



THESE

Présentée à

L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax

En vue de l'obtention du

DOCTORAT

Dans la discipline *Génie Electrique*

Par

Ferdaous MASMUDI

(Master Conversion Electrique et Energie Renouvelable)

Optimisation de Systèmes Photovoltaïques Autonomes

Soutenue le 31 décembre 2016, devant le jury composé de :

M. Abdessatar GUERMAZI (Professeur)	Président
M. Mohamed Nejb MANSOURI (Maître de conférences)	Rapporteur
M. Abderrazak YANGUI (Maître de conférences)	Rapporteur
M. Mohamed Ben Ali KAMMOUN (Professeur)	Examineur
M. Nabil DERBEL (Professeur)	Examineur
M. Hafedh TRABELSI (Professeur)	Directeur de Thèse

Université de Sfax
École Nationale d'Ingénieurs de Sfax *ENIS*
École Doctorale Sciences et Technologies *EDST*
Control and Energy Management Laboratory *CEMLab*
ENIS, Route de Soukra km 2.5, BP. 1173 - 3038, Sfax, Tunisie
Tel : +216 74 274 418
Fax : +216 74 275 595
<http://www.enis.rnu.tn>
<http://www.enis.rnu.tn/EDST/index1.php>
<http://www.cem-lab.info/>
https://www.researchgate.net/profile/Ferdaous_Masmoudi
Copyright © Ferdaous MASMOUDI, 2016
N° d'ordre : 69-2016

© Ferdaous Masmoudi, 2016 – All rights reserved

Dédicace

À mon mari *Zied* et mon fils *Adem*,

à mes parents *Younès* et *Hajer*,

à mes beaux-parents *Abd El Waheb* et *Ratiba*,

à ma sœur *Siwar* et mon frère *Firas*,

aux familles *Masmoudi* & *Loukil*

et à tous ceux qui me sont chers...

© Ferdaous Masmoudi, 2016. All rights reserved

Avant-Propos

Mon travail de thèse intitulé “Optimisation de Systèmes Photovoltaïques Autonomes” s’est déroulé dans le cadre de l’École Doctorale Sciences et Technologies *EDST*, au sein du laboratoire Control and Energy Management Laboratory *CEM-LAB* de l’École Nationale d’Ingénieurs de Sfax *ENIS*. Je remercie le directeur du CEM-LAB, **Mohamed CHTOUROU** pour la confiance qu’il m’a accordée.

Je suis très sensible à l’honneur que m’a fait monsieur **Abdessatar GUERMAZI**, Professeur de l’ENIS, en acceptant de présider le jury de ma soutenance de thèse. Je lui exprime tous mes remerciements pour l’intérêt porté à ce travail.

Ma gratitude et mes sincères remerciements s’adressent à Monsieur **Mohamed Nejib MANSOURI**, Maître de conférences à l’École Nationale d’Ingénieurs de Monastir et PDG de l’ECO Park de BORJ CEDRIA, d’avoir accepté de juger ce travail et de participer comme rapporteur.

Je suis très honorée que le Professeur **Abderrazak YANGUI**, Maître de conférences à l’ENIS, ait accepté la charge de rapporter et juger ce travail. Je le remercie chaleureusement pour son dévouement.

J’exprime mes sincères remerciements au Professeur **Mohamed Ben Ali Kammoun** de l’ENIS d’avoir accepté de participer à mon jury comme examinateur. Je tiens à lui exprimer mes sentiments les plus respectueux.

Je tiens à remercier le Professeur **Nabil DERBEL** de l’ENIS pour l’honneur qu’il me fait d’avoir accepté d’examiner cette thèse. Qu’il trouve ici l’expression de ma profonde reconnaissance.

Le projet de recherche a été dirigé par Monsieur **Hafedh TRABELSI**, Professeur de l'ENIS, je voudrais lui témoigner toute ma reconnaissance. Je lui exprime mes vifs remerciements pour le soutien professionnel constant durant l'élaboration de ce travail. Ses conseils, ses compétences scientifiques et humaines, son ouverture d'esprit, l'enthousiasme qu'il a su me communiquer ainsi que la confiance qu'il m'a témoignée m'ont permis d'accomplir ma tâche dans les meilleures conditions.

Je voudrais spécialement remercier Madame **Fatma BEN SALEM**, Maître de conférences à l'ISGIS, pour la qualité de sa collaboration, ses conseils, sa qualité humaine et pour la façon amicale avec laquelle elle a soutenu ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Samir AYEDI**, technicien du laboratoire d'électrotechnique, pour l'aide et le soutien qu'il m'a apportés. Je remercie également l'ensemble des cadres et des techniciens du département de Génie électrique de l'ENIS.

Je remercie aussi tous les doctorants, **Rabeb ABID**, **Jihen LOUKIL**, **Faten AYADI**, **Nesrine BOUJELBEN** et le docteur **Fatma ABDELHEDI**, avec qui j'ai eu l'occasion de partager et d'échanger de nombreuses idées.

À toutes les personnes (liste trop longue) appartenant ou non à la famille du CEM-Lab, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, trouvez ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Les erreurs et les incohérences demeurent les miens.

Sfax, le 31 décembre 2016

Ferdaous MASMUDI

À propos du manuscrit

Cette œuvre vise à couvrir les aspects pertinents permettant d'obtenir une vue d'ensemble des systèmes photovoltaïques autonomes, avec un accent particulier sur les méthodes d'optimisation du rendement des chaînes de conversion photovoltaïques.

Dans un premier temps, une introduction générale présente la situation globale des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie photovoltaïque, dans le monde et en Tunisie. Elle est suivie de la description générale de la problématique de cette recherche. Ensuite, une partie importante est consacrée à la présentation de l'état de l'art relatif aux fondements de la conversion photoélectrique et aux modes de fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque.

Les travaux présentés dans cette thèse s'articulent autour de trois axes principaux. Le premier axe est consacré à l'étude du générateur photovoltaïque. Des modèles mathématiques de la cellule solaire photovoltaïque ont été développés et identifiés à l'aide d'algorithmes d'estimation des paramètres internes pour chaque modèle, suivis d'une analyse comparative des performances des différents modèles. Cette étude est complétée par la modélisation des associations de cellules solaires permettant la formation de modules et de panneaux photovoltaïques. Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque ont été validés par des essais expérimentaux réalisés sur une cellule solaire monocristalline typique ainsi que sur un module solaire monocristallin d'une puissance de 50 W.

La deuxième partie est consacrée à l'optimisation du rendement du module photovoltaïque par l'amélioration de son câblage et par l'optimisation de son orientation par rapport au rayonnement solaire. Dans ce cadre, une étude détaillée d'un système de poursuite de la trajectoire solaire, appelé « suiveur solaire » ou « traqueur solaire », motorisé sur deux axes et commandé par un microcontrôleur, est présentée. Ce système est conçu pour supporter un module solaire de 50 W et le déplacer afin de maintenir une orientation orthogonale par rapport au rayonnement solaire, permettant ainsi d'exploiter parfaitement le gisement solaire disponible dans l'environnement.

La troisième partie est consacrée à la conception et au dimensionnement du régulateur de charge. Celui-ci intègre l'étage de conversion continu-continu (hacheur), assurant l'adaptation entre la source et la charge, la commande MPPT permettant l'optimisation du rendement du système de conversion, ainsi qu'un système de supervision de la batterie destiné à améliorer les performances du système de stockage.

Enfin, une partie significative de cette thèse est consacrée aux travaux expérimentaux relatifs au système conçu. La réalisation pratique a permis de valider les études théoriques et les résultats de simulation à travers la mise en œuvre d'un prototype d'une chaîne d'alimentation photovoltaïque optimisée par un régulateur de charge et un suiveur solaire.

Table des matières

Introduction	1
1 Généralités sur les énergies renouvelables	1
1.1 Aperçu sur l'état actuel de l'énergie renouvelable photovoltaïque dans le monde et en Tunisie	2
2 Motivations et Objectifs	5
2.1 Motivations	5
2.2 Objectifs	6
2.3 Limites du projet	7
2.4 Contributions principales	7
3 Structure de ce mémoire	8
3.1 Outils utilisés	9
3.2 Liste des publications issues de cette thèse	10
I Le Générateur Photovoltaïque : Présentations, Structures et Modes d'opérations	11
I.1 Introduction	12
I.2 Aperçu sur la cellule solaire photovoltaïque	12
I.2.1 Histoire de la cellule solaire	12
I.2.2 Technologies de la cellule solaire	14
I.2.3 Domaines d'applications	16
I.3 Structure et modes d'opération de la cellule solaire	18

I.3.1	Structure de la cellule solaire	19
I.3.2	Modes d'opérations de la jonction solaire	20
I.3.3	Pertes électriques dans la cellule solaire	24
I.4	Paramètres et caractéristiques d'une cellule solaire	25
I.4.1	Systèmes de référence et de fonctionnement	25
I.4.2	Paramètres électriques de la cellule solaire	26
I.4.3	Conditions de tests et données du fabricant	28
I.5	Effet de l'éclairement et de la température sur la performance de la cellule solaire	30
I.5.1	Effet de l'éclairement	31
I.5.2	Effet de la température	31
I.6	Conclusion	32
II	Modélisations de la cellule solaire photovoltaïque	33
II.1	Introduction	34
II.2	Méthodes et expérimentations	35
II.2.1	Principe de la procédure d'identification des paramètres internes	35
II.2.2	Principe de la procédure d'ajustement des courbes	37
II.2.3	Mesures Expérimentales de la cellule solaire	38
II.3	Modèle Idéal	40
II.3.1	Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle idéal	40
II.3.2	Résultats d'identification des paramètres du modèle idéal dans l'STC	42
II.3.3	Effet de la température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle idéal	43
II.4	Modèle à une résistance série : modèle simplifié à une diode	44
II.4.1	Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle simplifié	46
II.4.2	Résultats d'identification des paramètres du modèle à une résistance série dans l'STC	48

II.4.3	Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une résistance série	49
II.5	Modèle à une diode	50
II.5.1	Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle à une diode	51
II.5.2	Résultats de l'identification des paramètres du modèle à une diode dans l'STC	54
II.5.3	Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une diode	55
II.6	Modèle à deux diodes	55
II.6.1	Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle à deux diodes	57
II.6.2	Résultats d'identification des paramètres du modèle à deux diodes dans l'STC	61
II.6.3	Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à deux diodes	62
II.7	Modèles à diodes multiples : cas de trois diodes	62
II.7.1	Recherche des paramètres inconnus par algorithme génétique	65
II.7.2	Recherche des paramètres inconnus par l'algorithme du gradient évolué .	65
II.7.3	Résultats de recherche des paramètres du modèle à trois diodes dans l'STC	66
II.7.4	Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une diode	68
II.8	Résultats de simulation et validation expérimentale	70
II.8.1	Comparaison des modèles de la cellule solaire dans l'STC	70
II.8.2	Comparaison des modèles de la cellule solaire hors de l'STC	72
II.8.3	Évaluation générale des modèles de la cellule solaire	72
II.8.4	Effet de la température et de l'éclairement sur le rendement de la cellule solaire	73

II.9 Conclusion	75
III Association et Exploitation Optimales de Cellules et Modules Solaires	76
III.1 Introduction	77
III.2 Associations des cellules et modules solaires photovoltaïques	78
III.2.1 Composition d'un module solaire PV	79
III.2.2 Association en série des cellules solaires	82
III.2.3 Association en parallèle des cellules solaires	83
III.2.4 Association mixte des cellules solaires	84
III.2.5 Caractérisation du module solaire monocristallin 50W utilisé	85
III.3 Problèmes engendrant les pertes du module PV	86
III.3.1 Ombrage uniforme et partiel	87
III.3.2 Pertes d'un module solaire par l'effet de Maladaptation	89
III.3.3 Rôle de la diode "Bypass"	92
III.3.4 Simulation de l'effet de l'ombrage total et partiel d'un module solaire photovoltaïque	93
III.4 Gisement solaire et poursuite de la trajectoire du soleil	95
III.4.1 Gisement solaire en Tunisie et à Sfax	96
III.4.2 Mouvement et positionnement du soleil	97
III.4.3 Irradiance solaire sur plan horizontal et incliné	100
III.4.4 Simulation du rendement des suiveurs solaires	103
III.5 Conception et réalisation du suiveur solaire à deux axes	105
III.5.1 Description de la structure mécanique	106
III.5.2 Description du système électrique	107
III.5.3 Algorithme de programmation du suiveur solaire	107
III.6 conclusion	110

IV Conception Optimale du Système de Conversion et de Stockage Photovoltaïque Autonome	111
IV.1 Introduction	112
IV.2 Principe de l'optimisation de la puissance photovoltaïque	112
IV.3 Caractérisation de la source PV et de la charge	115
IV.3.1 Caractérisation de la source PV	116
IV.3.2 Caractérisation de la charge	117
IV.4 Caractérisation et observation du système de stockage	119
IV.4.1 Présentation de l'élément de stockage :	119
IV.4.2 Présentation du modèle de la batterie et identification de ses paramètres .	121
IV.4.3 Système d'observation de la batterie :	126
IV.5 Conception, Modélisation et Dimensionnement du convertisseur DC-DC	126
IV.5.1 Dimensionnement optimal des convertisseurs de puissances	127
IV.5.2 Conception de la chaîne de conversion PV par hacheur Boost	132
IV.6 Conception et modélisation de la commande MPPT	139
IV.7 Principe de la stratégie de commande MPPT	139
IV.7.1 La commande MPPT de type P&O	140
IV.7.2 Simulation de la chaîne de conversion PV commandée par la stratégie MPPT de type P&O	142
IV.8 Conclusion	147
V Travaux et Résultats Expérimentaux	148
V.1 Introduction	149
V.2 Système suiveur solaire à deux axes	150
V.2.1 Acquisition et conditionnement des données en temps réel	150
V.2.2 Installation du système et résultats expérimentaux	151
V.3 Système de régulation de charge	151

V.3.1	Conception et réalisation du circuit imprimé	152
V.3.2	Tests expérimentaux	154
V.4	Conclusion	157
Conclusion		158
1	Résumé des travaux	158
2	Principaux Résultats	159
3	Perspectives	160

© Ferdaous Masmoudi, 2016 – All rights reserved

Liste des tableaux

1	Production d'énergie renouvelable en Tunisie en 2013.[5]	4
I.1	Frise chronologique du développement de la cellule solaire.	13
I.2	Les diverses applications de l'énergie PV.[3, 5, 70]	18
I.3	Spécifications des Conditions de Test Standard	28
I.4	Spécifications des Conditions d'Opération Nominale	28
I.5	Spécifications électriques de la cellule solaire "JAC M5SF-2" dans l'STC	29
II.1	Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle idéal.	42
II.2	Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle à une résistance série.	49
II.3	Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC' par le modèle à une diode.	54
II.4	Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC' par le modèle à deux diode.	61
II.5	Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle à triple diodes.	67
II.6	comparaison entre les caractéristiques de simulation et la caractéristique de référence	72
II.7	Évaluation des modèles de la cellule solaire monocristalline	73
III.1	Spécifications techniques du module solaire 50W dans l'STC	86
III.2	Exemple d'évaluation du facteur d'ombrage	94

III.3 comparaison entre les différents types d'orientations d'un module solaire	104
IV.1 Evaluation de R_m au voisinage de l'MPP du module solaire 50W à l'STC ($G = 1000W/m^2$ et $T = 25^\circ C$).	117
IV.2 Comparaison entre les caractéristiques des diverses technologies des batteries connues [96].	120
IV.3 Spécifications électriques de la batterie Plomb-Acide de référence "Power Kingdom PS7-12".	123
IV.4 Résultats des méthodes d'extraction de paramètres de la batterie Plomb-Acide de référence "Power Kingdom PS7-12".	125
IV.5 Schémas électriques des topologies des convertisseurs considérées. [104]	128
IV.6 Matrices d'états des topologies des convertisseurs considérées [104].	129
IV.7 Expressions mathématiques des paramètres des différentes topologies des convertisseurs considérés [104].	130
IV.8 Calcul numérique des paramètres des différentes topologies de convertisseurs étudiées.	131

© Ferdaous Masmoudi, 2016 - All rights reserved

Table des figures

1	Évolution de l'énergie PV dans le monde. (a) puissance annuelle installée (GW). (b) puissance cumulée (GW).[3] IEA-PVPS : les pays membres du programme PVPS de l'Agence internationale d'énergie IEA.	3
2	Productions globales des modules solaires PV dans le monde en 2014 (48 961 MW). (a) Par pays. (b) Par technologie. (c) Par fabricant.[4]	3
3	Conception Robot Mobile Autonome. (a) Dessin compact. (b) Dessin éclaté. . .	6
4	Schéma synoptique du système d'alimentation en énergie solaire PV.	6
I.1	Développement de la qualité de la jonction en Silicium.	14
I.2	Développement des records des rendements des cellules solaires lors des 40 der- nières années (source : NREL).	15
I.3	Architecture des différents types de chaînes PV : (a) Couplage Direct. (b) Sys- tème Autonome. (c) Système connecté au réseau. (d) Système hybride.	17
I.4	Section d'une cellule solaire typique. (a) Schéma en perspective. (b) Coupe trans- versale. [7]	19
I.5	Pertes électriques dans la cellule solaire.	24
I.6	Caractéristiques ($I - V$) en quatre quadrants de la cellule solaire suivant le système de référence. (a) Système de référence Charge. (b) Système de référence Générateur.	25
I.7	Caractéristique d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement.	26
I.8	Caractéristique électrique ($I - V$) du fabricant de la cellule solaire "JAC M5SF-2" dans l'STC.	30

I.9	Caractéristiques électriques ($I - V$) de la cellule solaire "JAC M5SF-2" sous plusieurs conditions climatiques.	30
II.1	Les points clés de la caractéristique ($I - V$) de la cellule solaire.	36
II.2	Schéma explicatif de la méthode d'ajustement des courbes.	38
II.3	Schéma explicatif de la méthode de mesures de la cellule solaire "JAC M5SF-2".	39
II.4	Banc d'essai expérimental de la cellule solaire "JAC M5SF".	39
II.5	Circuit électrique équivalent du modèle idéal.	40
II.6	Algorithme de recherche des paramètres internes du modèle idéal.	42
II.7	Variations des paramètres internes du modèle idéal de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.	45
II.8	Circuit électrique équivalent du modèle à une résistance série.	45
II.9	Algorithme de recherche des paramètres internes des modèles : à une résistance en série, à une diode et à deux diodes.	49
II.10	Variations des paramètres internes du modèle à une résistance série de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de R_s en fonction de la température. (d) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.	50
II.11	Circuit électrique équivalent du modèle à une diode.	51
II.12	Variations des paramètres internes du modèle à une diode de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de R_s en fonction de la température. (d) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (e) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.	56

II.13	Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes.	57
II.14	Variations des paramètres internes du modèle à deux diodes de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de I_{s1} en fonction de la température. (b) Variations de I_{s2} en fonction de la température. (c) Variations de n_2 en fonction de la température. (d) Variations de R_s en fonction de la température. (e) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (f) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.	63
II.15	Circuits électriques équivalents : (a) du modèle à trois diodes. (b) du modèle multi-diodes.	64
II.16	Algorithme génétique	66
II.17	Algorithme du gradient évolué	67
II.18	Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement par l'algorithme de gradient évolué.	68
II.19	Variations des paramètres internes du modèle à trois diodes de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température. (a) Variations de n_1 en fonction de la température. (b) Variations de I_{s1} en fonction de la température. (c) Variations de n_2 en fonction de la température. (d) Variations de I_{s2} en fonction de la température. (e) Variations de n_3 en fonction de la température. (f) Variations de I_{s3} en fonction de la température. (g) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (h) Variations de R_s en fonction de la température.	69
II.21	Comparaison entre les différents modèles et la courbe de référence : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)	70
II.20	Exemple d'implémentation du modèle de la cellule solaire sur l'environnement MATLAB-Simulink : modèle à triple diodes	71
II.22	Comparaison entre les différents modèles et la courbe expérimentale : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)	72

II.23	Effet de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule solaire : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)	74
II.24	Effet de la variation de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)	75
III.1	Principaux facteurs conduisant à la dégradation du rendement d'un générateur PV.	77
III.2	Illustrations de (a) Cellule solaire, (b) Module solaire, (c) Panneau solaire, (d) Matrice solaire.	79
III.3	Illustrations d'un module solaire typique. (a) Composition du module. (b) Liaisons électriques des cellules	80
III.4	Illustrations avec démonstration d'une association en série de N_s cellules solaires.	83
III.5	Illustrations avec démonstration d'une association en parallèle de N_p cellules solaires.	84
III.6	Illustrations d'une association mixte de $N_s \times N_p$ cellules solaires.	85
III.7	Module solaire 50W utilisé. (a) Banc d'essai des tests expérimentaux. (b) Comparaisons entre les caractéristiques électriques expérimentales et de simulation	86
III.8	Illustrations des cellules solaires sous différentes circonstances d'éclairements.	87
III.9	Illustration de l'effet de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en série.	90
III.10	Caractéristiques électriques de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en série. (a) Caractéristiques ($I - V$). (b) Caractéristiques ($P - V$).	90
III.11	Illustrations du phénomène du "Hot-spot"	91
III.12	Illustration de l'effet de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en parallèle.	91
III.13	Caractéristiques électriques de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en parallèle. (a) Caractéristiques ($I - V$). (b) Caractéristiques ($P - V$).	92

III.14 Association idéale des diodes Bypass avec les cellules solaires.	93
III.15 Association économique des diodes Bypass avec les cellules solaires.	93
III.16 Illustrations d'un module solaire ombré. (a) Motif réaliste de l'ombre. (b) Motif simplifié de l'ombre	94
III.17 Comparaison entre les caractéristiques électriques d'un module ombré et non ombré. (a) Les caractéristiques ($I - V$). (b) Les caractéristiques ($P - V$).	94
III.18 Exemple d'implémentation du modèle d'un module solaire en tenant compte de l'effet de l'ombrage sur l'environnement MATLAB-Simulink	95
III.19 Gisement Solaire en Tunisie. (a) Irradiation Globale Horizontale en KWh/m ² en Tunisie (source : Solargiz). (b) Irradiation Globale cumulée par mois et par année en KWh/m ² dans six villes de la Tunisie (source : INM).	97
III.20 Caractéristiques solaires de la ville de Sfax. (a) Profil du rayonnement solaire de l'année 2010 en W/m ² . (b) Profil de la fourchette des températures de l'année 2010. (Source : INM).	98
III.21 Caption for LOF	99
III.22 Trajectoire du soleil par l'algorithme SPA. (a) L'organigramme de calcul de la position du soleil. (b) Les trajectoires journalières du soleil des 12 mois de l'année 2010 à l'ENIS.	100
III.23 Irradiance solaire sur un plan horizontal et un plan incliné. (a) Irradiance solaire sur un plan horizontal en P . (b) Irradiance solaire sur un plan incliné en P . (Source : ITACA)	101
III.24 Caractéristiques solaire durant la meilleure et la pire journées d'éclairement en 2010 à Sfax.(a) L'organigramme de calcul d'irradiance solaire. (b) Profil d'irradiance réel et estimé en W/m ² (Source : INM).	102
III.25 Caractéristiques météorologiques durant la meilleure et la pire journées d'éclairement en 2010 à Sfax.(a) Profil de l'indice du ciel clair. (b) Profil de température réelle mesurée (°C) (Source : INM).	104

III.26 Exemple d'implémentation du modèle du suiveur solaire dans l'environnement MATLAB-Simulink.	104
III.27 Simulation des suiveurs solaires durant la meilleure et la pire journées d'éclair- ement en 2010 à Sfax.(a) Puissances générées pendant la meilleure journée. (b) Puissances générées pendant la pire journée.	105
III.28 Système mécanique du suiveur dual (à deux axes). (a) La structure du mouve- ment vertical. (b) La structure du mouvement horizontal.	106
III.29 Schématisation du système électrique du suiveur solaire.	108
III.30 Algorithme Global du suiveur solaire à deux axes.	109
IV.1 Les intersections entre les niveaux des fem d'une batterie 24 V et diverses charges résistives avec les caractéristiques ($I - V$) et ($P - V$) d'un générateur PV : points de fonctionnement lors d'un couplage direct.	113
IV.2 Principe de la chaîne de conversion PV conçue.	115
IV.3 Linéarisation de la source au voisinage de l'MPP. (a) Caractéristique ($I - V$). (b) Circuits équivalents.	116
IV.4 Simplification de la chaîne de conversion PV au voisinage de l'MPP.	118
IV.5 Composition de l'élément de stockage. (a) cellule électrochimique. (b) batterie électrochimique. [95]	120
IV.6 Modèle électrique de batterie de la boîte à outils <i>SimPowerSystems</i> . (a) Symbo- lisation. (b) Schéma électrique.	121
IV.7 Caractéristique de décharge de la batterie Plomb-Acide de référence "Power Kingdom PS7-12" à 25°C	123
IV.8 Mesures expérimentales de la batterie "Power Kingdom PS7-12". (a) Schéma explicatif des mesures. (b) Banc d'essai expérimental.	124
IV.9 Schéma explicatif de la méthode d'ajustement des courbes utilisée pour l'identi- fication des paramètres de la batterie "Power Kingdom PS7-12".	124

IV.10 Comparaison des caractéristiques de décharge de la batterie “Power Kingdom PS7-12”.	125
IV.11 Algorithme de l’observateur de batterie.	127
IV.12 Comparaison du rendement des différentes topologies de convertisseurs.	131
IV.13 Structure du convertisseur boost.	132
IV.14 Schémas des séquences du fonctionnement du convertisseur boost.	132
IV.15 Modèle de simulation de la Chaîne PV à travers des composants idéaux.	134
IV.16 Résultats de simulation du convertisseur boost avec des composants idéaux. (a) Tension du module PV V_{pv} . (b) Courant du module PV I_{pv} . (c) Puissance du module PV P_{pv} . (d) Courant dans l’inductance I_L . (e) Tension de sortie V_S . (f) Courant de sortie I_S . (g) Puissance de sortie P_S . (h) Courant de la batterie I_{bat}	136
IV.17 Modèle de simulation de la Chaîne PV en tenant compte des pertes de puissance.	137
IV.18 Résultats de simulations du convertisseur boost en tenant compte des pertes de puissance. (a) Tension du module PV V_{pv} . (b) Courant du module PV I_{pv} . (c) Puissance du module PV P_{pv} . (d) Courant dans l’inductance I_L . (e) Tension de sortie V_S . (f) Courant de sortie I_S . (g) Puissance de sortie P_S . (h) Courant de la batterie I_{bat}	138
IV.19 Différentes situations considérées par la stratégie MPPT.	140
IV.20 Algorithme de la stratégie de commande MPPT de type P&O	141
IV.21 Implémentation du modèle de l’MPPT dans l’environnement MATLAB-Simulink	142
IV.22 Effet de la variation de la charge sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Rapport cyclique. (b) Tensions d’entrée V_{pv} et de sortie V_S . (c) Courants d’entrée I_{pv} et de sortie I_S . (d) Puissances d’entrée P_{pv} et de sortie P_S	143

IV.23	Effet de la variation de l'éclairement sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Profil de l'éclairement. (b) Rapport cyclique. (c) Tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_S . (d) Courants d'entrée I_{pv} et de sortie I_S . (e) Puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_S	144
IV.24	Effet de la variation de la température sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Profil de température. (b) Rapport cyclique. (c) Tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_S . (d) Courants d'entrée I_{pv} et de sortie I_S . (e) Puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_S	146
V.1	Prototype du système d'alimentation en énergie solaire PV dédié aux applications embarquées.	149
V.2	Partie hardware du suiveur solaire.	150
V.3	Processus d'acquisition des données.	151
V.4	Interface graphique du Web-Service.	152
V.5	Résultats expérimentaux du suiveur solaire du 6 novembre 2016.	153
V.6	Organigramme de la machine d'états et des transitions du programme du régulateur de charge.	154
V.7	Étapes de conception et de fabrication du système du régulateur de charge.	155
V.8	Test du système de régulation de charge.	155
V.9	Fréquence et rapport cyclique de la commande MLI du Mosfet.	156
V.10	Visualisation par oscilloscope du test expérimental du convertisseur boost avec une source de tension 15 V	156
V.11	Visualisation par oscilloscope du test expérimental du convertisseur boost avec le module PV.	157

Introduction Générale

Cette introduction présente le contexte général et la motivation principale du travail documenté dans cette thèse. Elle comprend un aperçu sur l'état actuel de l'énergie renouvelable photovoltaïque dans le monde et en Tunisie. Elle est suivie par les motivations, les objectifs et les limites de ce projet de thèse ainsi que les contributions principales menées par nos travaux. Enfin, les grandes lignes de ce mémoire seront énumérées.

1 Généralités sur les énergies renouvelables

En raison de l'accroissement rapide de la demande énergétique mondiale, le développement concernant les énergies renouvelables est témoin d'évolutions permanentes. Simultanément, l'épuisement des réserves en combustibles fossiles a poussé davantage plusieurs projets recherche-développement pour compenser ce déficit à l'aide des sources d'énergies alternatives.

S'agissant des ressources d'origine pétrolière, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, elles ont été longtemps les seules sources d'énergies disponibles. Mais, à cause de leur dispersion et de leur répartition aléatoire non uniforme sur les territoires ainsi que leurs faibles existences qu'ils représentaient une source de conflit et la raison de toutes les compétitions entre nations depuis le 18^e siècle. De plus, les sources d'énergies conventionnelles d'origine fossile peuvent être exploitées pour seulement quelques décennies. En outre, les déchets provenant des centrales nucléaires génèrent d'autres problèmes de pollution en termes de déchets radioactifs.

Cependant, pour répondre au besoin énergétique mondial, il devient nécessaire d'identifier des solutions et de diversifier les sources d'énergie. Actuellement, les recherches se concentrent afin de trouver et de développer des sources d'énergies nouvelles, renouvelables, inépuisables et conviviales à l'environnement. Néanmoins, les techniques d'extraction d'énergie de ces ressources nécessitent des recherches et des stratégies plus approfondies et de développement visant à améliorer l'efficacité et la fiabilité. Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois familles principales : l'énergie mécanique (éolienne, hydraulique, et hydrodynamique des vagues), l'énergie électrique (conversion photovoltaïque, et conversion thermoélectrique) et l'énergie calorifique (géothermie, et solaire thermique).

Le soleil, vu comme une source prometteuse d'énergie propre, occupe depuis quelques décennies le centre d'intérêt de plusieurs équipes de recherche partout dans le monde. Il est considéré comme une mine inépuisable d'énergie possédant le plus large potentiel de développement comparé aux autres sources. Ainsi, on cite le générateur photovoltaïque (PV) comme le système de

conversion le plus répandu d'origine solaire. Le générateur PV, et contrairement aux systèmes conventionnels, produit de l'énergie électrique d'une manière silencieuse, propre et efficace en soumettant les cellules photovoltaïques qui le constituent au rayonnement solaire. Il y a de nombreux avantages incitatifs à exploiter les systèmes PV, à savoir :

- L'énergie solaire est gratuite. Elle ne consomme pas de combustible. De même, les systèmes PV ne libèrent pas de l'air nocif ou de l'eau polluée dans la nature. Ils ne produisent pas d'émissions de dioxyde et ne mettent pas en danger la santé humaine.
- Les systèmes photovoltaïques solaires peuvent fonctionner en mode connecté au réseau ou en mode autonome. En outre, un système PV peut être construit à n'importe quelle taille en fonction des besoins énergétiques. En effet, le système PV est extensible si on vise à augmenter la production d'énergie en associant des modules PV pour obtenir les tensions et les puissances souhaitables.
- Les cellules fonctionnent d'une manière fiable pendant de longues périodes sans pratiquement aucun entretien. En effet, les panneaux solaires ont une longue durée de vie opérationnelle, où la plupart des fabricants garantissent leurs panneaux solaires allant jusqu'à 20 ans de fonctionnement, avec une exception notable pour les systèmes autonomes dont les batteries doivent être remplacées tous les 8 à 10 ans.

1.1 Aperçu sur l'état actuel de l'énergie renouvelable photovoltaïque dans le monde et en Tunisie

Le photovoltaïque est un marché en pleine expansion [1]. Ce fait peut être observé au niveau de l'activité ascendante des marchés solaires et du commerce international des équipements solaires. On donne comme exemple la plate-forme en ligne *PvXchange*¹. Le taux de croissance annuel des installations photovoltaïques est de 44 % environ de 2000 à 2014 (44 GW en 2014 seulement). Plus de vingt ans de développement du marché du PV ont entraîné le déploiement de plus de 177 GW de systèmes PV autour du monde [2]. Le diagramme à bandes de la figure 1.a montre l'évolution de la puissance annuelle installée, ainsi que la puissance cumulée (figure 1.b) en énergie PV dans le monde de 2000 à 2014.

Le volume de participation de chaque pays dans les puissances PV installées en 2014 est montré dans les diagrammes circulaires de la figure 2.

Concernant la production de modules photovoltaïques en 2014, le diagramme circulaire de la figure 2.a indique que la Chine tient la tête avec une part de 66 %. Toute l'Europe a contribué avec une part de 8%. Le Japon et la Malaisie en troisième rang avec 6% et 5% respectivement.

Dans le même contexte, selon la figure 2.b, la technologie photovoltaïque à base de Silicium, représentait environ 92% de la production des cellules PV en 2014. La part de la technologie polycristalline est maintenant d'environ 56% de la production totale, par la suite la technologie monocristalline de 26%. Ce chiffre tend à augmenter selon plusieurs recherches dans les années

1. PvXchange est l'une des plus grandes plates-formes de courtage du monde pour les modules solaires, onduleurs, et autres composants PV. Elle est un leader du marché solaire dans le monde entier. Plus de détails que le lecteur peut consulter sur son site électronique <http://www.PvXchange.com>

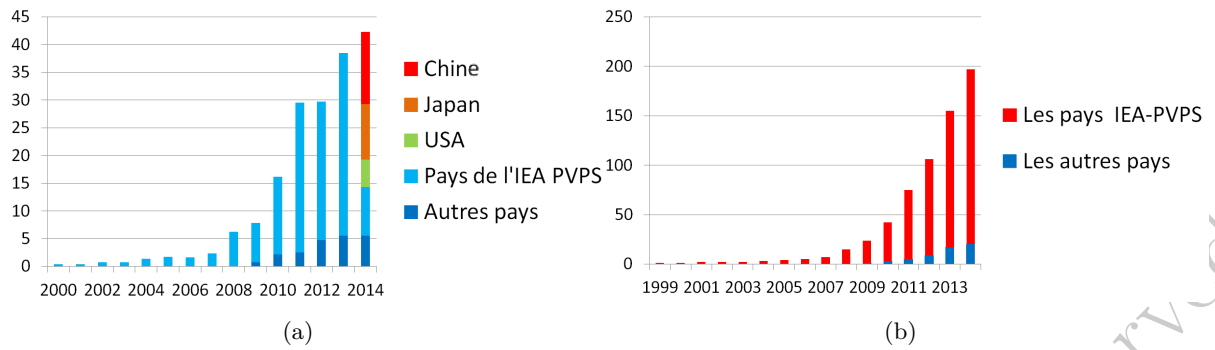


FIGURE 1 – Évolution de l'énergie PV dans le monde. (a) puissance annuelle installée (GW). (b) puissance cumulée (GW).[3]

IEA-PVPS : les pays membres du programme PVPS de l'Agence internationale d'énergie IEA.

à venir vu l'augmentation du rendement de cette technologie et la diminution de son coût de production.

La figure 2.c expose la part de chaque fabricant de la production des cellules PV en 2014. Le fabricant "JA solar" tient déjà une part importante du marché avec environ 3% annuellement.

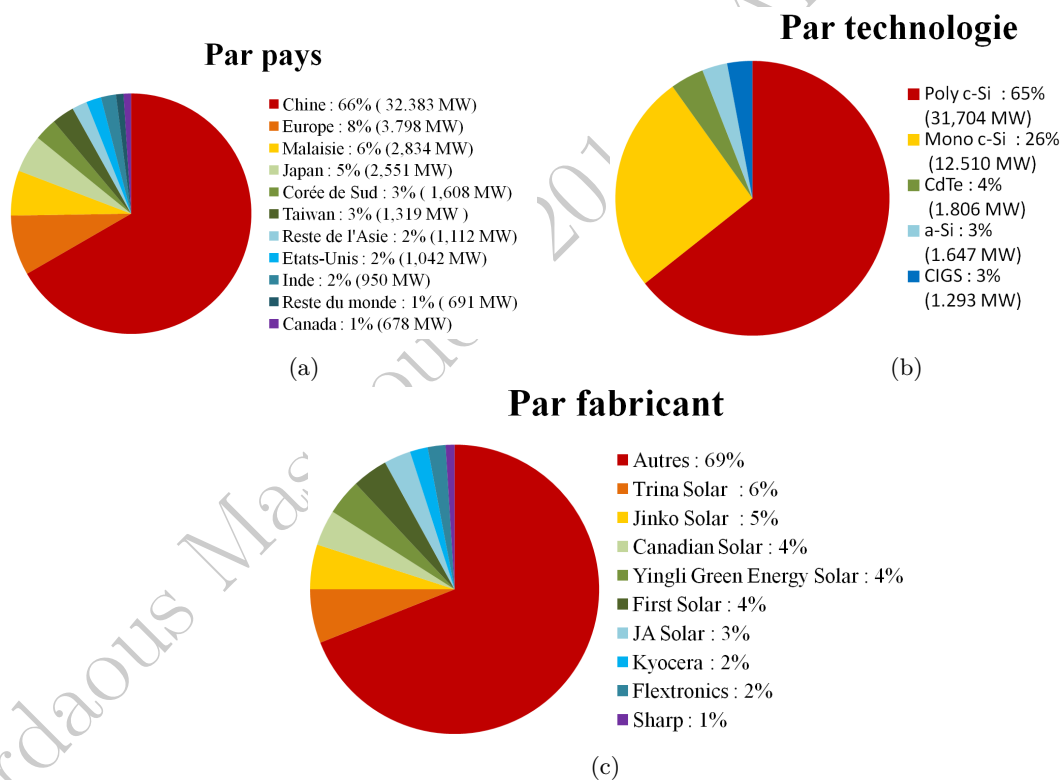


FIGURE 2 – Productions globales des modules solaires PV dans le monde en 2014 (48 961 MW). (a) Par pays. (b) Par technologie. (c) Par fabricant.[4]

Sur la voie des pays développés, la Tunisie est l'un des rares pays en développement qui s'est engagée pleinement depuis 1980 (Projet Hammam Biadha) dans la stratégie de la transition énergétique en adoptant une politique volontariste de maîtrise de l'énergie en vue d'encourager le développement du secteur d'énergie renouvelable. Pour atteindre cet objectif, des mesures

ambitieuses et des politiques d'investissements courageuses ont été initiées depuis des années. Cette politique s'est accélérée surtout à partir du milieu des années 2000 avec la flambée des prix des combustibles et l'apparition d'un déficit énergétique de plus en plus croissant.

La production en énergie électrique à l'échelle nationale a atteint 19 952 GWh en 2016 et elle est estimée par les prévisions d'atteindre 23 515 GWh en 2021. Seulement 430 GWh de la puissance produite proviennent d'origine renouvelable (sans tenir compte des installations privées) [5]. Le tableau 1 présente des chiffres indicatifs sur les types de sources d'énergies renouvelables disponibles et actives en Tunisie entre les années 2013 et 2014, les puissances totales installées, la moyenne de leurs productions annuelles ainsi que l'économie réalisée d'équivalent pétrole (unité : kilotonne d'équivalent pétrole ; Ktep). Ce tableau montre une faible participation de l'énergie solaire PV dans la production totale en renouvelable, surtout au niveau des installations publiques (absence des centrales solaires PV de grande échelle).

TABLEAU 1 – Production d'énergie renouvelable en Tunisie en 2013.[5]

Type de source renouvelable	Puissance produite GWh/an	Puissance installée MW	Économie réalisée Ktep/an
Éolien	358	233	150
Hydraulique	60	62	38.44
Solaire Photovoltaïque	Publique : 9 Privée : 31.5 (14.000 ménages)	13 21	3.72 31.5
Chauffe Eau Solaire	— —	500.000 m^2 (surfaces installées)	31

Engager l'État vers la formation des compétences qualifiées dans les domaines des énergies renouvelables nécessite une action immédiate sur le volet de la recherche scientifique et de l'enseignement universitaire.

En Tunisie, plusieurs établissements universitaires enseignent des sujets relatifs à la maîtrise de l'énergie. Parmi les structures actives de recherche dans les domaines des énergies renouvelables, on cite le Technopôle de Borj Cédria *TBC*² qui abrite le centre de recherche et des technologies de l'énergie *CRTE*³ concerné par l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. Le centre met l'accent sur l'utilisation des systèmes photovoltaïques pour l'éclairage, l'irrigation et le dessalement de l'eau grâce aux énergies renouvelables, l'utilisation des énergies solaire et éolienne et les recherches sur les matériaux à usage photovoltaïque.

L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax *ENIS* s'est intégrée, elle aussi, dans la politique d'incorporation du thème des énergies renouvelables dans l'enseignement supérieur et au sein des organismes de recherche. Les travaux menés dans cette thèse présentent une parmi plusieurs contributions du laboratoire *CEM LAB* dans la motivation, l'animation et l'incitation vers la maîtrise scientifique des technologies des ressources renouvelables.

2. <http://www.ecopark.tn/>

3. <http://www.crten.rnrt.tn>

2 Motivations et Objectifs

2.1 Motivations

Le sujet de thèse présenté dans ce manuscrit rentre dans le cadre de l'intégration et de l'exploitation des sources d'énergies renouvelables dans la conception des systèmes embarqués et des mécatroniques. En effet, ce sujet fait partie d'un vaste projet de recherche à l'ENIS qui suggère la conception d'un Robot m Mobile Autonome par un effort collectif fusionnant les divers volets de recherche. Ainsi, les études effectuées et programmées abordent les thématiques suivantes :

Robotique et Systèmes embarqués : La conception du système robotique embarqué et la synthèse des outils et des diagrammes d'actions nécessaires pour l'analyse des données en temps réel ainsi que le contrôle et la commande des différents organes et périphériques.

Informatique des systèmes électriques : Le développement des algorithmes optimisés de commande des sous-systèmes et de transferts de données en temps réel.

Automatique : Le développement des approches automatiques avancées pour la commande du mouvement du robot et le suivi de sa trajectoire en tenant compte des obstacles et des contraintes survenants.

Energies Renouvelables et Électronique de puissance : La conception d'un système de conversion d'énergie et les étages de puissance nécessaires pour exploiter les sources d'énergies renouvelables.

Système de stockage : Recharge de batteries et système de gestion et d'observation de l'énergie stockée ainsi qu'une vision sur l'état de charge, l'état de vie et le diagnostic de la batterie en charge.

Moteurs et machines électriques : La modélisation et la commande des machines électriques ainsi que la gestion et l'optimisation de leur consommation d'énergie électrique.

Le robot mobile autonome est conçu autour d'une base mobile motorisée qui supporte un bras manipulateur et est équipé d'un système PV pour l'alimentation autonome en énergie solaire. Le premier prototype du robot a été lancé durant l'année universitaire 2015-2016. La figure 3 montre la conception mécanique du système élaboré par le logiciel *SolidWorks*.

Un tel système robotique est en mesure d'être employé dans diverses applications. On peut exploiter le robot pour des finalités éducatives ainsi que dans des missions industrielles (par exemple déplacement des charges et des objets sur de longues trajectoires), comme on peut le naviguer comme robot explorateur dans les endroits où l'intervention humaine est dangereuse ou bien impossible. On peut, de même, lui accorder la mission de surveillance et de collecte d'informations.

Il est possible, également, d'utiliser le système d'alimentation PV séparément dans des systèmes autonomes comme l'éclairage public ou bien les stations de recharge mobile. Ainsi, qu'on

peut s'en servir pour alimenter les systèmes embarqués intelligents et les objets connectés dans le cadre de la mise en œuvre de la ville intelligente "Smart City".

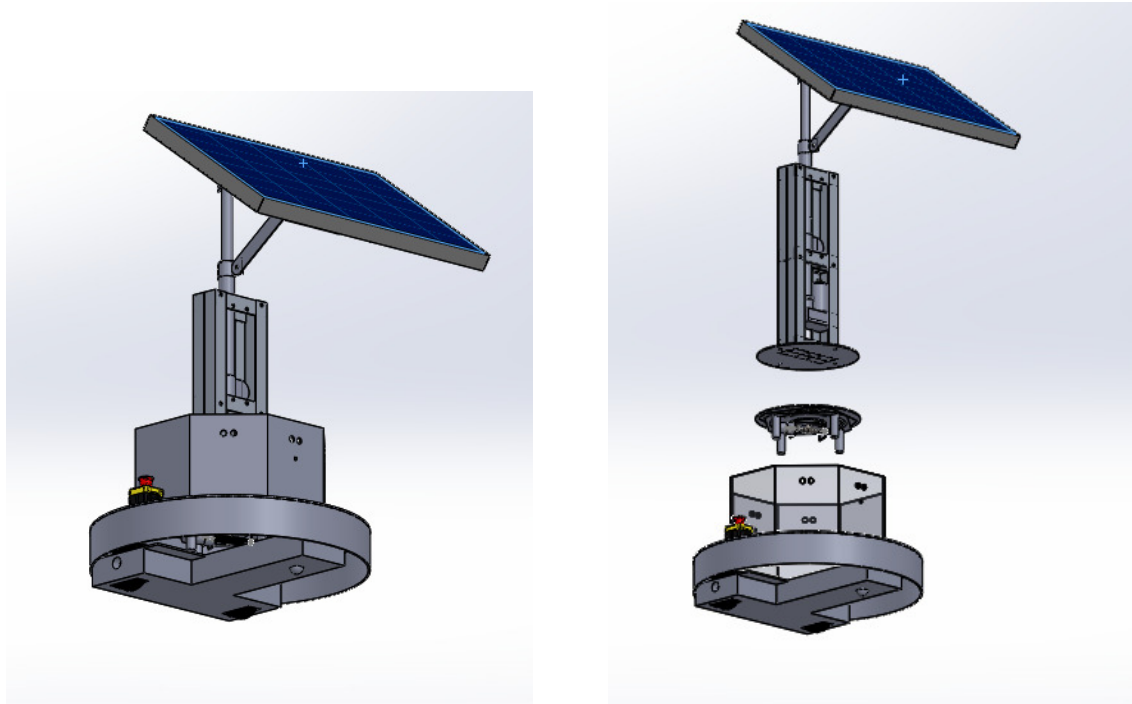


FIGURE 3 – Conception Robot Mobile Autonome. (a) Dessin compact. (b) Dessin éclaté.

2.2 Objectifs

Le travail accompli durant cette thèse s'articule autour du développement de la partie alimentation en énergie électrique du robot précédemment décrit. On propose une autonomie totale du robot du point de vue production et consommation de l'énergie électrique en utilisant une source d'énergie renouvelable, propre, silencieuse et sûre.

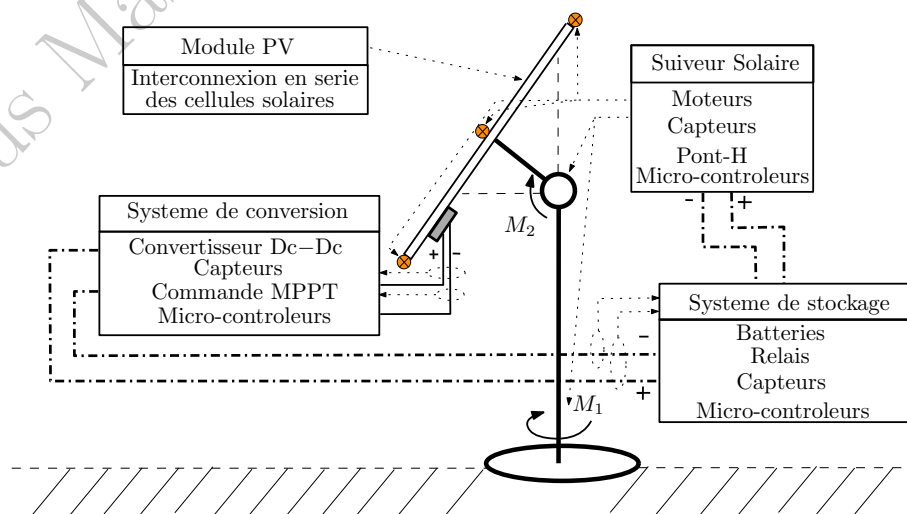


FIGURE 4 – Schéma synoptique du système d'alimentation en énergie solaire PV.

On présente dans ce travail la conception d'un système d'alimentation en énergie solaire PV dédié aux applications embarquées et robotiques. Le rendement énergétique des modules PV employés est optimisé par diverses méthodes dans le but d'une exploitation maximale, sans perte, d'énergie électrique disponible auprès de l'équipement PV.

Un schéma synoptique simplifié du système conçu résumant les différents blocs développés dans cette thèse est présenté par la figure 4.

À la fin de cette thèse, on présente également une concrétisation pratique du système étudié théoriquement à travers la fabrication d'un prototype préliminaire.

Il convient tout de même de mettre l'accent sur les problèmes de modélisation des cellules et des modules solaires et l'étude de leurs rendements via les perturbations climatiques permanentes ainsi que l'étude des techniques et des moyens de l'exploitation appropriée et optimale des générateurs photovoltaïques.

2.3 Limites du projet

Bien qu'il existe de nombreux types et technologies de cellules et de modules solaires, on a adopté seulement le type monocristallin qui a été exploité sous forme de module unitaire (sans associations de plusieurs modules) et on s'est limité à l'étude d'un système PV de type autonome connecté à un élément de stockage de type batterie (Lead-Acid).

La modélisation et l'étude des cellules et modules PV n'ont pas tenu compte de l'effet de vieillissement et de dégradation du rendement du dispositif causé par les défauts mécaniques et physiques de la structure de la jonction.

Le système de conversion d'énergie conçu est censé fonctionner dans des conditions normales sans tenir compte des défauts accidentels inattendus comme le claquage de la cellule de commutation ou l'endommagement des capteurs etc.

Le travail proposé n'a pas mis en question les bruits environnementaux agissant sur les systèmes ni les émissions parasites perturbant le fonctionnement et l'endurance de la chaîne PV.

2.4 Contributions principales

Les principales contributions de cette thèse s'articulent autour des points suivants :

- La problématique de la modélisation de la cellule solaire photovoltaïque a été minutieusement discutée dans le deuxième chapitre, en élaborant cinq modèles électriques équivalents tout en identifiant leurs paramètres internes par des algorithmes itératifs consciencieux. Les travaux élaborés ont permis de publier deux articles de journaux [1-2] et deux communications de conférences [4-5].
- L'optimisation du rendement du module solaire se fait par la protection des modules tout d'abord, ainsi que le positionnement optimal de leurs surfaces par rapport à l'éclairement incident. Dans le troisième chapitre, on a proposé un prototype de suiveur solaire motorisé sur deux axes et commandé par un algorithme adéquat de poursuite de la trajectoire du soleil. Une partie des travaux élaborés a fait l'objet d'une communication de conférence [6].

- L'utilisation d'un modèle de batterie pour simuler la chaîne PV nécessite l'identification expérimentale de l'élément de stockage et la déduction de ses paramètres internes. Dans le chapitre 4, on propose une méthode d'identification de batterie, avec une conception d'un système d'observation de batterie. Le travail d'identification a fait l'objet d'un article de journal [3] et d'une communication publiée dans une conférence [7].
- Dans le quatrième chapitre, on a détaillé la conception d'un convertisseur de puissance avec sa commande MPPT adéquate et on a présenté dans le cinquième chapitre un prototype de la carte électronique conçue montée sur le système "Module PV–Suiveur Solaire–Régulateur de charge". Certaines parties de ces travaux ont fait l'objet de trois communications publiées dans des conférences internationales [8-9-10].

3 Structure de ce mémoire

Le présent mémoire, qui constitue une synthèse des travaux susmentionnés, est organisé en cinq chapitres. Le présent chapitre introduit un aperçu général sur la position de l'énergie photovoltaïque dans le monde et en Tunisie ainsi qu'il décrit les problématiques et les motivations qui ont déclenché ce travail. On présente aussi les principaux objectifs souhaités et les contributions apportées.

Dans un premier temps, le premier chapitre propose une vue d'ensemble sur la technologie solaire photovoltaïque et ses caractéristiques électriques. Une revue historique est présentée ainsi que l'exposition des différentes technologies et des applications photovoltaïques actuellement existantes. Des notions fondamentales sur la structure interne de la cellule solaire sont fournies et on conclut avec la description des paramètres électriques et le principe du fonctionnement du dispositif solaire.

Le deuxième chapitre discute la problématique de modélisation des cellules solaires photovoltaïques et la synthèse des modèles électriques équivalents. Nous enchaînons par l'élaboration des algorithmes de recherche des paramètres internes des modèles considérés et nous concluons par l'analyse de quelques résultats de simulation, ainsi qu'une étude comparative des modèles proposés.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des associations des cellules solaires dans le but de former des modules et des panneaux photovoltaïques. Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que les problèmes qui peuvent survenir lors de leurs connexions. Ensuite, on enchaîne avec la synthèse de méthodes d'optimisation de l'exploitation énergétique des générateurs photovoltaïques par la conception d'un suiveur solaire motorisé qui poursuit en boucle ouverte et en boucle fermée les rayonnements solaires incidents.

