

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

THÈME

Contrôleur MPPT d'un système PV basé sur Arduino

*Préparé par : Mouaz Abed El Ouareth Mohamed Bilal
Seddar Yagoub Wafaa*

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
S.Zine	MCB	Président
T.Allaoui	Pr	Examineur
Y.Mihoub	MCA	Examineur
H.AIT MIMOUNE	MCA	Encadrant

PROMOTION 2024 /2025

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à **Allah**, le Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Monsieur Ait Mimoun Hamiche**, notre encadreur, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité et ses conseils éclairés tout au long de ce projet.

Nos sincères remerciements vont également aux **membres du jury**, qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail et de nous apporter leurs précieuses observations.

Nous adressons aussi notre reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants, qui ont contribué à notre formation et à notre évolution académique au fil des années. Grâce à leur engagement et leur dévouement, nous avons pu acquérir des connaissances et des compétences essentielles pour notre parcours.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide et leur soutien à la réalisation de ce projet et de ce mémoire. Que chacun trouve ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, en premier lieu, à mes parents qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mes études, et qui n'ont jamais cessé de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Que Dieu leur accorde bien-être et longue vie.

À nos chers frères et chères sœurs, que Dieu nous unisse toujours dans l'amour, la fraternité et la réussite.

À toute ma famille.

À mes chers ami(e)s, sans exception.

Et c'est bien sûr à ma binôme Wafaa, pour son entente, sa sympathie et surtout pour l'effort qu'elle a fourni durant la préparation de notre projet.

Enfin, à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel, je leur exprime ma profonde gratitude

Mouaz Abed El Ouareth Mohamed Bilal

Dédicaces

SEDDAR YAGOUB Wafa

Sommaire

Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Etat d'art sur le système MPPT en photovoltaïque	05
I.1 Introduction.....	05
I.2 Topologie du système MPPT.....	05
I.3 Production d'énergie photovoltaïque et modèle de circuit.....	06
I.4 Électronique de puissance dans les systèmes PV.....	08
I.5 Suivi du point de puissance maximale (MPPT) en photovoltaïque.....	11
I.5.1 Les méthodes de poursuite de MPP.....	13
I.5.1.1 Les méthodes indirectes.....	13
I.5.1.2 Les méthodes directes.....	13
I.5.1.3 La méthode de perturbée et observe (P&O).....	14
I.5.1.4 La méthode de conductance incrémentale (IC).....	15
I.6 Méthode d'évaluation des performances.....	17
I.7 Conclusion	19
Chapitre 2. Modélisation d'un système PV et Algorithme INC modifié	20
II.1 Introduction	21
II.2. Modèle du panneau photovoltaïque sous Proteus.....	21
II.2.1 Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.....	21
II.2.2 Implémentation du modèle PV sous Proteus.....	22
II.2.3 Simulation des caractéristiques I-V et P-V.....	24
II.3 Algorithme INC modifié.....	27
II.3.1 Principe de l'algorithme Incremental Conductance (INC).....	27
II.3.2 Amélioration de l'algorithme INC : Version modifiée	28
II.4 Conclusion	30
Chapitre 3 : Simulation et Réalisation	31
III.1 Introduction	32
III.2 La partie matériel.....	32
III.2.1 Partie Software (logiciel).....	32
III.2.1.1 le logiciel Arduino.....	32
III.2.1.2 ISIS Proteus.....	33
III.2.1.3 Labview.....	33
III.2.2 Partie Hardware.....	34
III.2.2.1 Carte Arduino.....	34
III.2.2.2 Capteur de tension.....	36
III.2.2.3 Capteur de courant	36
III.2.2.4 Convertisseur	37
III.3 Résultats et discussion.....	39
III.3.1 Résultat de la simulation.....	39
III.3.2 Résultat expérimental.....	40
III.4 Conclusion	44
Conclusion générale.....	45
Annexes.....	47
Annexe A : Fiche technique réelle des paramètres du module PV choisi	48
Annexe B : Méthodes MPPT direct avec critères abstraits.....	49
Annexe C : Tableau récapitulatif utilisée pour le dimensionnement des composants d'un convertisseur DC/DC Boost	51
Annexe D: Datasheet des équipements utilisés.....	52
Liste des références.....	54

Liste des figures

Figure I.1 : Système photovoltaïque hors réseau.....	05
Figure I.2 : Cellule photovoltaïque - Analog Devices 2019.....	06
Figure I.3 : Schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	07
Figure I.4 : Cellule Photovoltaïque (expérimental et simulé).....	08
Figure I.5 : Circuit Boost.....	08
Figure I.6 : Modèle PV avec Boost simplifié	11
Figure I.7 : Courbe caractéristique IV (bleu) et courbe de puissance de sortie (rouge).....	12
Figure I.8: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	13
Figure I.9 : Organigramme de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) [16] [44].....	14
Figure I.10 : Puissance de sortie par rapport à la tension de sortie pour les panneaux PV.....	15
Figure I.11 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale (IC)	16
Figure I.12 : Efficacité de démarrage de différents algorithmes MPPT.....	18
Figure I.13 : Analyse transitoire pour changement des points de puissance maximale.....	18
Figure II. 1. (a) : Circuit équivalent du panneau PV, (b) : modèle Proteus du panneau PV.....	23
Figure II. 2. Étapes de modélisation du panneau photovoltaïque sous Proteus.....	24
Figure II. 3. (a) : Dispositif de mesure, (b) : Caractéristiques I-V et P-V pour la simulation et l'expérimentation.....	26
Figure II. 4. Organigramme de la méthode INC.....	28
Figure II.5. Organigramme de l'algorithme INC modifié.....	30
Figure III.1 : interface du logiciel de programmation Arduino.....	33
Figure III.2 : Arduino UNO.....	35
Figure III.3 : Arduino Méga2560.....	35
Figure III.4 : Capteur de tension (B25).....	36
Figure III.5 : Capteur de courant (INA169).....	36
Figure III.6. Système photovoltaïque à faible coût conçu sous Proteus.....	38
Figure III.7 (a) : Temps d'exécution du programme de la méthode conventionnelle, (b) : Temps d'exécution du programme de la méthode modifiée.....	39
Figure III.8. (a) : Résultat de la simulation de l'algorithme INC conventionnel, (b) : Résultat de la simulation de l'algorithme INC modifié.....	40
Figure III.9. Dispositif expérimental.....	41
Figure III.10 (a) : Résultat expérimental de l'algorithme, l'algorithme INC conventionnel (b) : Résultat expérimental de INC modifié.....	43

Liste des tableaux

TABLEAU I. 1 : États de la conductance incrémentielle.....	19
TABLEAU I. 2 : Rendement et THD du MPPT.....	17
TABLEAU II. 1 : Spécifications du panneau photovoltaïque TDC-M20-36 au STC	22
TABLEAU III. 1 : Comparaison entre nos résultats avec certains travaux expérimentaux publiés récemment	43

Liste des symboles

C	Condensateur
D	Rapport cyclique
d	Diode
E_{gap}	Énergie de la bande interdite des semi-conducteurs
f_s	Fréquence de commutation du convertisseur continu-continu
GP	Rayonnement photovoltaïque
G_r	Rayonnement photovoltaïque de référence
I_{MPP}	Courant maximal du point de puissance
I_o	Courant de sortie du convertisseur
$I_{p\boxtimes}$	Photocourant
I_{PV}	Courant photovoltaïque
I_{RS}	Courant de saturation inverse de la cellule solaire
I_S	Courant de saturation inverse des cellules photovoltaïques
I_{SC}	Courant de court-circuit du modèle photovoltaïque
$I_{SC,}$	Condition de référence courant de court-circuit
k	Constante de Boltzmann
N_p	Nombre de cellules solaires connectées en parallèle
N_s	Nombre de cellules solaires connectées en série
P_{actual}	La puissance réelle mesurée produite par le générateur PV
P_{in}	Puissance d'entrée du convertisseur
P_{max}	Puissance maximale
P_{out}	Puissance de sortie du convertisseur
q	La charge de l'électron
R_{opt}	Point de fonctionnement optimal de la charge résistive
R_S	Résistance en série des cellules solaires
$R_{S\boxtimes}$	Résistance shunt de la cellule solaire
T_C	Température de fonctionnement en kelvin pour la cellule solaire
t_{off}	Durée d'arrêt du convertisseur
t_{on}	Durée de mise en marche du convertisseur
T_{Ref}	Température de référence de la cellule solaire
T_S	Période de commutation du convertisseur CC-CC
V_d	Tension d'entrée du convertisseur DC-DC
V_L	Tension de l'inductance
V_{max}	Tension de puissance maximale de la cellule solaire
V_o	Tension de sortie du convertisseur
V_{OC}	Tension en circuit ouvert du modèle solaire
Δ_{iL}	Valeur de l'ondulation du courant de l'inductance
R_{load}	Résistance de la charge
Δ_v	Valeur de l'ondulation de la tension de sortie

Liste abréviations

AC	Courant alternatif
AI	Intelligence Artificielle
CCMC	Mode de conduction continue
CV	Tension Constante
DC	Courant continu
FL	Logique Floue
FLC	Contrôleur de logique flou
HC	Hill Escalade
IC	Conductance Incrémentale
I-V	Courant-tension
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PnO	Perturb et Observe
PI	Proportionnel Intégral
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
PSO	Particle Swarm Optimisation
PV	Photovoltaïque
P-V	Puissance-Tension
PWM	Modulation de la largeur d'impulsion
SC	Court-circuit
SISO	Entrée-sortie unique
STC	Conditions d'essai standard

Introduction générale

Il est largement admis que l'utilisation des ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole et le gaz est condamnée à disparaître. Pour répondre aux demandes énergétiques futures, les sources d'énergie durables et renouvelables constituent les solutions de la prochaine génération. Parmi celles-ci, l'énergie solaire est d'un intérêt primordial puisqu'il s'agit de la source la plus abondante et la plus fiable [1]. L'énergie propre peut être produite simplement à l'aide de dispositifs photovoltaïques (PV) [2]. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent encore de faibles rendements et des coûts élevés [3]. Par conséquent, des efforts de recherche intensifs ont été déployés pour améliorer les performances des convertisseurs PV, augmenter leur efficacité et diminuer leur coût de production [4], [5]. En outre, le comportement non linéaire du panneau photovoltaïque et sa forte dépendance aux conditions climatiques extérieures et aux caractéristiques de la charge conduisent à la tâche la plus difficile pour optimiser l'énergie photovoltaïque [6], [7]. L'une des solutions proposées dans la littérature pour surmonter ce défi consiste à faire fonctionner le panneau photovoltaïque au point de puissance maximale (MPP). C'est pourquoi divers algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été proposés [8],[9],[6],[7]. La façon la plus évidente d'évaluer les performances d'un algorithme MPPT est de le tester dans des conditions climatiques contrôlables. De telles conditions ne sont pas faciles à obtenir en raison des données météorologiques environnementales aléatoires. Pour cela, des émulateurs PV sont généralement utilisés à la place des panneaux PV [10], [11], [12]. Néanmoins, les émulateurs PV ne sont pas toujours disponibles et sont coûteux, en particulier pour les pays en développement [13]. Par ailleurs, les chercheurs utilisent les environnements PSIM ou Matlab/Simulink pour mettre en œuvre et vérifier les performances des algorithmes MPPT [14], [15], [16], [7]. Cependant, ces outils ne contiennent pas de cartes embarquées ou de microcontrôleurs (comme PIC, DSP, Arduino ou FPGA...) dans lesquels l'algorithme MPPT peut être implémenté et testé comme réalisé à l'aide d'un prototype physique réel. Proteus est un outil unique qui permet de simuler des systèmes électriques à l'aide de composants matériels tels que des microcontrôleurs, des DSP, des FPGA, des cartes embarquées comme Arduino, des capteurs et des actionneurs. Avec Proteus, le système peut être simulé à l'aide de composants matériels et débogué en détectant le maximum d'erreurs sans qu'il soit nécessaire de disposer d'un prototype physique. Comme on le sait, Proteus ne fournit pas de modèle de panneau photovoltaïque. Pour la première fois dans la littérature, le modèle PV à une diode est implémenté dans Proteus. Pour justifier la validité du modèle, un dispositif expérimental a été construit. L'avantage qui en résulte est que l'algorithme MPPT peut être mis en œuvre en utilisant les composants matériels fournis par Proteus. Par conséquent, cette solution peut être utilisée comme simulateur PV à faible coût lorsque le prototype physique n'est pas disponible.

D'autre part, les chercheurs ont proposé plusieurs algorithmes MPPT dans la littérature [17]. Les critères de sélection d'un tel algorithme MPPT sont le temps de réponse, les oscillations en régime permanent, la complexité de l'implémentation et les capteurs requis. Les algorithmes MPPT les plus populaires sont le contrôle par logique floue (FLC), le réseau neuronal artificiel (ANN), la perturbation et l'observation (P&O) et l'INC. Les techniques FLC et ANN conduisent à un MPPT cohérent en raison de leur capacité à gérer l'aspect non linéaire des panneaux PV [18], [19]. Par exemple, (Youssef et al., 2018) a conçu et mis en œuvre un FLC-MPPT sur une carte FPGA. Ce contrôleur peut atteindre un rendement de 98 %. (Messalti et al., 2017) a conçu et mis en œuvre un ANN-MPPT à pas variable sur une carte DSP. Ce contrôleur peut atteindre une précision de suivi et un temps de réponse acceptables. Cependant, la mise en œuvre d'un système PV basé sur des méthodes d'intelligence artificielle telles que FLC et ANN n'est pas facile en raison de leur complexité. Elles nécessitent une mémoire importante pour la mise en œuvre des règles et la formation, le calcul à grande vitesse et les langages de haut niveau. Cela nécessite l'utilisation de cartes embarquées coûteuses telles que FPGA ou DSP, ce qui augmente considérablement le coût du système photovoltaïque [7]. Par ailleurs, les algorithmes MPPT les plus commercialisés sont INC et P&O [22]. La méthode P&O est largement utilisée dans les systèmes PV autonomes en raison de sa simplicité [23], [24] [25]. Dans ce type de systèmes PV, il est préférable de mettre en œuvre les algorithmes MPPT à l'aide d'un microcontrôleur à faible coût pour réduire les dépenses du système [26]. D'autre part, l'INC est plus compliqué à utiliser que les P&O car il contient plusieurs calculs de division qui impliquent un processus de calcul rapide et l'utilisation d'un microcontrôleur plus puissant [27], [28]. Techniquement, les P&O peuvent donner une réponse imprécise qui conduit le système à osciller autour du MPP, entraînant des pertes de puissance accrues [29], [30], [31]. Par exemple, (Khaled et al., 2016) a mis en œuvre un P&O modifié dans la carte de développement économique Freescale FRDM-KL25Z. Le rendement maximal atteint était de 96 %, une valeur qui n'est pas satisfaisante pour une utilisation efficace des systèmes photovoltaïques. En revanche, l'INC est capable de suivre rapidement le MPP avec de faibles oscillations en régime permanent lors de changements rapides de l'irradiation solaire [32], [33], [34], [35].

Ce travail vise à présenter une méthode MPPT modifiée avec une structure simple et de bonnes performances. Cette méthode est une modification de l'algorithme INC qui élimine tous les calculs de division, ce qui rend l'algorithme plus simple. Cette modification permettra de réduire le traitement en temps réel, ce qui rendra possible l'utilisation de microcontrôleurs bon marché. Une simulation globale du système ainsi qu'une validation expérimentale sont effectuées pour évaluer la faisabilité technique et prouver sa supériorité par rapport à la technique conventionnelle. Ce système pourrait s'appliquer aux

systèmes photovoltaïques portables ou de petite taille pour lesquels la réduction des coûts peut être essentielle pour une utilisation à grande échelle, en particulier dans les pays à faible revenu.

Le reste de cette thèse est organisé comme suit :

Chapitre 1

Les techniques de point de puissance maximale, le principe du transfert de puissance maximale et l'adaptation de la charge sont discutés. L'utilisation des techniques MPPT classiques est également abordée. Les avantages et les inconvénients des méthodes classiques sont expliqués. Le chapitre fournit également un résumé sur l'utilisation des algorithmes de calcul intelligent dans le MPPT, et discute de leur nécessité dans des conditions d'ombrage partiel. Les méthodes telles que la logique floue (FL) sont discutées.

Chapitre 2

Ce chapitre présente la modélisation du panneau photovoltaïque à l'aide de Proteus. L'algorithme INC modifié est aussi décrit dans ce chapitre.

Chapitre 3

La mise en œuvre et les résultats du système proposé sont présentés et discutés dans ce chapitre.

Enfin, la conclusion générale présente les principales conclusions de cette étude, ainsi que les travaux futurs.

Chapitre I :
Etat d'art sur le système MPPT en
photovoltaïque

I.1 Introduction

Les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisés pour maximiser la puissance électrique des panneaux photovoltaïques (PV). Pour atteindre cet objectif, ces MPPT utilisent un convertisseur DC-DC pour transformer la tension produite par les PV. De nombreuses recherches antérieures sur les MPPT ont porté leur attention sur l'algorithme d'acquisition du point de puissance maximale et sur la topologie du convertisseur DC-DC utilisé dans le MPPT. Ce sujet propose un modèle photovoltaïque (PV) pour la conception de systèmes PV avec un MPPT simple afin d'obtenir un rendement élevé, une réponse plus rapide et un faible coût. Ce chapitre fournira des informations de base sur le sujet, tels que la topologie du système MPPT, la production d'énergie PV, les convertisseurs DC-DC boost, les algorithmes MPPT et d'autres travaux connexes.

I.2 Topologie du système MPPT

La Figure I.1 présente le schéma fonctionnel d'un petit système photovoltaïque hors réseau. Il y a trois blocs fonctionnels. Le premier est la production d'énergie, représentée par le bloc du panneau solaire à gauche. Le deuxième est le bloc d'électronique de puissance, généralement représenté par le convertisseur élévateur DC-DC, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et les blocs de batterie. Le troisième bloc est celui des charges DC. [36] [37]

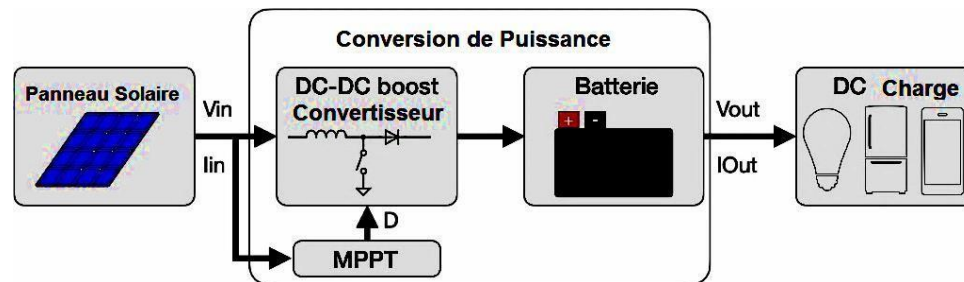


Figure I.1 : Système photovoltaïque hors réseau [9].

Des systèmes électroniques de puissance complexes sont nécessaires pour convertir l'énergie électrique générée dans le premier bloc en énergie utilisable par les charges du troisième bloc.

L'énergie électrique produite n'est presque jamais égale à la puissance utilisée par les charges et nécessite une élévation de tension pour correspondre à la tension de la charge. Pendant la journée, les panneaux photovoltaïques produisent une puissance de pointe qui dépasse les charges en courant continu.

L'énergie supplémentaire est stockée dans des batteries. La nuit ou lorsque la consommation d'énergie

dépasse la production d'énergie, les batteries fournissent de l'énergie supplémentaire à la charge DC. Dans le projet de maison à courant continu, par exemple, un petit système photovoltaïque hors réseau permet d'améliorer considérablement la qualité de vie. Les familles ayant une maison à courant continu auront accès à des poêles et à des éclairages électriques au lieu de brûler de la biomasse, réduisant ainsi l'exposition aux sous-produits de combustion toxiques et à la fumée [38].

