Photovoltaic, battery, hybrid system, Machine learning, Linear regression (MPPT), DC/DC boost converter, Bidirectional DC/DC converter, Renewable energy, Real-time simulation, PIL, HIL, MIL.

ملخص

في ظل تزايد الطلب العالمي على الطاقة والحاجة الملحة لاعتماد حلول مستدامة ,تركز هذه الأطروحة على إدارة الطاقة في النظام الهجين للبطارية الكهروضوئية (PV) يتكون النظام من وحدة كهروضوئية، مدعومة بطارية لتلبية احتياجات الحمولة,من خلال اعتماد خوارزمية تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) القائمة على تقنية الذكاء الاصطناعي ,وبالإضافة الى التحكم في الناقل التيار المستمر بواسطة ليونوف مما يؤدي الى تنظيم شحن وتفريغ البطارية ,ومن ثم التحقق من صحة أداء تسير الطاقة من خلال الوقت الحقيقي لمحاكاة, توضح النتائج متانة النظام واستقراره وقدرته على الاستجابة بسرعة للتغيرات , تسهم نتائج هذه الدراسة في تقديم رؤى علمية معمقة من شأنها دعم الأبحاث المستقبلية وتعزيز التطور في مجال أنظمة الطاقة الهجينة .

كلمات مفتاحية : إدارة الطاقة - نظام البطارية الكهروضوئية الهجين - بطاريات - تعلم الآلة – الانحدار الخطي MPPT محول رافع DC/DC - محول ثنائي اتجاه DC/DC - الطاقات المتجددة –PIL-HIL-MIL- الزمن الحقيقي محاكاة

Table Des Matières

Résumé	A
Table Des Matières.....	D
Liste Des Figures	H
Liste Des Tableaux.....	K
Symboles et notations	L
Introduction Générale	I

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

1.1 Introduction.....	4
1.2 Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque	4
1.3 Description de l'effet photovoltaïque	5
1.3.1 Cellule photovoltaïque	5
1.3.2 Module photovoltaïque	6
1.3.3 Panneaux solaires (générateur PV)	6
1.3.3.1 Cellule au silicium monocristallin	7
1.3.3.2 Cellule au silicium poly cristallin	8
1.3.3.3 Module en couches minces	8
a) Cellule au silicium amorphe.....	9
b) La technologie CIS.....	10
c) La technologie CdTe.....	11
d) Les cellules organiques et plastiques	11
1.3.4 Avantage et inconvénients des générateurs PV	12
a) Avantages	12
b) Inconvénient	13
1.4 Description des différents éléments de stockage	13
1.4.1 Différents types de stockage	14
1.4.1.1 Le stockage mécanique dans un volant d'inertie	14
1.4.1.1.1 Définition et constitution	14
a) Définition	14
b) Constitution	14
c) Volant d'inertie	15
d) Le moteur/générateur	15
e) Les paliers	16

Table Des Matières

1.4.1.1.2 Principe de fonctionnement	17
1.4.1.1.3 Avantages	17
1.4.1.1.4 Inconvénients	17
1.4.1.2 Le stockage chimique dans un accumulateur électrochimique	18
1.4.1.2.1 Principe de fonctionnement	18
1.4.1.2.2 Batterie Plomb-acide	19
1.4.1.2.3 Batterie Ni-Cd	19
1.4.1.2.4 Batterie NiMH	21
1.4.1.2.5 Batterie Li-ion	21
1.4.1.3 Comparaison des types de batteries	23
1.4.1.4 Stockage électrostatique : Les supercondensateurs	23
1.4.2 Caractéristiques des sources d'énergie électrique dédiées au stockage	27
1.4.3 Domaine d'utilisation du système de stockage	28
1.5 Systèmes hybrides	29
1.5.1 Définition	29
1.5.2 Classification des systèmes hybrides	30
a) Selon le régime de fonctionnement.....	30
b) Selon les sources d'énergie exploitées	30
c) Selon la configuration du bus commun.....	31
1.5.3 Les Avantages.....	32
1.5.4 Les Inconvénients.....	32
1.5.5 Stratégies de la gestion de l'énergie	33
1.6 Conclusion.....	33

Chapitre II : Modélisation du système hybride PV-batterie

2.1 Introduction	34
2.2 Modélisation du panneau PV	35
2.2.1 Modélisation d'une cellule solaire	35
2.2.1.1 Caractéristique I-V	36
2.2.1.2 Influence de l'éclairement et la température	38
2.2.2 Modélisation de la batterie plomb-acide (AGM)	38
2.2.2.1 Modèle de Thévenin	42
2.2.2.2 Modèle de Thévenin avec Branche de Polarisation	42

Table Des Matières

2.2.2.3 L'état de charge (SOC)	44
2.2.2.4 La profondeur de décharge (DOD)	44
2.3 Modélisation des convertisseurs statiques	45
2.3.1 Modélisation du convertisseur DC-DC boost côté PV	45
2.3.2 Modélisation du convertisseur DC-DC (bidirectionnel) côté batterie	49
2.4 Modélisation de la charge résistive	53
2.5 Conclusion	53

Chapitre III : Description des Approches de Commande

3.1 Introduction.....	54
3.2 Schéma Synoptique du système hybride	54
3.3 Description des approches de commande.....	55
3.3.1 Commande rapproché coté module photovoltaïque.....	56
a) Méthode d'évaluation de la puissance nette	57
b) Estimation de la puissance de la charge par la méthode de Projection	58
3.3.1.1 Commande en mode MPP.....	59
a) Les techniques d'optimisation numérique.....	60
b) Description de l'algorithme basé sur la régression linéaire multiple.....	61
3.3.1.2 Commande rapproché basée sur l'MIT	66
a) Modèle de référence MRAC	68
b) Loi de commande par retour d'état adaptative : $u(t) = \theta_1 x(t) + \theta_2 y_{ref}$	69
3.3.1.3 Mode régulation de puissance.....	71
3.3.2 Commande coté Batterie	74
3.3.2.1 Régulation de la tension du bus continu	75
3.3.3 Différents Schémas de l'écoulement de puissance pour chaque mode	76
3.4 Conclusion	78

Chapitre IV : Validation des contrôles

4.1 Introduction	79
4.2 Différentes Méthodes de Validation	79
a) MIL (Model-in-the-Loop).....	79
b) SIL (Software-In-The-Loop).....	80
c) PIL (Processor-In-The-Loop).....	80
d) HIL (Hardware-In-The-Loop).....	81

Table Des Matières

4.2.1 Résultats du MIL (Résultat de Simulation)	83
4.2.2 1 Résultats du PIL	89
4.2.3 Expérimental HIL	91
4.2.4 Résultats expérimentaux basés sur le HIL	92
a) Validation de l'algorithme MPPT.....	92
b) Validation du système hybride.....	93
4.3 Conclusion	95
Conclusion générale	97
Bibliographie.....	Q
Annexes	

Liste Des Figures

Liste Des Figures

Chapitre I

Fig I.1 : Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule	5
Fig I.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	5
Fig I.3 : Module photovoltaïque	6
Fig I.4 : Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque	7
Fig I.5 : Cellules photovoltaïques monocristallines	7
Fig I.6 : Cellules photovoltaïques monocristallines	8
Fig I.7 : Technologies couches minces	9
Fig I.8 : Deux exemples de modules utilisant les cellules amorphes	10
Fig I.9 : Technologies couches minces CIS	10
Fig I.10: Technologies couches minces CdTe	11
Fig I.11: Cellule solaire organique	11
Fig I.12: Principaux du Système de stockage d'énergie par volant d'inertie	14
Fig I.13: Architectures intégrées de machine électrique possibles	16
Fig I.14: Chaîne de conversion de l'énergie dans un SISE	17
Fig I.15: Réactions chimiques dans une cellule en Plomb	18
Fig I.16: Etat déchargé du super condensateur	24
Fig I.17: Etat Chargé du super condensateur	25
Fig I.18: Etat chargé au maximum du super condensateur	25
Fig I.19: Etat de Décharge	26
Fig I.20: Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs	28
Fig I.21: Plan de Ragone	28
Fig I.22: Classification des systèmes hybrides	30
Fig I.23: Système hybride avec connexion série	32
Fig I.24: Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie	33

Chapitre II

Fig II.1: schéma synoptique du système hybride	34
Fig II.2: Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque	35
Fig II.3: Caractéristiques du panneau PV dans les conditions standards	38

a) Caractéristique courant-tension.

b) Caractéristique de puissance

Liste Des Figures

Fig II.4: Caractéristique courant–tension du panneau PV pour différents niveaux d’éclairement et une température fixe 25° C	39
Fig II.5: Caractéristique de puissances du panneau PV pour différents niveaux d’éclairement et une température fixe 25° C	39
Fig II.6: Caractéristique courant–tension du panneau PV pour différentes valeurs de température et un éclairement fixe 1000W/m ²	40
Fig II.7: Caractéristique puissances–tension du GPV pour différentes valeurs de température et un éclairement fixe 1000W/m ²	40
Fig II.8: Modèle de Thevenin d’une batterie	42
Fig II.9: Modèle électrique de Thevenin avec effet de polarisation	43
Fig II.10: Une image de la batterie utilisée	45
Fig II.11: Schéma descriptif du convertisseur boost	46
Fig II.12 : Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction	47
Fig II.13 : Circuit électrique équivalent de la Deuxième séquence de conduction	48
Fig II.14 : Schéma bloc fonctionnel de l’hacheur Boost	49
Fig II.15: Convertisseur associé à la batterie	50
Fig II.16 : Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction	50
Fig II.17 : Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction	51
Fig II.18 : Schéma bloc fonctionnel de l’hacheur Buck-Boost	52

Chapitre III

Fig III.1 : schéma synoptique du système hybride	54
Fig III.2 : Organigramme des différents modes de fonctionnement du système	55
Fig III.3 : Schéma synoptique de la commande rapprochée coté Batterie et coté PV	57
Fig III.4 : Graphique de la méthode de Projection	58
Fig III.5 : Types d'apprentissage	62
Fig III.6 : modèle issu de la régression linéaire multiple	63
Fig III.7 : Test de l’algorithme de MPPT par la régression linéaire multiple	66
Fig III.8 : Schéma synoptique de la méthode MRAC	67
Fig III.9 : Estimation de la FT du convertisseur boost	67
Fig III.10 : schéma bloc du régulateur MRAC du courant du panneau solaire	69
Fig III.11 : Modèle Simulink du contrôle adaptatif MRAC pour le MPPT	70
Fig III.12 : Réponse du contrôle MRAC sur le convertisseur Boost	71

Fig III.13 : commande du panneau PV en mode régulation de puissance	71
Fig III.14 : Schéma fonctionnel de la régulation par l'approche de Lyapunov	73
Fig III.15 : Schéma décrivant le basculement entre les deux modes	73
Fig III.16 : Schéma synoptique de la commande du convertisseur Buck-Boost	74
Fig III.17 : Schéma fonctionnel de la commande rapprochée coté batterie	75
Fig III.18 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 2	76
Fig III.19 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 3	77
Fig III.20 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 4	77

Chapitre IV

Fig IV.1: Approche Model-In-The-Loop	79
Fig IV.2: Approche Software-In-The-Loop	80
Fig IV.3: Approche Processor -In-The-Loop.....	81
Fig IV.4: Approche Hardware-In-The-Loop	82
Fig IV.5: Organisation fonctionnelle d'une simulation P-HIL	83
Fig IV.6 : Profile d'éclairement et de température	84
Fig IV.7 : Nouveau Profile de charge	84
Fig IV.8 : Allures issues du MIL : (a)SOC de la batterie ;(b) la Puissance totale ; (c) La Puissance de la batterie ;(d) la Puissance du module PV.....	85
Fig IV.9: Résultats du MIL : (a) Tension du bus continu ;(b) Courant de la batterie ; (c) Tension de la batterie ;(d) Courant du panneau PV.....	86
Fig IV.10: Profile de charge	87
Fig IV.11: Résultats du MIL : (a)SOC de la batterie ;(b) la Puissance du Pv et la- charge ; (c) la Puissance de la batterie ;(d) Tension de bus continu.....	88
Fig IV.12: La représente l'allure MIL	88
(a) Courant de la batterie	(b) Tension de la batterie
Fig IV.13: Description expérimentale du système PIL	89
Fig IV.14: Résultats issus du PIL	90
Fig IV.15: Allures issues du PIL	90
Fig IV.16: Description expérimentale du système HIL	91
Fig IV.17: Résultats issus du HIL	92
Fig IV.18: Résultat du HIL pour variation de l'éclairement	93
Fig IV.19: Résultats issus du HIL	94

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des rendements des différents types de cellules	12
Tableau 1.2 : Moment d'inertie de quelques géométries	15
Tableau 1.3 : Caractéristiques de l'accumulateur au plomb	19
Tableau 1.4 : Caractéristiques de l'accumulateur au Ni-Cd	20
Tableau 1.5 : Caractéristiques de l'accumulateur NiMH	21
Tableau I.6 : Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion	22
Tableau I.7 : Comparatif des technologies d'accumulateur utilisé	23
Tableau I.8 : Les différents types de supercondensateur	26
Tableau I.9 : Domaine d'utilisation du système de stockage	29
Tableau II.1: Pièce d'identité du panneau solaire utilisé	41
Tableau III.1 : Echantillon du Dataset utilisé en régression.....	63

SYMBOLES ET NOTATIONS

SYMBOLES ET NOTATIONS

W_c	Énergie cinétique de rotation [J]
J	Le moment d'inertie des parties tournantes [$Kg.m^2$]
Ω	La vitesse angulaire [rad/s]
V	La vitesse tangentielle (linéaire) [m/s]
Q	Charge électrique [C]
dm	Élément infinitésimal de masse [Kg]
M	La masse [Kg]
I_{PV}	Courant du générateur photovoltaïque [A]
I_{op_th}	Courant optimal théorique du module photovoltaïque [A]
I_{cc}	Courant de court-circuit du générateur photovoltaïque [A]
V_{PV}	Tension du générateur photovoltaïque [V]
R_s	Résistance série générateur photovoltaïque [Ω]
V_{th}	Tension thermique [V]
N_p	Nombre de branches en parallèle
N_s	Nombre de modules en série
V_{oc}	Tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque [V]
V_{op}	Tension optimale du générateur photovoltaïque [V]
T	Température de la cellule [$^{\circ}C$]
T_a	Température ambiante [$^{\circ}C$]
E	Eclairement solaire [W/m^2]
T_{ref}	Température de référence [$^{\circ}C$]

E_{ref}	Eclairement de référence [W/m^2]
V_b	Tension de la batterie [V]
I_b	Courant de la batterie [A]
R_0	Résistance interne d'une cellule de la batterie [Ω]
E_0	Tension à vide de la batterie [V]
C_n	La capacité nominale de la batterie [Ah]
$\widehat{R}_{ch}$	La valeur estimée de la charge [Ω]
R_{ch}	Valeur de la charge [Ω]
I_{ch}	Courant de la charge [A]
I_l	Courant de la bobine [A]
C_{dc}	Capacité du bus continu [F]
V_{dc}	Tension de bus continu [V]
α	Rapport cyclique
$T1, T2, T3$	Interrupteur de l'hacheur
P_b	Puissance de la batterie [W]
P_{MPPT}	Puissance optimale du générateur photovoltaïque [W]
P_{pv}	Puissance du générateur photovoltaïque [W]
P_{ch}	Puissance de la charge [W]
t_r	Temps de montée [s]
ξ_n	Facteur d'amortissement
ω_n	Pulsation propre [rad/s]

γ	Gain d'adaptation
<i>GPV</i>	Générateur photovoltaïque
<i>MPP</i>	Maximum power point
<i>SHSER</i>	Systèmes Hybrides de Production d'Énergie Renouvelable
<i>SOC</i>	State of charge [%]
<i>DOD</i>	depth of discharge[%]
<i>RLS</i>	Réursive Least Square
<i>MRAC</i>	Commande Adaptative à Modèle de Référence
<i>MPPT</i>	Suiveur du point de puissance maximale
<i>MIL</i>	Model-in-the-Loop
<i>SIL</i>	Software-In-The-Loop
<i>PIL</i>	Processor-In-The-Loop
<i>HIL</i>	Hardware-In-The-Loop

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la consommation énergétique mondiale connaît une croissance remarquable dans toutes les régions du globe. Cette tendance semble se poursuivre, portée à la fois par la croissance économique et l'augmentation de la consommation électrique par habitant, et ce, quel que soit le scénario envisagé. Selon les statistiques de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), plus des trois quarts de l'énergie consommée en 2010 provenaient encore de sources fossiles, Or, ces ressources - gaz, pétrole et charbon, sont vouées à s'épuiser au cours des prochaines décennies, Leur exploitation engendre des émissions massives de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'aggravation de la pollution et au dérèglement climatique. Le danger réside aussi dans la surexploitation des réserves naturelles, menaçant les besoins énergétiques des générations futures, C'est dans cette optique que l'AIE recommande vivement de développer les sources d'énergie propres et renouvelables.

Dans le contexte de l'électrification des zones isolées, les limites des réseaux de distribution traditionnels deviennent évidentes. Ces derniers peinent à couvrir certaines zones géographiquement difficiles d'accéder, telle que : les montagnes escarpées, îles éloignées, régions désertiques ou à faible densité de population. Ces contraintes sont souvent liées à des obstacles techniques ou à un manque de rentabilité économique des projets de raccordement au réseau national.

Dans ce cadre, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution efficace et durable. Adaptables aux besoins locaux, elles permettent la mise en place de systèmes électriques autonomes, tels que les micro-réseaux, ce qui en fait représente une option idéale pour assurer la continuité du service électrique dans les zones difficiles à connecter au réseau central.

Les sources d'énergie renouvelables ont connu une expansion significative dans le monde entier au cours des dernières décennies, une dynamique qui s'est particulièrement intensifiée après la signature du protocole de Kyoto, qui impose des limites aux émissions de gaz à effet de serre dans de nombreux pays. L'une des technologies les plus prometteuses pour exploiter ces ressources renouvelables est la conversion de l'énergie solaire en énergie photovoltaïque, qui permet de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire.

La technologie solaire photovoltaïque connaît une croissance sans précédent, des efforts importants étant déployés pour améliorer son efficacité et réduire son coût. Les matériaux utilisés dans la fabrication des panneaux évoluent également constamment pour augmenter leur efficacité.

Cependant, le défi le plus important auquel est confrontée l'énergie solaire reste les fluctuations météorologiques, en raison de sa nature intermittente et variable. Par exemple, la productivité des panneaux diminue en hiver, la nuit ou les jours de pluie. L'énergie fournie par les panneaux est considérablement réduite.

Les systèmes d'énergie solaire sont confrontés à des défis liés à l'instabilité de la production due aux fluctuations climatiques, ce qui nécessite une solution sous forme de dispositifs de stockage tels que des batteries pour assurer un approvisionnement énergétique continu pendant les périodes de faible production ou de forte demande. Ce type de système est connu sous le nom de système hybride (multi-sources), où plusieurs sources d'énergie et unités de stockage sont combinées pour assurer la continuité de l'alimentation électrique.

Les systèmes électriques décrits dans la littérature varient entre des systèmes isolés, connectés au réseau, à source unique ou à sources multiples. Le concept de système hybride (HES) fait généralement référence à des systèmes qui s'appuient sur différentes sources d'énergie pour profiter des avantages de chacune en fonction de ses caractéristiques. L'utilisation de ces systèmes est devenue courante dans plusieurs domaines industriels, comme les systèmes intégrés (voitures, bateaux), ainsi que pour l'alimentation de communautés isolées ou encore connectées au réseau [26].

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur la gestion de l'énergie dans un système hybride photovoltaïque-batterie, qui alimente une charge autonome, de type résistive. Cette charge émule en fait la demande d'un village ou autre, en qualité de puissance active. L'objectif principal de ce travail est de gérer correctement le flux de puissance entre les deux sources impliquées, en tenant compte de la variation de charge et de la variation du rayonnement solaire incident, et de la température ; ainsi que l'état de la batterie. Dans ce contexte, un algorithme avancé, inspiré du Machine Learning, et de la théorie de contrôle est proposé pour assurer ce partage de puissance.

Cet ouvrage se compose d'une introduction générale, de quatre chapitres principaux et d'une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, un aperçu macroscopique des topologies des systèmes hybrides est décrit, en commençant par des informations générales sur les panneaux solaires photovoltaïques, les dispositifs de stockage, puis les systèmes solaires photovoltaïques hybrides combinant des batteries.

Le deuxième chapitre traite la modélisation des différents éléments constituant le système électrique hybride (sources, convertisseurs statiques et charge). Cette modélisation permet de bien savoir les caractéristiques de chaque entité, et de suggérer des lois de contrôle appropriées, respectant leurs natures, et de prédire par conséquent les performances attendues.

Le troisième chapitre, qui constitue en fait le cœur de ce travail décrit les différentes lois de gestion et de contrôle appliqué au système, pour chaque mode de fonctionnement, pour assurer un fonctionnement flexible et fiable, amenant par conséquent à couvrir la demande en toute circonstance. Cela est en fait obtenu, via un ensemble d'algorithmes, mariant entre le concept de Régression, du Machine Learning, et les méthodes issues de la théorie de contrôle.

Dans le dernier chapitre, ces lois sont évaluées à l'aide de plusieurs méthodes (MIL, PIL) pour prouver la validité du système et son contrôle à travers des résultats numériques, en plus d'une vérification expérimentale (HIL) sur une plateforme d'essais mise en œuvre au Laboratoire des Energies Renouvelables de Biskra.

Enfin, une conclusion générale est présentée qui résume le travail.

Chapitre I
Généralités sur Les systèmes
hybrides

1.1.Introduction

Face aux défis environnementaux et économiques actuels, la transition vers des sources d'énergie renouvelables et durables est devenue une priorité mondiale. Parmi les solutions innovantes émergentes, les systèmes hybrides d'énergie occupent une place centrale grâce à leur capacité à combiner plusieurs technologies de production et de stockage d'énergie. En intégrant des sources telles que l'énergie solaire ou éolienne avec des systèmes de stockage comme les batteries ou les volants d'inertie, ces systèmes visent à optimiser l'efficacité énergétique, assurer un approvisionnement continu en énergie et réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce chapitre, nous explorerons les bases des systèmes hybrides d'énergie. Nous commencerons par une présentation de l'effet photovoltaïque, qui constitue l'un des piliers des systèmes solaires. Ensuite, nous décrirons les différents éléments utilisés pour le stockage d'énergie, tels que les batteries, les supercondensateurs et les volants d'inertie, en mettant en lumière leurs caractéristiques spécifiques et leurs domaines d'application. Par la suite, nous définirons les systèmes hybrides et examinerons leurs principales configurations, y compris les systèmes connectés au réseau (on-grid) et les systèmes autonomes (off-grid). Enfin, nous discuterons des avantages et des défis associés à ces systèmes, ainsi que de leur rôle crucial dans la transition énergétique.

1.2.Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque

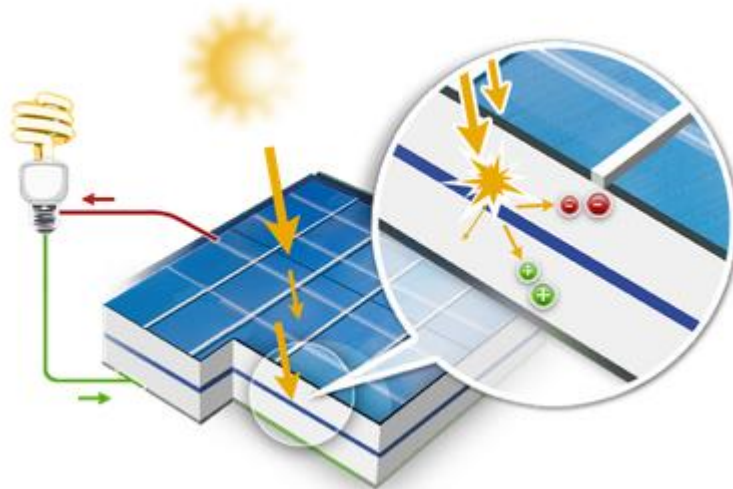
L'énergie solaire photovoltaïque fait référence à la méthode de transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique grâce à des cellules photovoltaïques ou des panneaux solaires. Ces cellules sont composées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, qui ont la capacité de produire un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Lorsque des photons provenant de la lumière solaire touchent la surface des cellules solaires, ils excitent les électrons, générant ainsi un courant électrique. Cette électricité produite peut servir à alimenter divers appareils et systèmes ou être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie propre et renouvelable qui présente des avantages environnementaux en diminuant la dépendance aux énergies fossiles et en contribuant à un avenir énergétique plus durable. [1]

1.3. Description de l'effet photovoltaïque

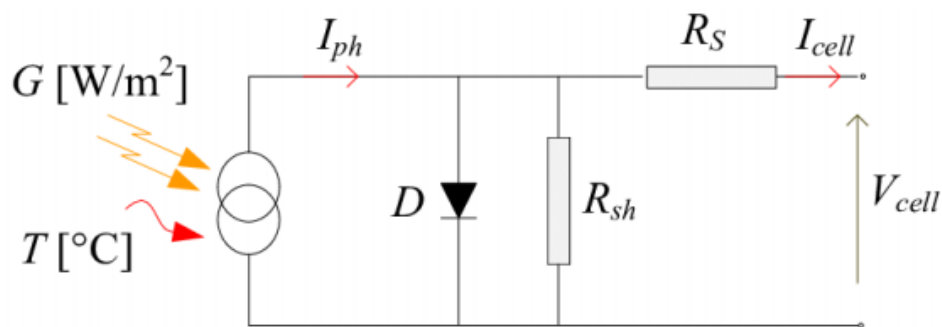
1.3.1. Cellule photovoltaïque

La conversion directe de la lumière solaire (sous forme de photons) en énergie électrique s'effectue grâce à un phénomène appelé effet photovoltaïque, qui repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs. Les modules photovoltaïques (PV), conçus pour réaliser cette transformation, présentent de nombreux atouts : ils sont robustes, fiables et nécessitent très peu d'entretien en raison de l'absence de pièces mobiles. De plus, ils fonctionnent de manière silencieuse et n'exigent que la lumière solaire comme source d'énergie principale. Au cœur de ces systèmes se trouve un matériau semi-conducteur spécialement modifié pour permettre la libération d'électrons, ces particules chargées négativement qui constituent l'élément fondamental de l'électricité. Parmi les matériaux semi-conducteurs utilisés, le silicium est de loin le plus répandu dans la fabrication des cellules photovoltaïques, étant donné qu'il est abondamment disponible sous forme de sable [2]. La cellule PV est composée de deux couches minces

dopée différemment : une couche dopée de type P et l'autre dopée de type N (voir la **FigI.1**).



FigI.1 : Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule [3]



FigI.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4]

1.3.2 Module photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques ou les modules actuellement fabriqués délivrent des puissance variante entre plusieurs watts-crête et quelques centaines de watts-crête [5]. Donc la puissance disponible à la sortie d'une cellule PV est très faible. Pour obtenir des puissances électriques en adéquation avec les charges usuelles, il est nécessaire d'associer plusieurs cellules entre elles sous forme d'un module (voir la **Fig I.3**)

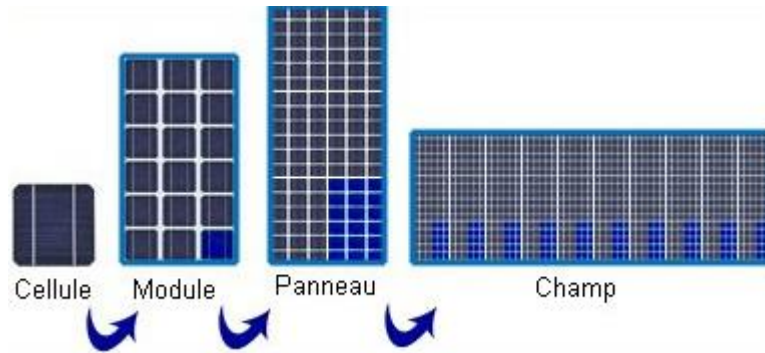


FigI.3: Module photovoltaïque

1.3.3. Panneaux solaires (générateur PV)

Le module solaire constitue l'élément fondamental des systèmes solaires. Un module photovoltaïque est généralement composé d'un réseau de cellules connectées en série et en parallèle, protégées contre l'humidité par un encapsulage en verre et en matériau plastique. Cet ensemble est ensuite intégré dans un cadre rigide et équipé d'une boîte de jonction pour les connexions électriques. Les modules captent l'énergie solaire sous forme de lumière (ou d'ensoleillement) et la transforment en électricité continue (C.C.). Plus ils reçoivent de lumière solaire, plus leur production d'électricité est élevée.

Les modules solaires représentent le cœur du système ; ils agissent en tant que générateurs d'énergie. Ils peuvent être interconnectés en série ou en parallèle pour former des champs photovoltaïques, permettant ainsi d'augmenter la tension et l'intensité nécessaires selon les besoins de l'application.



FigI.4 : Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque

Les applications courantes des générateurs photovoltaïques se divisent classiquement entre des systèmes basés sur le courant continu (12, 24 ou 48 Volts DC) et ceux produisant du courant alternatif grâce à un onduleur (230 Volts AC monophasé ou 380 Volts AC triphasé).[\[6\]](#)

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques, notamment les :

1.3.3.1. Cellule au silicium monocristallin :

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un unique cristal de silicium pur, ce qui en fait les plus efficaces sur le plan technologique. Le silicium utilisé dans leur production est extrait de la silice, présente sous forme de quartz ou de sable, grâce à un processus de transformation chimique métallurgique complexe. Ces cellules se distinguent par une durée de vie élevée, généralement estimée entre 20 et 30 ans, ainsi que par leur excellent rendement énergétique. Elles représentent ainsi une solution durable et performante pour diverses applications solaires.[\[7\]](#)



FigI.5: Cellules photovoltaïques monocristallines

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché : elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairement, Il affiche les meilleurs rendements sur le marché des produits actuellement disponibles.

-Rendement électrique des panneaux : 15 % STC

-Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m²

- Usage : tous usages extérieurs de forte et moyenne puissance (télécommunication, balisage, relais, habitat) [8]

1.3.3.2. Cellule au silicium poly cristallin :

Les cellules polycristallines, composées de plusieurs cristaux de silicium, sont légèrement moins efficaces que les monocristallines mais offrent une durée de vie similaire de 20 à 30 ans. Fabriquées à partir de silicium fondu refroidi dans un creuset, leur taille cristalline est contrôlée lors de la solidification. Cependant, les joints entre cristaux (joints de grain) affectent négativement leurs performances photovoltaïques.



Fig I.6: Cellules photovoltaïques poly cristallin

Rendement électrique des panneaux : 12 à 14 % STC

- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m²

- Usage : même usage que le silicium monocristallin [8]

1.3.3.3. Modules en couches minces :

Les modules en couches minces gagnent en popularité grâce à leurs caractéristiques physiques avantageuses par rapport au silicium cristallin. Lorsque le coût du matériau est élevé (entre 50 et 100 euros par kilogramme pour le silicium polycristallin), il devient stratégique d'en réduire l'utilisation, ce qui constitue le principe fondamental des cellules solaires en couches minces. Plusieurs technologies émergent dans ce domaine :

- Le silicium amorphe (a-Si), qui représente la filière historique des couches minces.

- Le silicium cristallin déposé en couche fine.
- Le tellure de cadmium (CdTe), une technologie innovante.
- Les composites cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/gallium/sélénium (CIS ou CIGS), également considérés comme des solutions innovantes.
- Les cellules multicouches, comprenant les structures à double ou triple jonction (3a-Si).
- Enfin, les cellules basées sur l'oxyde de titane, qui explorent de nouvelles voies dans le domaine photovoltaïque [9]

a) Cellule au silicium amorphe :

Une fine couche de matériau photovoltaïque, appelée cellules amorphes, est déposée sur un support, réduisant à la fois la quantité de matériau nécessaire et l'énergie grise liée à sa fabrication. Cette famille de technologies est souvent moins coûteuse, mais avec une efficacité légèrement inférieure. Elle est parfois utilisée pour alimenter de petits appareils ou pour fabriquer des modules solaires flexibles. Plusieurs technologies utilisant divers matériaux existent, notamment:

- A-Si : Silicium amorphe ($<1 \mu\text{m}$)
- $\mu\text{C-Si}$: Silicium micro-cristallin ($1 \text{ à } 2 \mu\text{m}$)
- CdTe : Tellure de cadmium
- CIS : Sélénure de cuivre-indium (CuInSe_2)
- CIGS : Sélénure de cuivre-indium-gallium (Cu(In,Ga)Se_2) [10]

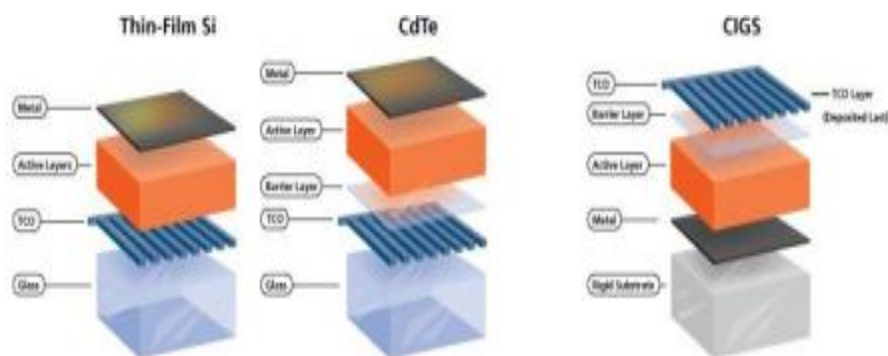


Fig I.7: Technologies des couches minces



Module flexible Unisolaire (68Wp, 1.12 m²)



Module rigide pointu (115Wp, 1.42 m²)

Fig I.8 : Deux exemples de modules utilisant les cellules amorphes

b) La technologie CIS (Cuivre-Indium-Sélénium)

Les cellules CIS constituent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, basées sur des matériaux tels que le cuivre, l'indium, le sélénium (CIS) ou encore le cuivre, l'indium, le gallium et le sélénium (CIGS). Contrairement aux cellules photovoltaïques classiques qui utilisent du silicium, les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus accessibles, même si le silicium est déjà abondant sur Terre. De plus, ces cellules présentent actuellement l'efficacité de conversion énergétique la plus élevée parmi les technologies de couches minces. Concernant la technologie CIS, elle est déjà fabriquée industriellement et son rendement est de 10 % environ. Sa fiabilité n'a pas été démontrée sur le très long terme.[\[10\]](#)

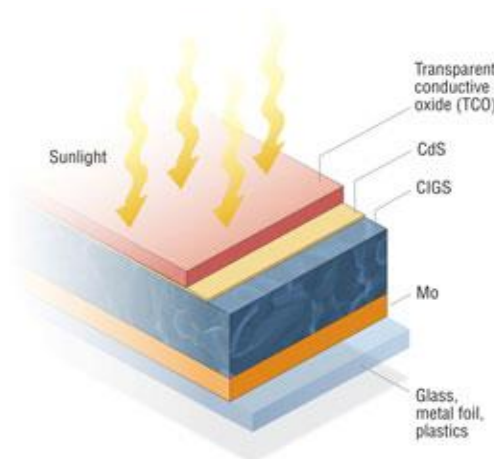


Fig I.9 : Technologies couches minces CIS [\[11\]](#)

c) La technologie CdTe (Tellurure de Cadmium)

La technologie CdTe est principalement produite par First Solar, avec des usines aux États-Unis, en Malaisie et en Allemagne. Prochainement, une nouvelle usine devrait voir le jour à Blanquefort, près de Bordeaux, en France. Cette installation sera cofinancée par EDF Énergies Nouvelles, qui se verra attribuer l'intégralité de la production pendant les dix premières années d'exploitation. Actuellement, le CdTe est largement utilisé pour les capteurs destinés aux centrales photovoltaïques au sol. Grâce à son coût compétitif, l'un des plus bas sur le marché, ainsi qu'à la grande capacité de production de First Solar, cette technologie répond efficacement à la demande croissante du secteur.[8]

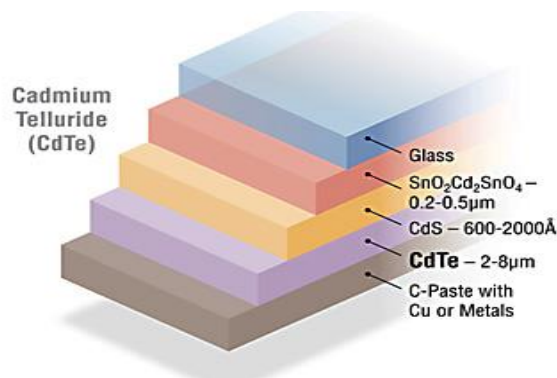


Fig I.10: Technologies couches minces CdTe [12]

d) Les cellules organiques et plastiques

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux semi-conducteurs organiques depuis 30 ans, mais ce n'est qu'en 1986 que l'équipe de Tang a atteint des rendements proches de 1 %, conformément aux prédictions faites par Merritt en 1978. Ces cellules se composent d'un bicouche moléculaire évaporée dans le vide. Il existe deux voies pour ces cellules : la voie des "cellules humides" et celle des polymères organiques ou "cellules plastiques". Bien que la technologie ait progressé rapidement et que les records d'efficacité (actuellement proches de 6 %) soient souvent battus, la stabilité et la durée de vie (actuellement d'environ 1000 heures) restent des obstacles importants.[13]



Fig I.11: Cellule solaire organique

Le tableau ci-dessous présente la comparaison des rendements des différents types de cellules.

Génération	Type de cellule	Rendement du module commercial	Modèle de prototype maximal	Les enregistrements dans le laboratoire
Premier	silicium monocristallin	12 à 20%	22,70%	24,70%
	Silicium multicristallin	11 à 15 %	16,20 %	20,30 %
Deuxièmement	Silicium cristallin secondaire (couchesminces)	7%	9,40 %	----
	Cellules amorphes (couches minces)	5 à 9 %	10,40 %	13,40 %
	Cdte (telluride de cadmium)	6 à 9 %	---	16,70 %
	CIS (Cuivre-Indium Sélénium), CGIS	26 – 29,5 %	13,50 %	19,30 %
	Cellule multijonction (technologie spatiale)	26 – 29,5 %	25 à 30 %	41 %
Troisièmes	Organes cellulaires	--	--	5 %

Tableau I.1 : Comparaison des rendements des différents types de cellules [13]

1.3.4. Avantages et inconvénients des générateurs PV

Aujourd'hui, le monde entier utilise l'énergie photovoltaïque pour produire de l'électricité, nous allons donc évoquer certains de ses avantages et inconvénients

a) Avantages

- ❖ La modularité des panneaux photovoltaïques offre la possibilité d'un assemblage simple et adaptable, répondant ainsi à divers besoins énergétiques.