Le quatrième chapitre traite le système d'adaptation et de conversion d'énergie qui sert d'interface entre le générateur PV et la charge ou l'élément de stockage. On présente des méthodes de linéarisation de la source PV et de la charge de sortie utilisées ainsi qu'on présente la modélisation et l'identification des paramètres de la batterie de stockage. Par la suite, on aborde l'étude du fonctionnement des convertisseurs statiques de types hacheurs de puissance et on

discute les diverses topologies existantes. On adopte le hacheur de type Boost et on présente un dimensionnement minutieux ainsi qu'une modélisation avec la prise en compte des éléments parasites de cette architecture. L'optimisation du rendement de l'étage d'adaptation se fait par la synthèse de la stratégie de commande MPPT adéquate.

Le cinquième chapitre est dédié à décrire les travaux expérimentaux élaborés. Il expose les différentes étapes de conception et de réalisation du prototype fabriqué. On présente ainsi un échantillon des résultats expérimentaux récoltés lors des premiers essais du système.

Ce manuscrit est clôturé par une brève conclusion qui souligne les résultats marquants issus de cette thèse, ouvrant des perspectives sur de nouvelles problématiques assurant la continuité et l'amélioration du projet.

3.1 Outils utilisés

Dans le but de simuler le comportement des différentes parties, le système photovoltaïques conçu a été implémenté dans l'environnement "*MATLAB/Simulink*" grâce à la boîte à outils (toolbox) "*SimPowerSystems*" pour modéliser le convertisseur de puissance, tandis que les algorithmes d'identifications des modèles de la cellule solaire sont élaborés par la programmation en langage "*MATLAB*" sur un document "*Mfile*" grâce à divers toolboxes comme "*Optimization toolbox*" et "*Symbolic Math toolbox*".

Concernant le prototype du système PV réalisé, le suiveur solaire est muni d'une couche électronique d'acquisition des données établie sur la carte "*ARDUINO Nano*" construite autour du microcontrôleur "*AVR Atmega328*" (Produit de "*Atmel*"). Compte tenu de la commande des moteurs du suiveur solaire et de l'algorithme de poursuite de la trajectoire du soleil, on a utilisé une carte Système sur Puce (System on Chip "*SoC*") de type "*Raspberry Pi*", vu sa forte puissance en calcul parallèle et sa capacité à se communiquer avec plusieurs périphériques.

Le système de contrôle et de commande du régulateur de charge PV a été mis en œuvre par l'intermédiaire d'une carte "*ARDUINO Mega*" à microcontrôleur de type "*AVR Atmega2560*" en raison de sa grande flexibilité de programmation, ainsi que de sa forte capacité de calcul. Le développement de la carte électronique du convertisseur DC-DC de type Boost est réalisé à l'aide du logiciel "*Proteus 8 Professional*" avec ses interfaces "*ISIS*" et "*ARES*" ainsi que le routage de la carte et la préparation du typon.

La centralisation puis le transfert des données sont assurés depuis la carte "*Raspberry Pi*" à travers l'utilisation de l'informatique en nuage (en termes anglo-saxonnes "*Cloud Computing*") qui vise à créer un réseau de télécommunication délocalisé facilitant le partage de l'information. Ainsi, le stockage des données acquises de l'état du système dans des serveurs distants s'effectue par l'intermédiaire de l'interface "*Wifi*" et du réseau "*Internet*" grâce au protocole "*Web Service*".

La conception mécanique du prototype Robot muni du Suiveur solaire est élaborée en collaboration avec la société de développement des solutions d'ingénierie mécatronique *Novel-Ti*⁴ (SFAX).

4. <http://www.novelti.com.tn>

3.2 Liste des publications issues de cette thèse

Articles

- [1] Ferdaous Masmoudi, Hafedh Trabelsi, Nabil Derbel. "Comparative study of photovoltaic solar cell models with identification of internal parameters and experimental ascertainment." DE GRUYTER (Germany). Advances on Systems, Signals, and Devices (ASSD) (accepted December 2016).
- [2] Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, Nabil Derbel. "Identification of Internal Parameters of a Monocrystalline Photovoltaic Cell Models and Experimental Ascertainment." International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), (Published September 2014).
- [3] Jihen Loukil, Ferdaous Masmoudi, Nabil Derbel. "Third Order Model Identification of Lead-Acid Battery Using Genetic Algorithm and Experimental Measurements." DE GRUYTER (Germany). Advances on Systems, Signals, and Devices (ASSD) (accepted December 2016).

Conférences

- [4] Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, Nabil Derbel. "Simple models design for one monocrystalline photovoltaic cell by identification of internal parameters." IEEE Annual Seminar on Automation, Industrial Electronics and Instrumentation (SAAEI), Maroc, Tanger, June (2014).
- [5] Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, Nabil Derbel. "Single and Double Diode Models for Conventional Mono-Crystalline Solar Cell with Extraction of Internal Parameters." IEEE International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD'16), Leipzig, Germany, March (2016).
- [6] Ferdaous Masmoudi, Hafedh Trabelsi, Nabil Derbel. "Simulation and Design of Dual Axis Solar Tracker System for Photovoltaic Power Optimization." (Submitted November 2016).
- [7] Jihen Loukil, Ferdaous Masmoudi, Nabil Derbel. "Modeling of Internal Parameters of a Lead Acid Battery with Experimental Validation." IEEE International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD'16), Leipzig, Germany, March (2016).
- [8] Rabeab Abid, Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, and Nabil Derbel. "Design and Realization of a Photovoltaic System Controlled by an MPPT Algorithm." IEEE International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA'15), Monastir, Tunisia, December (2015).
- [9] Rabeab Abid, Ferdaous Masmoudi, Fatma Ben Salem, Nabil Derbel. "Modeling and Simulation of Conventional DC-DC Converters Dedicated to Photovoltaic Applications." The International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet-Tunisie, March (2016).
- [10] Rabeab Abid, Ferdaous Masmoudi, Nabil Derbel. "Comparative Study of Fundamental Variable Input Converters used for PV Conversion Systems." (Submitted November 2016).

Chapitre I

Le Générateur Photovoltaïque : Présentations, Structures et Modes d'opérations

Résumé : *Ce premier chapitre vise à se familiariser avec l'énergie électrique d'origine photovoltaïque. Tout d'abord, on présente une introduction générale puis une revue historique sur le développement de la structure de la cellule solaire. Par la suite, on introduit les différentes technologies de cellules PV actuellement existantes, puis on expose une classification des applications PV les plus marquantes dans le monde. Le deuxième volet porte sur l'investigation de la structure interne de la cellule solaire ainsi que sur l'analyse des mécanismes physiques fondamentaux régissant la jonction solaire. On conclut avec l'inspection des caractéristiques et des modes d'opération de la cellule solaire tout en détaillant ses paramètres électriques fondamentaux.*

Mots-clés : Effet photoélectrique – photovoltaïque,
Cellule – Générateur – Système photovoltaïque,
Jonction p-n : émetteur – base – zone de charge espace
Phénomène de Génération - Recombinaison - Diffusion
Caractéristiques - Paramètres électriques,

I.1 Introduction

Le terme photovoltaïque (PV) est une combinaison entre le mot grec “phós” (lumière), ou bien, “phōtós” (de la lumière), et le nom du physicien italien “Alessandro Volta” (1745-1825), qui a découvert la première batterie électrochimique, d’après lui est nommée l’unité fonctionnelle de l’électricité (Volt). Ainsi, une traduction du mot photovoltaïque pourrait être “la batterie de lumière” ou bien “la source de lumière” ou encore “le convertisseur de lumière” [6]. Plus généralement, on entend par le mot photovoltaïque la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique.

Le composant élémentaire qui constitue le générateur photovoltaïque (GPV) est la cellule solaire. Généralement fabriqué à base de silicium : un semi-conducteur est également utilisé pour les diodes, transistors et les circuits intégrés.

Une cellule solaire, non exposée à la lumière, ressemble exactement à une diode qui, au cas où la jonction p-n est polarisée en direct, permet le passage du courant de la zone-p vers la zone-n. Lorsque la diode est soumise à la lumière, elle se comporte comme une photopile, un courant photonique est généré et ensuite diffusé de la zone-n vers la zone-p.

Il en résulte la création d’une différence de potentiel (environ 0,5 V) entre les deux bornes de la cellule. Le courant libéré varie selon le rayonnement et la surface de la cellule ainsi que la technologie de fabrication et le rendement de conversion de cette dernière (de 5 à 9 A, pour une cellule conventionnelle de 125 mm×125 mm de surface). Afin d’obtenir une tension utilisable dans la région de 20 à 50 V, de nombreuses cellules doivent être associées pour former un module solaire.

I.2 Aperçu sur la cellule solaire photovoltaïque

Après cette introduction, on présente un aperçu sur l’histoire de la cellule photovoltaïque ainsi que ses différentes technologies et ses domaines d’applications.

I.2.1 Histoire de la cellule solaire

La chronologie des cellules solaires commence au 19^{ème} siècle, quand le père et le fils “Becquerel” ont observé, lors d’une expérience électrochimique (une pile), que la présence de la lumière du soleil stimule la génération de l’énergie électrique entre les électrodes de platine plongées dans l’électrolyte. L’effet de mouvement exercé par la lumière sur les électrons d’un corps est appelé effet photoélectrique. Plus tard, la combinaison du concept des jonctions p-n (mise en contact de deux semi-conducteurs dopés généralement à base de silicium) avec l’effet photoélectrique a permis l’apparition des premières cellules solaires à l’état solide nommées “photovoltaïques”.

Les cellules solaires ont continué d’être utilisées dans de nombreuses applications. Historiquement, elles ont été utilisées dans des situations dans lesquelles l’alimentation via le réseau électrique était inaccessible (Système photovoltaïque autonome – isolé), tel que Hammam Biadha en Tunisie depuis plusieurs décennies.

TABLEAU I.1 – Frise chronologique du développement de la cellule solaire.

1839	“Alexandre Edmond Becquerel” a observé l’effet photovoltaïque via une expérience electro-chimique exposée à la lumière.
1873	“Willoughby Smith” a découvert la photo-conductivité du sélénium <i>Se</i> .
1877	“W.G. Adams” et “R.E. Jour” ont observé l’effet photovoltaïque en sélénium solidifié, et ont publié le premier document sur la cellule de sélénium.
1883	“Charles Fritts” développe une cellule solaire en utilisant le sélénium sur une couche-mince d’or pour former un dispositif donnant un rendement moins de 1%.
1887	“Heinrich Hertz” a découvert l’effet photoélectrique causé par la lumière ultraviolette, en même temps, “James Moser” a rapporté les cellules photo-électrochimiques sensibilisées.
1888	“Aleksandr Stoletov”, “Melvin Severy”, puis “Harry Reagan” ont reçu les premiers brevets de fabrication de cellules solaires entre 1888 et 1897.
1904	“Wilhelm Hallwachs” a construit la première une cellule solaire à base d’une jonction en semi-conducteur (cuivre et d’oxyde de cuivre).
1905	“Albert Einstein” a publié un document expliquant l’effet photoélectrique de point de vue physique quantique.
1918	“Jan Czochralski” a produit une méthode pour cultiver des mono-cristaux de métal. Cette méthode a été adaptée plus tard pour produire du silicium monocristallin.
1948	“Gordon Teal” et “John Little” ont adapté la méthode de “Czochralski” de croissance cristalline pour produire du germanium monocristallin et, plus tard, du silicium.
1950	“Bell Labs”, la société américaine de recherche et de développement scientifique a produit des cellules solaires pour les activités spatiales.
1954	“Bell Labs” annonce l’invention de la première cellule solaire en silicium pratique. Peu de temps après, elle a présenté des cellules d’environ 6% de rendement. Le “New York Times” ont prévu que les cellules solaires conduiront à une source d’énergie illimitée du soleil.
1955	“Western Electric” une société d’ingénierie électrique, été la première à recevoir la permission de commercialisation des cellules solaires. Ensuite la société “Hoffman Electronics-Semiconductor” a crée puis commercialisée une cellule solaire de 2% de rendement pour 25 \$/cellule c-à-d 1,785 \$/watt.
1958	“Vanguard I”, le premier satellite à énergie solaire, a été lancé avec 100 cm^2 de cellules PV.
1960	“Hoffman électronique” a crée une cellule solaire de rendement de 14%.
1977	Après la crise de pétrole de 1973, Le solaire PV a été utilisé comme une source terrestre alternative d’énergie et la production mondiale a dépassé 500 kW.
1983	La production mondiale photovoltaïque dépasse 21,3 mégawatts, et les ventes dépassent 250 millions \$.
1991	Le président “George H. W. Bush” a dirigé le Département de l’énergie des Etats-Unis et a fondé le Laboratoire National des Energies Renouvelables “NREL”.
1994	“NREL” a développé le concentrateur solaire (180 soleil) a deux-jonctions GaInP/GaAs qui a devenu la première cellule solaire de rendement supérieur à 30%.
1999	La puissance photovoltaïque totale installée dans le monde a atteint 1000 mégawatts.
2006	“Boeing” et “Spectrolab” ont déclaré un nouveau record de rendement des cellules solaires qui a atteint 40%.
2016	Une course mondiale de rendement des cellules solaires a déclenché entre les laboratoires d’énergies solaires. L’institut allemand “Fraunhofer ISE” a déclaré dernièrement un nouveau record de 46% .

La frise chronologique du tableau I.1 montre les dates les plus particulières concernant le développement de la technologie photovoltaïque.

I.2.2 Technologies de la cellule solaire

Les cellules photovoltaïques représentent la plus petite unité dans un dispositif de production d'énergie solaire. Les cellules peuvent être classées suivant la technologie de fabrication, en général, sous 5 grandes catégories :

- Le type Silicium cristallin (silicium monocristallin, silicium polycristallin...).
- Le type couche mince, nommé aussi semi-conducteur composé (Amorphe, Cadmium-Telluride CaTd...).
- Le type multijonction (Concentrateur, GaInP2/GaAs/Ge...).
- Le type simple-jonction GaAs (concentrateur, cristallin...).
- Le type émergent, qui regroupe toutes les nouvelles technologies qui sont en cours de développement et d'amélioration (organique, inorganique, pérovskite, Grätzel...).

L'utilisation des matériaux pour les cellules en silicium a été réduite de manière significative lors des 10 dernières années. La figure I.1 montre l'amélioration de la qualité de la jonction des points de vue épaisseur et quantité de matière utilisée en passant d'environ $400\mu\text{m}$ avec $16\text{g}/W_c$ à moins de $150\mu\text{m}$ avec $6\text{g}/W_c$; ce qui fournit des galettes "wafers (par anglicisme)" plus fines avec plus d'efficacité.

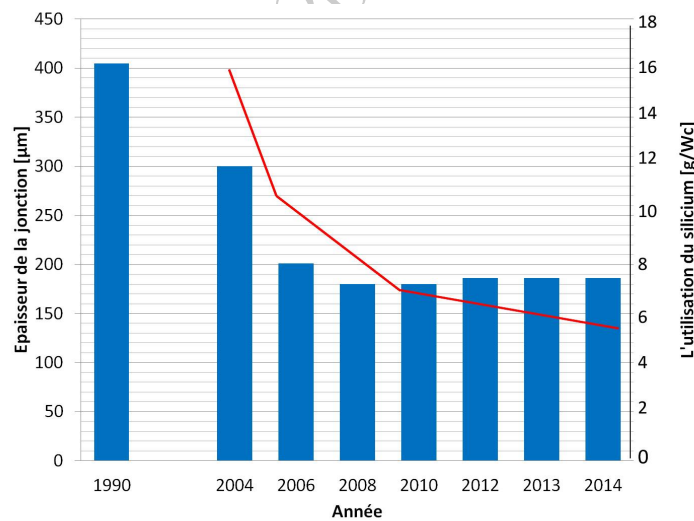


FIGURE I.1 – Développement de la qualité de la jonction en Silicium.

Actuellement, les cellules à technologies de silicium cristallin sont les plus fabriquées et commercialisées (voir figure 2.b). Les enregistrements de l'efficacité des cellules montrent l'augmentation du rendement des différents types de cellules. Cette figure I.2 résume les différentes technologies de cellules solaires existantes actuellement et leurs inventeurs ainsi que le progrès en rendement enregistré durant les 40 dernières années.

Rendement (%)

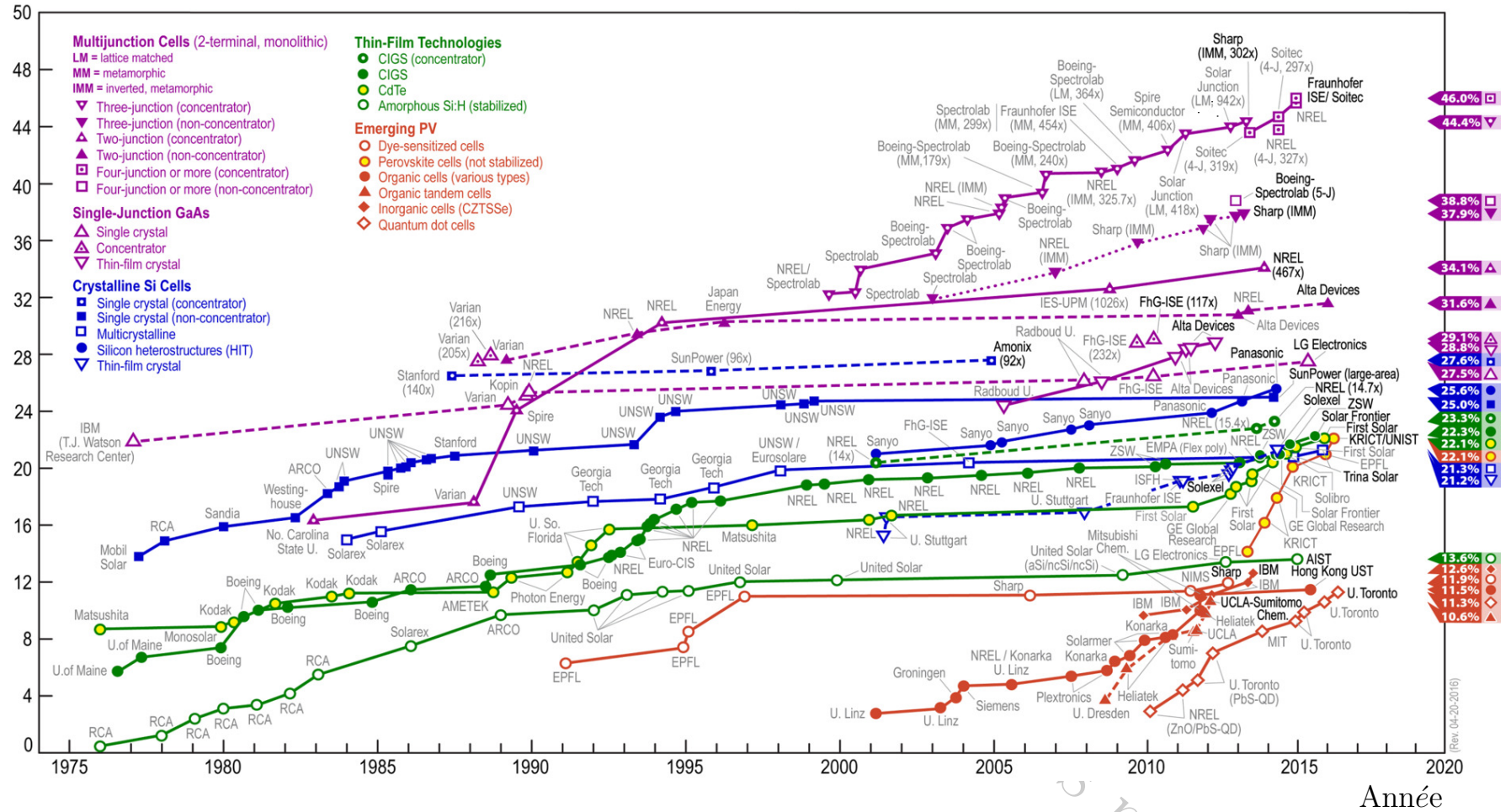


FIGURE I.2 – Développement des records des rendements des cellules solaires lors des 40 dernières années (source : NREL).

En tête de la course du rendement, on trouve évidemment les cellules solaires multijonctions à forte concentration qui peuvent atteindre un rendement de 46%. Pour les cellules cristallines, la cellule d'architecture *PERL* tient le devant de la scène avec une efficacité de 25%. Les cellules organiques occupent le dernier rang avec un rendement d'environ 9%. Toutefois, le gain d'efficacité durant ces cinq dernières années est nettement visible, qui s'élève de 3% jusqu'à 12% actuellement.

I.2.3 Domaines d'applications

Au début, l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque était confinée à des applications extraterrestres (satellites, robots explorateurs...), vu le coût élevé de cette technologie (1000 fois plus cher que le prix actuel). Aujourd'hui, le domaine du photovoltaïque couvre une multitude d'applications diversifiées et possède le plus grand potentiel de développement par rapport aux autres ressources renouvelables. Les applications peuvent être classées en quatre grandes catégories [7] :

- **Couplage direct du système photovoltaïque** : Ce type de système, représenté par la figure I.3.a, qui peut être considéré aussi comme un système autonome, est le système de couplage le plus simple. De plus, il est indépendant du réseau. La sortie continue du module PV est directement reliée à la charge continue. Grâce à ce couplage, la charge fonctionne seulement durant les heures d'ensoleillement. Ayant comme avantage la simplicité de l'utilisation, l'inconvénient majeur de ce type est l'impossibilité de profiter du maximum d'énergie produite par le générateur PV ainsi que l'absence du système de stockage qui permet de récupérer l'énergie pendant la nuit.
- **Système photovoltaïque Autonome** : le système autonome, représenté par la figure I.3.b, est généralement utilisé dans les sites isolés en cas d'absence du réseau électrique ou lorsque le coût de connexion au réseau est trop élevé. Ce système inclut dans sa chaîne les régulateurs de charges et les systèmes de stockage. Les batteries doivent avoir une capacité suffisante pour stocker l'énergie produite pendant la journée pour être utilisée la nuit et pendant les périodes de mauvais temps.
- **Système photovoltaïque connecté au réseau** : Bien qu'au début, les principales utilisations de l'énergie photovoltaïque aient été autonomes. Aujourd'hui, les systèmes connectés au réseau jouent un rôle prépondérant. Ces systèmes ne nécessitent pas des éléments de stockage, car le réseau agit comme un réservoir de l'énergie excédentaire. En période d'insuffisance de production d'énergie photovoltaïque, le réseau fournit également l'énergie souhaitée (figure I.3.c).
- **Système hybride** : Un système hybride est une combinaison de différentes méthodes de production d'électricité. Cette combinaison, montrée dans la figure I.3.d, compte les sources d'énergies renouvelables (telles que l'énergie de l'eau, éolienne, solaire...) ainsi que les sources conventionnelles non renouvelables (gaz, charbon, pétrole...) afin d'équilibrer les périodes de mauvais temps et même les fluctuations saisonnières. Les systèmes hybrides nécessitent généralement des systèmes de contrôle plus sophistiqués que les sys-

tèmes PV autonomes ou connectés au réseau. Par exemple, dans le cas d'un système PV/diesel, le moteur diesel doit être démarré lorsque la batterie atteint un niveau de décharge donné et arrêté de nouveau lorsque la batterie atteint un état adéquat de charge. Le générateur de secours peut être utilisé pour recharger les batteries uniquement ainsi que pour alimenter la charge.

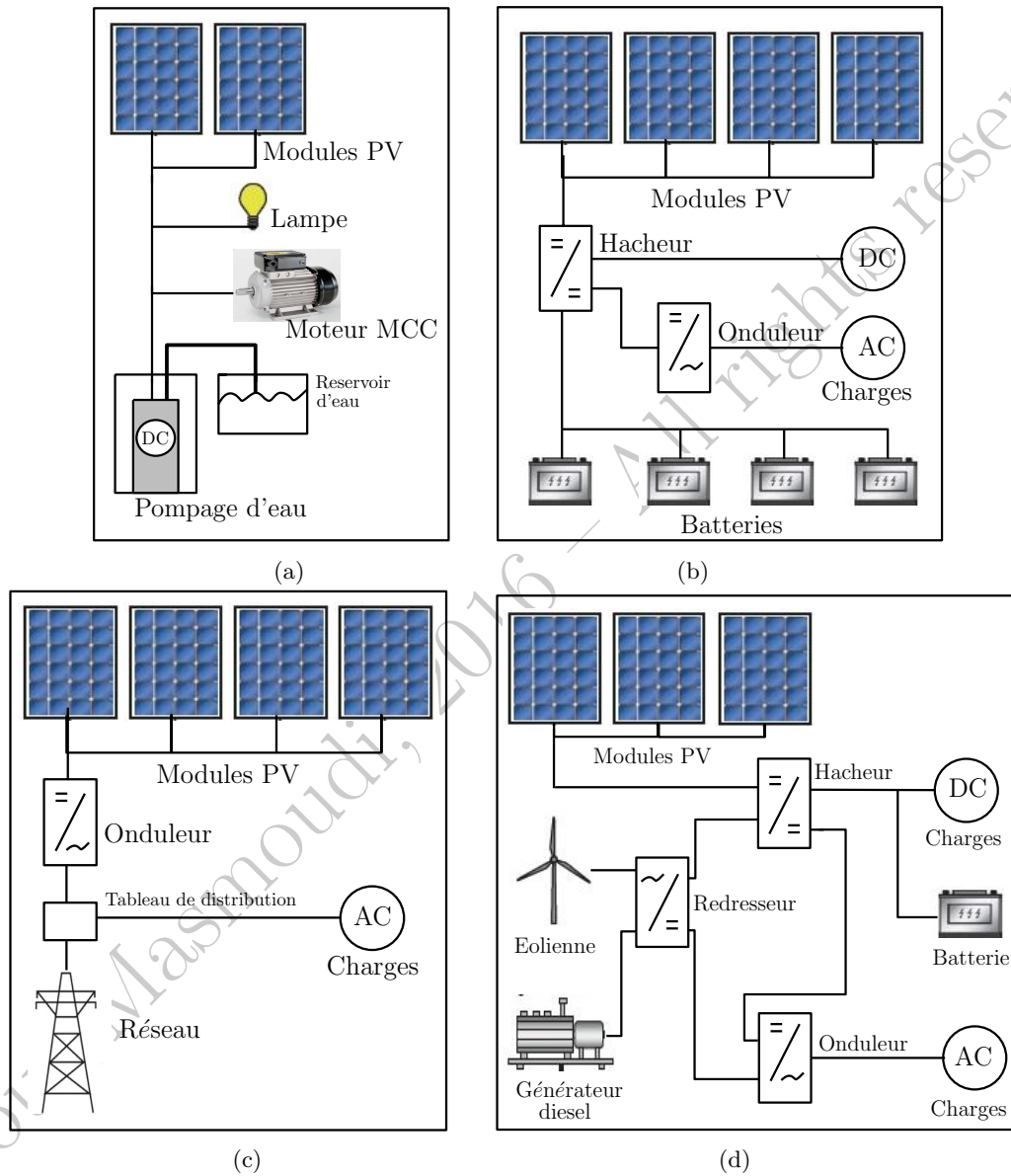


FIGURE I.3 – Architecture des différents types de chaînes PV : (a) Couplage Direct. (b) Système Autonome. (c) Système connecté au réseau. (d) Système hybride.

Le tableau I.2 résume les applications photovoltaïques les plus marquées existantes dans le monde.

TABLEAU I.2 – Les diverses applications de l'énergie PV.[3, 5, 70]

Systèmes PV Autonomes	Très Petits Systèmes	- Chargeur téléphone - Ordinateur portable - Radio
	Pico-Système	- Lampe torche - Sécurité (système de sécurité) - Ventilateur - Montre-calculatrice-capteurs
	~ < 10 Watt-crête (W_c)	
Autonomes	Petits Systèmes	- Éclairage public - Système de télécommunication et signalisation - Voiture solaire - Pompage d'eau solaire - Satellites - robot mobile - système macaronique
	~ < 1 KW_c	
	Systèmes Moyens	- Alimentation des sites isolés Exemple : Hammem Biadha à Siliana - Tunisie = 30 KW_c
Systèmes PV	Systèmes Petits ou Moyens Résidentiel ou Commercial	- Système sur toitures - Système posé sur sol - Système intégré aux bâtiments
	quelques dizaines KW_c → quelques MW_c	
Connectés aux réseaux	Larges Systèmes	- Utilitaire de grande échelle : Station de Génération Solaire ; Parque Solaire ; Ferme Solaire ; Centrale Solaire ; Usine Solaire... Exemples : - "Solar Star" station de 579 MW_c étendue sur 13 Km^2 (California, USA) - "Perovo Solar" parque de 100 MW_c étendu sur 2 Km^2 (Perovo, crimera, Ukraine) - "Wald Polenz Solar" parque de 52 MW_c étendu sur 22 Km^2 (Leipzig, Allemagne)
Systèmes hybrides	Systèmes Moyens ou Larges (surtout sur les îles) quelques centaines KW_c → quelques dizaines MW_c	- PV/T : Photovoltaïque - Thermique - CPV/T : Concentrateur PV - Thermique - PV/Diesel : Photovoltaïque - moteur diesel - PV/éolienne : Photovoltaïque - Éolienne - Combinaisons diverses existantes... Exemples : - L'îles "Pellwor" en Allemagne (PV-Diesel-Éolienne) - L'îles "Kythnos" en Grèce (PV-Éolienne)

I.3 Structure et modes d'opération de la cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif électronique fabriqué à base de matériaux semi-conducteurs sous la forme d'une jonction p-n. Lors de son illumination, le matériau absorbe la lumière, ce qui cause l'excitation des électrons et la génération des paires électrons-trous. Ainsi, on peut profiter des électrons libérés en les déplaçant ; ce qui constitue de l'énergie électrique.

Ce chapitre vise à citer les phénomènes originels agissant sur la cellule solaire, sans pénétrer dans les détails de la physique des semi-conducteurs, ainsi que l'exploration de sa structure interne ; ce qui permettra une compréhension adéquate des modes de fonctionnement des GPV ainsi que de leurs modélisations.

I.3.1 Structure de la cellule solaire

La structure d'une cellule solaire cristalline est fondamentalement constituée d'une jonction p-n de silicium dopé, comme c'est montré sur la figure I.4 [56].

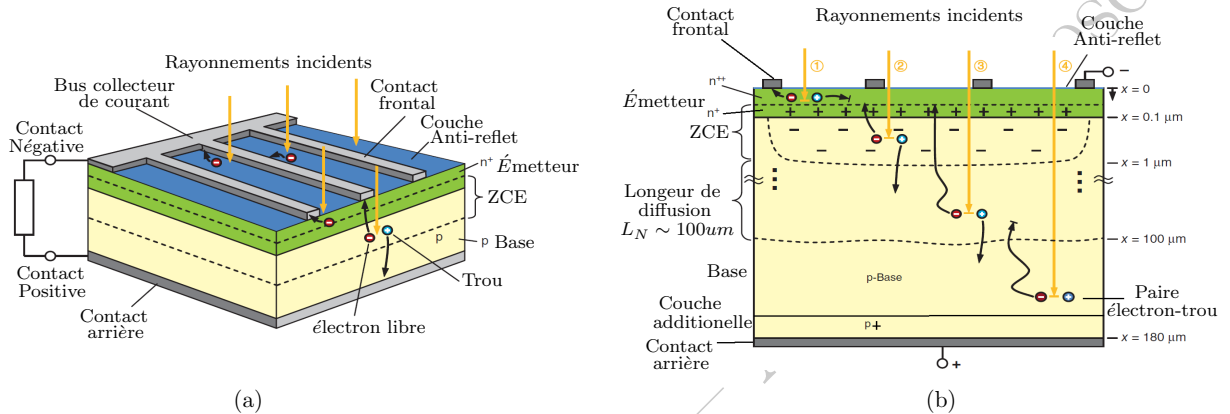


FIGURE I.4 – Section d'une cellule solaire typique. (a) Schéma en perspective. (b) Coupe transversale. [7]

Le fond de la structure constitue la *Base* de la jonction formée essentiellement par deux couches : silicium fortement dopé p^+ suivi par le silicium dopé p du bas vers le haut. Au sommet, c'est l'*Émetteur* de la jonction formé aussi par deux couches : du silicium fortement dopé n^+ suivi par le silicium dopé n du haut vers le bas. Les termes *Base* et *Émetteur* sont des termes des transistors bipolaires utilisés aussi pour les cellules solaires. Au milieu, un champ électrique de diffusion s'installe entre la *Base* et l'*Émetteur* constituant la zone de charge d'espace *ZCE* ou encore région de déplétion.

Sur la face de l'*Émetteur*, un peigne de conducteurs métalliques frontal est posé pour collecter les électrons générés sur la surface de la structure. Les barres collectrices de courant (rail) servent à recueillir l'ensemble de l'énergie produite et à la transférer vers le pôle positif de la cellule. D'une manière similaire, l'arrière de la cellule (contact arrière) est vêtu d'une interface métallique semi-conducteur consacrée à la recombinaison des paires électrons-trous ; ce qui constitue le pôle négatif de la cellule.

Lorsque la cellule est éclairée, chaque photon absorbé génère une paire électron-trou. En reliant une charge aux deux pôles de la cellule solaire, cela peut soutirer de l'énergie électrique. En effet, les particules (électrons et trous) sont séparées du champ électrique de la *ZCE* puis déplacées vers les pôles : les trous à travers la *Base* puis vers le contact arrière et les électrons à travers l'*Émetteur* vers les contacts frontaux. Après le passage à travers la charge, chaque électron se réunit avec un trou et complète ainsi le circuit. La génération d'une différence de potentiel aux bornes d'une jonction de deux matériaux différents en réponse à un rayonnement

solaire est appelée *l'effet photovoltaïque*. Le courant généré dépend principalement et directement des quantités de photons absorbés par la structure, autrement dit, de l'intensité de la lumière incidente à la jonction. Ce courant est appelé *le photocourant* ou bien *le courant photoélectrique*.

I.3.2 Modes d'opérations de la jonction solaire

Toutes les cellules solaires contiennent des jonctions entre des matériaux différents de dopages différents. Compte tenu du rôle fondamental de ces jonctions dans le fonctionnement de la cellule solaire, leur comportement physique est analysé dans cette section. En général, on distingue quatre types de jonctions p-n :

Homo-jonction p-n : C'est la jonction p-n fabriquée par le même matériau semi-conducteur tel que c-Si (cas des cellules solaires monocristallines).

Hétéro-jonction : C'est une jonction p-n qui est formée par deux semi-conducteurs chimiquement différents

Jonction p-i-n : C'est une jonction dans laquelle la zone du champ électrique interne est étendue en insérant une couche intrinsèque i entre la couche de type-p et la couche de type-n. La couche i se comporte comme un condensateur qui étend le champ électrique formé par la jonction p-n.

Jonction MS : C'est une jonction entre un métal et un semi-conducteur, comme le contact Schottky formé au niveau de l'interface métal/semi-conducteur.

Dans ce qui suit, on adopte le type homojonction pour étudier la physique interne de la cellule solaire de type monocristallin.

I.3.2.1 Génération, diffusion et Recombinaison

La *génération radiative* est le phénomène originel de génération des paires électrons-trous. Lorsque la lumière pénètre dans un matériau (par analogie, la chaleur), elle sera (partiellement) absorbée en se propageant à travers la structure. Si l'énergie du photon (phonon dans le cas de la chaleur) est supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur, elle sera capable de rompre la liaison de valence et d'exciter un électron vers la bande de conduction en laissant derrière un trou dans la bande de valence. C'est bien le procédé de génération (génération thermique), qui est la cause essentielle de l'apparition du courant photonique (thermique)[35].

La *diffusion* est un procédé dans lequel les particules ont tendance à se propager à partir des régions de forte concentration de dopage de particules vers les régions de faible concentration de dopage de particules en raison du mouvement thermique aléatoire. La force motrice de diffusion est un gradient de concentration de particules. Le courant résultant de la diffusion est proportionnel au gradient de concentration des particules. Il croît exponentiellement en fonction de la tension appliquée sur la jonction de la cellule solaire. Le terme exponentiel est en liaison directe avec la fonction de distribution de *Fermi – Dirac* : $f(E)$ qui décrit le rapport des états remplis par un électron avec les autres états autorisés à une énergie E donnée.

L'augmentation de la température augmente la vitesse de collision des particules chargées avec les atomes vibrants des réseaux moléculaires. Lorsque le nombre de collisions augmente, la mobilité des particules diminue ; ce qui se traduit par la dégradation du rendement de la jonction avec l'augmentation de la température [10].

La *recombinaison* est un phénomène qui détermine fortement le rendement des cellules solaires car il réduit le courant collecté et par conséquent celui utilisé de la cellule solaire. En effet, tout électron qui existe dans la bande de conduction est dans un état instable et il finira par se stabiliser à une position de plus faible énergie dans la bande de valence. Lorsque cela se produit, l'électron occupe une place vacante dans la bande de valence ; ce qui élimine effectivement un trou. Ce processus est appelé recombinaison. Il existe trois types principaux de recombinaison dans le volume d'un semi-conducteur monocristallin.

- La recombinaison directe
- La recombinaison Auger
- La recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)

Le dernier mécanisme de recombinaison (SRH) est le plus important pour la cellule solaire, car il est le processus de recombinaison dominant dans les semi-conducteurs dans la plupart des conditions de fonctionnement. Lorsque le cristal n'est pas pur en raison d'atomes étrangers, il se produit des défauts au niveau du réseau cristallin. Ces centres de recombinaison introduisent des états pièges autorisés. Un électron peut être piégé dans un tel défaut et se recombiner avec un trou attiré par l'électron piégé. En conséquence, l'excès d'énergie est dissipé dans le réseau sous forme de chaleur [11].

Le taux de photogénération est souvent largement plus élevé que le taux de recombinaison, de telle sorte que l'effet de recombinaison peut être considéré comme négligeable. Toutefois, le taux de recombinaison détermine fortement la densité du courant de saturation. Une densité de courant de saturation élevée a un effet néfaste sur la tension de la cellule solaire, et donc sur son efficacité de conversion d'énergie.

I.3.2.2 Jonction solaire à l'équilibre

Lorsque deux semi-conducteurs de type-p et de type-n sont regroupés ensemble, la grande différence des concentrations d'électrons et de trous entre les deux régions provoque tout d'abord un courant de diffusion des électrons du matériau de type-n à travers la jonction métallurgique (l'interface entre les régions de type n et de type-p) vers le matériau de type-p, et réciproquement un courant de diffusion de trous du type-p vers le type-n. En raison de ce processus de diffusion de la région près de la jonction métallurgique, celle-ci devient presque complètement déchargée des porteurs de charge mobiles. L'épuisement des porteurs de charge engendre une zone de charge d'espace ZCE ou encore appelée région de déplétion. Les régions en dehors de la ZCE, dans lesquelles la neutralité de charge est conservée, sont désignées par les régions quasi-neutres. La ZCE autour de la jonction métallurgique est le résultat de la formation d'un champ électrique interne qui force les porteurs de charge à se déplacer dans la direction opposée à celle du gradient de la concentration. Les courants de diffusion continuent à circuler jusqu'à ce que les forces

agissant sur les porteurs de charge (le gradient de concentration et le champ électrique interne) se compensent mutuellement. En ce moment, la force motrice de transport des charges disparaît et aucun flux de courant ne circule à travers la jonction p-n [12].

La jonction p-n représente un système de particules chargées en équilibre de diffusion dans lequel le potentiel électrochimique est constant et indépendant de la position. En raison du champ électrique, une différence de potentiel électrostatique est créée entre les limites de la région de charge d'espace. À travers la région de déplétion, les changements de la concentration des porteurs de charges sont compensés par les changements du potentiel électrostatique. Dans les régions quasi-neutres, la concentration des électrons et des trous est la même que dans les semi-conducteurs dopés isolés.

Dans la région de déplétion du semi-conducteur de type-n, c'est la concentration d'atomes donneurs chargés positivement N_D qui détermine la charge de l'espace dans cette région. Dans le semi-conducteur de type-p, la concentration des atomes accepteurs chargés négativement N_A détermine la charge d'espace dans la région de déplétion.

I.3.2.3 Jonction solaire sous-éclairage

Quand une jonction p-n est illuminée, des paires électron-trou supplémentaires sont générées dans le semi-conducteur. La concentration des porteurs minoritaires (des électrons dans la région de type-p et des trous dans la région de type-n) augmente fortement. Cette augmentation de la concentration des porteurs minoritaires conduit à leur circulation à travers la région de déplétion vers les régions quasi-neutres. Les électrons circulent de la région de type-p vers la région de type-n et les trous de type-n vers le type-p. La circulation des porteurs photogénérés provoque le courant de photogénération I_{ph} , qui s'additionne avec le courant de génération thermique I_{gen} . Lorsqu'aucun contact extérieur n'est établi entre les régions de type-n et de type-p (la jonction est en circuit ouvert), aucun courant ne peut circuler à l'intérieur de la jonction p-n. Cela signifie que le courant résultant du flux de porteurs photogénérés et générés thermiquement doit être équilibré par le courant de recombinaison inverse [7].

Le courant de recombinaison I_{rec} augmente par la diminution de la barrière du potentiel électrostatique à travers la région de déplétion. La barrière du potentiel électrostatique à travers la jonction est abaissée d'une quantité V_{oc} (on désigne par V_{oc} la tension en circuit-ouvert). Sous-éclairage, lorsque les régions de type-n et de type-p sont court-circuitées, le courant photogénéré circule à travers le circuit externe. Sous la condition de court-circuit, la barrière du potentiel électrostatique ne change pas, mais par la forte variation du niveau de quasi-Fermi à l'intérieur de la région de déplétion, on peut confirmer que le courant circule à l'intérieur du semi-conducteur. Lorsqu'une charge est connectée aux bornes de la jonction p-n, seule une fraction du courant photogénéré circulera à travers le circuit externe. La différence de potentiel électrochimique entre la région de type-n et la région de type-p est abaissée par une chute de tension par la charge. Ceci à son tour réduit le potentiel électrostatique au-dessous de la région de déplétion qui se traduit par une augmentation du courant de recombinaison. Dans l'approximation de superposition, le courant net circulant à travers la charge est déterminé comme étant

la somme des courants de génération thermique et photonique et du courant de recombinaison. La chute de tension au niveau de la charge peut être simulée en appliquant une tension de polarisation directe de la jonction. Par conséquent, l'équation qui décrit le comportement de la jonction sous tension appliquée est incluse pour décrire le courant net de l'éclairage de la jonction p-n.

$$I(V) = I_{rec}(V) - I_{gen} - I_{ph} \quad (I.1)$$

L'équation (I.1) est appelée équation de *Shockley*, qui décrit la caractéristique courant-tension ($I - V$) d'une diode p-n idéale. C'est l'équation fondamentale de la physique des dispositifs de la microélectronique. La caractéristique $I - V$ éclairée de la jonction p-n est la même que la caractéristique en obscurité, mais elle est décalée vers le bas par la densité de courant photogénéré I_{ph} . La dérivation détaillée de la densité de courant photogénéré de la jonction p-n est présentée dans la littérature [35]. Sa valeur sous un taux de génération uniforme, G_u , est

$$I_{ph} = q \cdot A \cdot G_u \cdot (L_N + W + L_P) \quad (I.2)$$

Avec :

$$G_u = \alpha \cdot N_u \cdot e^{-\alpha X} \quad (I.3)$$

où :

- L_N : longueur de diffusion des porteurs minoritaires pour des électrons.
- L_P : longueur de diffusion des porteurs minoritaires pour des trous.
- W : la largeur de la région de déplétion.
- α : coefficient d'absorption en unité de surface (cm^{-1}).
- X : distance de profondeur dans le matériau SC.
- N_u : le flux de photons uniforme à la surface (photons/unité de surface/s).
- A : surface de la cellule.
- q : charge d'un électron.

Cela signifie que seuls les porteurs générés dans la région de déplétion et dans les régions jusqu'à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de la région de déplétion contribuent au courant photogénéré. Lors de la conception de l'épaisseur d'une cellule solaire, l'épaisseur de l'absorbant ne doit pas être plus épaisse que la région à partir de laquelle les supports contribuent au courant photogénéré, où I_s est la densité du courant de saturation de la jonction p-n, donnée par :

$$I_s = qn_i^2 \left(\frac{D_N}{L_N N_A} + \frac{D_P}{L_P N_D} \right) \quad (I.4)$$

Avec :

- D_N : constante de diffusion des électrons dans la zone P.
- D_P : constante de diffusion des trous dans la zone N.
- N_A : concentration des accepteurs.
- N_D : concentration des donneurs.
- n_i : concentration intrinsèque.

La démonstration détaillée de la densité du courant de saturation de la jonction p-n est disponible dans la littérature [7]. La densité de courant de saturation dépend d'une manière complexe des paramètres fondamentaux des semi-conducteurs. Idéalement, la densité du courant de saturation doit être aussi faible que possible et cela nécessite une conception optimale et équilibrée des propriétés semi-conductrices de type-p et de type-n. Par exemple, une augmentation de la concentration du dopant diminue la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ; ce qui signifie que le produit optimal de ces deux grandeurs nécessite un équilibre délicat entre ces deux propriétés.

La recombinaison des porteurs majoritaires en raison de la diffusion des porteurs minoritaires injectés dans la majeure partie des régions quasi-neutres cause une diminution de la concentration des porteurs majoritaires par rapport à celle en équilibre. La baisse de la concentration des porteurs majoritaires est compensée par l'écoulement des porteurs majoritaires à partir des électrodes dans la masse. De cette manière, le courant circule à travers la jonction p-n sous tension de polarisation directe. Pour la haute tension de polarisation inverse, le facteur de Boltzmann dans l'équation I.1 devient très faible et peut être négligé. La densité de courant est donnée par :

$$I(V) = -I_s - I_{ph} \quad (\text{I.5})$$

et I_s représente le flux de porteurs minoritaires générés thermiquement à travers la jonction.

I.3.3 Pertes électriques dans la cellule solaire

Le rendement de la cellule solaire est limité par un ensemble de pertes causées par divers phénomènes (figure I.5). Les pertes optiques ne font pas partie de notre recherche. On s'intéressera seulement aux pertes électriques.

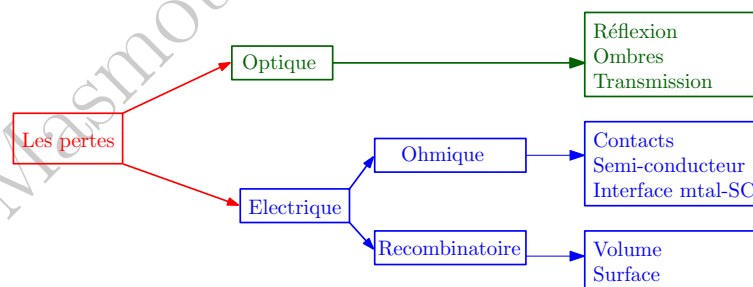


FIGURE I.5 – Pertes électriques dans la cellule solaire.

Pertes ohmiques

Il y a des pertes électriques dans les doigts du peigne de conducteurs métalliques frontaux à la surface de la cellule. De plus, les pertes ohmiques se produisent aussi dans le matériau semi-conducteur puisque la conductivité du matériau dopé est limitée. Des courants élevés doivent être dirigés vers les contacts avant en particulier avec les émetteurs minces. Enfin, il existe des pertes au niveau de la jonction métal/semi-conducteur (contact Schottky).

Pertes de recombinaison

Le mécanisme le plus important est la recombinaison due à l'imperfection. Elle se produit lorsque le cristal théoriquement idéal est impur en raison d'atomes étrangers, d'erreurs de structure du cristal ou similaire. Dans ce cas, la zone interdite n'est plus vide, car elle contient des niveaux supplémentaires. Pour un électron, des niveaux supplémentaires représentent une activité comme les niveaux d'étape sur laquelle une descente dans la bande de valence devient plus simple et donc plus probable. Les centres de recombinaison causés par les atomes étrangers sont également appelés pièges. En plus des atomes étrangers, aussi des erreurs de cristal telles qu'un endroit vide du réseau ou des déplacements de cristal conduisent à une augmentation de la recombinaison. Une surface de cristal est une perturbation du cristal idéal infiniment prolongée. Les électrons des atomes extérieurs ne trouvent pas les partenaires de liaison et restent obligatoirement en liaisons ouvertes. Ceux-ci conduisent alors à des recombinaisons indésirables de surface.

I.4 Paramètres et caractéristiques d'une cellule solaire

I.4.1 Systèmes de référence et de fonctionnement

On présente dans les figures I.6.a et I.6.b deux systèmes de références (Charge/Générateur) pour le fonctionnement en quatre quadrants d'une jonction p-n dans l'obscurité et sous éclairage.

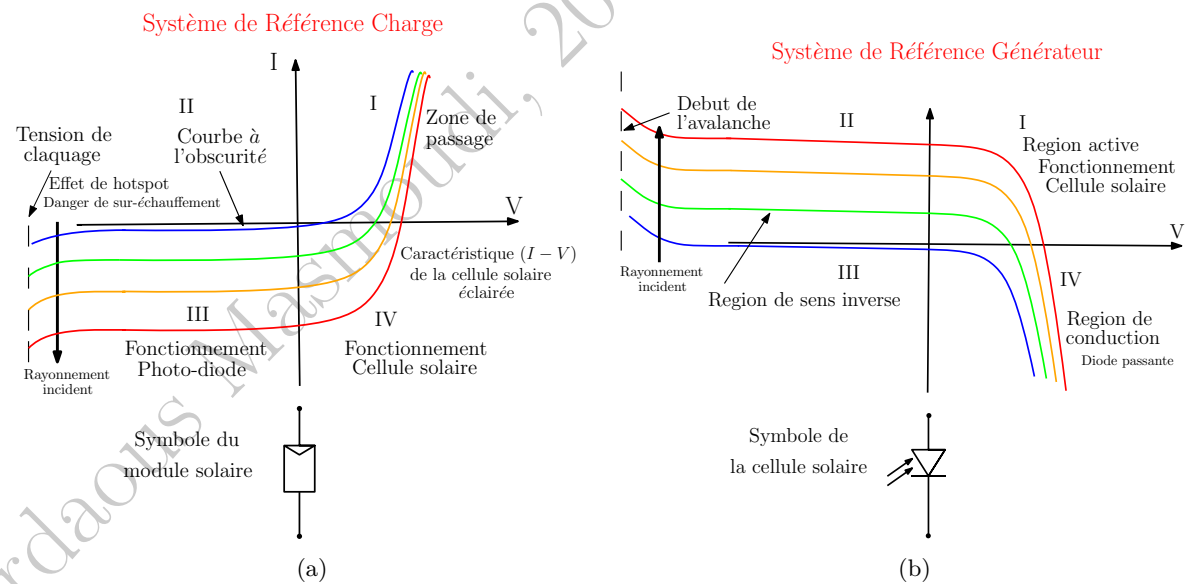


FIGURE I.6 – Caractéristiques ($I - V$) en quatre quadrants de la cellule solaire suivant le système de référence. (a) Système de référence Charge. (b) Système de référence Générateur.

Dans le système de référence charge (figure I.6.a), la tension V est appliquée sur l'appareil, puis le courant I considéré comme positif circule à partir de la source de tension vers la jonction p-n. Tant qu'aucune lumière brille sur la jonction p-n, elle se comporte comme une diode non polarisée. Seulement avec une tension inverse, de petits flux de courant inverse circulent, appelés

souvent courants d'obscurité. Dès que la lumière brille sur la diode, un courant photoélectrique indépendant de la tension V est ajouté à la courbe caractéristique ($I - V$) de la diode. Comme il circule dans le sens inverse, il déplace la courbe ($I - V$) vers le bas. L'utilisation de la photodiode dans le quadrant III est appelée opération photodiode. Les photodiodes sont généralement utilisées avec une tension inverse, par exemple, pour servir de détecteurs pour les récepteurs de données optiques. Dans le quadrant IV, la photodiode est utilisée comme cellule solaire : avec une tension positive appliquée, le résultat est un courant négatif.

La courbe caractéristique d'une cellule solaire correspond au principe d'une jonction p-n et plus particulièrement d'une photodiode. Cependant, avec la cellule solaire, le système de référence générateur est la plupart du temps sélectionné. Dans le système de référence générateur, la tension V est mesurée à la source d'énergie qui est la cellule solaire et le courant positif I circule de la cellule vers la charge extérieure. Par rapport à la figure I.6.a, l'axe de la tension est maintenu, seul le signe du courant est inversé. La génération d'énergie se fait maintenant dans le premier quadrant et, pour cette raison, la plupart du temps seulement la courbe caractéristique du premier quadrant de la cellule solaire est représentée. Au lieu du symbole de la photodiode, le symbole de cellule solaire spéciale est devenu standard (voir la figure I.6).

I.4.2 Paramètres électriques de la cellule solaire

Les principaux paramètres utilisés pour caractériser les performances des cellules solaires sont la puissance de crête P_m , le courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit-ouvert V_{oc} , et le facteur de remplissage FF . Ces paramètres sont déterminés à partir de la caractéristique électrique ($I - V$) sous éclairage, comme c'est illustré sur la figure I.7, le rendement de conversion η peut être déterminé à partir de ces paramètres.