Le photovoltaïque est souvent la seule source de production d'énergie pour les personnes qui vivent avec des systèmes hors réseau. Il est donc essentiel de maximiser la production d'énergie solaire avec le MPPT. Le MPPT mesure le courant et la tension du panneau photovoltaïque, puis modifie le point de fonctionnement du convertisseur élévateur DC-DC pour trouver et maintenir le point de puissance maximale. Cependant, la performance de ces algorithmes est sujette à l'ondulation du point de fonctionnement DC en raison de l'ondulation du courant d'inductance causée par la commutation des convertisseurs. Pour comprendre comment l'ondulation du courant d'inductance affecte le MPPT, nous devons examiner comment les cellules PV, les convertisseurs et le MPPT rendent cela possible.

I.3 Production d'énergie photovoltaïque et modèle de circuit

Les cellules photovoltaïques produisent du courant à l'aide d'une jonction PN. La Figure I.2 représente la structure de base de cette cellule solaire. Lorsque la lumière frappe le matériau, les photons transmettent de l'énergie principalement à la couche N située au-dessus et légèrement à la couche P située en dessous. Cette énergie produit des électrons libres dans la couche N et des trous libres dans la couche P, ce qui entraîne une tension aux bornes de la jonction PN. Lorsque les cellules sont fixées à une charge résistive, les électrons libres circulent de la couche N à travers la charge pour remplir les trous de la couche P, produisant un courant continu [39].

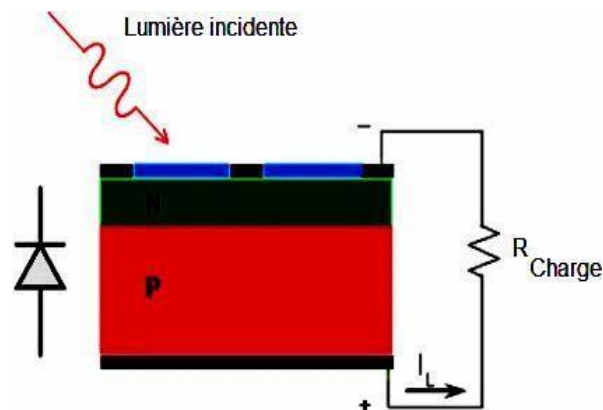


Figure I.2 : Cellule photovoltaïque - Analog Devices 2019 [39].

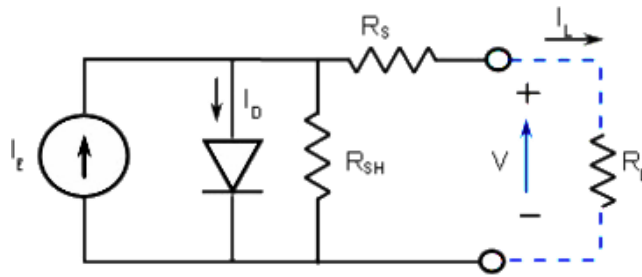


Figure I.3 : Schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [39].

Un modèle de circuit équivalent à diode unique d'une cellule photovoltaïque provenant d'Analog Devices est illustré à la Figure I.3. La fonction principale d'une cellule photovoltaïque est une source de courant, représentée à gauche sur la Figure I.3 par I_E . Il y a une diode avec un courant de saturation I_D qui fixe la tension du PV lorsqu'il est chargé et fournit un chemin de retour du courant lorsqu'il n'y a pas de charge. Cependant, les PV présentent des pertes de puissance modélisées sous la forme de deux résistances parasites : la résistance shunt R_{SH} et la résistance série R_S . En général, R_{SH} est très élevée et R_S est très faible.

La Figure I.4 illustre la proximité du modèle de circuit des cellules photovoltaïques par rapport aux mesures réelles de courant-tension (IV) et de puissance. Dans la figure, les courbes IV des systèmes photovoltaïques simulés sont représentées par des lignes pleines tandis que les résultats des mesures expérimentales des systèmes photovoltaïques sont représentés par des symboles. Chaque couleur représente une condition de fonctionnement différente pour un panneau solaire mais a la même forme en raison des R_S et R_{SH} intrinsèques. Cette courbe change en fonction de l'irradiation solaire et de la température du panneau, et le système peut déplacer son point de fonctionnement sur la courbe IV du système photovoltaïque en modifiant la charge de sortie. Ceci est intuitif avec le schéma de circuit équivalent de la Figure I.3. Au départ, l'impédance de charge R_L est nulle, ce qui produit zéro watt à la sortie. En augmentant l'impédance de charge, nous augmentons la tension aux bornes de la sortie car l'impédance de charge est en série avec R_S . À partir de ces courbes, nous pouvons observer que les résultats simulés correspondent étroitement aux profils de charge réels des panneaux solaires, en particulier aux niveaux de puissance inférieurs [13].

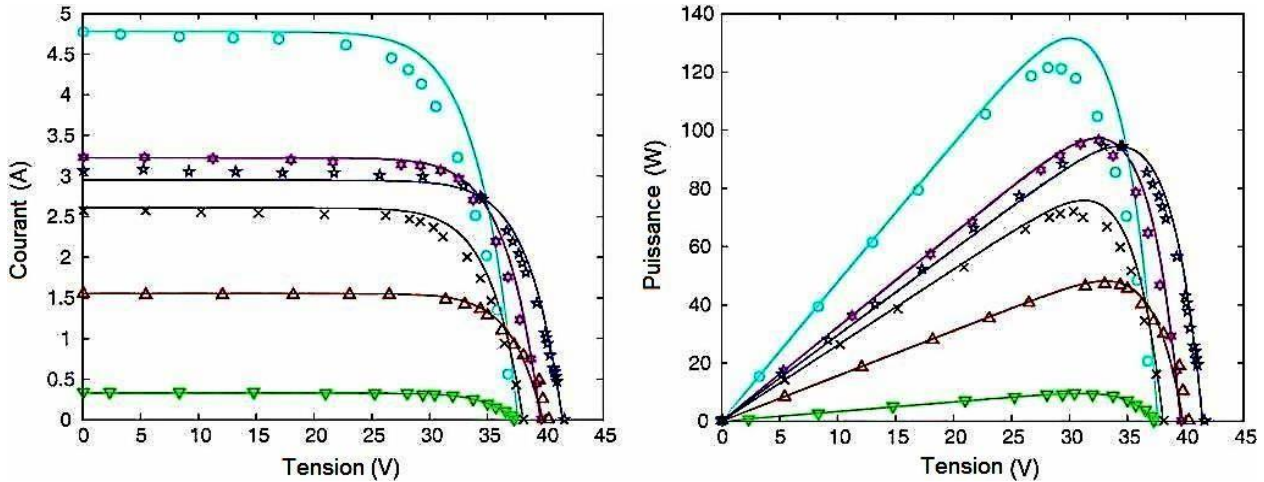


Figure I.4 : Cellule Photovoltaïque (expérimental et simulé) [40].

En observant le graphique de droite de la Figure I.4, nous voyons que les profils de charge atteignent la puissance de sortie maximale à un point IV spécifique. Pour tirer le maximum de puissance d'un système PV, nous devons définir le point de fonctionnement du système à l'aide du MPPT. En fait, l'algorithme MPPT lit le courant et la tension PV pour déterminer le profil de charge qui produira la puissance maximale en fonction des résistances parasites en série et en dérivation.

I.4 Électronique de puissance dans les systèmes PV

Le convertisseur survolteur est généralement utilisé dans un système PV MPPT pour augmenter la faible tension produite par le PV. Un convertisseur survolteur fonctionne en stockant l'énergie dans le champ magnétique d'une inductance et en utilisant un contrôleur pour activer et désactiver un commutateur à transistor. Cela se manifeste par un courant d'inductance, I_L , et une tension d'inductance, V_L , qui augmente la tension de sortie. Lorsque le contrôleur active l'interrupteur, ce dernier constitue une impédance quasi nulle et un chemin de retour de tension [41].

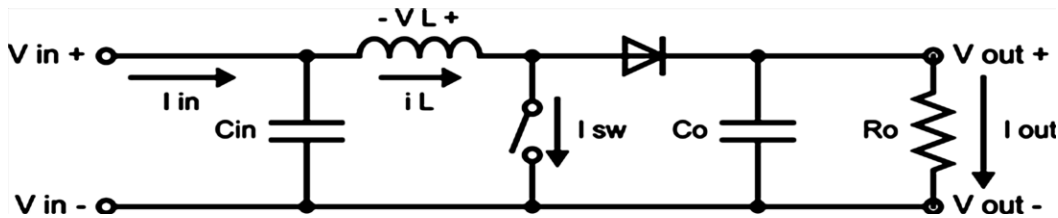


Figure I.5 : Circuit Boost [41].

Cette voie de retour à faible résistance provoque la charge du courant d'inductance, I_L . Le contrôleur met

alors l'interrupteur hors tension, déconnectant effectivement le chemin de retour à faible impédance et ne laissant que le chemin de retour à plus haute impédance.

Le champ magnétique de l'inductance empêche le courant de changer instantanément, forçant ce courant vers la sortie dans un chemin d'impédance plus élevée. Le courant de l'inductance commence à chuter dès qu'il est connecté à ce chemin à plus haute impédance. L'équation I.1 montre que cette variation de courant produit une tension aux bornes de l'inductance.

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{I.1})$$

Le courant de l'inductance va à la charge de sortie, mais charge également le condensateur de sortie et augmente la tension de sortie. La tension du condensateur de sortie augmente selon l'équation I.2 en raison du courant d'inductance poussé vers la sortie. Lorsque la tension de sortie du convertisseur a atteint une limite supérieure, l'interrupteur du contrôleur s'allume pour charger le courant de l'inductance et répéter le cycle.

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (\text{I.2})$$

Pendant que l'inductance se charge, le condensateur fournit le courant de charge. Cela fait lentement chuter la tension de sortie. Lorsque la tension atteint une limite inférieure, le contrôleur active l'interrupteur et remonte la tension de sortie.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = t_{on} \quad (\text{I.3})$$

$$V_0 = \frac{V_{in}}{(1 - D)} \quad (\text{I.4})$$

Les convertisseurs Boost sont contrôlés par la durée pendant laquelle le contrôleur de commutation charge l'inductance. Cela se fait principalement par modulation de largeur d'impulsion (PWM), où le commutateur fonctionne à une fréquence constante, mais modifie le rapport cyclique D . Cela détermine la durée de circulation du courant dans le commutateur et la durée d'envoi du courant à la sortie. L'équation

I.3 définit le rapport cyclique comme le rapport entre la durée d'activation de l'interrupteur et la durée

d'une période.

L'équation 1.4 montre que le rapport cyclique définit la tension de sortie en tant que rapport de la tension d'entrée. En augmentant le temps pendant lequel l'interrupteur est activé et charge l'inductance, on augmente le rapport cyclique, ce qui augmente la tension de sortie. C'est le fonctionnement fondamental d'un convertisseur élévateur ; tout est contrôlé par le rapport cyclique.

Le convertisseur élévateur peut être réduit à une impédance contrôlée par le rapport cyclique pendant le fonctionnement MPPT. Ceci est utile pour comprendre comment le convertisseur obtient une puissance maximale du panneau PV. En utilisant la même topologie boost de la Figure I.5.

$$\eta = \frac{P_{out}}{R_{in}} = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}I_{in}} \quad (\text{I.5})$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{out}} \quad (\text{I.6})$$

$$I_{in} = \frac{V_{int}}{R_{boost}} \quad (\text{I.7})$$

Nous commençons par l'équation de rendement I.5 qui définit le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée. Nous remplaçons ensuite la puissance par la tension et le courant pour l'entrée et la sortie. L'équation I.6 est une loi d'ohm à la sortie, introduisant R_{out} . L'équation I.7 est la loi d'ohm, où R_{boost} est la résistance équivalente du circuit boost vu de l'entrée. C'est le rapport entre la tension d'entrée et le courant d'entrée.

$$\eta = \frac{V_{out} \frac{V_{out}}{R_{out}}}{V_{in} \frac{V_{int}}{R_{boost}}} = \frac{R_{boost}}{R_{out}} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)^2 \quad (\text{I.8})$$

$$\eta = \frac{R_{boost}}{R_{out}} \left(\frac{1}{1-D} \right)^2 \quad (\text{I.9})$$

$$R_{boost} = \eta R_{out} (1-D)^2 \quad (\text{I.10})$$

Nous pouvons alors substituer I_{out} et I_{in} en utilisant les équations I.6 et I.7 dans l'équation de rendement I.5. Cela donne l'équation I.8, qui a R_{boost} mais a toujours besoin d'un rapport cyclique. En utilisant l'équation I.4, nous pouvons substituer le rapport de la tension d'entrée et de sortie pour introduire le rapport cyclique dans l'équation I.9. La résolution de R_{boost} donne l'équation finale I.10 qui montre que

la résistance équivalente d'un convertisseur survolteur est une fonction D , le rapport cyclique.

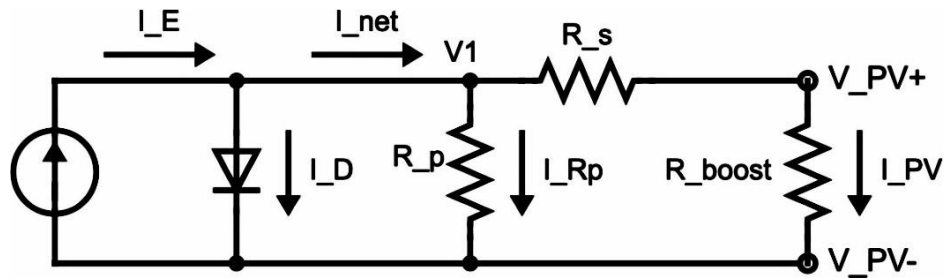


Figure I.6 : Modèle PV avec Boost simplifié [14].

Ensuite, nous pouvons combiner le modèle PV à diode unique de la Figure I.3 avec la résistance équivalente du convertisseur élévateur pour obtenir le modèle MPPT équivalent de la Figure I.6. Pour maximiser la puissance de sortie, le rapport cyclique doit correspondre à l'impédance de source de Thévenin du modèle PV à gauche. Cependant, le système est non linéaire en raison de la diode en parallèle à la source de courant, ce qui produit la courbe IV du panneau PV de la Figure I.4. Comme il n'existe pas de moyen facile de calculer l'impédance de source, la plupart des algorithmes modifient R_{boost} de manière expérimentale, en ajustant le rapport cyclique du convertisseur élévateur jusqu'à ce qu'un point de puissance maximale soit trouvé.

I.5 Suivi du point de puissance maximale (MPPT) en photovoltaïque

Les algorithmes de suivi du point de puissance maximale partent du principe que les panneaux PV ont des courbes IV décroissantes monotones en raison de leurs résistances internes, comme nous l'avons vu dans la Section 1.3. La Figure I.7 montre la courbe IV (bleu) d'un panneau PV et sa puissance de sortie (rouge).

La puissance de sortie est mesurée comme le produit du courant et de la tension du panneau. Pour toutes les conditions de fonctionnement, il existe un seul point de puissance maximale (MPP) où la pente est nulle. À gauche du MPP, la pente est positive, tandis qu'à droite du MPP, la pente est négative. Ces caractéristiques de pente sont toujours vraies pour chaque courbe et sont utilisées pour deux algorithmes MPPT étudiés dans cette thèse [42].

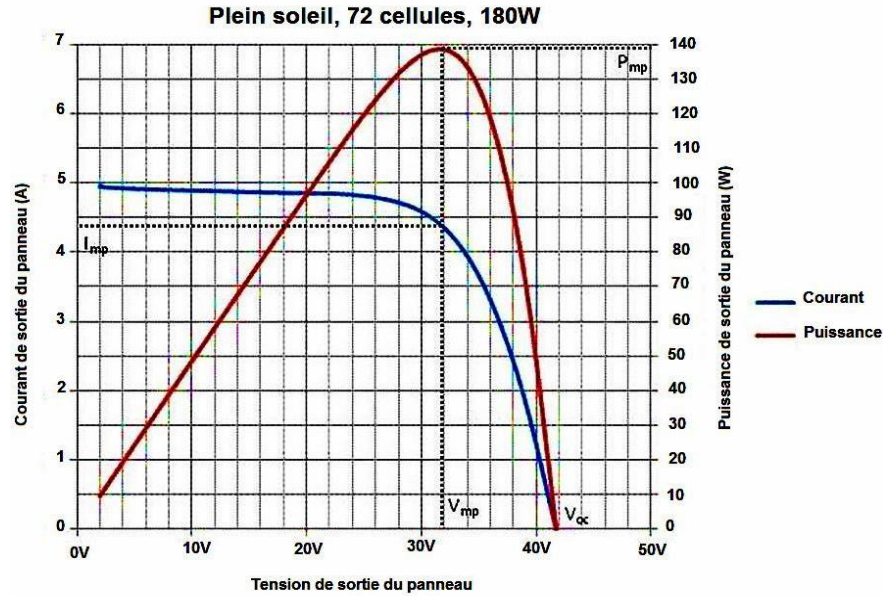


Figure I.7 : Courbe caractéristique IV (bleu) et courbe de puissance de sortie (rouge) [42].

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) est une partie très essentielle dans les systèmes photovoltaïques, et très nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. Il existe de nombreuses techniques afin d'atteindre le point de puissance maximale (PPM) selon toute combinaison de courant et de tension et cela dans différentes conditions météorologiques (pour un éclairage et une température donnée).

La tension et le courant correspondants au PPM sont appelés tension optimale et courant optimal. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximal), cependant, il est possible d'insérer un convertisseur DC-DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale entre la source photovoltaïque et la charge qui permettra alors la recherche du (MPP). L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Malgré tout au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

Le schéma fonctionnel de notre système se présente comme suit :

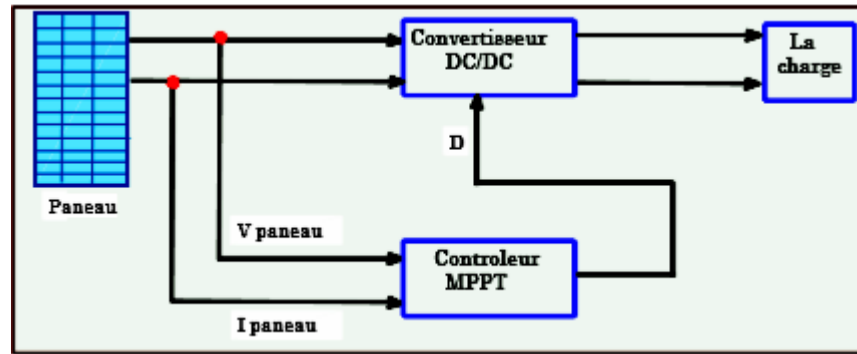


Figure I.8: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

I.5.1 Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables.

I.5.1.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans différents conditions climatiques (température, ensoleillement) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et de ce fait, difficiles à généraliser:

- La méthode d'ajustement.
- La méthode « look-up table ».
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit.

I.5.1.2 Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et leurs algorithmes sont basés sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux. Parmi ces méthodes, on retrouve :

- La méthode de perturbe et observe (P&O).
- L'incrément de conductance.
- La méthode d'optimisation d'essaim de particules (PSO).
- La méthode de la logique floue (voir l'Annexe B)
- La méthode basée sur les réseaux neuronaux (voir l'Annexe B)

I.5.1.3 La méthode de perturbée et observe (P&O)

L'algorithme Perturb and Observe (P&O) est l'un des algorithmes MPPT les plus simples utilisés aujourd'hui. Le schéma de l'organigramme de P&O est illustré à la Figure I.9. L'algorithme compare la puissance de sortie à deux points de fonctionnement différents et sélectionne le point maximal, pour finalement atteindre et maintenir un point de fonctionnement au MPP.