- ❖ Les systèmes peuvent être conçus pour des applications allant de quelques milliwatts jusqu'à plusieurs mégawatts.
- ❖ La technologie photovoltaïque se distingue par ses avantages écologiques : le produit final est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation environnementale.
- ❖ Bénéficie également d'une grande fiabilité, car elle ne comporte aucune pièce mobile, ce qui la rend particulièrement robuste et durable.
- ❖ Leurs coûts de fonctionnement restent très faibles, grâce à des besoins en entretien limités. Ils n'exigent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé, ce qui en fait une solution économique et pratique à long terme.[14]

b) Inconvénients

- ❖ La fabrication des modules photovoltaïques repose sur des technologies avancées et nécessite des investissements coûteux.
- ❖ Le rendement réel de conversion de ces modules reste relativement faible, se situant entre 10 % et 15 %. Par conséquent, les générateurs photovoltaïques ne deviennent compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour de faibles besoins énergétiques dans les régions isolées.
- ❖ La source d'énergie n'est pas disponible de manière continue, étant dépendante des conditions météorologiques et du cycle jour/nuit.
- ❖ Les installations de grande envergure exigent une importante occupation de l'espace, ce qui peut représenter une contrainte dans certaines situations.[14]

1.4. Description des différents éléments de stockage

Les unités de stockage sont des composants essentiels dans les systèmes hors réseau, en particulier dans les configurations à faible énergie et gérées manuellement. Ces unités permettent de stocker l'énergie excédentaire produite par les sources d'énergie, qui peut ensuite être utilisée pendant les périodes de faible production ou lorsque les sources d'énergie sont inactives. Il existe différents types de systèmes de stockage, allant des sources à haute densité énergétique comme les piles à combustible, aux systèmes de stockage moyen comme les batteries, en passant par les sources à haute puissance spécifique comme les supercondensateurs. L'objectif principal du stockage d'électricité est de répondre à quatre défis clés :

- ❖ Récupérer l'énergie excédentaire produite au-delà de la demande immédiate.
- ❖ Fournir de l'énergie pour compenser les déficiences dues à l'intermittence d'approvisionnement.
- ❖ Assurer une fourniture d'énergie pour répondre aux pics de demande occasionnels.

- ❖ Offrir une alimentation en énergie en cas de panne du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.[15]

1.4.1. Différents types de stockage

La forme d'énergie intermédiaire peut être mécanique ou chimique. Ces diverses solutions sont brièvement présentées ici ainsi que leurs performances

1.4.1.1. Le stockage mécanique dans un volant d'inertie (Fly Wheel Energy Storage)

1.4.1.1.1. Définition et constitution

- a) **Définition** : Un volant d'inertie permet de stocker de l'énergie en convertissant de l'énergie cinétique de rotation en électricité et inversement. [16]
- b) **Constitution** : Les principaux composants d'un dispositif de stockage électromécanique inertiel sont schématisés (voir la **Fig I.12**).

Il se compose des éléments suivants :

- Un volant d'inertie (sous forme d'un anneau ou d'un tube massif)
- Des paliers assurant le soutien et la stabilité
- Une machine électrique permettant la conversion entre l'énergie mécanique et l'énergie électrique
- Une électronique de puissance associée pour gérer et contrôler le fonctionnement ;
- Une enceinte de protection pour isoler et sécuriser l'ensemble.

Le volant d'inertie tourne autour d'un axe, généralement fixe, afin de stocker l'énergie sous forme d'énergie cinétique grâce à sa masse et sa vitesse de rotation. [16]

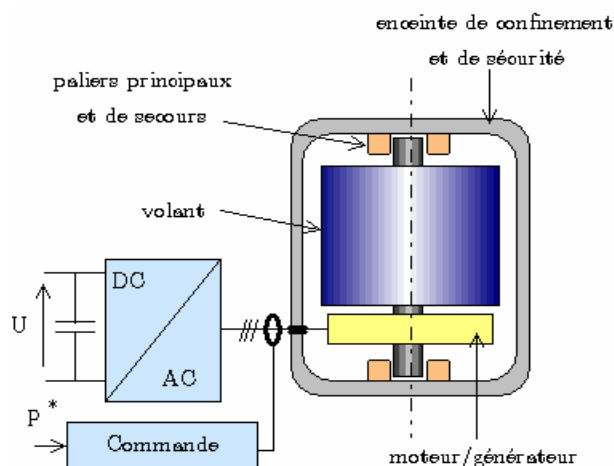


Fig I.12: Principe du Système de stockage d'énergie par volant d'inertie [16]

- c) Volant d'inertie** Le type de matériau constituant le volant et sa forme caractérisent en grande partie les capacités énergétiques théoriques de la partie active de l'accumulateur. L'énergie stockée dans un volant en rotation s'exprime sous la forme

$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \iiint V^2 dm \quad (\text{I.1})$$

Où J est le moment d'inertie des parties tournantes, Ω la vitesse de rotation et V la vitesse tangentielle de l'élément tournant dm . [16]

A titre d'exemple, le tableau suivant indique les moments d'inertie de quelques cas élémentaires.

Système élémentaire	Moment d'inertie
Masse M ponctuelle	mR^2
Cylindre plein de masse M	$\frac{1}{2} MR^2$
Cylindre creux de masse M	$\frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$
Barre de section rectangulaire de masse M et de longueur L tournant autour de son centre de gravité	$\frac{1}{12} ML^2$

Tableau I.2 : Moment d'inertie de quelques géométries [16]

d) Le moteur/générateur

Pour stocker et restituer cette énergie cinétique sous forme d'énergie électrique, le deuxième élément clé est le convertisseur électromécanique réversible, accompagné de son système électronique de puissance et de commande. Ces deux composants essentiels (volant + machine) peuvent être soit intégrés ensemble dans une unité unique, soit simplement connectés via un axe et un système d'accouplement. Les différentes topologies et architectures des machines électriques dédiées au stockage d'énergie sont illustrées dans (voir la Fig I.13). L'intégration entre le convertisseur et le volant, qui va au-delà des simples volumes de chaque composant mentionnés précédemment, repose sur l'adaptation de la structure électromagnétique à la forme générale du volant. Une structure disque-like (discoïde) globale, où la partie électromagnétique fonctionne avec un champ

axial (configurations c et d), semble être particulièrement avantageuse pour cette intégration. Cela s'explique par les contraintes mécaniques (comme les vitesses périphériques élevées) et électromagnétiques (liées à la surface active d'entrefer [16])

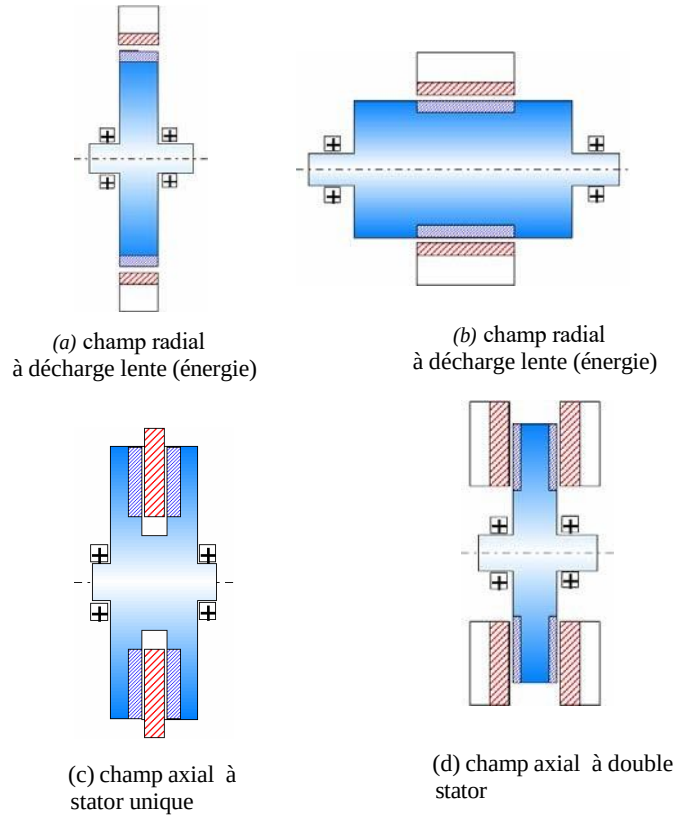


Fig I.13 : Architectures intégrées de machine électrique possibles pour le stockage inertiel [16]

e) Les paliers. Les paliers des systèmes de stockage d'énergie par volants inertie se classent en deux types : mécaniques (à billes) et magnétiques (actifs, passifs ou supraconducteurs). Les paliers mécaniques, bien qu'économiques, sont sujets à l'usure et engendrent des pertes significatives, tandis que les paliers magnétiques, bien que coûteux, sont préférés pour les applications nécessitant des durées de stockage supérieures à 24 heures. L'enceinte de confinement assure la protection contre les éventuelles défaillances du volant, nécessitant une grande résistance mécanique pour supporter la différence de pression (l'intérieur étant sous vide pour réduire les pertes aérodynamiques). Le volant est accéléré ou ralenti par un moteur-générateur électrique, qui permet la conversion réversible entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique lors des cycles de charge et décharge [16]

1.4.1.1.2. Principe de fonctionnement :

Comme en partie indiquée précédemment, le Le Système Inertiel de Stockage d'Energie (SISE) est composé d'un volant d'inertie, d'un moteur – générateur et d'un convertisseur d'électronique de puissance (voir la **Fig I.14**)

- Phase de stockage : L'énergie électrique excédentaire alimente un moteur qui la convertit en énergie cinétique, accroissant ainsi la vitesse de rotation de la masse.
- Phase stationnaire : Après l'arrêt de l'alimentation, la masse continue à tourner grâce à la conservation de l'énergie. Seules de faibles quantités d'énergie sont nécessaires pour compenser les pertes dues aux frottements.
- Phase de déstockage : Le générateur transforme l'énergie mécanique stockée en électricité, ce qui ralentit progressivement la masse.[17]

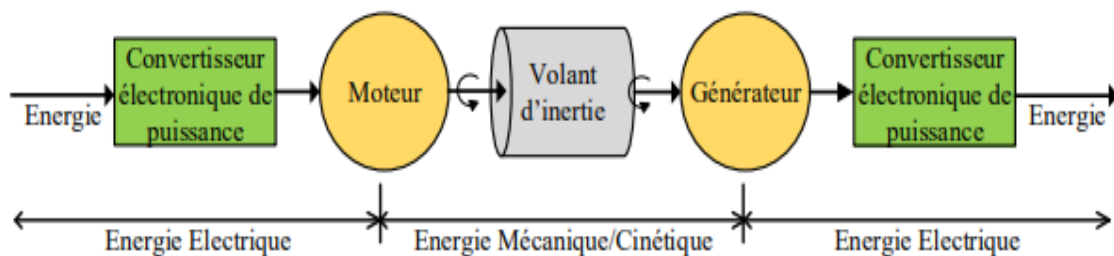


Fig I.14 : Chaîne de conversion de l'énergie dans un SISE

En général, le moteur et le générateur forment un même composant, c'est-à-dire une machine électrique, capable de fonctionner dans ces deux modes. Le convertisseur de puissance permet d'imposer à la machine électrique le sens de transfert de l'énergie en la faisant fonctionner dans un mode ou dans l'autre [17]

1.4.1.1.3. Avantages

- ❖ Haut rendement (environ 80 % de l'énergie absorbée peut être restituée).
- ❖ Phase de stockage rapide par rapport à une batterie électrochimique.
- ❖ Temps de réponse très court, permettant de réguler la fréquence du réseau.
- ❖ Aucune pollution : ni combustible fossile, ni produits chimiques.
- ❖ Technologie fiable nécessitant peu d'entretien. [17][16]

1.4.1.1.4. Inconvénients

- ❖ Temps de stockage limité (environ 15 minutes)
- ❖ Le stockage d'énergie par volant d'inertie est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système, il ne permet pas d'obtenir une durée d'autonomie importante comme les batteries électrochimiques ou le stockage d'énergie par pompage/turbinage [17][16]

1.4.1.2. Le stockage chimique dans un accumulateur électrochimique

Les accumulateurs utilisent des réactions électrochimiques entre deux électrodes via un électrolyte pour stocker et restituer l'énergie. Une grande densité énergétique nécessite des matériaux légers, un fort échange d'électrons, et une réversibilité complète des réactions [18].

1.4.1.2.1. Principe de fonctionnement

Les accumulateurs électrochimiques constituent la solution de stockage la plus répandue pour des applications de faible envergure. Ils s'appuient sur des technologies avancées et économiques, permettant de convertir l'énergie électrique en énergie chimique pendant la charge via des réactions d'oxydo-réduction, puis de la restituer efficacement lors de la décharge, avec un rendement pouvant atteindre environ 85 %. Ces batteries comprennent deux électrodes principales (anode et cathode) plongées dans des solutions ioniques et séparées par un électrolyte non réactif. (Voir la **Fig I.15**)

- Lors de la charge : Une réaction d'oxydation se produit à la cathode, entraînant la perte d'électrons qui transitent par le circuit externe jusqu'à l'anode, où ils provoquent une réduction des molécules présentes. Les ions produits migrent vers leurs solutions respectives pour maintenir l'équilibre électrolytique.
- Lors de la décharge : Les réactions inverses ont lieu, avec un flux d'électrons allant de l'anode vers la cathode, libérant ainsi l'énergie stockée tout en réduisant progressivement les concentrations ioniques dans les solutions. L'électrolyte retrouve alors sa composition initiale.[19]

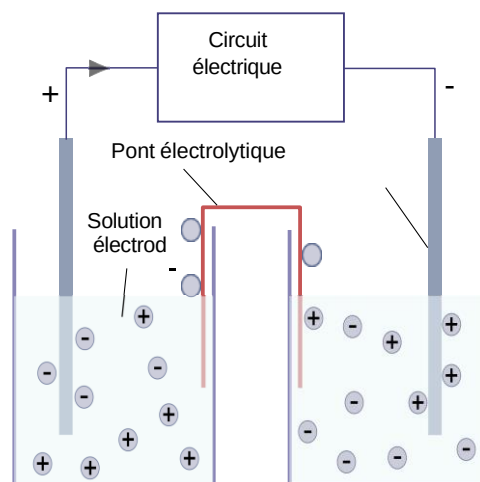


Fig I.15 : Réactions chimiques dans une cellule en Plomb

1.4.1.2.2. Batterie Plomb-acide

La batterie au plomb-acide, inventée en 1859 par le physicien Gaston Planté, est la plus ancienne technologie de stockage électrochimique rechargeable. Cette solution largement utilisée et économique utilise des électrodes en plomb et dioxyde de plomb avec un électrolyte d'acide sulfurique pour produire de l'énergie électrique grâce à des réactions chimiques. Les batteries au plomb-acide sont connues pour leur fiabilité et leur capacité à délivrer de forts courants, ce qui les rend adaptées à diverses applications. Cependant, elles présentent des limitations en termes de densité énergétique et nécessitent un entretien régulier pour garantir une performance optimale et une durée de vie prolongée. Le **Tableau I.3** ci-dessous résumé ces caractéristiques [20]

Durée de vie (année)	4 – 5
Nombre de cycle de vie	800
Rendement charge/décharge (%)	50
Autodécharge (%)	5
Tension nominale par élément (V)	2,1
Résistance interne (Ohm)	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	30 – 50
Énergie volumique (Wh/l)	75 – 120
Temps de charge (h)	8

Tableau I.3 : Caractéristiques de l'accumulateur au plomb [20]

1.4.1.2.3. Batterie Ni-Cd

Ce type d'accumulateur, plus récent que celui au plomb, présente de nombreux avantages. Il peut effectuer un grand nombre de cycles de charge/décharge, possède une résistance interne très faible qui minimise les pertes de puissance, et son stockage est simple, s'adaptant à différents

niveaux de charge. De plus, il se recharge rapidement (jusqu'à 60 % de sa capacité totale en seulement 20 minutes). Cependant, ces avantages technologiques par rapport aux batteries au plomb se traduisent par un coût trois fois supérieur. De plus, la toxicité du cadmium constitue un inconvénient majeur pour cet accumulateur. Il présente également une faible densité énergétique, se décharge relativement rapidement et est sensible à l'effet de mémoire. Les caractéristiques de cette batterie sont résumées dans le **tableau I.4** [20]

Durée de vie (année)	2 – 3
Nombre de cycle de vie	1200
Rendement charge/décharge (%)	70 – 90
Autodécharge (% par mois)	15
Tension nominale par élément (V)	1,2
Résistance interne (Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1Ah
Température en fonctionnement (°C)	–40a + 80
Énergie massique (Wh/kg)	45 – 80
Énergie volumique (Wh/l)	80 – 150
Temps de charge (h)	1

Tableau I.4 : Caractéristiques de l'accumulateur au Ni-Cd [20]

1.4.1.2.4. Batterie NiMH

Contrairement aux deux types précédents, cet accumulateur est écologique car il ne contient ni cadmium ni plomb. Il offre une meilleure capacité de stockage d'énergie que le Ni-Cd et présente une faible sensibilité à l'effet mémoire. Globalement, ses performances surpassent celles du Ni-Cd, bien qu'il souffre d'un taux d'autodécharge plus élevé et d'une durée de vie réduite en termes de cycles de charge/décharge (De plus, il est difficile de détecter précisément la fin de charge, et il ne tolère pas le surchargement. Les principales caractéristiques de cette batterie sont résumées dans le **tableau I.5.** [20]

Durée de vie (année)	2 – 4
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	66
Autodécharge (% par mois)	20
Tension nominale par élément (V)	1,2
Résistance interne (Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1Ah
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	60 – 110
Énergie volumique (Wh/l)	220 – 330
Temps de charge (h)	1

Tableau I.5 : Caractéristiques de l'accumulateur NiMH [20]

1.4.1.2.5. Batterie Li-ion

Ce modèle ne souffre d'aucun effet mémoire et présente un faible taux d'autodécharge, Bien qu'il soit exempt d'entretien, sa durée de vie reste limitée, principalement en raison de facteurs tels que le vieillissement, l'usure ou la corrosion, même lorsqu'il n'est pas utilisé. Paradoxalement, il offre un nombre correct de cycles de vie. Des recherches sont actuellement menées pour

surmonter cette limitation, notamment en modifiant la structure de l'électrode, ce qui contribue à améliorer ses performances de manière significative.

Son principal atout réside dans sa haute densité énergétique, due à son grand potentiel électrochimique. Le lithium, étant un métal léger, confère également à cet accumulateur un avantage en termes de poids. Cependant, sa principale faiblesse est liée à la sécurité : une surchauffe peut entraîner une explosion.

Pour pallier ce risque, un système de protection doit être intégré à la batterie. Une autre solution développée consiste à adopter un accumulateur Li-Polymère, qui offre des garanties supplémentaires en matière de sécurité. Toutefois, malgré cet avantage, le Li-Polymère ne répond pas encore pleinement aux exigences en termes de performance.

Sont résumées dans le **tableau I.6**[\[20\]](#)

Durée de vie (année)	7
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	90
Autodécharge (% par mois)	2
Tension nominale par élément (V)	3,6
Résistance interne (Ohm)	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	90 – 180
Énergie volumique (Wh/l)	220 – 400
Temps de charge (h)	2 – 3

Tableau I.6 : Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion [\[20\]](#)

1.4.1.3. Comparaison des types de batteries

	Plomb	Ni – Cd	NiMH	Li-ion
Durée de vie (année)	4-5	2-3	2-4	7
Nombre de cycle de vie	800	1200	1000	1000
Rendement charge/décharge (%)	50	70-90	66	90
Autodécharge (% par mois)	5	15	20	2
Tension nominale par élément (V)	2,1	1,2	1,2	3,6
Résistance interne (Ohm)	Très faible	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante	-40 a +80	Ambiante	Ambiante
Énergie massique (Wh/ kg)	30-50	45-80	60-110	90-180
Énergie volumique	75-120	80 – 150	220-330	220-400
Temps de charge (h)	8	1	1	2-3

Tableau I.7 : Comparatif des technologies d’accumulateur utilisé [20]

1.4.1.4. Stockage électrostatique : Les supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage électrochimique conçus pour une très longue durée de vie. Grâce à leurs densités d'énergie et de puissance, ils occupent une position intermédiaire entre les batteries et les condensateurs diélectriques classiques.

Un supercondensateur se compose de deux électrodes poreuses, généralement fabriquées en carbone activé, immergées dans un électrolyte liquide et séparées par un matériau isolant perméable aux ions mais imperméable aux électrons. L'interaction entre les électrodes et l'électrolyte provoque une accumulation naturelle de charges aux interfaces, formant ce que l'on

appelle une double couche électrochimique, composée d'une couche de charges positives et d'une couche de charges négatives.

Le fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface entre un électrolyte et une électrode polarisable à grande surface spécifique. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, des charges s'accumulent électrostatiquement aux interfaces électrode-électrolyte.[18]

Ce principe peut être décrit selon quatre états :

- A. Déchargé** : Aucune charge ni tension.
- B. En charge** : Les ions migrent vers les électrodes, formant des couches chargées.
- C. Chargé** : Les interfaces sont saturées de charges, stabilisant la tension.
- D. En décharge** : Les charges sont libérées, restituant l'énergie stockée

A. Etat déchargé

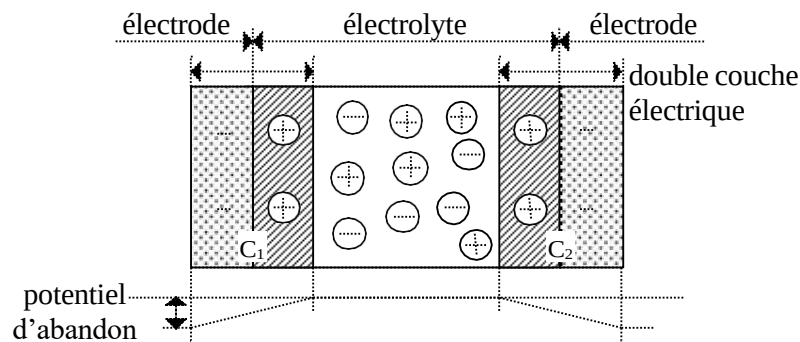


Fig I.16: Etat déchargé du super condensateur [18]

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q^{el}) que du côté de l'électrolyte (q^{ion}). q^{el} et q^{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électroneutralité impose $q^{el} = -q^{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique [18]

B. En charge

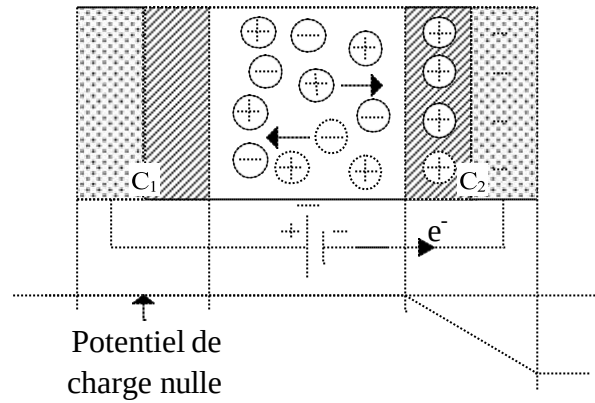


Fig I.17: Etat Chargé du super condensateur [18]

Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux bornes du supercondensateur, la répartition des charges aux deux interfaces change. L'une des interfaces atteint son potentiel de charge nulle, tandis que l'autre voit une augmentation de l'accumulation de charges. Cela entraîne une élévation du potentiel global. [18]

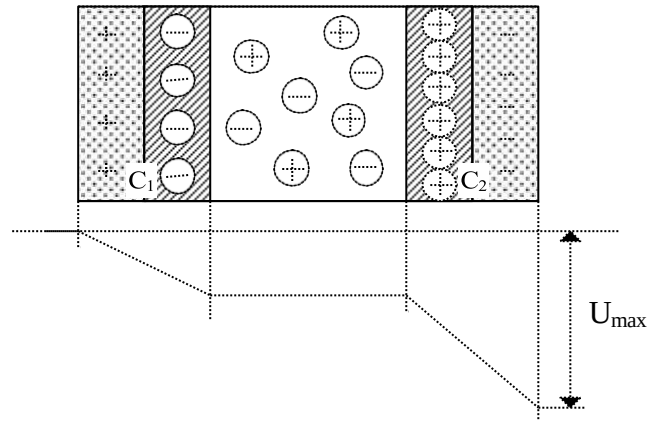


Fig I.18 : Etat chargé au maximum du super condensateur [18]

C. Etat chargé

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale U_{max} du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type $Q = CU$. A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série et est donc donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (I.2)$$

D. En décharge

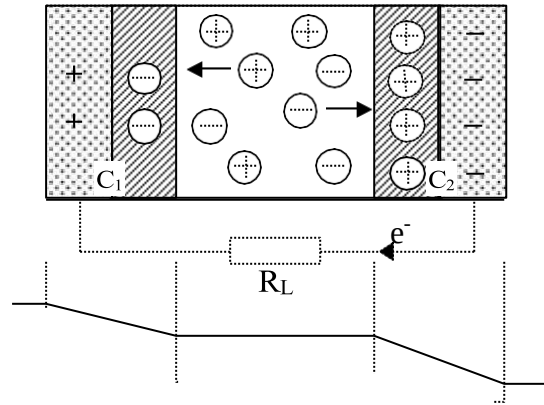


Fig I.19: Etat de Décharge [18]

Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur

Electrode	Charbon actif		Matériau Métallique	Polymère Conducteur
Electrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Moyen de stockage De l'énergie	Condensateur de double Couche		Double couche + processus Faradiques réversibles	
Energie massique (Wh/kg)	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique (kW/kg)	1 à 10	0.1 à 2	10 à 100	100
Capacité massique (F/g)	120 à 180	60 à 100	600	200 à 400
Tension (V)	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5
Cyclabilité	> 100000	> 100000	> 100000	10000 à 100000

Tableau I.8 : Les différents types de supercondensateur [18]

1.4.2. Caractéristiques des sources d'énergie électrique dédiées au stockage :

Dans les systèmes multi-sources dédiés aux applications de transport, plusieurs technologies de stockage d'énergie électrique sont employées. Leur principe repose sur la transformation de l'énergie électrique en une autre forme plus stable avant le stockage, puis sa conversion inverse lors de la restitution. Nous examinons ici trois solutions principales : les batteries, les supercondensateurs et volant d'inertie, chacune caractérisée par des critères spécifiques pour évaluer leur performance

- Densité d'énergie : mesure la quantité d'énergie stockée par unité de masse (Wh/kg), sachant que la densité théorique peut être réduite par les pertes inhérentes aux transformations et à la profondeur de décharge.
- Densité de puissance : indique la puissance produite par kilogramme (W/kg).
- Durée de vie : représente le nombre maximal de cycles de charge/décharge possibles, un paramètre crucial mais complexe à évaluer en raison de facteurs comme la température, la fréquence d'utilisation et les pics de puissance.
- Coût : inclut les coûts d'acquisition et de maintenance (exprimés en €/kWh).
- Sécurité : évalue les risques potentiels liés à l'utilisation de la technologie.
- Recyclabilité : mesure la facilité avec laquelle l'unité de stockage peut être recyclée ou réutilisée après sa fin de vie.

Le rapport entre la densité de puissance et la densité d'énergie correspond à une fréquence, ce qui permet de classer les différentes technologies de stockage d'énergie électrique en fonction de leur réponse dynamique. Cette classification est connue sous le nom de « diagramme de Ragon », illustré par exemple (voir la **Fig I.22**). Ce diagramme est largement utilisé pour comparer les solutions de stockage en se basant uniquement sur les densités de puissance et d'énergie, sans prendre en compte les autres caractéristiques détaillées précédemment.

Cependant, certaines références proposent une comparaison plus complète selon les six critères mentionnés (densité d'énergie, densité de puissance, durée de vie, coût, sécurité, recyclabilité). Ce type de représentation graphique, appelé « diagramme d'araignée », offre une vue plus globale des performances. Un exemple de diagramme d'araignée comparant les batteries et les supercondensateurs est présenté (voir la **Fig I.20**) [21]

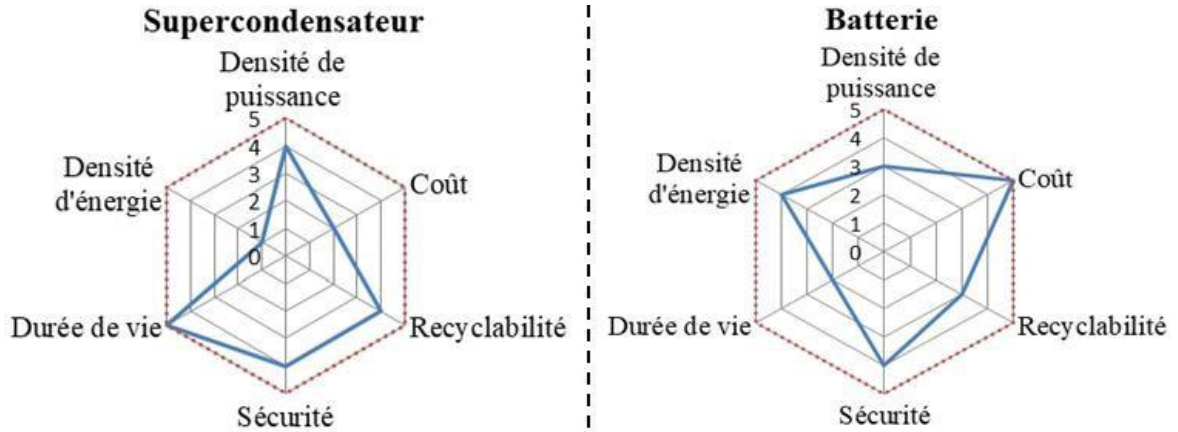


Fig I.20 : Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs [21]

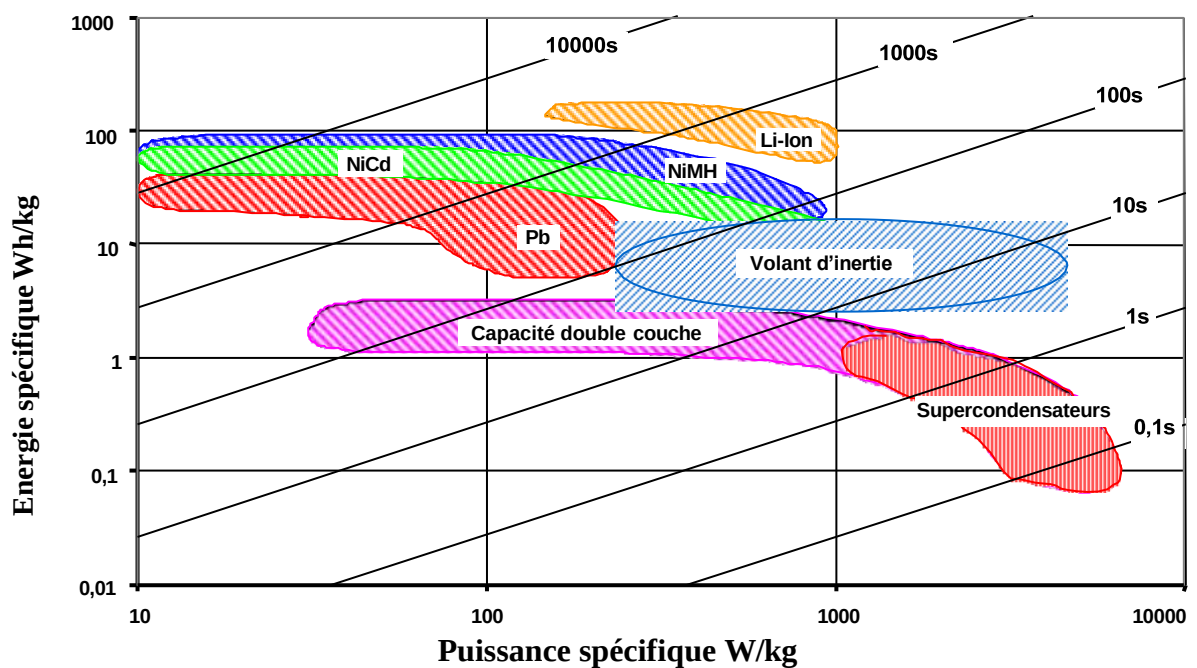


Fig I.21 : Plan de Ragone [18]

1.4.3. Domaine d'utilisation du système de stockage

Types de stockage	Domaine
Volant d'inertie	- Régulation de fréquence, - Lissage de la production éolienne et solaire, - Stockage et restitution de l'énergie de freinage des véhicules
Batterie	Véhicules électriques (EVs) : Les batteries lithium-ion sont aujourd'hui la technologie dominante pour alimenter les véhicules électriques, offrant une autonomie et une performance élevées

	• Hybrides rechargeables (PHEVs) : Combinaison de moteurs thermiques et électriques, où les batteries stockent l'énergie pour les phases de propulsion électrique • Intégration des énergies intermittentes : Les batteries stabilisent la production des sources renouvelables comme le solaire et l'éolien en stockant l'énergie excédentaire pour une utilisation ultérieure
Supercondensateurs	• Informatique et télécommunication • Source de puissance constituée uniquement par le banc supercondensateurs, le but étant de montrer l'aptitude du banc à couvrir à lui seul les transitoires de puissance imposés par la charge. • Utilisation en véhicule Electrique

Tableau I.9 : Domaine d'utilisation du système de stockage [21][22][23]

1.5. Systèmes hybrides

1.5.1. Définition

Un SHSER (Système Hybride de Production d'Énergie Renouvelable) intègre plusieurs sources d'énergie renouvelable (EnR), souvent combinées avec une source conventionnelle ou un élément de stockage pour assurer une production énergétique continue. L'élément de stockage joue un rôle crucial en captant l'énergie excédentaire produite et en la restituant lors des périodes de déficit énergétique

Dans la plupart des cas, les SHSERs fonctionnent en mode hors réseau(off-grid), étant principalement déployés dans des zones isolées qui ne disposent pas d'un accès aux réseaux électriques de distribution. Ces systèmes sont conçus et dimensionnés en fonction des besoins énergétiques spécifiques des charges connectées, en privilégiant l'utilisation de l'énergie issue des sources renouvelables par rapport à celle des sources conventionnelles, afin de maximiser leur efficacité écologique et économique [24]

1.5.2. Classification des systèmes hybrides

Due à l'intérêt croissant pour les SHSERs, diverses architectures et configurations ont été développées. Ces systèmes peuvent être classifiés selon trois critères principaux :

- Le régime de fonctionnement (on-grid ou off-grid),

- Le type des sources d'énergie exploitées (solaire, éolien, etc.),
- La configuration du bus commun dans le système.

Cette classification est illustrée schématiquement (voir la **FigI.22**).

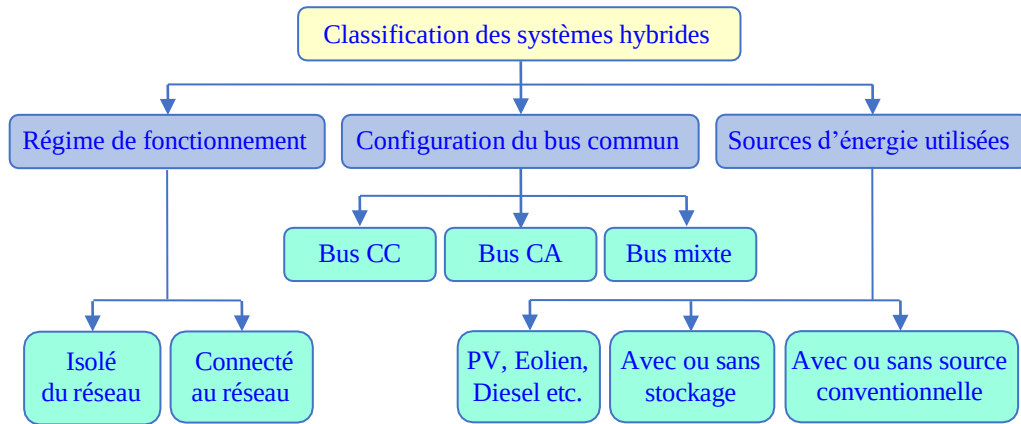


Fig I.22 : Classification des systèmes hybrides [24]

a) Selon le régime de fonctionnement :

- **Les systèmes hybrides connectés au réseau (on-grid) :** sont des SHSERS qui interagissent avec le réseau électrique via des convertisseurs statiques (onduleurs ou redresseurs). Ils permettent d'injecter l'excédent d'énergie produite dans le réseau et, en cas de déficit, de tirer l'énergie nécessaire du réseau pour alimenter les charges connectées.
- **Les systèmes hybrides isolés (off-grid) :** Sont des SHSERS autonomes qui fonctionnent indépendamment du réseau électrique de distribution. Ils fournissent de l'énergie sans recourir au réseau, principalement pour desservir des zones éloignées ou inaccessibles, comme les villages isolés, les refuges de montagne ou les îles. Ces systèmes doivent satisfaire entièrement les besoins énergétiques des consommateurs locaux.[25][24]

b) Selon les sources d'énergie exploitées : Selon la nature des sources d'énergie utilisées, trois critères peuvent être pris en compte pour classifier les systèmes hybrides

- **Présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle :** Une source conventionnelle (turbine à gaz, générateur diesel) peut être intégrée pour assurer une production énergétique continue lorsque les sources d'EnR ne suffisent pas. Elle est utilisée uniquement en cas de déficit énergétique.
- **Présence ou non d'un dispositif de stockage :** Un dispositif de stockage permet de lisser l'alimentation en énergie, en absorbant l'excédent ou en compensant le déficit. Il est

essentiel dans les systèmes isolés pour découpler les sources et les charges, tandis que dans les systèmes connectés au réseau, le stockage n'est pas toujours nécessaire car le réseau joue ce rôle.