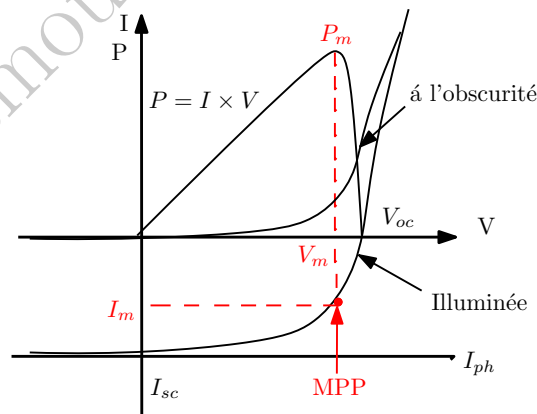


FIGURE I.7 – Caractéristique d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage.

Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit I_{sc} est le courant qui circule à travers le circuit externe lorsque les électrodes de la cellule solaire sont court-circuitées. Le courant de court-circuit d'une cellule solaire dépend de la densité incidente du flux de photons, déterminée par le spectre de la lumière incidente. Pendant les mesures de cellules solaires classiques, le spectre est normalisé au spectre

AM1.5. Dans le cas idéal I_{sc} est égal au courant photonique I_{ph} ($I_{sc}=I_{ph}$), dans une cellule solaire réelle les pertes électriques influencent le courant de court-circuit.

Dans les cellules solaires monocristallines du laboratoire, on mesure un courant I_{sc} supérieur à $42mA/cm^2$, tandis que la cellule solaire commerciale possède un courant I_{sc} supérieur à $35 mA/cm^2$.

Tension de circuit-ouvert

La tension en circuit ouvert est la tension à laquelle aucun courant ne circule dans le circuit externe. Elle est la tension maximale que peut fournir une cellule solaire. V_{oc} correspond à la tension de polarisation en sens direct, durant laquelle le courant d'obscurité compense le photocourant. Dans le cas idéal, la tension en circuit-ouvert peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (I.6)$$

Cette équation montre que V_{oc} dépend de la densité de courant photogénéré I_{ph} et du courant de saturation I_s de la cellule solaire.

Le courant de saturation I_s dépend du taux de recombinaison dans la cellule solaire. Par conséquent V_{oc} est une mesure de la quantité de recombinaison dans le dispositif.

Les cellules solaires du laboratoire de silicium monocristallin ont une tension V_{oc} de l'ordre de $720 mV$ dans les conditions standards AM1.5, tandis que les cellules solaires commercialisées ont généralement une tension V_{oc} supérieure à $600 mV$.

Point de Puissance Maximale

La cellule solaire fournit des puissances différentes en relation avec le point de fonctionnement réel dans lequel elle est actionnée. Le point auquel la puissance atteint une valeur maximale est appelé le point de puissance maximale *MPP* (*Maximal Power Point*).

Comme la puissance P d'un point de fonctionnement est égale au produit $V \times I$, cette puissance atteint son maximum P_m dans le cas du *MPP*. Ce cas est représenté sur la figure I.7, les valeurs du courant et de la tension associées *MPP* sont appelées I_m et V_m .

Facteur de Remplissage (Fill Factor)

Le facteur de remplissage FF (en anglais *Fill Factor*), décrit la relation entre la puissance maximale P_m à l'*MPP* et le produit de la tension en circuit-ouvert V_{oc} avec le courant de court-circuit I_{sc} (voir Figure I.7). Le FF indique la taille de la surface en point de fonctionnement à l'*MPP* par rapport à la surface $V_{oc} \times I_{sc}$. Le facteur de remplissage peut être exprimée par :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (I.7)$$

Le facteur de remplissage est une mesure de la qualité d'une cellule. Des valeurs typiques pour les cellules en silicium monocristallin sont comprises de 0,75 à 0,85 et pour les cellules en couches minces, elles sont comprises de 0,6 à 0,75.

Rendement de conversion

Le rendement de conversion η est calculé comme étant le rapport entre la puissance maximale générée P_m et la puissance optique incidente P_{opt} . La valeur d'irradiance P_{opt} de $1000 W/m^2$

pour le spectre $AM1.5$ est devenue un standard pour mesurer le rendement de conversion des cellules solaires :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{opt}} = \frac{V_m I_m}{P_{opt}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{opt}} \quad (I.8)$$

Des valeurs typiques du rendement de conversion d'une cellule solaire en silicium cristallin se situent dans l'intervalle de 17% à 21%.

I.4.3 Conditions de tests et données du fabricant

I.4.3.1 Conditions de Tests Standards : *STC*

Les problèmes avec les comparaisons des caractéristiques mesurées des différentes cellules solaires ont conduit à la notion de conditions de test standard *STC* (*Standard Test Condition*). En effet, l'utilisation de cette norme de référence pour tester les performances des cellules solaires permet de les comparer objectivement dans des limites d'erreur et d'incertitude restreintes.

Ce test de performance fait l'objet de multiples normes européennes (IEC 60904-1) et internationales (ASTM E948) et il fournit une méthode reconnue pour les essais et les rapports du comportement électrique des cellules photovoltaïques.

L'*STC* comprend la température de cellule, l'éclairement global incident, et la distribution spectrale de la lumière de référence. Le tableau I.3 résume les spécifications dans l'*STC*.

TABLEAU I.3 – Spécifications des Conditions de Test Standard

Les Conditions de Test	Symbole	Valeur
l'éclairement	G_{ref}	1000 W/m ²
La température de la cellule	T_{ref}	25 °C
Spectre du lumière	AM_{ref}	1.5

I.4.3.2 Température d'Opération Nominale de la Cellule : *NOCT*

La température influence fortement les performances d'un module PV. Alors que le niveau de l'éclairement incident peut facilement être déterminé en le mesurant avec un pyranomètre, la température atteinte à l'intérieur de la cellule est très difficilement évaluable.

Afin de donner une estimation de la température moyenne de fonctionnement de la jonction de la cellule, les fabricants fournissent également avec les performances dans l'*STC* la Température d'Opération Nominale de la cellule, que l'on appelle *NOCT* (*Nominal Operating Cell Temperature*). Cette valeur correspond aux performances d'une cellule dans les conditions résumées par le tableau I.4.

TABLEAU I.4 – Spécifications des Conditions d'Opération Nominale

Les Conditions de Test	Symbole	Valeur
l'éclairement	G_{NOCT}	800 W/m ²
La température ambiante	T_a	20 °C
Vitesse du vent externe	$Vitesse_{vent}$	1 m/s

Les modèles thermiques simplifiés utilisent une relation linéaire entre l'éclairement solaire incident G et la différence entre la température de la jonction de la cellule et la température ambiante ($T - T_a$), où le NOCT est utilisé comme un point de référence :

$$T = T_a + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} G \right) \quad (I.9)$$

I.4.3.3 Données du fabricant

La cellule photovoltaïque (cellule témoin), proposée pour l'étude dans les travaux de simulation et d'expérimentations, est la cellule monocristalline commercialisée sous la référence *JA Solar, JAC M5SF-2*.

Les performances électriques de la cellule photovoltaïque fournies par le fabricant consistent à mesurer le courant électrique en fonction de la tension : caractéristique électrique ($I - V$), lorsqu'elle est éclairée par une source de lumière stable appropriée et maintenue dans un niveau de température fixe, c'est-à-dire dans les Conditions de test standard STC.

Les spécifications électriques de la cellule témoin dans l'STC sont résumées dans le tableau I.5

TABLEAU I.5 – Spécifications électriques de la cellule solaire “JAC M5SF-2” dans l'STC

Grandeurs électriques	Symbole	Valeur
Puissance maximale	P_{mref}	2.97 W
Tension au point de puissance maximale	V_{mref}	0.537 V
Courant au point de puissance maximale	I_{mref}	5.531 A
Tension du circuit-ouvert	V_{ocref}	0.637 V
Courant de court-circuit	I_{scref}	5.888 A
Coefficient de température de puissance	K_p	-0.370 % /K
Coefficient de température de Tension	K_v	-0.241 % /K
Coefficient de température du courant	K_i	0.033 % /K
$\left. \frac{dI}{dV} \right _{I=I_{sc}}$	$\Delta_{I_{sc}}$	-0.003945 S
$\left. \frac{dI}{dV} \right _{V=V_{oc}}$	$\Delta_{V_{oc}}$	-150.6667 S
Facteur de remplissage (en%)	FF	79.19 %
Rendement	η	19.2~20 %
Température d'opération nominale de la cellule	$NOCT$	45 °C

Le fabricant de cellules photovoltaïques fournit, dans la fiche technique (*datasheet*) du produit, l'évolution de la caractéristique ($I - V$) de la cellule PV dans l'STC comme présenté par la figure I.8.

Deux paramètres supplémentaires doivent être déduits de la courbe ($I - V$) de la figure I.8 fournie dans le *datasheet*, qui sont : la dérivée du courant par rapport à la tension au voisinage du point de court-circuit $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(0, I_{sc})}$ et la dérivée du courant par rapport à la tension au voisinage du point du circuit-ouvert $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(V_{oc}, 0)}$. Dans ce cas, un logiciel couramment utilisé nommé “*ScanIt*” est impliqué dans la reproduction de la courbe de la fiche technique et dans la définition des dérivées aux points indiqués. Les paramètres calculés sont ajoutés aux spécifications électriques du tableau I.5.

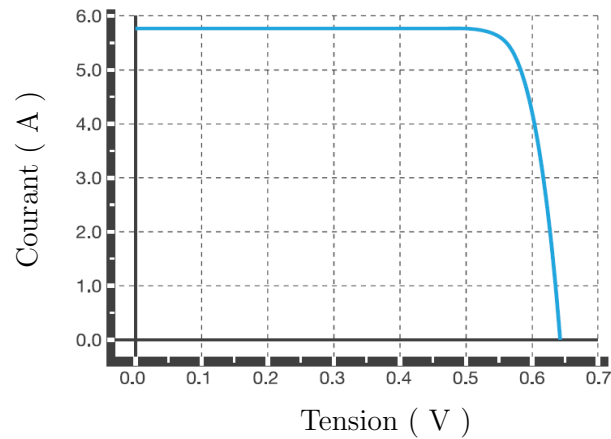


FIGURE I.8 – Caractéristique électrique ($I - V$) du fabricant de la cellule solaire “JAC M5SF-2” dans l’STC.

I.5 Effet de l’éclairement et de la température sur la performance de la cellule solaire

L’installateur des modules PV ne s’intéresse généralement pas à la puissance nominale (dite puissance crête) donnée par le fournisseur à l’STC. En effet, les Conditions de Test Standard (STC) des modules PV ne sont pas représentatives des conditions réelles de leurs fonctionnements. Par exemple, des niveaux plus élevés de rayonnements solaires incidents peuvent provoquer l’augmentation de la température d’un module de plusieurs degrés au-dessus de la température de l’STC (25°C), ce qui signifie la dégradation des performances du module. Afin d’estimer efficacement la production d’énergie en temps réel à partir d’un ensemble de données et de paramètres ambiants, il est essentiel de rendre compte de l’effet de la variation de la température et de l’éclairement sur le rendement du générateur solaire. Sur la figure I.9 on porte les caractéristiques ($I - V$) de la cellule solaire témoin à l’STC, avec une diminution de l’éclairement jusqu’à 500 W/m^2 puis avec une augmentation de la température jusqu’à 50°C .

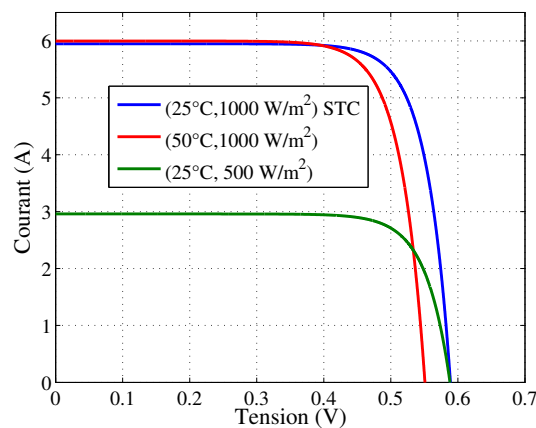


FIGURE I.9 – Caractéristiques électriques ($I - V$) de la cellule solaire “JAC M5SF-2” sous plusieurs conditions climatiques.

I.5.1 Effet de l'éclairement

Intuitivement, les performances d'une cellule solaire diminuent considérablement avec la diminution de l'intensité incidente de la lumière sur le module par rapport à l'STC. La cause de cette dégradation est due à la dépendance de la tension en circuit-ouvert et du courant en court-circuit à la lumière incidente, comme c'est décrit dans la section 1.4.2. L'évaluation de l'ampleur de cette réduction n'est cependant pas triviale, comme le fabricant du module solaire ne prévoit pas explicitement un facteur de réduction de l'efficacité pour tous les niveaux d'intensités lumineuses. Cependant, on peut explicitement observer sur la figure I.9 la proportionnalité du courant par rapport à l'éclairement. Certes, à 500 W/m^2 de luminosité le courant devient presque à moitié par rapport à la caractéristique à 1000 W/m^2 (STC). En effet, ceci est dû à la proportionnalité du courant photonique généré I_{ph} à la lumière incidente, ce résultat est montré physiquement (voir section 1.3.2.3) et il conduit à établir la relation I.10. Dans le cas du modèle idéal de la cellule solaire, le courant photonique coïncide exactement avec le courant de court-circuit et ainsi on peut utiliser la relation I.10 pour tout courant. Pour les modèles les plus exacts, il existe plusieurs types de pertes de courant, surtout au niveau de la jonction, ce qui conduit à des expressions de courants plus compliquées.

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(G_{ref}, T) \quad (\text{I.10})$$

Où

- G est l'éclairement actuel.
- T est la température de la jonction actuelle
- $\frac{G}{G_{ref}}$ est le facteur de proportionnalité

I.5.2 Effet de la température

D'une manière pareille, le comportement des modules solaires vis-à-vis des changements de la température est aussi d'un grand intérêt. La figure I.9 montre la diminution de la valeur de la tension en circuit-ouvert V_{oc} à une température de 50°C par rapport à la caractéristique à 25°C (STC), et il en est ainsi pour l'ensemble des valeurs de tension. En revanche, on peut constater que les valeurs des courants augmentent légèrement avec l'augmentation de la température.

Grossièrement, la légère augmentation du courant de court-circuit à des températures plus élevées est complètement compensée par la diminution flagrante de la tension en circuit-ouvert. L'effet global est d'une diminution générale linéaire de la puissance maximale résultante et donc d'une diminution du rendement de la cellule et du facteur de remplissage. Cet effet est dû à une augmentation de la concentration de porteurs intrinsèques à des températures plus élevées qui à son tour conduit à une augmentation de l'intensité I_s du courant inverse de saturation, qui représente une mesure de la fuite des porteurs à travers la jonction de la cellule. Comme c'est expliqué auparavant, la dépendance exponentielle à la température de I_s est la cause principale de la réduction linéaire de V_{oc} avec la température.

Par ailleurs, la légère augmentation du courant généré est due à une augmentation modérée

du courant photoélectrique résultant d'une augmentation du nombre de porteurs générés thermiquement. La réduction globale de la puissance à haute température montre que les climats froids et ensoleillés sont les meilleurs environnements pour installer un système solaire.

L'effet de déviation de la caractéristique d'un module dû au changement de la température par rapport à l'état de référence (STC) est exprimé par les coefficients de températures (K_i , K_v , K_p) donnés par le fabricant dans son document technique. Lorsqu'on possède les valeurs des coefficients de température, on peut estimer la valeur de certains paramètres en appliquant les relations généralisées suivantes : Pour les courants on a :

$$I(G_{ref}, T) = I_{ref} + K_i(T - T_{ref}) \quad (I.11)$$

Pour les tensions on a :

$$V(G_{ref}, T) = V_{ref} + K_v(T_c - T_{ref}) \quad (I.12)$$

I.6 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de faire le tour d'horizon sur différentes technologies et applications de la cellule solaire photovoltaïque, ainsi que l'étude de ses caractéristiques fondamentales. Tout d'abord, on a présenté un aperçu sur l'histoire de la cellule solaire et le développement de ses technologies ainsi que ses diverses applications. Par la suite, on a fait des rappels sur les fondements de la physique des semi-conducteurs, et on a étudié la structure et le mode d'opération d'une cellule solaire monocristalline à l'obscurité et sous éclairage. La partie suivante a mis l'accent sur les paramètres caractéristiques de la cellule solaire ainsi que sur les données du fabricant dans les conditions de test standards "STC" et dans les conditions de température nominale de la cellule "NOCT".

Chapitre II

Modélisations de la cellule solaire photovoltaïque

Résumé : *Ce chapitre porte sur la modélisation de la cellule solaire photovoltaïque à l'aide de cinq modèles électriques équivalents : le modèle idéal, le modèle à une résistance série, le modèle qui suit à une diode, le modèle à deux diodes et le modèle à trois diodes. Pour chacun de ces modèles, la détermination de ses paramètres internes inconnus s'effectue selon deux méthodes de recherche, à savoir : (i) la méthode d'identification, et (ii) la méthode d'ajustement. Ce chapitre est clôturé par des résultats de simulation portant sur la comparaison entre les différents modèles étudiés ainsi que leurs validations théoriques et expérimentales.*

Mots clés : Cellule solaire photovoltaïque
Méthode d'identification, méthode d'ajustement
Modèles électriques équivalents,
Modèle idéal,
Modèle à une résistance série (Simplifié),
Modèle à une diode,
Modèle à deux diodes,
Modèle à trois diodes (multi-diodes),
Algorithmes de Newton, Algorithme Génétique, Algorithme du Gradient évolué,

II.1 Introduction

La meilleure exploitation de l'énergie offerte par un générateur PV et l'optimisation de son rendement nécessitent le développement d'un système de conversion de puissance adéquat puis l'élaboration d'une technique efficace de contrôle et de commande, qui s'harmonisent avec les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque utilisé. À ce niveau, se manifeste l'importance des phases de modélisation et de simulation. En effet, l'association des modules solaires avec les étages de conversion exige la bonne connaissance du comportement de ces modules qui peuvent, en cas de mauvaise utilisation, endommager ou détériorer l'efficacité du système. La simulation permet de reproduire les différents phénomènes physiques réels susceptibles de se produire, ce qui permet de concevoir un système de performance optimal. Cette étape s'avère alors indispensable avant de se lancer dans toute procédure de réalisation expérimentale ou de fabrication, car elle épargne les pertes de temps, d'efforts et surtout d'argent.

Pour être en mesure de développer un modèle de simulation d'un système de conversion photovoltaïque, qui intègre le générateur solaire photovoltaïque, l'étage d'adaptation continu-continu ou continu-alternatif, la charge et le système de stockage ainsi que son dispositif de commande, il est indispensable de définir un modèle électrique équivalent du générateur photovoltaïque.

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque. Jusqu'à présent, et après plusieurs années de recherche dans ce domaine, il n'y a pas eu de modèle définitif qui décrit parfaitement le fonctionnement qui se produit à l'intérieur de la plaquette solaire. En effet, la cellule solaire est un dispositif dynamique multiphysique. De plus, une multitude d'interactions se déroulent autour et à travers la jonction solaire. Chaque conception de modèle de la cellule solaire vise à souligner un comportement précis du dispositif. En considérant certaines hypothèses, il est possible de négliger les effets secondaires afin de se concentrer uniquement sur l'effet principal de l'étude. On trouve d'innombrables types de modèles, citons comme exemple : les modèles chimiques [14], les modèles physiques [15], les modèles thermiques [16], les modèles optiques [17], ainsi que les modèles électriques [18, 19, 20, 21] qui représentent le sujet principal de cette étude.

L'objectif principal de ce chapitre est le développement de différents modèles susceptibles d'être mis en œuvre. Afin de définir un modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, un système d'équations doit être établi et résolu pour déterminer les paramètres inconnus qui marquent les propriétés de la cellule.

La bonne définition d'un modèle électrique équivalent implique la détermination des paramètres internes du modèle qui s'adaptent avec le générateur PV d'intérêt. Pour cet objectif, deux approches sont proposées dans la littérature

- Approche d'identification paramétrique [22] : fondée sur les données qui correspondent à des points clés acquis principalement à partir du document technique (datasheet) du générateur photovoltaïque en question.
- Approche d'ajustement de courbe [23] : établie sur le meilleur ajustement des courbes

$(I - V)$ ou $(P - V)$ obtenu au moyen du modèle avec les données de référence issues de tests du module PV.

Une multitude de modèles électriques équivalents sont étudiés dans la littérature. Le modèle idéal a été discuté par “VILLALVA” [24] qui a proposé d’identifier le paramètre I_s au lieu d’utiliser la relation physique en fonction de l’énergie de bande. Le modèle à une résistance série a été proposé par “XIAO” et “DUNFORD” [25] qui ont supposé que tous les paramètres sont dépendants de l’éclairement et de la température. Le modèle à une diode a été proposé au début par “KENNERUD” [26] puis “PHANG” et “CHAN” [27] qui ont suggéré la méthode d’identification en s’appuyant sur des mesures expérimentales. Ce modèle a été bien discuté dans la littérature mais personne n’a tenu compte de la variation climatique. Pour le modèle à deux diodes, il a été proposé aussi par “PHANG” et “CHAN” [28] où ils ont utilisé des formulations mathématiques assez compliquées mais les résultats sont plus précis. “GOW” et “MANNING” [29] ont utilisé également le modèle double diodes, mais en recourant à des constantes d’identification ainsi qu’à des mesures expérimentales. Ce modèle a été aussi largement discuté tout en négligeant l’effet de la variation climatique. Concernant les modèles multi-diodes, leurs apparitions sont récentes, liées à la propagation des algorithmes d’évolution. On cite “JIN JUN” [30] qui a proposé un modèle multidimensionnel généralisé et “KHANNA” [31] qui a étudié le modèle triple-diodes, tous les deux ont utilisé l’algorithme PSO (*Particle Swarm Optimization*). Il existe d’autres travaux qui visent les cellules multijonctions et utilisent d’autres algorithmes, sans toutefois tenir compte de la variation des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, on présente une brève introduction sur les méthodes de recherche des paramètres internes ainsi qu’une méthode de mesure expérimentale de la caractéristique $(I - V)$ de la cellule solaire. Par la suite, on détaille cinq modèles électriques équivalents avec la recherche des paramètres internes par l’une des deux méthodes tout en considérant la variation de la température T de la jonction et la variation de l’éclairement G . Les résultats des algorithmes de recherche permettront d’évaluer les paramètres internes de chaque modèle en fonction de la variation de la température. Ces paramètres seront utilisés pour implémenter les modèles de la cellule solaire sur Matlab-Simulink/SimpowerSystems. Ce chapitre sera clôturé par une étude comparative des différents modèles en exploitant les résultats de simulation.

II.2 Méthodes et expérimentations

II.2.1 Principe de la procédure d’identification des paramètres internes

Le principe fondamental adopté pour identifier les paramètres internes de la cellule photovoltaïque est d’exploiter les valeurs des caractéristiques électriques (V_{oc} , I_{sc} , V_m , I_m , K_i , K_v , ΔI_{sc} , ΔV_{oc}) fournies dans la fiche technique du fabricant ou directement mesurées de la cellule PV. Selon le modèle de la cellule solaire choisi, on peut cerner jusqu’à six paramètres électriques inconnus qui doivent être identifiés pour définir le modèle. La détermination de ces quantités est fondée sur la résolution d’un système d’équations non linéaires en considérant uniquement les informations du datasheet mentionnées dans le tableau I.5.

La courbe de la caractéristique électrique ($I - V$) de la cellule solaire est présentée par la figure II.1. Celle-ci illustre les points clés pour le principe de l'identification paramétrique, à savoir :

- Le point de Court-Circuit, à coordonnées $(V, I) = (0, I_{sc})$.
- Le point de Circuit-Ouvert, à coordonnées $(V, I) = (V_{oc}, 0)$.
- Le point de Maximum de Puissance, à coordonnées $(V, I) = (V_m, I_m)$.
- La pente de la caractéristique ($I - V$) au voisinage du court-circuit $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}}$.
- La pente de la caractéristique ($I - V$) au voisinage du circuit-ouvert $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc}}$.
- La pente de la caractéristique ($P - V$) au voisinage de la puissance maximale $\left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_m}$.

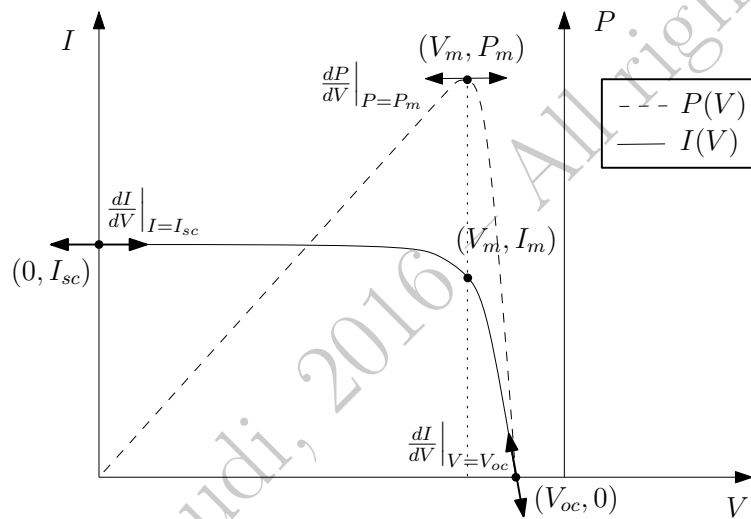


FIGURE II.1 – Les points clés de la caractéristique ($I - V$) de la cellule solaire.

Afin de formuler les pentes de la caractéristique ($I - V$) et ($P - V$) et à partir de la relation implicite liant I et V et de l'expression de la puissance P :

$$I = f(I, V) \quad (\text{II.1})$$

$$P = I.V \quad (\text{II.2})$$

on écrit que :

$$dI = \frac{\partial f}{\partial V} dV + \frac{\partial f}{\partial I} dI \quad (\text{II.3})$$

La dérivée du courant I par rapport à la tension V s'écrit comme suit :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\partial f}{\partial V}}{1 - \frac{\partial f}{\partial I}} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi, la dérivée de la puissance P par rapport à la tension V s'écrit comme suit :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{\frac{\partial f}{\partial V}}{1 - \frac{\partial f}{\partial I}} \quad (\text{II.5})$$

Avec le développement des outils et des plates-formes de calculs numériques, le process du calcul itératif devient une tâche assez abordable. Selon l'outil de programmation sélectionné, on peut développer un programme qui résout les équations non linéaires à une précision désirée. Ce travail propose deux méthodes de calcul dans l'environnement MATLAB :

1. Soit on utilise les fonctions de résolution des équations non linéaires prédéfinies dans l'environnement MATLAB par l'outil *Optimization Toolbox*¹, comme les commandes : *fzero* et *fsolve*.
2. Soit on développe un programme de calcul récursif qui se repose sur une ou plusieurs théories de programmation mathématique d'optimisation. Dans ce travail, on propose la méthode de *Newton*. (*Newton-Raphson*)

II.2.2 Principe de la procédure d'ajustement des courbes

Une autre approche pour rechercher les paramètres internes des modèles de la cellule solaire consiste à les extraire au moyen de la méthode d'ajustement des courbes.

L'ajustement d'une courbe, connu par "*Curve fitting*" est un processus de construction d'une courbe ou d'une fonction mathématique, qui a le meilleur ajustement à une série de points de données de référence. On dit également ajustement de paramètres (on peut utiliser le "franglais" pour dire "*fitter* une courbe" c'est-à-dire "ajuster une courbe").

On utilise, pour l'ajustement d'une courbe, un algorithme d'optimisation qui consiste à trouver le jeu de paramètres (p_1, p_2, \dots, p_n) tel que le critère de performance (ou évaluation) est minimal. Dans ce cas, on parle des algorithmes de minimisation de l'erreur.

On définit pour la modélisation une fonction f ayant pour n paramètres (p_1, p_2, \dots, p_n) , selon le modèle choisi, qui relie la tension V (abscisse) par le courant I (ordonnée), telle que :

$$I = f(p_1, p_2, \dots, p_n, I, V) \quad (\text{II.6})$$

La simulation permet d'obtenir :

$$\begin{bmatrix} (x_1, y_1^{sim}) \\ (x_2, y_2^{sim}) \\ \vdots \\ (x_m, y_m^{sim}) \end{bmatrix}$$

que l'on compare avec les m points de références :

$$\begin{bmatrix} (x_1, y_1^{ref}) \\ (x_2, y_2^{ref}) \\ \vdots \\ (x_m, y_m^{ref}) \end{bmatrix}$$

1. Pour en savoir plus sur ce toolbox, tapez `>> optimtool` sur la fenêtre de commande du logiciel MATLAB, où bien consultez le guide en ligne de *Mathworks* : <http://www.mathworks.com/products/optimization/>

Selon la nature du critère d'évaluation, on distingue deux types d'ajustements :

- L'ajustement algébrique vise à minimiser l'écart vertical (en ordonnée) entre la courbe du modèle mathématique et la courbe de référence insérée sous forme de base de données. On exprime le critère d'évaluation par $J = \min_{1 \leq i \leq m} (|y^{ref} - y^{sim}|)$.
- L'ajustement géométrique vise à minimiser la distance perpendiculaire à la courbe du modèle mathématique. Dans ce cas, il existe une multitude de formulations. On peut utiliser la régression quadratique par la minimisation du critère $J = \sum_{i=1}^m (y^{ref} - y^{sim})^2$.

En général, les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en deux catégories différentes : les méthodes exactes (Gauss, Newton, Gradient...) et les méthodes non exactes (algorithmes évolutifs). Les recherches ont montré que lorsque la complexité d'un problème augmente, les méthodes non exactes sont plus appropriées que les méthodes exactes.

Les méthodes non exactes, telles que les méthodes numériques, heuristiques et métaheuristiques, impliquent des formulations de calculs fondamentales et simplifiées. Même si elles ne peuvent pas assurer une solution optimale, la plupart peuvent parvenir à une solution quasi optimale.

Ce travail propose deux méthodes d'ajustement élaborées à partir de (i) un algorithme heuristique présenté par l'algorithme génétique et (ii) un algorithme métaheuristique présenté par l'algorithme du gradient évolué. En général, pour les méthodes d'optimisations non exactes, on utilise une fonction d'évaluation pour évaluer les performances d'une solution probable, appelée souvent "fitness". Comme par convention, une valeur supérieure de fitness désigne une solution meilleure, on définit alors la fonction fitness par $f = \frac{1}{J}$.

Les données de référence peuvent être obtenues soit par des mesures expérimentales de la cellule solaire, soit à partir de la caractéristique ($I - V$) souvent tracée dans le document technique fourni par le constructeur. Le principe de la procédure d'ajustement d'une courbe est expliqué par la figure II.2.

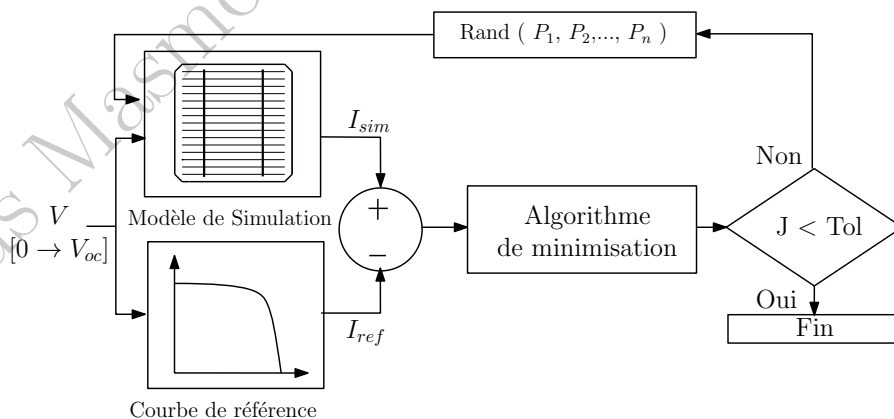


FIGURE II.2 – Schéma explicatif de la méthode d'ajustement des courbes.

II.2.3 Mesures Expérimentales de la cellule solaire

Dans le but de valider expérimentalement les modèles mis en œuvre dans la suite de ce chapitre, un banc d'essai pratique a été réalisé pour l'investigation de la cellule solaire témoin

commercialisée sous la référence JA M5SF-2 (Tableau I.5). Les mesures visent essentiellement à tracer la caractéristique ($I - V$) expérimentale d'une cellule solaire individuelle et à la comparer par la suite avec les résultats de simulation des modèles développés. Le travail expérimental est décrit par le schéma explicatif de la figure II.3.

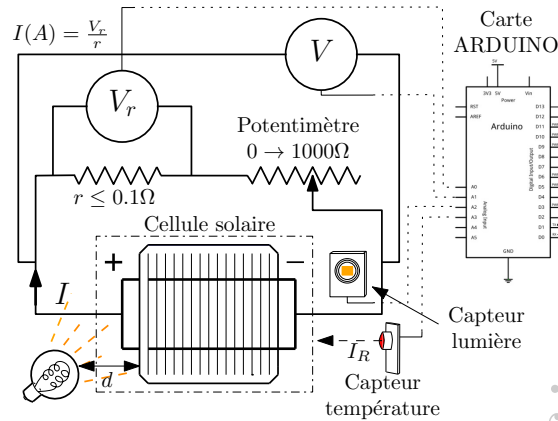


FIGURE II.3 – Schéma explicatif de la méthode de mesures de la cellule solaire “JAC M5SF-2”.

Le banc d'essai réalisé de la figure II.4 est composé essentiellement des éléments suivants :

- Une cellule solaire monocristalline : JA Solar JAC M5SF-2,
- Une source de lumière : lampe à spectre complet
- Des résistances de très faibles valeurs : inférieures à 0.1Ω .
- Un capteur de tension : pour la mesure de la tension et du courant ,
- Un potentiomètre : pour changer la valeur de résistance connectée ($0 \Omega \sim 1K\Omega$),
- Un capteur de lumière numérique : pour mesurer la valeur de la lumière incidente,
- Un capteur de température infrarouge, pour mesurer la température de jonction de la cellule,
- Un micro-contrôleur ARDUINO pour l'acquisition des données issues des capteurs et pour enregistrer les mesures.

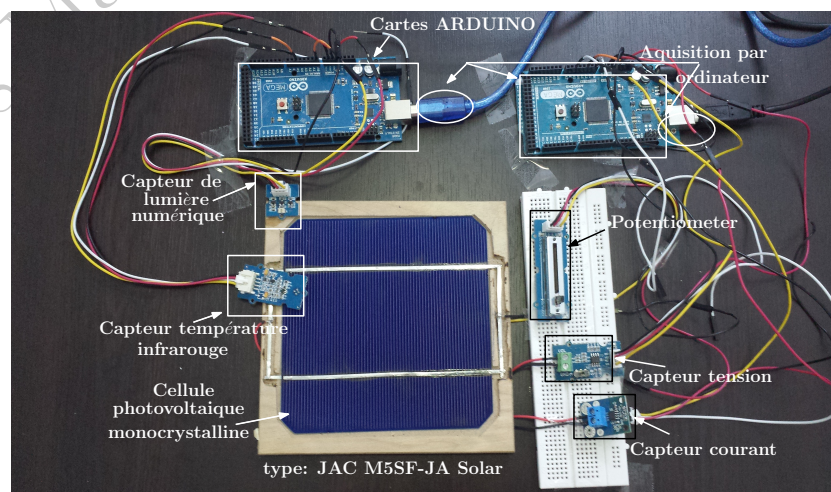


FIGURE II.4 – Banc d'essai expérimental de la cellule solaire “JAC M5SF”.

II.3 Modèle Idéal

Le modèle électrique le plus simple d'une cellule solaire est représenté par une source de courant en parallèle avec une seule diode. La configuration du circuit électrique idéal équivalent de la cellule solaire est donnée par la figure II.5. Ce modèle équivalent est composé d'une source de courant qui génère le courant photonique I_{ph} et d'une diode parcourue par un courant I_d .

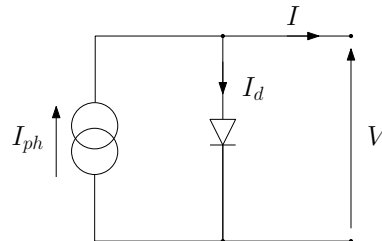


FIGURE II.5 – Circuit électrique équivalent du modèle idéal.

Le courant I délivré par la cellule peut être exprimé en termes de photocourant I_{ph} et du courant I_d à travers la diode selon la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.7})$$

La relation entre le courant I délivré par la cellule et la tension V à ses bornes est décrit par :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

avec :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.9})$$

où :

- I_{ph} : Le photo-courant (courant photoélectrique) généré par la cellule,
- I_s : Le courant de saturation de la jonction de la cellule,
- n : Le facteur d'idéalité de la diode qui est de 1 à 2.
- T : La température de la jonction lors de son fonctionnement (K)
- k : La constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
- q : La charge d'un électron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C).

II.3.1 Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle idéal

Les paramètres inconnus du modèle idéal sont : I_{ph} , I_s et n . La recherche de ces trois inconnues nécessite la résolution d'un système de trois équations. On adopte la procédure d'identification expliquée ci-dessous sur trois points clés comme suit :

En appliquant l'équation II.8 au point de court-circuit, on obtient la relation suivante.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{0}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Au point de circuit-ouvert l'équation II.8 s'écrit comme suit :

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

En réécrivant l'équation II.8 au point de puissance maximale, on obtient :

$$I_m = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_m}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

On vise à simplifier le système d'équations afin de mettre en relief les paramètres inconnus. Alors, en tenant compte de la relation II.10, l'expression du photo-courant I_{ph} s'exprime comme suit :

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (\text{II.13})$$

Ainsi, le courant de saturation I_s pourrait s'exprimer grâce à l'équation II.11 comme suit :

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1} \quad (\text{II.14})$$

La réécriture de l'équation II.12, avec le remplacement des courants I_{ph} et I_s par leurs expressions, entraîne la relation du courant I_m au point de puissance maximale comme suit :

$$I_m = I_{sc} \left(1 - \frac{\exp \left(\frac{V_m}{nV_t} \right) - 1}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1} \right) \quad (\text{II.15})$$

En exploitant les équations II.13 et II.14, les courants I_{ph} et I_s peuvent être facilement calculés et déterminés uniquement avec les informations de la fiche technique du fabricant et l'inconnu n . Toutefois, la détermination du paramètre n est établie par la résolution numérique de la relation II.15. Comme la relation est non linéaire (difficile à résoudre), on élabore un algorithme numérique pour la recherche de n .

Pour résoudre l'équation II.15 du modèle idéal de la cellule solaire, on peut utiliser la commande *fzero* de MATLAB, ou bien on développe l'algorithme de Newton pour une seule équation non linéaire, qui s'exprime comme suit : pour $n_0 = 1$ et $i \in \mathbb{N}$:

$$n_{i+1} = n_i - \frac{g(n_i)}{g'(n_i)} \quad (\text{II.16})$$

avec :

$$g(n) = I_m - I_{sc} \left(1 - \frac{\exp \left(\frac{V_m}{nV_t} \right) - 1}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1} \right) \quad (\text{II.17})$$

et

$$g'(n) = \frac{\partial g(n)}{\partial n} = \frac{(I_{sc} - I_m)V_{oc}}{I_{sc}(n^2V_t)} \exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - \frac{V_m}{n^2V_t} \exp \left(\frac{V_m}{nV_t} \right) \quad (\text{II.18})$$

La figure II.6 dresse l'algorithme adopté pour l'identification de l'inconnu n . Les entrées de cet algorithme sont préalablement résumées dans le tableau I.5.

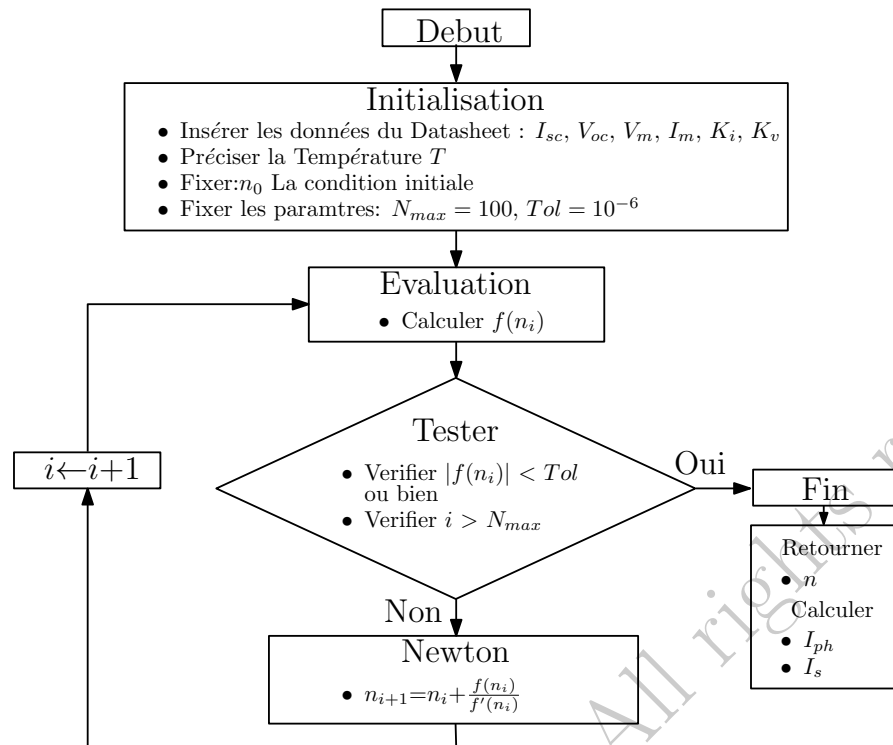


FIGURE II.6 – Algorithme de recherche des paramètres internes du modèle idéal.

II.3.2 Résultats d'identification des paramètres du modèle idéal dans l'STC

Dans les conditions de tests standards, les données d'entrées de l'algorithme (I_{sc}, V_{oc}, I_m, V_m) prennent les valeurs de référence du datasheet récapitulées dans le tableau I.5 par ($I_{sref}, V_{ocref}, I_{mref}, V_{mref}$).

L'exécution² des programmes de recherche des paramètres internes du modèle idéal en insérant les caractéristiques de la cellule monocristalline témoin (JA JAC M5SF-2) permettent de recueillir les valeurs des paramètres inconnus dans l'STC. Comme les paramètres recherchés sont dans l'STC, on peut les appeler ($I_{phref}, I_{sref}, n_{ref}$). Les résultats sont résumés dans le tableau II.1.

TABLEAU II.1 – Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle idéal.

Paramètre	$fzero$	$Newton$
I_{phref} (A)	5.8880	5.8880
I_{sref} (A)	1.037×10^{-7}	1.037×10^{-7}
n_{ref}	1.3886	1.3886
N itérations	8	3
Temps (s)	0.814	1.62
Méthode	bisection/interpolation	newton simple

2. Le programme est exécuté sur un ordinateur. Intel(R) Core (TM) i3-3120M CPU @ 2,50 GHz, de RAM 4,00 Go et sous un système d'exploitation 64bits, processeur x64.

Ces résultats montrent la convergence des deux algorithmes vers les mêmes valeurs. L'algorithme de Newton converge en temps concurrentiel en le comparant avec la fonction prédéfinie *fzero* de MATLAB. Le nombre d'itérations réduit montre également la rapidité de la méthode et son efficacité. La précision tolérée est à 10^{-6} ce qui peut être considéré suffisamment précis. On constate que l'algorithme de Newton effectue moins d'itérations ; toutefois il épuise plus de temps dans le calcul (ceci prouve l'importance de l'optimisation de code³ en programmation informatique).

II.3.3 Effet de la température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle idéal

Les résultats prédécrits par le tableau II.1 représentent les paramètres internes de la cellule solaire dans l'STC. En revanche, on a montré précédemment (I.2.2.8) que sous d'autres facteurs climatiques où la température est différente de 25°C et l'éclairement n'est plus de 1000 W.m^{-2} , Les grandeurs (V_{oc} , I_{sc} , V_m , I_m) prennent d'autres valeurs ; ce qui nécessite un ajustement de ces grandeurs avant l'exécution du programme.

On admet que la variation de la température provoque le changement des grandeurs liées à la structure interne de la cellule, pour ce modèle $n(T)$, $I_s(T)$ et $I_{ph}(T)$. Il est cependant important de souligner que la variation de l'éclairement touche uniquement le courant photoélectrique $I_{ph}(G, T)$ généré. La réécriture de l'expression II.8 générale du modèle idéal en fonction de T et G donne la relation suivante :

$$I(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(T) - I_s(T) \left(\exp \left(\frac{V(G, T)}{n(T) V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.19})$$

Pour exécuter l'algorithme en tenant compte de la variation de la température de la jonction T , on reprend le système d'équations formé par les relations II.13, II.14, II.15 et on utilise les facteurs K_v et K_i fournis par le constructeur pour ajuster les valeurs des paramètres d'entrée (V_{oc} , I_{sc} , V_m , I_m). On rappelle que pour de faibles variations de la température on a :

$$I_{sc}(T) = I_{scref} + K_i(T - T_{ref}) \quad (\text{II.20})$$

$$V_{oc}(T) = V_{ocref} + K_v(T_c - T_{ref}) \quad (\text{II.21})$$

$$I_m(T) = I_{mref} + K_i(T - T_{ref}) \quad (\text{II.22})$$

$$V_m(T) = V_{mref} + K_v(T - T_{ref}) \quad (\text{II.23})$$

Pour la variation de l'éclairement, il convient d'ajuster le courant I_{ph} .

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(T) \quad (\text{II.24})$$

Pour ce modèle idéal, on peut affirmer que :

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} [I_{scref} + K_i(T - T_{ref})] \quad (\text{II.25})$$

3. L'optimisation de code (*program optimization, software optimization*) est la discipline qui enseigne la pratique de modification d'un code algorithmique de manière optimale permettant au programme de s'exécuter plus efficacement en utilisant moins de ressources (stockage de mémoire...) et en consommant moins d'énergie.

Les figures II.7.a et II.7.b dressent les variations des paramètres n et I_s de la cellule solaire témoin en fonction des variations de la température.

L'allure de la courbe $n(T)$ est décroissante, d'après la théorie des semi-conducteurs [32, 33, 34, 35] : le facteur d'idéalité n est très proche de l'unité à faible dopage et à des températures élevées. Cependant, il peut s'écarter sensiblement de l'unité lorsque le taux de dopage augmente ou lorsque la température s'abaisse. La courbe $I_s(T)$ est croissante, l'allure exponentielle est justifiée aussi par la théorie des jonctions.

La figure II.7.c présente les variations du courant photoélectrique I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement. L'allure de la surface montre une double linéarité triviale justifiée par la relation II.24. En revanche, on peut remarquer le faible effet de la température sur l'augmentation du courant photonique.

À la suite de l'identification des paramètres internes du modèle idéal $n(T)$, $I_s(T)$ et $I_{ph}(G, T)$, on est en mesure d'exprimer les variations en fonction de l'éclairement et de la température du courant de court-circuit $I_{sc}(G, T)$ et de la tension en circuit-ouvert $V_{oc}(G, T)$ en s'appuyant sur la relation II.19. Pour le modèle idéal, on obtient :

$$I_{sc}(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{sc}(T) = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc,ref} + K_i(T - T_{ref})] \quad (\text{II.26})$$

$$V_{oc}(G, T) = n(T) V_t \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \frac{I_{ph}(T)}{I_s(T)} + 1 \right) \quad (\text{II.27})$$

II.4 Modèle à une résistance série : modèle simplifié à une diode

Plus de précision peut être introduite dans le modèle précédent en ajoutant une résistance série. La figure II.8 montre le circuit équivalent du modèle simplifié à une diode avec une seule résistance R_s connectée en série et qui regroupe les différentes résistances de connexion à travers la structure de la cellule.

Ce modèle est couramment utilisé dans de nombreuses études et propose un compromis entre la précision et la simplicité.

Comme le modèle idéal, le courant de ce modèle simplifié peut aussi être exprimé par II.28 :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.28})$$

La relation entre le courant I_d de la diode et la tension V à ses bornes est décrite par II.29 :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.29})$$

En substituant le courant I_d par son expression, l'équation II.28 devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.30})$$

avec :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.31})$$

où :

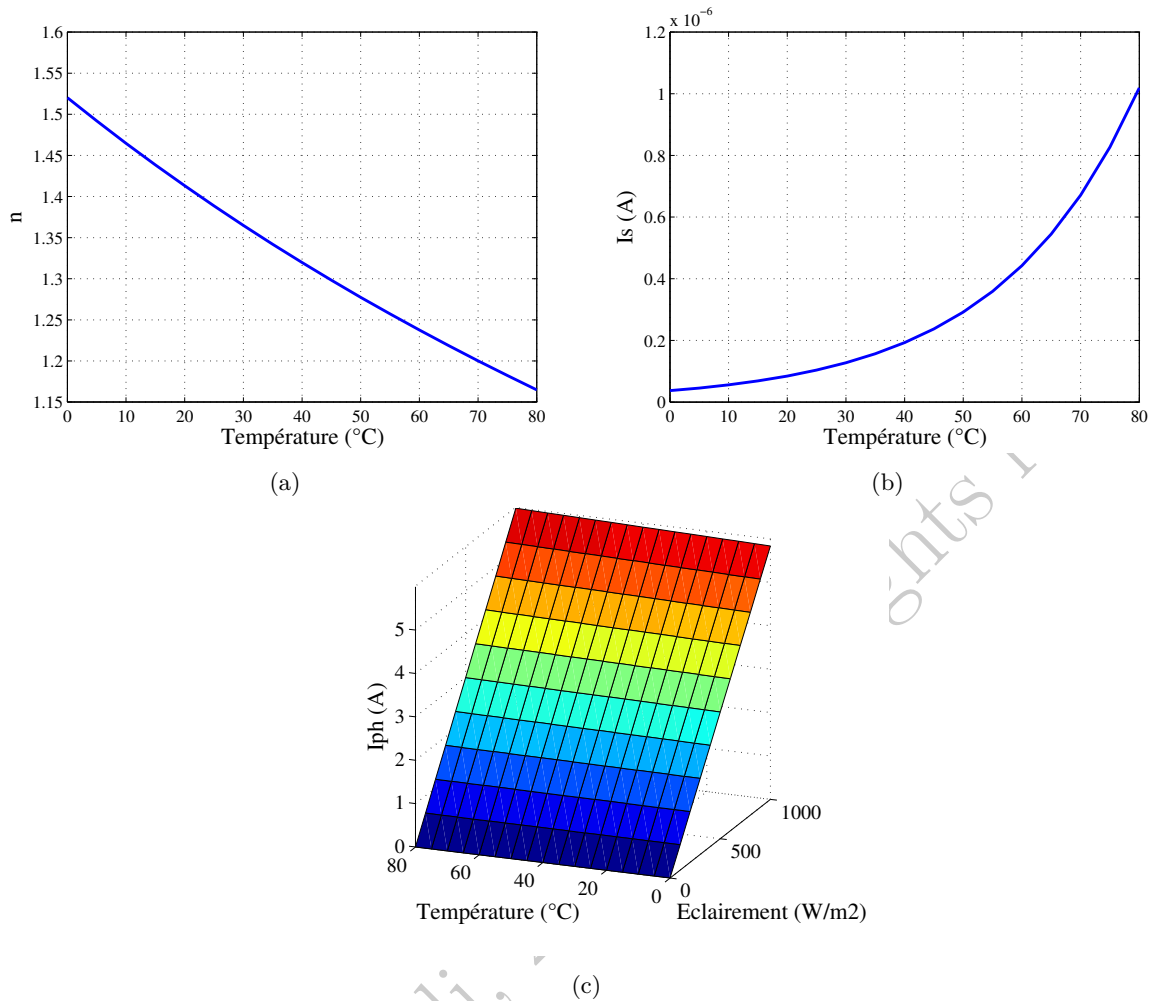


FIGURE II.7 – Variations des paramètres internes du modèle idéal de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.

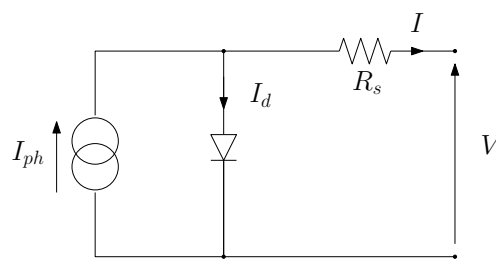


FIGURE II.8 – Circuit électrique équivalent du modèle à une résistance série.

- I_{ph} : le photo-courant (courant photoélectrique) généré par la cellule,
- I_s : le courant de saturation de la jonction de la cellule,
- n : le facteur d'idéalité de la diode qui est de 1 à 2,
- R_s : la résistance série qui regroupe les différentes résistances des substrats de la structure de la cellule,
- T : la température de la jonction lors de son fonctionnement (K),

- k : la constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K),
- q : La charge d'un électron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C),

II.4.1 Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle simplifié

La détermination des quatre paramètres inconnus du modèle à une résistance série qui sont (I_{ph} , I_s , R_s et n) nécessite l'utilisation d'un système à quatre équations. On adopte la procédure d'identification sur les quatre points clés suivants.