P&O commence avec un rapport cyclique D par défaut, et zéro pour les deux valeurs de puissance. ΔD est présélectionné en fonction des performances et sera couvert plus tard. Lors de la première période d'échantillonnage, le convertisseur DC-DC fonctionne avec le rapport cyclique par défaut. P_{new} est calculé à partir du courant et de la tension de sortie. P_{new} sera plus grand que P_{old} , qui commence à zéro. L'algorithme augmente le rapport cyclique de ΔD sur le premier cycle, puis enregistre P_{new} comme P_{old} [43].

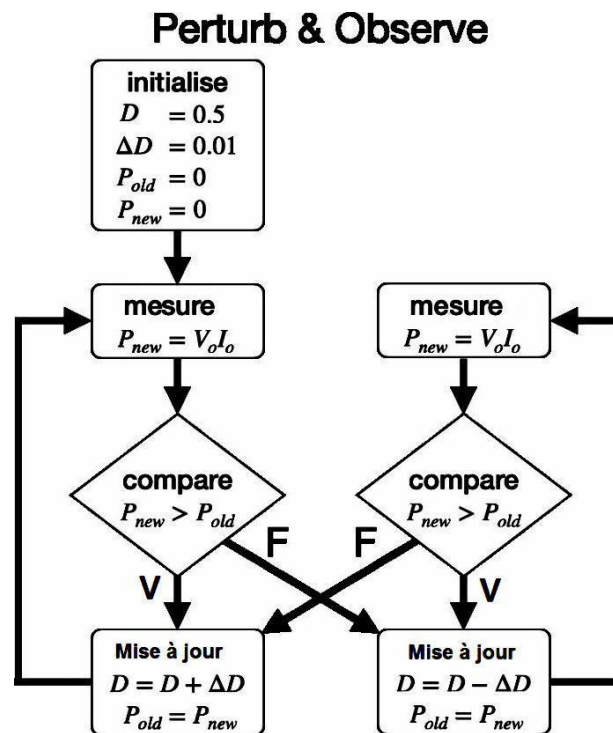


Figure I.9 : Organigramme de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) [16] [44].

Lors de la période d'échantillonnage suivante, la puissance de sortie est calculée comme étant P_{new} . Cette

puissance est ensuite comparée à la puissance de sortie P_{old} . Si P_{new} est supérieure à P_{old} , l'algorithme augmente à nouveau le rapport cyclique. Sinon, l'algorithme diminue le rapport cyclique. La même comparaison de P_{new} et P_{old} est effectuée dans la boucle de rapport cyclique droite de la Figure I.8. Si la diminution de la tension fait augmenter la puissance de sortie, l'algorithme continue à diminuer la tension. Sinon, il augmente la tension pour faire augmenter la puissance de sortie [44].

Le seul inconvénient de P&O est l'oscillation autour du point de puissance maximale. Ceci est principalement dû au fait qu'il n'y a pas de condition pour maintenir un point de fonctionnement, et donc le rapport cyclique peut augmenter et diminuer d'un pas continuellement. L'algorithme suivant résout cette limitation en ajoutant une position de maintien en régime permanent [45].

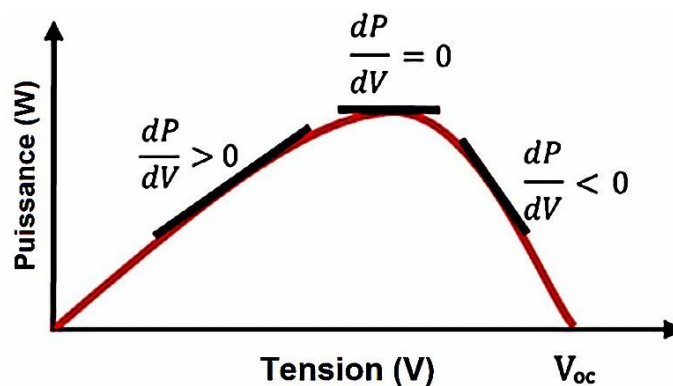


Figure I.10 : Puissance de sortie par rapport à la tension de sortie pour les panneaux PV [40].

I.5.1.4 La méthode de conductance incrémentale (IC)

La conductivité incrémentale (IC) utilise la pente du graphique de la tension par rapport à la puissance, comme le montre la Figure I.10, pour trouver le point de puissance maximale (MPP) où la pente est nulle. Il fonctionne de manière similaire à P&O mais calcule le changement de tension et le changement de courant au lieu du seul changement de la puissance de sortie. Il a également une option pour maintenir son rapport cyclique lorsque le MPP est trouvé. Le diagramme de flux de l'algorithme IC est illustré à la Figure I.11.

IC a trois options pour son point de fonctionnement : maintenir sa tension, augmenter sa tension, ou diminuer sa tension. Le panneau PV étant censé être à son MPPT la plupart du temps, IC vérifie d'abord si la variation de la puissance par rapport à la tension est nulle. La première condition est à MPP. Le rapport cyclique est statique donc il n'y a pas de changement de tension, $\Delta V = 0$. Si le courant reste constant, $\Delta I = 0$, la puissance ne change pas et donc le panneau est au point de puissance maximale [46].

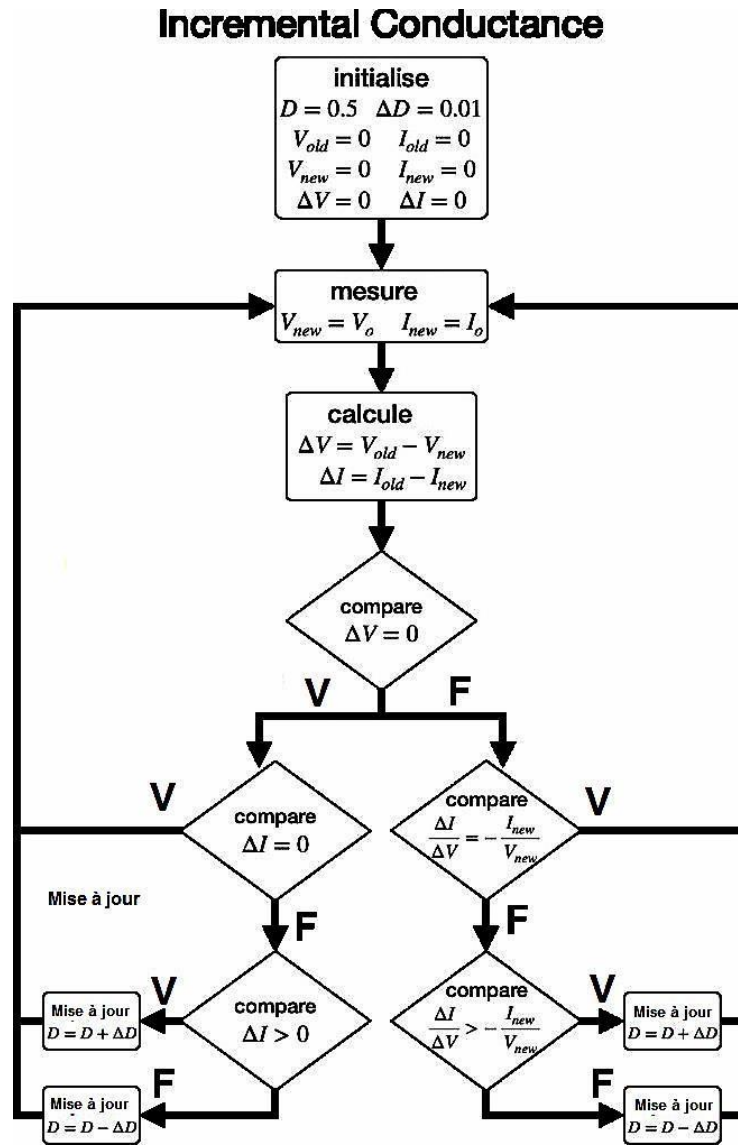


Figure I.11 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale (IC) [46][47].

L'équation I.11 est l'équation de puissance qui est ensuite différenciée pour obtenir l'équation I.12. En divisant les deux côtés de l'équation I.12 par V puis en réarrangeant, on obtient l'équation I.13 qui montre le terme de conductance, d'où le nom de l'algorithme. Comme la tension est toujours positive, l'équation I.13 nous permet de déterminer le signe de dP/dV avec le courant, la tension et la conductance [48].

$$P = I \times V \tag{1.11}$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{1.12}$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} + \frac{1}{V} \frac{dP}{dV} \quad (1.13)$$

Tableau I.1 : États de la conductance incrémentielle

Augmenter la tension	Maintenir la tension	Diminution de la tension
$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$	$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$	$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$
$\frac{dP}{dV} < 0$	$\frac{dP}{dV} = 0$	$\frac{dP}{dV} > 0$

Les trois états du CI réduisent l'oscillation autour du point de puissance maximale tout en maintenant le suivi autocorrectif de la méthode P&O. L'inconvénient est que trois comparaisons doivent être effectuées pendant le suivi du MPP par rapport à une seule comparaison avec la méthode P&O [43]. Enfin, il est important de noter que le changement de pas du rapport cyclique, ΔD , affecte les performances du CI. Plus le pas est grand, plus l'algorithme peut changer la différence de tension pour obtenir plus rapidement le MPP. Cependant, cela se fait au prix d'une perte de précision lorsque le processus est proche de la MPP. Un autre point important est que les algorithmes P&O et IC fonctionnent en supposant que les sorties de courant et de tension sont relativement stables. En réalité, les mesures doivent être effectuées avec une ondulation du courant due à l'action de commutation dans le convertisseur boost [49].

I.6 Méthode d'évaluation des performances

Pour évaluer la performance d'un algorithme MPPT comme cela sera réalisé dans cette thèse, la méthode de test présentée dans [14] sera utilisée. La Figure I.12 illustre un exemple de résultat de test où plusieurs algorithmes MPPT sont comparés en termes de performance d'efficacité de démarrage. Un autre exemple de résultat de test est présenté dans la Figure I.13 où les algorithmes ont été testés pour leur capacité de suivi lorsque le point de puissance optimale change toutes les secondes [50].

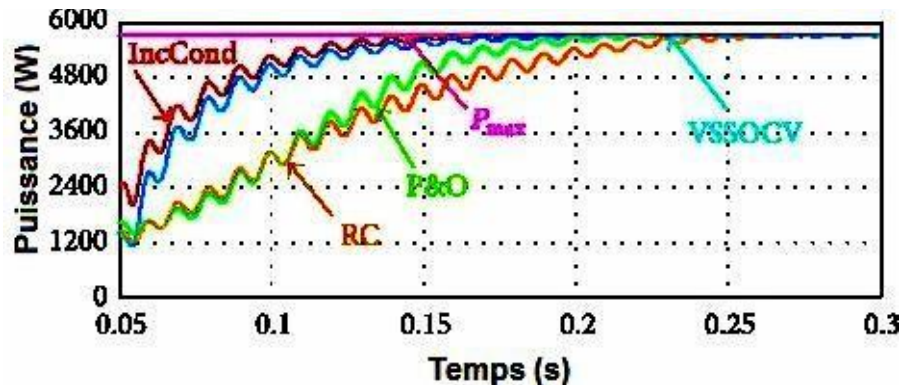


Figure I.12 : Efficacité de démarrage de différents algorithmes MPPT [50].

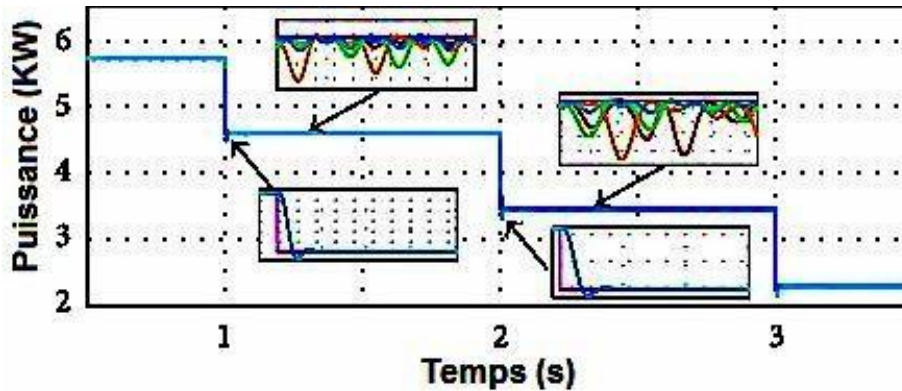


Figure I.13 : Analyse transitoire pour changement des points de puissance maximale [50].

Le tableau I.2 présente le tableau final des mesures de performance qui résume les résultats. Outre le rendement, une mesure de performance figurant dans le tableau est le THD, qui signifie distorsion harmonique totale et représente le niveau de bruit de l'alimentation. De plus, la précision de l'évaluation des performances est plus importante que la vitesse de suivi puisque l'objectif principal est d'atteindre le véritable point de puissance maximale. Cela souligne l'importance d'étudier l'effet de l'ondulation du courant de l'inductance qui a un impact direct sur la précision de l'obtention du point de puissance maximale

Tableau I.2 : Rendement et THD du MPPT [25].

MPPT	Efficiency ($\eta\%$)	THD (%)			
		1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²
VSSOCV	99.95	1.6	1.5	2.0	3.0
IncCond	99.94	4.6	5.7	7.7	24.0
P&O	99.93	1.7	1.9	7.1	9.0
RC	99.86	2.1	3.8	2.0	8.0

I.7 Conclusion

Le fonctionnement du générateur (GPV) et le récepteur à leur rendement optimal, nécessitent l'insertion des convertisseurs statiques entre le générateur et le récepteur. Ce chapitre a été consacré à l'étude des convertisseurs DC-DC et particulièrement le hacheur boost ainsi qu'à son dimensionnement et sur quelques méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT), comme la méthode de perturbe et observe (P&O) et la méthode de conductivité incrémentale (IC)

Chapitre II :
Modélisation d'un système PV et
Algorithme INC modifié

II.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques jouent un rôle clé dans la production d'énergie renouvelable, nécessitant une modélisation précise pour optimiser leur performance. Ce chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement Proteus, ainsi que sur l'implémentation d'un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPP) basé sur la méthode Incrémentale de Conductance (INC) modifiée.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle du panneau photovoltaïque TDC-M20-36, actuellement disponible sur le marché sous Proteus, en tenant compte des caractéristiques électriques fournies par le constructeur. Ensuite, nous détaillons l'algorithme INC modifié, conçu pour améliorer l'efficacité du suivi du MPP en réduisant la complexité des calculs.

II.2. Modèle du panneau photovoltaïque sous Proteus

II.2.1 Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque (PV) convertit la lumière du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La figure II.1(a) illustre le modèle à diode unique, couramment utilisé pour représenter le comportement électrique d'un panneau PV. Bien que plusieurs modèles plus avancés aient été développés dans la littérature pour améliorer la précision et répondre à divers besoins spécifiques, le modèle à deux diodes, par exemple, proposé par [51], [52], prend en compte l'impact de la recombinaison des porteurs.

Cependant, pour simplifier l'analyse tout en conservant une précision satisfaisante, nous adoptons ici le modèle à une diode. Ce modèle représente un compromis optimal entre simplicité et précision, ce qui le rend particulièrement adapté aux études en électronique de puissance. Il est largement utilisé dans la littérature, parfois avec des simplifications, mais toujours basé sur une structure fondamentale composée d'une source de courant et d'une diode en parallèle [8]-[13].

Comme illustré dans la figure II.1(a), ce modèle comprend une source de courant photonique (I_{ph}), qui génère le courant proportionnel à l'irradiation solaire, une diode représentant la jonction P-N, ainsi qu'une résistance shunt (R_{sh}) et une résistance série (R_s) tenant compte des pertes parasites. Ainsi, le courant photovoltaïque peut être exprimé par l'équation (II.1) [53]:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{V \pm I R_s}{aKT N_n} \right) - 1 \right\} - \frac{V \pm I R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

Le panneau TDC-M20-36 est utilisé dans cette étude et le tableau II.1 présente ses spécifications. Il convient de mentionner que les paramètres manquants de la fiche technique sont extraits à l'aide de l'outil "PV array" fourni par Mathworks :

Tableau II.1, Spécifications du panneau photovoltaïque TDC-M20-36 au STC (Voir l'annexe A)

Caractéristiques	Valeurs
MPP	20 W
V _{mp} (Tension à MPP)	18.76 V
I _{mp} (courant à la MPP)	1.07 A
I _{sc} (courant de court-circuit)	1.17 A
V _{oc} (Tension en circuit ouvert)	22.7 V
K _v (Coefficient de température de V) _{oc}	-0.35 %/°C
K _i (coefficient de température de I) _{sc}	0.043 %/°C
Le nombre de cellules, N _s	36
Courant généré par la lumière, I _{ph}	1.173 A
Courant de saturation de la diode, I _s	2.6797e-11 A
Facteur d'idéalité	1.0036
Résistance du shunt, R _{sh}	405.96 Ω
Résistance en série, R _s	1.0547 Ω

II.2.2 Implémentation du modèle PV sous Proteus

Pour modéliser un panneau photovoltaïque sous Proteus, son équivalent électrique est élaboré comme suit: une source de courant dépendante de la tension est placée en parallèle avec une diode, dont le code SPICE est ajusté en fonction des caractéristiques du panneau PV. Deux résistances sont ensuite intégrées, l'une en série et l'autre en parallèle, afin de représenter respectivement les résistances série et shunt. La figure II.1(b) illustre ce modèle dans Proteus, accompagné de son code SPICE.

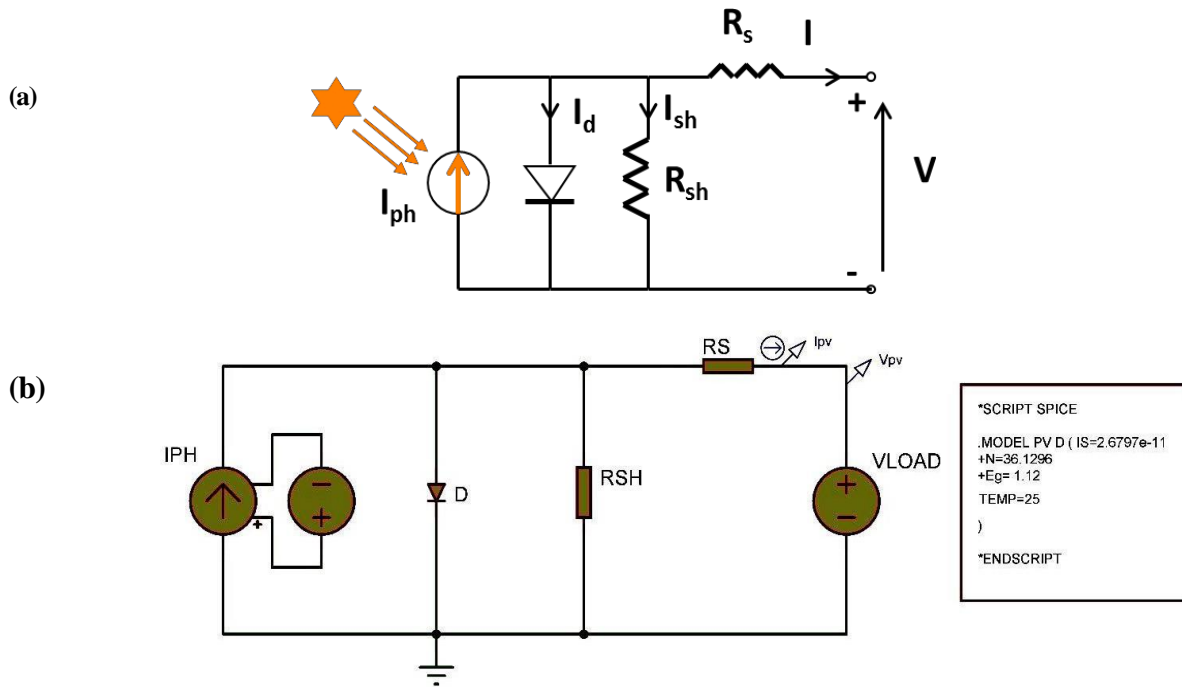


Figure II. 1. (a) : Circuit équivalent du panneau PV, (b) : modèle Proteus du panneau PV

Par ailleurs, la figure II.2 illustre en détail les différentes étapes de la modélisation du panneau photovoltaïque sous Proteus.