- **Type de sources d'EnR exploitées :** Le choix des sources renouvelables dépend du potentiel énergétique local et de l'application visée. Plusieurs sources peuvent être combinées pour optimiser la performance du système hybride.

c) Selon la configuration du bus commun :

- **Système hybride avec un bus CC (courant continu) :** Est configuré de manière à connecter toutes les composantes (sources d'énergie, stockage et charges) à un bus CC commun. Les sources CC, comme les panneaux PV, sont reliées directement ou via un convertisseur CC/CC, tandis que les sources CA (éoliennes, générateurs diesel) nécessitent des redresseurs CA/CC pour s'interfacer avec le bus. Cette architecture convient aux applications fonctionnant en CC (recharge de batteries) mais peut également alimenter des charges CA grâce à des onduleurs CC/CA. Des convertisseurs bidirectionnels sont utilisés pour permettre l'échange d'énergie entre les éléments capables de générer et de recevoir de l'énergie (stockage, réseau). [24]
- **Un système hybride avec un bus CA (courant alternatif) :** connecte toutes les sources d'énergie à un bus CA commun via des convertisseurs spécifiques (CA/CA ou CC/CA). Cette configuration modulaire offre une grande flexibilité, permettant de relier directement les sources de production au réseau électrique ou aux charges CA. Les convertisseurs CC/CA et CA/CC assurent les échanges d'énergie entre les composants du système. [24]
- **Un système hybride avec un bus mixte :** combine les structures à bus CA et CC en créant deux bus distincts. Les charges CA sont alimentées par des sources CA via le bus CA, tandis que les charges CC sont servies par des sources CC via le bus CC. Cette configuration réduit les pertes de conversion (CC/CA ou CA/CC) et améliore l'efficacité énergétique du système. Cependant, la gestion et le contrôle de l'énergie sont plus complexes comparés aux configurations classiques. La figure 1.4 illustre un exemple avec deux bus : un pour CC et un pour CA, interconnectés par un convertisseur CC/CA bidirectionnel pour faciliter les échanges d'énergie. [25][24]

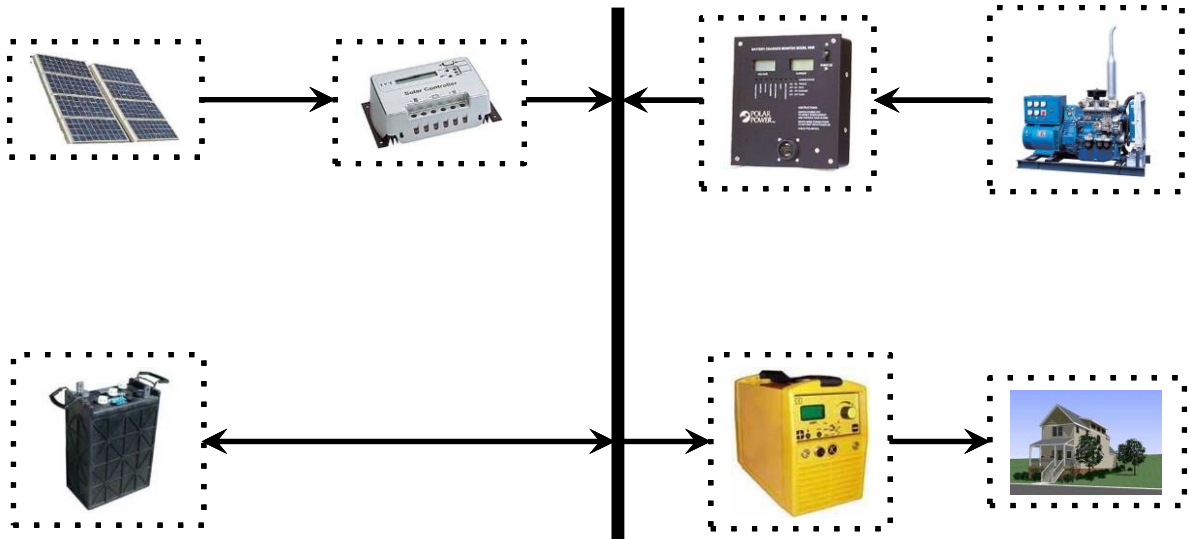


Fig I.23 : Système hybride avec connexion série [27]

1.5.3. Les Avantages :

- Durabilité: Les systèmes hybrides réduisent la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables, ce qui profite à l'environnement et diminue les émissions de carbone.
- Faible Entretien : Les panneaux solaires nécessitent peu d'entretien, tandis que les dispositifs de stockage peuvent être entretenus relativement facilement.
- Flexibilité : Ces systèmes peuvent être installés dans divers emplacements, tels que les toits, les terrains ouverts et les zones reculées.

1.5.4. Les Inconvénients

- Coût Initial Élevé : Le coût d'installation des systèmes hybrides peut être élevé, surtout pour les projets à grande échelle.
- Dégradation des Performances : La capacité de stockage des batteries et autres dispositifs peut diminuer avec le temps, affectant leur efficacité.
- Élimination des Batteries : L'élimination des batteries peut avoir des impacts environnementaux négatifs si elle n'est pas gérée correctement. [27]

1.5.5. Stratégies de la gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie consiste en la répartition des flux de puissance entre les différents composants d'un système hybride. Plusieurs stratégies ont été proposées dans la littérature, variant selon la composition du système multi-sources et ses objectifs spécifiques. Ces approches

sont principalement basées sur trois méthodes : des modèles mathématiques, l'expertise humaine ou des simulations. Chacune de ces bases permet d'optimiser la distribution de l'énergie en fonction des contraintes et des performances attendues du système. Les stratégies de gestion de l'énergie peuvent être classées en deux grandes familles (voir la **FigI.24**) :

- Stratégies à base de règles
- Stratégies basées sur l'optimisation [26]

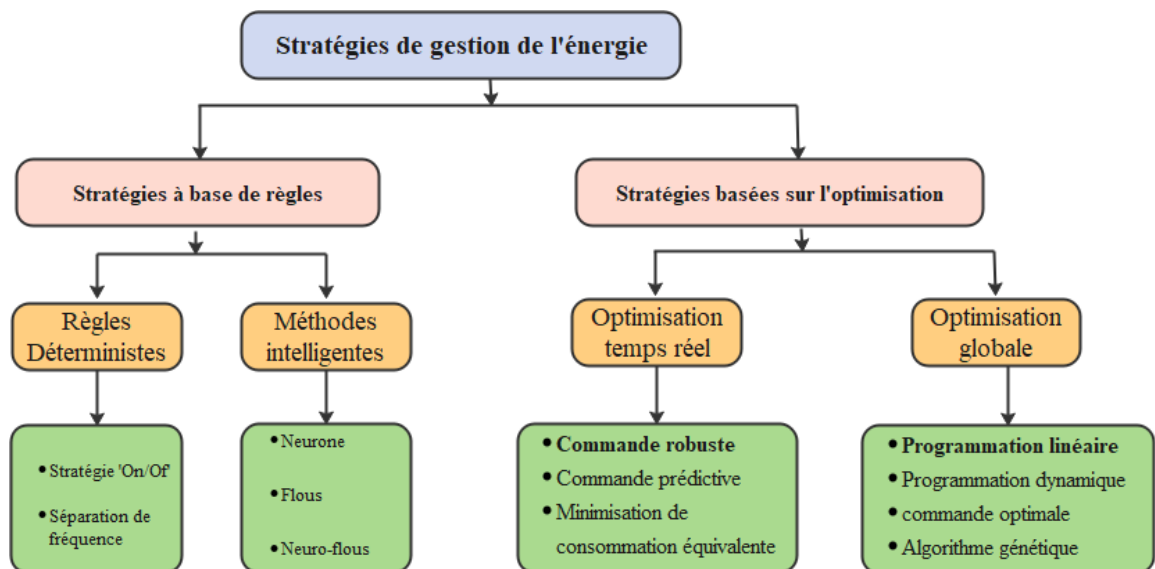


Fig I.24 : Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie.

1.6. Conclusion

Ce chapitre fournit un aperçu complet à la fois de l'énergie photovoltaïque et des batteries. Nous avons discuté du principe de conversion photovoltaïque, y compris ses avantages et inconvénients, les phénomènes physiques de base et leurs propriétés fondamentales. De plus, nous avons approfondi notre analyse des batteries en explorant leurs différents types et caractéristiques. Enfin, une brève description des systèmes hybrides a été présentée. Le chapitre suivant traitera de la modélisation explicite du système hybride autonome choisi, avant d'aborder les différentes approches de contrôle applicables à ce type de système.

Chapitre II
Modélisation du système hybride
PV-batterie

2.1.Introduction

La gestion efficace des systèmes dépend de l'étude de la manière dont le système interagit avec différentes entrées, ce qui peut être réalisé en effectuant des simulations numériques basées sur des modèles clairs et précis. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons dans un premier temps sur la conception de modèles pour les sources primaires telles que les panneaux solaires et les batteries au plomb-acide. Ensuite, nous aborderons la modélisation mathématique des convertisseurs électroniques statiques, y compris les convertisseurs DC-DC boost et Buck-boost. Ces modèles constituent un outil essentiel pour analyser le système et améliorer ses performances, contribuant ainsi à son efficacité et à sa stabilité dans l'application pratique.

Dans le cadre de cette étude, un système hybride combinant un panneau solaire et une batterie pour alimenter une charge fixe est présenté, comme la montre (voir la **Fig II.1**). Pour obtenir une gestion efficace de l'alimentation et un contrôle du système, chaque source est équipée de son propre convertisseur DC-DC. Le fonctionnement optimal du panneau solaire est assuré par un réglage précis du rapport cyclique du convertisseur qui lui est connecté. De même, le convertisseur côté batterie est un convertisseur DC-DC bidirectionnel, permettant au courant de circuler dans les deux sens pour charger ou décharger la batterie selon les besoins.

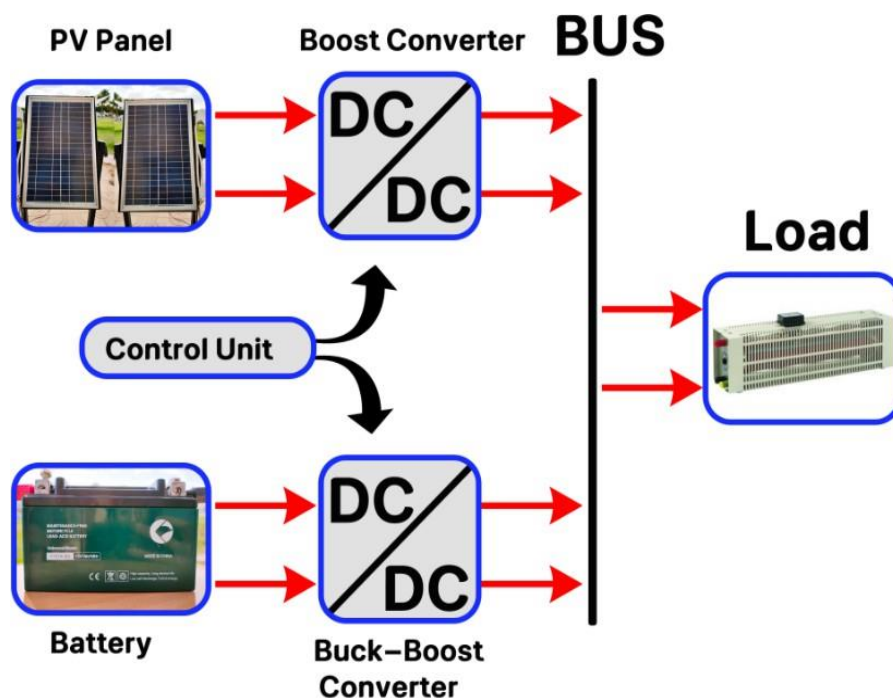


Fig II.1 : schéma synoptique du système hybride étudié [28]

2.2. Modélisation du panneau PV

2.2.1. Modélisation d'une cellule solaire

La littérature contient plusieurs modèles pour représenter une cellule photovoltaïque (PV). Parmi ces modèles, le modèle à une seule diode se distingue comme étant le plus utilisé. Ce modèle est largement adopté grâce à son équilibre entre simplicité et précision, ce qui le rend approprié pour la plupart des applications, telles que l'analyse des performances d'une installation PV. Il est considéré comme un outil essentiel dans la conception et la simulation des systèmes solaires, permettant de prédire les performances sous diverses conditions environnementales et opérationnelles. De plus, les modèles de panneaux photovoltaïques varient des modèles simples à une seule diode aux modèles complexes à plusieurs diodes, et le choix du modèle approprié dépend de la précision requise et de l'effort de calcul nécessaire. [28][24]

Les générateurs photovoltaïques sont considérés ni sources de tension ni de courant, mais ils peuvent être estimés comme des générateurs de courant contrôlés en tension

Le modèle implicite à quatre paramètres (I_{PV} , R_s , V_{th} , I_o) reflète avec une exactitude notable, la caractéristique courant-tension :

$$I_{PV} = I_{cc} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (\text{II. 1})$$

Cette caractéristique peut être illustrée par le schéma équivalent de la (voir la **FigII.2**), composé par un générateur de courant variable, monté en parallèle avec une diode D caractérisant la jonction et une résistance R_s représentant les pertes par effets joule

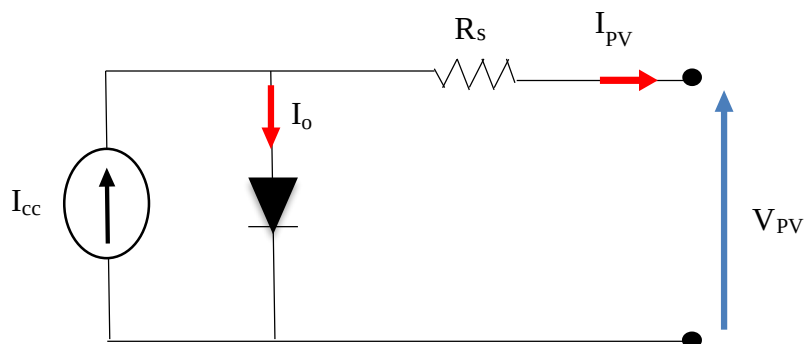


Fig II.2 : Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque

La tension thermique V_{th} et le courant d'obscurité I_o s'identifient par :

$$I_o = (I_{cc} - I_{op}) \exp \left[-\frac{(V_{op} - R_s I_{op})}{V_{th}} \right] \quad (II.2)$$

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{oc}}{\log \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right)} \quad (II.3)$$

Chaque module se compose de plusieurs cellules, et l'assemblage de plusieurs modules solaires en série, et/ou en parallèle constitue le générateur photovoltaïque. Les paramètres du générateur sont liés à ceux du module par les relations suivantes [26] :

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc}(\text{module}). \quad (II.4)$$

$$V_{th} = N_s \cdot V_{th}(\text{module}) \quad (II.5)$$

$$r_s = (N_s/N_p) \cdot R_s(\text{module}). \quad (II.6)$$

$$I_o = N_p \cdot I_o(\text{module}). \quad (II.7)$$

$$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc}(\text{module}). \quad (II.8)$$

$$V_{op} = N_s \cdot V_{op}(\text{module}) \quad (II.9)$$

La température T de la cellule PV peut être estimée à partir de la température ambiante T_a et de l'ensoleillement E qu'elle reçoit en utilisant l'équation suivante [24] :

$$T = T_a + \frac{E}{800} (NOCT - 20) \quad (II.10)$$

Où NOCT (*nominal operating cell temperature*) est la température de la cellule sous un éclairement de 800 W/m² et une température ambiante de 20 °C

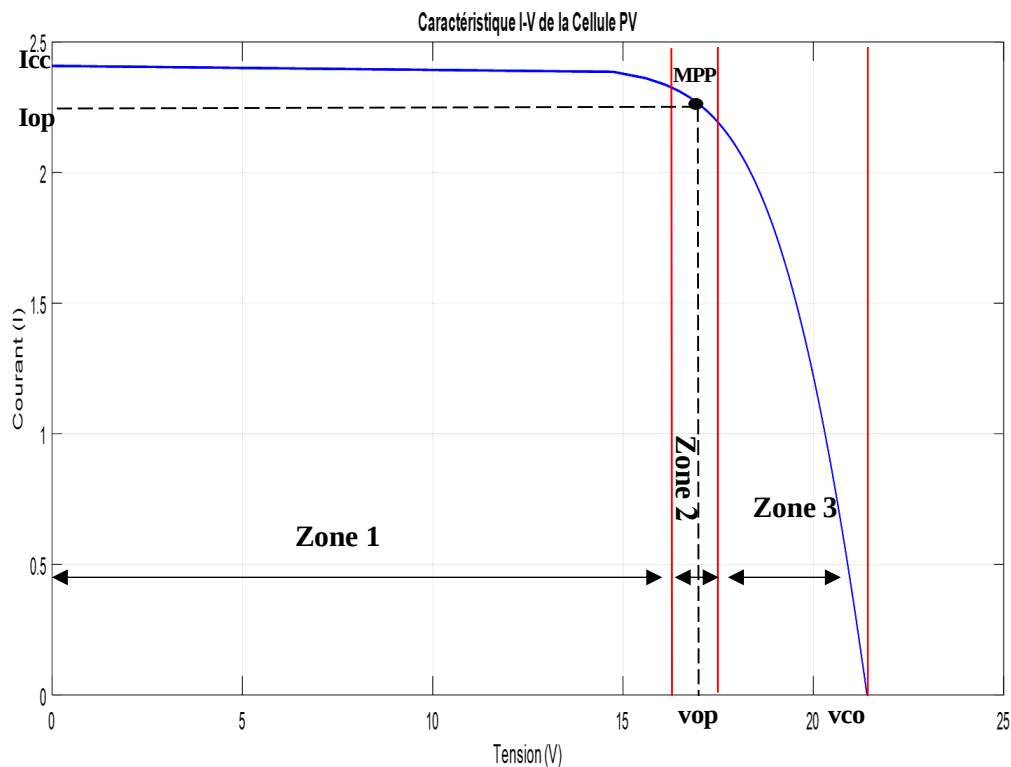
2.2.1.1. Caractéristique I-V :

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque (PV) est un paramètre fondamental qui décrit la relation entre le courant (I) et la tension (V) produite par le panneau selon différentes conditions de fonctionnement. Elle indique le comportement du panneau en tant que source de courant à divers niveaux d'ensoleillement et de température. Le point de puissance maximale (MPP), où le panneau opère avec son efficacité optimale, est généralement représenté par un

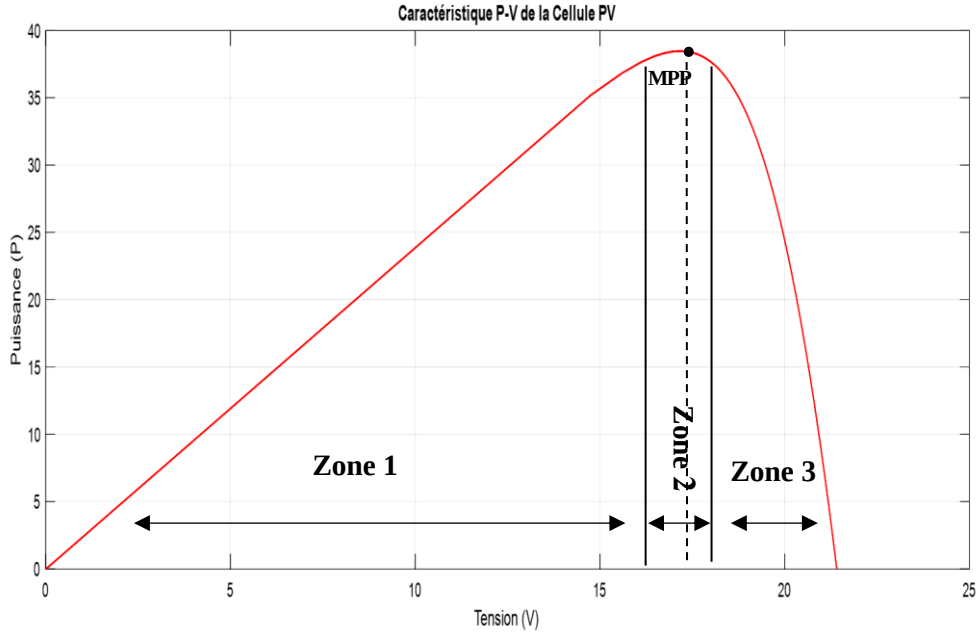
point critique sur la courbe I-V. La conception et l'optimisation des systèmes PV reposent largement sur la compréhension de cette caractéristique I-V

Les (voir la **Fig II.3.a** et **Fig II.3.b**) illustrent respectivement les caractéristiques de courant et de puissance, sous forme de cloche. Sur ces caractéristiques, trois zones de fonctionnement sont distinguées.

- **Zone 1** : elle est assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- **Zone 2** : elle correspond au coude de cette caractéristique, où le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées. Un point optimum de puissance « *MPP* » (maximum power point) peut être identifié au point (I_{op}, V_{op}) , permettant d'exploiter au mieux le gisement solaire.
- **Zone 3** : elle est assimilable à un générateur de tension, où le fonctionnement dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées [29]



a) Caractéristique courant-tension.



b) Caractéristique de puissance.

Fig II.3 : Caractéristiques du panneau PV dans les conditions standards

a) Caractéristique courant-tension b) Caractéristique de puissance.

2.2.1.2. Influence de l'éclairement et la température :

Le courant et la tension du générateur photovoltaïque sont essentiellement affectées par la variation des deux paramètres principaux : l'éclairement et la température des panneaux. L'adaptation de l'équation (II-1) pour différents niveaux d'éclairement et de température peut être manipulée par les équations suivantes :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (II.11)$$

$$\Delta I = \gamma \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{cc} \quad (II.12)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (II.13)$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (II.14)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (II.15)$$

Où, E_{ref} et T_{ref} désignent les valeurs standards de l'éclairement et la température (1000 W/m², 25°C)

La (**Fig II.4**) présente les caractéristiques I-V pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir que le courant de court-circuit varie en proportion du niveau de l'éclairement

Alors que la tension en circuit ouvert est peut affectée. Par conséquent, la puissance extraite augmente en monotonie, comme on peut le distinguer sur (voir la **Fig II.5**)

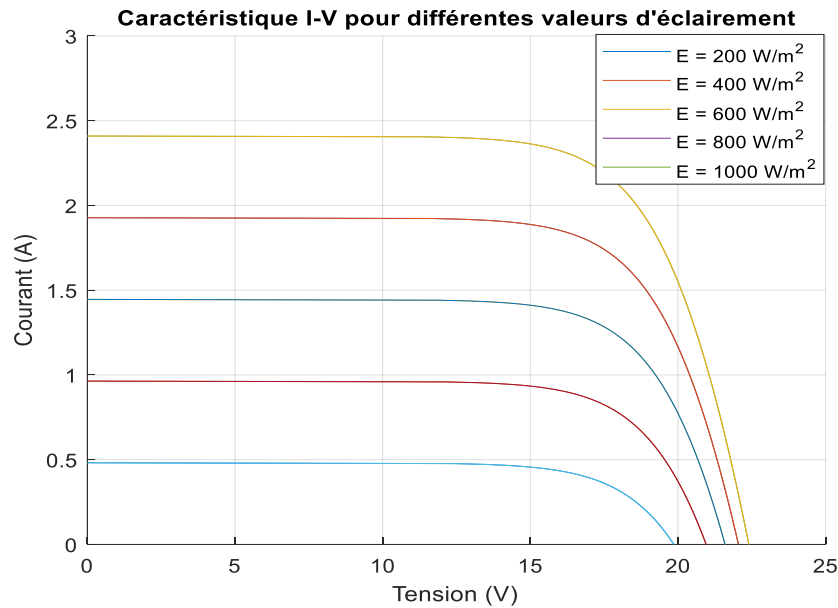


Fig II.4 : Caractéristique courant–tension du panneau PV pour différents niveaux d’éclairement et une température fixe 25° C

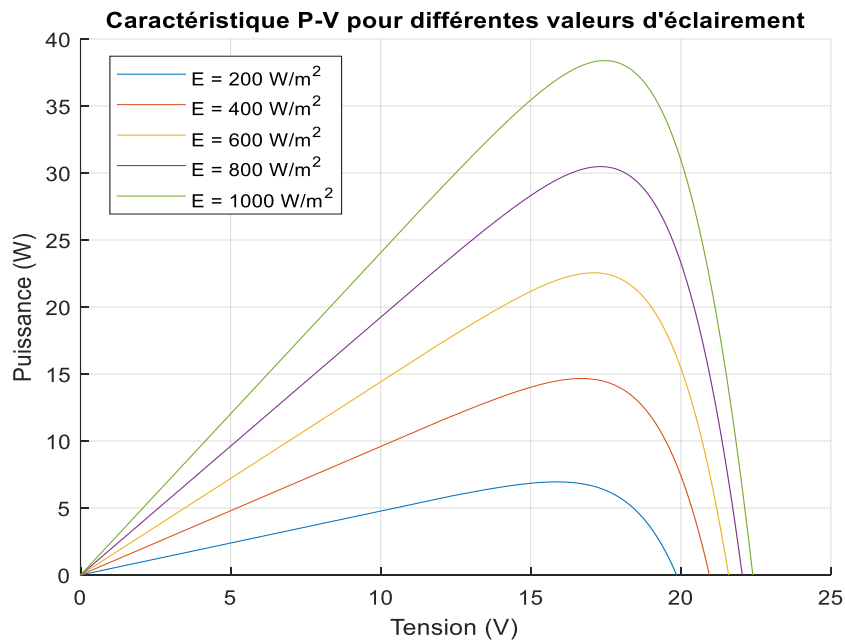


Fig II.5 : Caractéristique de puissances du panneau PV pour différents niveaux d’éclairement et une température fixe 25° C

De la même manière, (voir la **FigII.6** et **Fig II.7**) illustrent les mêmes comportements du panneau PV

Pour une augmentation graduelle de la température de la cellule, alors que le niveau d'éclairement est maintenu constant à sa valeur standard 1000 W/m^2 .

Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, ce qui est dû à l'absorption accrue de la lumière. Toutefois, comme la température augmente, la tension en circuit ouvert tend à diminuer, par conséquent la puissance extraite tend alors à diminuer.

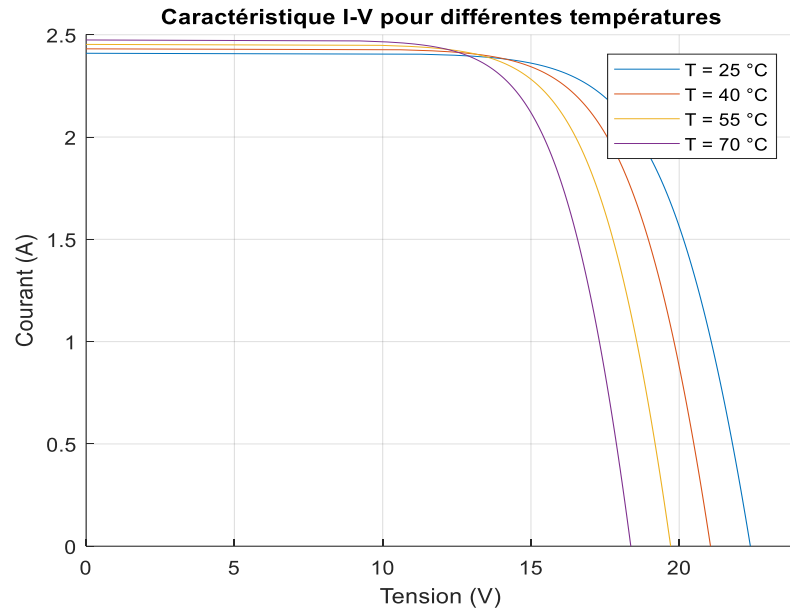
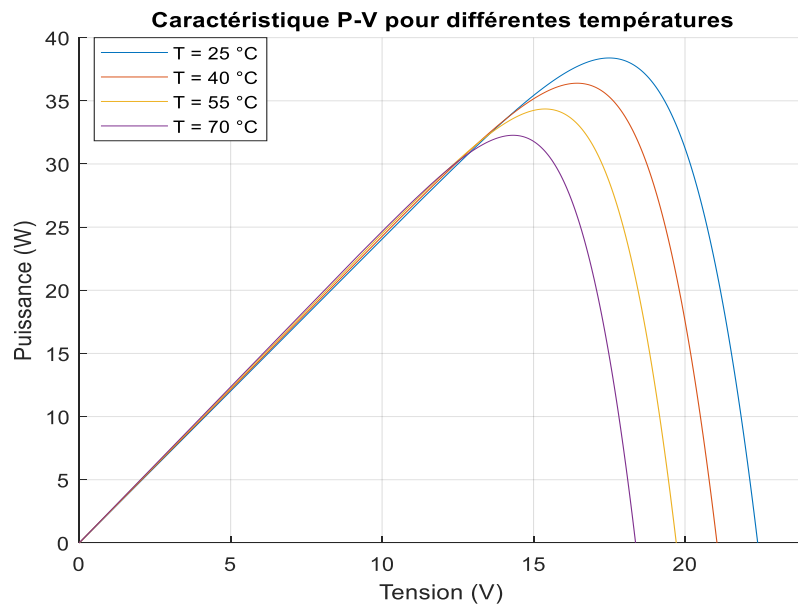


Fig II.6: Caractéristique courant–tension du panneau PV pour différentes valeurs de température et un éclairement fixe 1000 W/m^2



FigII.7:Caractéristique puissances–tension du GPV pour différentes valeurs de température et un éclairement fixe 1000 W/m^2

Dans notre étude un petit panneau cristallin de 38 W est utilisé, qui présente les caractéristiques suivantes dans des conditions standard d'ensoleillement et de température :

PARAMÈTRE	VALEUR	UNITÉ
Type de module PV	AEG-40	-
Courant optimal du PV	2.2	A
Tension optimale du PV	17.45	V
Tension en circuit ouvert (V_{OC})	22,40	V
Courant en court-circuit (I_{CC})	2,410	A
Résistance série (R_S)	0,450	Ω
Coefficient de température pour le courant (γ)	0,06	%/ °C
Coefficient de température pour la tension (β)	0,40	%/ °C
Puissance au point de fonctionnement optimal (P_{op})	38,39	W

Tableau II.1 : Pièce d'identité du panneau solaire utilisé [30]

2.2.2. Modélisation de la batterie plomb-acide (AGM)

Actuellement ,la technologie la plus largement répandue pour les applications photovoltaïques est celle des batteries au plomb (Pb). Il s'agit encore de la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée, notamment pour les applications stationnaires, comme c'est le cas pour notre système. Le modèle de batterie adopté est celui qui permet de prédire l'autonomie du système, c'est-à-dire d'estimer, à tout moment, l'énergie restante dans la batterie (état de charge ou profondeur de décharge DOD). Dans la littérature, différents modèles existent, allant des plus simples, émulant seulement les pertes joules à l'intérieur de la batterie, aux modèles dits de Thévenin, L'efficacité de charge et de décharge sont des fonctions non linéaires du courant et de l'état de charge (SOC).

2.2.2.1. Modèle de Thévenin :

Le modèle électrique simplifié d'une batterie est montré par (voir la **Fig II.8**) Il est constitué d'une source de tension idéale E_0 (tension à vide) en série avec une résistance interne R_0 , V_b est la tension de sortie aux bornes de la batterie. Dans ce modèle, E_0 et R_0 sont considérées variables en fonction de l'état de charge SOC, ou seule E_0 , qui peut être interpolée par un polynôme d'ordre 9 ou 10. Ces paramètres peuvent être déduits par différentes techniques d'identification, parmi, celle de Moindre carrés récursif (RLS) [24] [26]

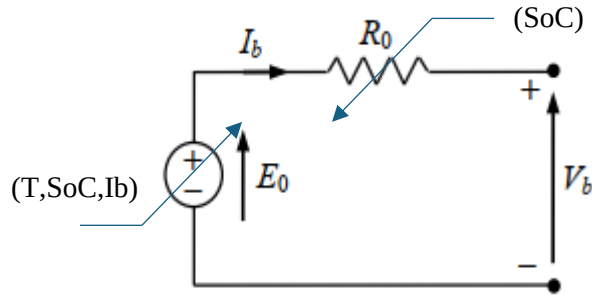


Fig II.8 : Modèle de Thevenin d'une batterie

Pour un courant I_b débité, la tension de sortie aux bornes de la batterie V_b est donnée par l'équation suivante :

$$V_b = E_0 - R_0 I_b \quad (\text{II.16})$$

Il s'agit d'un modèle de base, simple et facile à mettre en application. Par ailleurs, il ne tient pas compte de la variation de la résistance interne de l'accumulateur par rapport ni au SoC ni à la température. Même si ce modèle, qui est adopté par le package Matlab/Simulink, ne reflète pas le comportement dynamique précis de l'accumulateur, il reste suffisant pour un premier dimensionnement

2.2.2.2. Modèle de Thévenin avec Branche de Polarisation :

Le modèle de Thévenin amélioré, représenté par la (voir la **Fig II.9**) reste le modèle le plus couramment utilisé. Il contient une source idéale E_0 , une résistance interne R_i , un condensateur C , représentant la polarisation des plaques métalliques de l'accumulateur, et une résistance de surtension R_0 modélisant le contact des électrodes avec l'électrolyte.

Dans le modèle de Thévenin, tous les éléments du circuit équivalent sont supposés constants. Par conséquent, ce modèle reste exclusivement valable autour d'un point de fonctionnement où l'ensemble des paramètres sont fixes.

Des améliorations du modèle de Thévenin ont été proposées pour prendre en compte l'influence du SOC et du courant lors des phases de charge et de décharge. Certaines études ont exprimé les paramètres du modèle (E_0, R_i, C) en fonction du SOC, de la température ou du courant. D'autres travaux ont introduit une loi de décroissance linéaire pour la tension et la résistance en fonction de la DOD (Profondeur de Décharge). [24] [26]

Dans le cas des batteries au plomb-acide, un modèle dynamique non linéaire a été proposé comme variante du modèle de Thévenin. Ce modèle intègre des diodes idéales pour séparer le comportement de la batterie en charge et en décharge, Deux résistances R_{ch} et R_{dch} décrivant respectivement les chutes de tension ohmiques et électrochimiques pendant la charge et la décharge, Un condensateur C représentant la polarisation des plaques métalliques de la batterie.

Ce modèle permet ainsi de refléter de manière plus précise le comportement dynamique et non linéaire de la batterie dans diverses conditions d'utilisation.

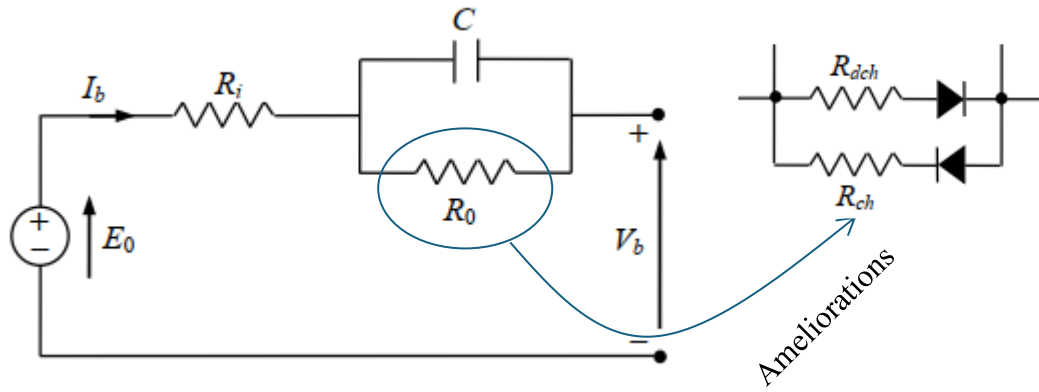


Fig II.9 : Modèle électrique de Thevenin avec effet de polarisation.

Comme la montre (voir la Fig II.9), le courant I_b passe par R_{ch} pendant la charge et passe par R_{dch} pendant la décharge. Pour une batterie de type plomb-acide, les tensions de charge ($V_{b-charge}$) et de décharge ($V_{b-decharge}$) aux bornes de la batterie sont exprimées comme suit [31][24] :

$$V_{b-charge} = E_0 + R_{ch}I_b \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{ch}C}\right) \right) \quad (II.17)$$

$$V_{b-decharge} = E_0 - R_{dch}I_b \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{dch}C}\right) \right) \quad (II.18)$$

2.2.2.3. L'état de charge (SOC)

La batterie peut être modélisée comme un système de stockage d'énergie dont le niveau d'énergie évolue en fonction des conditions d'exploitation. Ainsi, son état de charge (SOC) reflète la quantité d'énergie disponible dans la batterie [32], laquelle dépend des paramètres opérationnels tels que le courant, la température, etc. Pour une batterie entièrement chargée, le SOC est égal à 100 % ou 1, tandis que pour une batterie déchargée complètement, le SOC est égal à 0 % ou 0.

$$\begin{aligned} SOC\% &= SOC \times 100 \\ &= \frac{(\text{La capacité actuelle})(Ah)}{(\text{La capacité Nominal})(Ah)} \end{aligned} \quad (II.19)$$

Comme solution simple, l'évolution du SOC peut être traquée selon l'équation Coulomb :

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t i_b(\tau) d\tau \quad (II.20)$$

Là, $SOC(t_0)$ représente l'état initial de charge, $i_b(t)$ représente le courant circulant à travers la batterie, et C_n est la capacité nominale de la batterie exprimée en As (1 Ah = 3600 C). Mis à part l'inconvénient de la mauvaise connaissance du $SOC(t_0)$ d'une batterie non neuve, la méthode de Coulomb reste la plus utilisée.

2.2.2.4. La profondeur de décharge (DOD)

Le DOD est la quantité de capacité supprimée pendant la phase de décharge lors du cycle à partir d'une batterie complètement chargée. Elle est exprimée en pourcentage (%) par rapport à la capacité maximale pouvant être délivrée par cette batterie [32]

$$DOD\% = \left(\frac{\text{la capacité retiré d'une batterie chargé } (Ah)}{C_n(Ah)} \right) \quad (II.21)$$

Aussi, selon l'équation II-19 et II-21 la profondeur de décharge est le complément de l'état décharge :

$$DOD\% = (1 - SOC) \times 100 \quad (II.22)$$

Les décharges plus profondes, qui entraînent des niveaux de DOD plus élevés, peuvent avoir un impact négatif sur la durée de vie en cycles de la batterie. La relation entre le DOD et la durée de vie en cycles est non linéaire et varie en fonction de la technologie de batterie spécifique. Dans la modélisation des batteries pour les systèmes hybrides PV-batterie, le modèle de Thévenin est couramment utilisé pour représenter le comportement dynamique des batteries. Estimer précisément l'Etat de Charge (SoC) et le DOD est crucial pour une gestion efficace de l'énergie dans les systèmes hybrides. Dans notre cas, la méthode coulombienne est utilisée.

Dans cette étude, une batterie au plomb-acid AGM de 7 Ah et 12 V est utilisée.



Fig II.10 : Une image de la batterie utilisée [28]

L'identification paramétrique de cette batterie par la méthode RLS, pour une décharge successive, a donné un polynôme d'ordre neuf, liant la tension de circuit ouvert E_0 au SOC, comme il est illustré $E_0 = P_1 SOC^{10} + P_2 SOC^9 + \dots + P_{10} SOC^1 + P_{11}$ (II.23)

Modélisation des convertisseurs de puissance :

2.2.3. Modélisation du convertisseur DC-DC boost côté PV

Étant donné qu'ils augmentent la tension d'entrée pour produire une tension de sortie plus élevée, les convertisseurs DC-DC à boost sont des composants essentiels dans un système hybride PV-batterie, car ils facilitent l'intégration des panneaux photovoltaïques. L'analyse de tels dispositifs est simplifiée à l'aide du modèle moyen, en prenant en compte leur comportement en mode de conduction continue (CCM). Ce comportement moyenné dans le temps permet d'exposer le modèle dynamique par une écriture canonique continue. En effet,

ces systèmes, dits commutant (switched systems), basculent entre un ensemble d'états continus, ce qui rend l'élaboration des lois de commande difficile. Le modèle moyen permet ainsi d'obtenir une fonction de transfert (Y/X) autour de leurs valeurs de fonctionnement [29].