L'application de l'équation II.30 au point de court-circuit donne la relation suivante :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.32})$$

Au point de circuit-ouvert, l'équation II.30 donne :

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.33})$$

La réécriture de l'équation II.30 au point de puissance maximale entraine la relation suivante :

$$I_m = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_m + R_m I_m}{nV_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.34})$$

En outre, compte tenu de la relation II.5 de la dérivée de la puissance par rapport à la tension au point de puissance maximale, on peut écrire :

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{P=P_m} = I_m + V_m \frac{\frac{\partial f}{\partial V} \Big|_{V=V_m, I=I_m}}{1 - \frac{\partial f}{\partial I} \Big|_{V=V_m, I=I_m}} = 0 \quad (\text{II.35})$$

L'identification des paramètres inconnus (I_{ph} , I_s , R_s , n) du modèle électrique équivalent est développée à partir de la résolution du système d'équations formé par les relations II.32, II.33, II.34 et II.35. En considérant les relations suivantes :

$$e_1 = \exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) \quad (\text{II.36})$$

$$e_2 = \exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{nV_t} \right) \quad (\text{II.37})$$

$$e_3 = \exp \left(\frac{V_m + R_m I_m}{nV_t} \right) \quad (\text{II.38})$$

La simplification du système d'équations donne lieu aux relations suivantes. Tout d'abord, la soustraction de la relation II.33 à partir de la relation II.32 donne le résultat suivant :

$$I_{sc} = I_s \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - \exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{nV_t} \right) \right) = I_s (e_1 - e_2) \quad (\text{II.39})$$

Par conséquent, le courant de saturation I_s s'exprime par :

$$I_s = \frac{I_{sc}}{e_1 - e_2} \quad (\text{II.40})$$

Ensuite, en tenant compte de l'équation (II.33), l'expression du photo-courant I_{ph} est :

$$I_{ph} = I_s \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1 \right) = I_s (e_1 - 1) \quad (\text{II.41})$$

La substitution du courant de saturation I_s obtenu de l'équation (II.40) dans l'expression du photocourant I_{ph} (II.41) conduit à :

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{e_1 - 1}{e_1 - e_2} \quad (\text{II.42})$$

Les relations (II.40) et (II.42) sont exprimées en termes des deux autres paramètres inconnus : R_s et n . Pour résoudre ce problème, on utilise les équations (II.34) et (II.35).

En réécrivant l'équation (II.34), avec la substitution des courants I_{ph} et I_s par leurs expressions, on obtient la relation du courant I_m au point de puissance maximale comme suit :

$$I_m = I_{sc} \frac{e_1 - e_3}{e_1 - e_2} \quad (\text{II.43})$$

L'équation (II.35) de la dérivée de puissance par rapport à la tension au niveau du point de puissance maximale est nécessaire pour trouver le quatrième paramètre inconnu.

En considérant la relation II.30, on obtient :

$$\frac{\partial f}{\partial V} = - \frac{I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) \quad (\text{II.44})$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = - \frac{R_s I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) \quad (\text{II.45})$$

En substituant les relations (II.44) et (II.45) dans l'équation (II.5) précédemment développée, on obtient :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{- \frac{I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right)}{1 + \frac{R_s I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right)} \quad (\text{II.46})$$

Au point de puissance maximale, l'équation (II.46) devient :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_m} = I_m + V_m \frac{- \frac{I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{nV_t} \right)}{1 + \frac{R_s I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{nV_t} \right)} = 0 \quad (\text{II.47})$$

En réécrivant l'équation (II.47) et en remplaçant I_s par son expression, on obtient :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_m} = I_m - \frac{V_m I_{sc} e_3}{nV_t (e_1 - e_2) + R_s I_{sc} e_3} = 0 \quad (\text{II.48})$$

Comme c'est fait pour le modèle idéal, la détermination des paramètres inconnus du modèle à une résistance série nécessite l'élaboration d'un algorithme numérique de recherche. Pour ce modèle, le système d'équations formé par les relations (II.43) et (II.48) est plus compliqué, car il contient deux équations non linéaires et vise à déterminer les deux paramètres inconnus R_s et n .

On adopte deux méthodes de calcul pour résoudre ce système, soit via la fonction *fsolve* de MATLAB, où bien en se basant sur l'algorithme de Newton écrit, cette fois, pour deux équations et exprimé comme suit :

$$X_{i+1} = X_i + J^{-1}(X_i)g(X_i), \text{ où : } i \in \mathbb{N} \quad (\text{II.49})$$

avec X le vecteur recherché :

$$X = \begin{bmatrix} n \\ R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

et g est le vecteur des fonctions objectifs.

$$g = \begin{bmatrix} F(n, R_s) \\ G(n, R_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m - I_{sc} \frac{e_1 - e_3}{e_1 - e_2} \\ I_m - \frac{V_m I_{sc} e_3}{V_t(e_1 - e_2) + R_s I_{sc} e_3} \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.51})$$

Le terme J^{-1} correspond à la matrice Jacobienne inverse du système étudié. La jacobienne est formée par :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(n, R_s)}{\partial n} & \frac{\partial F(n, R_s)}{\partial R_s} \\ \frac{\partial G(n, R_s)}{\partial n} & \frac{\partial G(n, R_s)}{\partial R_s} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

Pour le calcul des dérivées partielles de la matrice jacobienne, on peut utiliser la fonction "jacobian" de l'outil *Symbolic Math Toolbox*⁴ de MATLAB. De même on utilise la fonction *inv* pour déterminer la jacobienne inverse J^{-1} .

On pose pour la première estimation le vecteur X_0 suivant :

$$X_0 = \begin{bmatrix} n_0 \\ R_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.01 \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

La figure II.9 présente l'algorithme adopté pour l'identification des inconnus R_s et n . Les entrées de cet algorithme sont les données du constructeur préalablement résumées dans le tableau I.5.

II.4.2 Résultats d'identification des paramètres du modèle à une résistance série dans l'STC

D'une manière analogue à ce qui a été fait pour le modèle idéal, on présente dans le tableau II.2 les résultats des algorithmes de recherche des paramètres inconnus du modèle à une résistance série appliqués à la cellule témoin de référence JA JAC MS5F-2 dans les conditions de mesures standard STC.

Les résultats du tableau II.2 montrent la convergence des deux méthodes vers les mêmes valeurs ; ce qui prouve leurs exactitudes. En revanche, l'algorithme de Newton effectue moins d'itérations et consomme plus de temps. La précision tolérée est à 10^{-6} ; ce qui peut être considéré suffisamment précis.

4. Pour en savoir plus sur ce toolbox, tapez `>> helpsymbolic` sur la fenêtre de commande du logiciel MATLAB, où bien consultez le guide en ligne de *Mathworks* : <http://www.mathworks.com/products/symbolic/>

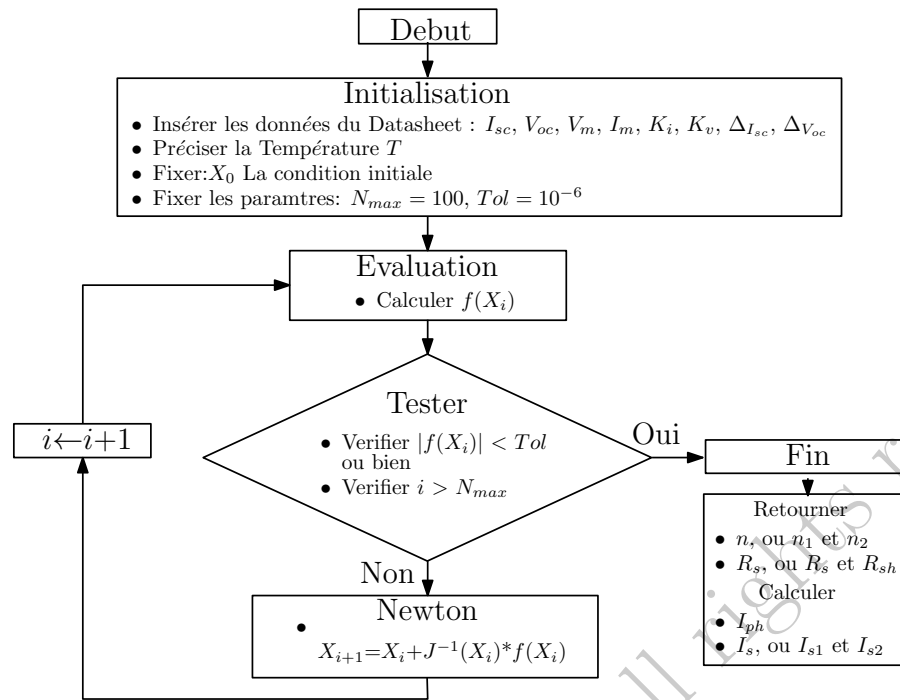


FIGURE II.9 – Algorithme de recherche des paramètres internes des modèles : à une résistance en série, à une diode et à deux diodes.

TABLEAU II.2 – Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle à une résistance série.

Paramètre	<i>fsolve</i>	<i>Newton</i>
I_{phref} (A)	5.8880	5.8880
I_{sref} (A)	5.4506×10^{-8}	5.45055×10^{-8}
n_{ref}	1.3403	1.3403
R_{sref} (Ω)	6.2863×10^{-4}	6.2864×10^{-4}
N itérations	6	4
Temps (s)	0.514	1.535
Méthode	Trust-region-dogleg	newton simple

II.4.3 Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une résistance série

Dans la suite, on propose de présenter l'influence de la température et de l'éclairement sur les paramètres du modèle ($n(T)$, $I_s(T)$, $R_s(T)$ et $I_{ph}(G, T)$). L'expression générale du modèle à une résistance série en fonction de G et T s'exprime par :

$$I(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(T) - I_s(T) \left(\exp \left(\frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{n(T) V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.54})$$

D'une manière analogue à ce qui a été établi pour le modèle idéal (II.4.2), et en tenant compte des relations (II.20), (II.21), (II.22) et (II.23) on porte sur la figure II.10 les variations des paramètres du modèle en fonction des changements climatiques.

La figure II.10.a montre une allure décroissante de la courbe $n(T)$ qui atteint des valeurs inférieures à l'unité pour les températures élevées. Sur la figure II.10.b on observe l'allure de la

courbe $I_s(T)$ qui est également décroissante d'une manière paradoxale à la théorie des jonctions. L'allure de la courbe $R_s(T)$ de la figure II.10.c est linéairement croissante ; en revanche elle est négative pour les faibles températures, ce qui n'a aucun sens physique.

Les variations du courant photo-électrique $I_{ph}(G, T)$ dressée par la figure II.10.d montrent une surface d'allure identique au modèle idéal ; ce qui reflète l'effet négligeable des termes exponentiels dans l'expression de I_{ph} .

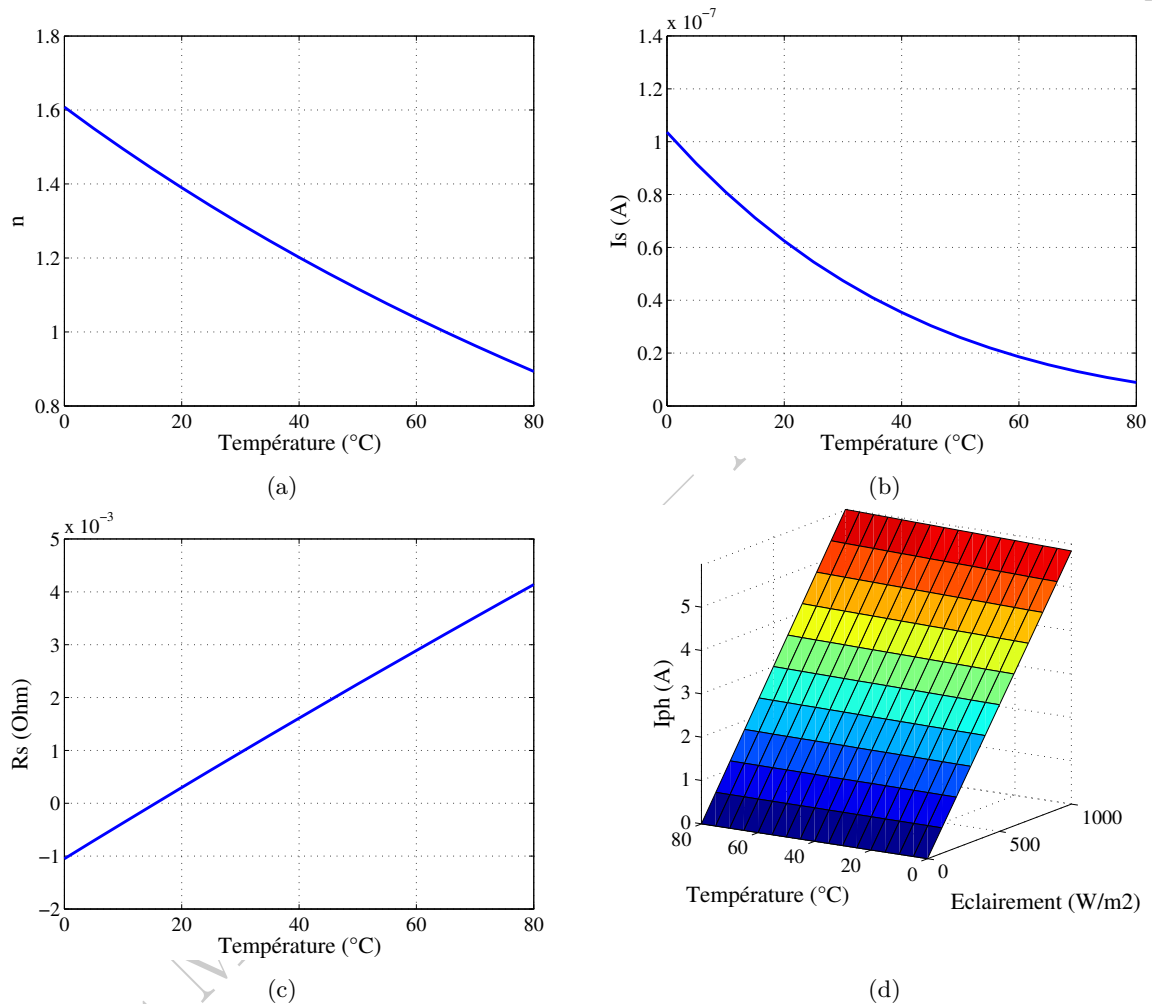


FIGURE II.10 – Variations des paramètres internes du modèle à une résistance série de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de R_s en fonction de la température. (d) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.

II.5 Modèle à une diode

Le modèle équivalent à une diode (1D) d'une cellule solaire est composé d'une source de courant qui génère le photocourant I_{ph} en parallèle avec une seule diode traversée par un courant I_d , une résistance parallèle R_{sh} et une résistance série R_s . La résistance parallèle (shunt) R_{sh} engendre le courant de fuite I_{sh} et traduit les pertes de courant dans les défauts et les impuretés

de la structure de la cellule solaire. La configuration électrique de ce modèle est indiquée sur la figure II.11 [23-32].

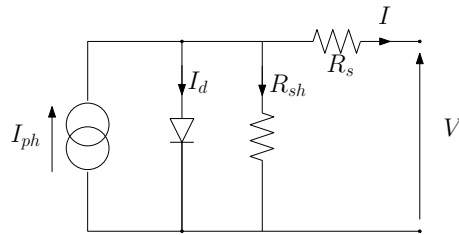


FIGURE II.11 – Circuit électrique équivalent du modèle à une diode.

Sous éclairage G , le courant I délivré par la cellule peut être exprimé en termes du photocourant I_{ph} , du courant I_d à travers la diode et du courant de fuite I_{sh} par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.55})$$

La relation entre le courant I_d de la diode, et la tension V à ses bornes, est décrite par l'équation suivante :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.56})$$

Le courant I_{sh} de la résistance de shunt R_{sh} , en fonction de la tension V aux bornes de la cellule, peut être exprimé comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.57})$$

En substituant les courants I_d et I_{sh} par leurs expressions, l'équation (II.55) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.58})$$

avec

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.59})$$

et où :

- R_{sh} : La résistance parallèle qui regroupe l'effet des différents courants de fuite à travers la structure de la cellule,

II.5.1 Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle à une diode

Les paramètres inconnus de ce modèle sont (I_{ph} , I_s , n , R_s , et R_{sh}). La détermination de ces cinq paramètres inconnus du modèle à une diode nécessite l'utilisation d'un système à cinq équations. On adopte la procédure d'identification sur cinq points clés comme suit. En appliquant l'équation (II.58) au point de court-circuit, on obtient la relation suivante :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{n V_t} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.60})$$

Au point de circuit-ouvert l'équation (II.58), cette équation prend la forme suivante :

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.61})$$

La réécriture de l'équation (II.58) au point de puissance maximale, entraîne la relation suivante :

$$I_m = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{nV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \quad (\text{II.62})$$

En considérant l'expression (II.58), Les dérivés partielles de I par rapport à V puis I , s'expriment par les relations suivantes :

$$\frac{\partial I(V, I)}{\partial V} = -\frac{I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \quad (\text{II.63})$$

$$\frac{\partial I(V, I)}{\partial I} = -\frac{R_s I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.64})$$

En substituant (II.63) et (II.64) dans l'équation (II.4) on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-\frac{I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s I_s}{nV_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.65})$$

La simplification de l'équation II.65 donne :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-R_{sh} I_s \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) - nV_t}{nV_t R_{sh} + R_s R_{sh} I_s \exp \left(\frac{V + R_s I}{nV_t} \right) + nV_t R_s} \quad (\text{II.66})$$

L'identification des paramètres internes inconnus du modèle à une diode, I_{ph} , I_s , n , R_{sh} and R_s , est établie sur la résolution du système d'équations formé par les relations (II.60), (II.61), (II.62) et (II.66) écrites au voisinage du point du court-circuit $I = I_{sc}$ et au voisinage du point du circuit-ouvert $V = V_{oc}$. On considère les relations suivantes :

$$e_1 = \exp \left(\frac{V_{oc}}{nV_t} \right) \quad (\text{II.67})$$

$$e_2 = \exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{nV_t} \right) \quad (\text{II.68})$$

$$e_3 = \exp \left(\frac{V_m + R_m I_m}{nV_t} \right) \quad (\text{II.69})$$

On vise maintenant à simplifier ce système d'équations.

La soustraction de la relation (II.60) à partir du relation (II.61) entraîne la relation suivante :

$$I_{sc} = I_s (e_1 - e_2) + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.70})$$

En conséquence, Le courant de saturation I_s s'exprime comme suit :

$$I_s = \frac{I_{sc} (R_s + R_{sh}) - V_{oc}}{R_{sh} (e_1 - e_2)} \quad (\text{II.71})$$

En tenant compte de la relation (II.61), Le photo-courant I_{ph} s'exprime comme suit :

$$I_{ph} = I_s (e_1 - 1) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.72})$$

On substituant I_s par son expression, l'équation (II.72) devient :

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{(R_s + R_{sh})(e_1 - 1)}{R_{sh}(e_1 - e_2)} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \left(1 - \frac{(e_1 - 1)}{(e_1 - e_2)} \right) \quad (\text{II.73})$$

En réécrivant l'équation (II.62) en fonction de I_{ph} et I_s , on aboutit à :

$$I_m - I_{ph} + I_s (e_3 - 1) + \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.74})$$

On remplaçant I_{ph} et I_s par leurs expressions, la relation (II.74) devient :

$$I_{sc} \left(\frac{(R_s + R_{sh})(e_3 - e_1)}{R_{sh}(e_1 - e_2)} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \left(1 + \frac{(e_3 - e_1)}{(e_1 - e_2)} \right) + \frac{V_m}{R_{sh}} + I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (\text{II.75})$$

Les relations (II.71), (II.73) et (II.75) sont exprimées en fonctions de deux autres paramètres inconnus qui sont R_s et R_{sh} . On utilise alors la relation (II.66) pour $(V, I) = (0, I_{sc})$ et pour $(V, I) = (V_{oc}, 0)$ afin de les identifier.

Au point du court-circuit $(V, I) = (0, I_{sc})$, l'équation (II.66) devient :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = \frac{-R_{sh}I_s e_2 - nV_t}{nV_t R_{sh} + R_s R_{sh} I_s e_2 + nV_t R_s} = \Delta I_{sc} \quad (\text{II.76})$$

On écrit alors :

$$-R_{sh}I_s e_2 - nV_t - \Delta I_{sc} [nV_t (R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_s e_2] = 0 \quad (\text{II.77})$$

Au point du circuit-ouvert $(V, I) = (V_{oc}, 0)$, l'équation (II.66) s'écrit :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc}} = \frac{-R_{sh}I_s e_1 - nV_t}{nV_t R_{sh} + R_s R_{sh} I_s e_1 + nV_t R_s} = \Delta V_{oc} \quad (\text{II.78})$$

De même, on écrit :

$$-R_{sh}I_s e_1 - nV_t - \Delta V_{oc} [nV_t (R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_s e_1] = 0 \quad (\text{II.79})$$

Le système de cinq équations est formé par les relations (II.71), (II.72), (II.75), (II.77) et (II.79). Il suffit de déterminer R_{sh} , R_s et n , pour que les courants I_{ph} et I_s soient facilement calculés. Par ailleurs, la détermination de ces paramètres repose sur une résolution numérique des trois relations non linéaires suivantes : (II.75), (II.77) et (II.79). On élabore un algorithme de recherche par deux méthodes de calcul, soit à l'aide de la fonction *fsolve* de MATLAB où bien grâce à l'algorithme de Newton pour la recherche des trois paramètres n , R_s et R_{sh} :

$$X_{i+1} = X_i + J^{-1}(X_i)g(X_i), \quad i \in \mathbb{N} \quad (\text{II.80})$$

avec X est le vecteur des paramètres recherchés ;

$$X = \begin{bmatrix} n \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} \quad (\text{II.81})$$

et g est le vecteur des fonctions objectifs.

$$g = \begin{bmatrix} F(n, R_s, R_{sh}) \\ G(n, R_s, R_{sh}) \\ H(n, R_s, R_{sh}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc} \left(\frac{(R_s + R_{sh})(e_3 - e_1)}{R_{sh}(e_1 - e_2)} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \left(1 + \frac{(e_3 - e_1)}{(e_1 - e_2)} \right) + \frac{V_m}{R_{sh}} + I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \\ -R_{sh}I_s e_2 - nV_t - \Delta I_{sc} (nV_t(R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_s e_2) \\ -R_{sh}I_s e_1 - nV_t - \Delta V_{oc} (nV_t(R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_s e_1) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.82})$$

Le terme J^{-1} correspond à la matrice Jacobienne inverse du système étudié. La jacobienne est formée par :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(n, R_s, R_{sh})}{\partial n} & \frac{\partial F(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial F(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial G(n, R_s, R_{sh})}{\partial n} & \frac{\partial G(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial G(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial H(n, R_s, R_{sh})}{\partial n} & \frac{\partial H(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial H(n, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.83})$$

On pose pour la première estimation le vecteur X_0 suivant :

$$X_0 = \begin{bmatrix} n_0 \\ R_{s0} \\ R_{sh0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.001 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (\text{II.84})$$

La figure II.9 présente l'algorithme adopté aussi pour l'identification des inconnus R_{sh} , R_s et n du modèle à une diode.

II.5.2 Résultats de l'identification des paramètres du modèle à une diode dans l'STC

Dans le tableau II.3, on présente les résultats des algorithmes de recherche des paramètres inconnus du modèle à une diode appliqués à la cellule témoin (JA JAC M5SF-2) dans les conditions de mesure standard *STC*. On ajoute aux grandeurs d'entrées I_{scref} , V_{ocref} , I_{mref} et V_{mref} les deux paramètres ΔI_{sc} et ΔV_{oc} (on suppose que l'effet des conditions climatiques sur les pentes de la caractéristique électrique sont négligeables).

TABLEAU II.3 – Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC' par le modèle à une diode.

Paramètre	<i>f solve</i>	<i>Newton</i>
I_{phref} (A)	5.888	5.88808
I_{sref} (A)	3.9945×10^{-8}	3.9945×10^{-8}
n_{ref}	1.3182	1.3182
R_{sref} (Ω)	8.828×10^{-4}	8.828×10^{-4}
R_{shref} (Ω)	253.5729	253.5729
<i>N itérations</i>	9	4
<i>Temps</i> (s)	0.414	14.0278
Méthode	Trust-region-dogleg	newton simple

Les résultats du tableau II.3 montrent la convergence des deux méthodes vers les mêmes valeurs ce qui prouve leurs exactitudes. L'algorithme de Newton est plus efficace du point de vue du nombre d'itérations, toutefois il écoule beaucoup plus de temps, surtout au niveau de l'évaluation de la matrice jacobienne. Le critère d'erreur toléré est inférieur à $1e-6$, ce qui peut être considéré suffisamment précis.

II.5.3 Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une diode

On propose de présenter l'influence de la température et de l'éclairement sur les paramètres du modèle ($n(T)$, $I_s(T)$, $R_s(T)$, $R_{sh}(T)$ et $I_{ph}(G, T)$). L'expression générale du modèle à une diode en fonction de G et T s'exprime par :

$$I(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(T) - I_s(T) \left(\exp \left(\frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{n(T) V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{R_{sh}(T)} \quad (\text{II.85})$$

D'une manière analogue à ce qui a été établi pour le modèle idéal (II.4.2), et en tenant compte des relations (II.20), (II.21), (II.22) et (II.23) on porte sur la figure II.12 les variations des paramètres inconnus du modèle en fonction des changements climatiques.

Les allures des courbes dressées par la figure II.12 montrent une cohérence totale avec la théorie des jonctions et la physique des semi-conducteurs, notamment le silicium dopé [32, 33, 34, 35].

Les variations du courant photoélectrique $I_{ph}(G, T)$ dressées par la figure II.12.e montrent une surface d'allure identique au modèle idéal ; ce qui reflète l'effet négligeable des termes exponentiels dans l'expression de I_{ph} .

II.6 Modèle à deux diodes

Le modèle présenté dans cette partie est le modèle à deux diodes (~double diode) qui tient compte du phénomène de recombinaison dans la zone de charge espace et qui fournit une meilleure précision de la caractéristique $I - V$. Il donne plus de valeurs physiques crédibles pour les paramètres internes qui pourraient faire allusion aux phénomènes qui se produisent à l'intérieur de la cellule solaire.

Le circuit électrique équivalent du modèle à double diode (2D) d'une cellule solaire consiste en une source de courant qui génère le photocourant I_{ph} en parallèle avec deux diodes traversées par les courants I_{d1} et I_{d2} . Le courant de fuite de la résistance shunt R_{sh} est représenté par le courant I_{sh} . Et R_s représente la résistance série. La configuration du circuit électrique équivalent est représentée par la figure II.13 [33-37].

Sous éclairement G , la caractéristique $I - V$ de la cellule solaire est exprimée par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II.86})$$

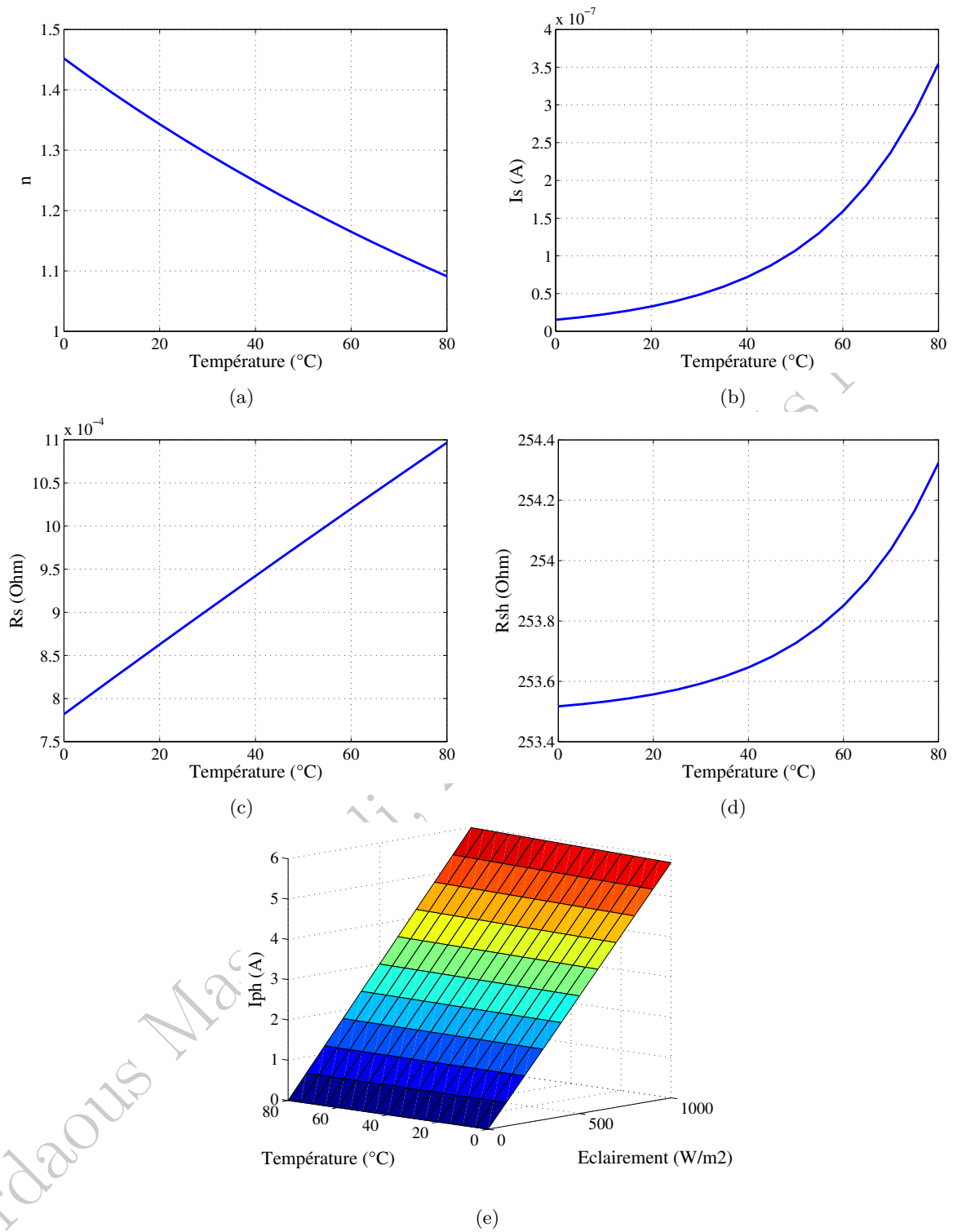


FIGURE II.12 – Variations des paramètres internes du modèle à une diode de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de n en fonction de la température. (b) Variations de I_s en fonction de la température. (c) Variations de R_s en fonction de la température. (d) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (e) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.

La relation entre le courant I_{d1} , et la tension V aux bornes de la cellule est décrite par l'équation

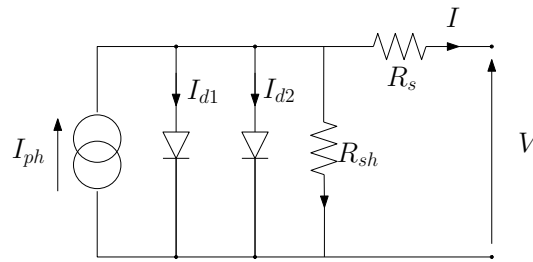


FIGURE II.13 – Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes.

suivante :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.87})$$

De la même façon, la relation entre le courant I_{d2} , et la tension V , est décrite comme suit :

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.88})$$

La relation entre le courant I_{sh} et la tension V aux bornes de la cellule peut être exprimée comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.89})$$

En substituant les courants I_{d1} , I_{d2} et I_{sh} par leurs expressions, l'équation (II.86) devient :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.90})$$

- I_{s1} : Le courant de saturation de la jonction des phénomènes de diffusion-recombinaison dans la zone quasi-neutre,
- I_{s2} : Le courant de saturation de la jonction du phénomène de recombinaison dans la zone de charge-espace,
- n_1 : Le facteur d'idéalité de la diode 1, pour ce modèle, est égal à 1,
- n_2 : Le facteur d'idéalité de la diode 2, considéré nettement supérieur à 1,

II.6.1 Algorithme d'identification des paramètres inconnus du modèle à deux diodes

Les paramètres inconnus de ce modèle sont (I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , R_s et R_{sh}). Selon les recherches précédentes faites sur la physique classique des semi-conducteurs et des jonctions $p-n$, le facteur de qualité n_1 des phénomènes de diffusion et de recombinaison dans la région quasi-neutre est généralement estimé égal à 1 [51] tandis que le facteur de qualité n_2 lié à la théorie de recombinaison dans la région de déplétion est supposé nettement supérieur à 1 [52]. La suite du travail consiste à adopter la procédure d'identification pour six paramètres inconnus du modèle à double diode et à élaborer un algorithme de recherche pour les identifier.

La détermination des six paramètres inconnus du modèle à double diode qui sont : I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , n_2 , R_s and R_{sh} , nécessite l'utilisation d'un système de six équations élaborées comme suit :

L'application de l'équation (II.90) au point de court-circuit donne la relation suivante :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{R_s I_{sc}}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.91})$$

Au point de circuit-ouvert, l'équation (II.90) s'écrit comme suit :

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.92})$$

La réécriture de l'équation (II.90) au point de puissance maximale entraine la relation suivante :

$$I_m = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} \quad (\text{II.93})$$

En considérant l'expression (II.90), Les dérivées partielles de I par rapport à V puis I , s'expriment par les relations suivantes :

$$\frac{\partial I(I, V)}{\partial V} = -\frac{I_{s1}}{V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - \frac{I_{s2}}{2V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \quad (\text{II.94})$$

$$\frac{\partial I(I, V)}{\partial I} = R_s \frac{\partial I(I, V)}{\partial V} \quad (\text{II.95})$$

En substituant les relations (II.94) et (II.95) dans l'équation (II.4), on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-\frac{I_{s1}}{V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - \frac{I_{s2}}{n_2 V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s I_{s1}}{V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) + \frac{R_s I_{s2}}{n_2 V_t} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.96})$$

La simplification de la relation (II.96) donne la relation suivante la suivante :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-n_2 R_{sh} I_{s1} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - R_{sh} I_{s2} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - n_2 V_t}{n_2 V_t (R_s + R_{sh}) + R_s R_{sh} \left(n_2 I_{s1} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) + I_{s2} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) \right)} \quad (\text{II.97})$$

L'expression de la dérivée de puissance P par rapport à la tension V donnée par la relation (II.5), s'exprime pour ce modèle par la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \left(\frac{-n_2 R_{sh} I_{s1} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - R_{sh} I_{s2} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - n_2 V_t}{n_2 V_t (R_s + R_{sh}) + R_s R_{sh} \left(n_2 I_{s1} \exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) + I_{s2} \exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) \right)} \right) \quad (\text{II.98})$$

L'identification des paramètres inconnus I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , n_2 , R_s et R_{sh} du modèle équivalent est élaborée à partir de la résolution du système formé par les relations (II.91), (II.92), (II.93), (II.98) et (II.97) écrite au voisinage du point du court-circuit $I = I_{sc}$ et au voisinage du point

du circuit-ouvert $V = V_{oc}$. On considère les relations suivantes :

$$e'_1 = \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) \quad (\text{II.99})$$

$$e''_1 = \exp\left(\frac{V_{oc}}{n_2 V_t}\right) \quad (\text{II.100})$$

$$e'_2 = \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t}\right) \quad (\text{II.101})$$

$$e''_2 = \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{n_2 V_t}\right) \quad (\text{II.102})$$

$$e'_3 = \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{V_t}\right) \quad (\text{II.103})$$

$$e''_3 = \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{n_2 V_t}\right) \quad (\text{II.104})$$

La soustraction de la relation (II.91) à partir de la relation (II.92) donne le résultat suivant :

$$I_{sc} = I_{s1}(e'_1 - e'_2) + I_{s2}(e''_1 - e''_2) + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.105})$$

Ainsi, le courant de saturation de courant I_{s1} peut être exprimée en terme de I_{s2} à l'aide de l'équation (II.105), comme suit :

$$I_{s1} = \frac{I_{sc}(R_s + R_{sh}) - V_{oc}}{R_{sh}(e'_1 - e'_2)} - I_{s2} \frac{(e''_1 - e''_2)}{(e'_1 - e'_2)} \quad (\text{II.106})$$

La soustraction de la relation (II.93) à partir de la relation (II.92) donne le résultat suivant :

$$I_m = I_{s1}(e'_1 - e'_3) + I_{s2}(e''_1 - e''_3) + \frac{V_{oc} - V_m - I_m R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.107})$$

Ainsi, le courant de saturation I_{s2} peut être exprimée en termes de I_{s1} grâce à l'équation II.107, comme suit :

$$I_{s2} = \frac{I_m R_{sh} - V_{oc} + V_m + I_m R_s}{R_{sh}(e''_1 - e''_3)} - I_{s1} \frac{(e'_1 - e'_3)}{(e''_1 - e''_3)} \quad (\text{II.108})$$

La substitution et la simplification du courant de saturation I_{s1} , obtenu à partir de l'équation (II.106) dans l'expression du courant de saturation I_{s2} donné par l'équation (II.108), conduit à :

$$I_{s2} = I_m \frac{(R_s + R_{sh})(e'_1 - e'_2)}{R_{sh} A} - I_{sc} \frac{(R_s + R_{sh})(e'_1 - e'_3)}{R_{sh} A} + V_{oc} \frac{(e'_2 - e'_3)}{R_{sh} A} + V_m \frac{(e'_1 - e'_2)}{R_{sh} A} \quad (\text{II.109})$$

avec :

$$A = (e''_1 - e''_3)(e'_1 - e'_2) - (e''_1 - e''_2)(e'_1 - e'_3) \quad (\text{II.110})$$

En remplaçant le résultat de l'équation (II.109) dans l'expression du courant de saturation de diffusion I_{s1} de l'équation (II.106), on obtient :

$$I_{s1} = I_{sc} \frac{(R_s + R_{sh})}{R_{sh}(e'_1 - e'_2)} \left[1 + \frac{(e'_1 - e'_3)(e''_1 - e''_2)}{A}\right] - I_m \frac{(R_s + R_{sh})(e''_1 - e''_2)}{R_{sh} A} - V_m \frac{(e''_1 - e''_2)}{R_{sh} A} - V_{oc} \frac{1}{R_{sh}(e'_1 - e'_2)} \left[1 + \frac{(e'_2 - e'_3)(e''_1 - e''_2)}{A}\right] \quad (\text{II.111})$$

Compte tenu de l'équation (II.92), l'expression du photocourant I_{ph} est écrite en terme de I_{s1} et I_{s2} comme suit :

$$I_{ph} = I_{s1}(e'_1 - 1) + I_{s2}(e''_1 - 1) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.112})$$

Les relations (II.111), (II.109) et (II.112) sont exprimées en termes des trois autres paramètres inconnus : n_2 , R_s et R_{sh} . Pour les retrouver, on écrit l'équation (II.97) pour $(V, I) = (0, I_{sc})$ et pour $(V, I) = (V_{oc}, 0)$, puis on utilise l'équation (II.98) au voisinage du point de puissance maximale $(V, I) = (V_m, I_m)$.

Au point de court-circuit, l'équation (II.97) s'écrit :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = \frac{-n_2 R_{sh} I_{s1} e'_2 - R_{sh} I_{s2} e''_2 - n_2 V_t}{n_2 V_t R_{sh} + n_2 R_s R_{sh} I_{s1} e'_2 + R_s R_{sh} I_{s2} e''_2 + n_2 V_t R_s} = \Delta_{I_{sc}} \quad (\text{II.113})$$

Au point de circuit-ouvert, l'équation (II.97) s'écrit :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{oc}} = \frac{-n_2 R_{sh} I_{s1} e'_1 - R_{sh} I_{s2} e''_1 - n_2 V_t}{n_2 V_t R_{sh} + n_2 R_s R_{sh} I_{s1} e'_1 + R_s R_{sh} I_{s2} e''_1 + n_2 V_t R_s} = \Delta_{V_{oc}} \quad (\text{II.114})$$

Au point de puissance maximale, l'équation (II.98) s'écrit :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\substack{V=V_m \\ I=I_m}} = I_m + V_m \left(\frac{-n_2 R_{sh} I_{s1} e'_3 - R_{sh} I_{s2} e''_3 - n_2 V_t}{n_2 V_t (R_s + R_{sh}) + R_s R_{sh} (n_2 I_{s1} e'_3 + I_{s2} e''_3)} \right) = 0 \quad (\text{II.115})$$

Le système de six équations est formé par les relations (II.111), (II.109), (II.112), (II.113), (II.114) et (II.115). Les courants I_{ph} , I_{s1} et I_{s2} pourraient être facilement calculés et déterminés par l'implémentation des informations de la fiche technique du fabricant. Par ailleurs, la détermination de ces paramètres est fondée sur une résolution numérique des trois relations non linéaires suivantes : (II.113), (II.114) et (II.115). Ainsi, on élabore un algorithme de recherche par deux méthodes de calcul, soit avec la fonction *fsolve* de MATLAB où bien en impliquant l'algorithme de Newton :

$$X_{i+1} = X_i + J^{-1}(X_i)g(X_i), \quad i \in \mathbb{N} \quad (\text{II.116})$$

avec X est le vecteur de conception

$$X = \begin{bmatrix} n_2 \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} \quad (\text{II.117})$$

et g est le vecteur des fonctions objectifs.

$$g = \begin{bmatrix} F(n_2, R_s, R_{sh}) \\ G(n_2, R_s, R_{sh}) \\ H(n_2, R_s, R_{sh}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc} \left(\frac{(R_s + R_{sh})(e_3 - e_1)}{R_{sh}(e_1 - e_2)} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \left(1 + \frac{(e_3 - e_1)}{(e_1 - e_2)} \right) + \frac{V_m}{R_{sh}} + I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \\ -R_{sh} I_{s2} e_2 - nV_t - \Delta_{I_{sc}} (nV_t(R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_{s2} e_2) \\ -R_{sh} I_{s1} e_1 - nV_t - \Delta_{V_{oc}} (nV_t(R_{sh} + R_s) + R_s R_{sh} I_{s1} e_1) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.118})$$

Le terme J^{-1} correspond à la matrice Jacobienne inverse du système étudié. La jacobienne est formée par :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial n_2} & \frac{\partial F(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial F(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial G(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial n_2} & \frac{\partial G(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial G(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial H(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial n_2} & \frac{\partial H(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_s} & \frac{\partial H(n_2, R_s, R_{sh})}{\partial R_{sh}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.119})$$

On pose pour la première estimation le vecteur X_0 suivant :

$$X_0 = \begin{bmatrix} n_{20} \\ R_{s0} \\ R_{sh0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0.001 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (\text{II.120})$$

La figure II.9 présente l'algorithme adopté aussi pour l'identification des inconnus R_{sh} , R_s et n_2 du modèle à deux diodes.

II.6.2 Résultats d'identification des paramètres du modèle à deux diodes dans l'STC

Dans le tableau II.4 on présente les résultats des algorithmes de recherche des paramètres inconnus du modèle à une diode appliqués à la cellule témoin (JA JAC M5SF-2) dans les conditions de mesures standards *STC*.

TABLEAU II.4 – Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC' par le modèle à deux diode.

Paramètre	<i>f</i> solve	<i>Newton</i>
I_{phref} (A)	5.88802	5.888
I_{s1ref} (A)	1.92927×10^{-11}	1.92926×10^{-11}
I_{s2ref} (A)	6.2819×10^{-8}	6.2818×10^{-8}
n_{1ref}	1	1
n_{2ref}	1.36658	1.36655
R_{sref} (Ω)	1.0637×10^{-3}	1.0636×10^{-3}
R_{shref} (Ω)	253.6219	253.622
<i>N itérations</i>	27	20
<i>Temps</i> (s)	0.931	20.546
<i>Méthode</i>	Trust-region-dogleg	newton simple

Les résultats du tableau II.4 montrent la convergence des deux méthodes vers les mêmes valeurs. L'algorithme de *Newton* a convergé après 20 itérations seulement ; en contrepartie, la fonction *f*solve a pu converger en 0.931 seconde. On remarque que les valeurs retournées, surtout des courants de saturations I_{s1ref} et I_{s2ref} présentent une forte cohérence avec la théorie des jonctions $p - n$ en silicium.

II.6.3 Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à deux diodes

On propose de présenter l'influence de la température et de l'éclairement sur les paramètres du modèle ($n_2(T)$, $I_{s1}(T)$, $I_{s2}(T)$, $R_s(T)$, $R_{sh}(T)$ et $I_{ph}(G, T)$). L'expression générale du modèle à deux diodes en fonction de G et T s'exprime par :

$$I(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph}(T) - I_{s1}(T) \left(\exp \left(\frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2}(T) \left(\exp \left(\frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{n_2(T) V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V(G, T) + R_s(T) I(G, T)}{R_{sh}(T)} \quad (\text{II.121})$$

D'une manière analogue à ce qui a été établi pour les autres modèles, et en tenant compte des relations (II.20), (II.21), (II.22) et (II.23) on porte sur la figure II.14 les variations des paramètres inconnus du modèle en fonction des changements climatiques.

Les allures des courbes dressées par la figure II.14 montrent une cohérence totale avec la théorie des jonctions et la physique des semi-conducteurs, notamment le silicium dopé [32, 33, 34, 35].

Les figures II.14.a et II.14.b montrent des allures croissantes des courbes $I_{s1}(T)$ et $I_{s2}(T)$, par contre le courant de saturation de la première diode présente des valeurs négatives pour les températures inférieures à 32°C ce qui est contradictoire avec la théorie des jonctions. Les figures II.14.c, II.14.d, II.14.e montrent des allures raisonnables par rapport à la littérature.

La variation du courant photoélectrique $I_{ph}(G, T)$ dressée par la figure II.14.f montre une surface d'allure identique aux modèles antérieurs, ce qui reflète l'effet négligeable des termes exponentiels dans l'expression I_{ph} de ce modèle aussi.

II.7 Modèles à diodes multiples : cas de trois diodes

Les modèles à diodes multiples sont des modèles qui contiennent dans leurs circuits électriques équivalents plus qu'une diode en parallèle avec la source du courant photonique (figure II.15.a). Ceci est dans le but de mieux décrire la physique sous-jacente agissante dans la structure interne de la cellule photovoltaïque. Les modèles multi-diodes permettent d'obtenir plus de précision. Lors des simulations des comportements de la cellule solaire. En revanche, la recherche des paramètres inconnus de ces modèles nécessite des algorithmes plus compliqués qui sont spectaculairement plus coûteux du point de vue quantité de calculs, en raison des diodes supplémentaires [40-42].

Le choix adéquat du nombre des diodes associées dépend principalement du type de la cellule et de sa technologie de fabrication. Comme l'augmentation du nombre de diodes engendre l'élévation du nombre des paramètres internes inconnus du modèle électrique (> à 6 paramètres), il devient impossible d'utiliser la méthode d'identification utilisée auparavant, d'où les paramètres du datasheet ne sont plus suffisants.

La recherche des paramètres inconnus des modèles à diodes multiples est élaborée à partir de la méthode d'ajustement de courbes expliquée en II.2.2.

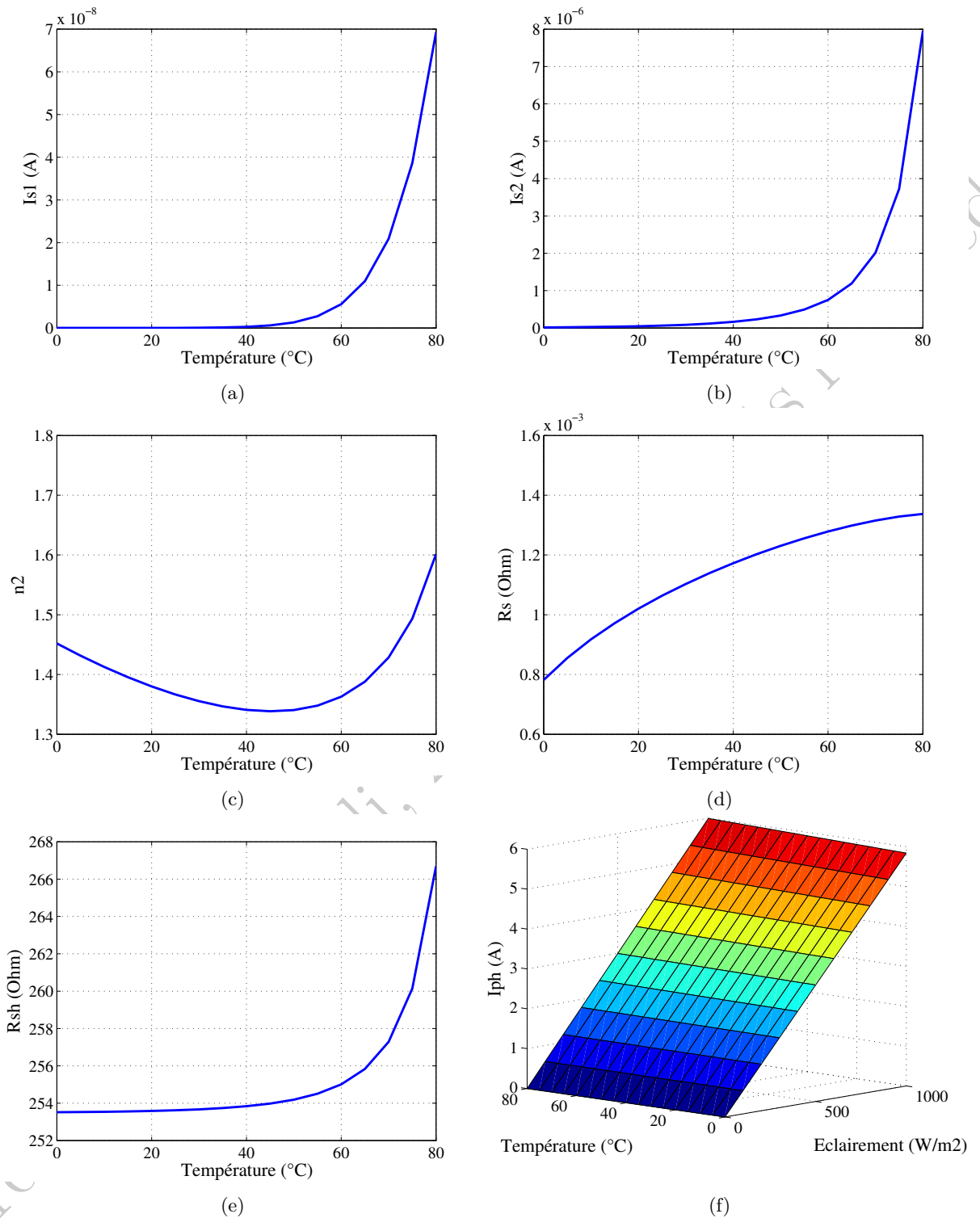


FIGURE II.14 – Variations des paramètres internes du modèle à deux diodes de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température et de l'éclairement. (a) Variations de I_{s1} en fonction de la température. (b) Variations de I_{s2} en fonction de la température. (c) Variations de n_2 en fonction de la température. (d) Variations de R_s en fonction de la température. (e) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (f) Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement.

Comme une étude de cas, on utilise le modèle à triple diodes (3D) illustré par la figure II.15.b.

Ce modèle apporte une amélioration supplémentaire au modèle à double diode en introduisant une troisième diode. Cela permet de modéliser correctement les effets des joints de grains et le courant de fuite dû aux périphéries [56].

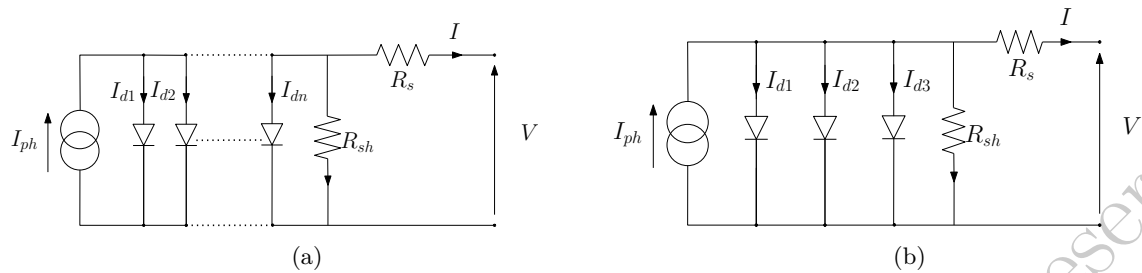


FIGURE II.15 – Circuits électriques équivalents : (a) du modèle à trois diodes. (b) du modèle multi-diodes.

Le circuit électrique équivalent du modèle à triple diodes d'une cellule solaire consiste en une source de courant qui génère le photocourant I_{ph} en parallèle avec trois diodes traversées par les courants I_{d1} , I_{d2} et I_{d3} en considérant deux résistances : la résistance shunt R_{sh} et la résistance série R_s .

Sous éclairage G , la caractéristique ($I-V$) de la cellule solaire est exprimée par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{sh} \quad (\text{II.122})$$

La relation entre le courant I_{d1} , et la tension V aux bornes de la cellule, est décrite par l'équation suivante :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.123})$$

De la même façon, la relation entre le courant I_{d2} , et la tension V , est décrite comme suit :

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.124})$$

Aussi, la relation entre le courant I_{d3} , et la tension V , est décrite comme suit :

$$I_{d3} = I_{s3} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_3 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.125})$$

La relation entre le courant I_{sh} et la tension V aux bornes de la cellule, peut être exprimée comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.126})$$

En substituant les courants I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} et I_{sh} par leurs expressions, l'équation (II.122) devient :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) - I_{s3} \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n_3 V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.127})$$

avec

- I_{s1} : Le courant de saturation de la jonction des phénomènes de diffusion-recombinaison dans la zone quasi-neutre,

- I_{s2} : Le courant de saturation de la jonction du phénomène de recombinaison dans la zone de charge-espace,
- I_{s3} : Le courant de saturation du phénomène de recombinaison dans les zones de défaut et les sites des joints de grains,
- n_1 : Le facteur d'idéalité de la diode 1 varie généralement de 1 à 2.
- n_2 : Le facteur d'idéalité de la diode 2, considéré de 1 à 5.
- n_3 : Le facteur d'idéalité de la diode 3, considéré de 2 à 5.