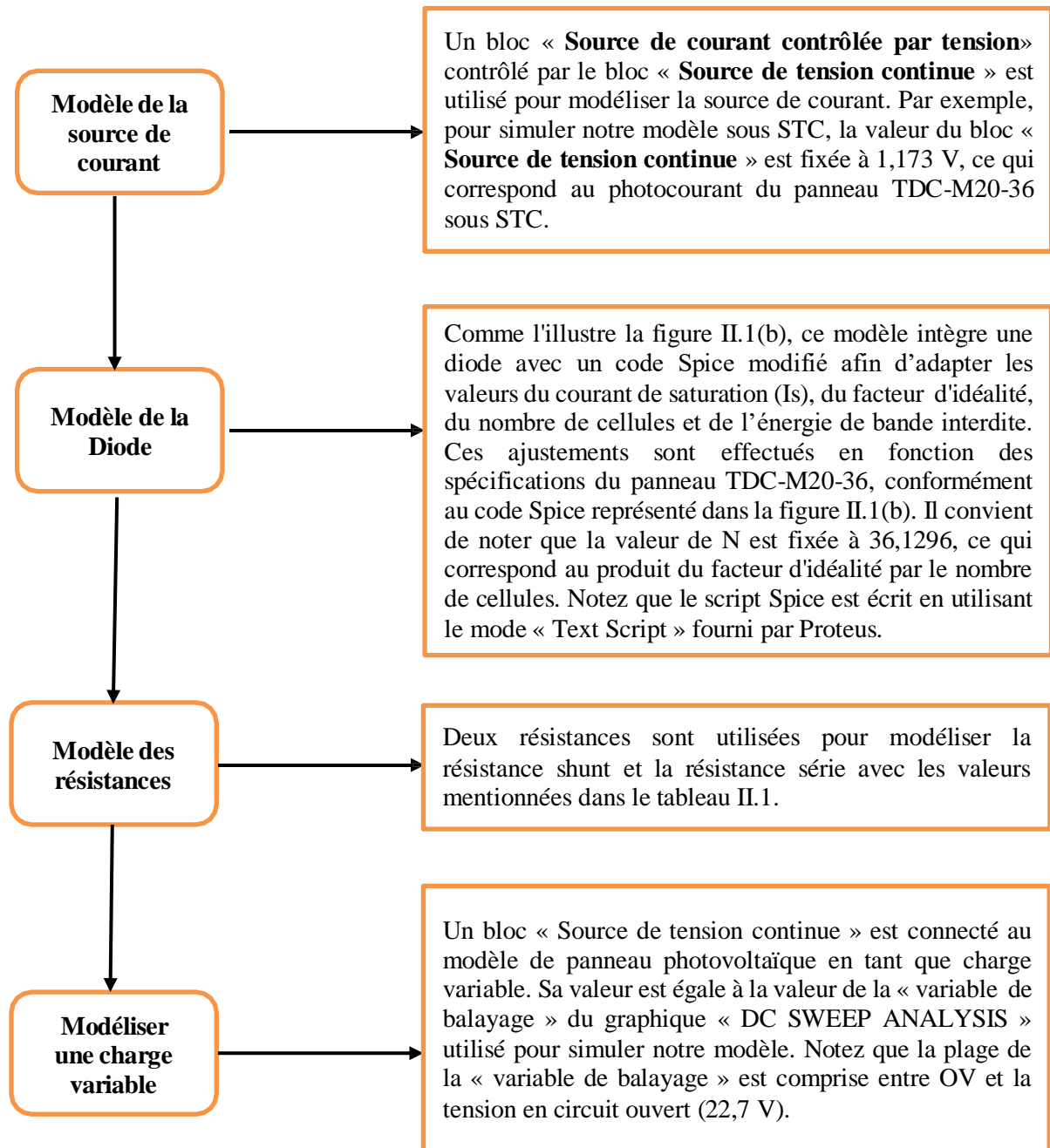


Figure II. 2. Étapes de modélisation du panneau photovoltaïque sous Proteus

II.2.3 Simulation des caractéristiques I-V et P-V

Le banc d'essai présenté à la figure II.3(a) est construit pour valider le modèle Proteus. Il se compose d'un Emulateur PV, d'une charge variable, de deux capteurs de tension et de courant pour mesurer la tension et le courant du panneau, et d'un ordinateur pour instrumenter les données mesurées par un instrument

virtuel réalisé dans l'outil LabVIEW [54].

LabVIEW est un environnement de programmation graphique souvent utilisé pour l'acquisition, l'analyse et la visualisation de données en temps réel. Dans ce banc d'essai, il sert à **instrumenter et traiter les données mesurées**. Voici comment :

a) Acquisition des données

- Les capteurs de tension et de courant envoient leurs mesures à un ordinateur via une interface d'acquisition de données (DAQ).
- LabVIEW récupère ces signaux en temps réel.

b) Traitement et analyse

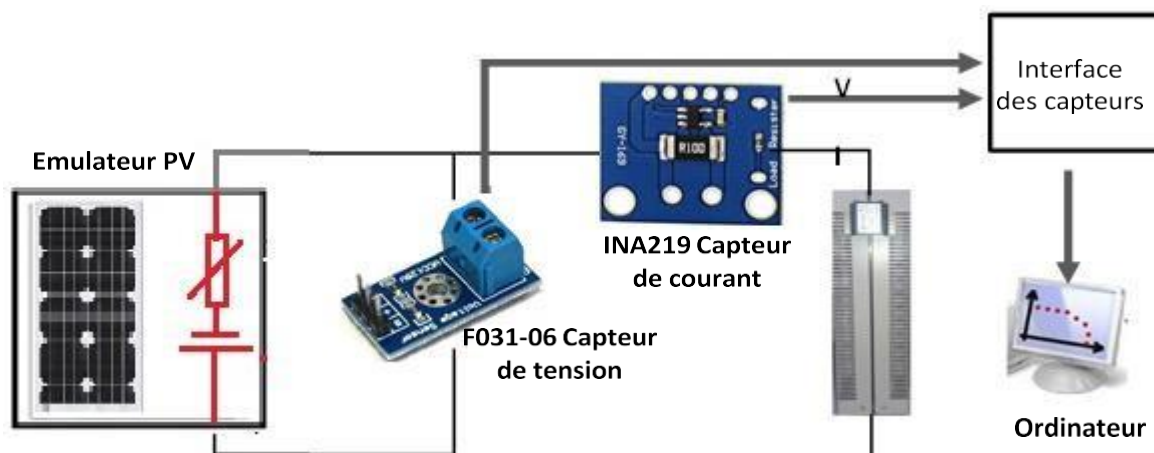
- Le logiciel convertit les valeurs brutes en données exploitables.
- Il peut appliquer des filtres, effectuer des moyennes ou comparer les mesures avec des valeurs de référence.

c) Affichage des résultats

- Un instrument virtuel (VI - Virtual Instrument) est créé pour afficher les données sous forme de courbes, graphiques ou tableaux dynamiques.
- L'utilisateur peut observer en direct l'évolution des paramètres du panneau solaire et ajuster les conditions du test si nécessaire.

d) Enregistrement et exportation des données

- LabVIEW peut enregistrer les mesures pour une analyse ultérieure, sous différents formats (Excel, CSV, etc.).



(a)

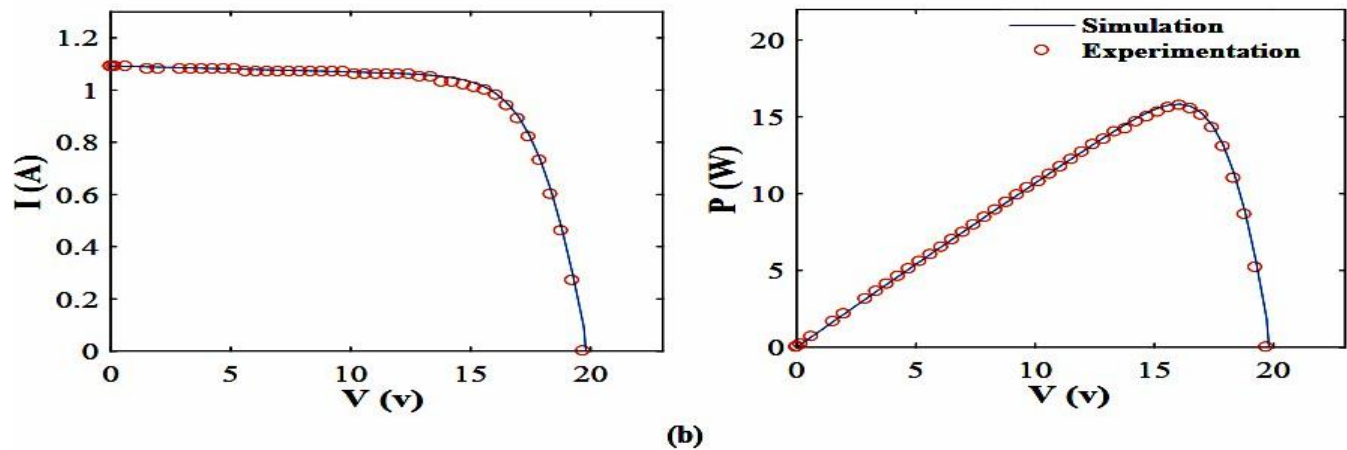


Figure II. 3. (a) : Dispositif de mesure, (b) : Caractéristiques I-V et P-V pour la simulation et l'expérimentation.

La figure II.3(b) illustre les courbes I-V et P-V obtenues à partir du modèle développé sous Proteus et des tests expérimentaux. Comme l'indiquent les résultats, les données simulées correspondent étroitement aux mesures expérimentales, aussi bien pour les caractéristiques de courant que de puissance.

Une fois le modèle du panneau photovoltaïque validé dans Proteus, il peut être exploité pour concevoir un **système PV complet**, intégrant un **contrôleur MPPT** en utilisant les composants matériels disponibles dans la bibliothèque de Proteus. Ces composants incluent notamment les **microcontrôleurs, DSP, FPGA, cartes embarquées (Arduino), capteurs et actionneurs** [15].

Un avantage clé de Proteus par rapport à **Matlab/Simulink ou PSIM** est la possibilité d'utiliser **le même code MPPT-C** développé en simulation pour le prototype physique, sans nécessiter de réécriture. En effet, si l'algorithme MPPT est mis en œuvre sous Proteus et fournit des résultats satisfaisants, il est **fortement probable** que le prototype physique obtienne des performances similaires, grâce à l'utilisation des **mêmes composants en simulation et en implémentation réelle**.

Enfin, dans une optique de **réduction des coûts**, ce projet privilégie l'utilisation d'**Arduino Uno** pour l'implémentation et les tests de l'algorithme MPPT. Son caractère **open source** et son **faible coût** en font une solution idéale pour les applications photovoltaïques accessibles et économiques."

II.3 Algorithme INC modifié

II.3.1 Principe de l'algorithme Incremental Conductance (INC)

La méthode INC conventionnelle est basée sur la conductance incrémentale ($\Delta I/\Delta V$) des caractéristiques PV pour identifier le signe de la pente de la courbe P-V ($\Delta P/\Delta V$) et sa structure peut être présentée comme suit [55]:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0 \text{ à gauche du MPP} \quad \frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \text{ à droite du MPP} \quad (\text{II.3})$$

Puisque,

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(IV)}{\Delta V} = V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (\text{II.4})$$

Donc

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ au MPP} \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ à gauche du MPP} \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ à droite du MPP} \quad (\text{II.7})$$

Sur la base des équations (II.5)-(II.7), la méthode INC conventionnelle est présentée à la figure II.4.

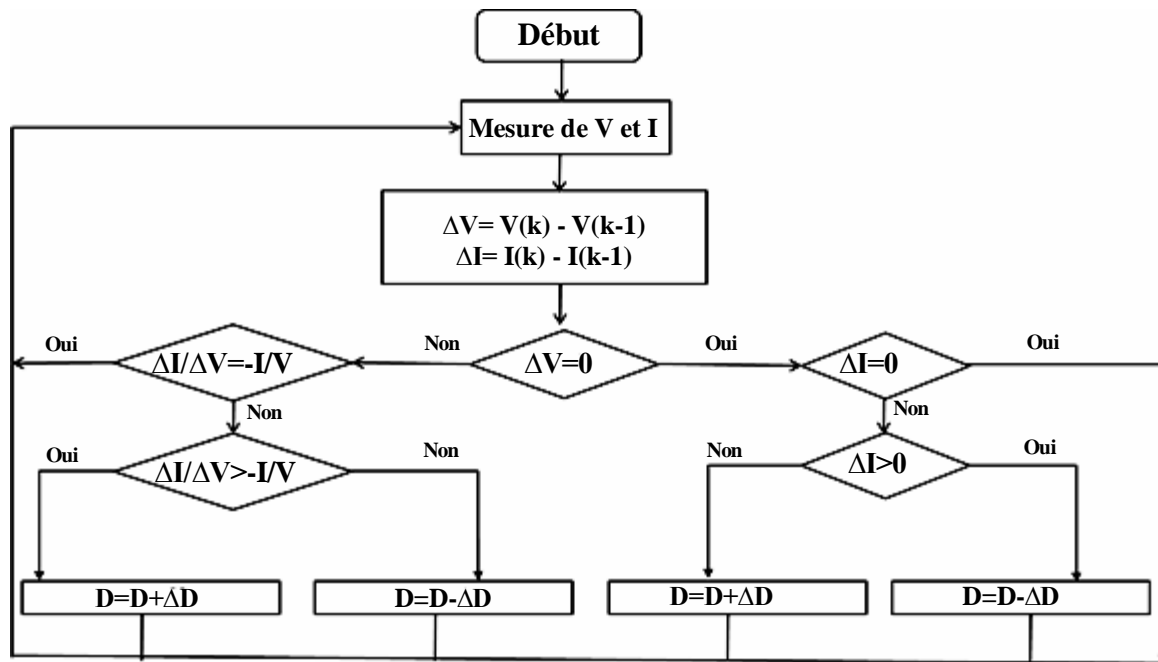


Figure II. 4. Organigramme de la méthode INC

II.3.2 Amélioration de l'algorithme INC : Version modifiée

Comme le montre la figure II 4, la méthode INC conventionnelle contient plusieurs calculs de division qui nécessitent un microcontrôleur plus puissant, notamment une grande mémoire, une fréquence d'horloge élevée et un calcul en virgule flottante, ce qui réduit la possibilité d'utiliser une carte de développement à faible coût.

Dans ce travail, un algorithme INC modifié est introduit. Ce dernier évite le nombre élevé de divisions mathématiques utilisées dans l'algorithme INC conventionnel, ce qui rend l'algorithme plus simple. Cette modification permettra de réduire le traitement en temps réel, ce qui rend possible l'utilisation de microcontrôleurs de bon marché. Par conséquent, les équations (II.5)-(II.7) sont modifiées comme suit :

$$\frac{(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V)}{(\Delta V \cdot V)} = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V)}{(\Delta V \cdot V)} > 0 \text{ à gauche du MPP} \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V)}{(\Delta V \cdot V)} < 0 \text{ à droite du MPP} \quad (\text{II.10})$$

Le dénominateur des équations (II.8)-(II.10) est égal à $V \times \Delta V$. Puisque l'équation (II.8) est égale à zéro, ce dénominateur peut être éliminé. Par conséquent, la division est évitée pour cette équation, comme le montre (II.11). Alors que seul V peut être éliminé des équations (II.9) et (II.10) parce que V est toujours supérieur à zéro, il n'a aucune influence. Par conséquent, les équations (II.12) et (II.13) seront:

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{[(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V)]}{\Delta V} > 0 \text{ à gauche du MPP} \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{[(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V)]}{\Delta V} < 0 \text{ à droite du MPP} \quad (\text{II.13})$$

En outre, pour éviter les calculs de division dans les équations (II.12) et (II.13), la logique "Et" est utilisée comme suit dans les équations (II.15)-(II.18) :

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{II.14})$$

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) > 0 \text{ au MPP ET à gauche du MPP si } \Delta V > 0 \quad (\text{II.15})$$

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) < 0 \text{ au MPP ET à gauche du MPP si } \Delta V < 0 \quad (\text{II.16})$$

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) > 0 \text{ au MPP ET à droite du MPP si } \Delta V > 0 \quad (\text{II.17})$$

$$(V \cdot \Delta I) + (I \cdot \Delta V) < 0 \text{ au MPP ET à droite du MPP si } \Delta V > 0 \quad (\text{II.18})$$

La structure de la méthode modifiée est illustrée à la figure II.5, mettant en évidence l'élimination de tous les calculs de division grâce à l'utilisation d'opérations logiques et arithmétiques. Cette simplification réduit considérablement la complexité de la méthode, optimisant ainsi le traitement en temps réel et permettant l'intégration de microcontrôleurs à faible coût.

De plus, comme l'indique l'équation (II.14), la détection du point de puissance maximale (MPP) repose sur une comparaison d'égalité, évitant ainsi toute perturbation supplémentaire du rapport cyclique. Toutefois, en raison des limitations des microcontrôleurs, une comparaison exacte entre deux nombres réels est impossible, car ceux-ci ne peuvent pas toujours être représentés avec une précision absolue [56]. C'est pourquoi, comme l'illustre l'organigramme de l'algorithme modifié, une marge d'erreur d'arrondi (0,06) est intégrée à l'équation (II.14) pour détecter le MPP et stabiliser le système en ce point.