Sur la (voir la **Fig II.11**) est illustré le schéma de l'hacheur boost, composé de l'interrupteur commandé S, de la diode d'anti-retour D, et du dipôle de stockage (L, C)

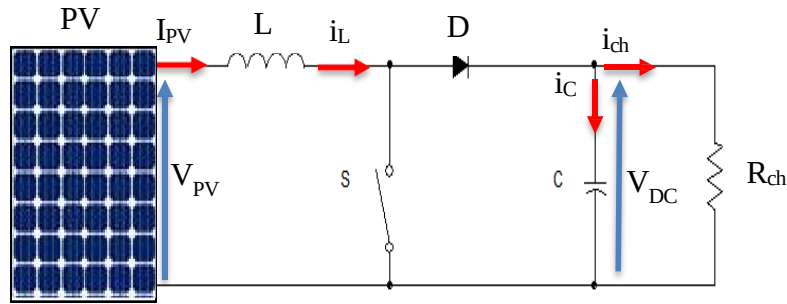


Fig II.11 : Schéma descriptif du convertisseur boost

L'évolution en fonction du temps est basée sur les équations des éléments de stockage (L, C), et peut être représenté par une écriture d'état linéaire (II-23), ayant comme paramètre le rapport cyclique α

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{II.24})$$

Pour la synthèse de la matrice de transition A, et du vecteur B, les deux séquences de commutation sont considérées :

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ V_{DC} \end{bmatrix}$$

Où : x : vecteur d'état

U : vecteur de commande $u = v_{pv}$

a) Séquences de fonctionnement et équations d'état :

On utilise les lois de Kirchhoff pour les tensions et les courants pendant les phases de fermeture et d'ouverture du transistor pour obtenir les équations du modèle moyen

- **Première séquence de conduction $[0, \alpha T]$:**

Dans cette séquence, l'interrupteur S est fermé, tandis que le diode D est bloquée de manière alternative. Cela entraîne une augmentation du courant dans l'inductance et permet le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique, tandis que la charge est déconnectée (voir la **Fig II.12**).

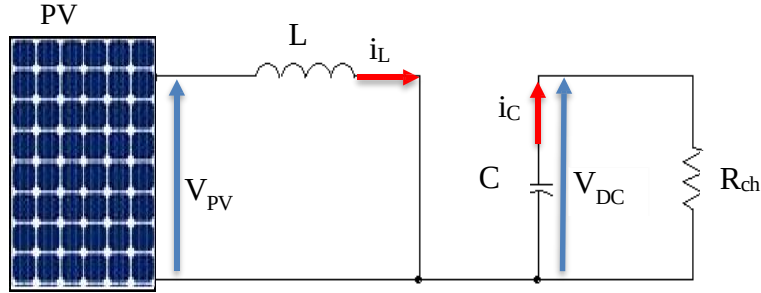


Fig II. 12 : Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction.

Le comportement dynamique du circuit est donné par :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{PV} \quad (\text{II.25})$$

$$\dot{V}_{DC} = \frac{1}{C} \frac{V_{DC}}{R_{ch}} \quad (\text{II.26})$$

En considérant le courant i_L et la tension de sortie V_{DC} comme variables d'état, l'équation (II.26) modélise la première séquence

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ch}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{PV} \quad (\text{II.27})$$

Qui peut être écrite sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 V_{PV} \\ y = D_1 x \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec: $D_1 = [0 \quad 1]$

• **Deuxième séquence de conduction [αT , T] :**

Pendant cette phase, l'interrupteur S est bloqué. Cela entraîne un transfert de l'énergie accumulée dans la bobine vers le condensateur C.

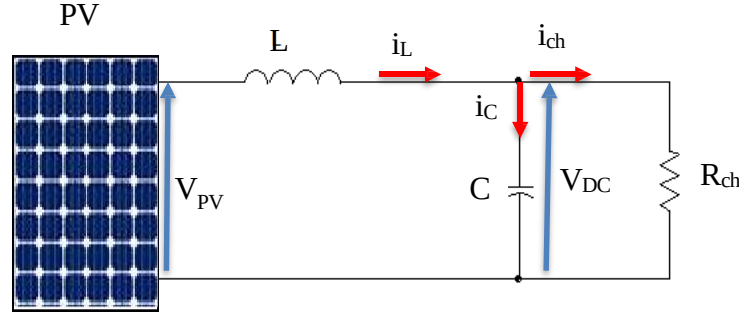


Fig II. 13 : Circuit électrique équivalent de la Deuxième séquence de conduction.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{PV} - V_{DC} \quad (II.29)$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_L - \frac{V_{DC}}{R_{ch}} \quad (II.30)$$

$$\text{Où : } \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_{ch}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{PV} \quad (II.31)$$

Qui peut être écrite sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 V_{PV} \\ y = D_2 x \end{cases} \quad (II.32)$$

b) Modèle moyen :

A partir des équations (II.26) et (II.31), on peut déduire l'équation d'état pour toute la période, qui consiste en fait, à une sommation des deux écritures d'état, pondérées par le rapport cyclique α :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_1 x + B_1 V_{PV})\alpha + (A_2 x + B_2 V_{PV})(1 - \alpha) \\ V_{DC} = [D_1 \alpha + D_2 (1 - \alpha)]x \end{cases} \quad (II.33)$$

Qui se met en définitif, sous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-\alpha}{L} x_2 + \frac{1}{L} V_{PV} \\ \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{C} x_1 - \frac{1}{R_{ch}C} x_2 \end{cases} \quad (II.34)$$

Le schéma fonctionnel du modèle moyen de l'hacheur Boost est présenté par (voir la **Fig II. 14**).

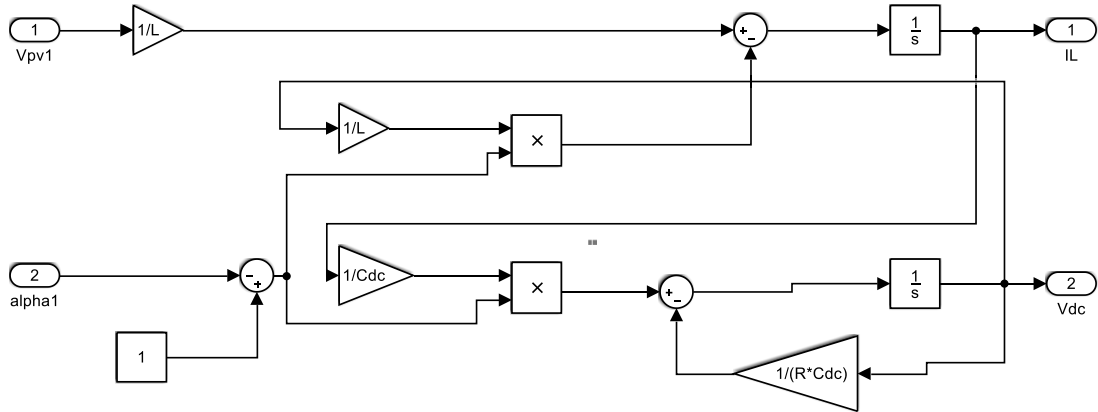


Fig II. 14 : Schéma fonctionnel de l'hacheur Boost

L'inductance de lissage L et le condensateur de filtrage C_{dc} sont soumis aux mêmes contraintes dans les deux modes de fonctionnement Boost. Ils sont dimensionnés suivant une fréquence de découpage f et des taux d'ondulation du courant et de la tension souhaités.

L'inductance minimale est calculée en fonction de f et de l'ondulation maximale du courant $\Delta I_{L_{max}}$ admissible. Sa valeur minimale est donnée par la relation suivante [24] :

$$L_{min} = \frac{\alpha V_{pv}}{\Delta I_{L_{max}} f} \quad (II.35)$$

Le condensateur C_{dc} joue son rôle dans l'amélioration de la qualité de la tension de sortie (tension du bus continu). La valeur minimale est calculée en fonction de f et de l'ondulation maximale $\Delta U_{dc_{max}}$ de la tension. Elle est donnée par la relation suivante [24] :

$$C_{dc-min} = \frac{\alpha I_c}{\Delta U_{dc_{max}} f} \quad (II.36)$$

2.2.4. Modélisation du convertisseur DC-DC (bidirectionnel) côté batterie

Dans le cas de l'hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur photovoltaïque (PV), le transfert d'énergie s'effectue exclusivement dans un sens unique, allant de la source (le générateur PV) vers le bus continu. En revanche, pour permettre la charge et la décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. À cet effet, la batterie est reliée au bus continu via un hacheur Buck-Boost réversible en courant, comme illustré par (voir la **Fig.II.15**)

Ce convertisseur a pour rôle principal d'assurer le transfert d'énergie dans les deux sens entre le bus continu et les batteries, tout en maintenant la tension du bus continu U_{dc} constante, indépendamment de la puissance fournie par les sources ou consommée par la charge [26]

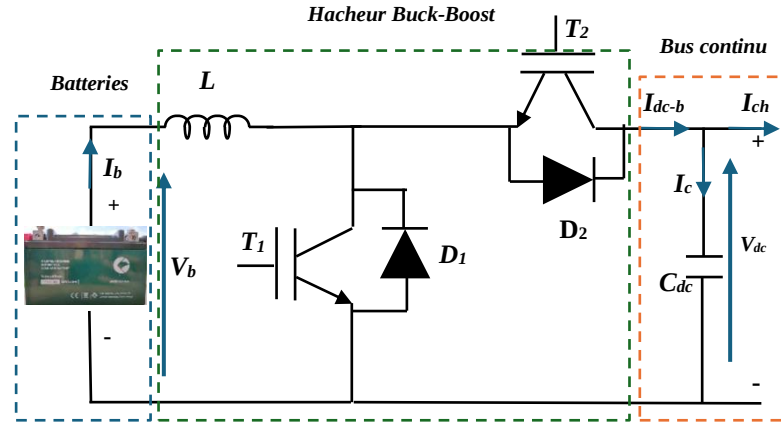


Fig.II.15. Convertisseur associé à la batterie

a) Séquences de fonctionnement et équations d'état :

On utilise les lois de Kirchhoff pour les tensions et les courants pendant les phases de fermeture et d'ouverture du transistor pour obtenir les équations du modèle moyen. Le vecteur d'état $x = \begin{bmatrix} I_b \\ V_{dc} \end{bmatrix}$, et $u = V_b$

• Première séquence de conduction $[0, \alpha T]$:

Lorsque l'interrupteur (T_1) est fermé et que l'interrupteur (T_2) est ouvert, le courant (I_b) circulant dans l'inductance (L) augmente linéairement., comme illustré sur (voir la Fig II. 16).

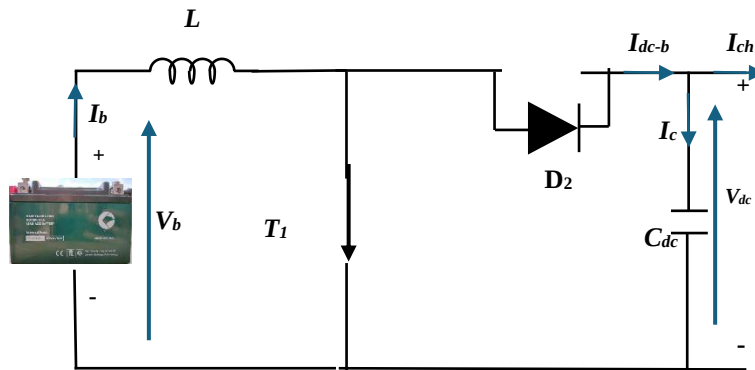


Fig II. 16 : Circuit électrique équivalent de la première séquence
De conduction.

Le fonctionnement de l'hacheur durant cet intervalle est décrit par les deux équations suivantes

$$V_b = L \frac{dI_b}{dt} \quad (\text{II.37})$$

$$I_c + I_{ch} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} = 0 \quad (\text{II.38})$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} = 0 \quad (\text{II.39})$$

En considérant le courant i_b et la tension de sortie V_{DC} comme variables d'état, l'équation (II.40) modélise la première séquence :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{dc}R_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (\text{II.40})$$

• **Deuxième séquence de conduction $[\alpha T, T]$:**

Lorsque l'interrupteur (T_1) est ouvert et l'interrupteur (T_2) fermé, l'énergie stockée dans l'inductance L est restituée au condensateur C_{dc} et à la charge extérieure via la diode (D_2). Pendant cette séquence, sur (voir la **Fig II. 17**)

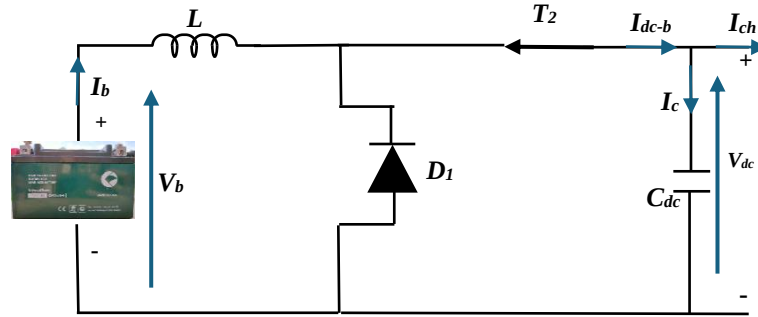


Fig II. 17 : Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence
De conduction.

Le fonctionnement de l'hacheur est caractérisé par les deux équations suivantes :

$$V_b = L \frac{dI_b}{dt} + U_{dc} \quad (\text{II.41})$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} = I_b \quad (\text{II.42})$$

L'équation (II.43) modélise la deuxième séquence :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{C_{dc}R_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (\text{II.43})$$

b) Modèle moyen :

Dans le cas où la période de découpage T est très faible comparée aux constantes de temps caractéristique du système, A partir des équations (II.40) et (II.43), on peut déduire l'équation d'état pour toute la période, qui consiste en fait, à une sommation des deux écritures d'état pondérées par le rapport cyclique α , le modèle moyen du hacheur Buck-Boost peut être décrit par les deux équations suivantes :

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{V_b}{L} - \frac{V_{dc}}{L} (1 - \alpha) \quad (\text{II.43})$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_b}{C_{dc}} (1 - \alpha) - \frac{1}{C_{dc}} I_{ch} \quad (\text{II.44})$$

$$= -\frac{I_b}{C_{dc}} (1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R_{ch}C_{dc}} \quad (\text{II.45})$$

Qui se met en définitif, sous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(1 - \alpha)}{L} x_2 + \frac{V_b}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{(1 - \alpha)}{C} x_1 - \frac{I_{ch}}{C_{dc}} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Le schéma fonctionnel du modèle moyen Basé sur des équations (II.44) (II.43) du hacheur Buck-Boost est présenté par (voir la **Fig II. 18**).

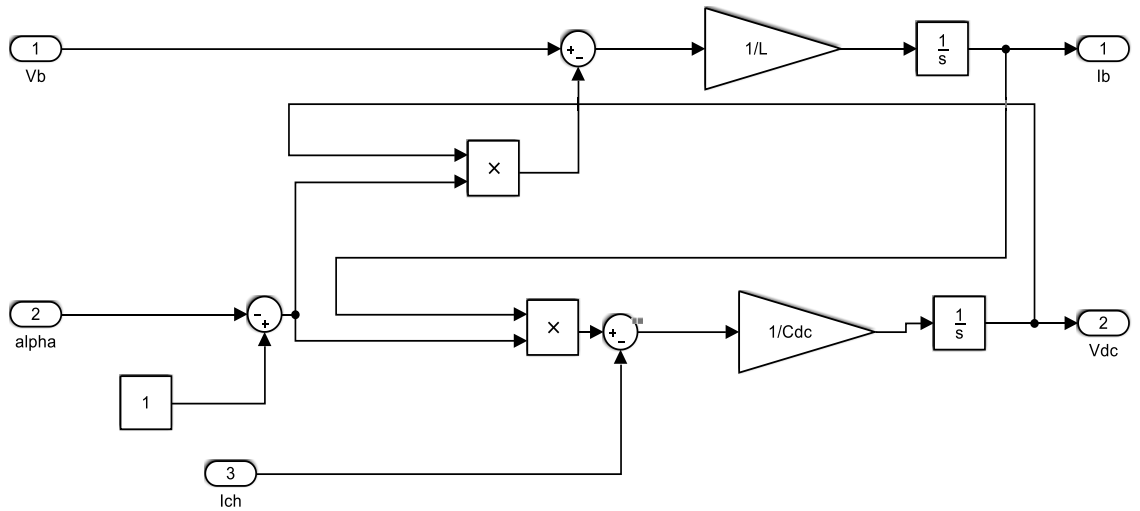


Fig II. 18 : Schéma fonctionnel de l'hacheur Buck-Boost

Le modèle de l'équation (II.26) reproduit le comportement de la batterie dans le cas de charge ($I_b < 0$) et de décharge ($I_b > 0$). Il est important de noter ici que les interrupteurs T_1 et T_2 sont commandés de manière complémentaire, et les rapports cycliques correspondants sont liés par l'équation suivante :

$$\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2} = 1 \quad (\text{II.47})$$

2.3. Modélisation de la charge résistive

Une charge résistive est généralement modélisée comme une résistance R connectée au circuit, représentant une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Cette modélisation est couramment utilisée pour simuler des charges statiques dans les systèmes électriques ou électroniques.

La relation fondamentale régissant le comportement d'une charge résistive est donnée par la loi d'Ohm :

$$V_{dc} = I_{ch} \times R \quad (\text{II.48})$$

La puissance dissipée par la charge résistive peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$P_{ch} = \frac{V_{dc}^2}{R} \quad (\text{II.49})$$

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation des composants principaux du système hybride PV-batterie, à savoir les panneaux photovoltaïques, les batteries et les convertisseurs DC-DC. La modélisation détaillée de la chaîne de conversion photovoltaïque ainsi que des convertisseurs statiques permet de poser les bases nécessaires pour évaluer les performances du système. Ces modèles constituent un socle essentiel pour mettre en œuvre les stratégies de contrôle proposées et les intégrer dans le module de gestion de l'énergie, qui sera développé dans le chapitre suivant. Une gestion optimale du flux énergétique permet ainsi au système hybride PV-batterie de satisfaire les besoins de la charge de manière efficace.

Chapitre III
Description des Approches
De Commande

3.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des approches de commande appropriées pour améliorer les performances et la stabilité d'un système hybride intégrant l'énergie solaire et les batteries. Nous mettons l'accent sur la commande des panneaux photovoltaïques en utilisant la technique de suivi du point MPP par une technique du Machine Learning afin d'extraire l'énergie solaire de manière optimale. Par ailleurs, nous abordons la régulation de l'énergie pour répondre aux besoins du système. La gestion de la batterie est également étudiée, avec un focus sur le maintien de la tension du bus DC et l'optimisation de l'énergie stockée. Un système intelligent sera conçu pour assurer une transition fluide entre les différents modes de fonctionnement, tels que le mode MPPT et le mode de régulation de puissance. Pour réaliser ces objectifs, nous recourons à des algorithmes inspirés de la théorie de contrôle, tels que la commande adaptative et celle de Lyapunov, et à des méthodes de stabilisation non linéaires. Ces outils permettent de renforcer l'efficacité du système tout en garantissant une exploitation énergétique durable.

3.2.Schéma Synoptique du système hybride

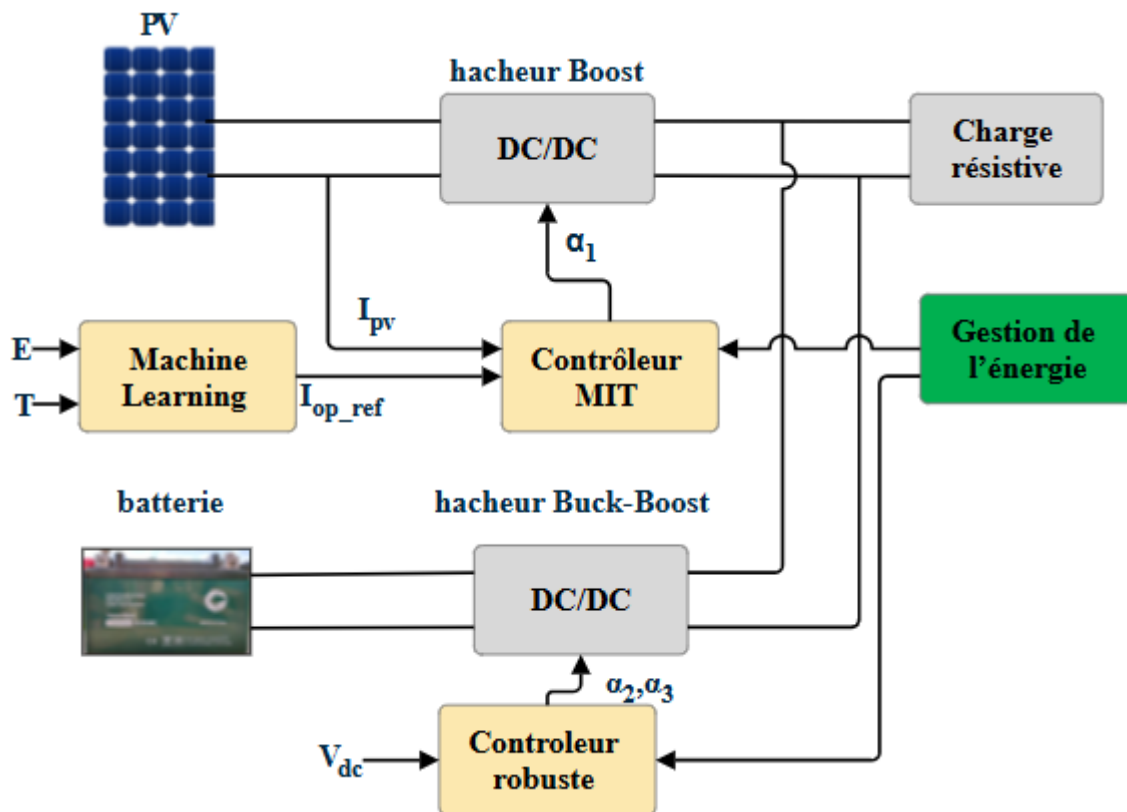


Fig III. 1 : schéma synoptique du système hybride.

Pour réaliser ce travail, dont le synoptique est présenté dans (voir la **Fg III.1**), Comme source principale, un panneau photovoltaïque de 38 W crêtes est utilisé pour alimenter une charge purement résistive, avec le soutien d'une batterie AGM de 12 V, 7 Ah.

3.3.Description des approches de commande

Le panneau photovoltaïque est une source principale commandé par MPPT pour fournir la puissance maximale extraite de celle rayonnée ; Quant aux batteries, elles ont deux fonctions :

- Première fonction : Stocker l'excédent d'énergie produite par le panneau solaire dans le système.
- Deuxième fonction : Fournir au système de l'énergie stockée au cas où le système aurait besoin d'énergie supplémentaire au-delà de celle produite par le panneau solaire. Pour ce faire, un ensemble de modes de fonctionnement sont distingués et proposés dans ce modeste travail, comme noyau des techniques de commande de commande du système hybride ; où l'organigramme de (voir la **Fig III.2**) visualise ce gestionnaire.

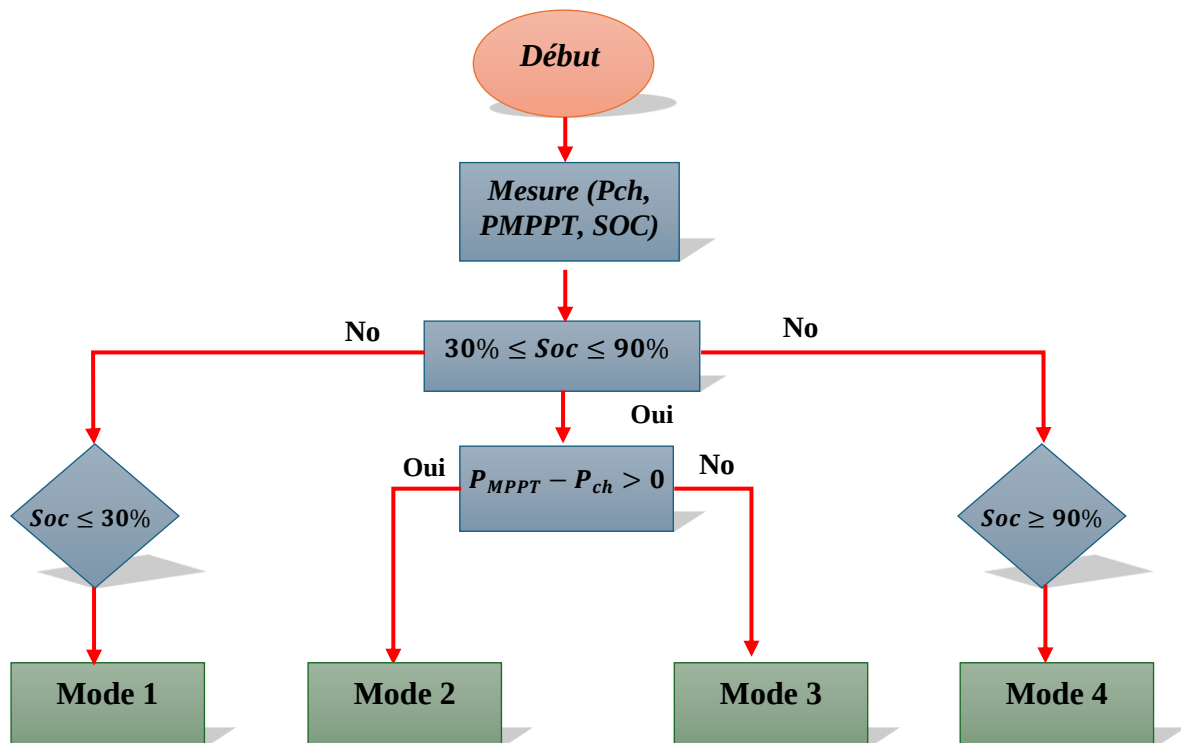


Fig III. 2 : Organigramme des différents modes de fonctionnement du système.

- **Mode 1 :** Cette situation se produit dans le cas suivant, Si la production d'énergie des panneaux solaires est inférieure à celle des batteries et que le niveau de charge de la batterie est situé en dessous du niveau minimum ($Soc \leq 30\%$), la batterie sera alors complètement déchargée et risque de ne pas alimenter les panneaux solaires, avec un délestage de la charge si nécessaire

Les panneaux solaires fonctionnent au niveau du point de puissance maximale (MPP).

- **Mode 2 :** Cette situation se produit lorsque l'état de charge de la batterie (SOC) se situe entre 30 % et 90 % dans un environnement naturel et L'énergie produite par les systèmes photovoltaïques (PV) est plus importante que celle nécessaire pour la charge $P_{MPPT} > P_{ch}$
-Les panneaux solaires fonctionnent à leur capacité maximale au point de puissance optimale (MPP).)

-tandis que le convertisseur de batterie continue à la charger

- **Mode 3 :** Ce mode de fonctionnement se produit dans le cas suivant, Cela se produit lorsque le niveau de charge de la batterie (SOC) est dans la plage normale (entre 30 % et 90 %) et que l'énergie produite par les panneaux solaires (PV) est inférieure à l'énergie requise pour la charge $P_{MPPT} < P_{ch}$. Dans cette situation, il n'est pas possible pour les panneaux solaires de fournir seul l'énergie nécessaire à la charge, c'est pourquoi les batteries viennent en aide à ce processus. Panneaux solaires fonctionnant avec (MPPT). Les charges sont alimentées par l'énergie solaire et la batterie.

- **Mode 4 :** Ce mode de fonctionnement se produit dans le cas suivant Une fois que l'état de charge (SOC) de la batterie atteint 90 %, elle ne peut plus se charger davantage, ce qui nécessite de la transférer en mode de décharge. La surproduction d'énergie par les panneaux solaires pourrait donner lieu à une hausse de l'intensité du travail. Pour garantir un fonctionnement stable, il convient de diminuer la capacité de PV en maintenant une distance avec MPPT, par Régulation de puissance.

3.3.1. Commande rapproché coté module photovoltaïque :

Dans ce travail, Le module photovoltaïque est dimensionné selon une puissance moyenne de la charge, Pour atteindre une efficacité de fonctionnement optimale, il était nécessaire d'extraire la puissance maximale possible des panneaux solaires. Par conséquent, un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basé sur une technique de l'apprentissage supervisé est utilisé ; qui est en fait, la méthode de régression linéaire multiple.

Cet algorithme est construit sur la base d'un ensemble de données collectées, qui comprend environ 648 points de données, dans le but de surmonter le problème d'oscillation dont souffrent

les méthodes traditionnelles telles que la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Ces données figurent en annexe.

De plus, la méthode de projection a été utilisée pour déterminer la valeur de la charge d'une façon dynamique, et évaluer en temps réel la puissance nette P_{net} . Cela a permis d'améliorer la stabilité du système et de garantir une contribution efficace de la charge à la gestion de l'énergie.

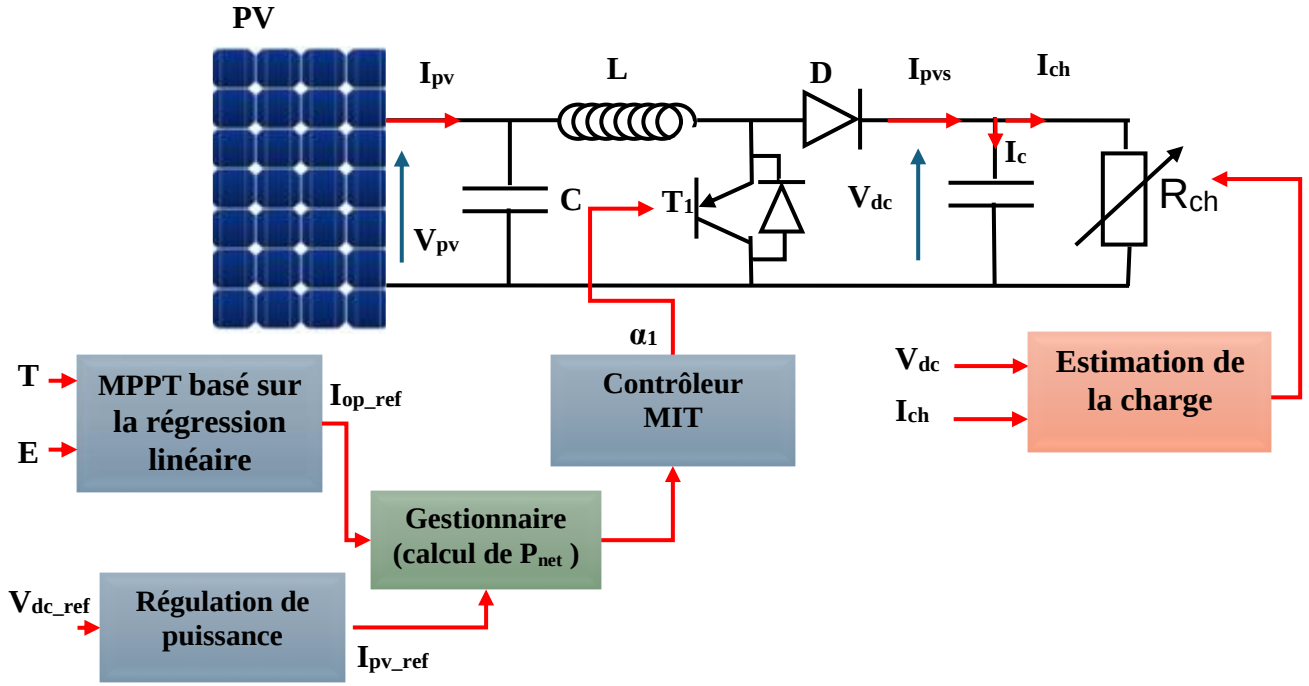


Fig III. 3 : Schéma synoptique de la commande rapprochée du convertisseur Boost coté PV

a) Méthode d'évaluation de la puissance nette :

La puissance nette (P_{net}) identifiée comme la différence entre la puissance du module photovoltaïque (P_{pv}) et la puissance de la charge (P_{charge}), quantifiée au sein du bus continu est modélisée ainsi :

$$P_{net} = P_{MPPT} - P_{ch} \quad (III. 1)$$

$$P_{MPPT} = V_{op} \times I_{op} \quad (III. 2)$$

$$P_{ch} = \frac{V_{dc_ref}^2}{\widehat{R_{ch}}} \quad (III. 3)$$

b) Estimation de la puissance de la charge par la méthode de Projection

La méthode de projection est l'une des méthodes adoptées pour une identification paramétrique des systèmes. Son concept réside dans une projection successive du vecteur régresseur $\Phi^T(k)$,

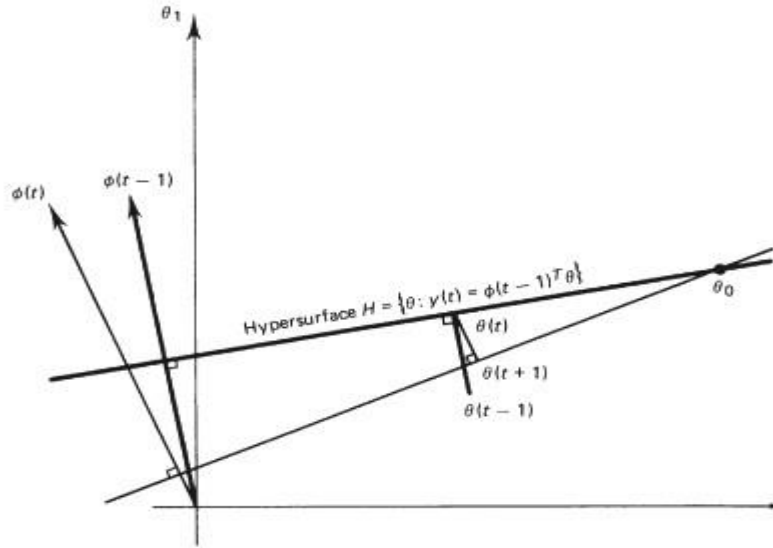


Fig III. 4 : Graphique de la méthode de Projection [33]

Dans cette méthode, soit à minimiser la fonction objective :

$$J \parallel \hat{\theta}(k) \parallel = \frac{1}{2} \parallel \hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k+1) \parallel^2 \quad (\text{III. 4})$$

Sous contrainte :

$$y(k) = \Phi^T(k) \cdot \hat{\theta}(k) \quad (\text{III. 5})$$

Donc, l'équation (III.4) et (III.5) se mettent sous la forme suivante à minimiser :

$$J \parallel \hat{\theta}(k) \parallel = \frac{1}{2} \parallel \hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k+1) \parallel + \lambda^T [y(k) - \Phi^T(k) \cdot \hat{\theta}(k)] \quad (\text{III. 6})$$

λ : Vecteur de Lagrange de taille $1 \times n$

n : Est la taille du vecteur $\hat{\theta}(k)$.

L'optimalité est obtenue en résolvant l'équation du gradient :

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}(k)} = 0 \quad (\text{III. 7})$$

Qui nous donne après manipulation mathématique l'algorithme d'identification par projection :

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\alpha \Phi(k-1)}{c + \Phi^T(k-1) \cdot \Phi(k-1)} \cdot \text{erreur} \quad (\text{III. 8})$$

$0 < \alpha < 2$ et $c = \text{eps}$

En utilisant cette méthode, les étapes suivantes résume l'utilisation de ce routine pour estimer la résistance de la charge $\widehat{R}_{ch}$:

$$I_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_{ch}} = \frac{1}{R_{ch}} V_{dc} \quad (\text{III. 9})$$

Où :

$$y(k) = x\theta(k) = \phi^T(k)\theta(k) \quad (\text{III. 10})$$

$$\frac{1}{R_{ch}} = \theta(k); I_{ch} = y(k)$$

Etape 01 : Initialiser l'erreur de prédiction $e(k)$.

Etape 02 : pour chaque itération, capter $I_{ch}(k)$, et construire :

$$e(k) = I_{ch}(k) - \Phi^T(k) \cdot \hat{\theta}(k-1) \quad (\text{III. 11})$$

Le vecteur régresser par : $\phi(k) = [v_{dc}]$

Etape 03 : Mise à jour du vecteur de paramètres de taille $(1 \times n)$ trouvé dans l'équation (III. 8)

3.3.1.1. Commande en mode MPPT :

La technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est l'une des technologies fondamentales utilisées dans les systèmes photovoltaïques. L'objectif principal de cette technologie est d'optimiser la production d'énergie des panneaux solaires en suivant le point où les cellules photovoltaïques peuvent fournir le maximum de puissance, appelé point de puissance maximale (MPP), cependant, ce point n'est pas fixe et varie en fonction de facteurs externes tels que la température et l'intensité du rayonnement solaire. Par conséquent, la technologie MPPT surveille continuellement ces changements et ajuste le système pour qu'il reste aussi proche que possible du point de puissance maximale $P_{\max}$, Il s'agit d'un point dont les coordonnées (V_{op}, I_{op}) et qui peut être déterminé à l'aide de plusieurs méthodes différentes, dites extrémales

Telle que celle de Conductance incrémentale (Incremental Conductance, ou IncCond), ou Perturbe&Observe (Perturbation et Observation), Ces méthodes sont équivalentes de point de vue approche, mais différentes de la manière de mise en œuvre.

Dans ce travail, nous allons présenter une méthode avancée parmi les approches d'amélioration (méthodes optimisées), pour améliorer la précision, réduire les oscillations et assurer un suivi plus rapide et efficace dans des conditions changeantes.

Les approches hybrides qui combinent plusieurs techniques, notamment les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle et les techniques d'optimisation convexes se montrent comme une alternative intéressante à ce sujet. Dans ce travail, une combinaison d'une méthode d'optimisation locale associée à une méthode de régression récapitule l'extraction du courant optimum du panneau :

a) Les techniques d'optimisation numérique : Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes, qui cherchent l'unique extremum d'une fonction convexe, parmi lesquelles, on peut citer :

- **Méthode d'ascension de gradient (ou Gradient Ascent Method)**
- **Méthode de Newton, et ces dérivées, qui utilisent la Hessienne.**

Dans ce travail, nous avons choisi la deuxième Méthode de recherche, ayant comme instruction sous MATLAB 'Fmincon'. Nous avons examiné la simplicité et l'efficacité de cette méthode polyvalente, qui est disponible sous forme prête à l'emploi dans MATLAB. Cela signifie que cette méthode est supportée par des outils fonctionnels intégrés dans le logiciel. Cette méthode est expliquée brièvement ci-après :

Méthode Fmincon : Trouver le minimum d'une fonction non linéaire multi variable sous contraintes d'égalité et d'inégalités linéaires et non linéaires :

Trouve le minimum x d'un problème spécifié par :

$$\min_x f(x) \text{ tel que } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \leq x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

$f(x)$: est la fonction objective à minimiser

$c(x)$: Contraintes d'inégalité non linéaires

$ceq(x)$: Contraintes d'égalité non linéaire.