Les paramètres inconnus de ce modèle sont (I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , I_{s3} , n_3 , R_s et R_{sh}). La suite du travail consiste à mettre en œuvre une procédure d'ajustement des courbes afin d'estimer les neuf paramètres inconnus du modèle à triple diodes.

II.7.1 Recherche des paramètres inconnus par algorithme génétique

L'algorithme génétique (GA)[57] est un outil d'optimisation adaptatif heuristique dont la technique de recherche s'inspire des principes darwiniens de survie des plus aptes en génétique biologique. Le GA, introduit à l'origine par Holland (1975), simule un processus évolutif d'une espèce vivante, au moyen des opérations typiques de génétiques biologiques telles que la sélection (*Selection*), la mutation (*Mutation*) et le croisement (*Crossover*).

Les algorithmes génétiques ont été appliqués dans plusieurs domaines. Ils ne nécessitent pas d'informations auxiliaires et de connaissances particulières comme d'autres méthodes exactes d'optimisation. Par conséquent, ils sont très pratiques pour les applications complexes.

Le principe de l'algorithme génétique repose sur l'emploi de multiples points de recherche simultanés (Population) sur lesquels on applique les opérations génétiques. Cette procédure est appliquée d'une manière itérative jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait. La population P contient N des individus X_i . Chaque individu est composé de D éléments $x_{i,j}$ qui correspondent aux paramètres inconnus du modèle. La population à l'itération T peut être représenté par la matrice suivante :

$$P^T = \begin{pmatrix} X_1^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_N^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1,1}^T & \cdots & x_{1,j}^T & \cdots & x_{1,D}^T \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1}^T & \cdots & x_{i,j}^T & \cdots & x_{i,D}^T \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1}^T & \cdots & x_{N,j}^T & \cdots & x_{N,D}^T \end{pmatrix} \text{ avec : } \begin{cases} i \in [1, N] \\ j \in [1, D] \\ T \in [1, T_{max}] \end{cases} \quad (\text{II.128})$$

L'organigramme de l'algorithme génétique élaboré est présenté par la figure II.16.

II.7.2 Recherche des paramètres inconnus par l'algorithme du gradient évolué

L'algorithme du gradient évolué (GE)[58] présente une nouvelle méthode métaheuristique qui est une dérivée de la méthode de gradient. Dans une méthode d'optimisation exacte, le gradient est utilisé pour trouver les optimums. Cette méthode utilise le gradient comme règle de mise à jour.

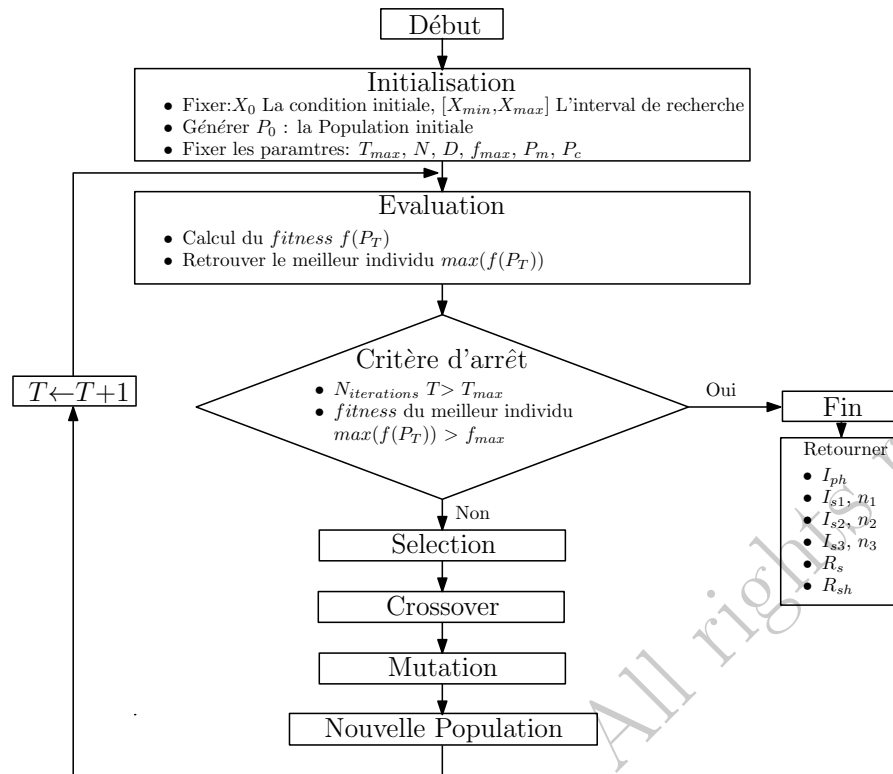


FIGURE II.16 – Algorithme génétique

L'algorithme GE explore l'espace de recherche au moyen d'un ensemble de vecteurs et comprend trois grands opérateurs : vecteur Mise-à-jour (*Updating*), vecteur Saut (*Jumping*) et vecteur Rafraîchissant (*Refreshing*). Le vecteur de mise à jour représente la principale règle agissante sur la population des solutions probables. La direction de recherche est déterminée grâce à la méthode de Newton-Raphson. Les vecteurs Saut et Rafraîchissants permettent d'éviter les optimums locaux. L'organigramme de l'algorithme de gradient évolué est présenté par la figure II.17.

II.7.3 Résultats de recherche des paramètres du modèle à trois diodes dans l'STC

Dans le tableau II.5, on présente les résultats des algorithmes de recherche des paramètres inconnus du modèle à trois diodes appliquées à la cellule témoin (JA JAC M5SF-2) dans les conditions de mesures standard *STC*.

Les résultats du tableau II.5 montrent la convergence des deux algorithmes vers des valeurs légèrement différentes, qui peuvent néanmoins être considérées comme assez proches. Ces résultats peuvent être améliorés en augmentant le nombre d'itérations ; toutefois, cela entraîne un temps de calcul plus important.

On remarque que l'algorithme génétique exécute un grand nombre d'itérations en un temps réduit, contrairement à l'algorithme de gradient évolué, qui effectue moins d'itérations mais nécessite un temps de calcul plus élevé en raison de la complexité des opérations effectuées.

À ce stade, l'algorithme de gradient évolué peut être considéré comme plus efficace dans la

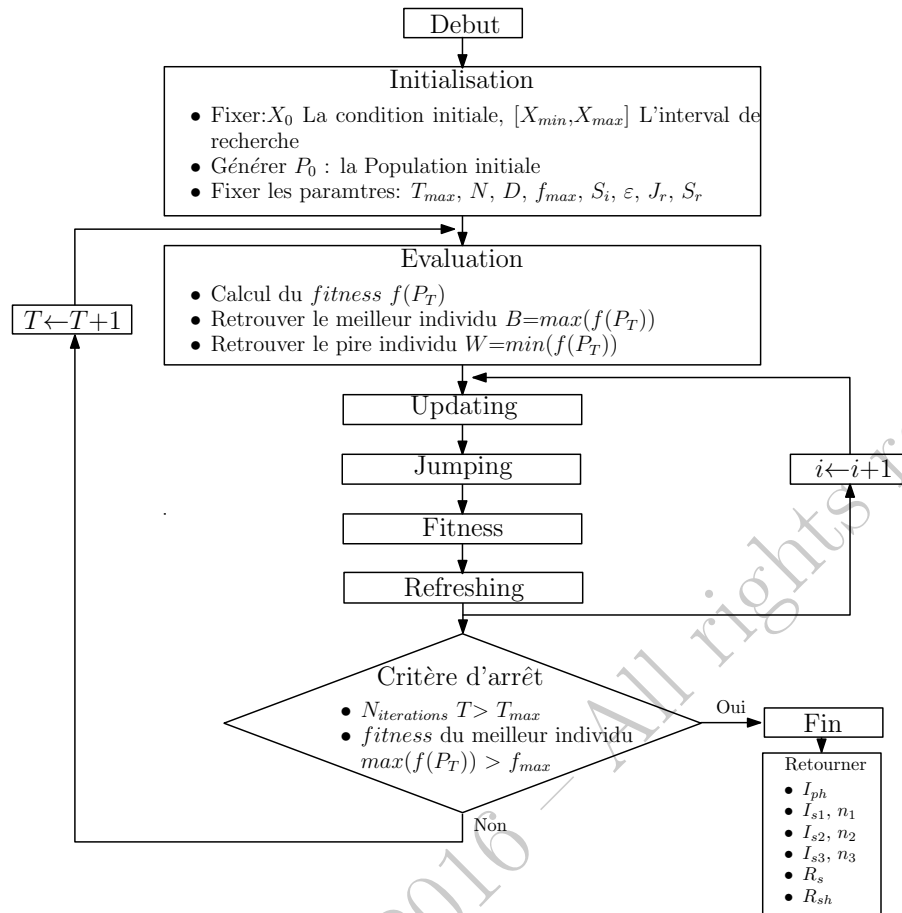


FIGURE II.17 – Algorithme du gradient évolué

TABLEAU II.5 – Résultat des paramètres internes de la cellule JAC M5SF-2 dans l'STC par le modèle à triple diodes.

Paramètre	<i>génétique</i>	<i>gradient évolué</i>
I_{ph} (A)	5.8883	5.8893
I_{s1} (A)	2.906×10^{-10}	2.5101×10^{-10}
I_{s2} (A)	5.2373×10^{-5}	3.4669×10^{-5}
I_{s3} (A)	5.0407×10^{-3}	3.5558×10^{-3}
n_1	1.0492	1.046
n_2	2.7627	2.4222
n_3	4.3131	4.9479
R_s (Ω)	0.001894×10^{-4}	0.001398
R_{sh} (Ω)	374.6215	157.6793
<i>fitness</i>	10.121	11.543
<i>N itérations</i>	501	101
<i>Temps</i> (s)	1829.125	3111.209

recherche des paramètres internes, son fitness étant supérieur à celui de l'algorithme génétique.

II.7.4 Effet de la Température et de l'éclairement sur les paramètres internes du modèle à une diode

On propose de présenter l'influence de la température et de l'éclairement sur les paramètres du modèle (I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , I_{s3} , n_3 , R_s , et R_{sh}). En tenant compte des relations (II.20), (II.21), (II.22) et (II.23) on présente dans la figure II.19 la variation des paramètres inconnus du modèle en fonction des changements climatiques.

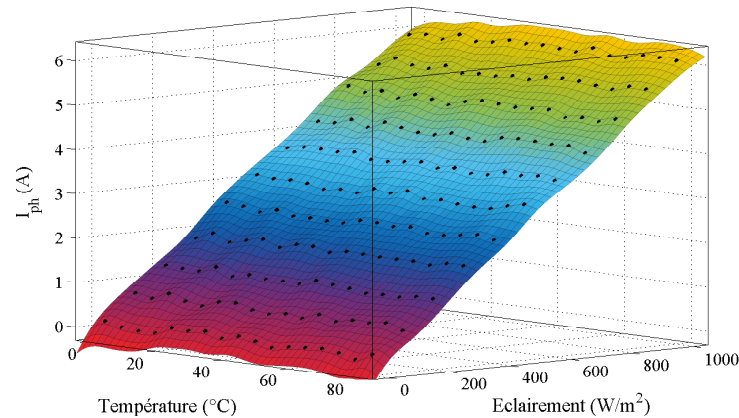


FIGURE II.18 – Variations de I_{ph} en fonction de la température et de l'éclairement par l'algorithme de gradient évolué.

On a utilisé l'algorithme de gradient évolué à plusieurs reprises (de 3 à 8 essais) et sur différentes valeurs d'éclairement G et de température T . Comme l'algorithme ne parvient pas à atteindre le même facteur élevé de fitness à chaque point, on a utilisé la boîte à outil *Curve Fitting Toolbox*⁵ de MATLAB pour fitter les allures des courbes par interpolation. La figure II.18 montre la variation du courant photonique I_{ph} en fonction des changements climatiques. On constate que la forme générale de la surface du modèle 3D est semblable aux formes récupérées par les modèles précédents et en harmonie totale avec l'étude théorique déjà faite.

De la même manière, on a utilisé les deux algorithmes étudiés (Génétique et Gradient évolué) à plusieurs reprises et sur différentes valeurs d'éclairement et de température pour retrouver les paramètres du modèle 3D en fonction des changements climatiques. La figure II.19 présente les résultats récupérés. Les points tracés indiquent les résultats des divers essais effectués et les courbes sont estimées par une interpolation adéquate à l'aide du toolbox *cftool*.

Dans l'ensemble, les courbes montrent une parfaite harmonie avec la théorie des jonctions de silicium dopé, surtout au niveau des courants de saturations I_{s1} , I_{s2} et I_{s3} (figures II.19.b, II.19.d et II.19.f) et leurs ordres de grandeur. Par conséquent, les valeurs des résistances R_{sh} et R_s (figures II.19.g et II.19.h) sont raisonnables et les allures montrent une augmentation avec l'accroissement de la température, ce qui est expérimentalement vérifié par plusieurs études [32, 33, 34, 35].

5. Pour en savoir plus sur cette toolbox, tapez `>> cftool` sur la fenêtre de commande du logiciel MATLAB, où bien consultez le guide en ligne de *Mathworks* : <http://fr.mathworks.com/products/curvefitting/>.

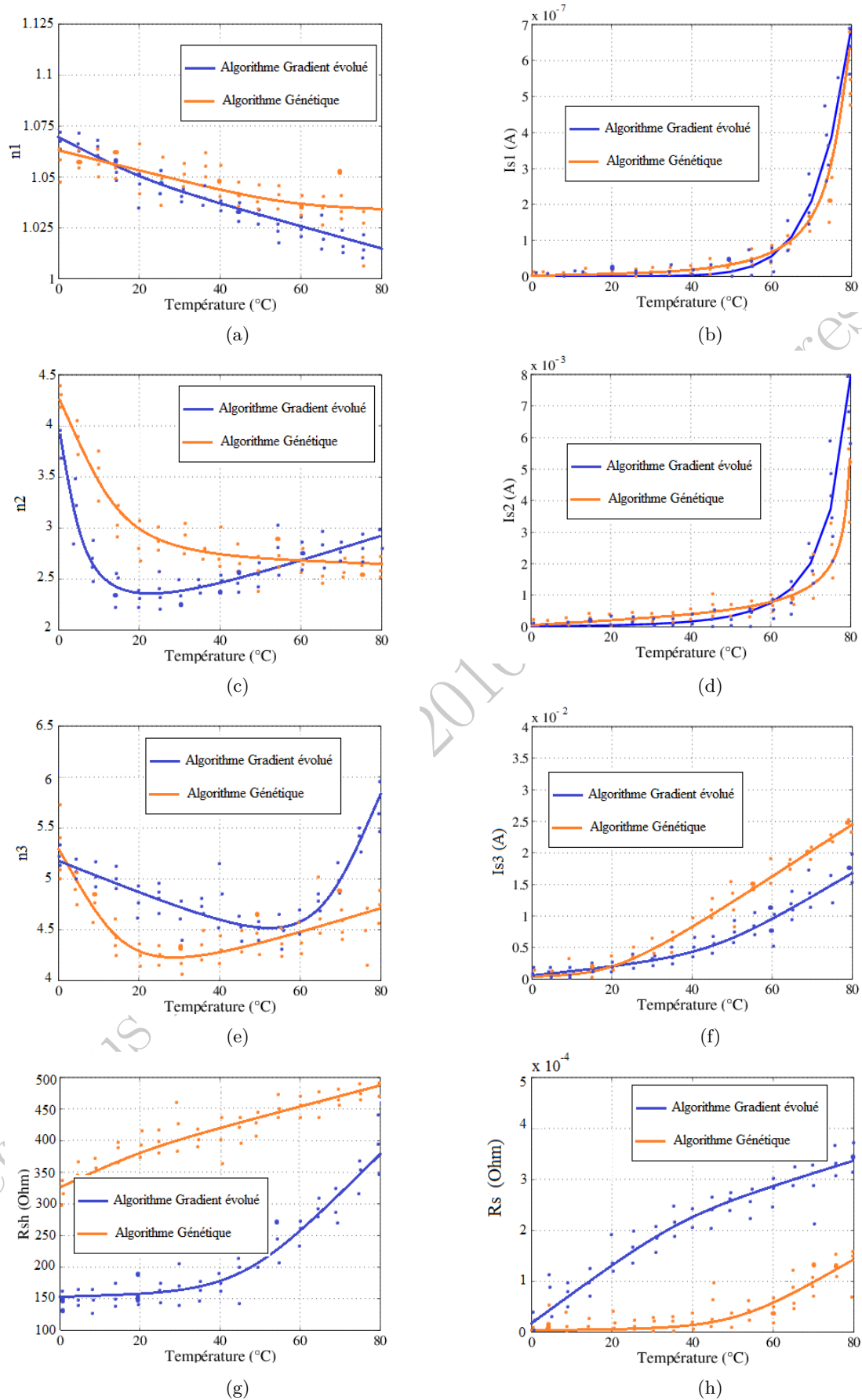


FIGURE II.19 – Variations des paramètres internes du modèle à trois diodes de la cellule solaire JAC M5SF-2 en fonction de la température. (a) Variations de n_1 en fonction de la température. (b) Variations de I_{s1} en fonction de la température. (c) Variations de n_2 en fonction de la température. (d) Variations de I_{s2} en fonction de la température. (e) Variations de n_3 en fonction de la température. (f) Variations de I_{s3} en fonction de la température. (g) Variations de R_{sh} en fonction de la température. (h) Variations de R_s en fonction de la température.

Concernant les facteurs d'idéalités n_1 , n_2 et n_3 (figures II.19.a, II.19.c et II.19.e), on constate que la valeur de n_1 tend vers l'unité avec l'augmentation de la température alors que n_2 et n_3 présentent des formes parabolique des courbes. Ces formes peuvent être justifiées par la limite de la jonction solaire à supporter les fortes températures. En effet, le coefficient d'idéalité de la jonction est lié à plusieurs facteurs comme le taux de dopage du silicium et les défauts intrinsèques du réseau cristallin. Ces facteurs interviennent visiblement surtout à hautes températures (la température favorise la vibration intermoléculaire du réseau cristallin et accélère la collision entre les particules libres) et modifient la qualité de conduction du matériau monocristallin.

II.8 Résultats de simulation et validation expérimentale

Dans cette partie, on vise à présenter puis discuter les résultats des simulations des modèles de la cellule solaire pré-détaillée qui sont implantés dans l'environnement Simulink/SimpowerSystems du Matlab, comme c'est montré par la figure II.20. On présente une comparaison entre les cinq modèles appliqués sur la cellule solaire témoin dans l'STC puis hors de l'STC. On détaille l'effet de l'éclairement et de la température sur les performances de la cellule solaire. Pour finir, on applique les cinq modèles étudiés sur un ensemble de générateurs photovoltaïques de différents types et on montre la validité des modèles pour n'importe quelle technologie de cellules solaires.

II.8.1 Comparaison des modèles de la cellule solaire dans l'STC

La figure II.21 illustre les caractéristiques (I-V) et (P-V) obtenues par simulation à partir des cinq modèles de la cellule solaire étudiés, en les comparant aux caractéristiques de référence de la cellule témoin monocristalline JA JAC MS5f fournies par le constructeur dans la fiche technique.

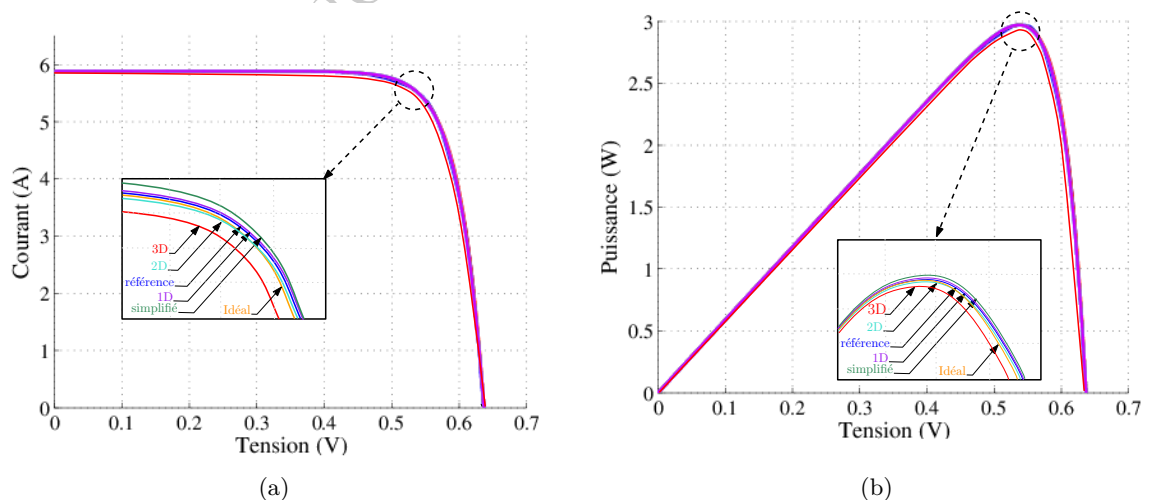


FIGURE II.21 – Comparaison entre les différents modèles et la courbe de référence : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)

L'analyse de la figure met en évidence la capacité des différents modèles à reproduire la

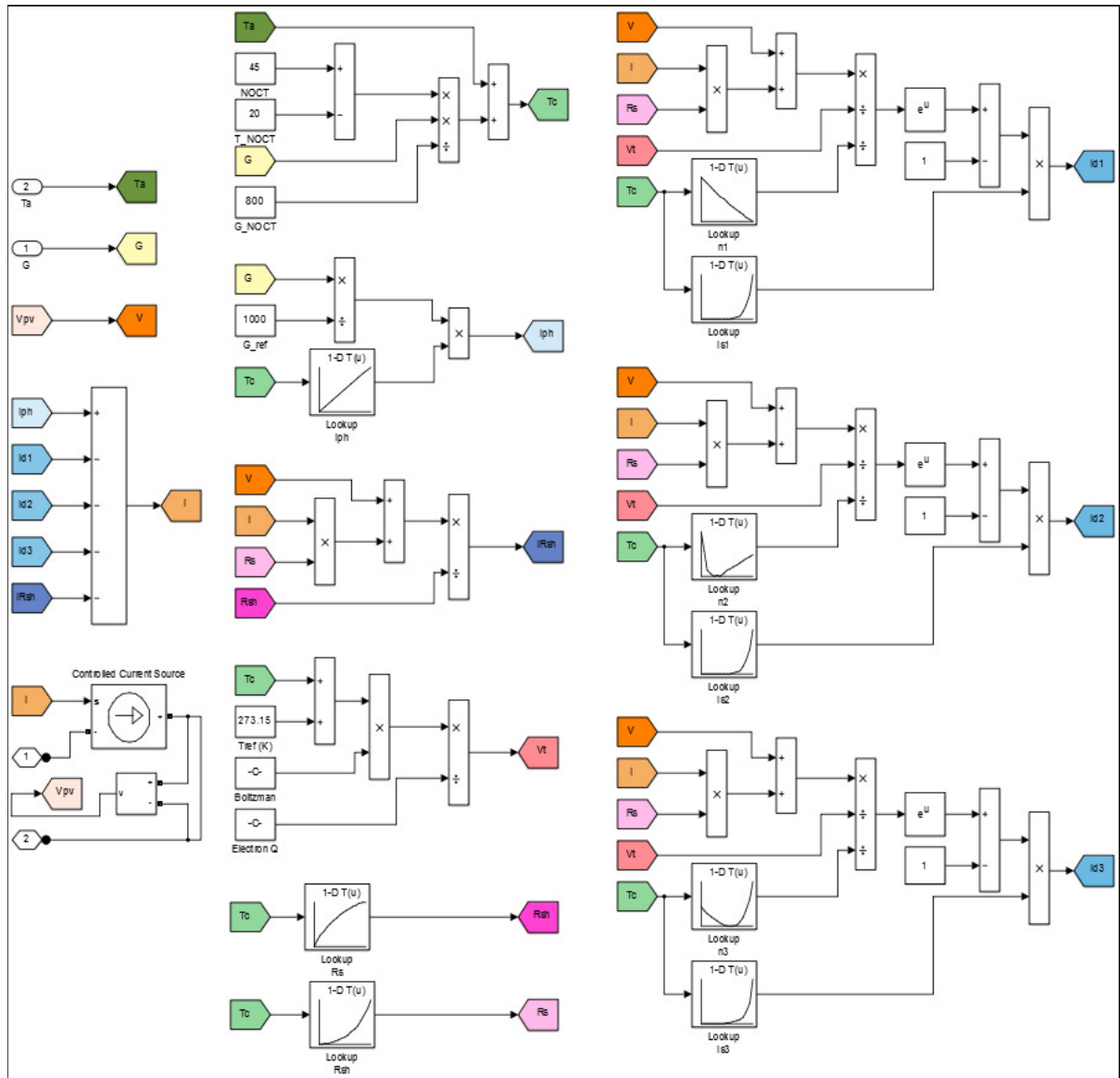


FIGURE II.20 Exemple d'implémentation du modèle de la cellule solaire sur l'environnement MATLAB-Simulink : modèle à triple diodes

caractéristique fournie par le constructeur. Une meilleure concordance en faveur du modèle à une diode peut être observée, perceptible uniquement à fort grossissement.

Pour une évaluation quantitative, l'erreur maximale entre les caractéristiques simulées et la caractéristique de référence est analysée, conjointement avec le facteur de remplissage FF , indiqué dans la fiche technique comme étant égal à 79.19%. L'erreur maximale entre les deux courbes est déterminée à partir de la relation II.129 :

$$\xi_r = \max(|P^{sim} - P^{ref}|) \quad (II.129)$$

Le Facteur de remplissage FF de la cellule solaire peut être évalué à partir de l'expression II.130 :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (II.130)$$

Le récapitulatif des erreurs et des facteurs de remplissage est présenté dans le tableau II.6. Les résultats confirment la bonne concordance des modèles, avec une légère amélioration observée pour le modèle à une diode.

TABLEAU II.6 – comparaison entre les caractéristiques de simulation et la caractéristique de référence

	ξ_r	FF (%)
modèle idéal	0.064	77.48
modèle simplifié	0.0785	77.09
modèle 1D	0.0534	78.68694
modèle 2D	0.0607	78.16661
modèle 3D	0.089	76.8146

II.8.2 Comparaison des modèles de la cellule solaire hors de l'STC

Les mesures expérimentales réalisées sur la cellule solaire monocristalline JA JAC MS5f-2, décrites dans la section I.2.3, sont présentées à la figure II.22. Pour une température ambiante de $T_a = 28^\circ\text{C}$ et un éclairement de $G = 500 \text{ W/m}^2$, les caractéristiques simulées ($I - V$) et ($P - V$) des différents modèles y sont également représentées.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations confirme la validité des modèles en dehors des conditions de test standard, notamment au niveau des points caractéristiques.

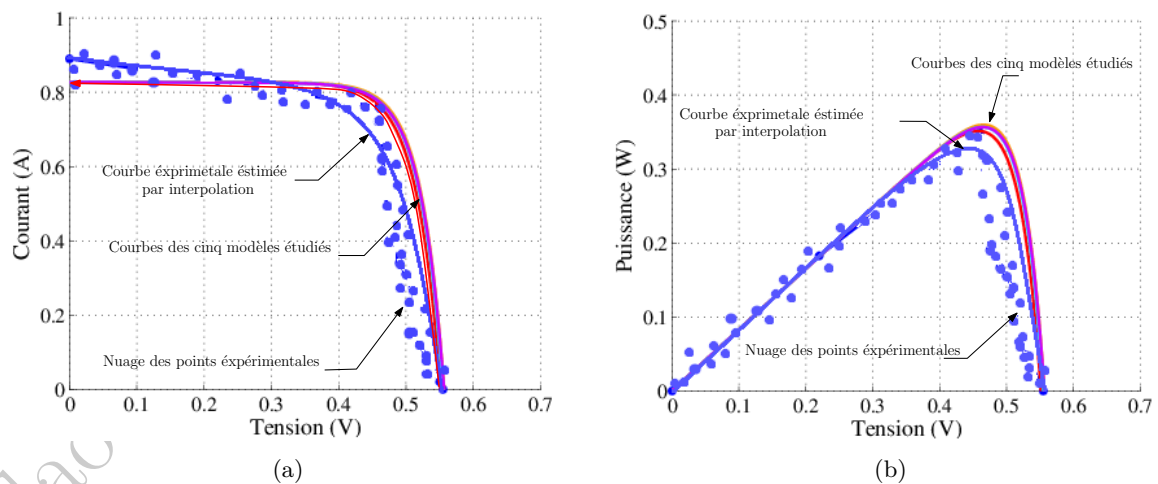


FIGURE II.22 – Comparaison entre les différents modèles et la courbe expérimentale : (a) la caractéristique ($I-V$). (b) la caractéristique ($P-V$)

II.8.3 Évaluation générale des modèles de la cellule solaire

Les résultats comparatifs des différents modèles de la cellule solaire révèlent une forte similarité, l'écart d'erreur entre eux restant limité.

En revanche, des différences significatives apparaissent en termes de complexité et de signification physique des paramètres propres à chaque modèle.

Le tableau II.7 présente une évaluation synthétique des différents modèles selon plusieurs critères.

TABEAU II.7 – Évaluation des modèles de la cellule solaire monocristalline

Modèles	Nombre des Paramètres	Complexité des systèmes	Temps d'exécution	Précision des modèles	Signification Physique
modèle idéal	+++	+++	+++	+	+
modèle simplifié	++	++	++	+	-
modèle 1D	+	+	+	+++	+++
modèle 2D	+	+	+	++	++
modèle 3D	++++	-	-	++	++

Pour les cellules solaires monocristallines, les simulations montrent que le modèle à une diode est le plus approprié et le plus fidèle pour reproduire leur comportement réel. Il constitue un bon compromis entre précision et complexité.

Le modèle idéal s'avère également performant compte tenu de sa simplicité et du nombre réduit des paramètres initiaux nécessaires pour exécuter l'algorithme de recherche. Il propose une précision acceptable avec un temps d'exécution faible, aussi ses paramètres conservent une signification physique cohérente.

En revanche, le modèle à une résistance série comporte des paramètres dépourvus de signification physique rigoureuse ; toutefois, cela n'affecte pas la précision globale du modèle, qui reste satisfaisante. Ce modèle demeure simple et requiert un nombre limité de paramètres initiaux.

Concernant le modèle à deux diodes, sa complexité ainsi que le temps d'exécution élevé de l'algorithme de recherche sont explicitement observables. Il représente néanmoins correctement la cellule solaire monocristalline, notamment du point de vue de la cohérence physique des paramètres.

Les modèles les moins précis dans cette étude sont les modèles multi-diodes, en particulier le modèle à triple diode. Fondé sur la méthode d'ajustement, il apparaît plus complexe que les modèles issus de la méthode d'identification. Néanmoins, ce modèle demeure une approche adaptée à la modélisation des cellules solaires à diodes multiples. Il est également pertinent pour les cellules solaires multijonctions de nouvelle génération ainsi que pour les systèmes photovoltaïques à concentrateurs.

De manière générale, la méthode d'ajustement demeure applicable aux autres modèles de cellule solaire (idéal, simplifié, 1D et 2D) en l'absence des données du constructeur ou lorsque le module étudié subit un phénomène de vieillissement. Dans ce contexte, l'établissement d'un modèle fiable nécessite la réalisation de mesures expérimentales récentes et précises.

II.8.4 Effet de la température et de l'éclairement sur le rendement de la cellule solaire

Dans le but de mettre en évidence l'influence de l'éclairement G sur le comportement de la cellule solaire, la figure II.23 illustre les caractéristiques (I-V) et (P-V) simulées pour différentes valeurs de l'éclairement G . Les résultats permettent de formuler les observations suivantes :

- le courant I_{sc} de court-circuit est proportionnel à l'éclairement G
- la tension V_{oc} du circuit-ouvert demeure relativement élevée, même pour de faibles valeurs de G
- la puissance maximale P_m évolue avec la tension V_m selon une loi non linéaire, en particulier pour de faibles éclairagements G .

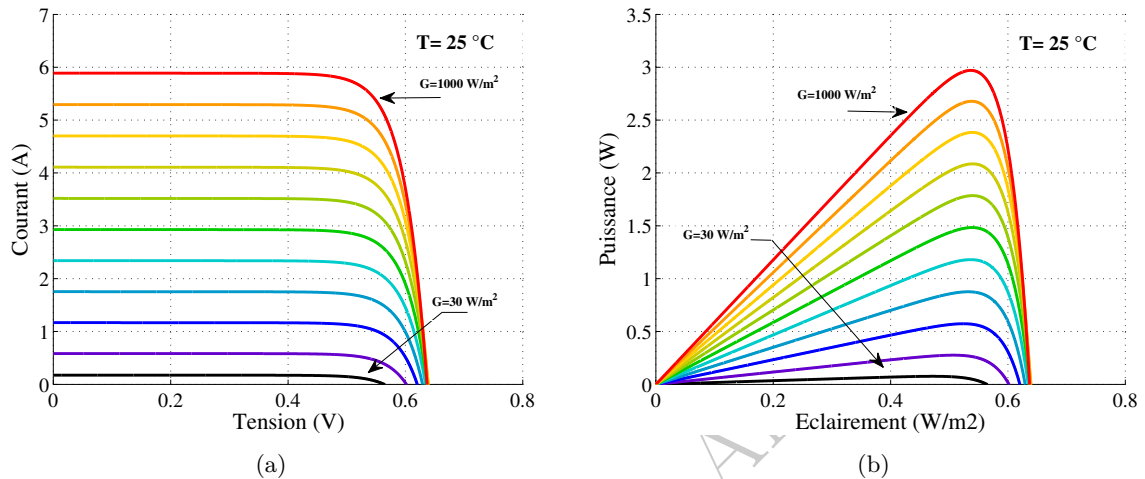


FIGURE II.23 – Effet de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule solaire : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)

Afin d'analyser l'influence de la température de jonction T sur le comportement de la cellule solaire, la figure II.24 présente les caractéristiques (I-V) et (P-V) simulées grâce au modèle de la cellule solaire pour différentes valeurs de T . L'analyse des résultats met en évidence que :

- le point (V_m, I_m) de puissance maximale P_m décroît avec l'augmentation de la température T_c , ce phénomène est dû à la diminution de la tension V_m aux bornes de la cellule, la variation de I_m restant négligeable.
- la puissance maximale P_m évolue de manière quasi linéaire en fonction de la tension V_m pour l'ensemble des valeurs de T_c

L'étude conjointe de l'influence de l'éclairement G et de la Température T sur la cellule solaire montre qu'une diminution de G ou une augmentation de T entraîne une dégradation des performances de la cellule solaire.

Cette perte d'efficacité est due essentiellement à :

- la diminution du courant I produit par le générateur solaire, et fortement sensible à l'intensité de l'éclairement G
- la baisse de la tension V aux bornes du générateur solaire, étroitement liée à la température de jonction T_c

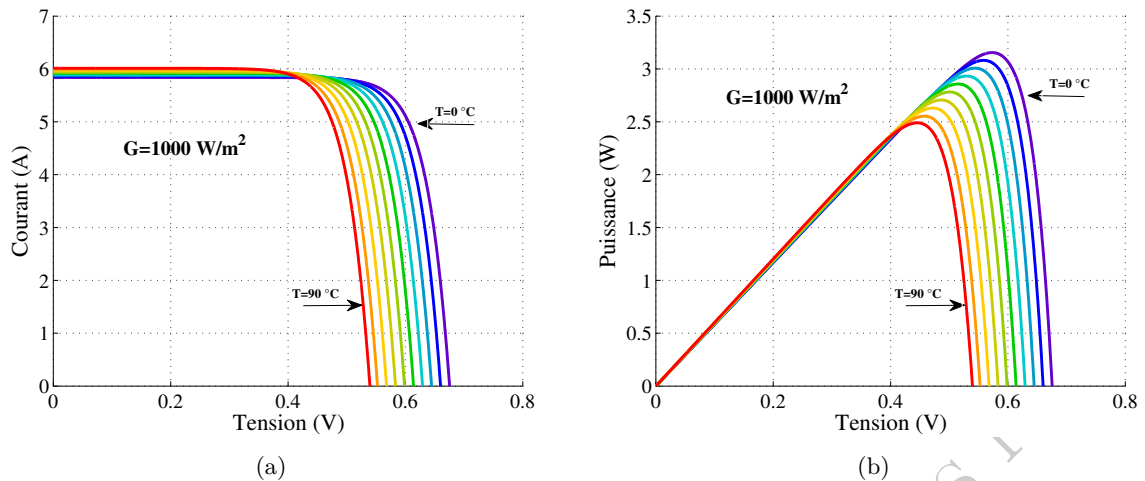


FIGURE II.24 – Effet de la variation de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire : (a) la caractéristique (I-V). (b) la caractéristique (P-V)

II.9 Conclusion

Ce chapitre a traité de la modélisation des cellules solaires photovoltaïques à travers l'étude de cinq modèles électriques distincts. Les méthodes d'identification des paramètres internes ont été présentées en tenant compte de la variation de la température T et de l'éclairement G .

Les résultats obtenus confirment la validité des différents modèles tout en mettant en évidence les avantages et les limites propres à chacun.

L'implémentation des modèles sous Matlab-Simulink a permis de reproduire le comportement de la cellule solaire avec une précision satisfaisante. Les modèles ont également été appliqués à différentes technologies de cellules photovoltaïques, confirmant leur robustesse et leur cohérence.

Le modèle développé peut être intégré dans la simulation complète des chaînes de conversion photovoltaïques, en association avec d'autres blocs tels que les convertisseurs, les onduleurs, batteries et charges, etc.

Chapitre III

Association et Exploitation Optimales de Cellules et Modules Solaires

Résumé : Dans ce chapitre, on propose de faire connaissance avec l'association des cellules solaires ainsi que la composition d'un module solaire PV. On discute des problèmes fondamentaux responsables du mauvais fonctionnement du module solaire. On suggère d'étudier le gisement solaire disponible dans l'environnement, qui dépend de la situation géographique, et on souligne les avantages et les bénéfices énergétiques liés à la trajectoire du soleil. Les travaux de ce chapitre sont clôturés par la présentation de la conception et la réalisation d'un suiveur solaire intelligent motorisé sur deux axes et programmé en boucle fermée.

Mots clés : Cellule / Module Solaire PV,
Associations série / parallèle / Mixte,
Ombrage uniforme et partiel,
Effet de maladaptation / point chaud,
Gisement et radiation solaire,
Suiveur solaire intelligent.

III.1 Introduction

Le générateur PV, lors de son fonctionnement quotidien, est sujet à plusieurs contraintes affectant son rendement et sa sûreté. Le graphe de la figure III.1 résume les principaux éléments qui peuvent influencer les performances d'un module PV [59, 60, 61, 62].

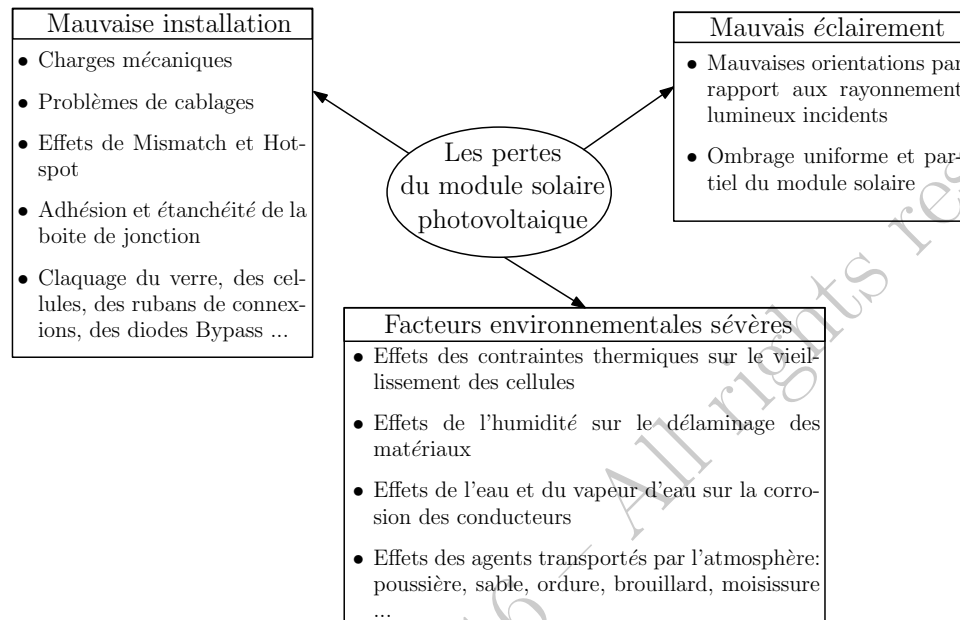


FIGURE III.1 – Principaux facteurs conduisant à la dégradation du rendement d'un générateur PV.

L'installation d'un générateur PV assurant un rendement optimal est principalement dictée par l'échappement adéquat contre les différentes sources de pertes. Il est sous-entendu que ce travail ne vise pas l'optimisation du générateur PV du point de vue physique et chimique conduisant à l'amélioration de la qualité de jonction solaire en elle-même, mais plutôt qu'on vise une meilleure exploitation et protection de l'équipement solaire dans le but d'en extraire le maximum d'énergie et de prolonger la durée de vie avec un rendement élevé. À partir du graphe de la figure III.1 on peut extraire trois actions à entreprendre pour optimiser le rendement solaire :

Maintenance et Réparation : Certains dommages mécaniques et électriques ainsi que des dépôts naturels atmosphériques appliqués sur le module PV ne peuvent être traités et soignés que par la maintenance quotidienne programmée de l'équipement pour surveiller minutieusement l'habilité du module et enlever les différents dommages.

Prévention des risques : Le fonctionnement du module PV comporte des risques identifiés et prévisibles liés surtout aux grandeurs électriques caractérisant le générateur solaire. Afin de surmonter ces risques, on mène des études théoriques et des travaux de simulation visant à anticiper et à valoriser les pertes et à contourner l'origine des défauts et ensuite à synthétiser des solutions abordables.

Régulation par contrôle et commande : Cette action est prise généralement suite à l'action de prévention. L'anomalie attaquant le module PV, étudiée théoriquement, peut être contournée par un système de régulation adéquat. Ce système doit évidemment

contenir des capteurs de détection de défauts nécessaires pour la phase de contrôle, des actionneurs capables d'intervenir mécaniquement et électriquement pour empêcher les dégâts. La phase de commande est assurée par une unité de traitement (généralement un microcontrôleur) capable de traiter l'information requise par les capteurs, de prendre des décisions par calculs appropriés et de transmettre les signaux de commande aux actionneurs.

Les travaux menés dans ce chapitre visent à participer aux thèmes de prévention des risques et de la régulation des systèmes PV, tout d'abord par la simulation du comportement d'une association de cellules solaires sous divers facteurs environnementaux et ensuite par la conception et la réalisation d'un système de régulation (un suiveur solaire intelligent) programmé en boucle fermée pour optimiser le rendement du module PV.

Tout d'abord, on présente les diverses formes de générateurs PV (cellule, module, panneau et matrice) et la composition mécanique d'un module solaire. On étudie ensuite rigoureusement les types d'associations des cellules solaires en vue de modéliser un module solaire 50W de caractéristiques électriques comparables au module utilisé dans la pratique. On conduit des essais expérimentaux sur le module solaire 50W afin de valider des résultats trouvés par simulation. Il est à noter que, le long de ce travail, on a considéré un seul module et on n'a pas abordé l'étude des associations de plusieurs modules solaires.

Par la suite, on étudie, en vue d'intervenir par action préventive, les paramètres clés affectant le rendement des modules solaires, principalement l'effet de l'ombre, de la maladaptation et du point chaud. On élabore ainsi un modèle de simulation d'un module solaire qui met en évidence ces divers problèmes étudiés.

La troisième partie concerne l'étude du gisement et de la radiation solaire disponible dans l'environnement et leurs caractéristiques en vue de leur exploitation optimale. Pour cette finalité, on présente une vue générale sur l'état du gisement solaire en Tunisie et à Sfax particulièrement. On enchaîne avec l'étude du mouvement et du positionnement du soleil par rapport à la terre. On présente ensuite l'étude de la radiation solaire incidente sur un plan incliné (on étudie le cas de la ville de Sfax) et on élabore un modèle de simulation mettant en relief l'importance et l'intérêt de la poursuite de trajectoire du soleil, par le module PV, dans la génération d'une puissance maximale d'énergie électrique.

La quatrième et dernière partie concerne la conception et la réalisation d'un suiveur solaire intelligent motorisé sur deux axes et programmé en boucle fermée, capable de détecter la position du soleil tout en faisant les régulations nécessaires pour s'échapper de toutes sources d'ombrage.

III.2 Associations des cellules et modules solaires photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque peut être employée pour les petites et les larges applications suivant la puissance totale désirée. Pour cela les cellules solaires (figure III.2.a) peuvent être associées en série et/ou en parallèle pour augmenter la tension et/ou l'intensité d'utilisation souhaitées [13].

Un module photovoltaïque (figure III.2.b) est composé de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle (généralement les fabricants préfèrent l'utilisation de l'association en série seulement à l'intérieur du même module). Un panneau photovoltaïque, comme cela est illustré par la figure III.2.c, est constitué de plusieurs modules connectés électriquement en série ou en parallèle et montés ensemble sur le même support mécanique. Enfin, un réseau ou une matrice ou encore un tableau photovoltaïque est composé de plusieurs panneaux solaires reliés électriquement en série ou en parallèle, comme le montre la figure III.2.d. Dans ce qui suit, on présente la composition d'un module solaire PV puis on étudie l'influence des associations des cellules solaires sur les grandeurs électriques de sortie du générateur PV résultant.

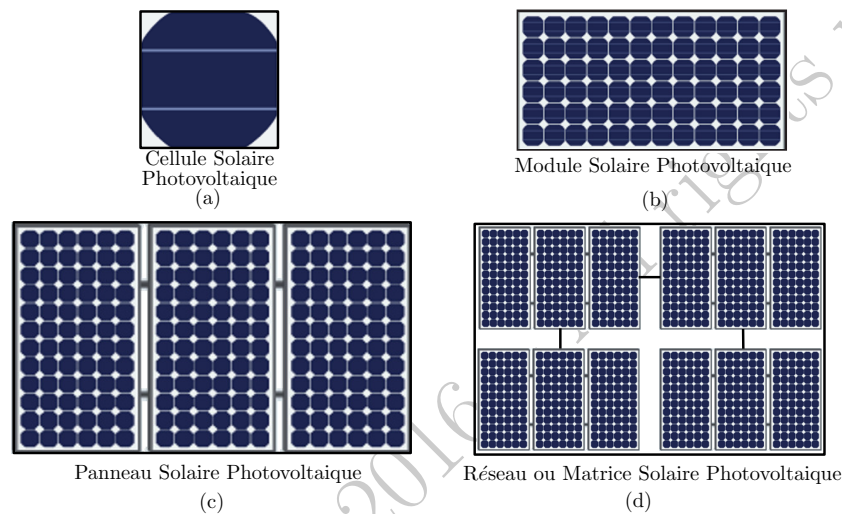


FIGURE III.2 – Illustrations de (a) Cellule solaire, (b) Module solaire, (c) Panneau solaire, (d) Matrice solaire.

III.2.1 Composition d'un module solaire PV

Un module PV est constitué de plusieurs cellules solaires interconnectées (typiquement 36 cellules connectées en série) et encapsulées dans une seule unité robuste et durable. L'objectif principal d'encapsuler l'ensemble des cellules solaires connectées électriquement est de les protéger ainsi que leurs fils (rubans) métalliques d'interconnexion de l'environnement sévère dans lequel elles sont utilisées. En effet, les cellules solaires d'épaisseur relativement mince sont très fragiles et sont sujettes à des dommages mécaniques à moins qu'elles soient parfaitement conservées. En outre, la grille métallique frontale de la cellule solaire et des rubans métalliques d'interconnexion reliant les différentes cellules peuvent être corrodés par l'eau ou par la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions d'encapsulation sont la protection contre l'endommagement mécanique et l'effet de corrosion [7, 56].

Il existe de nombreux types de modules photovoltaïques avec des structures différentes appropriées à la nature des cellules solaires employées. Par exemple, les cellules solaires au silicium amorphe sont souvent enrobées dans une matière flexible, tandis que les cellules solaires au silicium sont généralement emballées par des couches rigides avec une façade en verre durable.

La durée de vie de ces modules est largement déterminée par la façon dont ils sont protégés contre l'environnement ambiant. Certains fournisseurs indiquent une durée de vie de 30 ans et accordent des garanties de 5 à 10 ans assurant que le module produit 90% de sa puissance nominale pour les 10 premières années. Il est à noter ainsi que l'optimisation du rendement d'un module solaire exige en premier lieu la protection et la maintenance appropriées de l'équipement durant toute sa période d'utilisation.

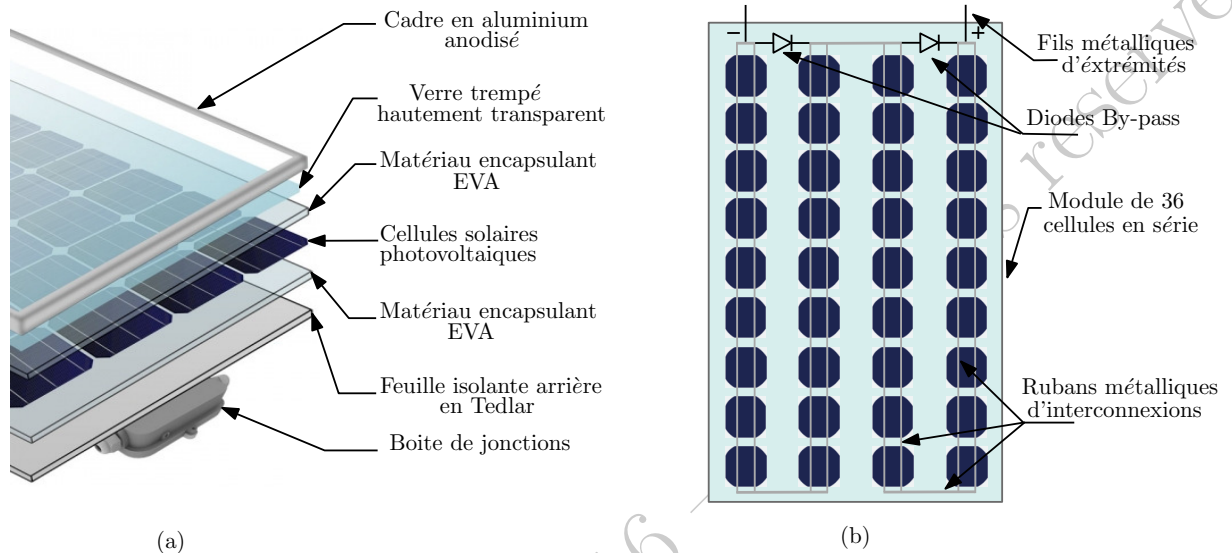


FIGURE III.3 – Illustrations d'un module solaire typique. (a) Composition du module. (b) Liaisons électriques des cellules

Un module solaire classique se compose généralement de plusieurs couches de protections encapsulées de manière robuste, comme c'est illustré par la figure III.3.a [63].

Matériau de surface avant : La surface frontale d'un module PV en silicium doit avoir une transmission élevée de la lumière dans la gamme de longueur d'onde de 350 nm à 1200 nm.

En outre, la réflexion sur la surface avant doit être faible. Cette réflexion pourrait être réduite par l'application d'un revêtement antireflet à la surface supérieure. Cependant, il n'est pas suffisamment robuste pour résister aux conditions environnementales sévères dans lesquelles la plupart des systèmes photovoltaïques sont utilisés. Une autre technique pour réduire la réflexion est de poncer ou texturer la surface. Cependant, dans ce cas, la poussière et la saleté sont plus susceptibles de se fixer sur la surface supérieure, et moins susceptibles d'être délogées par le vent ou la pluie. Ces modules ne sont plus "autonettoyants", et les avantages de la réflexion réduite sont rapidement compensés par les pertes en raison de l'augmentation de la salissure sur la surface avant.

En plus de ses propriétés de réflexion et de transmission, le matériau de surface supérieure doit être imperméable à l'eau, doit avoir une bonne résistance mécanique aux chocs, doit suffisamment être rigide pour supporter les cellules solaires et le câblage, devrait être stable dans l'exposition prolongée aux rayonnements ultraviolets (UV) et

devrait avoir une faible résistivité thermique.

Il y a plusieurs choix pour un matériau de surface supérieure comme les polymères, les acryliques, et le verre trempé. Le verre trempé à faible teneur en fer est souvent le matériau le plus utilisé puisqu'il est de faible coût, solide, stable, très transparent, imperméable à l'eau et aux gaz et a de bonnes propriétés d'auto-nettoyage.