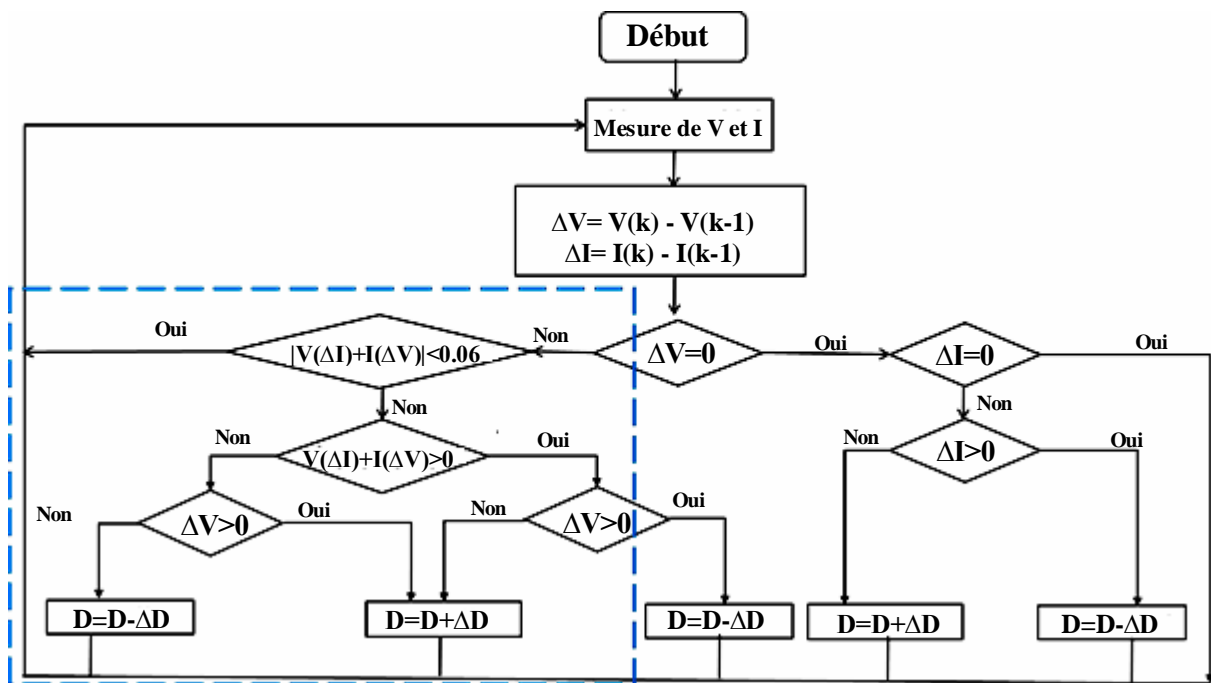


Figure II.5. Organigramme de l'algorithme INC modifié

II.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du PV sous Proteus et à la comparaison des deux méthodes de poursuite du point de puissance maximale INC et INC Modifiée. Ce dernier évite le nombre élevé de divisions mathématiques utilisées dans l'algorithme INC conventionnel, ce qui rend l'algorithme plus simple. Cette modification permettra de réduire le traitement en temps réel, ce qui rend possible l'utilisation de microcontrôleurs de bon marché. En conclusion, ce chapitre a permis de valider une approche complète de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque sous Proteus, offrant une solution fiable pour le développement de systèmes MPPT embarqués à faible coût. Les résultats obtenus ouvrent la voie à une intégration physique de l'algorithme INC modifié sur un prototype réel, qui sera abordée dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Simulation et Réalisation

III.1 Introduction

Ce chapitre s'attache à présenter la simulation via le logiciel Proteus, ainsi que la réalisation expérimentale d'un système de conversion photovoltaïque, intégrant les algorithmes de commande de type Incremental Conductance (IC) et IC modifié. L'objectif principal consiste à évaluer les performances de ces algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) à travers une série de tests pratiques et comparatifs. Dans un premier temps, une démarche méthodique est adoptée pour la sélection des composants essentiels à l'architecture du système, incluant notamment un convertisseur élévateur de tension (hacheur boost) et des microcontrôleurs de type Arduino, spécifiquement les modèles Uno et Mega2560, en charge de l'implémentation des logiques de commande. Une description technique concise de chaque composant introduira les étapes subséquentes, à savoir, la simulation fonctionnelle, ainsi que l'assemblage physique du prototype. Enfin, la validation du dispositif proposé reposera sur une analyse comparative rigoureuse des résultats obtenus avec des références expérimentales issues de la littérature scientifique récente, dans le but de démontrer la robustesse, l'efficacité énergétique et la pertinence pratique de la solution développée.

III.2 La partie matériel

III.2.1 Partie Software (logiciel)

III.2.1.1 le logiciel Arduino

Le langage de programmation employé dans l'environnement Arduino repose sur une syntaxe dérivée du langage C/C++, permettant à l'utilisateur de rédiger un ensemble d'instructions (code source) compréhensibles par la machine après compilation. Ce processus de compilation transforme le code source en langage machine, exécutable par le microcontrôleur. L'exécution d'un programme Arduino suit une logique séquentielle, dans laquelle les instructions sont interprétées les unes après les autres, selon leur ordre d'apparition.

La structure d'un programme Arduino typique se compose de trois sections principales :

- **La déclaration des variables** (optionnelle), dans laquelle sont définis les types et les noms des données utilisées ;
- **La fonction `setup()`**, qui s'exécute une seule fois au démarrage du programme, sert à configurer les paramètres d'initialisation, notamment les entrées et sorties ;

- **La fonction `loop()`**, qui représente le cœur du programme, s'exécutant de manière itérative tant que le microcontrôleur reste sous tension.

Cette architecture modulaire et intuitive comme est illustré à la figure III.1, facilite le développement d'applications embarquées, même pour des utilisateurs débutants, tout en offrant une grande flexibilité pour des projets plus complexes [1].

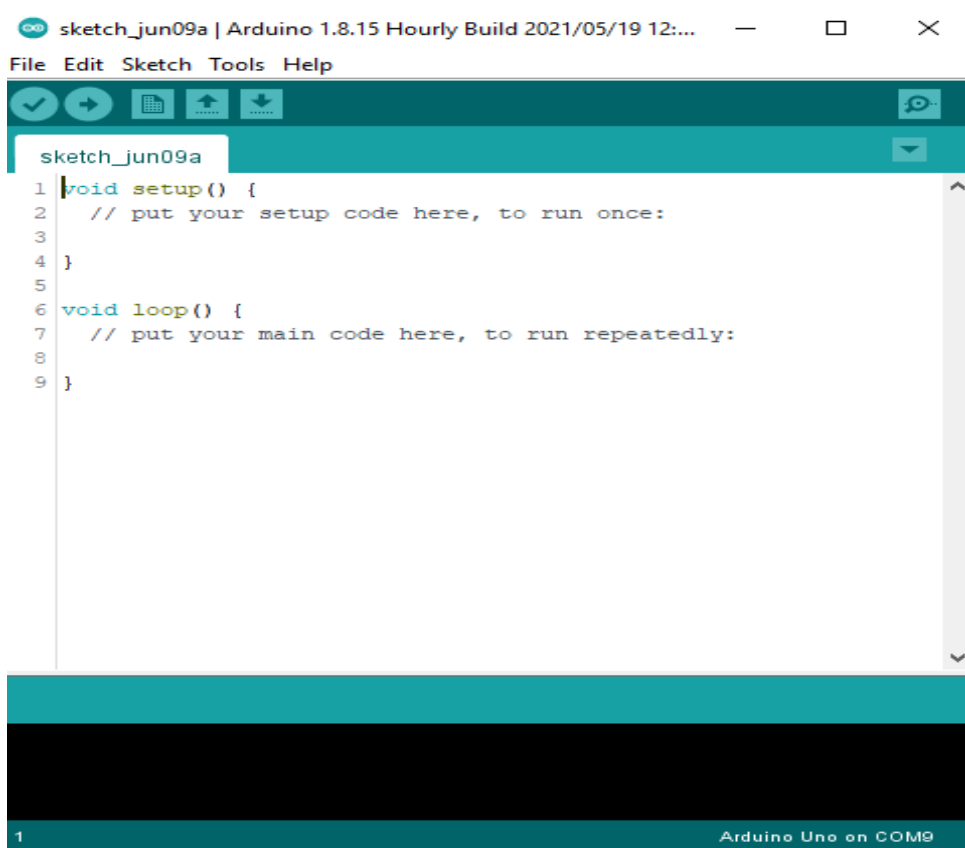


Figure III.1 : interface du logiciel de programmation Arduino

III.2.1.2 ISIS Proteus

Proteus est une suite logicielle dédiée à l'électronique, offrant des outils complets pour la conception assistée par ordinateur (CAO) dans ce domaine. Elle comprend principalement deux logiciels : ISIS et ARES.

ISIS : Le logiciel ISIS de Proteus est reconnu pour sa capacité à éditer des schémas électriques. En plus de cette fonction, il permet de simuler ces schémas, ce qui aide à détecter d'éventuelles erreurs dès la phase de conception. De plus, les circuits électriques créés avec ISIS peuvent être utilisés

dans des documentations, car le logiciel offre un contrôle précis de l'apparence graphique des schémas.

ARES : ARES est un outil de conception et de routage qui complète parfaitement ISIS. Un schéma électrique réalisé sur ISIS peut être facilement importé dans ARES pour la création du PCB (circuit imprimé) de la carte électronique. Bien que l'édition manuelle d'un circuit imprimé soit généralement plus efficace, ARES permet de placer automatiquement les composants et de réaliser le routage de manière automatisée.

III.2.1.3 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un environnement de développement graphique conçu par National Instruments. Il est largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche pour le développement d'applications de test, de mesure et de contrôle.

III.2.2 Partie Hardware

III.2.2.1 Carte Arduino

Arduino est une plateforme de développement électronique open-source reposant sur une carte à microcontrôleur, conçue pour être facilement programmable en vue d'analyser, de traiter et de générer des signaux électriques. Cette architecture permet la mise en œuvre de systèmes embarqués capables d'exécuter des tâches variées, allant de simples automatismes à des fonctions de contrôle avancées.

L'un des principaux avantages d'Arduino réside dans la synergie qu'il propose entre la programmation informatique et la conception électronique. En effet, l'intégration d'un microcontrôleur programmable permet de simplifier significativement les schémas électroniques, ce qui contribue à la réduction des coûts de réalisation et à l'optimisation de la phase de conception des circuits imprimés [2].

Grâce à sa modularité, sa simplicité d'utilisation et son large écosystème, Arduino est aujourd'hui largement utilisé dans divers domaines d'application, tels que l'électrotechnique industrielle, les systèmes embarqués, la domotique, le modélisme, la robotique, ainsi que dans des disciplines plus transversales comme l'art interactif. Il permet notamment de piloter des moteurs, de gérer des jeux de lumière, d'interagir avec des ordinateurs ou encore de contrôler des dispositifs mobiles à distance.

Description des cartes Arduino UNO et Mega2560

La carte Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328 (voir la fiche technique et la figure III.2).

Elle dispose:

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,

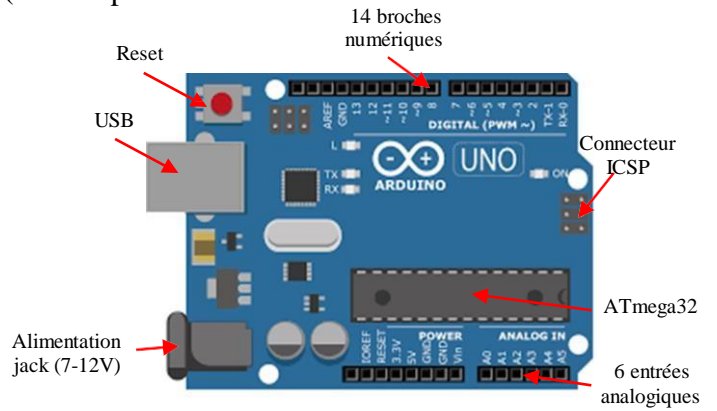


Figure III.2 : Arduino UNO

- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

La figure III.3 donne une représentation schématique de la carte Arduino Mega2560

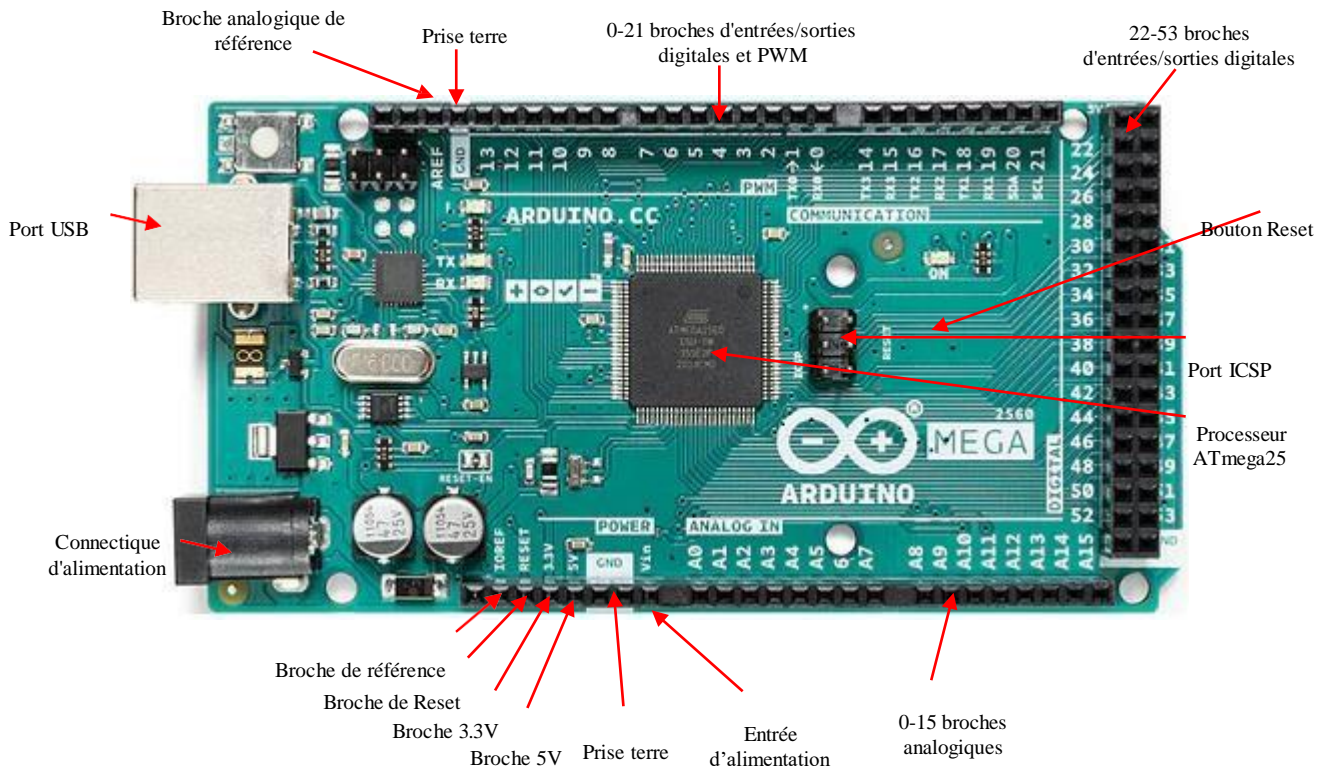


Figure III.3 : Arduino Méga2560

III.2.2.2 Capteur de tension : Dans le cadre de ce travail, il est indispensable d'adapter la tension issue du panneau photovoltaïque à la plage de fonctionnement de l'entrée analogique de la carte Arduino, qui est limitée à 5 V. Pour ce faire, le module utilisé est le B25 Voltage Sensor Module «Voltage Sensor Module –Arduino Compatible», représenté à la figure III.4.

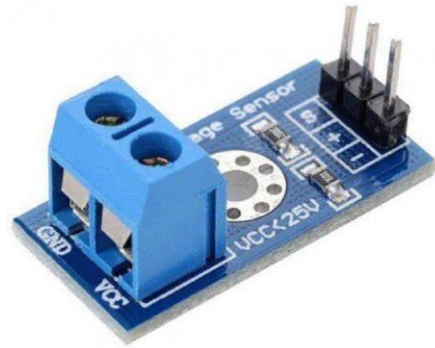


Figure III.4 : Capteur de tension (B25)

Ce module repose sur le principe d'un diviseur de tension résistif, permettant de réduire la tension d'entrée d'un facteur cinq. Ainsi, une tension maximale de 5V peut être appliquée à l'entrée analogique (ADC) de l'Arduino, ce qui autorise une mesure de tension allant jusqu'à 25 V à l'entrée du module. Si la carte Arduino fonctionne sous 3,3 V, la tension maximale mesurable est réduite à 16,5 V.

Caractéristiques:

- Plage de tension d'entrée : 0-25 V DC
- Plage de détection de tension : 0,02445V - 25V DC
- Résolutions analogiques de tension : 4,89 mV
- Connexion de l'alimentation : borne positive sur VCC, négative sur GND
- Interface de sortie : « + » 5 / 3,3 V, « - » GND, « s » la broche AD
- Taille : environ 27 x 14 x 12 mm

III.2.2.3 Capteur de courant : il est nécessaire pour détecter le courant PV. Le capteur utilisé dans ce travail est le "INA219 DC Current Sensor" de la Figure III.5.

Un capteur de courant numérique qui permet de mesurer la tension, le courant et la puissance d'une charge.

Caractéristiques :

- Plage de mesure : Mesure des courants jusqu'à 3,2 A.
- Précision : Haute précision grâce à une conversion analogique-numérique de 12 bits.
- Interface : Communication via le protocole I2C.
- Alimentation : Fonctionne généralement avec une alimentation de 3 à 5 V.



Figure III.5 : Capteur de courant (INA219)

III.2.2.4 Convertisseur : Comme illustré à la figure III.6, un convertisseur Boost est utilisé dans le cadre de ce travail afin de réduire le déséquilibre de tension entre le générateur photovoltaïque et la charge, tout en permettant le fonctionnement du système au point de puissance maximale (MPP). Ce choix est motivé par plusieurs travaux antérieurs, notamment ceux de Belkaid et al. (2016) [3], Gayen et Jana (2017) [4], ainsi que Montoya et al. (2016) [5], qui ont démontré l'efficacité du convertisseur Boost dans ce contexte.

Le convertisseur Boost, de type élévateur de tension, permet d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée, en fonction du rapport cyclique du signal de commande. Son fonctionnement est régi par les équations suivantes (voir l'annexe C)[6]:

$$V_0 = \frac{V_{in}}{(1 - D)} \quad (\text{III.1})$$

$$I_0 = I_{in} \times (1 - D) \quad (\text{III.2})$$

La valeur du condensateur d'entrée peut être calculée comme suit [6] :

$$C_{in} \geq \frac{D}{8 \times F^2 \times L \times 0.01} \quad (\text{III.3})$$

La valeur du condensateur de sortie peut être calculée comme suit [6] :

$$C_0 \geq \frac{D}{0.02 \times F \times R} \quad (\text{III.4})$$

La valeur de l'inductance doit être conçue comme suit, où r est le rapport d'ondulation du courant de l'inducteur, qui est optimal dans la plage de [0,3, 0,5] ([7]Ayop et Tan, 2018 ; [6]) :

$$L \geq \frac{V \times D}{r \times I \times F} \quad (\text{III.5})$$

Les paramètres du convertisseur Boost sont sélectionnés comme suit : $L = 20$ mH, $C_{in} = 220$ μ F, $C_0 = 470$ μ F, $F = 1$ kHz, et R de la charge est de 70Ω . Il convient de mentionner que le commutateur utilisé dans le convertisseur Boost conçu est le transistor IRFZ44N (voir Annexe D) parce qu'il a une faible valeur de $R_{ds(on)}$ qui est égale à $0,022 \Omega$. Par conséquent, l'utilisation de ce commutateur permet de réduire la perte de puissance. De plus, la diode utilisée est une diode

Schottky car elle peut augmenter l'efficacité du convertisseur Boost en raison de sa faible tension directe et de son temps de récupération rapide.

Driver : il est utilisé pour contrôler le transistor MOSFET par le microcontrôleur. Le circuit d'attaque utilisé dans ce travail est le TC4420 ; ce dernier est fabriqué en CMOS pour une faible consommation et un fonctionnement plus efficace que le circuit d'attaque bipolaire ("TC4420/TC4429 Datasheet," voir l'annexe D).