$A \leq x \leq b$ Et $Aeq \cdot x = beq$: contraintes d'inégalité et d'égalité linéaires respectivement

$lb \leq x \leq ub$: Bornes de variation des variables.

Dans notre travail, cette méthode est utilisée comme suit : Trouver la valeur du courant I_{op} , maximisant la puissance extraite, donnée en équation (III.14) :

$$P_{pv} = I_{pv} \times V_{pv} \quad (III. 13)$$

$$P_{pv} = \left(V_{th} \cdot \log \left(\frac{I_{cc} - I_{pv} + I_o}{I_o} \right) - I_{pv} \cdot R_s \right) \cdot I_{pv} \quad (III. 14)$$

Vue que la méthode minimise un fonctionnel, l'équation objective est définie comme suit :

$$f(x) = \frac{1}{\text{abs} \left(\left(V_{th} \cdot \log \left(\frac{I_{xe} - x + I_o}{I_o} \right) - x \cdot R_s \right) \cdot x \right) + 0.00001} \quad (III. 15)$$

Avec $x = I_{op}$

$$\min_x f(x) \text{ tel que } \{0 \leq x \leq I_{cc}\} \quad (III. 16)$$

Enfin, nous pouvons l'écrire en Matlab comme :

`[x, fval] = fmincon (f, x0, [], [], [], [], [0, Icc], [], options)`

x : La valeur optimale de x trouvée par 'fmincon', qui est en fait I_{op} pour chaque éclairement et température.

$fval$: La valeur de la fonction objectif $f(x)$ évaluée au point optimal x .

Cette méthode est compilée d'une façon intense pour construire le dataset utilisé par la méthode de régression, et ce pour une variation aléatoire de l'éclairement solaire et la température de la cellule dans une large gamme.

b) Description de l'algorithme basé sur la régression linéaire multiple

Le Machine Learning consiste à laisser l'ordinateur apprendre quel calcul à effectuer, plutôt que de lui donner ce calcul pouvant apprendre tout seul, Pour doter un ordinateur de la capacité d'apprendre, on fait appel à des méthodes d'apprentissage qui s'inspirent largement de la manière dont les êtres humains acquièrent de nouvelles compétences. Ces méthodes incluent notamment

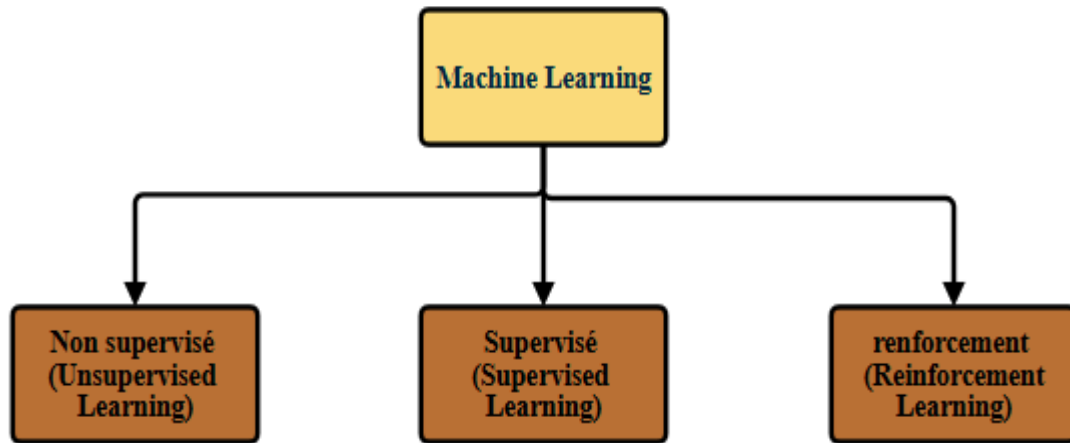


Fig III. 5 : Types d'apprentissage

- **L'Apprentissage Supervisé** : Le modèle est entraîné sur un ensemble de données étiquetées, où les entrées (X) sont associées à des sorties (Y), Apprendre une fonction f qui relie les entrées aux sorties : $Y = f(X)$

L'apprentissage supervisé 'Supervised Learning' peut développer des modèles pour résoudre deux types de problèmes :

- **Les problèmes de Régression** : Prédire des valeurs continues.
- **Les problèmes de Classification** : Prédire des étiquettes discrètes.

Dans ce travail, nous nous contentons du premier objectif, en développant une écriture régressive pour prédire le courant I_{op} du panneau solaire pour n'importe quelle valeur d'éclairement et de température. Pour maîtriser l'apprentissage supervisé, il est nécessaire d'appliquer les quatre étapes suivantes :

- **Le Dataset** : La collection des données fondamentales constitue l'élément central de tout projet éducatif nécessitant une supervision, C'est un ensemble de données destiné à l'entraînement, à la validation et à l'évaluation du modèle, dans notre cas, nous cherchons à trouver le courant correspondant à la température et au rayonnement. On parle d'apprentissage supervisé lorsqu'on fournit à la machine de nombreux exemples (x, y) afin qu'elle apprenne la relation qui lie x à y .

$$\begin{array}{ccc} x & \longrightarrow & y \\ [T, E] & \longrightarrow & I_{op} \end{array}$$

En Machine Learning, on compile ces exemples (x, y) dans un tableau que l'on appelle Dataset :

- La variable y porte le nom de la cible (Target), C'est la Valeur que l'on cherche à estimer.
- La variable x porte le nom de facteur (feature). Un facteur Affecte la valeur de y .

TARGET Y	FEATURES X1	FEATURES X2
I _{op} [A]	T[C°]	E[w/m ²]
0.217	1	100
1.089	13	500
2.529	25	1150
1.419	40	650

Tableau III.1 : Echantillon du Dataset utilisé en régression

Pour ce faire, l'algorithme d'optimisation 'Fmincon' est intensivement utilisé pour chaque paire d'éclairement E et de température T , donnant en sortie le courant I_{op} correspondant. Nous avons collecté 648 points, dressés en tableau, qui peut être consulté en Annexe. Pour une implémentation, la phase d'optimisation peut alternativement être remplacé par la méthode d'ascent de gradient, présentée précédemment.

• **Développer un modèle à partir du Dataset :** Nous construisons un modèle en utilisant ce jeu de données. Il peut s'agir d'un modèle linéaire, ou bien un modèle non-linéaire. Afin de trouver la valeur I_{op} théorique que nous avons appliqué un modèle linéaire, présenté sur (voir la FigIII.6)

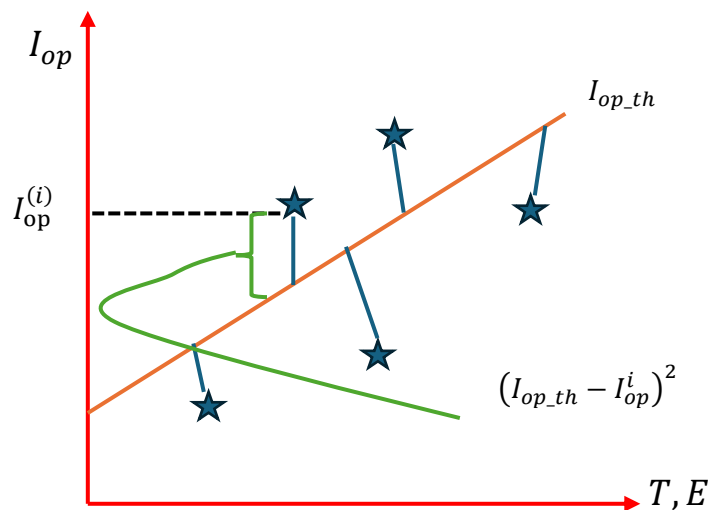


Fig III. 6 : modèle issu de la régression linéaire multiple

L'équation du modèle de la Régression Linéaire multiple proposé est mise sous l'expression suivante :

$$I_{op_th} = a_1 E + a_2 T + a_3 \quad (\text{III. 17})$$

a_1, a_2, a_3 : étant les paramètres du modèle, déterminés par l'étape suivante, alors que a_3 est appelé le biais.

• **La Fonction Coût** : Pour la régression linéaire, on utilise la norme euclidienne pour mesurer les erreurs entre $(\mathbf{x})$ et $(\mathbf{y})$ Concrètement, la formule pour exprimer l'erreur i entre le prix (i) et la prédiction faites en utilisant la surface $\mathbf{x}(i)$

$$erreur^{(i)} = (f(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (\text{III. 18})$$

Chaque prédiction s'accompagne d'une erreur, on a donc m erreurs, On définit la Fonction Coût $J(a_1, a_2, a_3)$ comme étant la moyenne de toutes les erreurs :

$$J(a_1, a_2, a_3) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m erreur^i \quad (\text{III. 19})$$

$$J(a_1, a_2, a_3) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (f(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (\text{III. 20})$$

$$\mathbf{X}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$$

On peut aussi lui attribuer ce nom : l'erreur quadratique moyenne

• **Minimisation de la Fonction Coût** : Cette étape est la base du travail, et c'est ce qui permet à la machine d'apprendre quels paramètres minimisent la fonction Coût, quel critère nous donne le meilleur modèle, Pour trouver le minimum, on utilise un algorithme d'optimisation qui s'appelle la descente de gradient qui nous permettra de quantifier les paramètres a_1, a_2, a_3 . Cet algorithme stipule que :

$$\theta = \theta - \alpha \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (\text{III. 21})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 \quad (\text{III. 22})$$

De l'équation (III.17), l'équation de régression linéaire se met sous :

$$\hat{y} = I_{op_th} = \theta_1 E + \theta_2 T + \theta_3 \quad (\text{III. 23})$$

$$\hat{y} = X\theta = [E \quad T \quad 1] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 24})$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} E_1 & T_1 & 1 \\ E_2 & T_2 & 1 \\ E_3 & T_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{648} & T_{648} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

La forme de régression :

$$y = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_n x_n + \theta_{n+1} \quad (\text{III. 26})$$

On veut minimiser l'erreur quadratique suivante :

$$J = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (X\theta - y)^2 \quad (\text{III. 27})$$

Pour ce faire, on calcule les dérivées partielles de la Fonction Coût :

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = \frac{1}{m} X^T (X\theta - y) = 0 \quad (\text{III. 28})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial a_1} \\ \frac{\partial J}{\partial a_2} \\ \frac{\partial J}{\partial a_3} \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{III. 29})$$

$$\Rightarrow X^T (X\theta - y) = 0 \quad (\text{III. 30})$$

$$\Rightarrow X^T X\theta = X^T y \quad (\text{III. 31})$$

D'où, on aura la fameuse équation normale utilisée en régression :

$$\theta = (x^T x)^{-1} \times y \quad (\text{III. 32})$$

Après le calcul numérique, nous trouvons :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.002203798067633 \\ 0.000035909306743 \\ -0.010435164540233 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 33})$$

Après avoir trouvé la valeur du courant I_{op} , nous l'avons substituée dans l'équation de la V_{pv} afin de déterminer la valeur de la tension. Nous avons utilisé la même méthode

$$\begin{bmatrix} \theta_1' \\ \theta_2' \\ \theta_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000280695330113 \\ -0.035551850156016 \\ 18.665593464104319 \end{bmatrix} \quad (III. 34)$$

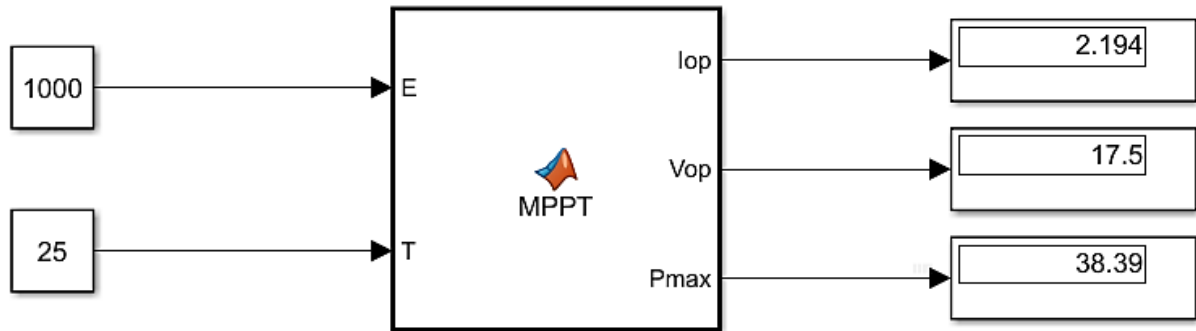


Fig III. 7 : Test de l'algorithme de MPPT par la régression linéaire multiple en conditions standard

3.3.1.2. Commande rapproché basée sur l'MIT

La commande adaptative par modèle de référence (MRAC) utilise un mécanisme pour adapter certains paramètres du système au cours du temps. La loi de la MIT est l'approche originale. Cette loi a été développée au laboratoire d'instrumentation de l'université de M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) d'où dérive son nom.

Cette technique consiste à estimer et ajuster directement les paramètres du régulateur en fonction de l'erreur entre le procédé et le modèle de référence. Ses principes de base sont les suivants :

- 1) La sortie du système doit suivre la trajectoire de référence.
- 2) L'erreur de poursuite $e(t) = y(t) - y_m(t)$ représente une déviation de la sortie de système par rapport à la sortie de modèle de référence.
- 3) Le système en boucle fermée est basé sur une loi de commande par feedback.
- 4) La commande comporte un contrôleur et un mécanisme d'ajustement.
- 5) Le mécanisme d'ajustement génère des estimés des paramètres du contrôleur.

- 6) La synthèse du contrôleur comporte la conception de la loi de commande et le d'adaptation [34]

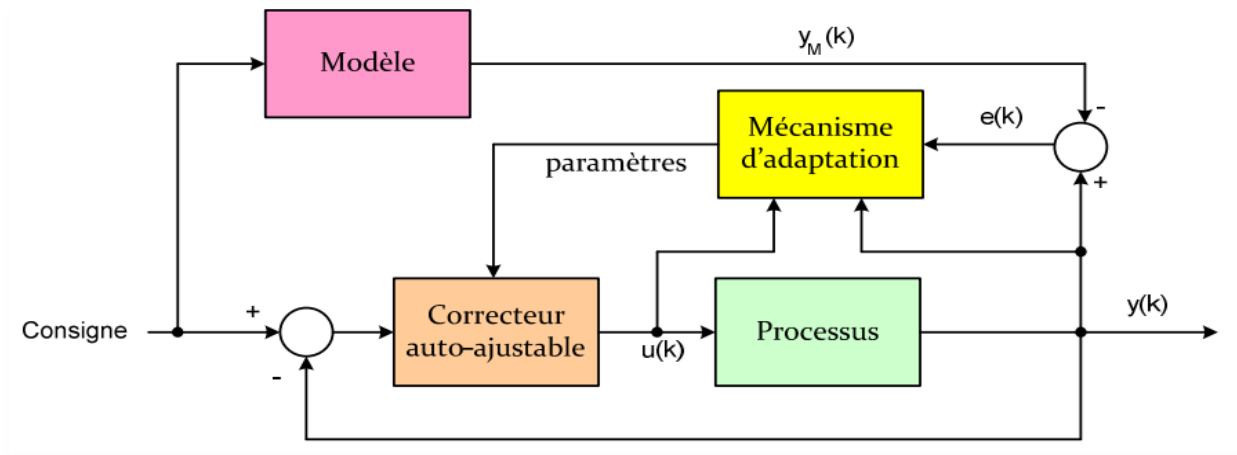


Fig III. 8 : Schéma synoptique de la méthode MRAC

Généralement, pour appliquer la méthode du gradient (règle MIT), il faut modéliser le système à contrôler en écriture d'état ou en fonction transfert ; dans notre cas le contrôleur adaptatif est utilisé en cascade avec l'étape précédente de régression, comme un régulateur en courant, permettant de comparer le courant optimum du panneau I_{op} et le courant I_{pv} et délivrer en sortie le rapport cyclique α du hacheur boost, comme peut être distingué sur le synoptique (voir la Fig III. 7) Il est alors impératif d'estimer la fonction de transfert liant le rapport cyclique α au courant du panneau I_{pv}

- **Fonction de transfert estimée du Convertisseur boost :** Pour appliquer cette théorie, nous devons d'abord trouver la Fonction de transfert du convertisseur boost par issue du circuit de simulation en boucle ouverte suivant :

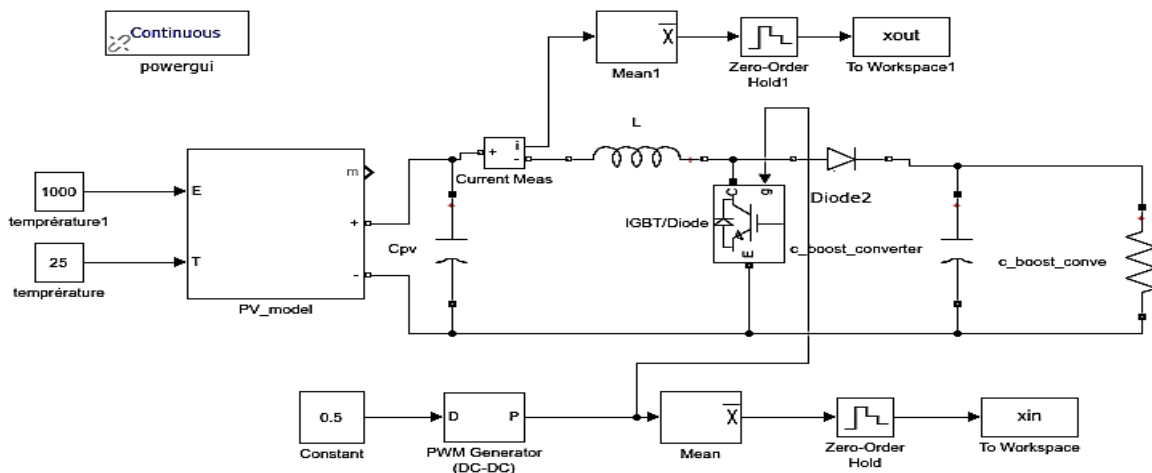


Fig III. 9 : Estimation de la FT du convertisseur boost

Paramètres de simulation : Solver : ode23tb (stiff/TR-BDF2); Type :Variable-step; Relative tolerance : 1e-6;Absolute tolerance : auto; Algorithm : Nonadaptive; Solver reset method : Fast

```
[num1,den1]=stmcb(xout ,xin ,1,2)
Gd=tf(num1,den1,1e-5)
Gi=d2c(Gd)

Gi =

          -3.206e04 s + 1.184e05
          -----
          s^2 - 6696 s + 2.458e04
```

Soit La fonction de transfert du système :

$$G(s) = \frac{Ipv}{\alpha} = \frac{b_0(s + z_0)}{s^2 + q_1s + q_2} \quad (\text{III. 35})$$

Représentation du système dans l'espace d'état :

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (\text{III. 36})$$

Où :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -q_2 & -q_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad z_0] \quad (\text{III. 37})$$

a) Modèle de référence MRAC :

Donc, finalement

$$M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III. 38})$$

$$\frac{y_m}{y_{ref}} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + w_n^2} \quad (\text{III. 39})$$

$$s^2 y_m + 2\xi\omega_n s y_m + \omega_n^2 y_m = \omega_n^2 y_{ref} \quad (\text{III. 40})$$

$$x_1 = y_m \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y}_m = x_2 \quad (\text{III. 41})$$

$$x_2 + 2\xi\omega_n x_2 + w_n x_1 = w_n^2 y_{ref} \quad (\text{III. 42})$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\xi_n x_2 + \omega_n x_1 + \omega_n^2 y_{ref} \end{cases} \quad (\text{III. 43})$$

state spare:

$$\begin{aligned} x_m &= A_m x_m + B_m \cdot y_{ref}; y_m = C_m x_m \\ A_m &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega_n & -2\xi_n \omega_n \end{bmatrix}; B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix}; c_m = [1 \quad 0]; \end{aligned} \quad (\text{III. 44})$$

Avec :

$$t_r = \frac{3}{\xi_n \omega_n} = 0.06s \quad (\text{III. 45})$$

$$\Rightarrow \xi_n = 1; \omega_n = 45 \text{ rad/s}$$

b) Loi de commande par retour d'état adaptative : $u(t) = \theta_1 x(t) + \theta_2 y_{ref}$:

Dans notre cas, une loi de commande par retour d'état adaptative est suggérée (voir la **Fig III.8**), qui délivre en fait le rapport cyclique α . L'état du système $x(t)$ est le courant I_{pv} , alors que y_{ref} est le courant optimum I_{op} issu de l'étape de régression.

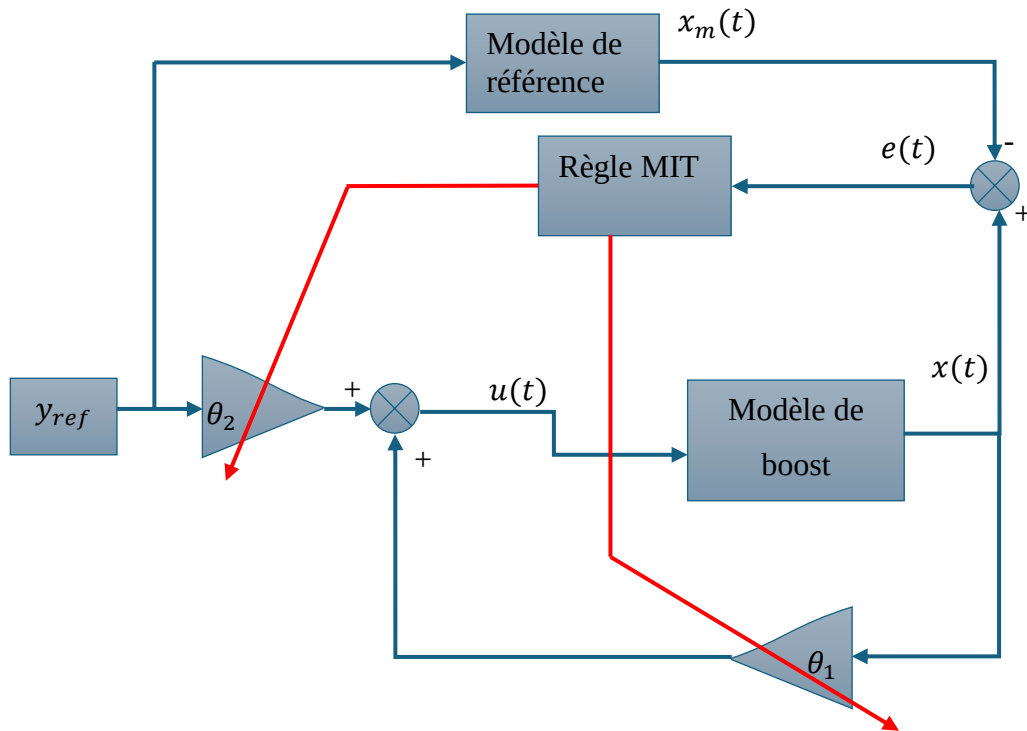


Fig III. 10 : schéma bloc du régulateur MRAC du courant du panneau solaire

Cette règle de MIT, permet de faire converger l'erreur $e = y - y_m$ vers zéro en un temps fini.

$$\begin{aligned} e(t) &= y - y_m \Rightarrow \dot{e}(t) = \dot{y} - \dot{y}_m = c\dot{x} - c_m\dot{x}_m \\ \dot{e}(t) &= c(Ax + Bu) - C_m(A_mx_m + B_my_{ref}) \\ \dot{e}(t) &= A_me + cB\theta_1x + (CB\theta - CB_m)y_{ref} \end{aligned} \quad (III. 46)$$

Approximons : $C = C_m$

Soit dans le cas idéal : $CB\theta^* = C = B_m$ (III. 47)

$$\Rightarrow \dot{e}(t) = A_me + CB\theta_1x + CB(\theta - \theta^*)y_{raf} \quad (III. 48)$$

MIT rule: Après un calcul fait, les parametres θ_1 et θ_2 sont ajustés ainsi :

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta} e(t); \frac{\gamma e}{\partial \theta_1} = -CB; \frac{\partial e}{\partial \theta_2} = -CB y_2 \quad (III. 49)$$

Donc, finalement:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1(t) = -\gamma_1 e \cdot x(t) \\ \dot{\theta}_2(t) = -\gamma_2 e \cdot y_{ref} \end{cases} \quad (III. 50)$$

$\gamma_1 = -25$; $\gamma_2 = -20$

θ : Est le paramètre ajustable connu sous le nom du paramètre de commande.

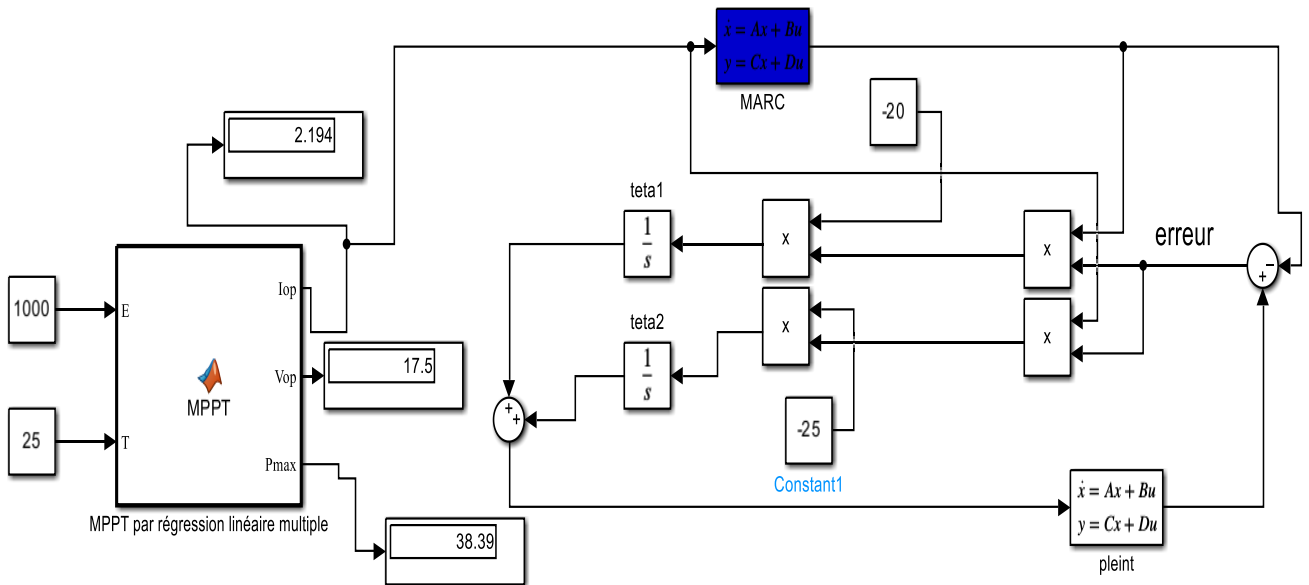


Fig III. 11 : Modèle Simulink du contrôle adaptatif MRAC pour le MPPT

Pour mettre en exergue cette approche, (voir la **Fig III.12**) illustre la réponse de l'hacheur pour les conditions standard d'éclairement et de température.

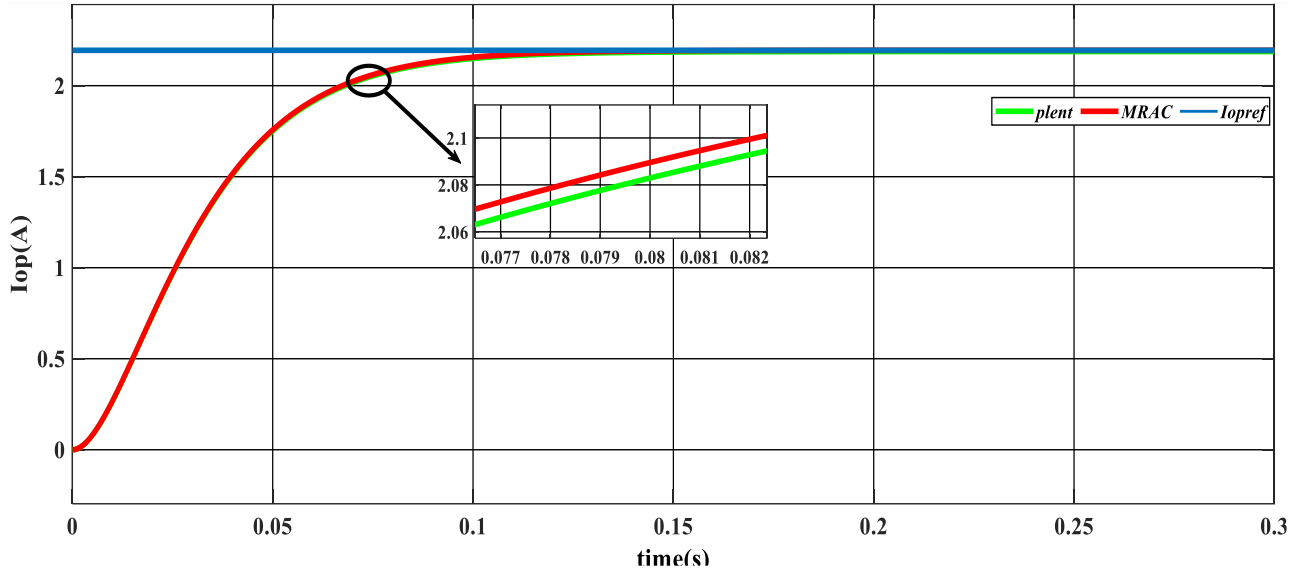


Fig III. 12 : Réponse du contrôle MRAC sur le convertisseur Boost

Nous remarquons que la réponse du système embrasse complètement celle du Modèle de référence dans toute la totalité du temps de simulation, permettant ainsi d'avoir un bon régulateur du courant du panneau I_{pv} .

3.3.1.3. Mode régulation de puissance

Dans ce mode, la batterie est pleine, et le générateur photovoltaïque fournit la puissance nécessaire pour réguler et satisfaire la demande de charge, tandis que le sous-système de la batterie reste inactif. Lorsque la capacité maximale du générateur photovoltaïque ne suffit pas à répondre à cette demande, le gestionnaire intervient pour passer le système en mode 4

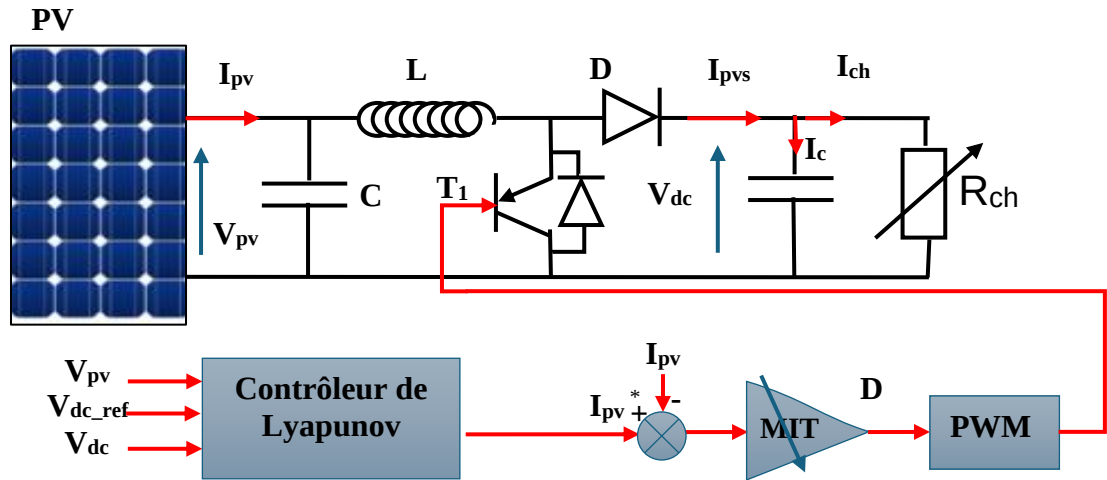


Fig III. 13 : commande du module PV en mode régulation de puissance

Le contrôleur basé sur la théorie de lyapunov effectue la régulation de la tension du bus V_{dc} . Une régulation en cascade du courant I_{pv} permet de piloter le hacheur boost.

- **Contrôleur de courant du PV basé sur la théorie de Lyapunov :**

On définit l'erreur de la tension de bus comme suit :

$$e(t) = V_{dc}(t) - V_{dcref} \quad (III. 51)$$

Soit la fonction de lyapunov définie positive :

$$V(t) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (III. 52)$$

Le système sera stable si le gradient est semi défini négatif :

$$\dot{V}(e) \leq 0 \quad ; \forall e > 0; V(e) > 0 \quad (III. 53)$$

Sa dérivée est alors :

$$\dot{V}(t) = e\dot{e}(t) = -ke^2 \leq 0 \quad (III. 54)$$

Alors :

$$\dot{e}(t) = -ke(t); k > 0 \quad (III. 55)$$

On choisit une constante positive K pour assurer la négativité de $\dot{V}$, et faire converger l'erreur vers zéro

La dérivée de l'erreur se met sous :

$$\dot{e}(t) = \dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc_ref} \quad (III. 56)$$

Avec $\dot{V}_{dc_ref} = 0$

$$V_{dc}\dot{(t)} = \frac{dv_{dc}}{dt} = \dot{x}(t) = \frac{1}{c}(I_{pvs}) - \frac{V_{dc}}{\hat{R}C} \quad (III. 57)$$

$$\frac{1}{c}(I_{pvs}) - \frac{v_c}{\hat{R}C} = -Ke \quad (III. 58)$$

Donc :

$$I_{pvs} = -Kce + \frac{V_c}{\hat{R}} \quad (III. 59)$$

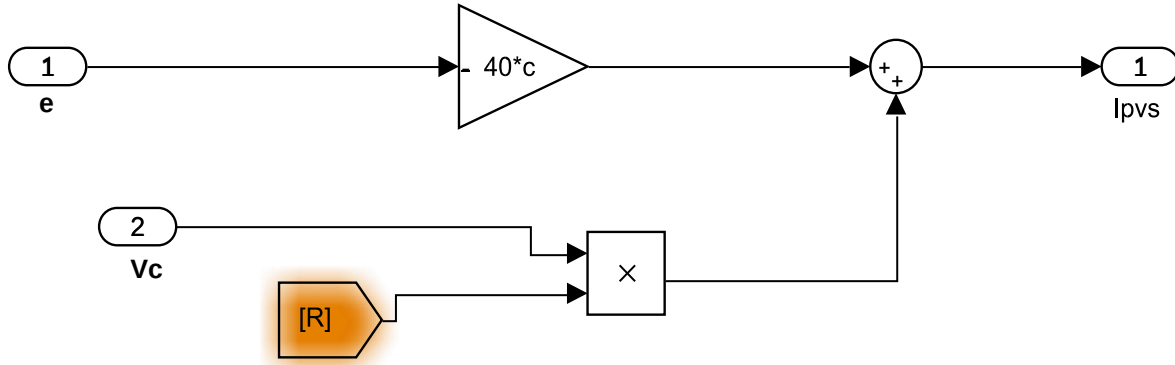


Fig III. 14 : Schéma fonctionnel de la régulation par l'approche de Lyapunov.

Dans cette formulation, le courant de sortie de l'hacheur boost, noté I_{pvs} se montre comme la commande du système.

Le courant de référence du générateur photovoltaïque se détermine par l'hypothèse de la conservation de puissance :

$$I_{PV_ref} = \frac{V_{c_ref} * I_{pvs}}{V_{pv}} \quad (III. 60)$$

Pour représenter le basculement entre les deux modes, voici un schéma typique du passage entre le mode 2 et le mode 4 en fonction des conditions du système :

- Si $P_{net} > 0 \rightarrow$ La puissance est adéquate, donc nous pouvons utiliser la régulation de puissance
- Si $P_{net} \leq 0 \rightarrow$ L'énergie à disposition est trop faible, il est impératif de se diriger vers la régression linéaire multiple pour optimiser l'extraction d'énergie.

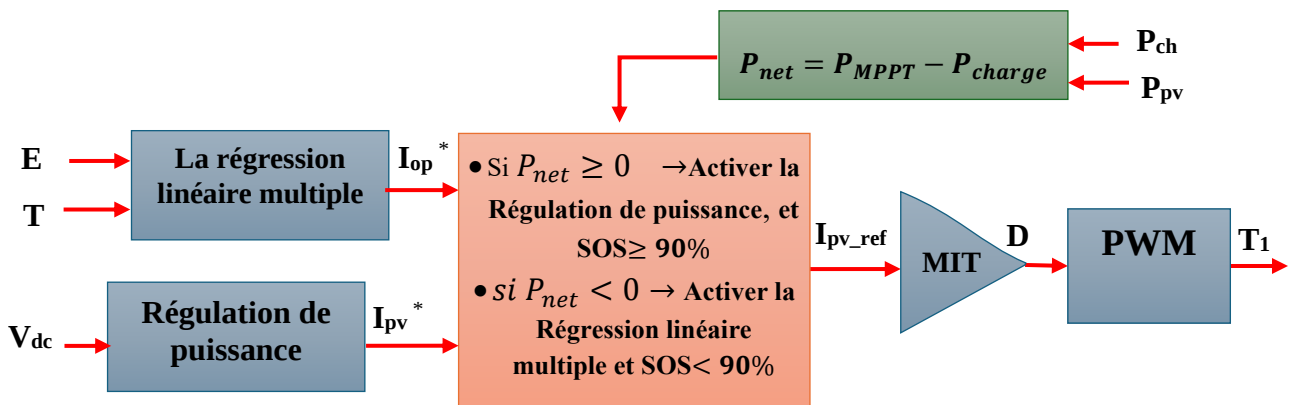


Fig III. 15 : Schéma décrivant le basculement entre les deux modes

3.3.2. Commande coté Batterie :

Dans un système hybride associé à un générateur photovoltaïque (PV), la gestion de l'énergie dépend fortement de la commande côté batterie (voir la **Fig III. 16**).