Matériau de surface arrière : Les principales caractéristiques de la surface arrière d'un module photovoltaïque sont la faible résistance thermique et l'étanchéité contre la pénétration de l'eau et de la vapeur d'eau. Dans la plupart des modules, une feuille de polymère mince, typiquement le *Fluorure de polyvinyle* (PVF) souvent connu sous le nom de marque "Tedlar", est utilisée pour la surface arrière. Certains modules photovoltaïques, appelés modules bifaciaux, sont conçus pour accepter la lumière provenant de l'avant et de l'arrière de la cellule solaire. Dans ce cas, les deux surfaces doivent optiquement être transparentes.

Matériau d'encapsulation : Un matériau d'encapsulation est utilisé pour assurer l'adhérence entre les cellules solaires, la surface supérieure et la surface arrière du module photovoltaïque. L'encapsulant doit être stable à des températures élevées et à une forte exposition aux UV. Il devrait également être optiquement transparent et doit présenter une faible résistance thermique. L'*éthyl-acétate de vinyle* (EVA) est le matériau encapsulant le plus couramment utilisé. L'EVA vient en feuilles minces qui sont insérées entre les cellules solaires, la surface supérieure et la surface arrière. Ce sandwich est ensuite chauffé à 150 °C pour polymériser l'EVA et lier l'ensemble du module.

Cadre : La bordure ou le cadrage est le composant de structure finale du module. Il est typiquement fabriqué en aluminium et la structure du châssis est exempte de projections qui pourraient entraîner le dépôt de l'eau, de poussière ou d'autres matières. En outre, des cadres en plastique sont aussi conçus pour la technologie des modules en silicium à couche mince.

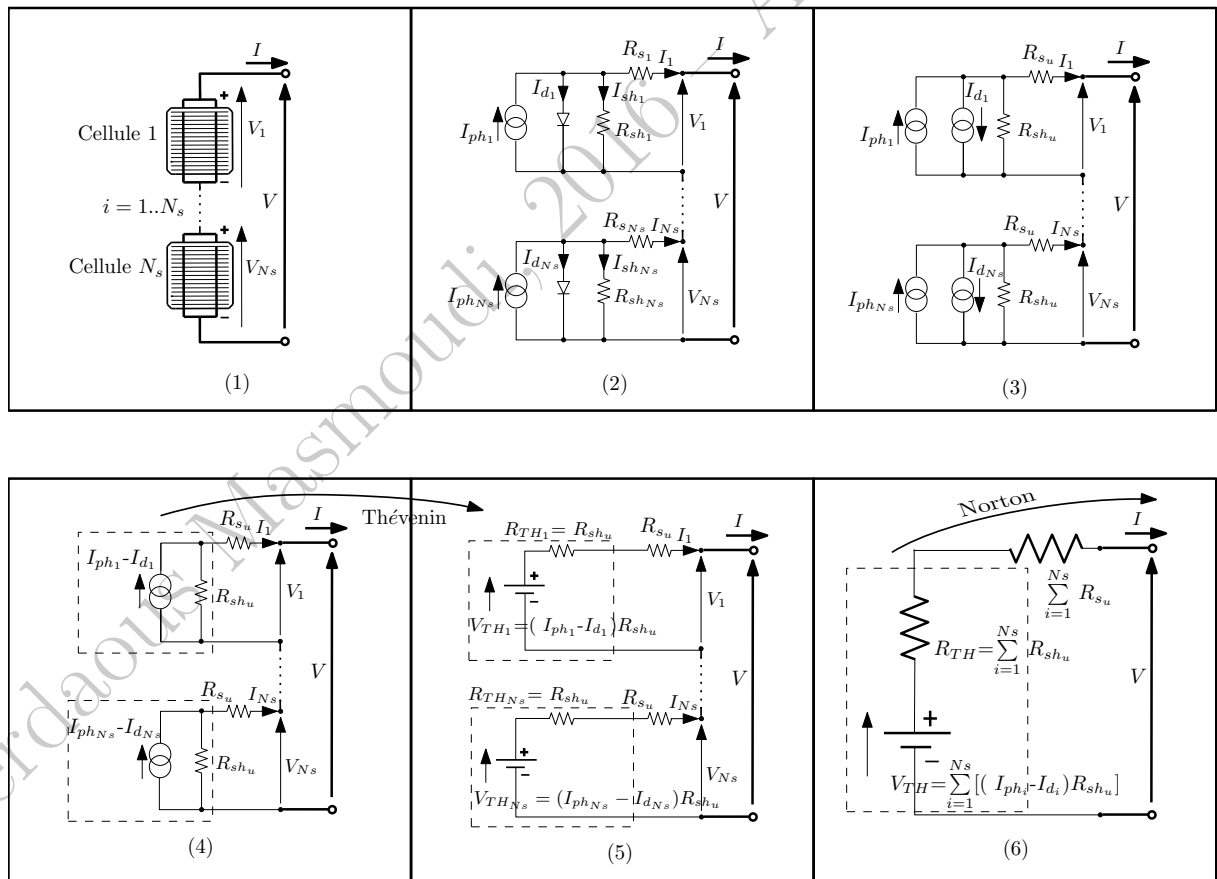
Boîte de jonction : Une boîte de jonction est l'interface de sortie d'un module solaire. Elle contient les liaisons électriques et les extrémités des rubans métalliques reliant les cellules solaires ainsi que les diodes "Bypass" assurant la protection du module contre les courants de retour lorsqu'il est à l'obscurité (figure III.3.b). La boîte de jonction photovoltaïque est une enceinte étanche en plastique, fixée à l'arrière du panneau solaire avec un adhésif de silicone. Elle maintient des connexions de bornes à l'abri de l'effet de corrosion car elle empêche la pénétration des intrusions.

III.2.2 Association en série des cellules solaires

Pour un nombre N_s de cellules solaires connectées en série, les tensions délivrées par chaque cellule $V_i, i = 1..N_s$, s'additionnent et la somme est la tension résultante V . Par ailleurs, toutes les cellules sont traversées par le même courant, et le courant I total résultant d'une association en série de cellules solaires dépend des courants I_i générés par chaque cellule. Afin de déterminer les relations mathématiques exactes des grandeurs électriques résultantes d'une association en série de N_s cellules solaires, on mène sur la figure III.4 l'illustrations avec démonstration de la démarche de calcul du circuit électrique équivalent.

Les hypothèses considérées dans cette démonstration sont les suivantes :

- On considère que toutes les cellules sont de même type, exactement identiques, semblables à une cellule unitaire, et leurs paramètres internes liés à la qualité de la jonction sont égaux, on obtient alors : $I_{s_i} = I_{s_u}, R_{s_i} = R_{s_u}, R_{sh_i} = R_{sh_u}, n_i = n_u$, pour $i = 1..N_s$.
- On néglige les résistances additionnelles dues aux fils d'interconnexion reliant les cellules.
- On considère la diode en parallèle équivalente à une source de courant liée avec $I_{di} = I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V_i + R_{s_u} I_i}{n_u V_t} \right) - 1 \right)$



Les équations mathématiques des grandeurs électriques résultantes d'une telle association s'écrivent

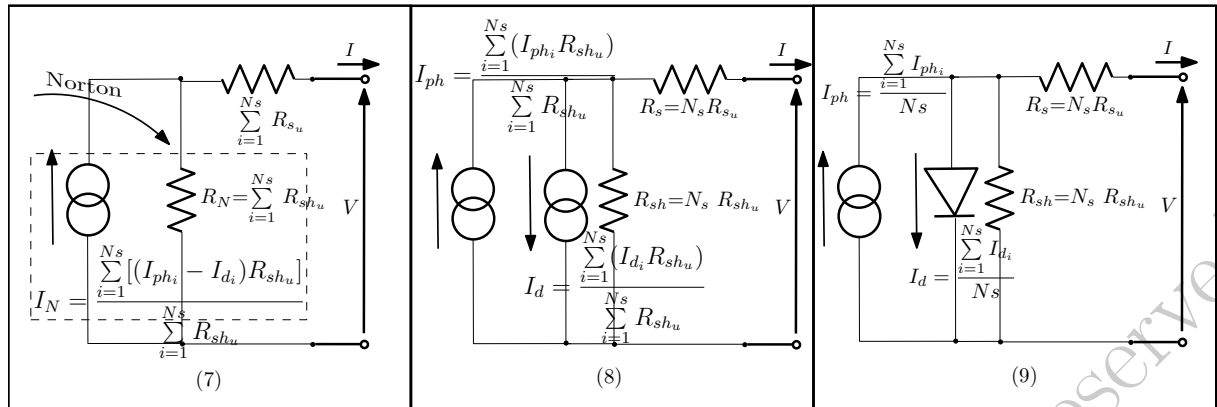


FIGURE III.4 – Illustrations avec démonstration d’une association en série de N_s cellules solaires.

comme suit :

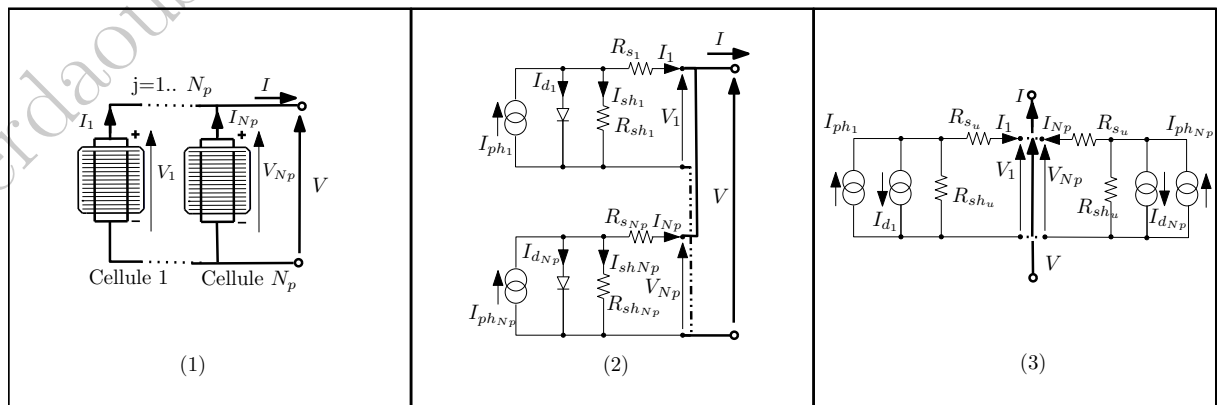
$$V = \sum_{i=1}^{N_s} V_i \tag{III.1}$$

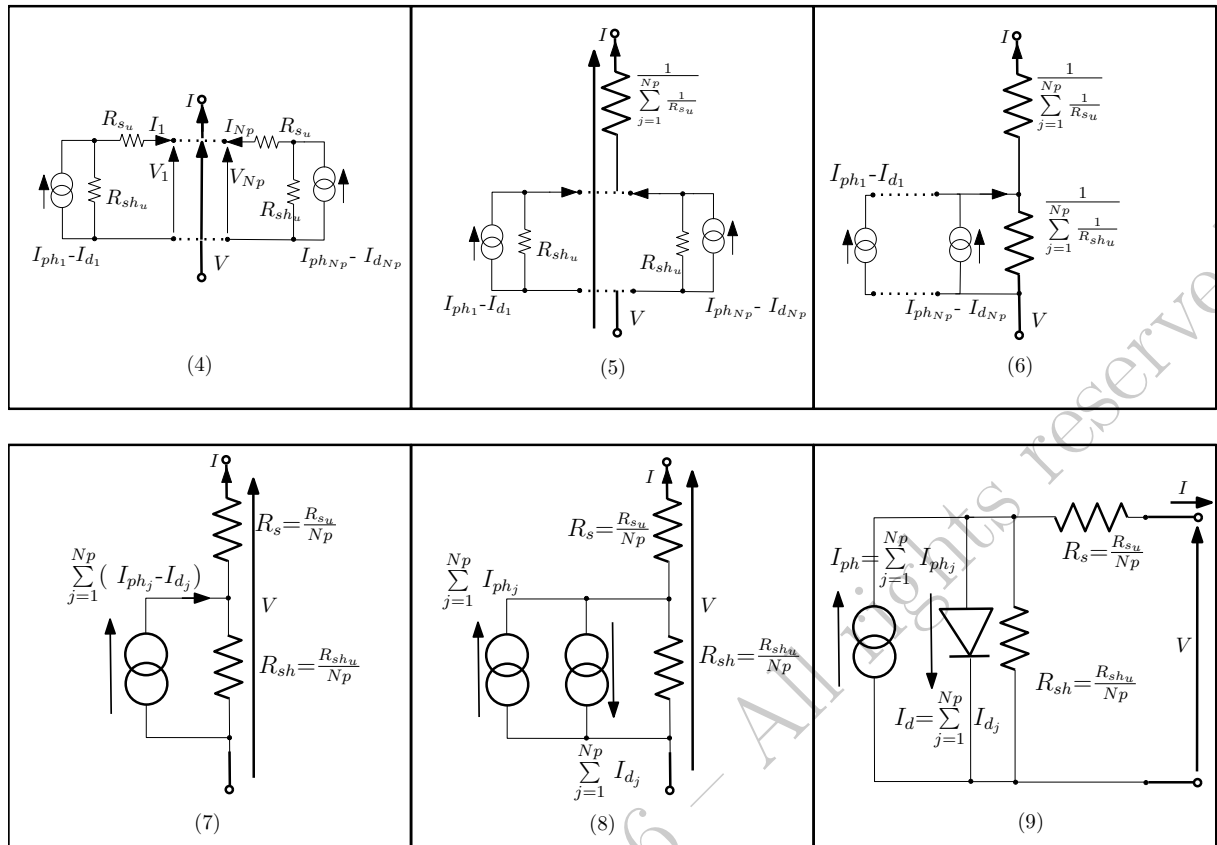
$$I = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} I_{ph_i}}{N_s} - \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \left[I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V_i + R_{s_u} I_i}{n_u V_t} \right) - 1 \right) \right]}{N_s} - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_{sh}} \tag{III.2}$$

Pour les cellules solaires monocristallines typiques (comme la cellule utilisée dans ce travail) avec une grille métallique avant classique, une connexion en série est établie en reliant les barres de la grille métallique du côté frontal avec le contact métallique arrière de la cellule voisine.

III.2.3 Association en parallèle des cellules solaires

Pour un nombre N_p de cellules solaires connectées en parallèle, les courants délivrés par chaque cellule I_j , $j = 1..N_p$, s’additionnent et la somme donne lieu au courant résultant I . De plus, toutes les cellules sont connectées à la même différence de potentiel et la tension résultante V dans une association parallèle de cellules solaires dépend des tensions V_j générées par chaque cellule.




 FIGURE III.5 – Illustrations avec démonstration d'une association en parallèle de N_p cellules solaires.

La figure III.5 montre l'illustration avec démonstration de la démarche de calcul du circuit électrique équivalent. On garde les mêmes hypothèses considérées dans l'association série.

Les équations mathématiques des grandeurs électriques résultantes de l'association parallèle s'écrivent comme suit :

$$I = \sum_{j=1}^{N_p} (I_j) = \sum_{j=1}^{N_p} I_{ph_j} - \sum_{j=1}^{N_p} \left[I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V_j + R_{s_u} I_j}{n_u V_t} \right) - 1 \right) \right] - \frac{V + \frac{R_{s_u} I}{N_p}}{\frac{R_{sh_u}}{N_p}} \quad (\text{III.3})$$

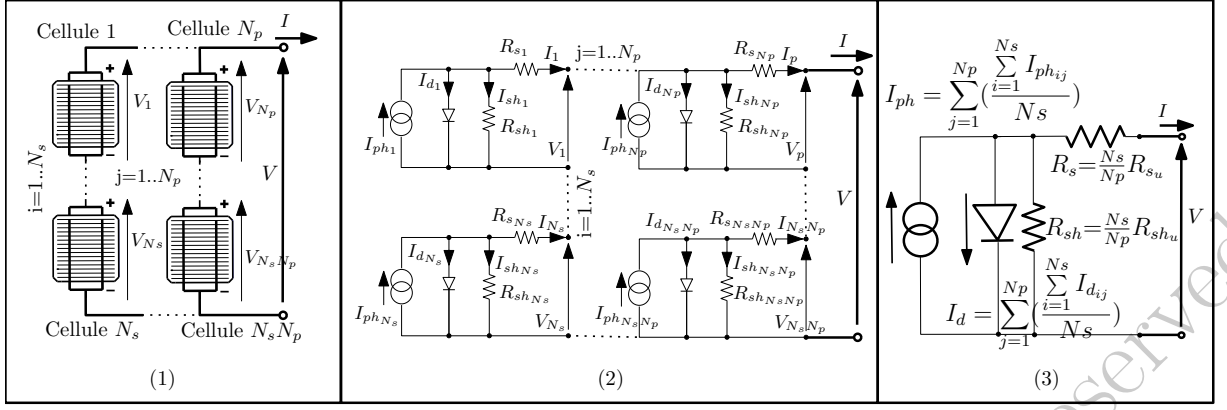
On déduit alors :

$$V = \left(\left[\sum_{j=1}^{N_p} I_{ph_j} - \sum_{j=1}^{N_p} I_{d_j} - I \right] \frac{R_{s_u}}{N_p} \right) - \frac{R_{s_u}}{N_p} I \quad (\text{III.4})$$

III.2.4 Association mixte des cellules solaires

Un module photovoltaïque peut être formé par la mise en parallèle de N_p séries de N_s cellules. La figure III.6 illustre les circuits électriques équivalents d'une association mixte des cellules solaires.

En s'appuyant sur les relations établies pour les associations série et parallèle, les équations


 FIGURE III.6 – Illustrations d'une association mixte de $N_s \times N_p$ cellules solaires.

mathématiques des grandeurs électriques d'une association mixte s'écrivent comme suit :

$$I = \sum_{j=1}^{N_p} I_j = \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_s} I_{ph_{ij}}}{N_s} \right) - \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_s} I_{d_{ij}}}{N_s} \right) - \frac{V + \frac{N_s}{N_p} R_{s_u} I}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh_u}} \quad (\text{III.5})$$

On obtient alors :

$$V = \sum_{i=1}^{N_s} V_i = \left(\left[\sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_s} I_{ph_{ij}}}{N_s} \right) - \sum_{j=1}^{N_p} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_s} I_{d_{ij}}}{N_s} \right) - \sum_{j=1}^{N_p} I_j \right] \frac{N_s}{N_p} R_{s_u} \right) - \frac{N_s}{N_p} R_{sh_u} \sum_{j=1}^{N_p} I_j \quad (\text{III.6})$$

III.2.5 Caractérisation du module solaire monocristallin 50W utilisé

Le module solaire photovoltaïque utilisé dans les travaux expérimentaux est un module en silicium monocristallin de puissance 50W composé de 36 mi-cellules (les cellules sont de même référence que la cellule solaire considérée dans le chapitre 2) connectées en série et muni de deux diodes bypass branchées dans la boîte de jonction comme c'est indiqué dans la figure III.3.b.

Les caractéristiques électriques et mécaniques du datasheet du module utilisé sont regroupées dans le tableau III.1.

Le module employé est testé expérimentalement afin d'enlever les allures de ses caractéristiques électriques réelles. Le banc d'essai est organisé comme le montre la figure III.7.a. Les tests sont effectués durant une journée d'été à ciel clair à une température moyenne de 39°C mesurée par un thermomètre classique et l'éclairement mesuré à l'aide d'un luxmètre qui indique une valeur presque constante de 156 kLux (les mesures de luxmètre dans les conditions de lumière du jour diffus sont estimées équivalentes à 1 W/m² pour 179 lux [64]). Les résultats des tests expérimentaux sont tracés sur la figure III.7.b.

Afin de construire le modèle de simulation sur Matlab du module 50 W adopté, on a utilisé le modèle à une diode d'une cellule solaire développé dans le chapitre 2 et on a associé 36 cellules en série (voir le modèle construit dans la figure III.18). Les résultats de simulation du module complet sont tracés sur la figure III.7.b. La comparaison entre l'allure expérimentale et l'allure

TABLEAU III.1 – Spécifications techniques du module solaire 50W dans l'STC

Grandeurs	Valeur
Puissance maximale P_{mref}	53.45 W
Tension au point de puissance maximale V_{mref}	19.33 V
Courant au point de puissance maximale I_{mref}	2.765 A
Tension du circuit-ouvert V_{ocref}	22.93 V
Courant de court-circuit I_{scref}	5.888 A
Nombre de cellules N_s	36 (9×4)
Type des cellules	Monocristallines "JAC M5SF-2"
Coefficient de température de puissance K_p	-0.41 % /K
Coefficient de température de Tension K_v	-0.33 % /K
Coefficient de température du courant K_i	0.059 % /K
Rendement η	19.2~20 %
Température d'opération nominale de la cellule $NOCT$	45 °C
Dimensions ($l \times L \times H$)	(45 × 45 × 3.5) cm
Poids	4.5 Kg
Nombre de diode Bypass	2

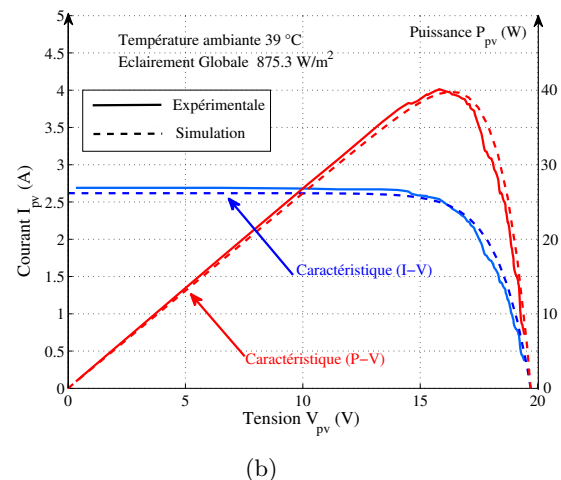
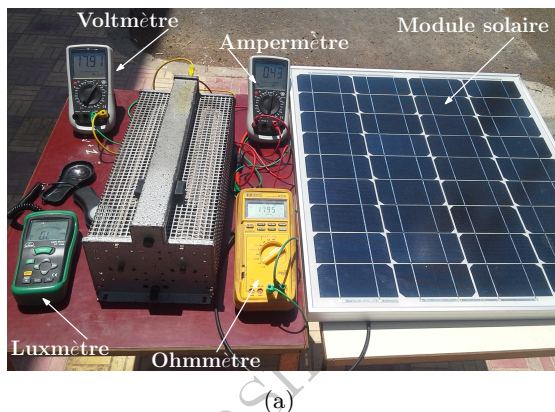


FIGURE III.7 – Module solaire 50W utilisé. (a) Banc d'essai des tests expérimentaux. (b) Comparaisons entre les caractéristiques électriques expérimentales et de simulation

par simulation montre une ressemblance remarquable ; ce qui prouve la validité du modèle même pour associer des cellules.

III.3 Problèmes engendrant les pertes du module PV

Le module solaire PV, composé de plusieurs cellules interconnectées, doit être utilisé d'une manière appropriée équivalente à un fonctionnement dans le premier quadrant de la caractéristique ($I - V$) (Figure I.6). Tout problème ou facteur environnemental sévère engendrant des dommages sur le module PV peut causer le passage du point de fonctionnement vers le deuxième ou le quatrième quadrant de la caractéristique ($I - V$). Le module ou certaines cellules à l'intérieur se transforment en charges passives qui absorbent de l'énergie plutôt que de la produire et

de la dégager sous forme thermique, causant ainsi des dégâts souvent irréversibles. Afin d'examiner comment de tels scénarios doivent être manipulés, on propose d'analyser de plus près les phénomènes et les causes fondamentales à l'origine de tels effets et d'essayer de les modéliser.

III.3.1 Ombrage uniforme et partiel

Le phénomène d'ombrage photovoltaïque peut se produire à cause des nuages, des obstacles environnementaux tels que les arbres et les bâtiments, la saleté et la poussière, ainsi que la neige, les fientes d'oiseaux, et souvent l'auto-ombrage entre les rangées parallèles des panneaux (en cas d'associations de plusieurs modules).

L'ombrage est considéré comme l'un des problèmes majeurs auxquels sont confrontés les systèmes photovoltaïques. En effet, il entraîne une diminution significative du rendement du système et peut, dans certains cas, provoquer l'endommagement des cellules.

À cet effet, l'optimisation du rendement d'un module solaire nécessite l'analyse des causes et des effets des ombrages sur les différentes associations des cellules solaires afin d'empêcher leurs occurrences [65, 66, 67, 68].

L'ombrage est dit uniforme lorsqu'il est simplement causé par l'abaissement de l'intensité du niveau d'éclairage de tout le système photovoltaïque d'une manière homogène sans provoquer des séparations entre les zones ombrées et non ombrées. Un exemple d'ombrage uniforme serait généralement dû à un ciel nuageux.

L'ombrage partiel est créé lorsqu'un objet physique, comme un poteau de téléphone ou un arbre, masque physiquement la lumière du soleil, il en résulte la création des zones éclairées et non éclairées sur la cellule.

III.3.1.1 Ombrage d'une cellule unitaire

On étudie dans cette partie l'effet de l'ombrage sur une seule cellule solaire, comme l'indique la figure III.8. La cellule 1 est parfaitement éclairée par une radiation d'intensité de 1000 W/m^2 . La cellule 2 est uniformément ombrée par rapport à la première cellule par un facteur d'ombrage $f_o=0.5$ équivalent à un éclairage de 500 W/m^2 . La troisième cellule est partiellement ombrée par un facteur $f_o=0.5$ qui est équivalent à un éclairage maximal pour la moitié de la surface de la cellule alors que l'autre moitié est complètement dans l'obscurité.

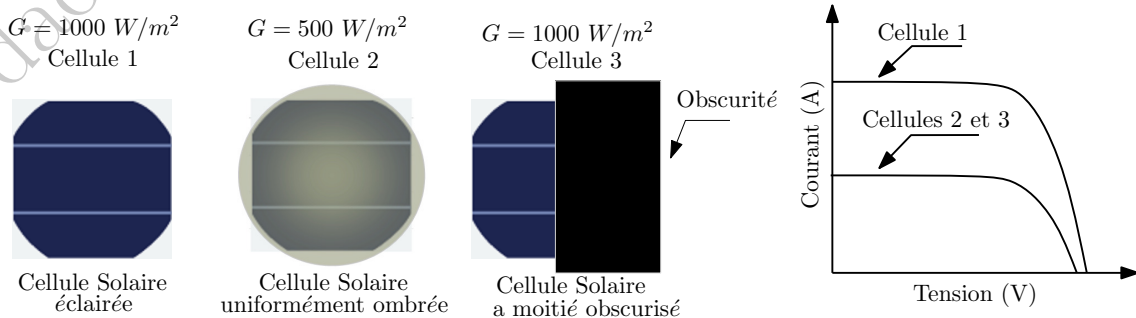


FIGURE III.8 – Illustrations des cellules solaires sous différentes circonstances d'éclairagements.

Les allures des caractéristiques électriques des différentes cellules montrent que pour une cellule unitaire, l'effet d'un ombrage partiel est équivalent à un ombrage uniforme de facteur équivalent. On conclut alors que le courant de sortie diminue proportionnellement à la quantité d'ombrage. Pour une cellule solaire unitaire, l'ombrage uniforme et l'ombrage partiel engendrent exactement le même comportement. Ce résultat peut être considéré comme évident physiquement car le courant photonique est directement proportionnel à la surface et à l'éclairement incident (Paragraphe I.3.2.3 les relations 1.2 et 1.3 du chapitre I).

Le facteur d'ombrage f_o s'exprime alors en fonction de deux composantes : le taux de surface T_s qui représente l'aire de la surface ombrée par rapport à la surface totale de la cellule (dans le cas de la cellule utilisée, la surface est $\frac{15,6}{2}$ cm²) et la densité d'ombrage D_o qui représente le taux d'ombrage par rapport à l'éclairement de référence.

$$f_o = 1 - T_s(1 - D_o) \quad (\text{III.7})$$

avec :

$$T_s = \frac{\text{Surface ombrée}}{\text{Surface totale}} \quad (\text{III.8})$$

$$D_o = \frac{\text{Éclairement à l'ombre}}{\text{Éclairement ambiant}} \quad (\text{III.9})$$

L'estimation de l'effet de l'ombre sur une cellule solaire se fait tout d'abord par la valorisation approximative de l'aire de la zone ombrée et de la densité moyenne de l'ombre dans cette zone. L'effet global est équivalent à l'effet d'un éclairement abaissé par le même facteur. En conséquence, la relation (II.24) s'écrit en ajoutant l'effet de l'ombre comme suit :

$$I_{ph}(G, T) = f_o \times \frac{G}{G_{ref}} \times I_{ph}(T) \quad (\text{III.10})$$

III.3.1.2 Ombrage d'une association de cellules solaires

Si l'ombrage est uniforme (toutes les cellules sont sous les mêmes conditions d'éclairement), alors tout serait simple, le courant électrique de toutes les cellules chuterait par le même facteur d'ombrage et la perte de puissance serait proportionnelle à la densité de l'ombrage.

En cas d'ombrage uniforme, les équations des associations des cellules solaires développées en III.2 prennent les formes suivantes :

Cas d'association en série :

$$V = N_s V_u \quad (\text{III.11})$$

$$I = I_u = I_{ph_u} - I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V + R_{s_u} I}{N_s n_u V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_{sh}} \quad (\text{III.12})$$

Cas d'association en parallèle :

$$V = V_u \quad (\text{III.13})$$

$$I = N_p I_u = N_p I_{ph_u} - N_p I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V + R_{s_u} I}{n_u V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + \frac{R_{s_u} I}{N_p}}{\frac{R_{sh_u}}{N_p}} \quad (\text{III.14})$$

Cas d'association mixte :

$$V = N_s V_u \quad (\text{III.15})$$

$$I = N_p I_u = N_p I_{ph_u} - N_p I_{s_u} \left(\exp \left(\frac{V + \frac{N_s}{N_p} R_{s_u} I}{N_s n_u V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + \frac{N_s}{N_p} R_{s_u} I}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh_u}} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

- V_u : est la tension d'une cellule solaire unitaire
- I_u : est le courant d'une cellule solaire unitaire

Le comportement d'un module solaire sujet à un ombrage partiel est totalement différent et compliqué. En effet, les pertes par ombrage partiel sont aggravées par les interconnexions entre les cellules et la puissance de sortie du module. Dans certains cas, ces pertes sont déterminées par la cellule solaire ayant le rendement le plus bas. Ce type d'ombrage cause des effets indésirables sur les cellules du module solaire comme l'effet de maladaptation ou bien "*Mismatch*" et l'effet de point chaud ou bien "*Hot-spot*".

III.3.2 Pertes d'un module solaire par l'effet de Maladaptation

Les pertes de maladaptation "*Mismatch*" sont provoquées par l'interconnexion des cellules ou des modules solaires qui ne présentent pas des propriétés identiques ou sont soumis à des conditions différentes d'éclairement et de température.

Les différences dans une partie quelconque de la courbe ($I - V$) entre une cellule solaire et une autre peuvent entraîner des pertes de maladaptation à certains points de fonctionnement. L'impact du décalage entre les cellules connectées dépend principalement de la configuration de l'association des cellules utilisées [69, 70].

III.3.2.1 Maladaptation des cellules connectées en série

Ce type de maladaptation est le plus répandu, comme la plupart des modules PV sont composés d'une association en série des cellules, comme il peut facilement être causé par l'ombrage partiel du module. Ce type est aussi le plus sévère.

Ce scénario peut être discuté en termes d'un exemple impliquant deux cellules solaires associées en série, comme le montre la figure III.9. Dans ce cas, les deux cellules solaires possèdent différentes caractéristiques ; ($I - V$) ceci est dû à un effet d'ombrage. La caractéristique résultante de cette association peut être déterminée graphiquement comme le montre la figure III.10.a, en identifiant tout d'abord les points du court-circuit (c'est l'intersection de la caractéristique de la cellule 2 avec la caractéristique de la cellule 1 projetée sur le deuxième quadrant) et du circuit-ouvert (c'est la somme des deux tensions de circuit-ouvert des deux cellules). Le reste des points résulte de l'addition des deux tensions des deux cellules issues des courants égaux.

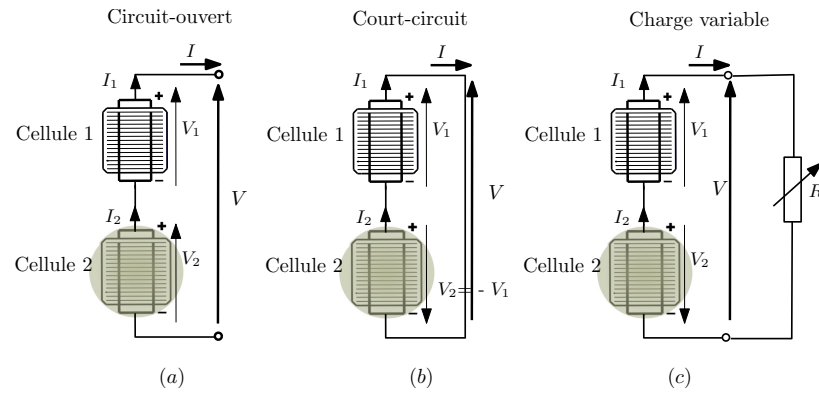
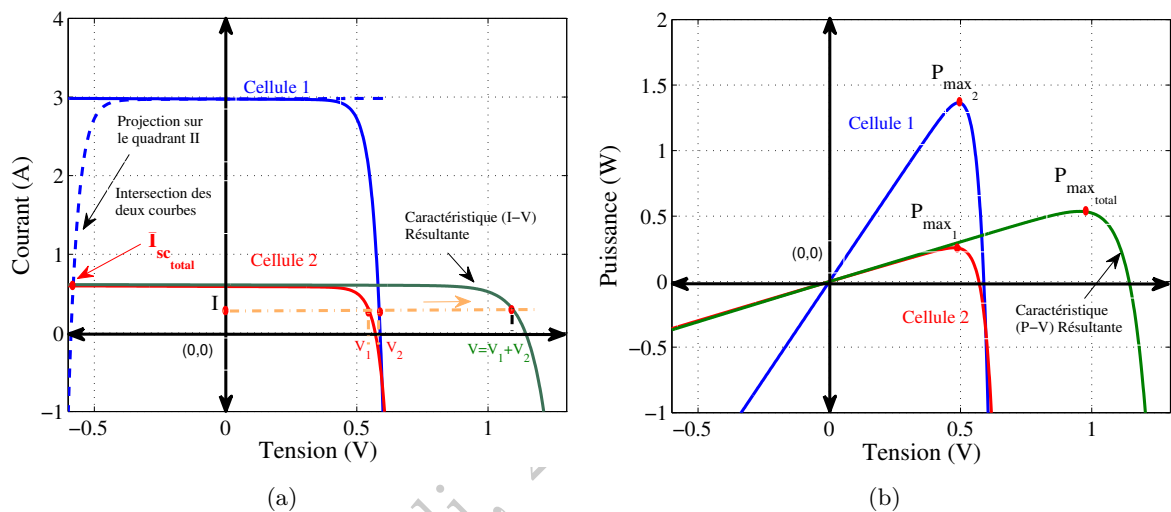


FIGURE III.9 – Illustration de l'effet de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en série.

FIGURE III.10 – Caractéristiques électriques de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en série. (a) Caractéristiques ($I - V$). (b) Caractéristiques ($P - V$).

On constate que la courbe résultante est proche de la courbe de la cellule ombrée sur l'axe des courants et prolongée approximativement deux fois selon l'axe des tensions.

La figure III.10.b montre que la puissance maximale de la caractéristique ($P - V$) résultante de l'association ne correspond pas à la puissance maximale cumulée des deux cellules, mais plutôt approximativement à deux fois la puissance maximale de la cellule la plus faible.

En court-circuit, la tension de la cellule ombrée est négative car $V_2 = -V_1$. La puissance produite par la cellule 1 est convertie en chaleur dans la cellule 2 (fonctionnement dans le deuxième quadrant). Si seulement deux cellules sont câblées en série, la cellule 2 peut résister à ce scénario sans aucune difficulté, toutefois, dans le cas d'association de plusieurs cellules, la puissance dissipée sera importante et la cellule ombragée peut être endommagée par l'effet du phénomène du point chaud.

Le phénomène de surchauffage d'un point local appelé l'effet du point chaud (en termes anglo-saxonnes "Hot-spot") se produit [71], alors, quand il y a une association en série des cellules dont l'une d'elles produit un courant très faible par rapport aux autres, comme le montre la figure III.11. Au voisinage du point de court-circuit une partie de la puissance générée par les

bonnes cellules est dissipée par la cellule de performance inférieure. Cela peut conduire à une dissipation de puissance très localisée et le chauffage local résultant peut causer des dommages irréversibles de la cellule.

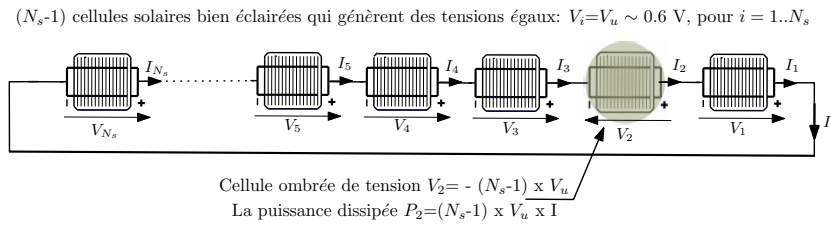


FIGURE III.11 – Illustrations du phénomène du “Hot-spot”

Le scénario de maladaptation des cellules connectées en série est moins intense pour les cellules du même type éclairées d’une manière semblable. En effet, en raison des tolérances de fabrication, les caractéristiques des jonctions de deux cellules ne peuvent jamais être absolument identiques. Par conséquent, la puissance maximale de cellules solaires connectées en série est toujours légèrement inférieure à la puissance maximale cumulée des cellules individuelles. Les fabricants tentent de minimiser ces pertes de maladaptation en incorporant dans un module uniquement les cellules ayant des caractéristiques proches. Dans la phase de fabrication, chaque cellule est mesurée après avoir été fabriquée puis affectée au groupe approprié de cellules.

Dans l’ensemble, dans une configuration de connexion en série des cellules, les réductions graves de puissance sont expérimentées s’il existe une maladaptation de cellule qui produit moins de courant que les bonnes cellules, également si l’ensemble de l’association fonctionne au voisinage du point de court-circuit ou du circuit-ouvert.

III.3.2.2 Maladaptation des cellules connectées en parallèle

Le courant des cellules solaires connectées en parallèle est cumulatif, mais la tension reste la même que pour une seule cellule. Comme les cellules solaires connectées en série, les cellules solaires connectées en parallèle qui possèdent différentes caractéristiques ($I - V$) sont soumises à des états de fonctionnement critiques qui doivent être étudiés. De ce fait, il convient d’examiner ce scénario à travers un exemple impliquant deux cellules solaires associées en parallèle, comme le montre la figure III.12.

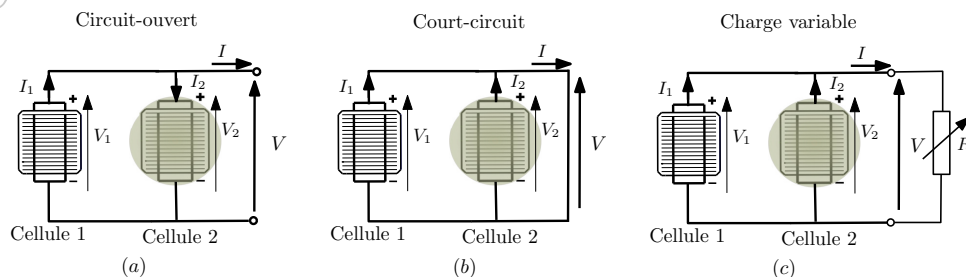


FIGURE III.12 – Illustration de l’effet de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en parallèle.

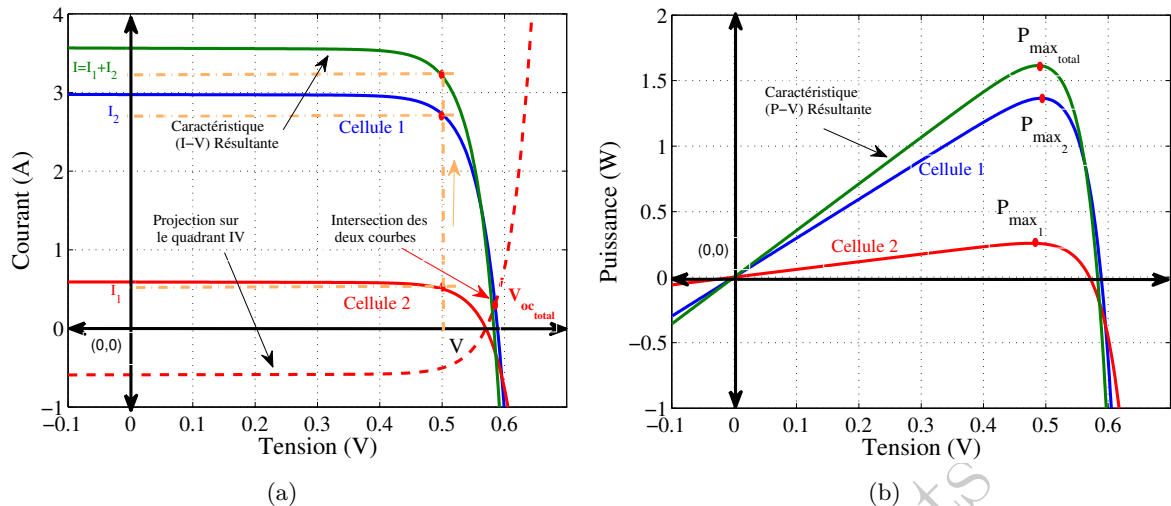


FIGURE III.13 – Caractéristiques électriques de maladaptation sur deux cellules solaires connectées en parallèle. (a) Caractéristiques ($I - V$). (b) Caractéristiques ($P - V$).

La caractéristique résultante de l'association parallèle peut être déterminée graphiquement, comme le montre la figure III.13.a, en identifiant tout d'abord les points du court-circuit (c'est la somme des deux courants de court-circuit des deux cellules) et du circuit-ouvert (c'est l'intersection de la caractéristique de la cellule 1 avec la caractéristique de la cellule 2 projetée sur le quatrième quadrant). Le reste des points résulte de l'addition des deux courants des deux cellules issues des tensions égales. On constate que la courbe résultante est proche de la courbe de la cellule 1 et les pertes de puissance montrées par la figure III.13.b sont beaucoup moins importantes que dans le cas des associations en série. La puissance résultante générée reste généralement supérieure à la puissance unitaire générée par la forte cellule, toutefois, au voisinage du point du circuit-ouvert la puissance résultante diminue considérablement et devient inférieure à la puissance de la cellule 1.

Le plus grand danger de ce scénario est rencontré dans les cas où l'ensemble du module est à la tension en circuit-ouvert, de telle sorte que la tension générée par les cellules ombrées est presque la même que la tension en circuit ouvert. Dans un tel cas, la cellule ombrée est alimentée par toutes les cellules éclairées qui lui sont adjacentes.

III.3.3 Rôle de la diode "Bypass"

Les effets destructeurs du phénomène du point chaud peuvent être contournés par l'utilisation d'une diode de dérivation ou "Bypass". Une diode bypass est branchée en parallèle, mais avec une polarité opposée, avec une cellule solaire. En fonctionnement normal, chaque cellule solaire sera polarisée et donc la diode de dérivation sera polarisée en inverse et sera effectivement un circuit ouvert. Cependant, si une cellule solaire est polarisée en inverse en raison d'une maladaptation sévère, la diode de dérivation conduit, permettant ainsi au courant provenant de bonnes cellules solaires de circuler dans le circuit extérieur plutôt qu'à travers la cellule défectueuse. Le montage idéal des diodes bypass est présenté par la figure III.14.

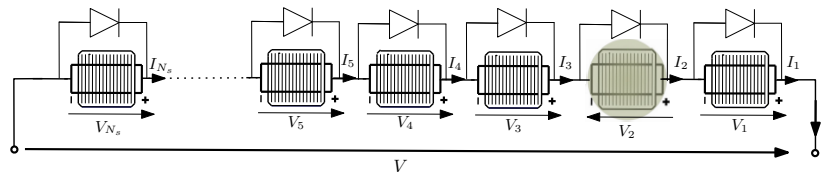


FIGURE III.14 – Association idéale des diodes Bypass avec les cellules solaires.

En pratique, le montage d'une diode Bypass pour chaque cellule solaire est trop coûteux. Pour cette raison, les diodes Bypass sont placées par groupement de cellules solaires. Le nombre de cellules qui en série admissible pour chaque groupement, sans causer de dommages, dépend de la puissance maximale (égale à la capacité de production de toutes les cellules du groupe) dissipée dans une seule cellule totalement à l'obscurité. Il est estimé à environ 15 cellules pour chaque diode Bypass (pour les cellules de silicium). Pour un module de 36 cellules, on doit utiliser 2 diodes bypass pour se prévenir de l'effet du "hot-spot" (Figure III.15).

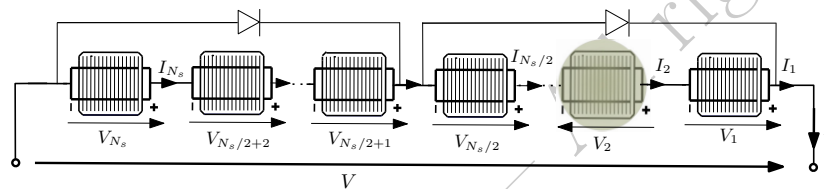


FIGURE III.15 – Association économique des diodes Bypass avec les cellules solaires.

III.3.4 Simulation de l'effet de l'ombrage total et partiel d'un module solaire photovoltaïque

Cette partie consiste en l'élaboration d'un modèle de simulation d'un module solaire qui tient compte de l'effet de l'ombrage et qui met en évidence les phénomènes de maladaptation entre les cellules et qui souligne le rôle des diodes Bypass dans la protection du module.

Lors de son fonctionnement quotidien, le module solaire peut être ombré par certains obstacles, surtout si on considère que le module est conçu pour un robot mobile qui va se déplacer partout dans son territoire. La forme générale de l'ombre projetée sur la surface du module prend une forme aléatoire selon l'angle de projection. On présente dans la figure III.16.a un exemple de motif d'ombre sur le module solaire de 50W. Sur la figure III.16.b on porte une schématisation simplifiée des cellules affectées par l'ombre.

La valorisation du facteur d'ombrage f_{o_i} pour chaque cellule s'effectue en attribuant une estimation de valeur de 0 à 1 du taux de surface T_{s_i} et de la densité d'ombrage D_{o_i} pour chaque cellule affectée, $i = 1..36$. Pour ce motif d'ombre, on présente l'exemple suivant :

La figure III.18 présente l'implémentation du modèle d'un module solaire de 36 cellules en série dans l'environnement MATLAB-Simulink en tenant compte du facteur d'ombrage appliqué sur chaque cellule.

On porte sur les figures III.17.a et III.17.b les caractéristiques $(I - V)$ et $(P - V)$ respectivement du module ombré en comparaison avec le module normalement éclairé.

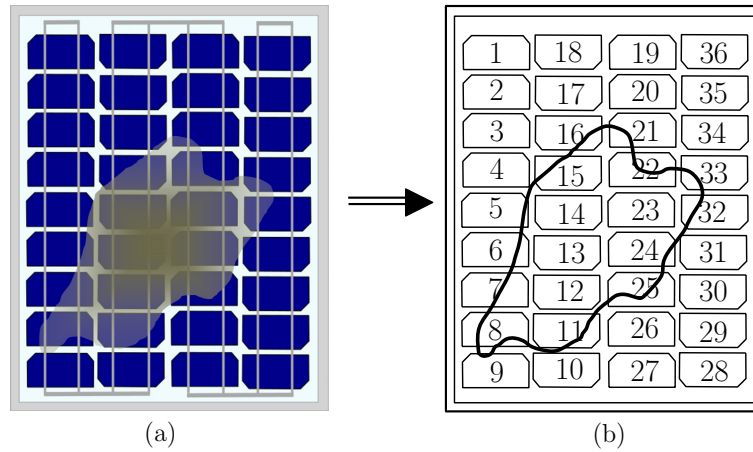


FIGURE III.16 – Illustrations d’un module solaire ombré. (a) Motif réaliste de l’ombre. (b) Motif simplifié de l’ombre

TABLEAU III.2 – Exemple d’évaluation du facteur d’ombrage

N°cellule	5	6	7	8	11	12	13	14	15
T_s	0.1	0.19	0.42	0.7	0.75	1	1	1	0.75
D_o	0.95	0.95	0.9	0.9	0.8	0.6	0.3	0.34	0.7
f_o	0.995	0.995	0.958	0.93	0.85	0.6	0.3	0.34	0.775
N°cellule	16	21	22	23	24	25	33	32	le reste
T_s	0.22	0.23	0.71	1	0.8	0.49	0.21	0.24	1
D_o	0.95	0.95	0.9	0.4	0.4	0.6	0.95	0.95	1
f_o	0.989	0.9885	0.929	0.4	0.52	0.804	0.9895	0.988	1

On observe une chute remarquable de la puissance générée par le module ombré, qui atteint 37% de la puissance maximale; ce qui reflète l’importance du phénomène et son impact sur le fonctionnement normal du module solaire. Les cassures montrées par les allures des caractéristiques du module ombré sont effectivement dues au fonctionnement alterné des diodes by-pass 1 et 2.

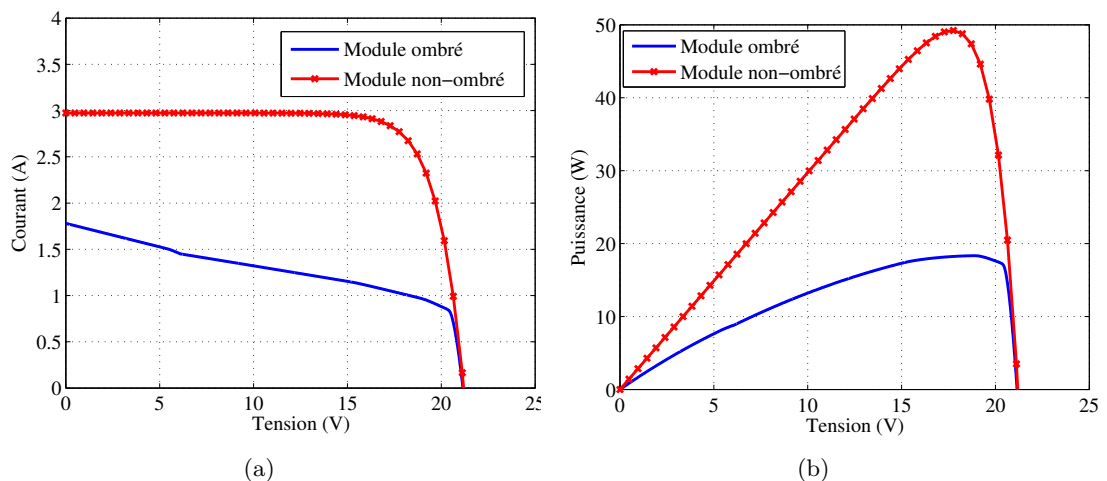


FIGURE III.17 – Comparaison entre les caractéristiques électriques d’un module ombré et non ombré. (a) Les caractéristiques ($I - V$). (b) Les caractéristiques ($P - V$).

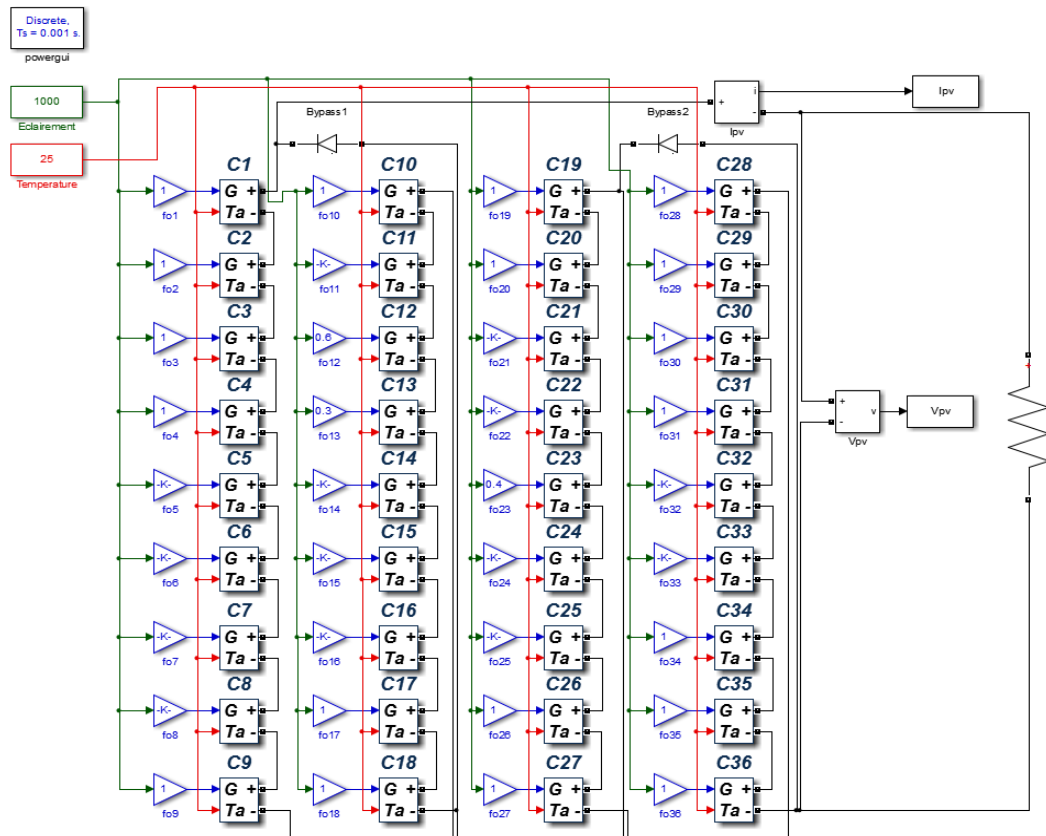


FIGURE III.18 – Exemple d'implémentation du modèle d'un module solaire en tenant compte de l'effet de l'ombrage sur l'environnement MATLAB-Simulink

III.4 Gisement solaire et poursuite de la trajectoire du soleil

L'extraction optimale de l'énergie photovoltaïque est liée principalement à la disponibilité du rayonnement solaire suffisant dans l'environnement ainsi qu'à l'orientation adéquate du module par rapport au rayonnement incident. À ce fait, l'étape d'étude de l'irradiation solaire et ses caractéristiques s'avèrent indispensables et essentielle.