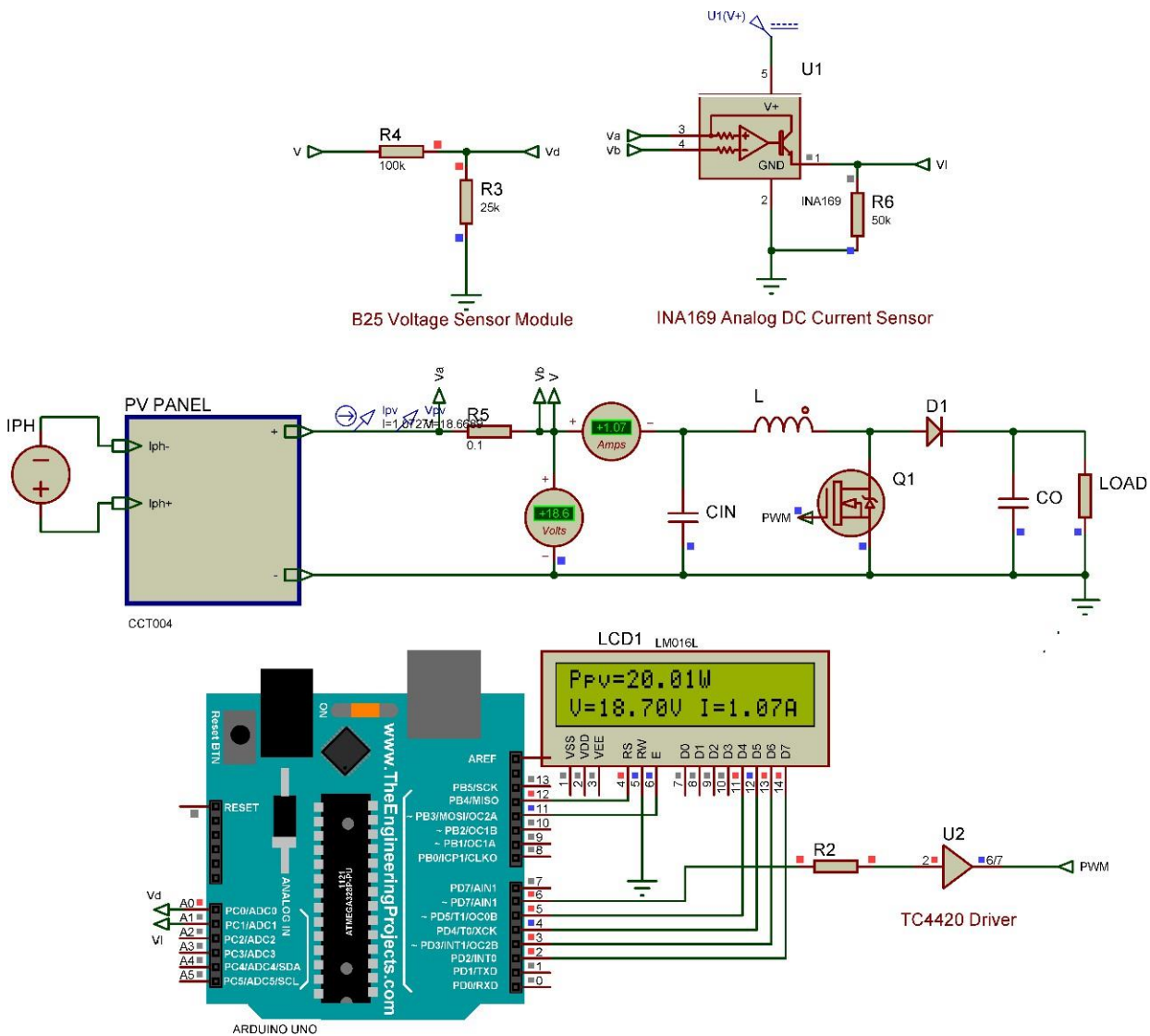


Figure III.6. Système photovoltaïque à faible coût conçu sous Proteus

Comme le montre la figure III.6, pour des raisons de clarté, le modèle de panneau photovoltaïque Proteus est placé dans un "sous-circuit", puis il est relié à la charge par l'intermédiaire du convertisseur Boost. La carte embarquée (Arduino) mesure la tension et le courant PV à l'aide de

capteurs de tension et de courant. Ensuite, l'algorithme MPPT implémenté dans la carte embarquée utilise ces données pour contrôler le convertisseur Boost par l'intermédiaire du Driver (pilote) en utilisant le rapport cyclique calculé pour atteindre le MPP. En outre, la puissance, la tension et le courant photovoltaïques sont affichés sur l'écran LCD.

III.3 Résultats et discussion

III.3.1 Résultat de la simulation

La simulation a été réalisée pour comparer les performances dynamiques et en régime permanent de la méthode INC et de la méthode INC modifiée. En outre, le temps d'exécution des deux méthodes est comparé pour montrer l'avantage de l'élimination de tous les calculs de division dans la méthode modifiée. Par conséquent, la figure III.7(a) présente le temps d'exécution du programme INC conventionnel qui est de $480 \mu\text{s}$ et la figure III.7(b) présente le temps d'exécution de la méthode modifiée qui est de $393 \mu\text{s}$. Par conséquent, l'élimination de tous les calculs de division dans la méthode modifiée rend le processus plus simple, ce qui réduit le traitement en temps réel.

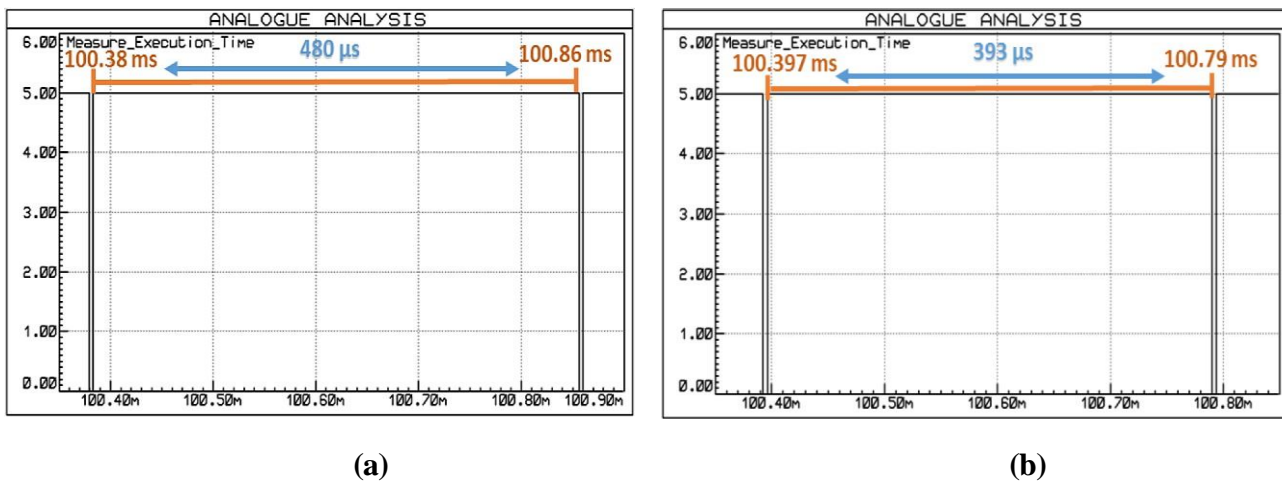


Figure III.7 (a) : Temps d'exécution du programme de la méthode conventionnelle, **(b) :** Temps d'exécution du programme de la méthode modifiée

L'insolation passe brusquement de 1000 W/m^2 à 500 W/m^2 à $t = 1,5 \text{ s}$. La figure III.8(a) présente le résultat de la simulation de l'algorithme conventionnel et la figure III.8(b) présente le résultat de la simulation de l'algorithme modifié. Comme le montrent ces figures, les oscillations en régime permanent sont identiques. En outre, lorsque l'irradiation est modifiée, le temps de réponse est de 0,37 et 0,35 s pour l'algorithme conventionnel et l'algorithme modifié respectivement. Par

conséquent, l'élimination de tous les calculs de division dans la méthode modifiée n'améliore pas considérablement les performances du MPPT avec des oscillations en régime permanent et une vitesse de suivi presque similaire.

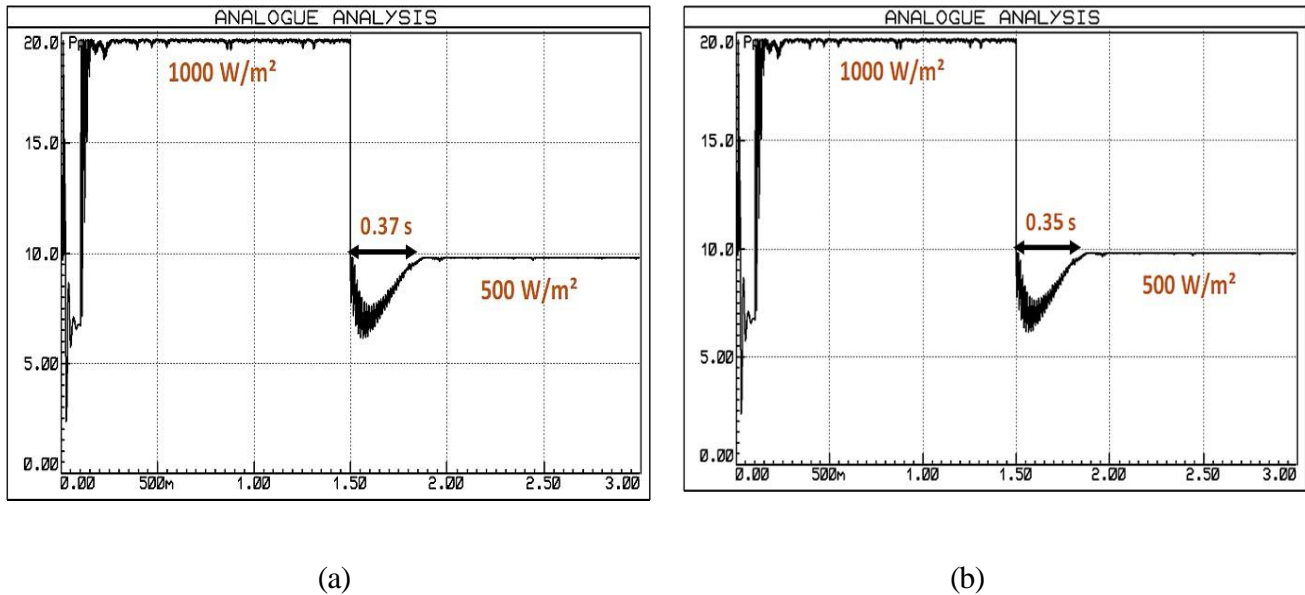


Figure III.8. (a) : Résultat de la simulation de l'algorithme INC conventionnel, **(b) :** Résultat de la simulation de l'algorithme INC modifié.

III.3.2 Résultat expérimental

L'élimination de tous les calculs de division dans l'algorithme modifié simplifie sa construction et rend possible l'utilisation de microcontrôleurs bon marché. Pour le valider, un banc d'essai utilisant des composants matériels réels est construit.

Les deux méthodes sont mises en œuvre dans le microcontrôleur ATmega328. La figure III.9 montre la configuration expérimentale et, comme indiqué, un ordinateur est utilisé pour mesurer la puissance photovoltaïque à l'aide d'un instrument virtuel réalisé dans l'outil LabVIEW. En outre, une diminution brutale de l'irradiation solaire devrait être effectuée pour comparer la réponse dynamique des deux algorithmes. Cependant, les panneaux photovoltaïques ne sont pas en mesure de générer ce profil en raison de données météorologiques environnementales aléatoires. Par conséquent, comme le montre la figure III.9, il est nécessaire de remplacer le panneau photovoltaïque par un émulateur photovoltaïque. Cet émulateur est basé sur une simple alimentation en courant continu et deux résistances comme indiqué par (Ram et al., 2018) et ces composants sont souvent disponibles. Par conséquent, cet émulateur ne nécessite aucune charge financière.

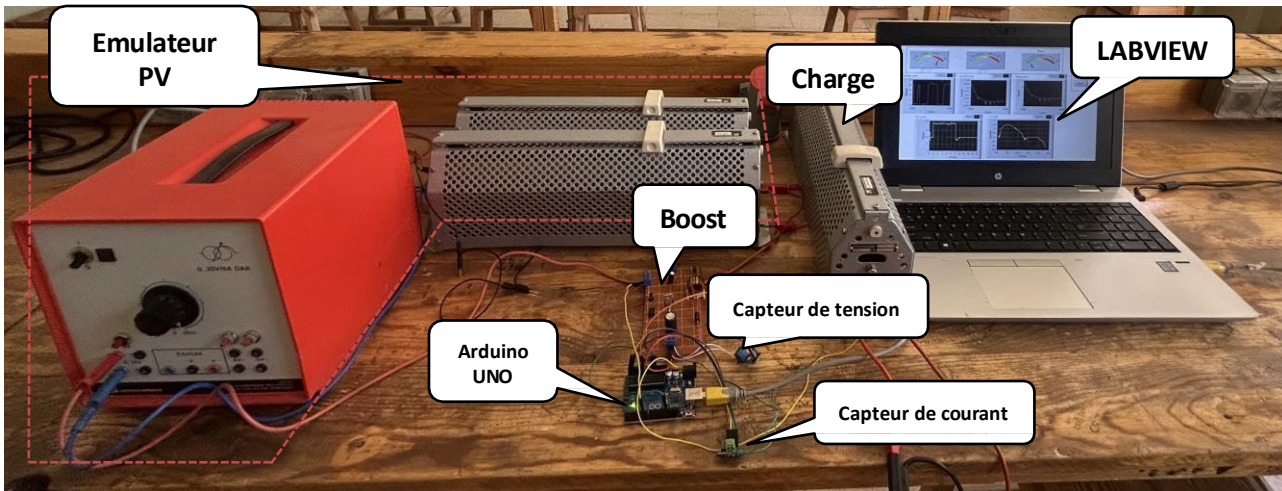
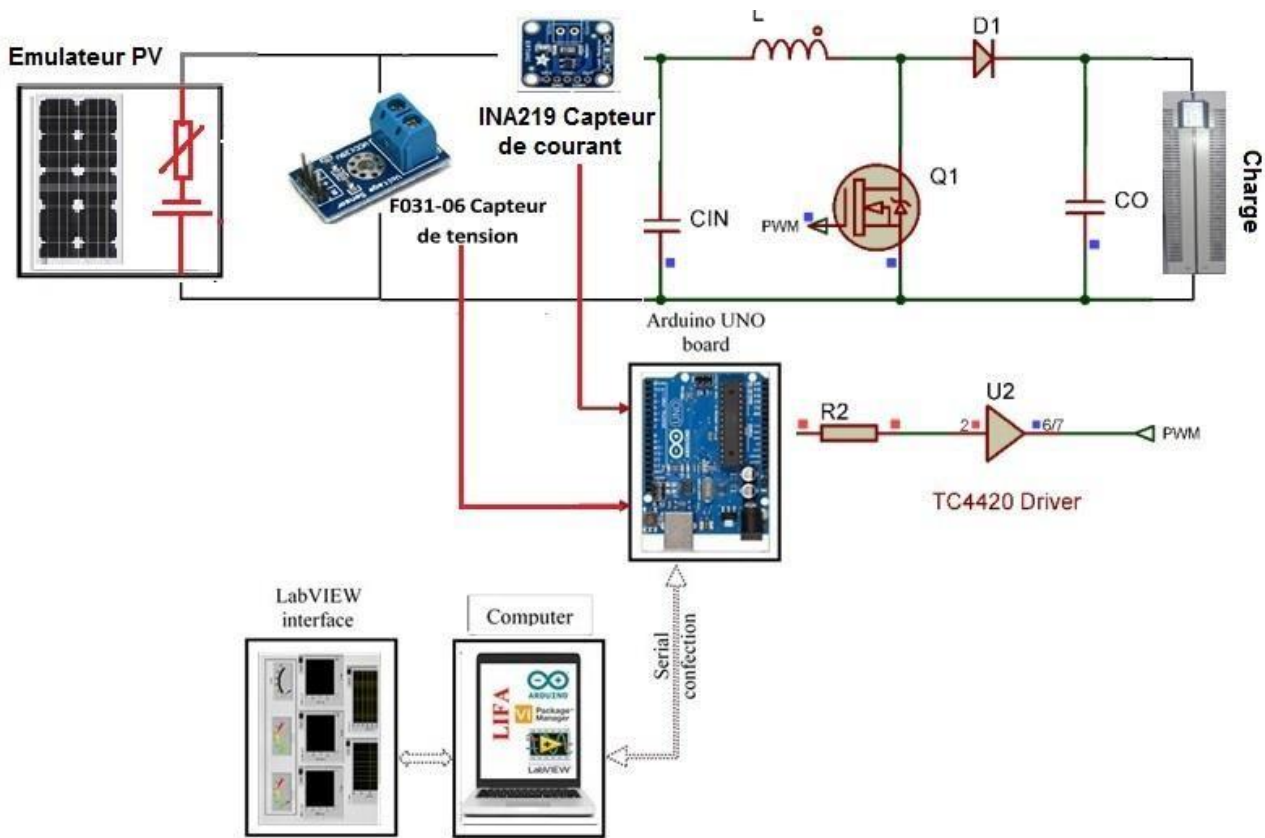


Figure III.9. Dispositif expérimental

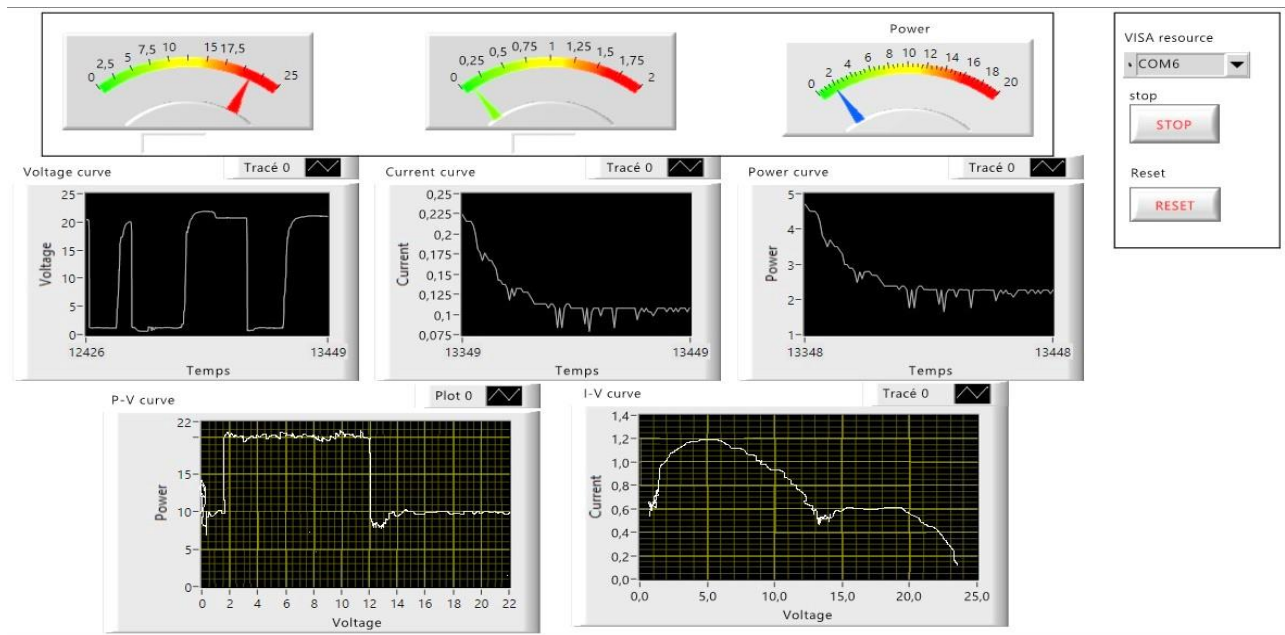
Les figures III.10(a) et III.10(b) illustrent les résultats expérimentaux des deux méthodes face à une variation rapide de l'ensoleillement, passant de 1000 W/m^2 à 500 W/m^2 . Ces résultats ont été agrandis pour une meilleure lisibilité. Comme l'indique la figure III.10(a), la méthode conventionnelle engendre des oscillations autour du point de puissance maximale comparables à celles observées avec la méthode modifiée (figure III.10(b)). Par ailleurs, les deux approches présentent une vitesse de poursuite similaire, avec un temps de réponse identique de $0,36 \text{ s}$.

En résumé, les résultats expérimentaux confirment les simulations réalisées sous Proteus: l'algorithme modifié permet de réduire le temps d'exécution du contrôleur, mais n'apporte pas d'amélioration notable en régime permanent.