Objectifs visés par la commande :

- **Premièrement**, il est essentiel d'assurer une source d'énergie : Il s'agit de compenser les variations de l'énergie photovoltaïque en termes de diminution ou d'augmentation.
- **Deuxièmement**, charge et décharge : nous protégeons la batterie contre la surcharge/décharge profonde. Utilisation d'un convertisseur DC-DC bidirectionnel
- **Troisième, améliorer** la circulation de l'énergie : Optimisation de l'utilisation de l'énergie selon les besoins en charge.
- **Quatrièmement et enfin**, Basculement entre les modes : Mets en marche la batterie si la génération d'énergie photovoltaïque est insuffisante.

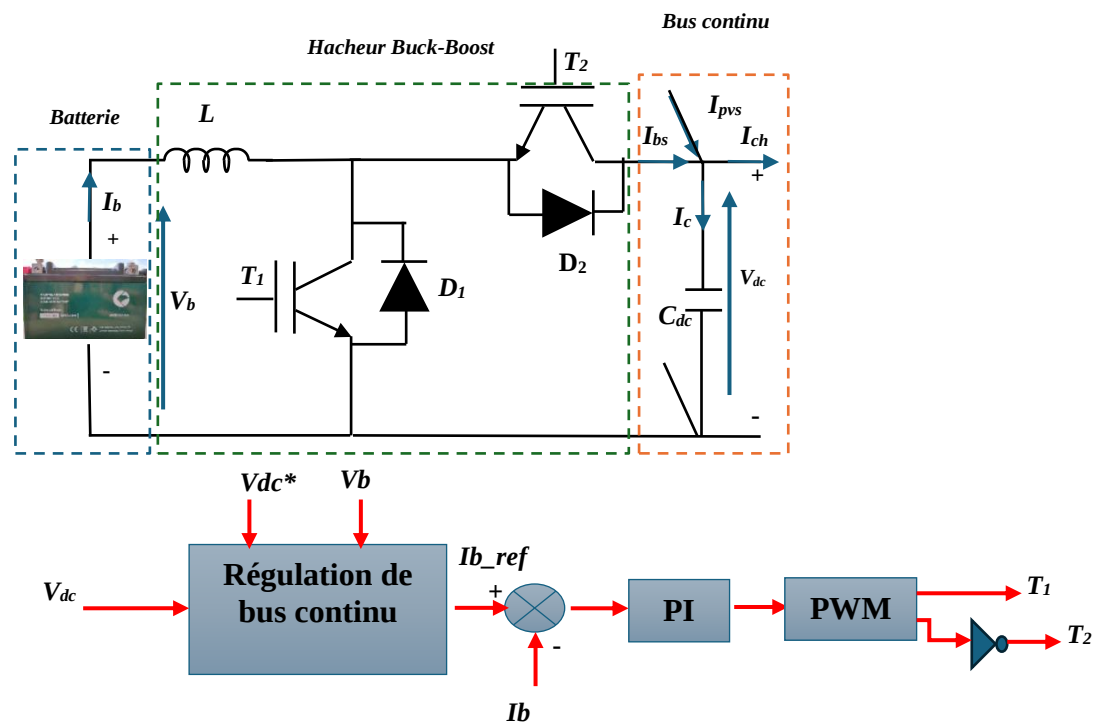


Fig III. 16 : Schéma synoptique de la commande du convertisseur

Buck-Boost coté Batterie

3.3.2.1. Régulation de la tension du bus continu

Cette régulation vise principalement à assurer une tension constante sur le bus continu, indépendamment des perturbations pouvant affecter le système en fonctionnement.

La conception de cette commande est basée sur la théorie de lyapunov, Avec le même contrôleur mode régulation de puissance.

On définit l'erreur de tension du bus comme suit :

$$e(t) = v_{dc}(t) - v_{dc_{ref}} \quad (\text{III. 61})$$

La dérivée de l'erreur issue de la même Fonction de Lyapunov précédemment décrite est alors :

$$\dot{V}(t) = e\dot{e}(t) = -k'e^2 \leq 0 \quad (\text{III. 62})$$

Avec :

$$\dot{e}(t) = \dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc_{ref}} ; \dot{V}_{dc_{ref}} = 0 \quad (\text{III. 63})$$

L'équation d'état de la tension du bus se met sous :

$$V_{dc}\dot{(t)} = \frac{dv_{dc}}{dt} = \dot{x}(t) = \frac{1}{c}(I_{pvs} + I_{bs}) - \frac{V_{dc}}{\hat{R}c} \quad (\text{III. 64})$$

Alors :

$$\frac{1}{c}(I_{pvs} + I_{bs}) - \frac{V_{dc}}{\hat{R}c} = -K'e \quad (\text{III. 65})$$

Donc, définissons le courant de sortie de le hacheur coté PV I_{pvs} comme entrée de perturbation, le courant de sortie du convertisseur bi-directionnel coté batterie, identifié comme variable de commande se déduit ainsi :

$$I_{bs} = -K'e + \frac{V_{dc}}{\hat{R}c} - I_{pvs} \quad (\text{III. 66})$$

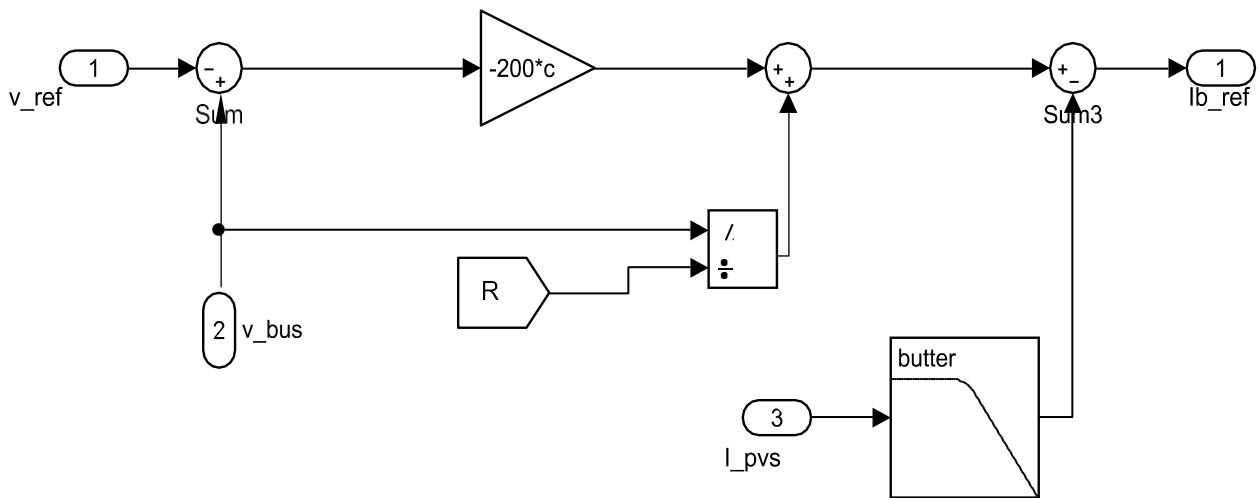


Fig III. 17 : Schéma fonctionnel de la commande rapprochée coté batterie

Le courant de référence du Batterie se détermine alors par :

$$I_{b_ref} = \frac{V_{c_ref} * I_{bs}}{V_b} \quad (III. 67)$$

Le choix du mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel, qu'il s'agisse d'un « convertisseur Boost » pour décharger la batterie ou d'un « convertisseur Buck » pour charger la batterie, dépend du signe du courant de batterie de référence I_{b_ref} , déduit de l'équation (III. 67)

Quant aux critères de sélection eux-mêmes, ils se présentent comme suit :

$$\begin{cases} \text{si } i_{bref} > 0 \Rightarrow & p_{ch} > P_{pv} & \Rightarrow \text{fonctionne comme boost} \\ \text{si } i_{bref} < 0 \Rightarrow & p_{ch} < P_{pv} & \Rightarrow \text{fonctionne comme buck} \end{cases}$$

3.3.3. Différents Schémas de l'écoulement de puissance pour chaque mode

- **Mode 1** : $P_{pv} = 0, SOC < 30\%$: Charge déconnectée.
- **Mode 2** : $P_{pv} > P_{ch}, 30\% \leq Soc \leq 90\%$ Conservation de l'énergie excédentaire dans les batteries.

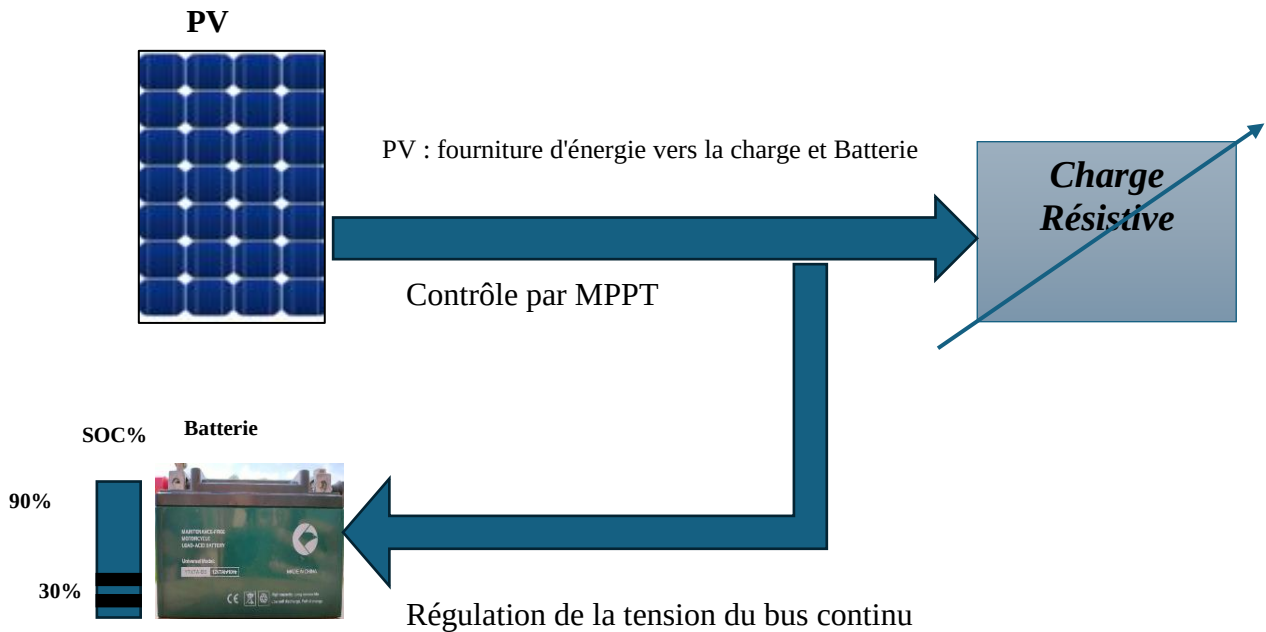


Fig III. 18 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 2

- **Mode 3** : $P_{pv} < P_{ch}$, $30\% \leq Soc \leq 90\%$ Alimentation par les batteries et PV

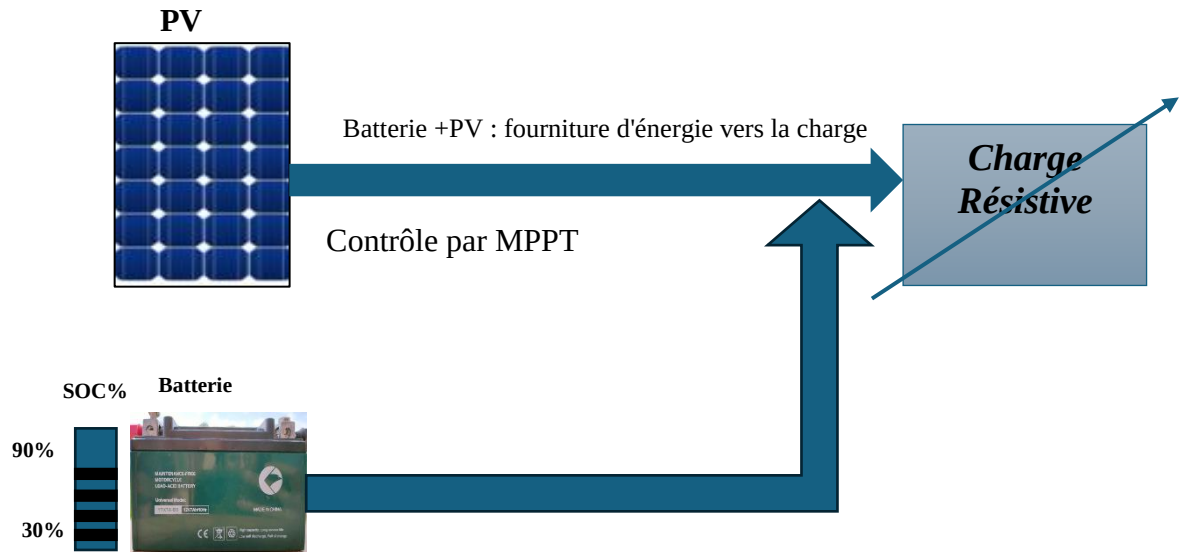


Fig III. 19 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 3

- **Mode 4** : $P_{pv} = P_{ch}$, $SOC > 90\%$ Alimentation uniquement par les Pv

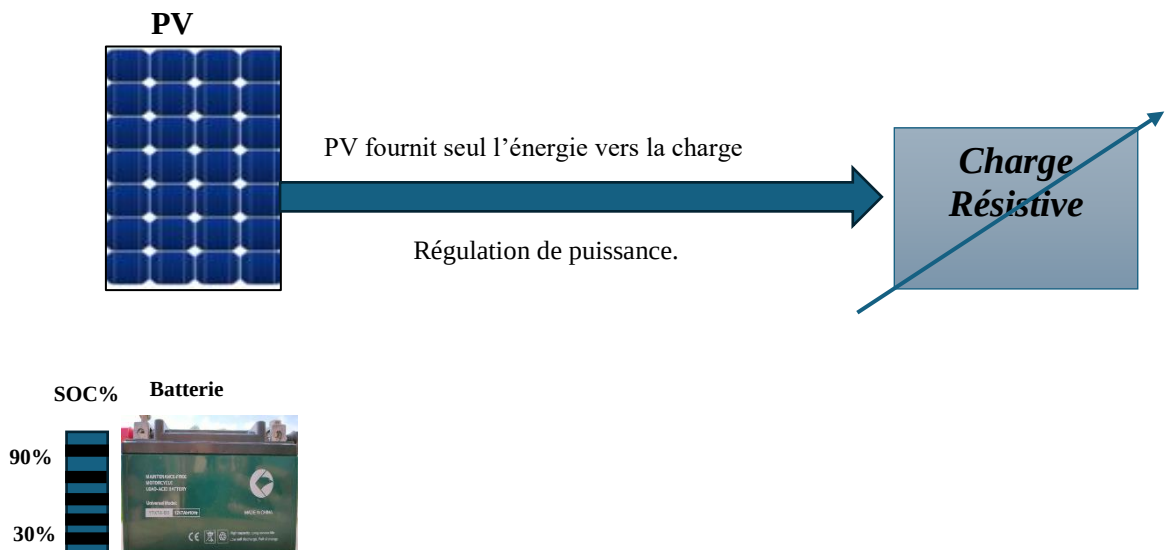


Fig III. 20 : Schéma de l'écoulement de puissance pour Mode 4

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les stratégies de gestion de l'énergie proposées pour la configuration hybride proposée. Une approche de contrôle avancée est proposée, incluant : le contrôle côté photovoltaïque grâce à des algorithmes issus de l'intelligence artificielle et de la théorie de contrôle. En outre, la deuxième source à puissance fine, qui est la batterie, une synthèse explicite sur la commande rapprochée du convertisseur Buck-Boost associé a été également fournie.

Cette étude souligne l'importance des algorithmes avancés dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes hybrides et présente des diagrammes de flux de puissance pour diverses conditions de fonctionnement dans le but d'atteindre l'efficacité et la stabilité du système. Pour vérifier la validité des lois de commande spécifiques, des simulations et des validations, seront réalisées et présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Validation des contrôles

4.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons vérifier l'efficacité et la faisabilité des algorithmes de contrôle proposés, ce qui constitue une étape fondamentale pour assurer la précision et le bon fonctionnement du système avant leur mise en œuvre pratique. Dans ce contexte, Ce processus comprend plusieurs méthodes différentes, visant à obtenir les performances issues de ces techniques ; on peut citer par exemple, le MIL, le PIL, le SIL, et le HIL et finalement le P-HIL. Ces approches ont pour but de soumettre le système à des tests à divers niveaux, en partant du modèle théorique et en arrivant aux appareils pratiques, L'utilisation de ces approches permet de minimiser les fautes et d'optimiser les performances avant l'application finale, ce qui favorise la création de systèmes de gestion fiables et efficaces.

4.2. Différentes Méthodes de Validation

Dans le cadre de l'évaluation de la validité des systèmes de contrôle, il existe plusieurs types de tests à réaliser ; dont certains sont cités ici :

- a) **MIL (Model-in-the-Loop)** : Le premier test débute par un système basé sur le modèle et l'approche de commande, tel qu'illustré dans le schéma de (voir la **Fig IV. 1**). L'analyse du modèle se fait à travers la mise en œuvre de la simulation sous un Package de calcul approprié, comme le Matlab/Simulink. Cette simulation ne se déroule pas en temps réel, au contraire des phases les plus avancées comme le HIL, ce qui signifie que les modifications peuvent être appliquées immédiatement et que leurs effets peuvent être testés directement. L'idée fondamentale derrière le MIL réside dans la création et la vérification de la validité de certains composants ou du modèle dans son ensemble (système + contrôle) sur une plateforme informatique, où le modèle est testé sans avoir besoin d'interagir avec un équipement matériel précis, qui permet de détecter rapidement les erreurs et de les corriger [35].

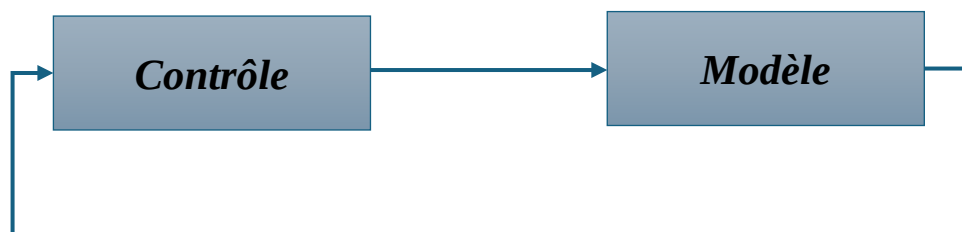


Fig IV. 1: Approche Model-In-The-Loop

b) SIL (Software-In-The-Loop) : Le modèle utilisé pour le test MIL peut être remplacé par un autre, exécuté sur la même plateforme informatique, et il est programmé en langage C/C++ ou bien en utilisant la virgule fixe (Fixed-point arithmetic). Cette étape aide les développeurs à vérifier plusieurs aspects essentiels :

- Sélectionner le bon type de données adapté, Certains types de données peuvent ne pas être précis ou consommer une grande capacité de mémoire.
- Découverte des erreurs de programmation. Lors du passage des modèles mathématiques à la programmation pratique, des erreurs peuvent survenir dans le codage ou les calculs, ainsi que les problèmes liés à la taille de mémoire, etc., Souvent, l'exécution de ces deux phases se fait à l'aide d'un seul et même logiciel sur un PC [35].

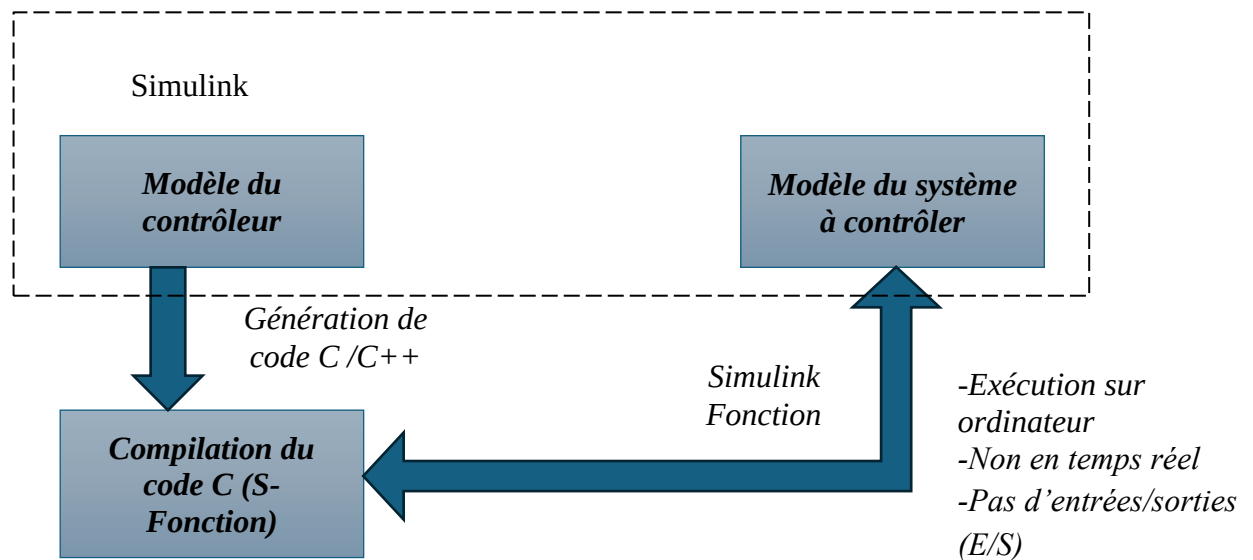


Fig IV. 2: Approche Software-In-The-Loop

c) PIL (Processor-In-The-Loop) : Le code a été exécuté avec succès et sa validation a été réalisée durant l'étape SIL par rapport à l'objectif matériel en cours d'évaluation, Le code a été exécuté avec succès et sa validation a été réalisée durant l'étape SIL par rapport à l'objectif matériel en cours d'évaluation.

Analyser l'exécution du programme en surveillant :

- L'utilisation de la mémoire (RAM, Flash, etc.).
- La durée d'exécution des algorithmes.

Comme étape suivante, le PIL cible à implémenter l'algorithme du contrôle, et son code généré en C/C++ sur une carte de développement, de type DSP, Arduino, STM32F, alors

que le modèle du système à contrôler réside toujours sur le CPU. Cette interaction permet en fait de s'assurer que cet algorithme de commande peut être chargé et utilisé en temps réel dans une application Hardware.

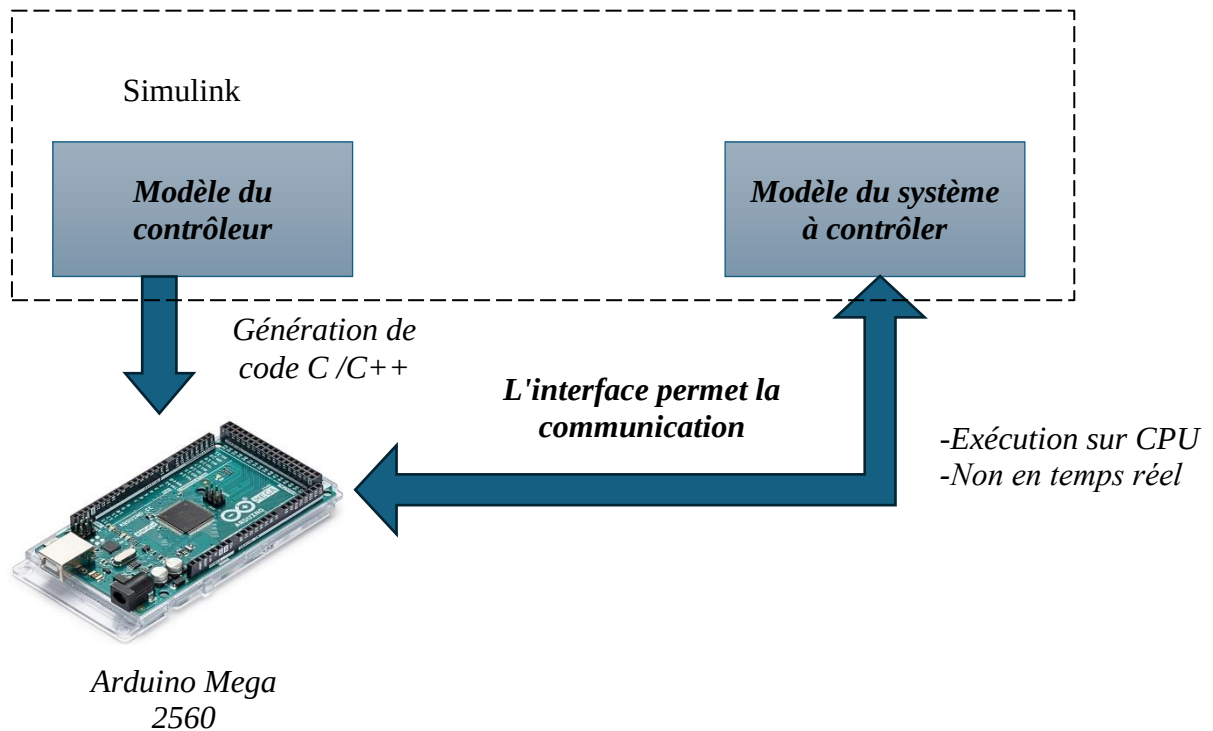


Fig IV. 3: Approche Processor -In-The-Loop

d) HIL (Hardware-In-The-Loop) : La simulation HIL est une méthode technologique utilisée pour tester les systèmes embarqués, en particulier les unités de contrôle électronique (ECU) ou de type STM32, DSPACE, en les connectant à un environnement de simulation qui reproduit le comportement du système réel. Cette technologie vise à réduire les risques et à améliorer les performances du système avant sa mise en œuvre réelle, On la connaît aussi sous le nom de simulation expérimentale (émulation), qui se divise en deux types principaux de simulation [35].

- **Simulation HIL de type signal :** Une évaluation de l'unité de contrôle doit être effectuée avant sa mise en œuvre dans le système réel, On n'utilise pas les composants de l'énergie active, mais on les remplace par un environnement simulé capable d'envoyer des signaux numériques et représentatifs à l'unité de contrôle. La simulation s'effectue en temps réel dans un environnement HIL, permettant de tester les fonctions ECU sans nécessiter de connexion à des composants matériels réels, comme la montre (voir la Fig IV. 4. Cette technique, adoptée dans le présent travail, vise à tester l'interaction en temps

réel entre les algorithmes de commande, implantés dans une carte de développement (Dspace, Dsp,...), et le modèle du système à contrôler, implanté à son tour dans une deuxième carte, avec un partage des entrées et des sorties par des ADC (Analog to Digital Converter), des DAC (Digital to Analog Converter), ainsi que d'autres signaux de type série (RST32,...), et PWM. Cette étape, exécutée en temps réel, constitue en fait une méthode efficace de vérification de la modélisation du système à contrôler (convertisseurs statiques, sources, machines tournantes,...), et les degrés de reproduction du comportement du système physique.

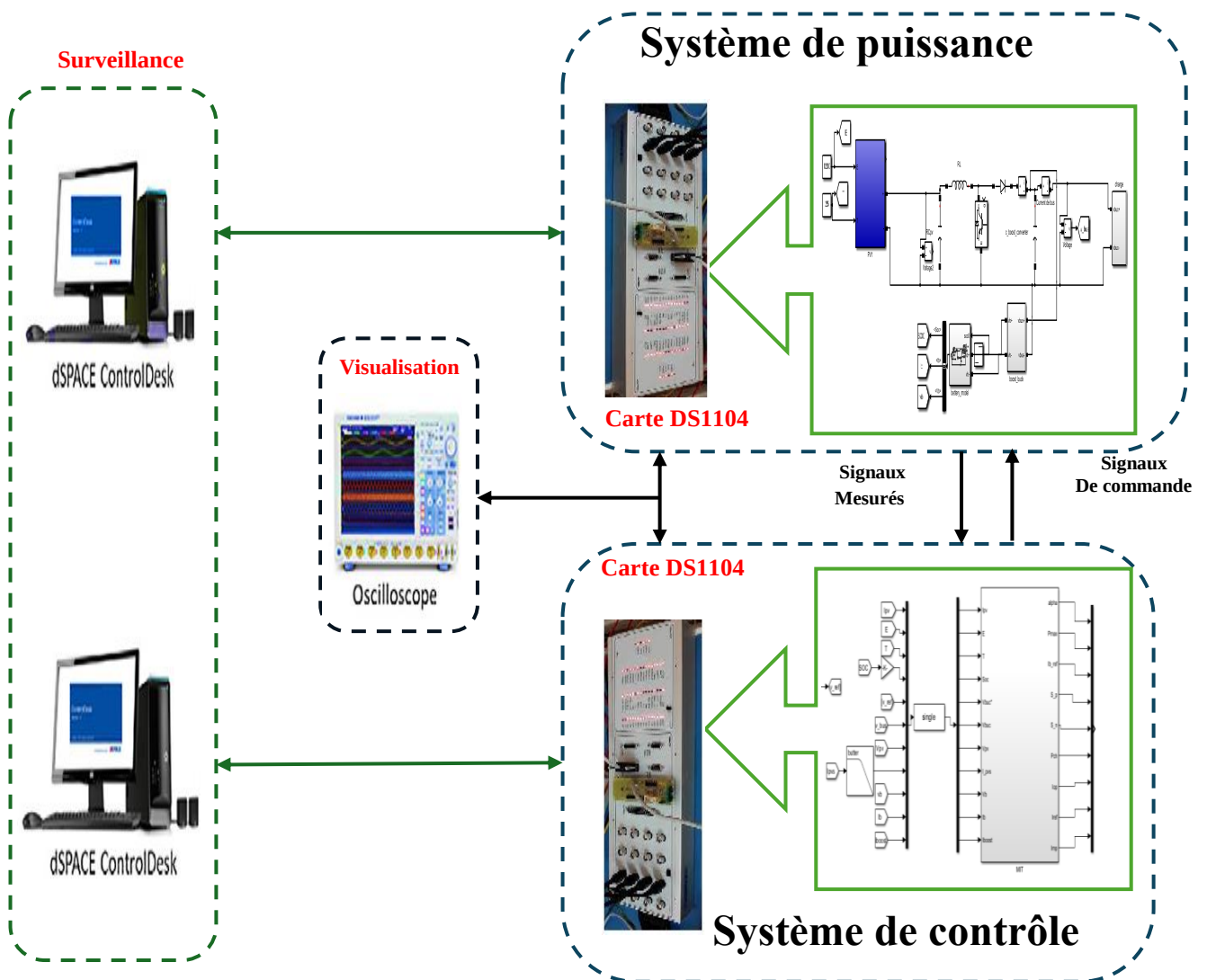


Fig IV. 4: Approche Hardware-In-The-Loop

- **Simulation HIL de type puissance ou Power-HIL :** C'est une technologie de simulation énergétique de pointe, qui sert à évaluer le composant physique concret pour un système donné, dans des conditions presque identiques à celles du monde réel. On applique cette approche en particulier pour vérifier l'efficacité des systèmes auxiliaires d'énergie avant de les fusionner avec le système principal, Il nécessite une simulation de haut niveau capables de gérer des signaux d'une grande complexité et un effort considérable pour reproduire le fonctionnement du système de manière intégrale, Comme la montre (voir la **Figure IV. 5**) [36].

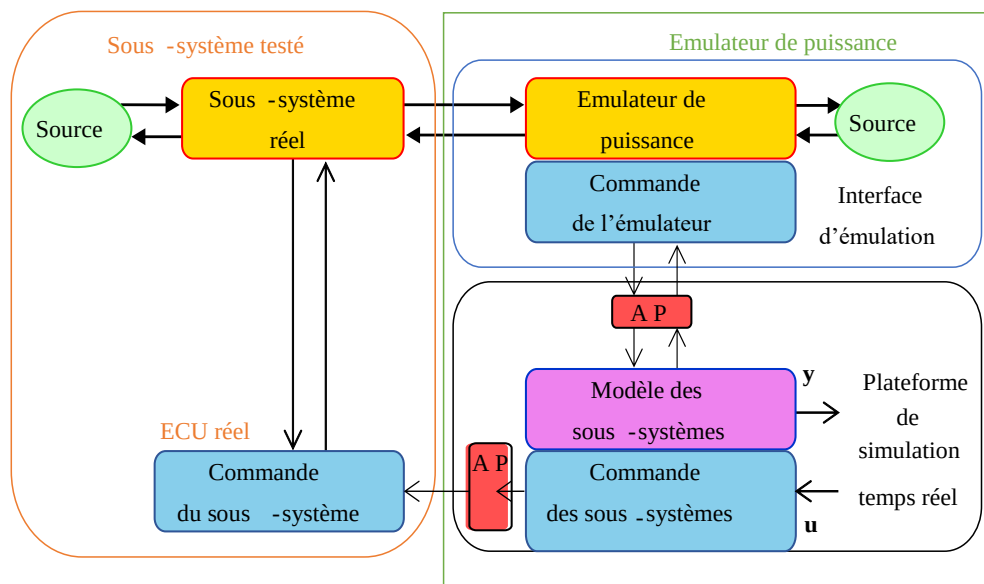


Fig IV. 5 : Organisation fonctionnelle d'une simulation P-HIL

Dans le cadre de ce travail, et pour évaluer les performances de l'algorithme de gestion d'énergie, présenté dans le chapitre précédent, une validation par les approches MIL, PIL et HIL sera présentée, adoptant un profil de charge, de l'éclairement et la température de la cellule, qui changent en créneaux. Cela permettra de mettre en exergue clairement les performances du système.

4.2.1. MIL (Résultat de Simulation) :

Dans cette section, nous passerons à la mise en œuvre du système hybride que nous avons étudié sous l'environnement Matlab/Simulink. L'objectif est d'étudier le comportement du système lorsque deux variables principales changent : l'éclairement solaire et la température des

cellules solaires. L'accent sera mis sur les effets dynamiques de ces variables sur le système, comme indiqué sur (voir la FigIV. 6) Pour cela, un temps de simulation de 5 secondes a été choisi.

❖ **Résultat pour un Eclairement Température et variable et une Charge variable**

• **Profile D'éclairement et Température :**

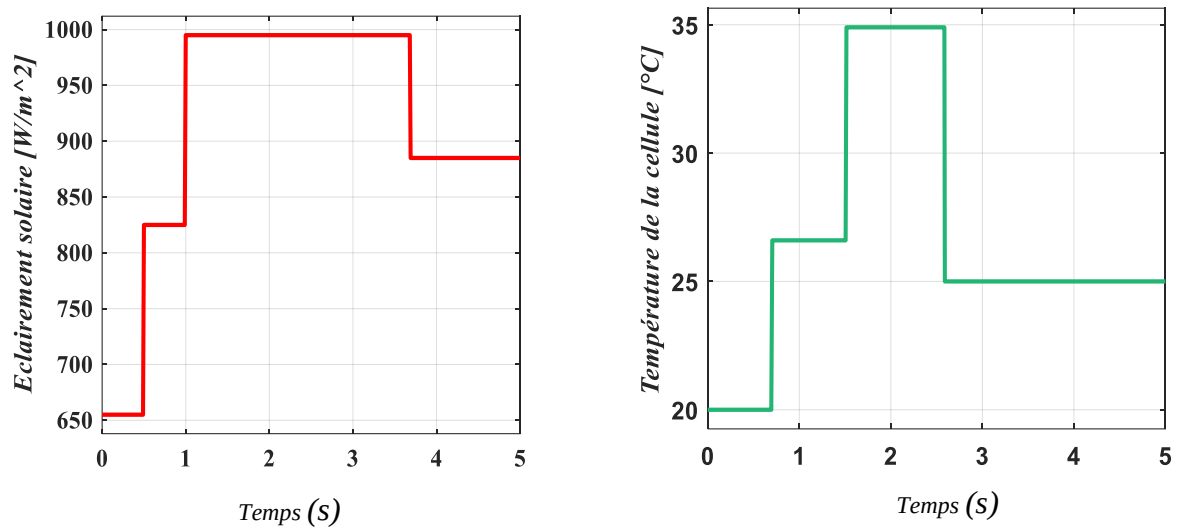


Fig IV. 6 : profile d'éclairement et température

• **Profile de charge :**

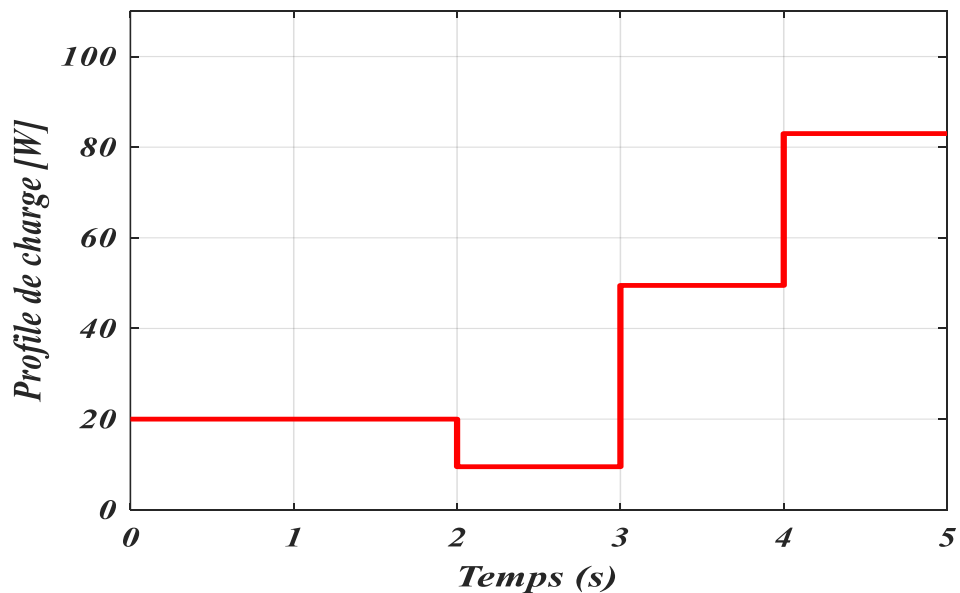


Fig IV. 7 : profile de charge

Après avoir fourni un fichier descriptif pour d'éclairement, la température et la charge, les performances englobent en fait les tracés des puissances des deux sources, comparées à celle de

la charge ; les tracés des courants, des tensions dans divers nœuds, ainsi que les rapports cycliques.

Pour bien distinguer les différents modes de fonctionnement, l'état de charge initiale SOC (0) de la batterie, est choisi à chaque présentation.