Ce paragraphe vise à présenter les concepts généraux sur l'énergie solaire, le gisement en radiation solaire disponible ainsi que la trajectoire et le mouvement du soleil (ou mouvement relatif et apparent du soleil) dans le ciel pendant la journée. On se réfère à la région de Sfax pour l'étude de cas, néanmoins, cette étude peut être appliquée à n'importe quel endroit sur terre.

Dans cette partie, on utilise des algorithmes largement décrits dans la littérature scientifique, permettant de modéliser le mouvement apparent du soleil et l'irradiation solaire reçue à la surface terrestre. La discussion autour du mouvement du soleil est ainsi faite dans le contexte d'identifier la meilleure orientation du module solaire utilisé par rapport au soleil à n'importe quel endroit sur terre et à n'importe quel moment. De même, la discussion autour de la radiation solaire est faite dans le contexte de l'évaluation du gain énergétique atteint lors de la régulation de l'orientation du module PV.

Un mécanisme automatisé pour réguler l'orientation du module solaire et la poursuite de

la trajectoire du soleil peut être conçue afin d'optimiser le rendement énergétique du module PV. Le concept du mouvement relatif du soleil aidera à mettre en œuvre les algorithmes du positionnement du soleil dans la programmation des microcontrôleurs et à s'en servir pour la régulation automatique du système de suivi solaire.

Le soleil émet de l'énergie sous forme d'énergie électromagnétique et l'intensité du rayonnement électromagnétique qui atteint la terre est souvent appelée éclairage ou insolation ou encore irradiance solaire et l'unité de mesure dans le système international est le "W/m²". Le terme radiation est généralement utilisé pour définir la quantité d'énergie solaire par unité de surface reçue pendant un temps donné et l'unité de mesure dans le système international est le "Wh/m²". L'énergie solaire reçue par une surface sur la terre en tant qu'irradiation quotidienne varie en fonction de l'emplacement, de la saison et du temps. Le niveau d'énergie solaire extraterrestre (la moyenne de rayonnement solaire extraterrestre au bord de l'atmosphère) est estimé par la constante solaire à environ 1367 W/m². Comme l'énergie électromagnétique solaire traverse l'atmosphère de la terre, l'intensité du rayonnement direct s'abaisse considérablement et elle est au maximum arrondie à 1 kW/m² quand elle atteint la surface de la terre. Ainsi, pour chaque mètre carré de surface de cellules photovoltaïques placées face au soleil, le système est en mesure de recueillir autour de 1000 W d'énergie solaire, ce qui peut fournir 200 W de puissance PV générée si on considère des cellules de rendement de 20%.

III.4.1 Gisement solaire en Tunisie et à Sfax

Partout dans le monde, il y a beaucoup de régions riches en termes de ressources solaires, surtout les pays et les régions à travers l'équateur. L'Afrique est ainsi bien connue comme l'un des continents du monde qui se trouve dans la ceinture solaire la plus favorable. Certains pays de l'Afrique, dont la Tunisie, ont un potentiel très élevé pour la récolte de l'énergie solaire et montrent un bon potentiel pour développer les projets d'énergie solaire.

La Tunisie se caractérise par un climat semi-aride qui reçoit le rayonnement solaire direct en raison de la couverture nuageuse et des précipitations limitées. La carte du gisement solaire de la figure III.19.a est calculée à partir des observations faites par les satellites météorologiques de 1994 à 2010 et montre la moyenne de l'irradiation globale cumulée sur un plan horizontal. Cette carte révèle que l'énergie solaire reçue annuellement par un mètre carré de surface est estimée à environ 1600 KWh/m² au nord-ouest du pays alors qu'elle dépasse les 2000 KW/m² dans les régions du sud ; ce qui constitue une richesse importante en énergie solaire.

Ces résultats sont confirmés par les mesures régionales de L'Institut National de la Météorologie¹ "INM" de Tunisie. Les données présentées par la figure III.19.b sont tracées à partir de la base de données des enregistrements réels des radiations solaires mesurées par les stations météorologiques situées partout dans le pays et fournies par l'INM et qui concernent seulement l'année 2010. Cette figure expose l'importance du gisement solaire cumulé mensuellement et annuellement dans certaines régions de la Tunisie et met en relief la richesse solaire des régions du Sud, comme Tataouine et Sfax, surtout pendant la saison hivernale.

1. INM : <http://www.meteo.tn/>

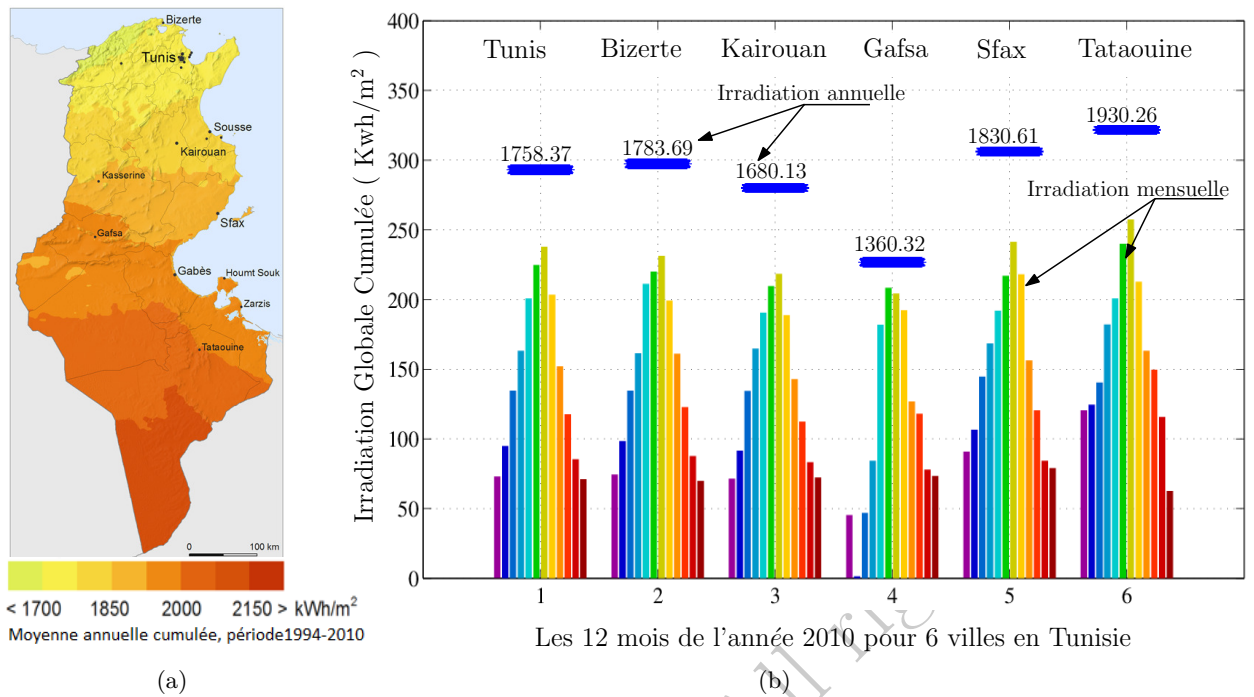


FIGURE III.19 – Gisement Solaire en Tunisie. (a) Irradiation Globale Horizontale en KWh/m² en Tunisie (source : Solargiz). (b) Irradiation Globale cumulée par mois et par année en KWh/m² dans six villes de la Tunisie (source : INM).

La ville de Sfax présente un gisement important en énergie solaire qui dépasse les 1800 KWh/m²/an. La radiation mensuelle cumulée est aussi importante même en hiver et elle est maximale pendant le mois de juillet et minimale pendant le mois de décembre.

Le profil d'Irradiance Globale sur un plan horizontal mesuré par l'INM pendant toute l'année avec une fréquence de mesures de 1/10 heure est présenté par la figure III.20.a. On distingue l'allure en sigma de la courbe générale, due essentiellement aux mouvements annuels de la terre par rapport au Soleil et à la variation de la distance Terre-Soleil. La fourchette des températures pendant toute l'année suit la même allure en sigma, vu la dépendance entre les rayonnements solaires et la température ambiante. La figure III.20.b trace les valeurs minimales et maximales des températures mesurées par les stations météorologiques de Sfax et qui montrent des perturbations permanentes de leurs valeurs vu la dépendance de la température des autres facteurs climatiques comme le vent, l'albédo², et l'humidité. Les valeurs des températures varient entre 4°C au minimum en hiver et 43°C au maximum en été, ce qui constitue un milieu favorable au fonctionnement des modules solaires.

III.4.2 Mouvement et positionnement du soleil

La position du Soleil dans le ciel vue de tout point P de la surface de la Terre peut être définie grâce à essentiellement quatre angles.

2. Albédo : c'est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension comprise de 0 à 1 : un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, aurait un albédo égal à 1. La Terre a un albédo relativement important de 0.3 à 0.35 .

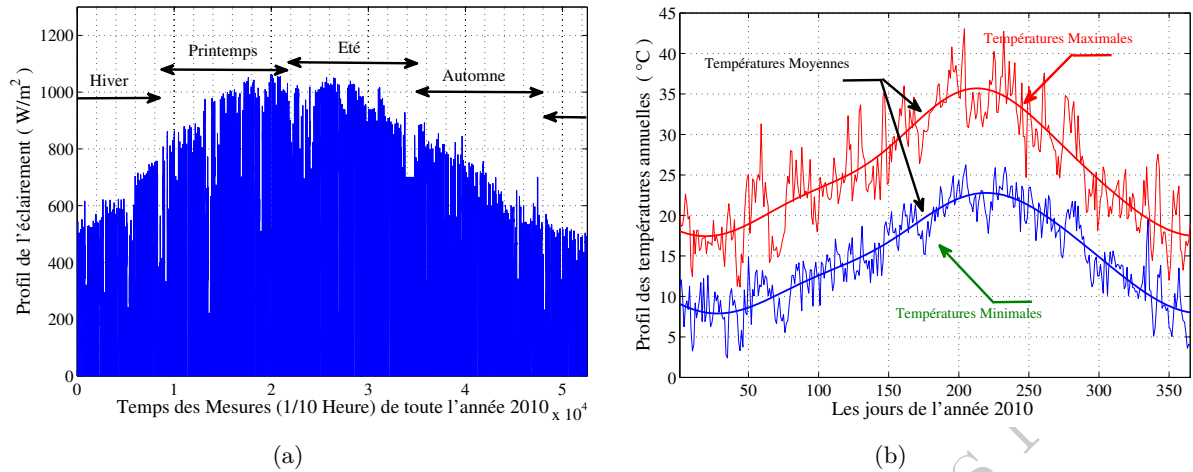


FIGURE III.20 – Caractéristiques solaires de la ville de Sfax. (a) Profil du rayonnement solaire de l'année 2010 en W/m^2 . (b) Profil de la fourchette des températures de l'année 2010. (Source : INM).

N'importe quel point P sur la surface de la Terre est défini en termes de longitude et de latitude. La latitude (ϕ) d'un point P est l'angle entre un rayon partant du point O au centre de la Terre et un rayon tracé à partir du centre de la Terre à l'équateur, comme c'est illustré par la figure III.21.a. Les valeurs vont de 0° à 90° Nord et de 0° à 90° Sud (où 0° est la latitude de tout point de l'équateur).

La longitude (L) d'un point est l'angle entre le méridien de Greenwich (ou premier méridien) et le méridien qui traverse le point P . Un méridien est une circonférence qui traverse les deux pôles. Les valeurs de longitude vont de 0° à 90° Est et de 0° à 90° Ouest (où 0° est la longitude d'un point sur le méridien de Greenwich).

L'angle de déclinaison (δ) et l'angle horaire (ω) sont les plus faciles à identifier à partir d'une vue extérieure de la Terre. L'angle de déclinaison est le même pour l'ensemble de la Terre en un jour donné. L'angle horaire à un point P sur la surface de la Terre est l'angle entre le méridien contenant le point P et le méridien perpendiculaire aux rayons du soleil. L'angle horaire est négatif lors de la matinée, réduit à zéro à midi solaire (lorsque le point P fait face au soleil) et devient positif à l'après-midi. On note que l'angle horaire est le même pour tous les points du méridien correspondant (c'est-à-dire les points avec la même longitude).

On définit d'autres angles en considérant le trajet du soleil dans le ciel vu du point P sur la surface de la Terre. La figure III.21.b montre l'angle solaire zénithal (θ_Z), l'angle d'altitude solaire (α) et l'angle d'azimut solaire (A_Z). L'élévation du Soleil dans le ciel à tout moment peut être décrite soit par l'angle α de l'horizon, soit θ_Z à partir d'une droite normale au centre de la Terre au point P (on a toujours $\alpha + \theta_Z = 90^\circ$).

Le modèle astronomique et les équations fondamentales de calcul de l'emplacement du soleil ont été élaborés en 1988 par "Michalsky"[72]. L'un des algorithmes les plus précis pour le calcul de la position du soleil grâce à l'approche de "Michalsky" a été développé sous la responsabilité du laboratoire NREL du département de l'Énergie des États-Unis par "Reda et Andreas"[73].

3. ITACA : <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/>.

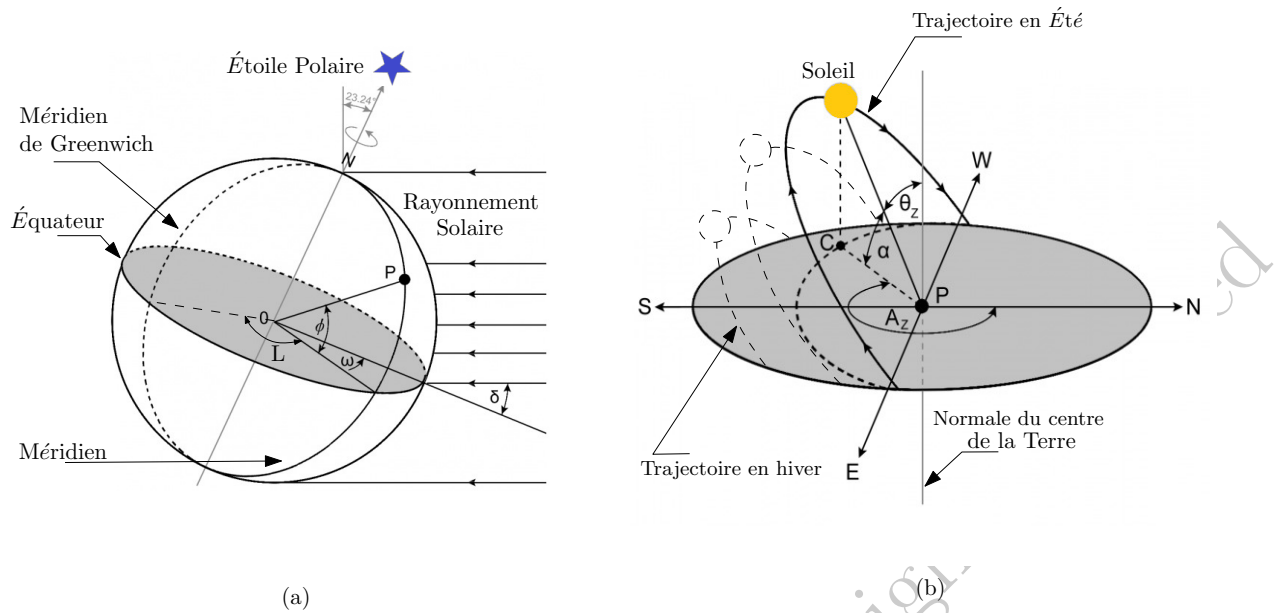


FIGURE III.21 – Mouvement apparent du soleil. (a) Les angles d'un point P de la Terre. (b) Les angles du soleil vus par le point P . (Source : ITACA) ³

Cet algorithme est connu sous le nom de “*Solar Position Algorithm*” (SPA) et calcule la position du soleil avec une grande certitude (erreur maximale de 0.01%). Le script complet ⁴ en langage C avec tous les commentaires pertinents est offert au public par le NREL ; ce qui constitue un outil précieux à intégrer dans les systèmes de suivi solaire.

Selon l'emplacement géographique du système photovoltaïque (L, ϕ), le jour, le mois de l'année, et le temps en heure-minute-seconde, la position du soleil dans le ciel en mouvement par rapport à la terre peut être estimée en termes d'angles du soleil (α, A_Z) en utilisant l'algorithme SPA, comme le montre l'organigramme de la figure III.22.a.

La figure III.22.b montre les trajectoires solaires calculées pour le site géographique de l'ENIS à Sfax (Longitude $L = 10.745^\circ$, Latitude $\phi = 34.783^\circ$) pour le 15 de chaque mois de l'année 2010. Sur cette figure, l'axe des abscisses est équivalent au plan horizontal où le module solaire est installé. L'axe des ordonnées est équivalent à la hauteur entre la surface de la terre et la position du Soleil. Les trajectoires du soleil sont tracées comme des contours projetés sur la verticale. Cette figure définit la fenêtre solaire de toute l'année vue par le module solaire installé en face.

Les trajectoires solaires sont symétriques par rapport à l'angle azimutal 0° , qui correspond au sud, et cet angle est limité entre -120° Est et 120° Ouest pour former une fourchette angulaire annelle de 240° ($A_Z \in [-120^\circ, 120^\circ]$). L'altitude journalière varie entre 0° la nuit et α_{max} qui dépend du numéro du jour de l'année. On remarque que α_{max} varie entre 30° au minimum en hiver et atteint 80° en été.

A partir de cette figure on peut conclure que la meilleure orientation choisie pour un module PV fixe est constituée par le couple d'angles $(A_{Zm}, \alpha_m) = (0^\circ, 30^\circ)$, de cette manière on garantie

4. SPA code source : <http://www.nrel.gov/midc/spa/>.

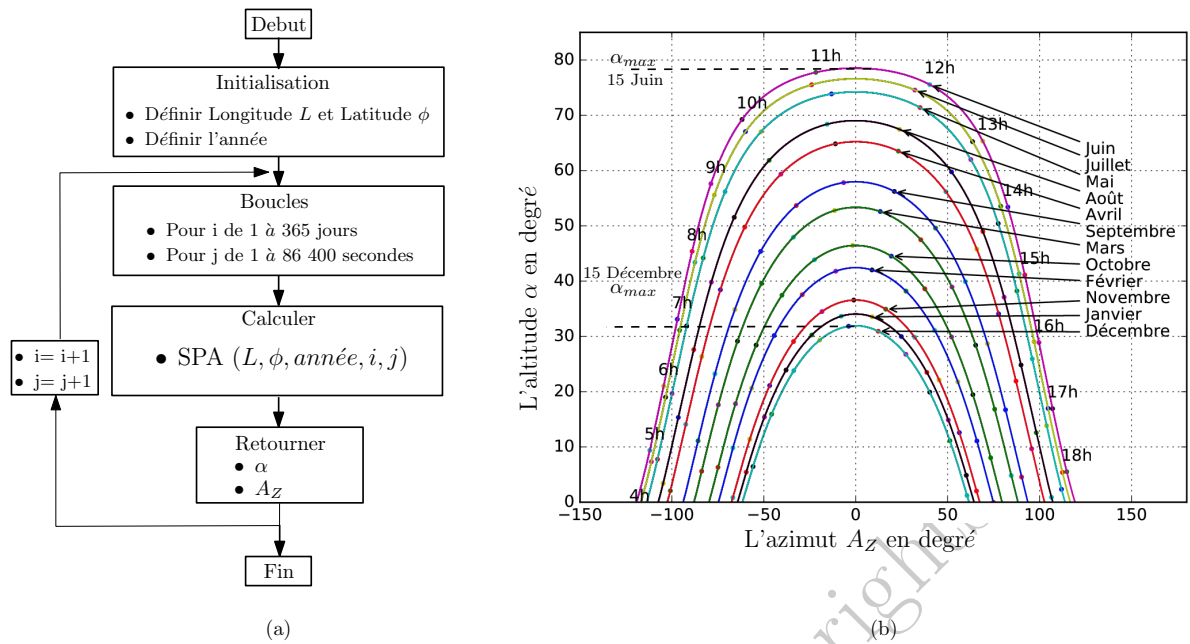


FIGURE III.22 – Trajectoire du soleil par l'algorithme SPA. (a) L'organigramme de calcul de la position du soleil. (b) Les trajectoires journalières du soleil des 12 mois de l'année 2010 à l'ENIS.

que le module reçoit de l'énergie pendant toute la journée et surtout pendant la saison hivernale.

Néanmoins, la fixation d'un module solaire à une seule orientation ne permet pas de se jouir de toute l'énergie fournie par le soleil, car le rayonnement solaire n'est pas perpendiculaire à la surface du module tout le temps et surtout au lever et au coucher du soleil.

A ce fait, l'idée de suivre la trajectoire solaire semble appropriée pour l'optimisation des rayonnements incidents et la récolte du maximum d'irradiance pendant toute la journée.

III.4.3 Irradiance solaire sur plan horizontal et incliné

La quantité d'énergie qui atteint la surface de la Terre toutes les heures est supérieure à la quantité d'énergie utilisée par la population de la Terre pendant une année entière. Le Soleil produit une quantité énorme relativement constante d'énergie. A la surface du Soleil l'intensité du rayonnement solaire est d'environ $63,3 \text{ MW/m}^2$. Comme les rayons du soleil se propagent dans l'espace le rayonnement devient moins intense et, avec le temps, les rayons qui atteignent le bord de l'atmosphère de la Terre sont considérés parallèles comme le montre la figure III.23.a.

Les rayons incidents du soleil sur la terre ne possèdent pas la même intensités en tout point P car ils sont affectés par l'angle d'inclinaison entre la tangente en P et la normale au centre du soleil. La figure III.23.a montre trois surfaces planes :

- Plan A : C'est le plan horizontal (tangent) au point P sur la surface de la terre.
- Plan B : C'est le parallèle au plan A, mais sur le bord de l'atmosphère de la terre.
- Plan C : C'est le plan perpendiculaire aux rayons du soleil, souvent désigné comme le plan normal.

On considère I_0 l'intensité de l'irradiance au niveau de plan C. La valeur de I_0 est considérée

la même en tout point de la surface de la terre, mais tous les points ne sont pas perpendiculaires aux rayons du soleil. On considère I_{0h} est l'intensité de rayonnement extraterrestre sur le plan B tangent au point P . L'irradiance sur une telle surface est inférieure à I_0 en raison de l'effet de cosinus θ_Z entre les deux plan B et C.

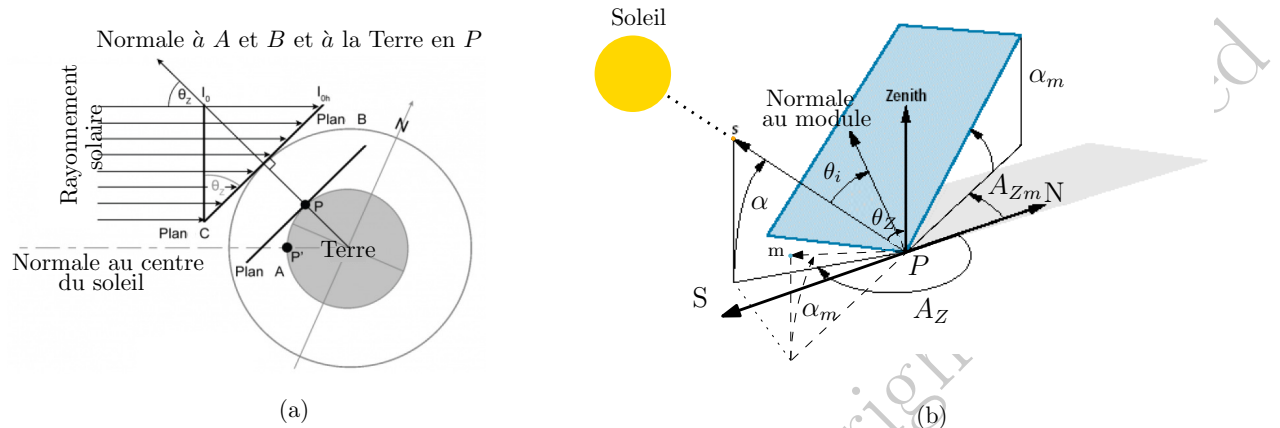


FIGURE III.23 – Irradiance solaire sur un plan horizontal et un plan incliné. (a) Irradiance solaire sur un plan horizontal en P . (b) Irradiance solaire sur un plan incliné en P . (Source : ITACA)

La figure III.23.b permet de visualiser les angles du soleil au point P et les angles d'orientations de la surface du module solaire au même point. On distingue l'angle d'azimut du module (A_{Zm}), l'angle d'altitude du module (α_m) et l'angle d'inclinaison (θ_i) qui définissent la position d'une surface inclinée par rapport au rayonnement solaire incident.

L'intensité de l'irradiance incidente sur un module PV dépend non seulement de l'intensité du rayonnement solaire, mais aussi de l'angle (θ_i) entre le module et le soleil. Lorsque la surface du module et la lumière du soleil sont perpendiculaires l'une à l'autre, l'intensité de l'irradiation sur la surface est égale à celle de la lumière et elle est alors maximale. Cependant, comme l'angle d'inclinaison entre le soleil et le module fixe est en évolution permanente durant la journée, la radiation solaire reçue par le module PV fixe est inférieure à celle du rayonnement solaire incident. A ce fait, on affirme qu'il est intéressant de régler l'orientation de la surface du module solaire de manière à récolter le maximum d'énergie des rayonnement solaires.

Alors que les rayonnements solaires incidents extraterrestres sont relativement constantes, le rayonnement à la surface de la Terre varie considérablement en raison des effets atmosphériques y compris l'absorption, la diffusion, la pression, l'altitude du lieu et les variations locales dans l'atmosphère, tels que la vapeur d'eau, les nuages et la pollution... Ces facteurs rendent l'estimation de l'irradiance en un point P de la terre une mission assez compliquée. En effet, les variables météorologiques tel que les mouvements des nuages et l'albedo du sol à chaque instant ne peuvent pas être déterminés qu'avec des mesures réelles. On porte sur la figure III.24.b des enregistrements réels des valeurs de l'irradiance sur le plan horizontal pendant la meilleure journée et la pire journée, en termes d'éclairement, de l'année 2010 à la région de Sfax fourni par l'INM.

Un modèle mathématique ainsi qu'un algorithme d'estimation approximatives de l'intensité

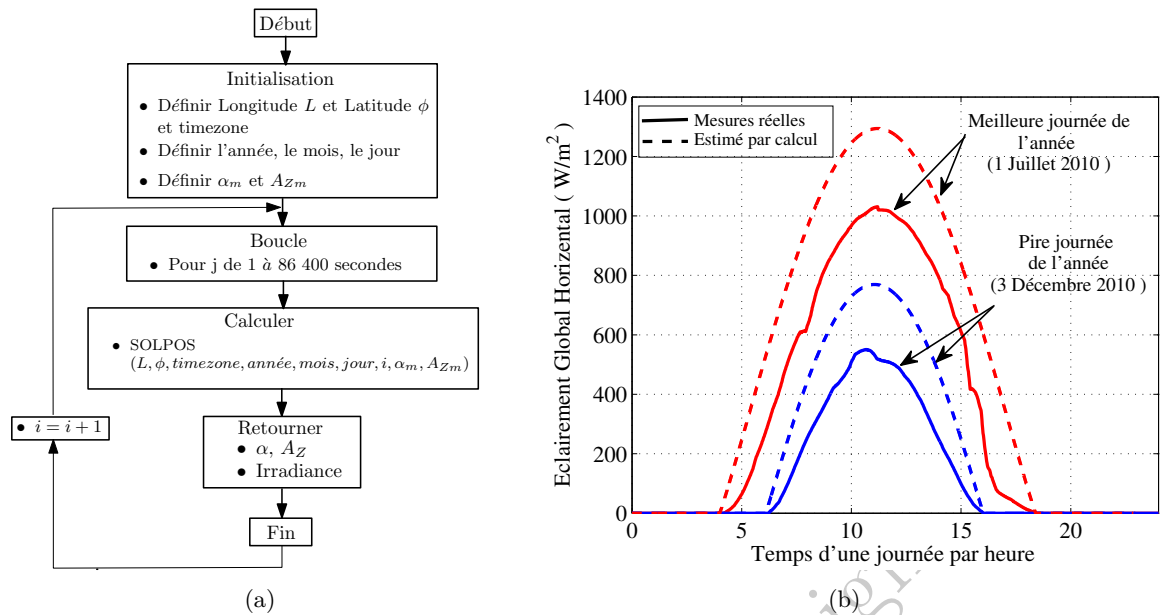


FIGURE III.24 – Caractéristiques solaire durant la meilleure et la pire journées d'éclairement en 2010 à Sfax. (a) L'organigramme de calcul d'irradiance solaire. (b) Profil d'irradiance réel et estimé en W/m^2 (Source : INM).

de l'irradiance solaire sur un plan incliné en tenant compte des paramètres atmosphériques et sans tenir compte des paramètres météorologiques d'un site particulier ont été proposé par l'équipe de NREL sous le nom de *Solar Position and Intensity* (SOLPOS). Le script complet⁵ en langage C avec toutes les références et les commentaires pertinents sont offerts pour le public par l'NREL.

En utilisant l'algorithme SOLPOS comme le montre l'organigramme de la figure III.24.a, on peut estimer approximativement l'irradiance maximale qui peut atteindre une surface à une orientation donnée selon le site géographique, la saison de l'année et l'heure de la journée. Sur la figure III.24.b on porte des estimations de l'irradiance sur le plan horizontal dans la meilleure et la pire journée précédemment décrites en 2010 à Sfax. On remarque que l'irradiance réelle récupérée par les mesures des stations météorologiques est nettement inférieure à l'irradiance estimée, ce qui met en relief l'effet important des conditions météorologiques comme les nuages et l'albedo sur l'éclairement résultant.

Afin d'estimer l'irradiance sur un plan incliné en tenant compte des conditions météorologiques on peut utiliser l'indicateur de ciel clair "*Clear Sky Index*" [74, 75] exprimée par :

$$K_c = \frac{G_{h_{mes}}}{G_{h_{est}}} \quad (III.17)$$

avec :

- $G_{h_{mes}}$: L'irradiance horizontale mesurée par des station météorologique.
- $G_{h_{est}}$: L'irradiance horizontale estimée par un algorithme de calcul.

On obtient alors :

$$G_i = K_c \times G_{i_{est}} \quad (III.18)$$

5. SOLPOS code source : <http://rredc.nrel.gov/solar/codesandalgorithms/solpos/>.

avec :

- G_i : L'irradiance estimée sur un plan incliné en tenant compte des conditions météorologiques.
- $G_{i_{est}}$: L'irradiance estimée sur un plan incliné par un algorithme de calcul.

III.4.4 Simulation du rendement des suiveurs solaires

Dans cette partie on propose d'étudier le rendement en puissance de plusieurs types de systèmes du suivi du soleil, souvent appelé "Suiveur Solaire" ou bien "Traqueur Solaire" (en termes anglo-saxones "Solar Tracker"), afin d'évaluer le profit énergétique et le gain en puissance résultant de l'utilisation de chaque type.

On étudie ainsi quatre manières pour l'orientation du module solaire :

Module fixe Généralement pour les installations PV montées sur les toitures des maisons on oriente les modules solaires vers une position optimale sur l'échelle annuelle estimée par le couple d'angles du module $(A_{Z_m}, \alpha_m) = (180^\circ, 30^\circ)$.

Suiveur solaire horizontal C'est un suiveur solaire à un seul axe qui possède un seul degré de liberté et agit comme un axe de rotation horizontal par rapport au sol. L'angle azimuthal du module est programmé pour suivre l'azimut solaire alors que l'élévation du module est fixée à un angle de $\alpha_m = 30^\circ$.

Suiveur solaire vertical C'est un suiveur solaire à un seul axe qui possède un seul degré de liberté et agit comme un axes de rotation vertical par rapport au sol, il suit ainsi l'élévation du soleil en gardant la composante azimuthal fixe à $A_{Z_m} = 180^\circ$.

Suiveur solaire dual C'est un suiveur solaire à deux axes qui possède deux degrés de liberté qui agissent comme des axes de rotation. Ces axes sont perpendiculaires l'un à l'autre. L'axe d'azimut est perpendiculaire au sol et il permet de varier l'azimut du module pour coïncider avec l'azimut solaire. L'axe d'élévation est parallèle au sol et permet de suivre l'élévation du soleil.

Afin d'évaluer avec précision la puissance générée par le module solaire en tenant compte de l'évolution réelle des températures et du facteur du ciel clair au cours de la journée on utilise les données tracés par les figures III.25.a et III.25.b et on étudie le rendement des suiveurs solaires pendant la meilleure et la pire journée en terme d'éclairement de l'année 2010 au site de l'ENIS.

L'implémentation du modèle de simulation du suiveur solaire en utilisant l'algorithme SOL-POS dans l'environnement MATLAB-Simulink est présenté par la figure III.26.

La simulation de la puissance générée par le module solaire à l'aide des quatre méthodes d'orientation précédemment décrites pendant la meilleure et la pire journée de l'année 2010 donne lieu aux courbes dressées sur les figures III.27.a et III.27.b.

Le récapitulatif du calcul du rendement maximal (par rapport à l'irradiance d'entrée) et du gain énergétique journalier (par rapport à l'horizontal) pour chaque type d'orientation du module solaire est présenté dans le tableau III.3.

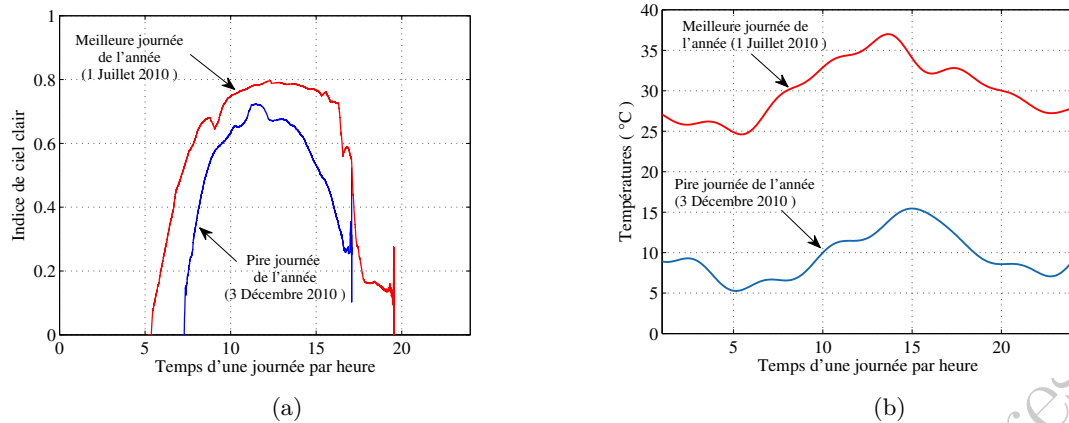


FIGURE III.25 – Caractéristiques météorologiques durant la meilleure et la pire journées d'éclairiment en 2010 à Sfax.(a) Profil de l'indice du ciel clair. (b) Profil de température réelle mesurée (°C) (Source : INM).

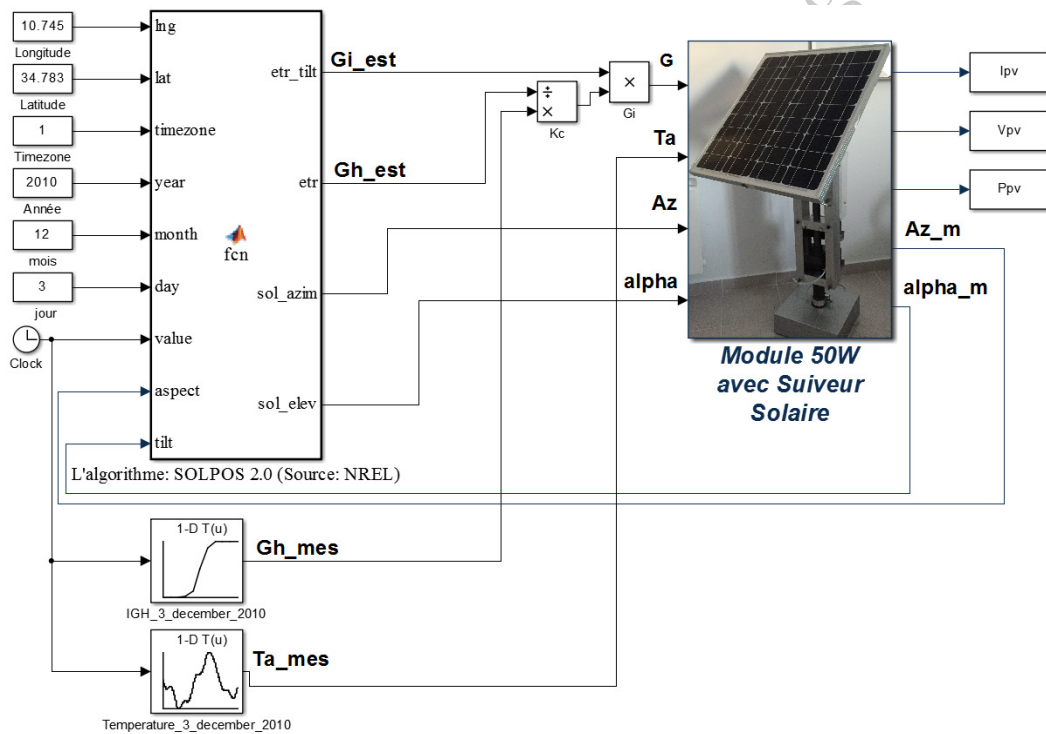


FIGURE III.26 – Exemple d'implémentation du modèle du suiveur solaire dans l'environnement MATLAB-Simulink.

TABLEAU III.3 – comparaison entre les différents types d'orientations d'un module solaire

Type d'orientation	Rendements en hiver et en été (%)	Gains énergétiques en hiver et en été (KWh/j)
Module fixe	14.24 – 17.116	0.3563 – 0.371
Suiveur vertical	14.49 – 17.125	0.3859 – 0.598
Suiveur horizontal	13.03 – 17.21	0.372 – 1.048
Suiveur dual	14.64 – 17.32	0.933 – 1.402

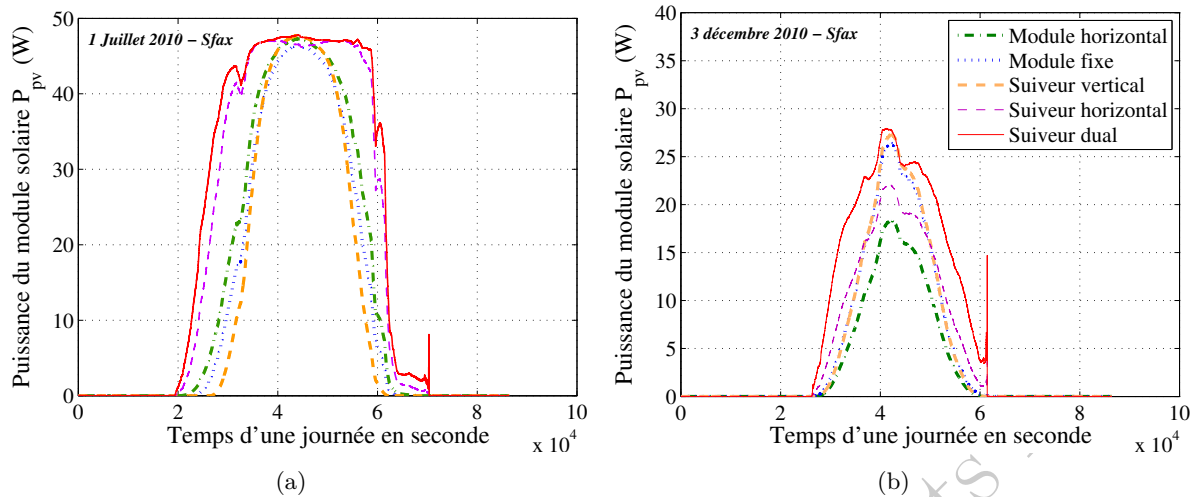


FIGURE III.27 – Simulation des suiveurs solaires durant la meilleure et la pire journées d'éclaircissement en 2010 à Sfax. (a) Puissances générées pendant la meilleure journée. (b) Puissances générées pendant la pire journée.

Les résultats mettent en évidence la supériorité du suiveur solaire à deux axes pour l'optimisation de l'énergie générée par le module solaire. En effet, on constate qu'un module solaire fixé à la position 180° sud et 30° d'élévation est toujours moins rentable qu'un module PV muni d'un suiveur solaire. La comparaison entre les différents suiveurs solaires montre que le suiveur vertical est plus rentable en hiver avec un rendement de 14.46% et un gain énergétique de 0.386 KWh/jour qu'un suiveur horizontal qui possède un rendement de 13.03% et fournit un gain énergétique de 0.372 KWh/jour. En été, le suiveur horizontal montre un profit énergétique supérieur au suiveur vertical avec un gain de 1.048 KWh/jour contre 0.598 KWh/jour pour le suiveur vertical. En ce qui concerne le suiveur solaire à deux axes, les résultats montrent son efficacité et sa capacité à augmenter les puissances générées par le module PV. La rentabilité du suiveur dual est toujours supérieur aux autres types de suiveurs que ce soit en hiver ou en été avec un rendement entre 14.64% et 17.32 % et un gain énergétique inclut entre 0.933 KWh/jour en hiver et 1.402 KWh/jour en été.

III.5 Conception et réalisation du suiveur solaire à deux axes

La nature a développé le principe de tournesol qui s'oriente vers le soleil au cours de la journée. Il est un principe simple, mais brillant qu'on peut s'inspirer pour l'appliquer à l'optimisation du rendement des systèmes d'énergie solaire [76, 77, 78, 79].

Dans le paragraphe précédent, on a montré que la puissance photovoltaïque générée est une fonction de l'orientation du module solaire et que l'optimisation du rendement des capteurs PV ne peut se produire qu'à l'aide d'un système de poursuite de la trajectoire solaire. On a prouvé ainsi, par simulation, que le suiveur solaire à deux axes produit un profit énergétique intéressant comparé aux autres types.

Dans cette partie, on vise, alors, à concevoir une plate-forme mobile motorisée sur deux axes

qui assure le mouvement du module solaire de manière adéquate pour suivre la trajectoire du soleil lorsqu'il se déplace dans le ciel, pour permettre de récolter le maximum de rayonnement solaire tout le long de la journée.

La plate-forme du suiveur solaire est muni d'un ensemble de capteurs nécessaires pour réaliser des fonctions avancées permettant non-seulement à bien réguler le système mais aussi à explorer l'environnement. Ce système est conçu afin de poursuivre la trajectoire solaire et de détecter puis d'éviter les zones d'ombrages projetés sur le module. Le premier prototype fabriqué et les premiers résultats enregistrés sont montrés dans le chapitre V.

III.5.1 Description de la structure mécanique

Cette partie s'intéresse à la description du système mécanique conçu comme la base du suiveur solaire. La plate-forme mécanique assure la mobilité du module solaire selon le repère sphérique en agissant sur les deux angles du module PV α_m et A_{Zm} . Le système est ainsi composé de deux parties complémentaires assurant les rotations suivant l'axe parallèle à l'horizontale et l'axe normal à l'horizontale.

Le système mécanique complet inclut typiquement les éléments et les composants suivants :

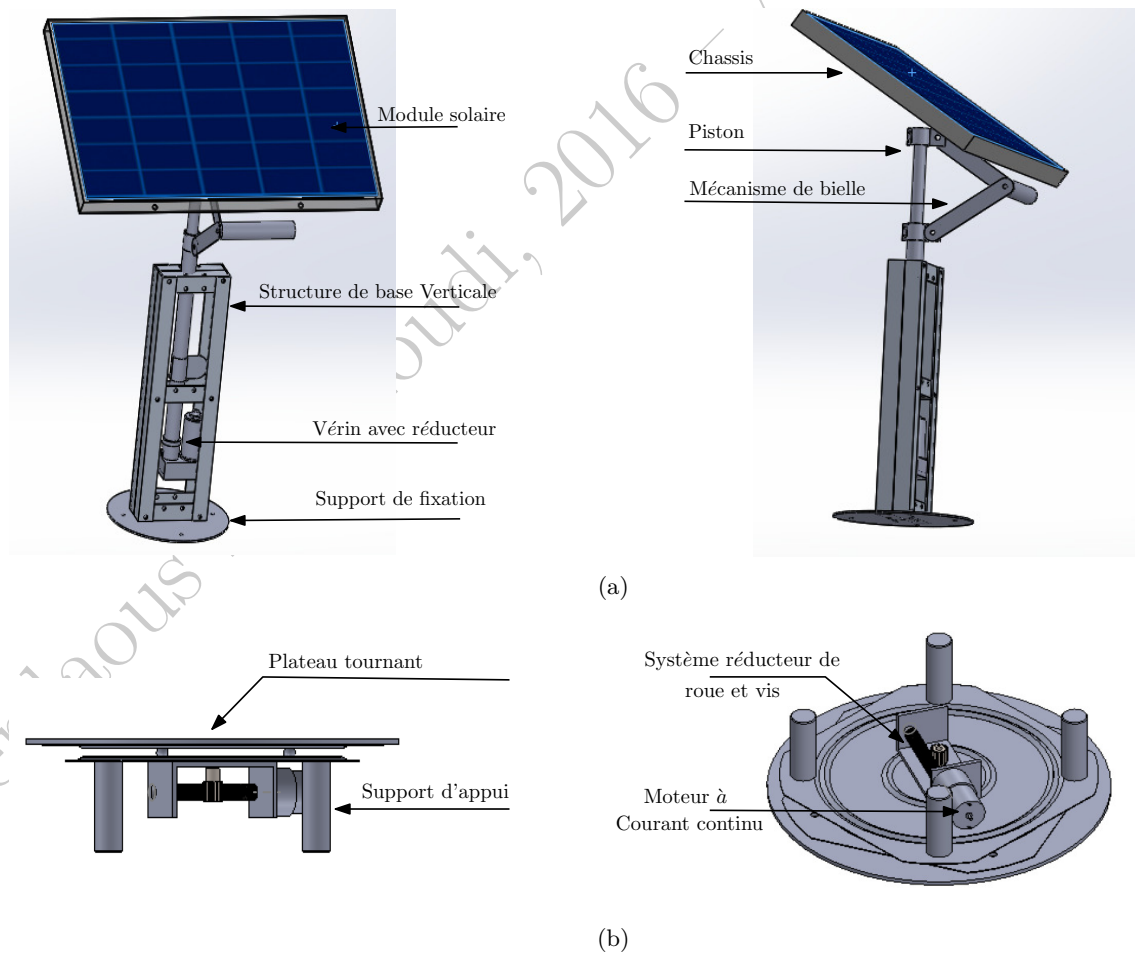


FIGURE III.28 – Système mécanique du suiveur dual (à deux axes). (a) La structure du mouvement vertical. (b) La structure du mouvement horizontal.

La structure du mouvement vertical Il permet de maintenir le module PV par fixation sur son châssis comme le montre la figure III.28.a. La structure de base verticale permet de garder une distance entre le module et le sol, assurant ainsi une certaine liberté de mouvement. Les mouvements de rotation sont assurés par un vérin logé dans la structure verticale. L'excitation du vérin permet le mouvement de translation de son piston vertical. Le mécanisme de bielle permet de convertir les mouvements de translations en rotations autour d'un axe parallèle à l'horizontale. Les mouvements de rotation peuvent varier l'angle d'élévation du module α_m entre 0° (Horizontal) et 90° (Vertical).

La structure du mouvement horizontal Elle permet de maintenir le support vertical par fixation sur son plateau tournant comme le montre la figure III.28.b. Les mouvements de rotation sont assurés par un moteur à courant continu monté sur le dos du plateau et connecté à travers son arbre à un système de roue et vis agissant comme réducteur de vitesse. Les mouvements de rotation peuvent varier l'angle d'azimut du module A_{Zm} d'un tour complet entre 0° et 360° .

III.5.2 Description du système électrique

Dans cette partie on s'intéresse à la description du système électrique intégré sur la plateforme mécanique et chargé de contrôler et commander électriquement le suiveur solaire d'une manière appropriée. Le système est ainsi composé d'un ensemble de périphériques électriques et électroniques communicants entre eux et assurant diverses fonctions avancées du suiveur solaire.

Dans ce système, en se basant sur la figure III.29, on identifie les composants suivants :

- Batteries d'alimentation : servent comme source d'alimentation du système complet. Elles alimentent les moteurs en 24V et le reste du système électronique en 5V à travers un bloc de conversion (24V-5V).
- Actionneurs : Le moteur à courant continu *MCC* horizontal (24V) et le vérin vertical à base d'un *MCC* (24V) sont commandés à travers deux pont-H agissant comme inverseurs du sens de rotation et variateurs de vitesses.
- Capteurs : Le système est muni d'un ensemble de capteurs capables d'explorer l'environnement et de se positionner dans le temps et dans l'espace en temps réel.
- Couche électronique décentralisée : Elle est constituée d'un ensemble de cartes ARDUINO utilisées pour l'acquisition des données, les transferts des données et la commande à travers le mode PWM des ponts-H.
- Couche de traitement des données : Elle est constituée de la carte électronique centrale *SOC* de type Raspberry Pi capable de faire la gestion des différents périphériques et des différentes fonctions parallèlement à travers l'algorithme global implanté sur la carte.

III.5.3 Algorithme de programmation du suiveur solaire

Le système du suiveur solaire est conçu comme un système embarqué, capable de fonctionner automatiquement d'une manière autonome sans aucune intervention humaine nécessaire. Pour

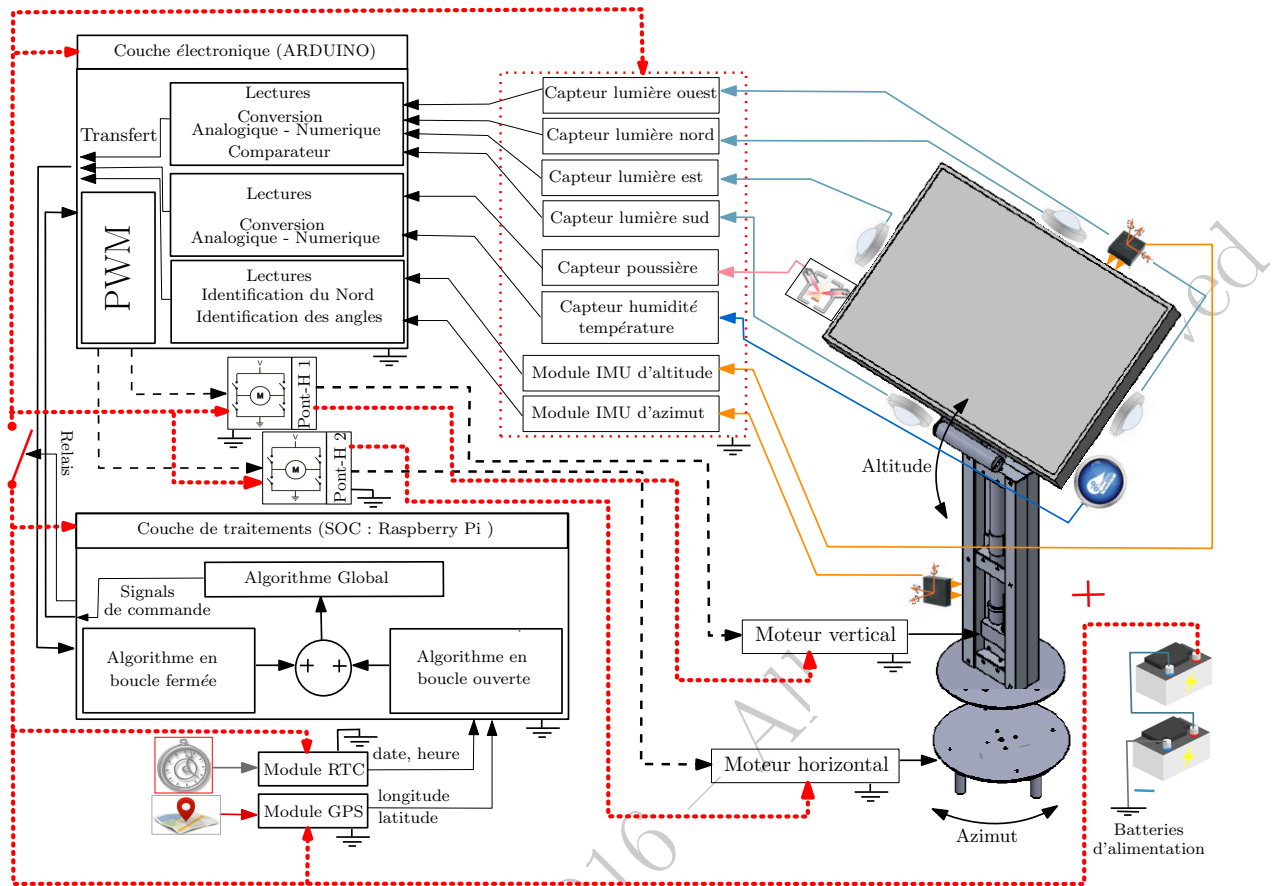


FIGURE III.29 – Schématisation du système électrique du suiveur solaire.

cet objectif, cette partie est dédiée à la description de l'algorithme de la commande centrale du suiveur solaire. La carte Raspberry est munie d'un programme global (en langage "Python") assurant plusieurs modes de fonctionnement selon la date, l'heure et l'état du système.