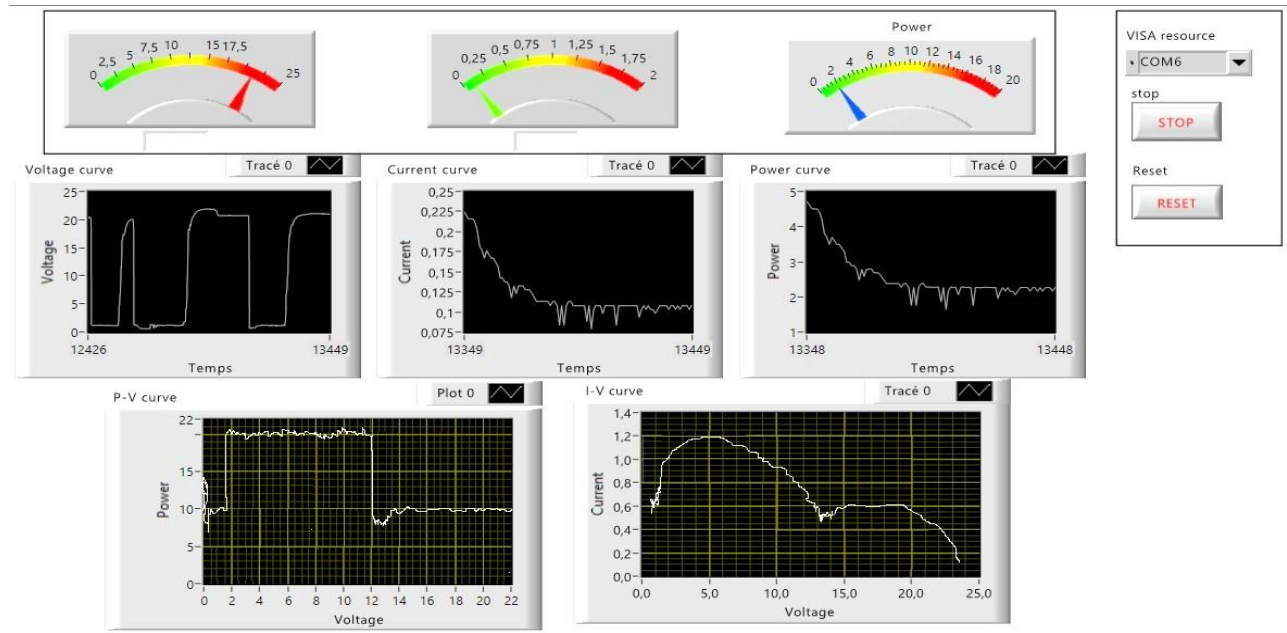
Malgré cela, le travail proposé est comparé, dans le tableau III.1, à plusieurs études expérimentales récentes. Comparé aux systèmes reposant sur des microcontrôleurs à faible coût (Mishra et Sekhar, 2014 ; Soon et Mekhilef, 2015), notre prototype présente une réponse relativement rapide face à des variations soudaines de l'ensoleillement. À l'inverse, les systèmes affichant une réponse encore plus rapide utilisent généralement des contrôleurs plus coûteux, tels que les FPGA ou les DSP (Chavoshian et al., 2014 ; Rahim et al., 2014). Par exemple, Boukenoui et al. (2017) ont opté pour une plateforme dSPACE onéreuse, tout en obtenant un temps de réponse inférieur à celui de notre solution.

De plus, notre système ne présente qu'une légère oscillation en régime permanent et affiche l'un des meilleurs rendements enregistrés, avec une efficacité supérieure à 98 %.

Ainsi, l'algorithme INC modifié, implémenté sur un microcontrôleur économique ATmega328, offre un excellent compromis entre rapidité dynamique et stabilité en régime permanent. Ce système se révèle particulièrement adapté aux applications photovoltaïques portables ou de petite échelle, où la réduction des coûts est cruciale pour une adoption à grande échelle, notamment dans les pays à faibles revenus.



(a)



(b)

Figure III.10 (a) : Résultat expérimental de l'algorithme, (b) : Résultat expérimental de l'algorithme INC conventionnel INC modifié.

Tableau III.1 : Comparaison entre nos résultats avec certains travaux expérimentaux publiés récemment

Année de publication, Article	Puissance du PV Aux STC	Algorithm MPPT	Contrôleur embarqué	Ondulation de puissance	Efficacité	Temps de réponse	Coût du contrôleur	Conditions de l'essai
(Chavoshian et al., 2014)	80 W	Modifié INC	FPGA (Xilinx XC3S400)	2.7 W	98.8 %	2,5 ms	38.5 \$	500 et 900W/m ² , 38°C
(Rahim et al., 2014)	210 W	MPPT adaptatif P&O-flou	DSP TMS320F28335	1 W	95.2 %	20 ms	21.17 \$	200 et 1000W/m ²
(Mishra et Sekhar, 2014)	40 W	TS fuzzy-based INC	dsPIC33FJ128MC802	1W	97.5 %	2 s	4.46 \$	500 et 1000 W/m ²
(Soon et Mekhilef, 2015)	87 W	Modifié INC	Microcontrôleur PIC18f410	1.3 W	99 %	0.275 s	4.26 \$	400 et 1000 W/m ² 25 °C
(Boukenoui et al., 2017)	10 W	FLC MPPT	dSPACE-1103	0.9 W	97.295 %	0.264 s	38 \$	(858 W/m ² 26 °C) et (493 W/m ² 19 °C)
(Boukenoui et al., 2017)	10 W	Amélioration de l'INC	dSPACE-1103	1 W	91.93 %	0.254 s	38 \$	858W/m ² 26 °C) et (493W/m ² 19 °C)
Proposé	20 W	Modifié INC	Atmega 328	0.5 W	98.5%	0.1 s	2 \$	500 et 1000W/m ² , 25 °C

III.4 Conclusion

Un modèle validé de panneau PV Proteus est développé et présenté dans ce travail. Par la suite, ce modèle PV et les composants matériels disponibles dans Proteus peuvent être utilisés comme un simulateur PV à faible coût pour mettre en œuvre et vérifier la performance des algorithmes MPPT lorsque le prototype physique n'est pas disponible. Ce simulateur rend les modifications futures du système beaucoup plus faciles à réaliser.

En outre, un algorithme INC modifié est présenté grâce à l'élimination de tous les calculs de division intervenant dans la méthode INC conventionnelle. Une structure plus simple est obtenue, permettant la mise en œuvre de microcontrôleurs à faible coût.

Conclusion générale et perspectives

Ce projet présente le développement d'un modèle validé de panneau photovoltaïque (PV) sous Proteus. Ce modèle, associé aux composants matériels disponibles dans l'environnement Proteus, permet de créer un simulateur PV à faible coût, idéal pour implémenter et évaluer des algorithmes MPPT en l'absence de prototype physique. Ce simulateur facilite également les modifications futures du système, rendant l'optimisation continue plus accessible.

Par ailleurs, un algorithme INC modifié a été conçu, éliminant tous les calculs de division inhérents à la méthode INC conventionnelle. Cette simplification structurelle permet l'implémentation sur des microcontrôleurs économiques, comme l'ATMega328, tout en réduisant les coûts globaux du système. Les résultats issus des simulations et des essais expérimentaux démontrent que l'algorithme modifié suit efficacement le point de puissance maximale (MPP), avec une réponse relativement rapide et un niveau d'oscillations acceptable en régime permanent, même en cas de variations soudaines.

En conséquence, le système proposé constitue une solution économiquement viable pour les applications de production d'énergie photovoltaïque. Il est également important de noter que les résultats obtenus via la simulation sous Proteus sont en forte concordance avec les résultats expérimentaux. Le banc de test virtuel proposé peut ainsi être considéré comme un outil fiable pour valider d'autres algorithmes MPPT.

Perspectives

La performance et la convergence des algorithmes intelligents reposant sur des approches stochastiques dépendent fortement du réglage précis de leurs paramètres. Il serait donc pertinent, dans le cadre de travaux futurs, d'analyser l'impact de la variation de ces paramètres sur l'efficacité de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques.

Afin de valider les résultats de simulation présentés dans cette thèse, il conviendrait de procéder à des expérimentations pratiques sur banc d'essai, à un niveau de puissance PV réaliste et dans des conditions environnementales réelles. La mise en œuvre des techniques MPPT développées pourrait ainsi être étendue à la réalisation d'un prototype fonctionnel, permettant une évaluation expérimentale comparative.

Par ailleurs, dans la conception du convertisseur boost, l'intégration d'algorithmes métaheuristiques apparaît comme une voie prometteuse pour l'optimisation automatique des paramètres du régulateur PI. Ces techniques permettraient de satisfaire des critères de performance multicritères tels que la minimisation du dépassement, du temps de montée et du temps de stabilisation. Les différents objectifs pourraient être combinés au sein d'une fonction coût globale, à optimiser à l'aide d'approches évolutionnaires ou de swarm intelligence (intelligence collective).

Annexes

Annexe A : Fiche technique réelle des paramètres du module PV choisi

Solar Panel Performance

The TDC-M20-36 solar panels have a rated output of 20 Wp and an impressive efficiency of , making them an excellent choice for homeowners looking to harness the power of the sun and reduce their energy costs.

With a maximum system voltage of and a temperature coefficient of , these solar panels can perform optimally even in challenging weather conditions.

Rated Power	20 Wp
Voltage at Maximum Power VMPP	17.2 V
Current at Maximum Power IMPP	1.16 A
Open Circuit Voltage VOC	21.2 V
Short Circuit Current ISC	1.28 A
Power Tolerance Positive	+ 3 %

Solar Panels Warranty Terms

Output Warranty	12 Years of 90% Output Power, 25 Years of 80% Output Power
Materials Warranty	12 Years

Solar Panels Thermal Ranges

The thermal performance of the TDC-M20-36 solar panels from Yongkang Tendency ensures their reliability and efficiency across varying temperature conditions. These panels are designed to operate optimally within a wide operating temperature range of . Additionally, the temperature coefficients of the panels, such as the Temperature Coefficient of Pmax (), Voc (), and Isc (), play a vital role in determining the panel performance under changing environmental conditions. The carefully engineered thermal attributes of these solar panels contribute to their long-lasting performance and make them an ideal choice for regions with diverse climate patterns

Solar Panel Attributes

Cell Type	Monocrystalline
Cell Count	36
Glass Type	Tempered, High Transmittance, Low Iron
Frame Type	Anodized Aluminium Alloy

Annexe B : Méthodes MPPT direct avec critères abstraits

Les méthodes MPPT abstraites-directes, tout comme les méthodes MPPT physiques-directes, reposent sur la mesure du courant et de la tension pour ajuster dynamiquement le point de fonctionnement. Elles sont qualifiées d'abstraites-directes car elles s'appuient sur des principes théoriques avancés permettant d'atteindre le point de puissance maximale (MPPT) de manière optimisée, en contournant certaines limitations des approches physiques-directes. Toutefois, ces méthodes sont spécialement adaptées à des conditions spécifiques et partagent certaines caractéristiques des méthodes MPPT indirectes.

1. Logique floue

L'algorithme de contrôle basé sur la logique floue est conçu pour suivre le point de puissance maximale (MPP) en exploitant les principes de fuzzification, d'inférence, de règles décisionnelles et de défuzzification. Cet algorithme intègre une certaine incertitude, appelée erreur, qu'il utilise pour ajuster dynamiquement la trajectoire vers le MPP. Il repose sur un ensemble de règles et de fonctions d'appartenance, illustrées à la figure I.6, qui permettent d'inférer la meilleure action à entreprendre. Dans différentes conditions, des règles spécifiques sont activées, facilitant ainsi le suivi du MPP.

La première étape de la mise en œuvre consiste à définir des règles adaptées à un panneau solaire spécifique, puis à optimiser les pondérations associées. Lorsqu'elles sont correctement établies et que le signal d'erreur est bien défini, cette approche permet une convergence rapide vers le MPP tout en limitant les oscillations.

Cependant, un inconvénient majeur de cette méthode réside dans son manque de flexibilité : une logique floue optimisée pour un panneau solaire donné peut ne pas être directement applicable à un autre, nécessitant un réajustement des règles et des paramètres. De plus, avec le vieillissement du panneau solaire et les variations climatiques, l'algorithme peut perdre en efficacité, car il n'est plus parfaitement optimisé pour ces nouvelles conditions.

Les principaux atouts de cette approche incluent sa rapidité à atteindre le MPP, sa capacité à le maintenir sans dépassement excessif et son aptitude à s'adapter dynamiquement aux variations de l'environnement. En revanche, ses inconvénients résident dans la nécessité d'un réglage précis, sa dépendance à l'exactitude du calcul de l'erreur et sa complexité de mise en œuvre ([2, 5, 8, 10, 17, 20]).

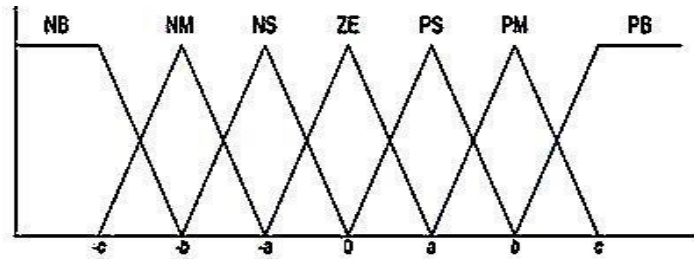


Figure I.6. Exemple de fonctions d'appartenance typiques [5]

2. Réseau neuronal

L'algorithme de contrôle basé sur les réseaux neuronaux repose sur des couches interconnectées de neurones scalaires (Figure I.7) entraînées à identifier et suivre le point de puissance maximale (MPP) en fonction des entrées de tension et de courant. Cette méthode exploite la puissance des mathématiques et la corrélation entre diverses variables abstraites pour localiser précisément le MPP.

L'entraînement du réseau neuronal nécessite d'abord la collecte de données pertinentes sur le comportement du panneau solaire afin d'optimiser son exploitation. Si l'ensemble de données est suffisamment vaste et représentatif, cette approche pourrait surpasser toutes les autres méthodes MPPT. Cependant, l'acquisition de données en quantité suffisante est un défi majeur, nécessitant parfois la simulation de modèles physiques en raison des contraintes de temps. L'algorithme doit apprendre la relation entre les variations du cycle de fonctionnement et les entrées de tension et de courant, ce qui complexifie encore davantage la phase d'apprentissage.

Un inconvénient majeur de cette méthode est son incapacité à s'adapter efficacement à des conditions non couvertes par l'ensemble de formation. Une fois optimisé pour un jeu de données donné, le réseau neuronal devient peu flexible face à des scénarios nouveaux ou imprévus. De plus, sa performance dépend fortement du nombre de couches et de neurones choisis, un paramètre difficile à ajuster pour éviter la sur-modélisation ou la sous-modélisation. Comme il s'agit d'une approche relativement récente, les facteurs d'optimisation restent encore mal maîtrisés et font l'objet de recherches en cours pour mieux comprendre le fonctionnement des réseaux neuronaux appliqués au suivi MPPT.

Les principaux avantages de cette méthode incluent sa capacité à suivre efficacement le MPP dans toutes les conditions d'entraînement, ses faibles oscillations autour du MPP et sa faculté à capturer des dynamiques complexes du panneau solaire. En revanche, ses inconvénients résident dans la nécessité d'un réentraînement fréquent, l'incertitude liée aux processus abstraits sous-jacents et une complexité algorithmique particulièrement élevée ([8, 10, 16, 20]).

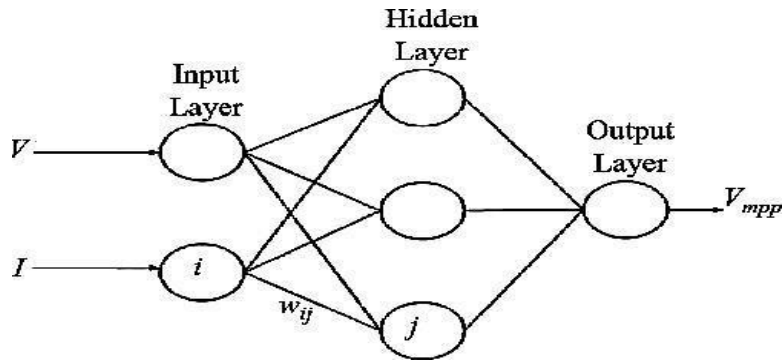


Figure I.7. Exemple d'un réseau neuronal [20]

Annexe C : Tableau récapitulatif des formules utilisées pour le dimensionnement des composants d'un convertisseur **DC/DC Boost** :

Composant	Formule	Remarques
Rapport cyclique (D)	$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$	Hypothèse : convertisseur idéal
Inductance (L)	$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_{sw} \cdot \Delta I_L}$	$\Delta I \approx 20-40\%$ du courant moyen
Condensateur (C)	$C = \frac{I_{out} \cdot D}{f_{sw} \cdot \Delta V_{out}}$	$\Delta V \approx 1-5\%$ de V
Diode	Pas de formule directe	Choisir une diode rapide (Schottky) si possible pour minimiser les pertes
Transistor (Switch)	Pas de formule directe	Choisir un MOSFET à faible $R_{DS(on)}$ pour réduire les pertes en conduction
Puissance de sortie	$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out}$	Sert à estimer le rendement et dimensionner thermiquement
Rendement estimé (η)	$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$	Peut être utilisé pour ajuster le dimensionnement initial

N-channel enhancement mode TrenchMOS™ transistor

IRFZ44N

GENERAL DESCRIPTION

N-channel enhancement mode

standard level field-effect power transistor in a plastic envelope using 'trench' technology. The device features very low on-state resistance and has integral zener diodes giving ESD protection up to 2kV. It is intended for use in switched mode power supplies and general purpose switching applications.

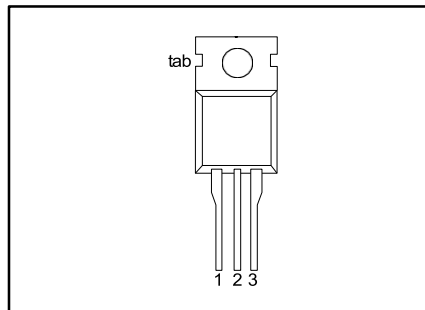
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
V_{DS}	Drain-source voltage	55	V
I_D	Drain current (DC)	49	A
P_{tot}	Total power dissipation	110	W
T_j	Junction temperature	175	°C
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance $V_{GS} = 10\text{ V}$	22	mΩ

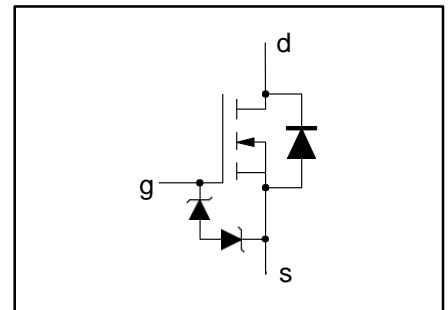
PINNING - TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	gate
2	drain
3	source
tab	drain

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DS}	Drain-source voltage	-	-	55	V
V_{DGR}	Drain-gate voltage	$R_{GS} = 20\text{ k}\Omega$	-	55	V
$\pm V_{GS}$	Gate-source voltage	-	-	20	V
I_D	Drain current (DC)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	49	A
I_D	Drain current (DC)	$T_{mb} = 100\text{ }^\circ\text{C}$	-	35	A
I_{DM}	Drain current (pulse peak value)	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	160	A
P_{tot}	Total power dissipation	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	110	W
T_{stg}, T_j	Storage & operating temperature	-	- 55	175	°C

ESD LIMITING VALUE

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_c	Electrostatic discharge capacitor voltage, all pins	Human body model (100 pF, 1.5 kΩ)	-	2	kV

THERMAL RESISTANCES

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYP.	MAX.	UNIT
--------	-----------	------------	------	------	------

$R_{th\ j-mb}$	Thermal resistance junction to mounting base	-	-	1.4	K/W
$R_{th\ j-a}$	Thermal resistance junction to ambient	in free air	60	-	K/W

6A High-Speed MOSFET Drivers

Features

- Latch-Up Protected: Will Withstand >1.5A Reverse Output Current
- Logic Input Will Withstand Negative Swing Up To 5V
- ESD Protected: 4 kV
- Matched Rise and Fall Times:
 - 25 ns (2500 pF load)
- High Peak Output Current: 6A
- Wide Input Supply Voltage Operating Range:
 - 4.5V to 18V
- High Capacitive Load Drive Capability: 10,000 pF
- Short Delay Time: 55 ns (typ.)
- CMOS/TTL Compatible Input
- Low Supply Current With Logic '1' Input:
 - 450 μ A (typ.)
- Low Output Impedance: 2.5 Ω
- Output Voltage Swing to Within 25 mV of Ground or V_{DD}
- Space-Saving 8-Pin SOIC and 8-Pin 6x5 DFN Packages

General Description

The TC4420/TC4429 are 6A (peak), single-output MOSFET drivers. The TC4429 is an inverting driver (pin-compatible with the TC429), while the TC4420 is a non-inverting driver. These drivers are fabricated in CMOS for lower power and more efficient operation versus bipolar drivers.