Nous supposons $SOC(0) = 50\%$

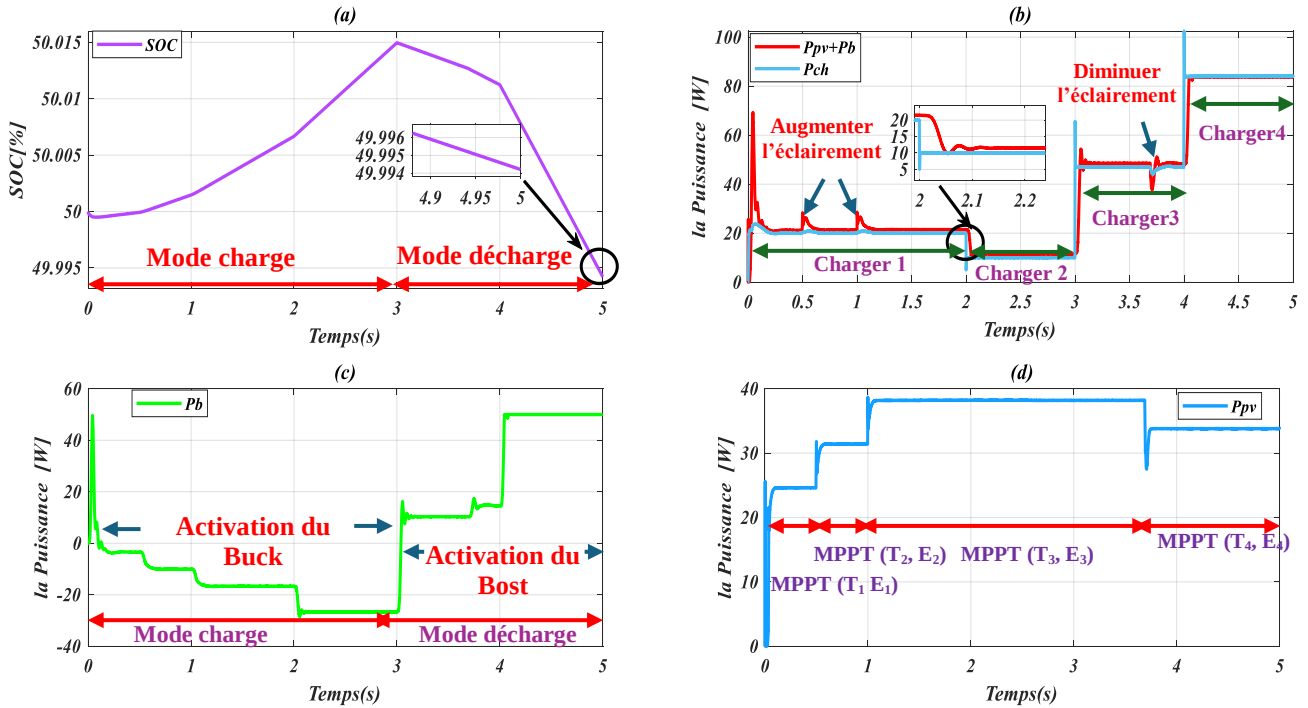


Fig IV. 8 : Allures issues du MIL : (a)SOC de la batterie ;(b) la Puissance totale ;
(c) La Puissance de la batterie ;(d) la Puissance du module PV

Selon ces courbes de (voir la Fig IV. 8), Le niveau de charge de la batterie commence à environ 50 %, puis augmente légèrement de [0s, 3s] grâce à l'apport d'énergie du panneau solaire. Ce résultat est dû principalement à la demande modérée de la charge, variant de 20 W à 10 W, ce qui permet en fait au panneau de couvrir cette puissance, et charge la batterie. On note aussi que pendant l'intervalle de temps entre [1s, 2s], une légère augmentation du SOC est obtenue, alors que cette augmentation est plus rapide entre [2s, 3s] ; qui est dû en fait à la diminution de la charge et à l'augmentation de l'éclairement solaire. Au-delà de 3 secondes, une augmentation notable de la charge (80 W), notée, ce qui oblige la batterie à combler le déficit de puissance, non couvert par le panneau ; la batterie se décharge alors, et son SOC diminue.

L'énergie totale fournie au système est égale à la somme de l'énergie générée par le panneau solaire et de l'énergie extraite de la batterie, dans la totalité du temps de simulation. Dans les

moments de forte demande, les batteries jouent un rôle majeur dans la réduction de la consommation d'énergie nécessaire, ce qui prouve l'efficacité de l'algorithme de gestion proposé.

La Puissance de la batterie, pendant la fenêtre de temps $[0s,3s]$ est notée négative (récepteur), indiquant que le système fonctionne en mode 2, bien adapté aux charges modérées ; tandis que pendant l'intervalle de temps $[3s,5s]$, cette puissance est positive (émetteur), où le système bascule au mode3, faisant de faire passer la batterie de l'état de charge à l'état de décharge.

L'algorithme MPPT par régression linéaire permet de garantir l'extraction maximale de l'énergie du panneau solaire pendant toute la période de simulation. Cela se traduit par une stabilité de la puissance générée (P_{pv}) malgré les variations de la charge.

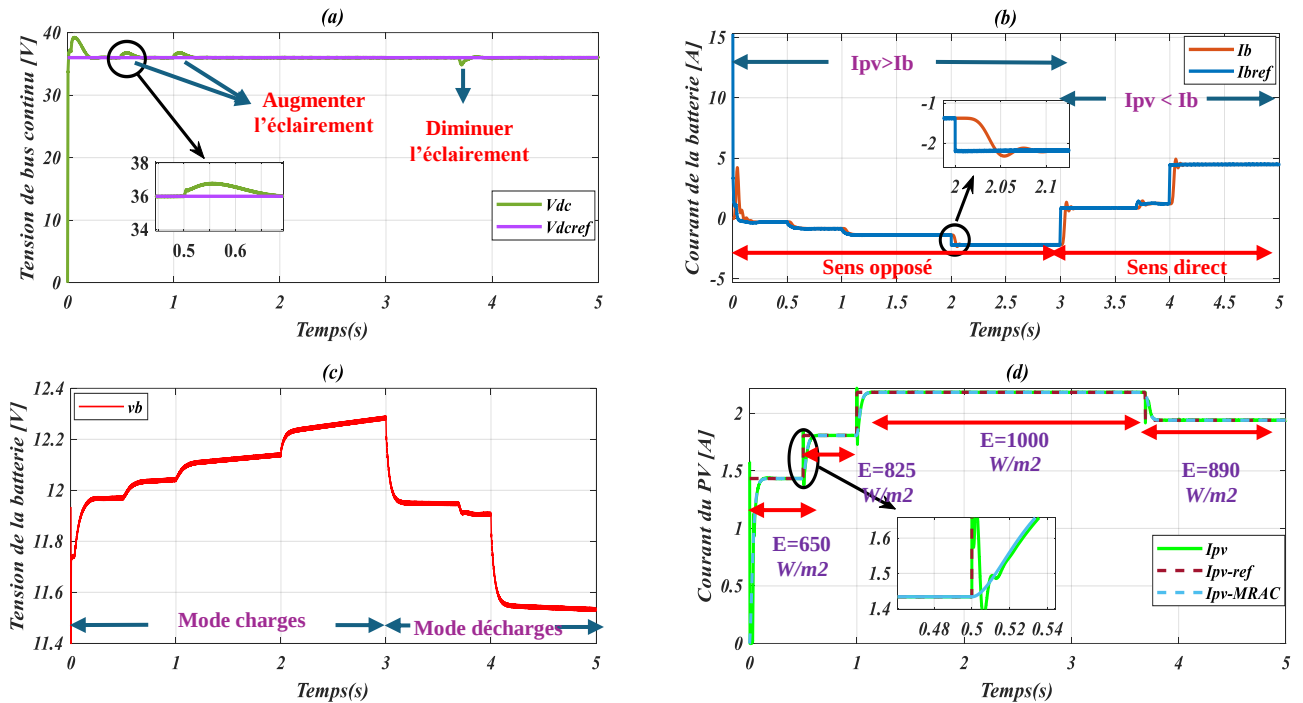


Fig IV. 9 : Résultats du MIL : (a) Tension du bus continu ;(b) Courant de la batterie ;

(c) Tension de la batterie ;(d) Courant du panneau PV

Sur (voir la Fig IV.9) sont illustrés les tracés de la tension du bus, du courant et de la tension de la batterie, ainsi que le courant du panneau. Ces allures décrivent en fait la commande rapprochée des deux convertisseurs statiques, et permettent de retenir quelques remarques :

- La tension du bus, issu du contrôleur robuste, est bien régulée, et se stabilise à sa valeur de consigne de 36 V, après une phase transitoire, malgré les variations de la charge, l'éclairement solaire, la température, et le changement de régimes de la batterie. Il est à signaler que cette régulation est une condition clé qui permet un partage de puissance adéquat.

- b) Pour le courant de la batterie ; et comme premier constat : un suivi parfait de ce dernier de sa valeur de référence pendant tout l'intervalle de temps ; ce qui prouve l'efficacité du régulateur intégré. Comme deuxième remarque : pendant l'intervalle $[0s, 3s]$, le courant de la batterie (I_b) est négatif, ce qui signifie que la batterie est en charge, À mesure que la charge augmente, le courant devient positif, ce qui signifie qu'il utilise l'énergie de la batterie pour alimenter la charge. Après (3s), le courant de la batterie augmente en monotonie avec l'augmentation de la charge.
- c) La tension de la batterie commence à environ 12 volts, et commence à augmenter pendant l'intervalle $[0s, 3s]$, à cause du fonctionnement en mode 2 (mode charge). Au-delà de 3s, l'augmentation de la charge provoque une légère baisse de la tension en raison de l'augmentation du courant extrait de la batterie.
- d) Le courant du panneau solaire démarre à une valeur proche de 1.5 A estimée à partir de la régression linéaire. Avec la variation de l'éclairement solaire, le contrôleur MIT ajuste ses paramètres pour faire converger le courant du panneau I_{pv} vers sa consigne dans le but d'améliorer les performances du système et de maintenir la production d'énergie près du point optimal.

Pour tester un autre mode de fonctionnement, qui est en fait le 'Mode de Régulation de Puissance, un nouveau profile de charge est présenté, et un nouveau état de charge initial

SOC (0) =91% est à son tour choisi. Cela indique que la batterie ne peut pas être chargée

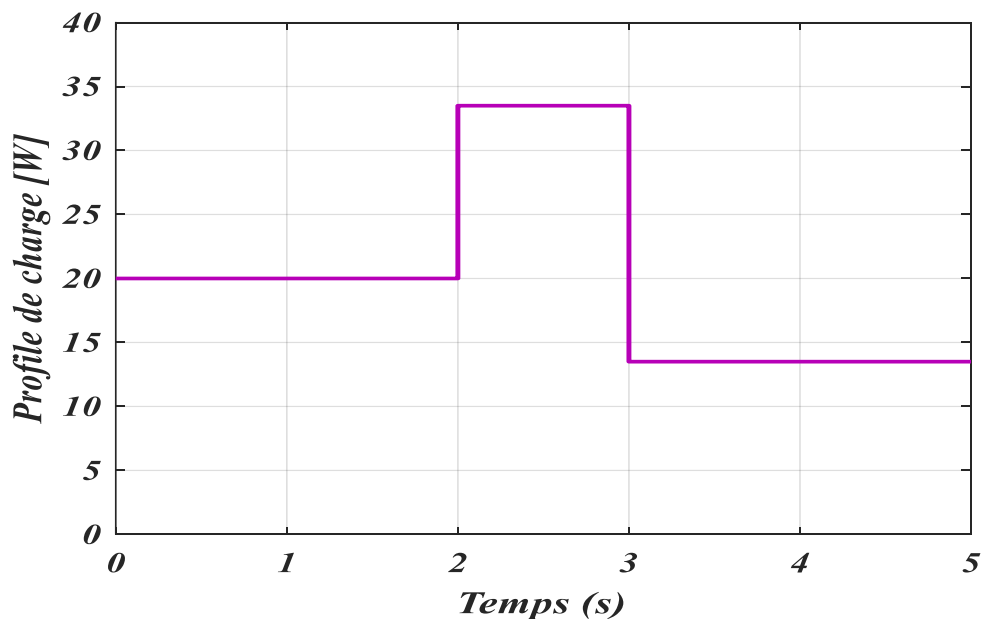


Fig IV. 10 : Nouveau Profile de charge

Nous obtenons les résultats suivants, illustrés sur (voir la **Fig IV. 11**) :

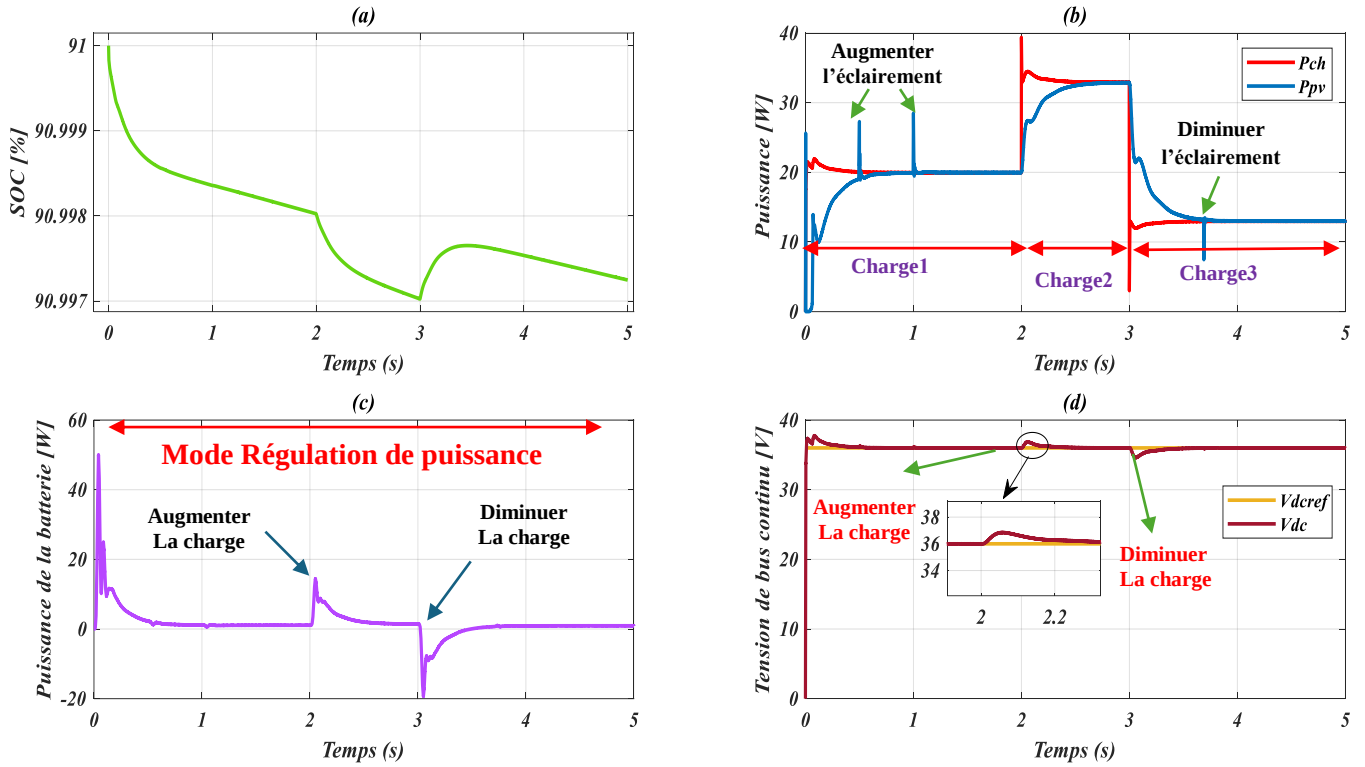


Fig IV. 11 : Résultats du MIL : (a)SOC de la batterie ;(b) la Puissance du Pv et la charge ;
(c) la Puissance de la batterie ;(d) Tension de bus continu

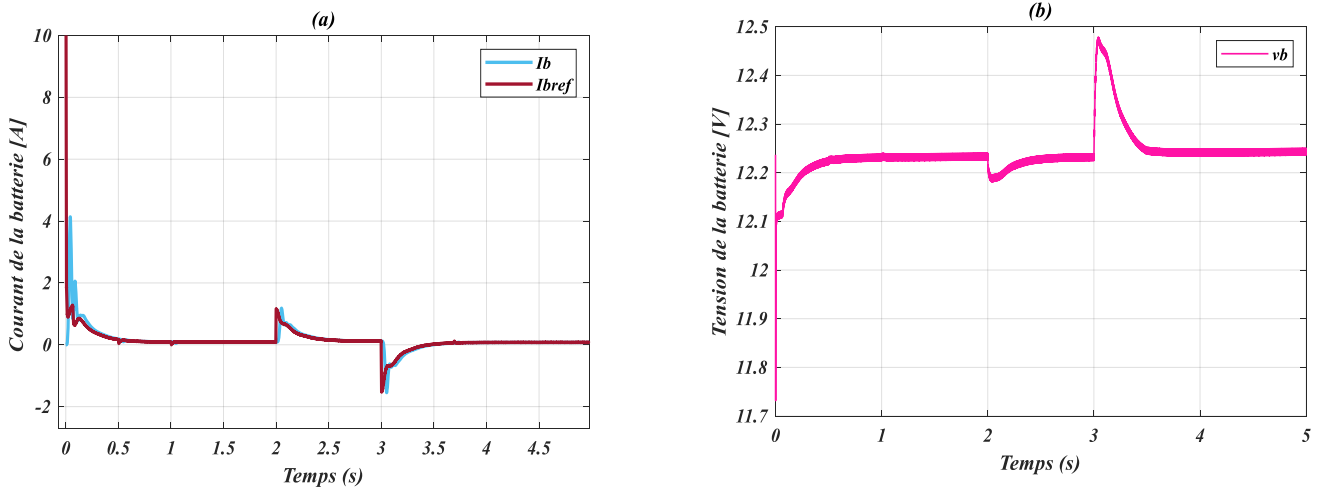


Fig IV. 12 : La représente l'allure MIL : (a) Courant de la batterie ;
(b) Tension de la batterie

Nous remarquons que dans ce mode, le panneau solaire délivre uniquement la puissance demandée par la charge ($P_{pv} = P_{ch}$) pendant toute la période de simulation. Cela est un résultat de

la régulation de la tension de bus V_{buc} , qui reste constante et suit la valeur de référence. Cela conduira automatiquement à faire transférer la puissance demandée, du panneau à la charge.

Quant au courant de la batterie, il est quasiment nul sauf dans le régime transitoire, alors que la tension de la batterie, elle ne subit aucun changement, et oscille autour de 12 V ; se qui signifie que le panneau contribue seul dans l'écoulement de puissance.

4.2.2. Résultats du PIL (Processor-In-the-Loop)

Pour valider davantage l'efficacité du contrôle proposé, une approche expérimentale basée sur le PIL (Processor-In-the-Loop) a été adoptée en raison de l'indisponibilité du matériel nécessaire à notre système, La vérification à l'aide de PIL est une approche raisonnable et peu coûteuse pour développer des prototypes.

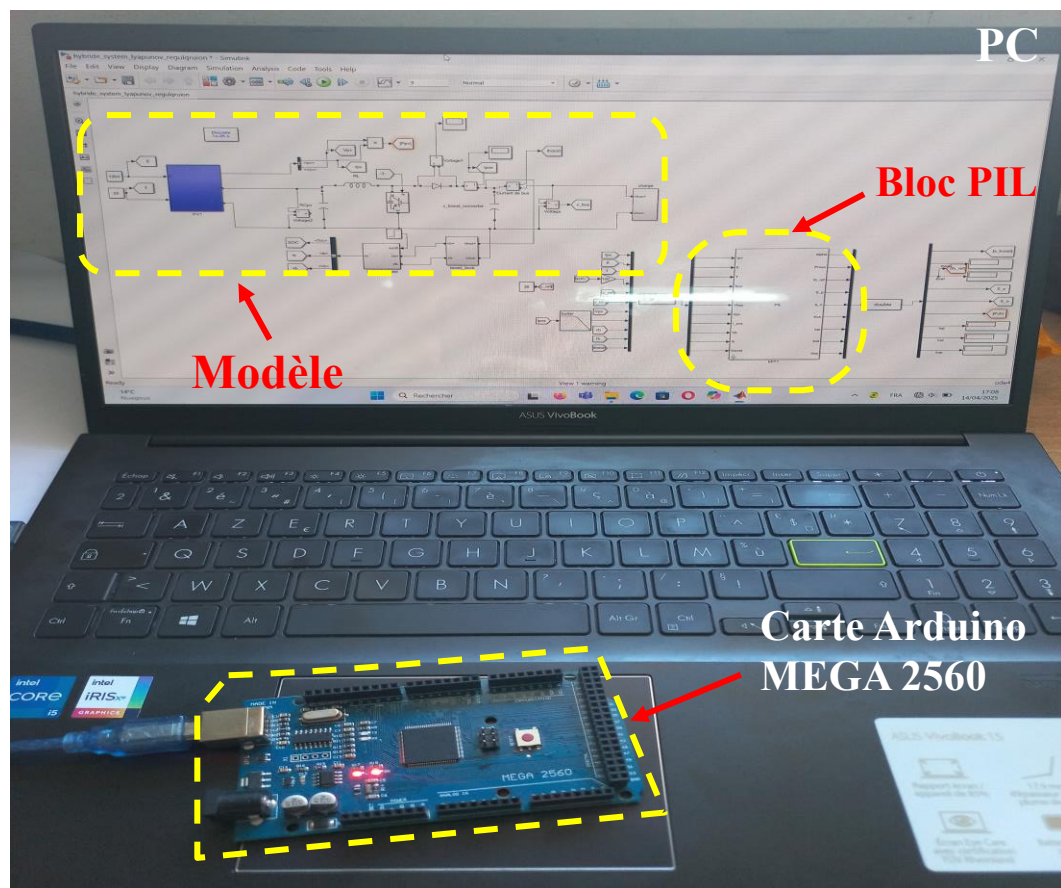


Fig IV. 13 : Description expérimentale du système PIL

Nous allons maintenant considérer un scénario de contrôleur dynamique. Le circuit de puissance est modélisé sur un ordinateur portable utilisant Simulink R2018a avec une résolution temporelle de $T_s=1e-5$ (s), tandis que l'algorithme de gestion est chargé sur le microcontrôleur

de la carte Arduino-MEGA-2560. Une communication bidirectionnelle est ensuite établie entre le processeur de l'ordinateur portable via le port série. Le dispositif expérimental est illustré sur (voir la Fig IV. 13).

Pour la validation, le premier Profile d'éclairement et température, ainsi que le $SOC(0) = 50\%$ sont adoptés. Les résultats obtenus sont illustrés sur (voir la Fig IV. 14 et Fig IV. 15) :

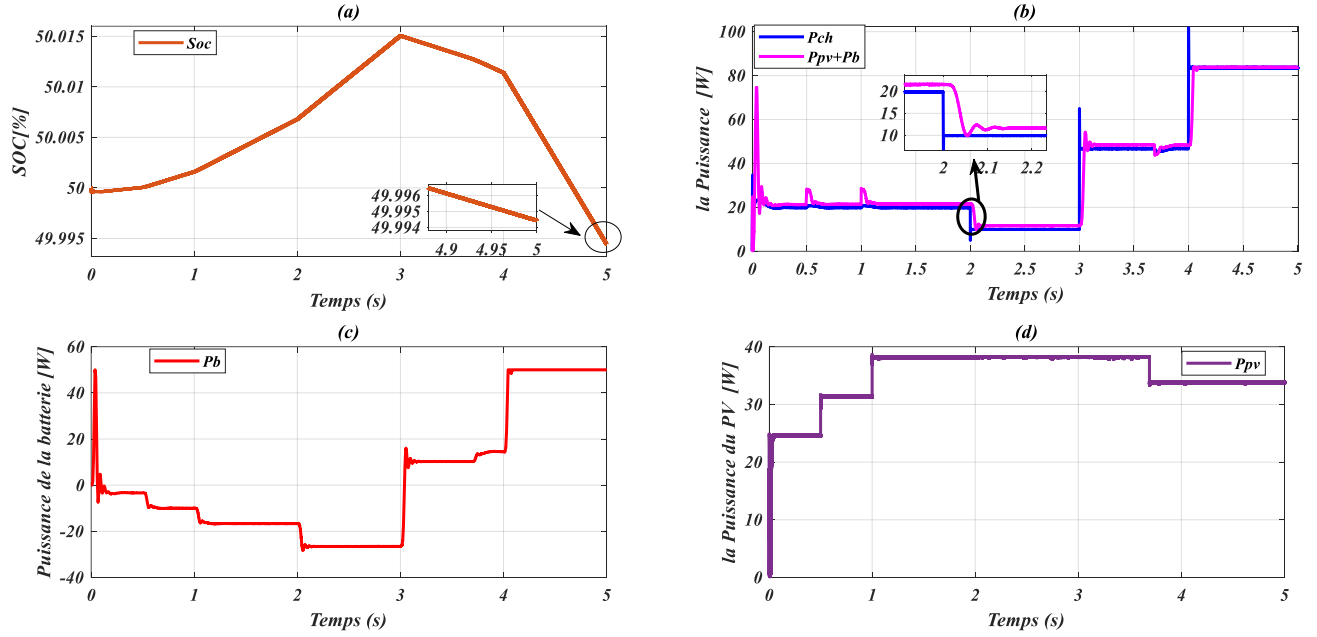


Fig IV. 14 : Résultats issus du PIL : (a) SOC de la batterie ;(b) Puissance totale ;
(c) Puissance de la batterie ;(d) Puissance du PV

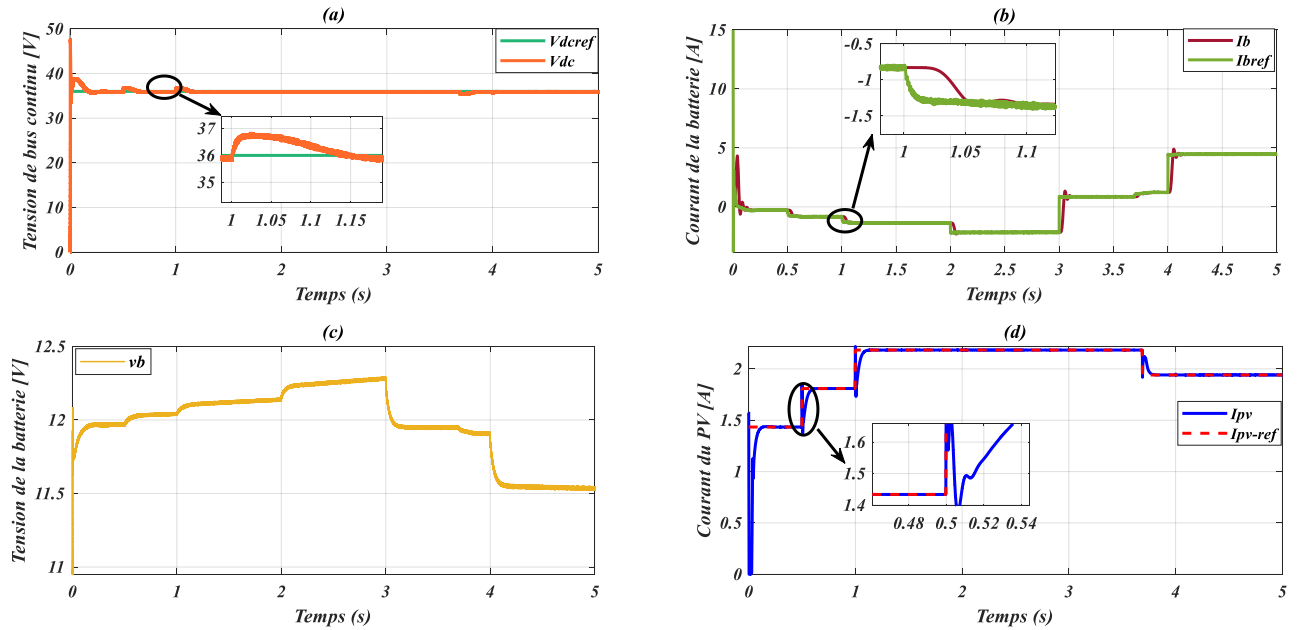


Fig IV. 15 : Allures issues du PIL : (a) Tension de bus continu ;(b) Courant de la batterie ;
(c) Tension de la batterie ;(d) Courant du panneau PV

On observe qu'en utilisant le test PIL, le modèle Simulink sur PC et celui sur Arduino MEGA fonctionneront simultanément et échangent des données en se basant sur le contrôleur modifié implémenté via le module PIL. Par conséquent, le test PIL peut être utilisé comme une solution à faible coût pour tester la mise en œuvre physique du contrôleur dans différentes conditions de rayonnement solaire et de température. En ce qui concerne les résultats obtenus à partir du test PIL, nous constatons qu'il y a une correspondance et une reproduction des mêmes résultats issus du test MIL, ce qui confirme l'efficacité du contrôleur, la validité de ses fonctions, ainsi que sa robustesse.

4.2.3. Validation par le Concept HIL (Hardware-In-the-Loop)

Cette méthode permet de valider l'algorithme de contrôle, ainsi que l'exactitude des modèles utilisés pour représenter le système à contrôler dans un environnement en temps réel. Pour ce faire, le système à commander est modélisé sur un ordinateur utilisant Simulink/Matlab connecté à un contrôleur matériel réel (Carte dSPACE 1104), alors que l'algorithme de commande est compilé sur une deuxième carte sur dSPACE 1104. Une interface de communication permet un échange bidirectionnel des signaux entre le système énergétique et l'unité de contrôle en temps réel. Les mesures (telles que les courants et les tensions) sont inters changés via des convertisseurs ADC et DAC, alors que le contrôleur délivre les signaux PWM au système de puissance pour commander les deux convertisseurs DC-DC du système. L'approche HIL suggérée a été testée au sein du laboratoire LGEB, et les résultats obtenus sont acquis sur un oscilloscope à quatre voies, et illustrés ci-après.

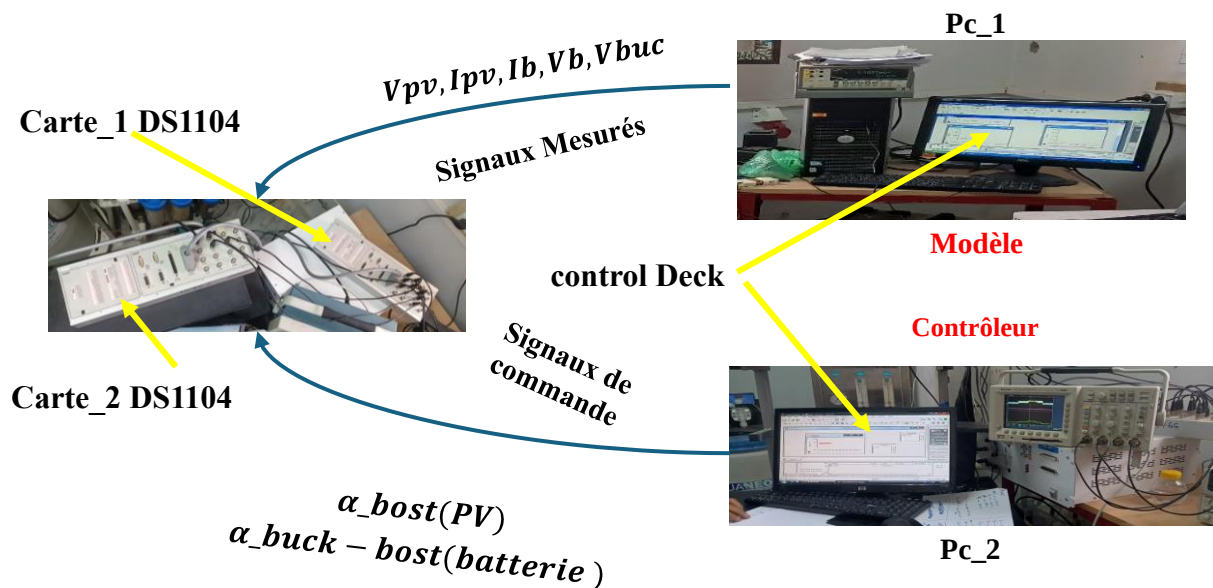
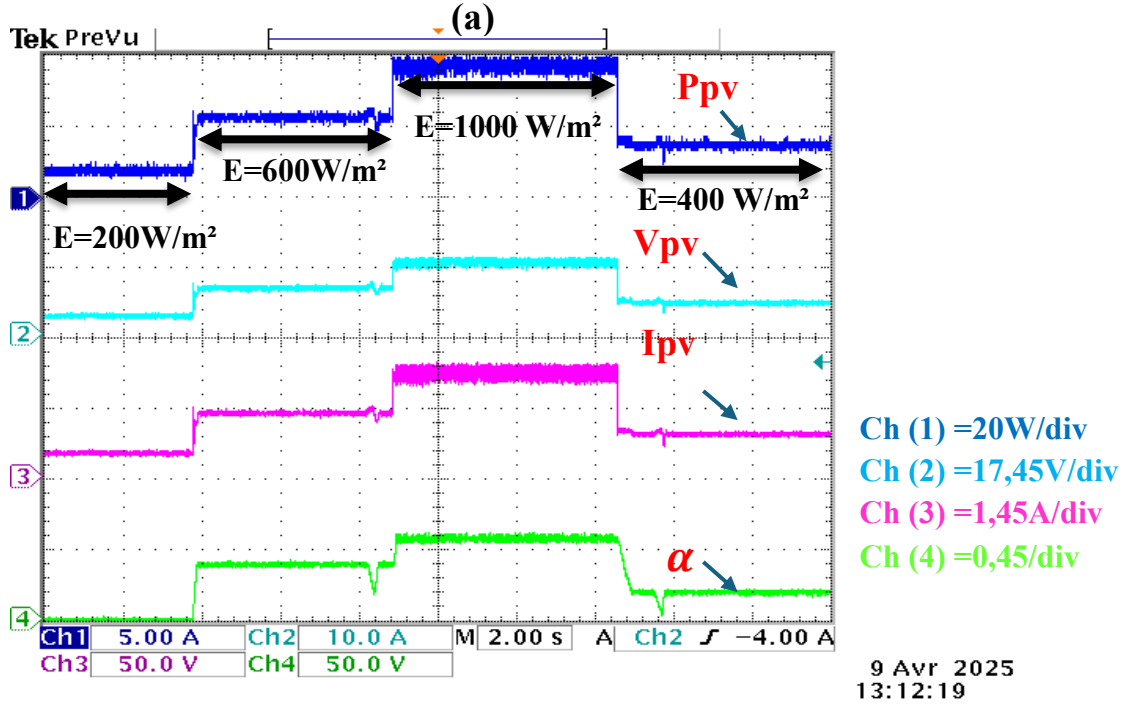


Fig IV. 16 : Description expérimentale du système HIL

4.2.4. Résultats expérimentaux

a) **Validation de l'algorithme MPPT** : En premier lieu, nous avons validé l'algorithme MPPT sur (voir la Fig IV. 17) :

• **Eclairement variable et charge fixe** : $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R=65\text{ }\Omega$



• **Charge variable et Eclairement fixe** : $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{ W/m}^2$,

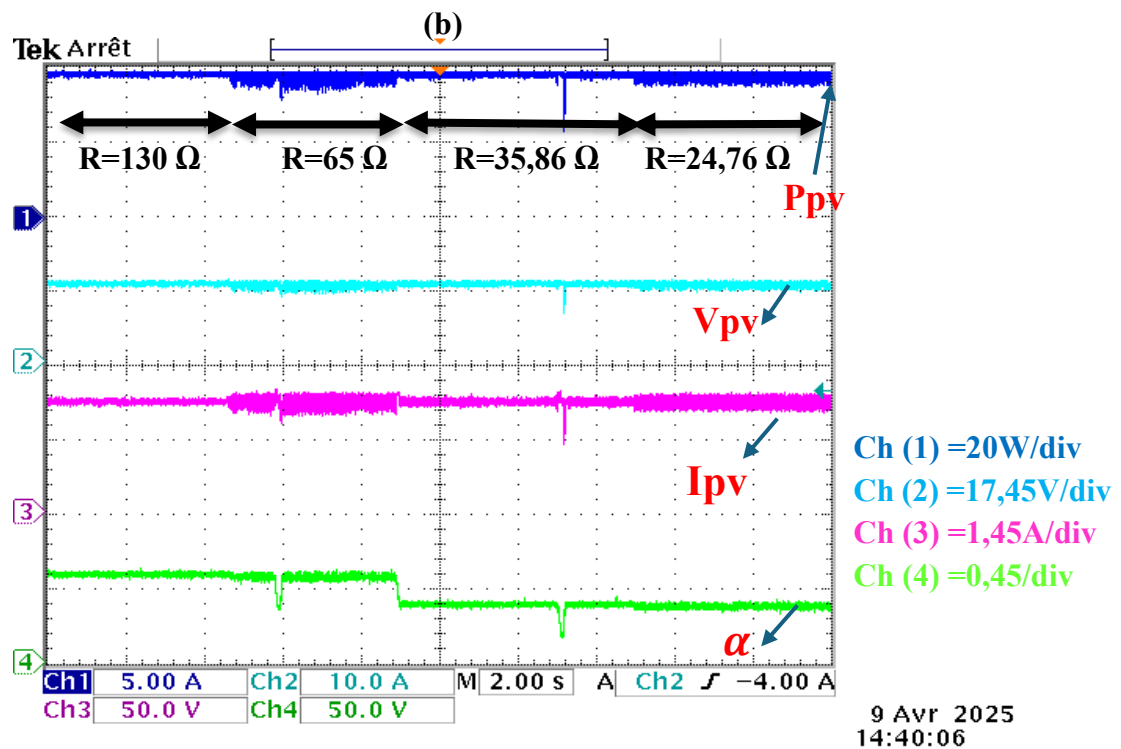


Fig IV. 17 : Résultats issus du HIL, coté PV (a) résultats pour variation de l'éclairement ;
(b) résultats pour variation de la charge

Les résultats expérimentaux indiquent une réponse rapide du système aux variations de l'éclairement solaire (E), la puissance, la tension et le courant changent proportionnellement aux variations de l'éclairement, ce qui prouve de cette Validation HIL, que l'algorithme MPPT proposé prouve une efficacité notable à être mis en œuvre, comme en témoignent la stabilité relative des signaux et l'absence de grandes ondulations. En outre, Le changement du rapport cyclique (α) est bien aligné avec tous les changements, indiquant que l'algorithme ajuste efficacement sa sortie pour atteindre la puissance maximale possible.

b) Validation du système hybride :

- Eclairement variable et charge fixe $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R=65\text{ }\Omega$

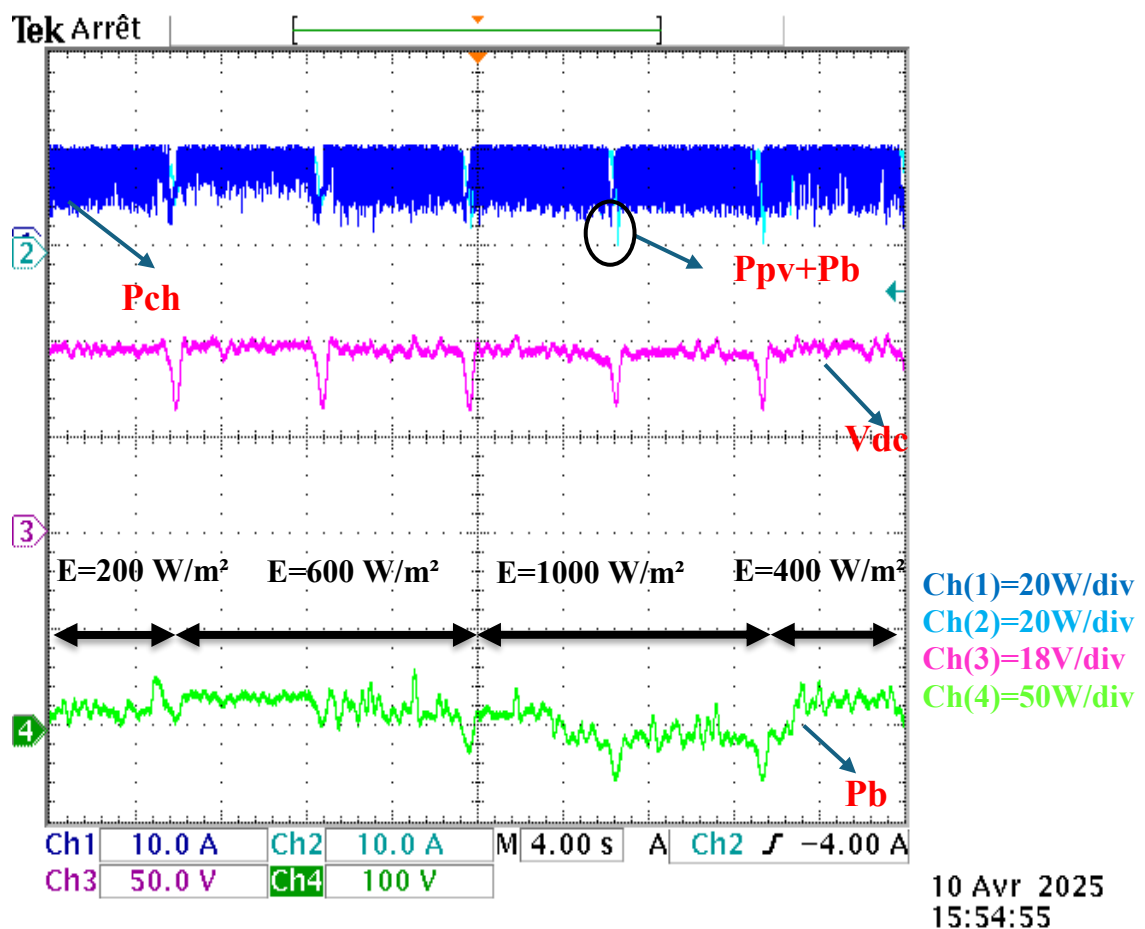
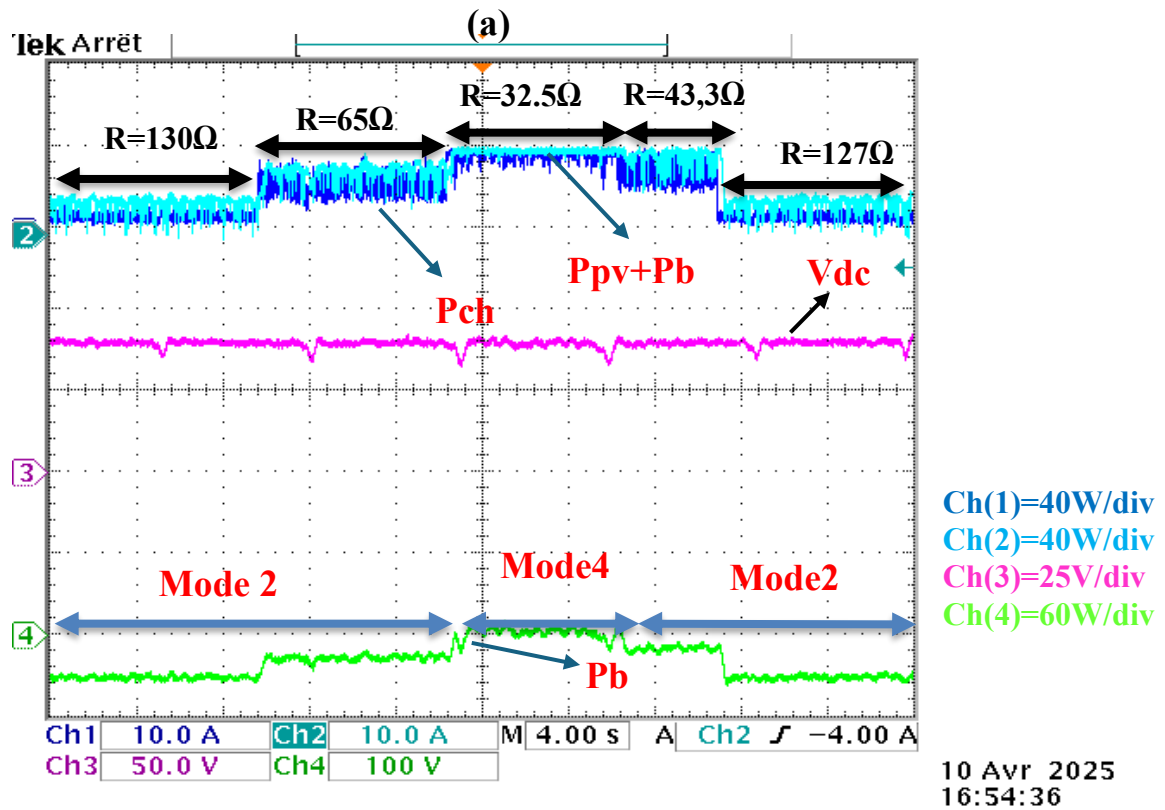


Fig IV. 18 : Résultat du HIL pour variation de l'éclairement

Nous remarquons d'après les résultats que lorsque nous avons modifié le rayonnement solaire, le gestionnaire a pu effectuer un partage adéquat de la puissance de la charge entre celle extraite du panneau, et celle fournie par la batterie. Ceci est en fait, le résultat de la régulation de la tension du bus, qui oscille légèrement autour de valeur de consigne 36 V.

- Charge variable et Eclairage fixe $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{ W/m}^2$



- Charge variable et Eclairage variable

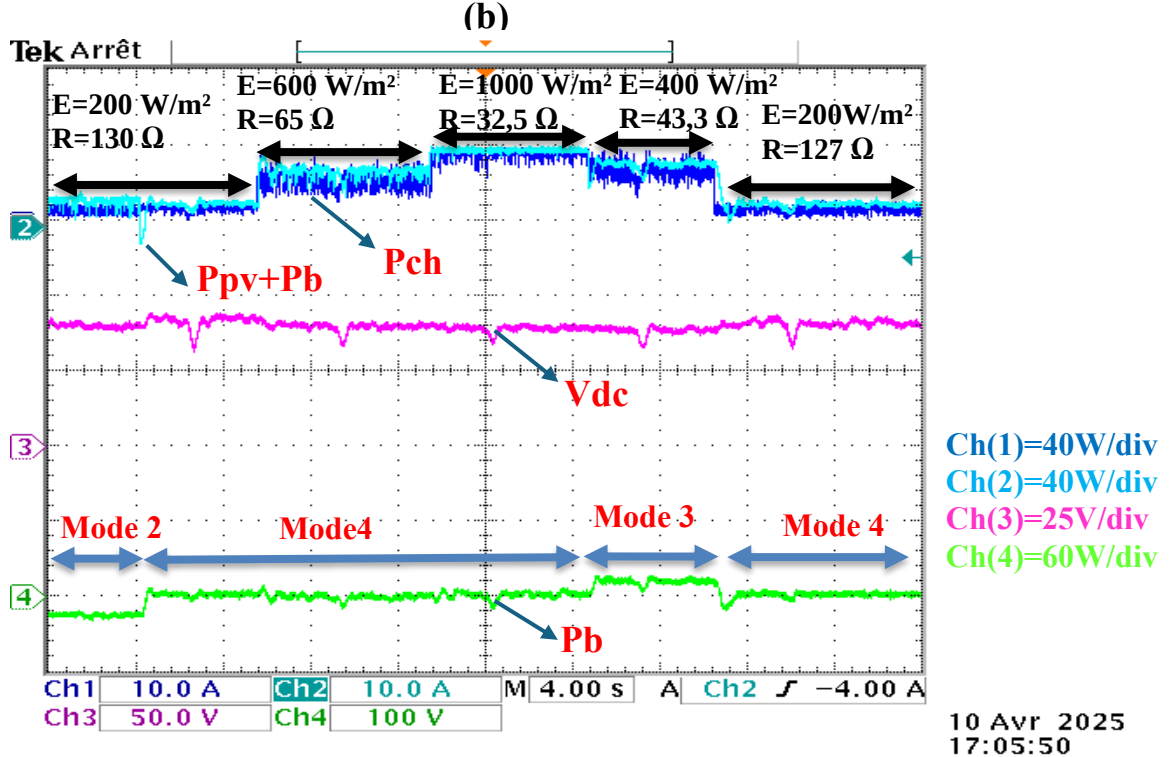


Fig IV. 19 : Résultats issus du HIL (a)variation de de la charge ;
(b) variation de la charge et l'éclairage

Après que le système ait passé avec succès le test PIL, qui a confirmé la compatibilité du code généré avec le modèle (Simulink) et avec les exigences du contrôleur ; puis en passant au test HIL pour garantir les performances du système dans un environnement plus réaliste, nous avons remarqué que le système réagisse efficacement aux variations de l'éclairement solaire, car la Puissance du panneau P_{pv} augmente rapidement, et en monotonie avec les variations de l'éclairement, tout en maintenant la stabilité de la tension V_{dc} , autour de sa référence, pour tous les modes testés ; garantissant par conséquent un partage adéquat des puissances fournies par les deux sources. En résumé, les résultats issus du MIL et du PIL sont reproduits via l'approche HIL, renforçant par conséquent la crédibilité des résultats obtenus, et assure la faisabilité de cette approche de gestion sur un système réel.

4.3. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons discuté des types de validation de notre gestionnaire proposé, via trois méthodes (MIL, PIL et HIL) ; et ce suivant un scénario de la demande de la charge, la variation de l'éclairement, de la température, et l'état de charge de la batterie. Les résultats obtenus via les trois méthodes sont en général similaires, prouvant ainsi l'efficacité de l'algorithme de gestion à être implémenté sur un système hybride (PV-Batterie).

Ce chapitre, qui intègre nos efforts, représente le dernier chapitre de ce mémoire, pose une base solide pour intégrer de manière transparente ces stratégies de contrôle et de gestion, soutenant le développement d'un système hybride PV-batterie plus efficace et plus durable.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Au cours de ce projet de Mémoire de Master, nous avons présenté une étude sur l'utilisation d'un système hybride composé de panneaux solaires et de batteries, contrôlé à l'aide de technologies avancées. Le but était de concevoir un gestionnaire d'énergie adéquat permettant un partage de la puissance demandée par la charge entre les deux sources, tout en respectant leurs natures.

Les performances attendues ont d'abord été vérifiées par simulation et quelques méthodes récentes, tel que le PIL et le HIL, qui se présentent comme méthodes intermédiaires entre une simulation numérique et une validation sur terrain. Les chapitres présentés comprenaient toutes les informations nécessaires pour construire et gérer un système énergétique hybride, en commençant par présenter des informations générales sur chaque composant du système et en expliquant son agencement, en passant par la présentation des modèles mathématiques nécessaires pour comprendre le comportement de chaque composant et comment l'utiliser, jusqu'à expliquer les différentes lois de contrôle adoptées en utilisant l'algorithme MPPT par régression linéaire (intelligence artificielle) et adaptative et en le mettant en œuvre à l'aide d'un convertisseur DC-DC de type Boost. La puissance maximale possible a été extraite du panneau solaire, en atteignant le point optimal en toute paire d'éclairement et de température. L'idée de l'algorithme de gestion repose essentiellement sur une régulation permanente de la tension de bus autour de sa référence, associée à une fourchette de variation de l'état de charge SOC(t) de la batterie, permettant par conséquent de distinguer un ensemble de modes de fonctionnement.

Le système conçu et le contrôle qui lui est appliqué ont été soumis à des tests rigoureux pour vérifier ses performances, en utilisant à la fois une simulation MIL (Simulink) et une plate-forme de test en temps réel (PIL, HIL). Le contrôle a été évalué dans différentes conditions de test et changements de charge, ce qui a permis de mesurer son efficacité et sa réponse rapide à divers changements. Dans tous les cas, le système a montré de bonnes performances, avec des résultats très satisfaisants.

Perspectives d'avenir : Voici quelques perspectives de ce travail, qui peuvent être distinguées dans le but d'améliorer ce type de systèmes : stabilisation de la valeur SOC par la commande prédictive et amélioration du MPPT en présence de perturbations météorologiques et application expérimentale du travail

Bibliographie

- [1] **BELHARRAT, S.-A.**, « Production et gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée à une maison », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010
- [2] **GAOUAS MEHDI REDHA**, « Etude d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire avec système de suiveur solaire », Mémoire de Fin d'Études, Université Larbi Ben Mhidi – Oum El Bouaghi, Juin 2021
- [3] **NOUARKHERKHACHI, F.**, « Commande d'un système hybride contenant un panneau solaire et une batterie », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2020
- [4] **ZEMGHASSENE, D. I.**, « Recharge d'une batterie avec un panneau photovoltaïque et poursuite du point de puissance maximale », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [5] **BROUSSE, B.**, « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique », Thèse de Doctorat, Limoges, 2004.
- [6] **MAOUEDJ, R.**, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire de Magistère, Décembre 2005
- [7] **D., Hichem**, « Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque dédié à une habitation », Université Mouloud Mammeri, 2017
- [8] **BELARBI, M. MUSTAPHA**, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015
- [9] **HORSIN MOLINARO, H., MULTON, B.**, « Énergie électrique : génération photovoltaïque », Culture Sciences de l'Ingénieur, École Normale Supérieure Paris-Saclay, 2020
- [10] **BENCHELLOUIA, B., HAFNAOUI, A., LOUAZENE, L.**, « Étude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans la région de Ouargla », Université Kasdi Merbah Ouargla. Mémoires de Master2022
- [11] **U.S. Department of Energy**, « Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS) », [en ligne]. Disponible sur : <https://www.energy.gov/eere/solar/copper-indium-gallium-diselenide>
- [12] **Futura Sciences**, « Cellules photovoltaïques : le cœur des panneaux solaires », [en ligne]. Disponiblesur : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellulesphotovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>
- [13] **HELALI KAMELI**, « Modeling of a Photovoltaic Cell: Comparative Analysis », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012

- [14] **MAOUEJ, R.**, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- [15] **MEEKHUN, D.**, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [16] **BEN AHMED, H., MULTON, B., BERNARD, N., KERZREHO, C.**, « Le stockage inertiel électromécanique », La Revue 3E.I, 2007, Le Système Inertiel de Stockage d'Énergie (SISE) 3EI n°48, mars 2007, pp. 18-29
- [17] **ABBEZZOT, C.**, « Système inertiel de stockage d'énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel », Thèse de Doctorat, Université Pascal Paoli, 2014
- [18] **LACHAIZE, J.**, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique (Toulouse), 2004
- [19] **CROCI, L.**, « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride Batteries/Supercondensateurs », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2013
- [20] **BENAMARA, V.**, « Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage », Thèse de Doctorat, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2012
- [21] **OUKKACHA, I.**, « Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimique dédié aux applications de transport », Thèse de Doctorat, Normandie Université, 2019
- [22] **BELHACHEMI, F.**, « Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2001
- [23] **BENARIF, B.**, « Dimensionnement et modélisation d'un système photovoltaïque autonome pour application véhicule électrique », Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021
- [24] **TRIKI, Y.**, « Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables », Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, 2020

- [25] **BOUTELLI, H.**, « Étude d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables dans la région de Ouargla : Application au pompage de l'eau », Doctorat LMD, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023.
- [26] **MAAMIR, M.**, « Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride », Thèse Doctorat, Université Khider Mohamed Biskra, 2020
- [27] **STOYANOV, L.**, « Étude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Mémoire de Doctorat, Université de Corse Pasquale Paoli, École Doctorale Environnement et Société UMR CNRS 6134 SPE, Université Technique de Sofia, École Doctorale Francophone, 2011
- [28] **MAANANI, A. A.**, « Backstepping Based Power Management of a PV-Battery Hybrid System », Mémoire de Master, Université Khider Mohamed, 2023.
- [29] **MENADI, A.**, « Commande par les techniques intelligentes d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Thèse de Doctorat, Université Khider Mohamed Biskra, 2016
- [30] **TERKI, A.**, « Contrôle flou-génétique hybride d'un moteur BLDC dans un système de pompage photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Khider Mohamed Biskra, 2012
- [31] **JANTHARAMIN, N., ZHANG, L.**, « A new dynamic model for lead-acid batteries », 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, York, United Kingdom, 2008, pp. 86-90
- [32] **DHAHOUA CHEMESS EDDINE**, « Commande d'un système hybride autonome », Mémoire de Master, Université Khider Mohamed Biskra, 2021.
- [33] **HARBAOUI, A.**, « Identification paramétrique des sources à puissance finie », Mémoire de Master, Université Khider Mohamed Biskra, 2024
- [34] **REZGUI, M.**, « Commande adaptative d'un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Université Khider Mohamed Biskra, 2022.
- [35] **CHERRAGUI, M. H.**, « Développement d'un simulateur Hardware-In-the-Loop d'un système pile à combustible à membrane échangeuse de proton », Thèse de Doctorat, Université Technologique de Belfort-Montbéliard
- [36] **TOURNEZ, F.**, « Du composant au conducteur dans la boucle de simulation pour le test de véhicules électriques hybrides. Énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2023.

Annexes

Annexes

Les techniques d'optimisation numérique

Méthode Fmincon : Pour trouver le point optimal dans Matlab

```
Paramètres de la cellule PV
I_cc = 2.41; % Courant de court-circuit en A
I_op = 2.2; % Courant optimal en A
V_op = 17.45; % Tension optimale en V
V_oc = 22.40; % Tension en circuit ouvert en V
R_s = 0.45; % Résistance série en ohms

% Calcul de la tension thermique
V_th = (V_op + R_s * I_op - V_oc) / log(1 - (I_op / I_cc));

% Calcul du courant de saturation de la diode
I_o = (I_cc - I_op) * exp(-(V_op + R_s * I_op) / V_th);

% Plage de courant
I_pv = linspace(0, I_cc, 100); % de 0 à I_cc

% Calcul de la tension pour chaque courant
V_pv = V_th * log((I_cc - I_pv + I_o) / I_o) - I_pv * R_s

% Calcul de la puissance
P_pv = V_pv .* I_pv

% Définir la fonction objective f pour fmincon
f = @(x) 1 / (abs((V_th * log((I_cc - x + I_o) / I_o) - x *
R_s) * x) + 0.00001);
% Appeler fmincon pour minimiser f
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'off');
[x, fval] = fmincon(f, 0, [], [], [], [], 0, I_cc, [],
options);
I_op = x
```

L'algorithme basé sur la régression linéaire multiple

Dataset utilisé en régression pour L'Apprentissage Supervisé

Température (°C)	Éclairement (W/m²)	I_op (A)	V_op (V)
1	50	0.108	18.617
1	100	0.217	18.603
1	150	0.325	18.588
1	200	0.434	18.574
1	250	0.543	18.560
1	300	0.651	18.546
1	350	0.761	18.532
1	400	0.870	18.518
1	450	0.979	18.504
1	500	1.089	18.489
1	550	1.198	18.475
1	600	1.308	18.461
1	650	1.418	18.447
1	700	1.528	18.433
1	750	1.639	18.419
1	800	1.749	18.405
1	850	1.860	18.391
1	900	1.971	18.377
1	950	2.082	18.363
1	1000	2.193	18.349
1	1050	2.304	18.335
1	1100	2.416	18.322
1	1150	2.527	18.307
1	1200	2.639	18.294
4	50	0.108	18.510
4	100	0.217	18.496
4	150	0.325	18.482
4	200	0.434	18.468
4	250	0.543	18.453
4	300	0.651	18.439
4	350	0.761	18.425
4	400	0.870	18.411
4	450	0.979	18.397
4	500	1.089	18.383
4	550	1.198	18.369
4	600	1.308	18.355
4	650	1.418	18.341
4	700	1.528	18.326
4	750	1.639	18.312

Annexes

4	800	1.749	18.298
4	850	1.860	18.284
4	900	1.971	18.271
4	950	2.082	18.256
4	1000	2.193	18.243
4	1050	2.304	18.229
4	1100	2.416	18.215
4	1150	2.528	18.201
4	1200	2.639	18.187
7	50	0.108	18.404
7	100	0.217	18.389
7	150	0.325	18.375
7	200	0.434	18.361
7	250	0.543	18.347
7	300	0.652	18.333
7	350	0.761	18.318
7	400	0.870	18.304
7	450	0.979	18.290
7	500	1.089	18.276
7	550	1.198	18.262
7	600	1.308	18.248
7	650	1.418	18.234
7	700	1.529	18.220
7	750	1.639	18.206
7	800	1.749	18.192
7	850	1.860	18.178
7	900	1.971	18.164
7	950	2.082	18.150
7	1000	2.193	18.136
7	1050	2.304	18.122
7	1100	2.416	18.108
7	1150	2.528	18.094
7	1200	2.640	18.081
10	50	0.108	18.297
10	100	0.217	18.283
10	150	0.325	18.268
10	200	0.434	18.254
10	250	0.543	18.240
10	300	0.652	18.226
10	350	0.761	18.212
10	400	0.870	18.198
10	450	0.979	18.184
10	500	1.089	18.169
10	550	1.199	18.155
10	600	1.308	18.141

Annexes

10	650	1.418	18.127
10	700	1.529	18.113
10	750	1.639	18.099
10	800	1.750	18.085
10	850	1.860	18.071
10	900	1.971	18.057
10	950	2.082	18.043
10	1000	2.193	18.029
10	1050	2.305	18.016
10	1100	2.416	18.001
10	1150	2.528	17.988
10	1200	2.640	17.974
13	50	0.108	18.190
13	100	0.217	18.176
13	150	0.325	18.162
13	200	0.434	18.148
13	250	0.543	18.133
13	300	0.652	18.119
13	350	0.761	18.105
13	400	0.870	18.091
13	450	0.979	18.077
13	500	1.089	18.063
13	550	1.199	18.049
13	600	1.308	18.035
13	650	1.419	18.021
13	700	1.529	18.006
13	750	1.639	17.992
13	800	1.750	17.978
13	850	1.860	17.964
13	900	1.971	17.951
13	950	2.082	17.937
13	1000	2.193	17.923
13	1050	2.305	17.909
13	1100	2.417	17.895
13	1150	2.528	17.881
13	1200	2.640	17.867
16	50	0.108	18.084
16	100	0.217	18.069
16	150	0.325	18.055
16	200	0.434	18.041
16	250	0.543	18.027
16	300	0.652	18.013
16	350	0.761	17.998
16	400	0.870	17.984
16	450	0.979	17.970

Annexes

16	500	1.089	17.956
16	550	1.199	17.942
16	600	1.309	17.928
16	650	1.419	17.914
16	700	1.529	17.900
16	750	1.639	17.886
16	800	1.750	17.872
16	850	1.860	17.858
16	900	1.971	17.844
16	950	2.082	17.830
16	1000	2.194	17.816
16	1050	2.305	17.802
16	1100	2.417	17.788
16	1150	2.529	17.775
16	1200	2.641	17.761
19	50	0.108	17.977
19	100	0.217	17.963
19	150	0.325	17.948
19	200	0.434	17.934
19	250	0.543	17.920
19	300	0.652	17.906
19	350	0.761	17.892
19	400	0.870	17.878
19	450	0.979	17.864
19	500	1.089	17.849
19	550	1.199	17.835
19	600	1.309	17.821
19	650	1.419	17.807
19	700	1.529	17.793
19	750	1.639	17.779
19	800	1.750	17.765
19	850	1.861	17.751
19	900	1.972	17.737
19	950	2.083	17.723
19	1000	2.194	17.710
19	1050	2.305	17.695
19	1100	2.417	17.682
19	1150	2.529	17.668
19	1200	2.641	17.654
22	50	0.108	17.870
22	100	0.217	17.856
22	150	0.325	17.842
22	200	0.434	17.828
22	250	0.543	17.813
22	300	0.652	17.799

Annexes

22	350	0.761	17.785
22	400	0.870	17.771
22	450	0.979	17.757
22	500	1.089	17.743
22	550	1.199	17.729
22	600	1.309	17.715
22	650	1.419	17.701
22	700	1.529	17.687
22	750	1.639	17.672
22	800	1.750	17.658
22	850	1.861	17.644
22	900	1.972	17.631
22	950	2.083	17.617
22	1000	2.194	17.603
22	1050	2.306	17.589
22	1100	2.417	17.575
22	1150	2.529	17.561
22	1200	2.641	17.547
25	50	0.108	17.764
25	100	0.217	17.749
25	150	0.325	17.735
25	200	0.434	17.721
25	250	0.543	17.707
25	300	0.652	17.693
25	350	0.761	17.678
25	400	0.870	17.664
25	450	0.979	17.650
25	500	1.089	17.636
25	550	1.199	17.622
25	600	1.309	17.608
25	650	1.419	17.594
25	700	1.529	17.580
25	750	1.640	17.566
25	800	1.750	17.552
25	850	1.861	17.538
25	900	1.972	17.524
25	950	2.083	17.510
25	1000	2.194	17.496
25	1050	2.306	17.482
25	1100	2.417	17.468
25	1150	2.529	17.455
25	1200	2.641	17.441
28	50	0.108	17.657
28	100	0.217	17.643
28	150	0.325	17.628

Annexes

28	200	0.434	17.614
28	250	0.543	17.600
28	300	0.652	17.586
28	350	0.761	17.572
28	400	0.870	17.558
28	450	0.979	17.544
28	500	1.089	17.529
28	550	1.199	17.515
28	600	1.309	17.501
28	650	1.419	17.487
28	700	1.529	17.473
28	750	1.640	17.459
28	800	1.750	17.445
28	850	1.861	17.431
28	900	1.972	17.417
28	950	2.083	17.403
28	1000	2.194	17.390
28	1050	2.306	17.375
28	1100	2.418	17.362
28	1150	2.530	17.348
28	1200	2.642	17.334
31	50	0.108	17.550
31	100	0.217	17.536
31	150	0.325	17.522
31	200	0.434	17.508
31	250	0.543	17.493
31	300	0.652	17.479
31	350	0.761	17.465
31	400	0.870	17.451
31	450	0.980	17.437
31	500	1.089	17.423
31	550	1.199	17.409
31	600	1.309	17.395
31	650	1.419	17.381
31	700	1.529	17.367
31	750	1.640	17.353
31	800	1.750	17.339
31	850	1.861	17.325
31	900	1.972	17.311
31	950	2.083	17.297
31	1000	2.195	17.283
31	1050	2.306	17.269
31	1100	2.418	17.255
31	1150	2.530	17.241
31	1200	2.642	17.228

Annexes

34	50	0.108	17.444
34	100	0.217	17.429
34	150	0.325	17.415
34	200	0.434	17.401
34	250	0.543	17.387
34	300	0.652	17.373
34	350	0.761	17.359
34	400	0.870	17.344
34	450	0.980	17.330
34	500	1.089	17.316
34	550	1.199	17.302
34	600	1.309	17.288
34	650	1.419	17.274
34	700	1.529	17.260
34	750	1.640	17.246
34	800	1.751	17.232
34	850	1.861	17.218
34	900	1.972	17.204
34	950	2.084	17.190
34	1000	2.195	17.176
34	1050	2.306	17.162
34	1100	2.418	17.148
34	1150	2.530	17.135
34	1200	2.642	17.121
37	50	0.108	17.337
37	100	0.217	17.323
37	150	0.325	17.308
37	200	0.434	17.294
37	250	0.543	17.280
37	300	0.652	17.266
37	350	0.761	17.252
37	400	0.870	17.238
37	450	0.980	17.224
37	500	1.089	17.209
37	550	1.199	17.195
37	600	1.309	17.181
37	650	1.419	17.167
37	700	1.529	17.153
37	750	1.640	17.139
37	800	1.751	17.125
37	850	1.861	17.111
37	900	1.973	17.097
37	950	2.084	17.083
37	1000	2.195	17.070
37	1050	2.307	17.056

Annexes

37	1100	2.419	17.042
37	1150	2.530	17.028
37	1200	2.643	17.014
40	50	0.108	17.230
40	100	0.217	17.216
40	150	0.325	17.202
40	200	0.434	17.188
40	250	0.543	17.173
40	300	0.652	17.159
40	350	0.761	17.145
40	400	0.870	17.131
40	450	0.980	17.117
40	500	1.089	17.103
40	550	1.199	17.089
40	600	1.309	17.075
40	650	1.419	17.061
40	700	1.530	17.047
40	750	1.640	17.033
40	800	1.751	17.019
40	850	1.862	17.005
40	900	1.973	16.991
40	950	2.084	16.977
40	1000	2.195	16.963
40	1050	2.307	16.949
40	1100	2.419	16.935
40	1150	2.531	16.921
40	1200	2.643	16.908
43	50	0.108	17.124
43	100	0.217	17.109
43	150	0.325	17.095
43	200	0.434	17.081
43	250	0.543	17.067
43	300	0.652	17.053
43	350	0.761	17.039
43	400	0.870	17.024
43	450	0.980	17.010
43	500	1.089	16.996
43	550	1.199	16.982
43	600	1.309	16.968
43	650	1.419	16.954
43	700	1.530	16.940
43	750	1.640	16.926
43	800	1.751	16.912
43	850	1.862	16.898
43	900	1.973	16.884

Annexes

43	950	2.084	16.870
43	1000	2.196	16.856
43	1050	2.307	16.842
43	1100	2.419	16.828
43	1150	2.531	16.815
43	1200	2.643	16.801
46	50	0.108	17.017
46	100	0.217	17.003
46	150	0.325	16.988
46	200	0.434	16.974
46	250	0.543	16.960
46	300	0.652	16.946
46	350	0.761	16.932
46	400	0.870	16.918
46	450	0.980	16.904
46	500	1.089	16.889
46	550	1.199	16.875
46	600	1.309	16.861
46	650	1.419	16.847
46	700	1.530	16.833
46	750	1.640	16.819
46	800	1.751	16.805
46	850	1.862	16.791
46	900	1.973	16.777
46	950	2.084	16.763
46	1000	2.196	16.750
46	1050	2.307	16.736
46	1100	2.419	16.722
46	1150	2.531	16.708
46	1200	2.644	16.694
49	50	0.108	16.910
49	100	0.217	16.896
49	150	0.325	16.882
49	200	0.434	16.868
49	250	0.543	16.853
49	300	0.652	16.839
49	350	0.761	16.825
49	400	0.870	16.811
49	450	0.980	16.797
49	500	1.089	16.783
49	550	1.199	16.769
49	600	1.309	16.755
49	650	1.420	16.741
49	700	1.530	16.727
49	750	1.640	16.713

Annexes

49	800	1.751	16.699
49	850	1.862	16.685
49	900	1.973	16.671
49	950	2.085	16.657
49	1000	2.196	16.643
49	1050	2.308	16.629
49	1100	2.420	16.615
49	1150	2.532	16.602
49	1200	2.644	16.588
52	50	0.108	16.804
52	100	0.217	16.789
52	150	0.325	16.775
52	200	0.434	16.761
52	250	0.543	16.747
52	300	0.652	16.733
52	350	0.761	16.719
52	400	0.870	16.704
52	450	0.980	16.690
52	500	1.089	16.676
52	550	1.199	16.662
52	600	1.309	16.648
52	650	1.420	16.634
52	700	1.530	16.620
52	750	1.641	16.606
52	800	1.751	16.592
52	850	1.862	16.578
52	900	1.973	16.564
52	950	2.085	16.550
52	1000	2.196	16.536
52	1050	2.308	16.522
52	1100	2.420	16.508
52	1150	2.532	16.495
52	1200	2.644	16.481
55	50	0.108	16.697
55	100	0.217	16.683
55	150	0.325	16.668
55	200	0.434	16.654
55	250	0.543	16.640
55	300	0.652	16.626
55	350	0.761	16.612
55	400	0.870	16.598
55	450	0.980	16.584
55	500	1.090	16.570
55	550	1.199	16.555
55	600	1.309	16.541

Annexes

55	650	1.420	16.527
55	700	1.530	16.513
55	750	1.641	16.499
55	800	1.751	16.485
55	850	1.862	16.471
55	900	1.974	16.457
55	950	2.085	16.443
55	1000	2.196	16.430
55	1050	2.308	16.416
55	1100	2.420	16.402
55	1150	2.532	16.388
55	1200	2.645	16.374
58	50	0.108	16.590
58	100	0.217	16.576
58	150	0.325	16.562
58	200	0.434	16.548
58	250	0.543	16.533
58	300	0.652	16.519
58	350	0.761	16.505
58	400	0.870	16.491
58	450	0.980	16.477
58	500	1.090	16.463
58	550	1.199	16.449
58	600	1.310	16.435
58	650	1.420	16.421
58	700	1.530	16.407
58	750	1.641	16.393
58	800	1.752	16.379
58	850	1.863	16.365
58	900	1.974	16.351
58	950	2.085	16.337
58	1000	2.197	16.323
58	1050	2.308	16.309
58	1100	2.420	16.295
58	1150	2.533	16.281
58	1200	2.645	16.268
61	50	0.108	16.484
61	100	0.217	16.469
61	150	0.325	16.455
61	200	0.434	16.441
61	250	0.543	16.427
61	300	0.652	16.413
61	350	0.761	16.399
61	400	0.870	16.384
61	450	0.980	16.370

Annexes

61	500	1.090	16.356
61	550	1.200	16.342
61	600	1.310	16.328
61	650	1.420	16.314
61	700	1.530	16.300
61	750	1.641	16.286
61	800	1.752	16.272
61	850	1.863	16.258
61	900	1.974	16.244
61	950	2.085	16.230
61	1000	2.197	16.216
61	1050	2.309	16.202
61	1100	2.421	16.189
61	1150	2.533	16.175
61	1200	2.645	16.161
64	50	0.108	16.377
64	100	0.217	16.363
64	150	0.325	16.348
64	200	0.434	16.334
64	250	0.543	16.320
64	300	0.652	16.306
64	350	0.761	16.292
64	400	0.870	16.278
64	450	0.980	16.264
64	500	1.090	16.250
64	550	1.200	16.235
64	600	1.310	16.221
64	650	1.420	16.207
64	700	1.530	16.193
64	750	1.641	16.179
64	800	1.752	16.165
64	850	1.863	16.151
64	900	1.974	16.137
64	950	2.086	16.124
64	1000	2.197	16.110
64	1050	2.309	16.096
64	1100	2.421	16.082
64	1150	2.533	16.068
64	1200	2.646	16.055
67	50	0.108	16.270
67	100	0.217	16.256
67	150	0.325	16.242
67	200	0.434	16.228
67	250	0.543	16.213
67	300	0.652	16.199

Annexes

67	350	0.761	16.185
67	400	0.870	16.171
67	450	0.980	16.157
67	500	1.090	16.143
67	550	1.200	16.129
67	600	1.310	16.115
67	650	1.420	16.101
67	700	1.531	16.087
67	750	1.641	16.073
67	800	1.752	16.059
67	850	1.863	16.045
67	900	1.974	16.031
67	950	2.086	16.017
67	1000	2.197	16.003
67	1050	2.309	15.989
67	1100	2.421	15.975
67	1150	2.534	15.962
67	1200	2.646	15.948
70	50	0.108	16.164
70	100	0.217	16.149
70	150	0.325	16.135
70	200	0.434	16.121
70	250	0.543	16.107
70	300	0.652	16.093
70	350	0.761	16.079
70	400	0.870	16.064
70	450	0.980	16.050
70	500	1.090	16.036
70	550	1.200	16.022
70	600	1.310	16.008
70	650	1.420	15.994
70	700	1.531	15.980
70	750	1.641	15.966
70	800	1.752	15.952
70	850	1.863	15.938
70	900	1.975	15.924
70	950	2.086	15.910
70	1000	2.198	15.897
70	1050	2.310	15.883
70	1100	2.422	15.869
70	1150	2.534	15.855
70	1200	2.646	15.841
73	50	0.108	16.057
73	100	0.217	16.043
73	150	0.325	16.028

Annexes

73	200	0.434	16.014
73	250	0.543	16.000
73	300	0.652	15.986
73	350	0.761	15.972
73	400	0.871	15.958
73	450	0.980	15.944
73	500	1.090	15.930
73	550	1.200	15.915
73	600	1.310	15.901
73	650	1.420	15.887
73	700	1.531	15.873
73	750	1.641	15.859
73	800	1.752	15.845
73	850	1.863	15.831
73	900	1.975	15.818
73	950	2.086	15.804
73	1000	2.198	15.790
73	1050	2.310	15.776
73	1100	2.422	15.762
73	1150	2.534	15.748
73	1200	2.647	15.735
76	50	0.108	15.950
76	100	0.217	15.936
76	150	0.325	15.922
76	200	0.434	15.908
76	250	0.543	15.893
76	300	0.652	15.879
76	350	0.761	15.865
76	400	0.871	15.851
76	450	0.980	15.837
76	500	1.090	15.823
76	550	1.200	15.809
76	600	1.310	15.795
76	650	1.420	15.781
76	700	1.531	15.767
76	750	1.642	15.753
76	800	1.753	15.739
76	850	1.864	15.725
76	900	1.975	15.711
76	950	2.086	15.697
76	1000	2.198	15.683
76	1050	2.310	15.669
76	1100	2.422	15.655
76	1150	2.535	15.642
76	1200	2.647	15.628

Annexes

79	50	0.108	15.844
79	100	0.217	15.829
79	150	0.325	15.815
79	200	0.434	15.801
79	250	0.543	15.787
79	300	0.652	15.773
79	350	0.761	15.759
79	400	0.871	15.744
79	450	0.980	15.730
79	500	1.090	15.716
79	550	1.200	15.702
79	600	1.310	15.688
79	650	1.420	15.674
79	700	1.531	15.660
79	750	1.642	15.646
79	800	1.753	15.632
79	850	1.864	15.618
79	900	1.975	15.604
79	950	2.087	15.590
79	1000	2.198	15.577
79	1050	2.310	15.563
79	1100	2.423	15.549
79	1150	2.535	15.535
79	1200	2.648	15.521