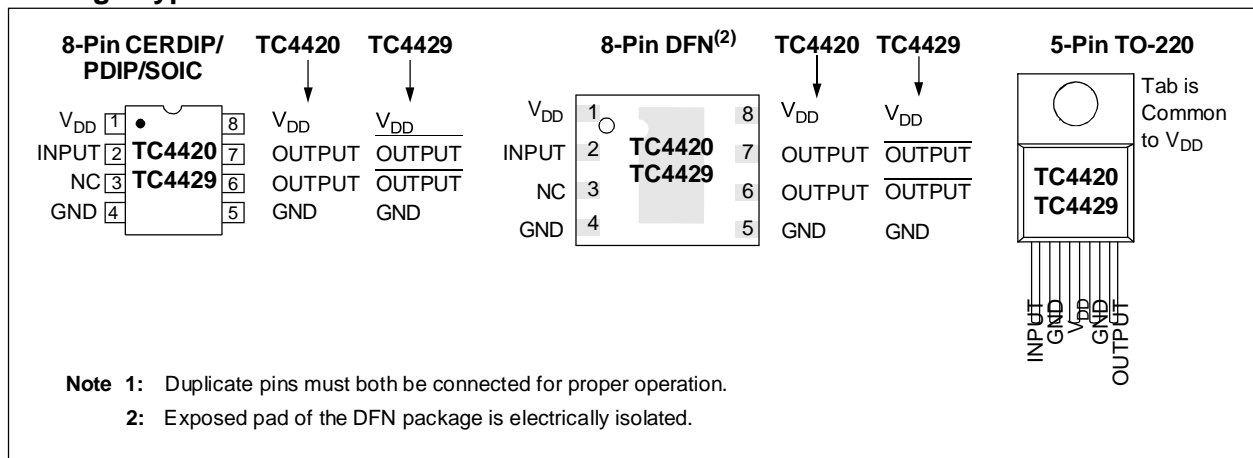
Both devices have TTL/CMOS compatible inputs that can be driven as high as $V_{DD} + 0.3V$ or as low as $-5V$ without upset or damage to the device. This eliminates the need for external level-shifting circuitry and its associated cost and size. The output swing is rail-to-rail, ensuring better drive voltage margin, especially during power-up/power-down sequencing. Propagational delay time is only 55 ns (typ.) and the output rise and fall times are only 25 ns (typ.) into 2500 pF across the usable power supply range.

Unlike other drivers, the TC4420/TC4429 are virtually latch-up proof. They replace three or more discrete components, saving PCB area, parts and improving overall system reliability.

Applications

- Switch-Mode Power Supplies
- Motor Controls
- Pulse Transformer Driver
- Class D Switching Amplifiers

Package Types⁽¹⁾



Références

Bibliographiques

- [1] Bayrak, F., Ertürk, G., Oztop, H.F., 2017. Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *J. Clean. Prod.* 164, 58–69. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.108>
- [2] Koofgar, H.R., 2016. Adaptive robust maximum power point tracking control for perturbed photovoltaic systems with output voltage estimation. *ISA Trans.* 60, 285–293. <https://doi.org/10.1016/J.ISATRA.2015.11.003>
- [3] Li, Q., Zhao, S., Wang, M., Zou, Z., Wang, B., Chen, Q., 2017. An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm based on a PV module four-parameter model for higher efficiency. *Appl. Energy* 195, 523–537. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.03.062>
- [4] Marinić-Kragić, I., Nižetić, S., Grubišić-Čabo, F., Papadopoulos, A.M., 2018. Analysis of flow separation effect in the case of the free-standing photovoltaic panel exposed to various operating conditions. *J. Clean. Prod.* 174, 53–64. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.310>
- [5] Nižetić, S., Arıcı, M., Bilgin, F., Grubišić-Čabo, F., 2018. Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. *J. Clean. Prod.* 170, 1006–1016. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.164>
- [6] Gupta, A., Chauhan, Y.K., Pachauri, R.K., 2016. A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar PV system, *Solar Energy*. Pergamon.
- [7] Rezk, H., Eltamaly, A.M., 2015. A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. *Sol. Energy* 112, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.11.010>
- [8] Ahmed, J., Salam, Z., 2016. A Modified P and O Maximum Power Point Tracking Method with Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency. *IEEE Trans. Sustain. Energy*. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2568043>
- [9] Faramarz, Amiri, M., Zarchi, H.A., 2017. Two-switch flyback inverter employing a current sensorless MPPT and scalar control for low cost solar powered pumps. *IET Renew. Power Gener.* 11, 669–677.
- [10] Kadri, R., Gaubert, J.-P., Ivanovici, T., Champenois, G., Andrei, P., 2012. Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator with partial shadow conditions. *Energy* 42, 57–67. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.10.018>

- [11] Zakzouk, N.E., Abdelsalam, A.K., Helal, A.A., Williams, B.W., 2013. Modified variable-step incremental conductance maximum power point tracking technique for photovoltaic systems, in: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699395>
- [12] Zhou, Z., Holland, P.M., Iqic, P., 2014. MPPT algorithm test on a photovoltaic emulating system constructed by a DC power supply and an indoor solar panel. *Energy Convers. Manag.* 85, 460–469. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.06.007>
- [13] Ram, J.P., Manghani, H., Pillai, D.S., Babu, T.S., Miyatake, M., Rajasekar, N., 2018. Analysis on solar PV emulators: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81, 149–160. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.07.039>
- [14] Chen, Y.-T., Jhang, Y.-C., Liang, R.-H., 2016. A fuzzy-logic based auto-scaling variable step-size MPPT method for PV systems. *Sol. Energy* 126, 53–63. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.01.007>
- [15] Motahhir, S., Chalh, A., El Ghzizal, A., Sebti, S., Derouich, A., 2017a. Modeling of photovoltaic panel by using proteus. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 10, 8–13. <https://doi.org/10.25103/jestr.102.02>
- [16] Rahrah, K., Rekioua, D., Rekioua, T., Bacha, S., 2015. Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 13665–13675. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.04.048>
- [17] Verma, D., Nema, S., Shandilya, A.M., Dash, S.K., 2016. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1018–1034. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.068>
- [18] Gounden, N.A., Ann Peter, S., Nallandula, H., Krithiga, S., 2009. Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renew. Energy* 34, 909–915. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.05.039>
- [19] Lin, W.M., Hong, C.M., Chen, C.H., 2011. Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system. *IEEE Trans. Power Electron.* <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161775>
- [20] Youssef, A., Telbany, M. El, Zekry, A., 2018. Reconfigurable generic FPGA implementation of fuzzy logic controller for MPPT of PV systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 1313–1319. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.093>
- [21] Messalti, S., Harrag, A., Loukriz, A., 2017. A new variable step size neural networks MPPT

- controller: Review, simulation and hardware implementation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 221–233. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.131>
- [22] Husain, M.A., Tariq, A., Hameed, S., Arif, M.S. Bin, Jain, A., 2017. Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems. *Green Energy Environ.* 2, 5–17. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2016.11.001> INA1x9 Datasheet [WWW Document], 2017. URL www.ti.com (accessed 8.1.18).
- [23] Elgendy, M.A., Zahawi, B., Atkinson, D.J., 2012. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications. *IEEE Trans. Sustain. Energy.* <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2168245>
- [24] Kamran, M., Mudassar, M., Fazal, M.R., Asghar, M.U., Bilal, M., Asghar, R., 2018. Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* ACCEPTED MANUSCRIPT <https://doi.org/10.1016/J.JKSUES.2018.04.006>
- [25] Samanta, S, Killi, M, 2015. Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2407854>
- [26] Khaled, M., Ali, H., Abd-El Sattar, M., Elbaset, A.A., 2016. Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller. *IET Renew. Power Gener.* <https://doi.org/10.1049/ietrpg.2015.0309>
- [27] Motahhir, S., El Hammoumi, A., El Ghzizal, A., 2018a. Photovoltaic system with quantitative comparative between an improved MPPT and existing INC and P&O methods under fast varying of solar irradiation. *Energy Reports* 4, 341–350. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2018.04.003>
- [28] Motahhir, S., Ghzizal, A. El, Sebti, S., Derouich, A., 2017b. MIL and SIL and PIL tests for MPPT algorithm. *Cogent Eng.* 4. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1378475>
- [29] Abdelsalam, A.K., Massoud, A.M., Ahmed, S., Enjeti, P.N., 2011. High-performance adaptive Perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2106221>
- [30] Femia, N., Granozio, D., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., 2007. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* <https://doi.org/10.1109/TAES.2007.4383584>

- [31] Piegari, L., Rizzo, R., 2010. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *IET Renew. Power Gener.* <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2009.0006>
- [32] Ishaque, K., Salam, Z., Lauss, G., 2014. The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions. *Appl. Energy* 119, 228–236. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.12.054>
- [33] Mishra, S., Sekhar, P.C., 2014. Takagi–Sugeno fuzzy-based incremental conductance algorithm for maximum power point tracking of a photovoltaic generating system. *IET Renew. Power Gener.* <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2013.0219>
- [34] Radjai, T., Rahmani, L., Mekhilef, S., Gaubert, J.P., 2014. Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE. *Sol. Energy* 110, 325–337. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.09.014>
- [35] Soon, T.K., Mekhilef, S., 2014. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level. *Sol. Energy* 101, 333–342. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.01.003>
- [36] Disponible: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. [Consulté le 24 mars 2025].
- [37] IRENA, Production mondiale d'électricité solaire photovoltaïque hors réseau. 2019. [En ligne]. Disponible: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. [Consulté le: 24-mars-2025].
- [38] L. Sun, D. Lubkeman et M. Baran, " Residential DC House Cost Benefit Analysis ", 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, 2018, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1109/TDC.2018.8440231>.
- [39] J. Umuhoza, Y. Zhang, S. Zhao et H. A. Mantooh, " An adaptive control strategy for power balance and the intermittency mitigation in battery-PV energy system at residential DC microgrid level ", 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 1341-1345, <https://doi.org/10.1109/APEC.2017.7930870>.
- [40] T. Taufik et M. Taufik, " The DC House Project : Promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables pour l'électrification rurale ", 2012 International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Bali, 2012, pp. 1-4.
- [41] "Activité : Caractéristiques des cellules solaires photovoltaïques", Wiki.analog.com, 2020.

- [En ligne]. Disponible : <https://wiki.analog.com/university/courses/eps/photovoltaic>. [Consulté le 02- Jul- 2024].
- [42] Y. Zhang, S. Gao et T. Gu, " Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model ", *Solar Energy*, vol. 144, pp. 349-355, 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.043>.
- [43] P. Shaw, " Modelling and analysis of an analogue MPPT-based PV battery charging system utilizing dc-dc boost converter ", in *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 11, pp. 1958-1967, 19 8 2019, <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6273>.
- [44] T. Barcelo, "Techniques to Maximize Solar Panel Power Output", Analog.com, 2020. [En ligne].
- [45] Disponible : <https://www.analog.com/fr/technical-articles/techniques-to-maximize-solar-panel-power-output.html>. [Consulté le 10 juillet 2024].
- [46] M. Kamran, M. Mudassar, M. Fazal, M. Asghar, M. Bilal et R. Asghar, " Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system ", *Journal of King Saud University -Engineering Sciences*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.006>.
- [47] C. Hua et Y. Chen, " Modified perturb and observe MPPT with zero oscillation in steady-state for PV systems under partial shaded conditions ", 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 2017. <https://doi.org/10.1109/cencon.2017.8262448>.
- [48] M. Elgendy, B. Zahawi et D. Atkinson, " Assessment of the Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm ", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no 1, p. 108-117, 2013. <https://doi.org/10.1109/tste.2012.2202698>,
- [49] K. Visweswara, " An Investigation of Incremental Conductance based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System ", *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 11-20, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.245>
- [50] P. Mohanty, G. Bhuvaneshwari, R. Balasubramanian et N. Dhaliwal, " MATLAB based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various operating conditions ", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 581-593, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.001>
- [51] Gow, J.A., Manning, C.D., 1999. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proc. - Electr. Power Appl.* <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19990116>

- [52] Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y., Fuyuki, T., 2007. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91, 1222–1227. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2007.04.009>
- [53] Chaibi, Y., Salhi, M., El-jouni, A., Essadki, A., 2018. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. *Sol. Energy* 163, 376–386. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.02.017>
- [54] Hammoumi, A.E., Motahhir, S., Chalh, A., Ghzizal, A.E., Derouich, A., 2018. Real-time virtual instrumentation of Arduino and LabVIEW based PV panel characteristics, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/161/1/012019>
- [55] Lin, C.-H., Huang, C.-H., Du, Y.-C., Chen, J.-L., 2011. Maximum photovoltaic power tracking for the PV array using the fractional-order incremental conductance method. *Appl. Energy* 88, 4840–4847. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.06.024>
- [56] Goldberg, D., 1991. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic. *ACM Comput. Surv.* <https://doi.org/10.1145/103162.103163>

عُضِّضَ رَأً انجحت رُوْخَبُ " بحسبُ" نظُّبِح كَسْطَبُح (PV) بِخَصْمَبُ" نَزْصِيْ اَطْعُ انطَبُح انشَسُح، بِذَعِبُح نَحْباصِبُح بِجَسَطُح نَزْرَجُح فَطُح انقَدَسُح انعطُ (MPPT)، ثَنَفَ رَحَقُ كَبْءُح غَبِقُح عِبُح، اَسْرَدِبُح دَبُكُح سَعُح، زُكْفُح رَفْرُح بِخُفُح. رِي رَطْبُح رُوْجُح نَهْذُ انكَسْطُحُ ثَبَسْرُخَاوُ كِدُ SPICE طُّبُحُ ثَبُح انْحَبُكُح Proteus، رُوْءُح عَهْجُح انزَحَقُح يِ صَحْرُحُ يِ خَلَالُ رَدْبَسَ بِخَرْجُشُح. رَقْرُشْدُ انسَاَسُح خَباصِبُح بِعَدْنُح نَطْسُفُح انزَمِ انزِصَاْذِي (INC) نَزْفُه انعء انصِبُح يِ خَلَالُ رَقْهَصُ عَدُ عَهْدُ انقَسُح انشَبُح بِقَسُحُ ثَبُحْباصِبُح انزَفِيْحُ. رِي رَفْرُح كَهْزُبُ انْحاصِبُحُ، انزَفِيْحُ انْعَدْنُح، عَهِي نَجُح Arduino Uno بِخُفُح انزَكْفُحُ ثَبَسْرُخَاوُ انزُجُح انْحَبُكُح نَهْذُ انكَسْطُحُ. اَطْسُدُ انزَبُح انزَسُحُ اُ انْحاصِبُح انْعَدْنُح رَحَقُ صِبُ" اسْرَدِبُحُ" فَصْبُ" جُهْ 6335 ثَبُحُ، رَزْرُثُ" بِعَزْدُ" فَ انْحَبُح انسَرْقُشُح، كُفْءُح رَحْمُ رِصْمُ اِنِي رَنكُ، رِي انزَحَقُح يِ فَعِبُح انظَبُح انقَرُشْدُ يِ خَلَالُ بِصُح اِخْرَجِبُح بِبِدُح رِعَزْدُ عَهِي انزَحُكُ انذَقُح بِخُفُح انزَكْفُحُ ATMega328 انبُحُح فَ نَجُح Arduino Uno. قُدُ اُحْشُدُ بِقَسُحُ لَأءَا انظَبُح بِع دَساسِبُح رَدْسُجُحُ حَدْنُح، بِبُ اَكْذُ كَبْءُح انزَقُحُ خُدَا القَرْصِبُدُح.

الكلمات المفتاحية: Arduino Uno؛ بخُفُح انزَكْفُح؛ حَسِبُذُ انقَسُح انشَبُح؛ انزَمِ الإطْبُفُ انْعَلُ؛ انْحَبُح انكَسْطُحُ؛

Proteus

Résumé

Ce projet présente un modèle photovoltaïque (PV) optimisé pour la conception de systèmes solaires intégrant un algorithme MPPT simplifié, visant à maximiser le rendement énergétique, à améliorer la rapidité de réponse dynamique et à réduire les coûts. Dans un premier temps, un modèle de panneau PV est développé à l'aide du code SPICE dans l'environnement de simulation Proteus3 Ce modèle est ensuite vérifié et validé à travers une plateforme expérimentale. Un algorithme modifié de conductance incrémentale (INC) est ensuite proposé, permettant de diminuer significativement le nombre de divisions mathématiques nécessaires par rapport à la méthode INC conventionnelle. Les deux algorithmes, conventionnel et modifié, sont implémentés sur une carte Arduino Uno à faible coût, utilisant le modèle simulé du panneau PV. Les résultats expérimentaux mettent en évidence les performances satisfaisantes de l'approche modifiée : un temps de réponse court de 0,35 seconde, une oscillation modérée en régime permanent, et une efficacité atteignant 58,5 % Pour valider davantage la solution proposée, un banc d'essai physique a été réalisé à l'aide du microcontrôleur économique ATmega328 intégré à la carte Arduino Uno3 De plus, les performances obtenues ont été comparées à celles de plusieurs études expérimentales récentes. L'ensemble du dispositif permet une réduction notable des coûts, confirmant la viabilité économique et la compétitivité du contrôleur développé.

Mots clés : Arduino Uno ; faible coût ; calculs mathématiques de division ; conductance incrémentale modifiée ; panneau PV ; Proteus.

Abstract

This study presents an optimized photovoltaic (PV) model for the design of solar energy systems integrating a simplified Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm, with the objectives of achieving high energy efficiency, fast dynamic response, and low implementation cost. A PV panel model was initially developed using SPICE code within the Proteus simulation environment and subsequently validated through experimental testing. A modified Incremental Conductance (INC) algorithm is proposed to reduce the computational burden by minimizing the number of mathematical divisions compared to the conventional INC method. Both algorithms were implemented on a low-cost Arduino Uno board using the simulated PV model. Experimental results demonstrate that the modified algorithm achieves a fast response time of 0.35 seconds, moderate steady-state oscillations, and a conversion efficiency of 98.5%. Furthermore, the proposed system was validated via a hardware test bench employing the low-cost ATmega328 microcontroller embedded in the Arduino Uno. The system's performance was benchmarked against recent experimental studies, confirming both its technical effectiveness and economic viability.

Keywords: Arduino Uno; low cost; mathematical division calculations; modified incremental conductance; PV panel; Proteus.