On distingue ainsi cinq modes de fonctionnements comme le montre l'organigramme de la figure III.30.

Mode nuit : L'algorithme global est capable de détecter la date et l'heure en temps réel et de déterminer l'heure du lever et du coucher du soleil. A ce fait, pendant la nuit, le système se met en veille automatiquement en agissant sur le relais d'alimentation télé-commandé.

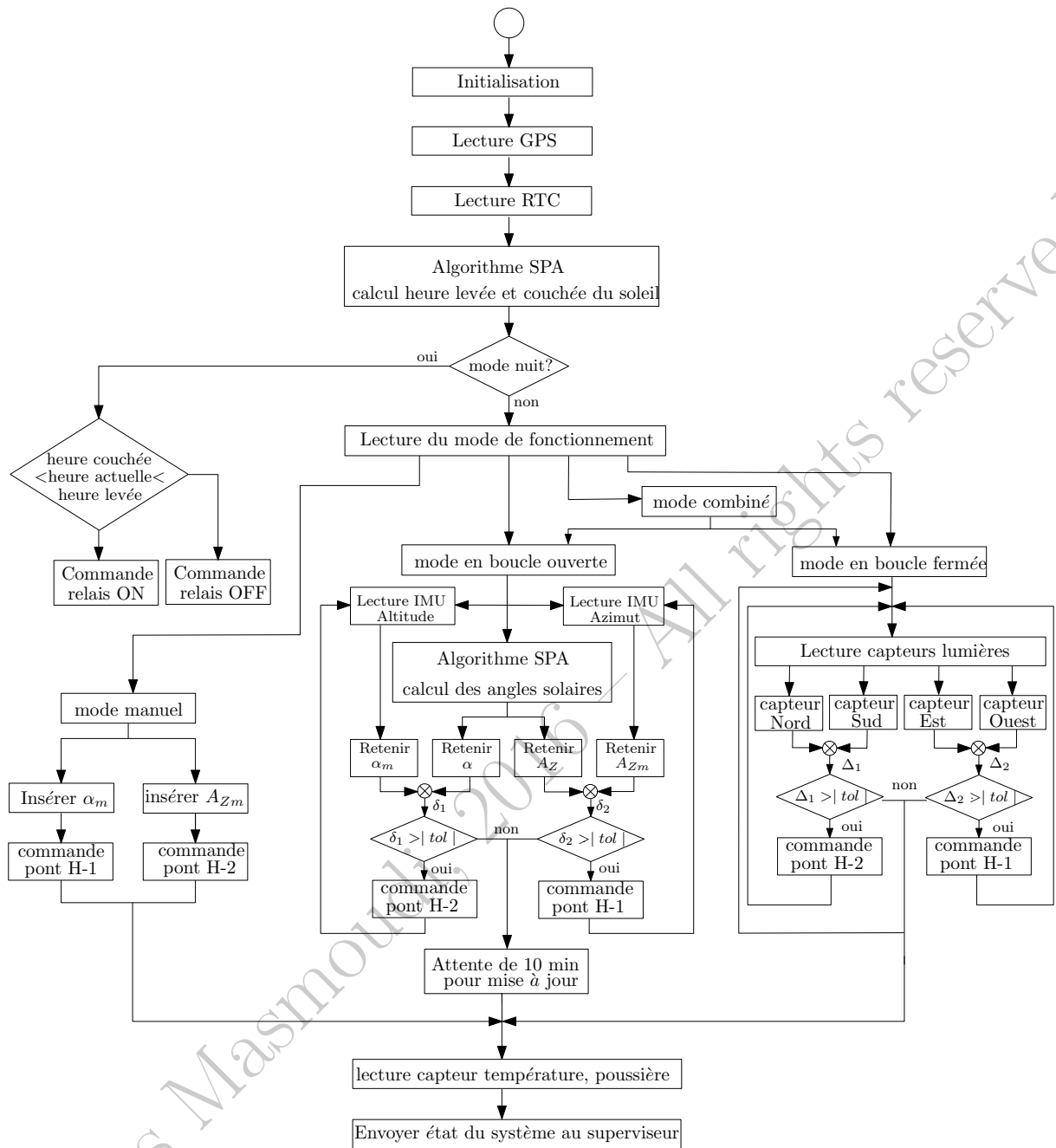


FIGURE III.30 – Algorithme Global du suiveur solaire à deux axes.

Mode manuel : Le système permet l'intervention manuelle de l'utilisateur en commutant le mode de fonctionnement vers le mode manuel, où le module PV s'oriente directement vers la position introduite par l'utilisateur.

Mode de commande en boucle ouverte : Ce mode de fonctionnement permet la mobilité du module d'une manière chronologique en identifiant et poursuivant le parcours du soleil suivant la date, l'heure et la position géographique. Cette commande du suiveur solaire est considérée comme une commande en boucle ouverte car elle ne tient pas en considération la réponse du système. Le module suit aveuglement la trajectoire solaire.

Mode de commande en boucle fermée : Ce mode de fonctionnement permet la mobilité du module solaire par comparaison des quantités d'éclairement récupérées par chaque capteur de lumière. Les quatre capteurs de lumière sont chargés d'évaluer la quantité de lumière sur les quatre côtés du module. On peut identifier ainsi les zones ombrées et on peut réguler l'orientation de manière à garder toujours les capteurs en valeurs proches. Cette commande est considérée comme une commande en boucle fermée car elle surveille l'évolution des états des capteurs à chaque échantillon et assure la régulation permanente de l'orientation du module PV.

Mode de commande combinée : Ce mode de fonctionnement combine entre la commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée afin d'exploiter les avantages de chaque mode et de se jouir du maximum de rayonnement solaire.

III.6 conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'optimisation du rendement d'un générateur PV à travers la meilleure exploitation et la protection du capteur solaire. On a étudié, dans la première partie, les associations des cellules solaires et on a réussi à définir mathématiquement le modèle d'un module PV constitué par l'association de $(N_s \times N_p)$ cellules solaires. Les résultats de simulation du modèle construit sur MATLAB-Simulink ont été validés expérimentalement. La deuxième partie a été réservée à l'étude du problème d'ombrage et de son impact sur les types d'associations ; ainsi, on a exposé les divers problèmes qui causent des pertes de puissance du générateur PV et on a proposé un modèle de simulation pour tel effet. Le gisement solaire en Tunisie et à Sfax particulièrement a été présenté dans la troisième partie. On a étudié alors le parcours et le positionnement du soleil dans le ciel et on a discuté de l'irradiance solaire mesurée sur la surface inclinée du module solaire. Les travaux de simulation ont porté sur la comparaison de trois types de suiveurs solaires par rapport à un module fixe et on a montré le profit énergétique résultant de l'utilisation d'un suiveur solaire à deux axes et son importance dans l'optimisation du rendement d'un module PV. Le chapitre a été conclu par la présentation du système complet du suiveur solaire conçu. On a décrit le montage mécanique, le système électrique et électronique comme on a élaboré l'algorithme global de programmation de l'ensemble du système.

Chapitre IV

Conception Optimale du Système de Conversion et de Stockage Photovoltaïque Autonome

Résumé : *Ce quatrième chapitre étudie la conception, le dimensionnement, la synthèse et l'analyse d'une chaîne de conversion de puissance dédiée aux applications photovoltaïques. Tout d'abord, on présente une méthode de linéarisation des caractéristiques non-linéaires de la charge et de la source autour du point de puissance maximale. Puis, on enchaîne par la modélisation et l'identification des paramètres internes de la batterie de stockage de type Plomb-Acide. Ensuite, on aborde le thème du dimensionnement et de la synthèse des convertisseurs de type hacheur en mode de conduction continue. Le dernier volet porte sur l'élaboration de la stratégie de commande du hacheur de type P&O. Ce chapitre est clôturé par quelques résultats de simulation portant sur l'étude des performances de la chaîne de conversion à travers les divers changements des conditions de fonctionnement.*

Mots-clés : Chaîne de conversion PV,
Linéarisation autour de l'MPP,
Modélisation batterie Plomb-Acide,
Dimensionnement, synthèse des convertisseurs,
Hacheur survolteur Boost,
Commande MPPT P&O,

IV.1 Introduction

La conception optimale d'un système de conversion PV est fortement exigée pour une exploitation maximale de l'énergie solaire [80]. Ceci nécessite obligatoirement le passage par la phase de dimensionnement puis de simulation. Pour développer un modèle de simulation de la chaîne globale de conversion PV qui intègre : (i) le générateur solaire photovoltaïque, (ii) l'étage d'adaptation continu-continu, (iii) la charge et le système de stockage, ainsi que (iv) son dispositif de commande associé, il est essentiel de modéliser convenablement chaque composante du système BOS (*en termes anglo-saxonnnes Balance Of System* : ce terme est utilisé pour résumer toutes les composantes nécessaires en plus des modules solaires pour construire un système photovoltaïque complet) [81].

Dans ce chapitre, on présente un aperçu des travaux menés pour entamer la conception et la modélisation de la chaîne PV décrite par la figure IV.2 . Tout d'abord, on présente le principe de l'optimisation des chaînes de conversions PV et on introduit des linéarisation de la source PV et de la charge couplée autour du point de puissance maximale (MPP), en vue d'un dimensionnement adéquat de l'étage d'adaptation. Par la suite, on propose une caractérisation de l'élément de stockage (batterie lead-acid) ainsi que son système d'observation associé. Le troisième volet porte sur la démarche du dimensionnement et les travaux de modélisation du convertisseur de puissance DC-DC. On présente ainsi les résultats de simulation des chaînes de conversion PV à travers un hacheur de type Boost. La quatrième et la dernière partie concerne la stratégie de commande MPPT. On présente alors la conception et la modélisation de la commande MPPT de type P&O (*Perturb and Observe*). Le chapitre est clôturé par les résultats de simulation du système.

IV.2 Principe de l'optimisation de la puissance photovoltaïque

Dans les chapitres précédents, on a réussi à élaborer des modèles précis de la cellule solaire puis du module solaire (formé par une association de cellules). Ce chapitre contient la suite de ces travaux. À cet effet, on propose d'examiner les possibilités d'adaptation du générateur PV à la charge électrique disponible ainsi que l'identification et la modélisation de chaque composante constituant la chaîne. L'accent de ce chapitre est sur les systèmes PV autonomes (non connectés au réseau électrique).

Les générateurs PV sont presque toujours associés à des dispositifs électroniques de puissance. Même dans le cas d'une connexion directe entre un module solaire et une batterie, une diode anti-retour est nécessaire [82].

La nécessité d'optimiser le rendement d'un module PV s'avère indispensable vu sa sensibilité vis-à-vis des changements continus des conditions météorologiques et surtout de la non-linéarité de ses caractéristiques en courant-tension ($I - V$) et en puissance-tension ($P - V$). Il existe un seul point de fonctionnement P_m où la production de la puissance est maximale et ceci pour un niveau de tension égal à V_m et un courant généré égal à I_m . Toutefois, les coordonnées d'un tel point sont variables suivant les conditions climatiques, essentiellement le niveau du rayonnement

incident sur la surface du panneau et l'évolution de la température ambiante durant la journée [83].

Lorsqu'on connecte directement un module PV avec une charge résistive ou une batterie, on a peu de chance pour qu'il fonctionne au point de fonctionnement optimal correspondant à la puissance maximale. La figure IV.1 présente l'intersection de plusieurs niveaux de forces électromotrices (V_1, V_2, V_3 et V_4) d'une batterie 24 V et l'intersection de plusieurs caractéristiques des charges résistives (R_1, R_2, R_3 et R_4) avec les caractéristiques ($I - V$) et ($P - V$) d'un module PV. Ces différents types de charges ont toujours leurs propres exigences des tensions et des courants fournis par la source. En conséquence, une quantité importante d'énergie électrique propre est perdue à cause du mauvais couplage entre la source et la charge. Pour cette raison, un étage d'adaptation doit être intercalé pour rendre la connexion appropriée [84].

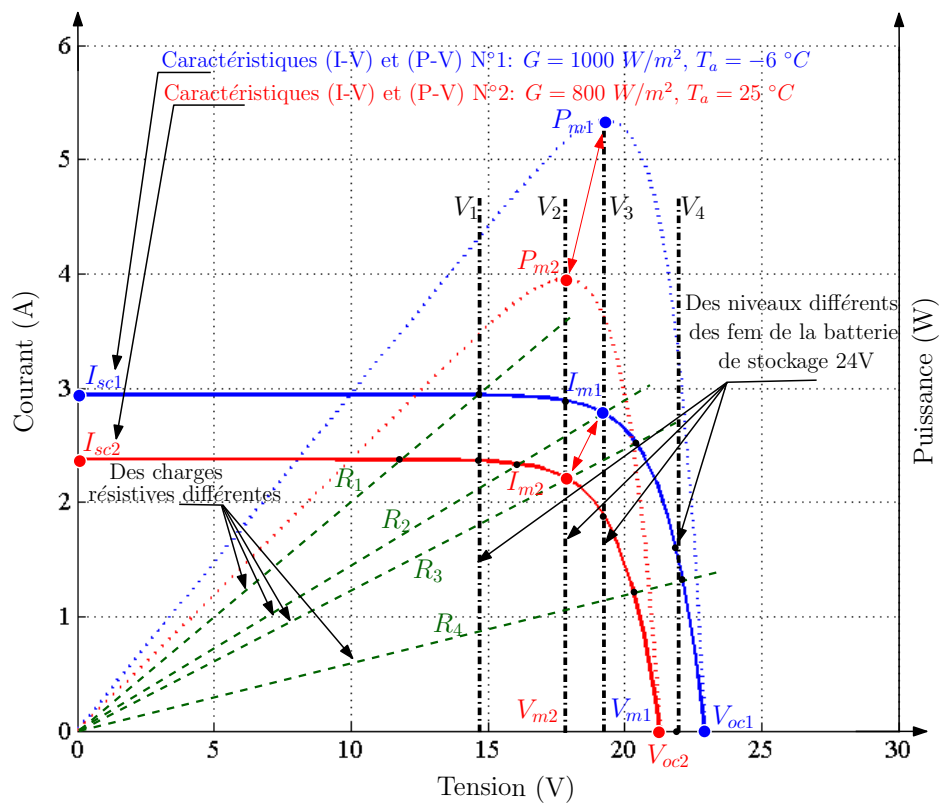


FIGURE IV.1 – Les intersections entre les niveaux des fem d'une batterie 24 V et diverses charges résistives avec les caractéristiques ($I - V$) et ($P - V$) d'un générateur PV : points de fonctionnement lors d'un couplage direct.

La figure IV.1 montre une infinité de points de fonctionnement correspondant à l'intersection de la caractéristique ($I - V$) du module PV avec les niveaux des fem de la batterie ou avec les différentes charges, mais un seul point peut coïncider avec le couple (I_m, V_m) donnant une puissance maximale P_m .

Ainsi, en vue d'améliorer le rendement d'un système de conversion photovoltaïque et de surmonter les inconvénients du couplage direct, un convertisseur électronique de puissance est

nécessaire pour adapter la fréquence électrique et le niveau de tension à l'utilisation prévue. En outre, l'utilisation rationnelle des générateurs photovoltaïques est possible seulement en association avec des convertisseurs électroniques de puissance afin de régler la tension du générateur photovoltaïque à un point de puissance maximale, indépendamment de la tension de sortie du système.

Avec le développement des dispositifs d'électronique de puissance dédiée aux applications photovoltaïques, plusieurs systèmes de conversion électrique ont été conçus. En effet, ces systèmes permettent de convertir l'énergie électrique de forme continue en une énergie électrique continue ou bien alternative, suivant le type de la charge à alimenter [85].

Partant du fait que le panneau solaire délivre du courant continu, et la charge exige également son alimentation par l'énergie électrique sous forme continue, le système servant d'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge est un convertisseur continu-continu (DC-DC) souvent appelé hacheur, qui force, à chaque instant, le générateur photovoltaïque à fonctionner à la tension de consigne désirée grâce à la variation du rapport cyclique (d) du signal de commande, et ceci quelque soient les perturbations de l'éclairement et de la température.

Une commande rigoureuse de l'étage d'adaptation, particulièrement du rapport cyclique, d permet de faire coïncider la tension V de la charge avec la tension V_m correspondante à la puissance maximale P_m et garantit l'optimisation du transfert de l'énergie électrique de la source vers la charge. La méthode de la commande des convertisseurs dédiés aux systèmes PV est souvent appelée MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). La stratégie de commande MPPT consiste à comparer les puissances générées par le générateur PV à différents instants en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur par augmentation ou diminution selon la différence de la puissance obtenue. La répétition successive de cette itération aboutit, après peu de temps, à se pointer sur la puissance maximale désirée.

Évidemment, l'utilisation de l'étage de conversion de puissance ainsi que sa stratégie de commande MPPT n'acquerraient de sens qu'en présence d'un élément de stockage (généralement batterie) capable de réserver le surplus d'énergie profité. Néanmoins, l'intégration d'un tel équipement nécessite une surveillance particulière.

Une batterie est un dispositif électrochimique qui nécessite un petit plus de potentiel pour se charger et moins de potentiel pour se décharger. Cependant, elle possède des limites en tension et en courant strictes, fondamentales à ses performances optimales.

Dans le but d'empêcher l'endommagement de la batterie, on recourt à une technique de protection spéciale souvent appelée "Observateur de batterie" (en termes anglo-saxons par BMS : *Battery Management System*). Cette technique permet l'utilisation de la batterie pendant une longue période à travers plusieurs cycles de charge et de décharge en toute protection contre : la surcharge, la décharge profonde, la décharge non désirée. L'observateur de batterie sert aussi à gérer et à surveiller son état de charge SOC (*State Of Charge*) et à maintenir son état de santé SOH (*State Of Health*).

Le système résultant de l'association du système de balance BOS et de sa commande MPPT avec l'observateur de batterie BMS est généralement connu et commercialisé sous le nom de

“Régulateur de charge” (*Charge Controller*) [86, 87, 88, 89].

Dans ce contexte, l’objectif de ce travail est de proposer le dimensionnement optimal et la modélisation d’un régulateur de charge dédié à un module PV de 50 W pour alimenter des charges (Moteurs, Lampes, Cartes de Commandes) en tension continu.

Le principe de la chaîne PV (Générateur PV–Régulateur de charge–Batterie–Charge) conçue est illustré par le schéma synoptique de la figure IV.2. Le premier prototype du régulateur de charge fabriqué et les premiers résultats récoltés sont montrés dans le chapitre V.

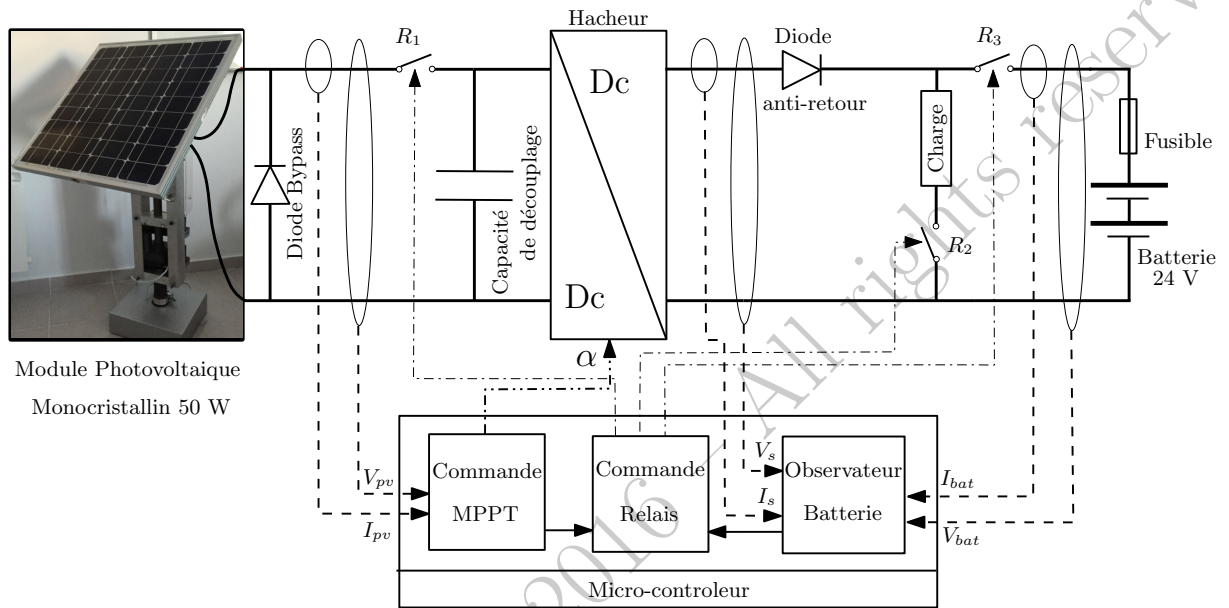


FIGURE IV.2 – Principe de la chaîne de conversion PV conçue.

IV.3 Caractérisation de la source PV et de la charge

Le dimensionnement optimal d’un convertisseur de puissance pour les applications photovoltaïques est une mission assez compliquée. Ceci revient au fait que les grandeurs électriques générées par la source d’entrée (module photovoltaïque) sont variables durant la journée (la tension varie de 0 à V_{oc} , le courant varie de 0 à I_{sc} , V_{oc} et I_{sc} varient en fonction de la température et de l’éclairement).

De même la charge de sortie n’est pas constante. Tout d’abord, la tension aux bornes de la batterie de stockage change de valeur selon son état de charge. Par ailleurs, les moteurs et les cartes de commande ne fonctionnent pas en permanence avec le même rythme. Afin de pallier ce problème durant la phase de dimensionnement, on choisit de faire les caractérisations de la source et de la charge autour d’un point de fonctionnement bien déterminé.

Cependant, compte tenu de l’objectif de conception d’une commande MPPT pour ce système, alors le module devra fonctionner autour du point de fonctionnement donnant la puissance maximale, on parle du point de puissance maximale MPP (*Maximum Power Point*).

En vue d’optimiser les performances du convertisseur lors de la phase de dimensionnement, on choisit de faire les caractérisations autour du point de fonctionnement de l’MPP à l’STC

(pour l'éclairement de 1000 W/m^2 et la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$) [90, 91, 92].

IV.3.1 Caractérisation de la source PV

Le comportement électrique d'un module solaire photovoltaïque est fortement non-linéaire. Ceci est explicitement visible au niveau de sa caractéristique ($I - V$) de la figure IV.3a. En effet, la source photovoltaïque se comporte comme une source de courant dans la région des faibles tensions; c'est-à-dire dans la partie supérieure de sa caractéristique. Elle se comporte comme une source de tension dans la région des faibles courants; c'est-à-dire dans la partie inférieure de la caractéristique. À l'intermédiaire de ces deux régions se situe le point de puissance maximale (MPP). Au voisinage de ce point, le courant et la tension sont presque constants et vaux I_m et V_m respectivement.

La simplification de la caractéristique du module solaire peut se faire en adoptant un circuit équivalent autour d'un point de fonctionnement bien déterminé. La figure IV.3b présente les circuits équivalents de Thévenin et de Norton utilisés pour la linéarisation des caractéristiques électriques du module solaire. Autour de l'MPP, les deux circuits sont exactement semblables.

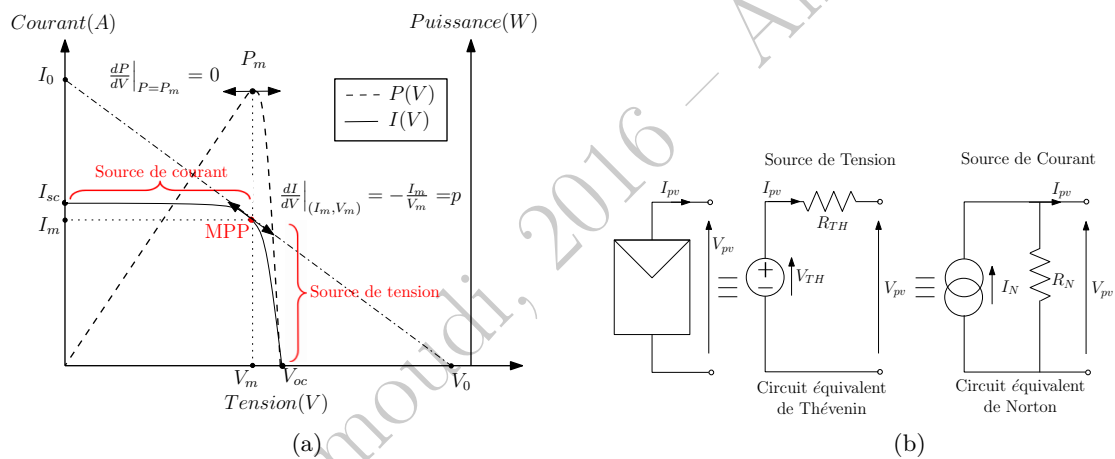


FIGURE IV.3 – Linéarisation de la source au voisinage de l'MPP. (a) Caractéristique ($I - V$). (b) Circuits équivalents.

Les circuits équivalents proposés sont identifiables grâce à la droite tangente à la caractéristique ($I - V$) au point MPP. L'intersection de la droite avec l'axe des abscisses donne la valeur de la source de tension V_0 . Son intersection avec l'axe des ordonnées donne la valeur de la source de courant I_0 . La pente p de cette droite est calculable à partir du point MPP comme suit :

$$\frac{dP}{dV}\bigg|_{P=P_m} = I_m + V_m \frac{dI}{dV}\bigg|_{\substack{V=V_m \\ I=I_m}} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

alors :

$$p = \frac{dI}{dV}\bigg|_{\substack{V=V_m \\ I=I_m}} = -\frac{I_m}{V_m} \quad (\text{IV.2})$$

L'équation de la tangente à la caractéristique $(I - V)$ au point MPP s'écrit comme suit :

$$I = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\substack{V=V_m \\ I=I_m}} (V - V_m) + I_m \quad (\text{IV.3})$$

$$= -\frac{I_m}{V_m} (V - V_m) + I_m \quad (\text{IV.4})$$

$$= -\frac{I_m}{V_m} V + 2I_m \quad (\text{IV.5})$$

On obtient alors les points particuliers de cette tangente : $(0, 2 I_m)$, $(2V_m, 0)$ Si on considère :

$$V_m = R_m \cdot I_m \quad (\text{IV.6})$$

alors :

$$R_m = R_{TH} = R_N = -\frac{1}{p} = \frac{V_m}{I_m} \quad (\text{IV.7})$$

R_m est la résistance équivalente de la source d'entrée autour du point de puissance maximale MPP.

L'évaluation de la résistance équivalente R_m estimée au voisinage de l'MPP à l'STC du module solaire 50W est présentée dans le tableau IV.1.

TABLEAU IV.1 – Evaluation de R_m au voisinage de l'MPP du module solaire 50W à l'STC ($G = 1000W/m^2$ et $T = 25^\circ C$).

Grandeur	Valeur
V_m (V)	19.332
I_m (A)	2.7655
R_m (Ω)	6.9904

IV.3.2 Caractérisation de la charge

Au cas où une charge est directement connectée au module PV, le point de fonctionnement est alors déterminé par l'intersection de la caractéristique du module et la courbe de la caractéristique électrique de la charge, comme c'est montré auparavant dans la figure IV.1. Afin d'amener le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale (MPP), un convertisseur $DC - DC$ est intercalé pour faire l'adaptation entre la source PV et la charge. Le convertisseur est commandé par une stratégie MPPT permettant d'évaluer le rapport cyclique d_m adéquat pour le maintien de l'MPP. Le rapport cyclique d_m recherché par l'MPPT varie suivant les changements des conditions climatiques agissantes sur le module PV ainsi que suivant la fluctuation permanente de la charge de sortie.

Contrairement au cas général où les convertisseurs $DC - DC$ sont utilisés pour réguler la tension de sortie, c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de sortie est fixée selon les exigences de l'élément de stockage (pour une batterie de 12 V, le constructeur recommande une tension de charge maximale V_{Sm} de 15 V). Le convertisseur désiré sert alors à régler la tension variable d'entrée; ce qui est l'origine de son appellation "Convertisseur à entrée variable" (en termes anglo-saxonnes *Variable Input Converter*) [93].

Avec l'établissement d'un régulateur MPPT qui commande le convertisseur, on peut jouir du maximum de la puissance disponible et fournie par le générateur. De cette manière, la puissance maximale P_m fournie par l'entrée est entièrement transmise vers la sortie. La charge connectée consomme son besoin de courant et le reste de l'énergie sera transféré vers l'élément de stockage. Avec cette réflexion, on conclut que les grandeurs de sortie ne sont plus variables. Autour du point MPP, la tension de sortie est toujours égale à la tension V_{S_m} de la batterie et le courant transféré est toujours I_{S_m} constant, quelle que soit la fluctuation de la charge. Le problème devient linéaire, représenté par une charge équivalente globale, R_{S_m} et la chaîne de conversion peut être représentée simplement par la figure IV.4.

Dans toute cette analyse, on considère le principe de conservation de la puissance et on néglige les différentes pertes de l'étage de conversion.

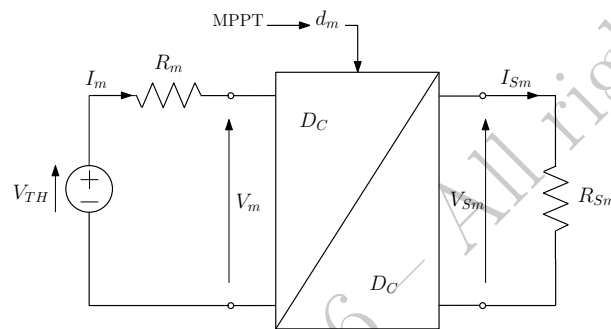


FIGURE IV.4 – Simplification de la chaîne de conversion PV au voisinage de l'MPP.

Évidemment, les expressions des gains en tension et en courant changent suivant le type de hacheur employé dans l'étage d'adaptation continu-continu (les divers types de hacheurs considérés dans cette étude et leurs gains sont présentés dans les tableaux IV.7). On note : Gain en tension

$$G_V(d) = \frac{V_s}{V_{pv}} \quad (\text{IV.8})$$

Gain en tension au voisinage du MPP :

$$G_{V_m}(d_m) = \frac{V_{S_m}}{V_m} \quad (\text{IV.9})$$

Conservation de puissance :

$$P_{pv} = P_s V_{pv} \times I_{pv} = V_s \times I_s \quad (\text{IV.10})$$

Gain en courant d'un convertisseur :

$$G_i(d) = \frac{I_s}{I_{pv}} = \frac{1}{G_v(d)} \quad (\text{IV.11})$$

Gain en courant au voisinage de l'MPP :

$$G_{i_m}(d_m) = \frac{I_{S_m}}{I_m} = \frac{1}{G_{V_m}} \quad (\text{IV.12})$$

d'où :

$$I_{S_m} = \frac{I_m}{G_{V_m}} \quad (\text{IV.13})$$

Résistances équivalentes de sortie au MPP :

$$V_m = R_m \times I_m \quad V_{Sm} = R_{Sm} \times I_{Sm} \quad (IV.14)$$

On rappelle que :

$$\frac{V_{Sm}}{V_m} = \frac{R_m}{R_{Sm}} \times \frac{I_m}{I_{Sm}} \quad (IV.15)$$

La résistance de sortie équivalente devient :

$$R_{Sm} = \frac{V_{Sm}}{V_m} \cdot \frac{I_m}{I_{Sm}} \cdot R_m \quad R_S = G_{Vm}(d_m)^2 \cdot R_m \quad (IV.16)$$

Selon le type du convertisseur employé, on peut déterminer le rapport cyclique optimal d_m permettant de retrouver le point MPP à l'STC. Par exemple, dans le cas d'un convertisseur boost, ou G_v est la suivante :

$$G_V(d) = \frac{1}{1-d} \quad (IV.17)$$

On obtient le rapport cyclique optimal d_m comme suit :

$$d_m = 1 - \frac{1}{G_{Vm}} = 1 - \frac{V_m}{V_{Sm}} \quad (IV.18)$$

L'évaluation des grandeurs électriques de sortie équivalentes (R_{Sm} , I_{Sm} , d_m) estimées au voisinage du MPP à l'STC du module solaire 50W pour divers types de convertisseurs est présentée dans le tableau IV.8.

IV.4 Caractérisation et observation du système de stockage

L'utilisation d'un élément de stockage est exigée dans les systèmes PV autonomes afin de stocker l'énergie électrique produite par le générateur solaire et de fournir de l'énergie pour les charges électriques. Cet équipement est capable d'alimenter des charges électriques à des tensions et des courants stables pendant certains temps. Cependant, il peut causer souvent des surtensions ou des pics élevés de courants ; ce qui nécessite une surveillance permanente [94].

IV.4.1 Présentation de l'élément de stockage :

La cellule électrochimique est l'unité élémentaire utilisée pour générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique stockée, ou pour stocker de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique. Elle se compose, comme c'est indiqué sur la figure IV.5.a, de deux électrodes positive et négative plongées dans un récipient rempli d'un électrolyte qui fournit la conductivité ionique essentielle entre les électrodes de la cellule. Le séparateur, perméable aux ions : électriquement un matériau non-conducteur ou un espaceur, empêche le court-circuit des électrodes positive et négative de la cellule.

La batterie est obtenue, comme le montre la figure IV.5.b, lorsque deux ou plusieurs cellules sont connectées dans un arrangement série/parallèle approprié, pour obtenir la tension de fonctionnement demandée et la capacité d'une certaine charge .

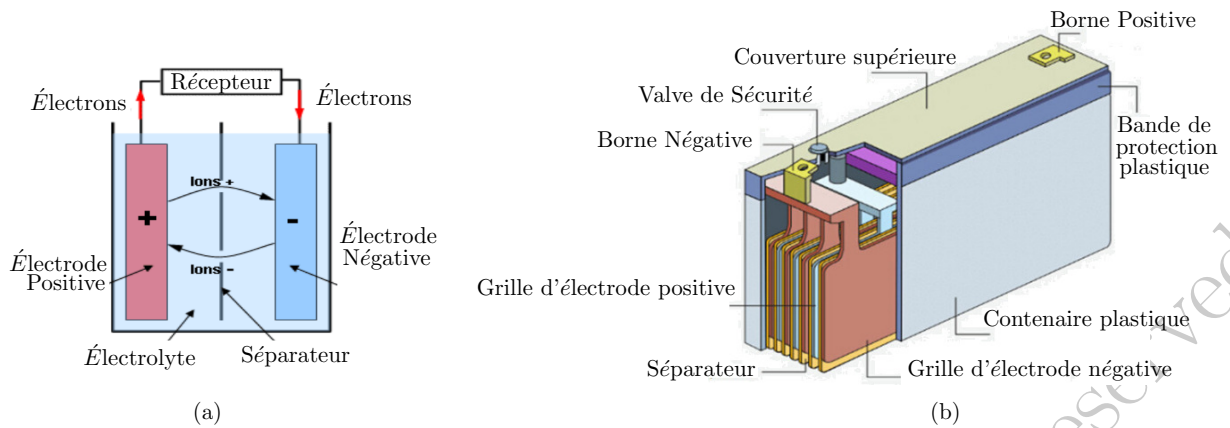


FIGURE IV.5 – Composition de l'élément de stockage. (a) cellule électrochimique. (b) batterie électrochimique. [95]

Il existe plusieurs types de batteries et la plupart d'entre eux sont encore en cours d'amélioration par de nouvelles recherches et développements. Dans les systèmes photovoltaïques, plusieurs types de batteries peuvent être utilisés. On présente dans le tableau IV.2 quelques comparaisons entre les caractéristiques des batteries les plus utilisées pour les énergies renouvelables.

TABLEAU IV.2 – Comparaison entre les caractéristiques des diverses technologies des batteries connues [96].

Batterie	Plomb-acide	NiCd	NiZn	Zebra	Lithium-ion
Tension d'une cellule (V)	2	1.2	1.65	2.6	3.7
Densité énergétique (Wh/Kg)	30–50	45–80	50–60	125	110–160
Nombre de cycle	500–1200	800–2000	>1000	800	500–1000
Temps de charge (h)	8–16	1	2–4	4–6	2–4
Autodécharge (%/mois)	5	20	30	12	10
Maintenance	3–6 mois	30–60 jours	60–90 jours	Rien	Rien
Recyclage	oui	non	oui	oui	oui
Sécurité	stable	stable	stable	chaud	explosif
Prix typique (\$/cycle)	0.04	0.1	0.12	0.5	0.14

Les batteries au plomb-acide sont les plus utilisées dans les applications photovoltaïques, en particulier dans les systèmes d'alimentation autonomes vu leurs prix abordables, leurs robustesses et fiabilités et leurs facilités de maintenance.

Cependant, l'utilisation de ce type de batterie dans les systèmes PV peut causer des modes de fonctionnement limites comme la surcharge excessive et la décharge profonde, engendrant ainsi des pertes d'électrolyte et des ruptures des liaisons chimiques irréversibles.

Dans la suite, on présente le modèle utilisé de la batterie plomb-acide avec l'identification adéquate de ses paramètres internes. Ensuite, on présente la méthode d'estimation de l'état de charge et l'observateur de batterie implanté dans le régulateur de charge.

IV.4.2 Présentation du modèle de la batterie et identification de ses paramètres

Dans la littérature, la batterie est reportée généralement par trois catégories de modèles : (i) les modèles expérimentaux, (ii) les modèles électrochimiques et (iii) les modèles électriques. Néanmoins, étant un dispositif électrochimique compliqué et difficilement modélisé, le modèle de batterie nécessaire pour cette étude doit être un modèle de type électrique associable avec les composants de la chaîne PV et simplifié pour imiter avec précision le comportement d'une batterie réelle autour d'un point de fonctionnement typique de système.

Alors, on propose d'utiliser le modèle de batterie élaboré par "Olivier Tremblay" et "Louis-A Dessaint" [97]. C'est un modèle qui est mis en œuvre par *Mathworks* pour créer le modèle de batterie de MATLAB dans la boîte à outils *SimPowerSystems*. Ce modèle peut être considéré comme suffisamment simple et satisfaisant dans ce contexte d'utilisation, comme il rassemble la précision, la facilité et la rapidité.

La figure IV.6 présente la schématisation du modèle électrique de batterie utilisé. Il est constitué principalement d'une source de tension en série avec une résistance interne. Le modèle considère la résistance interne de batterie fixe alors que la tension est variable suivant les cycles de charge et de décharge et en fonction de l'état de charge SOC actuel de la batterie.

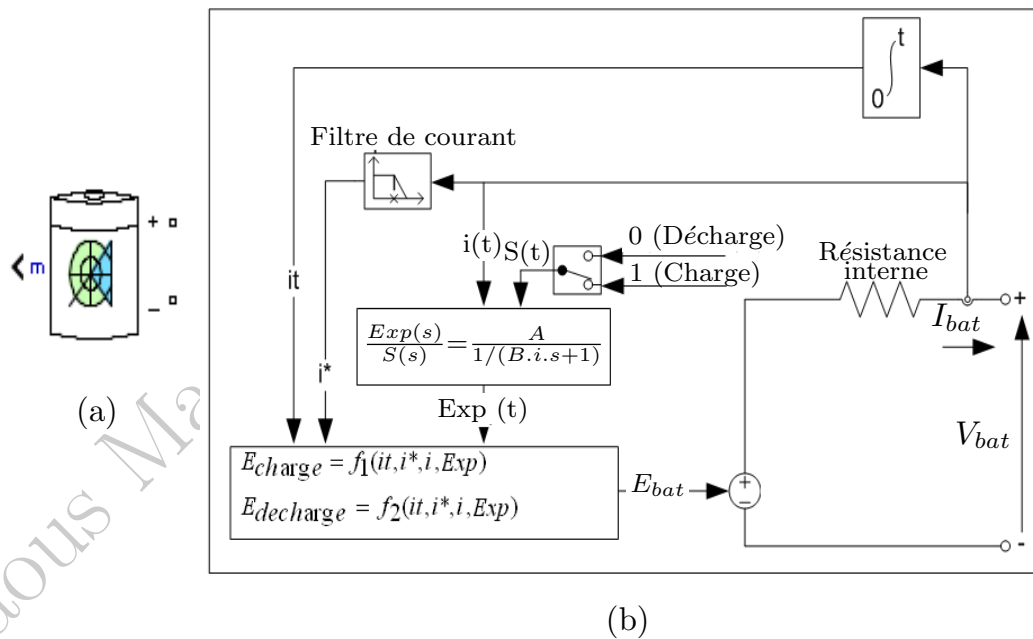


FIGURE IV.6 – Modèle électrique de batterie de la boîte à outils *SimPowerSystems*. (a) Symbolisation. (b) Schéma électrique.

Le modèle est exprimé mathématiquement par les relations suivantes :

Durant la phase de charge :

$$V_{bat} = E_0 - R i - K \frac{Q}{it - 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Exp(t) \quad (IV.19)$$

Durant la phase de décharge :

$$V_{bat} = E_0 - R i - K \frac{Q}{Q - it} (i^* + it) + Exp(t) \quad (IV.20)$$

où :

$$Exp(t) = B | i(t) | (-Exp(t) + A S(t)) \quad (IV.21)$$

et :

$$i^* = \frac{1}{\frac{T_r}{3}s + 1} i \quad (IV.22)$$

avec :

- V_{bat} : Tension totale actuelle de la batterie (V).
- E_0 : Tension constante de la batterie (V).
- K : Constante de polarisation (V/Ah).
- Q : Capacité de la batterie (Ah).
- it : $\int idt$ La charge actuelle de la batterie (Ah).
- i : Courant total actuel de la batterie (A).
- i^* : Courant filtré de la batterie (A).
- $Exp(t)$: Tension de la zone exponentielle (V).
- $S(t)$: En mode de charge $S(t) = 1$ et en mode de décharge $S(t) = 0$.
- A : Amplitude de la zone exponentielle.
- B : Constante de temps inverse de la zone exponentielle.
- T_r : Constante de temps de la batterie, estimée généralement à 30 secondes.

L'élaboration et l'utilisation de ce modèle nécessitent la considération de certaines hypothèses dans les conditions d'opérations typiques :

- La résistance interne est constante au cours du fonctionnement.
- Les paramètres sont déduits de la courbe de décharge et sont supposés semblables à ceux de la courbe de charge.
- La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant.
- La température n'affecte pas le comportement de la batterie.

La précision de ce modèle dépend essentiellement du choix des paramètres qui le constituent. On propose dans les paragraphes suivants l'identification des paramètres de la batterie grâce à deux méthodes : une méthode graphique fondée sur les données du datasheet du constructeur et une méthode d'ajustement établie à partir des mesures expérimentales réelles de la batterie utilisée.

IV.4.2.1 Extraction des paramètres avec les données du constructeurs

L'avantage majeur du modèle proposé est la simplicité avec laquelle les paramètres de batterie sont extraits. En effet, les paramètres nécessaires peuvent être déduits graphiquement grâce à seulement cinq points de la courbe de décharge fournis dans le datasheet du fabricant. Les données du fabricant de la batterie utilisée en pratique de référence "Power Kingdom PS7-12" sont résumées dans le tableau IV.3.

TABLEAU IV.3 – Spécifications électriques de la batterie Plomb-Acide de référence “Power Kingdom PS7-12”.

Grandeur	Valeur
Tension Nominale Globale V_{NG} (V)	12
Capacité Nominale ^(f) C_N (Ah)	(25°C,20HR) 7.0
Résistance interne ^(g) R_I (mΩ)	(25°C,SOC=100%) 22
Capacité Maximale C_M (Ah)	(25°C,5HR,1.19A) 5.95
Courant de décharge Maximal I_M (A)	(25°C,5s) 105
Tension de Charge V_{cycle} (V)	(25°C,-24mV/°C) 14.5~15
Courant Maximal de Charge I_{cycle} (A)	(25°C) 2.1

La figure IV.7 présente l’allure de la courbe de la caractéristique de décharge du datasheet de la batterie étudiée.

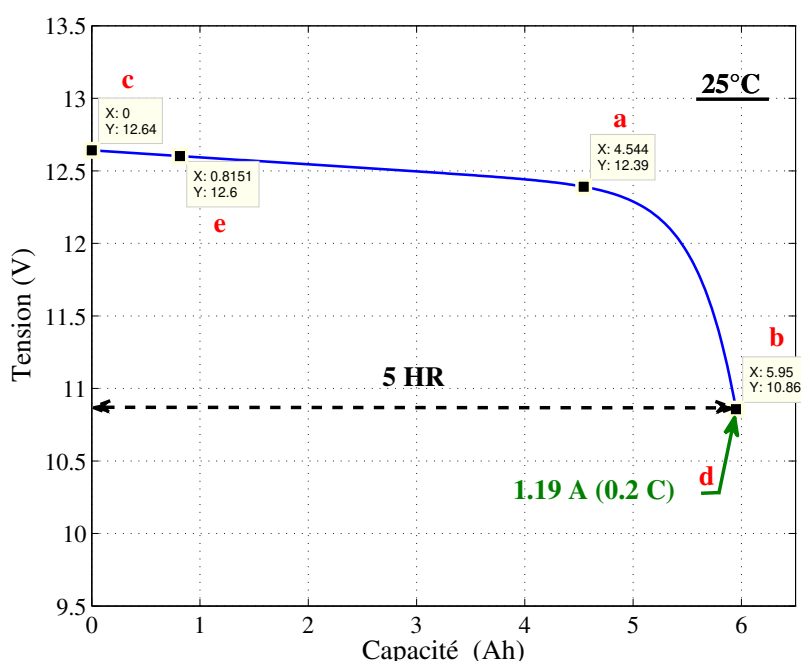


FIGURE IV.7 – Caractéristique de décharge de la batterie Plomb-Acide de référence “Power Kingdom PS7-12” à 25°C

Il est possible d’extraire les paramètres du modèle grâce aux points (a,b,c,d,e) indiqués sur la figure IV.7. Ainsi, le point (a), qui reflète la fin de la zone linéaire, permet de préciser les valeurs de la tension nominale V_N et sa capacité correspondante C_N . Le point (b) permet d’identifier la capacité maximale C_M alors que le point (c), qui reflète l’extrémité de la zone exponentielle, permet de retrouver la valeur de la tension de charge complète V_C . Le point (d) reflète le courant de décharge nominal supposé constant I_N utilisé par le fabricant pour retrouver la capacité maximale C_M . Concernant le point (e), reflétant l’extrémité de la zone linéaire, il permet d’identifier les valeurs de la tension exponentielle V_E et sa capacité correspondante C_E . En outre, la résistance interne R_I et la capacité nominale C_N sont généralement données numériquement (données f et g du tableau IV.3).

Les résultats de l'identification graphique grâce aux données du datasheet du fabricant sont exposés dans le tableau IV.4.

IV.4.2.2 Extraction des paramètres avec les mesures expérimentales

Afin d'améliorer la précision du modèle de la batterie, on propose d'étudier la caractéristique de décharge expérimentalement dans les conditions de fonctionnement typiques du système PV et grâce à des charges typiques [98]. Les mesures expérimentales des courants et des tensions délivrées par la batterie (initialement chargée) en cours de sa décharge sont enregistrées automatiquement. La figure IV.8.a montre le schéma explicatif de la méthode de mesures des courants et des tensions et la figure IV.8.b présente le banc d'essai expérimental de mesure de la batterie.

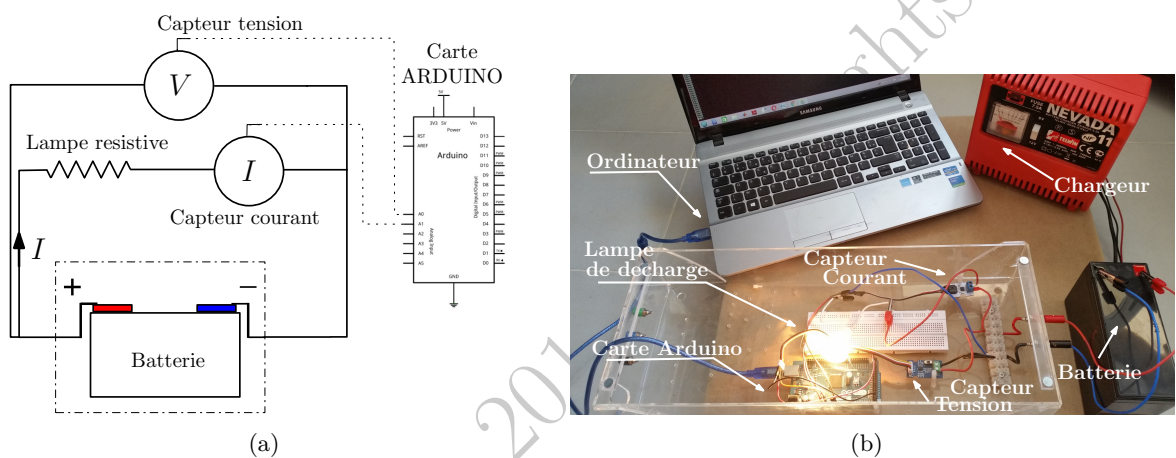


FIGURE IV.8 – Mesures expérimentales de la batterie “Power Kingdom PS7-12”. (a) Schéma explicatif des mesures. (b) Banc d'essai expérimental.

On propose d'ajuster les paramètres du modèle de la batterie pour coïncider avec la caractéristique de décharge expérimentale. Pour cela on utilise la procédure d'ajustement des courbes (paragraphe II.2.2) avec l'algorithme du gradient évolué comme c'est illustré par la figure IV.9.

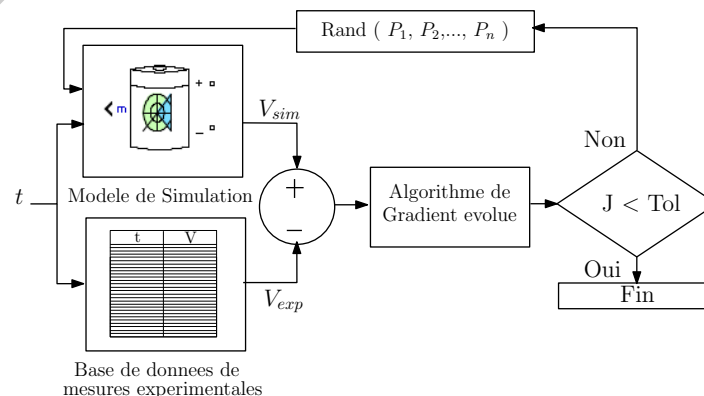


FIGURE IV.9 – Schéma explicatif de la méthode d'ajustement des courbes utilisée pour l'identification des paramètres de la batterie “Power Kingdom PS7-12”.

Les résultats de l'identification des paramètres de la batterie “Power Kingdom PS7-12” par

ajustement et grâce à des mesures expérimentales sont exposés dans le tableau IV.4.

IV.4.2.3 Résultats et interprétations

Les résultats d'extraction des paramètres de la batterie "Power Kingdom PS7-12" utilisée en pratique en adoptant les deux méthodes précédemment décrites sont résumés dans le tableau IV.4.

TABLEAU IV.4 – Résultats des méthodes d'extraction de paramètres de la batterie Plomb-Acide de référence "Power Kingdom PS7-12".

Paramètre	Valeur par datasheet	Valeur par expérimentation
Tension Nominale V_N (V), "Nominal Voltage"	12.39 ^(a)	12.3327
Capacité Nominale C_N (Ah), "Rated Capacity"	7 ^(f)	6.9571
Capacité Maximale C_M (Ah), "Maximum Capacity"	5.95 ^(b)	6.2597
Tension de Charge Complet V_C (V), "Fully Charged Voltage"	12.64 ^(c)	12.8821
Courant de décharge Nominal I_N (A), "Nominal Discharge Current"	1.19 ^(d)	0.5527
Résistance interne R_I (mΩ), "Internal Resistance"	22 ^(g)	22
Capacité à la tension Nominale C_{VN} (Ah), "Capacity @ Nominal Voltage"	4.544 ^(a)	3.6211
Tension Exponentielle V_E (V), "Exponential Voltage"	12.6 ^(e)	12.7491
Capacité Exponentielle C_E (Ah), "Exponential Capacity"	0.8151 ^(e)	0.5470

Dans le but de comparer la précision des paramètres déterminés par les deux méthodes étudiées, on porte sur la figure IV.10 les courbes de décharge simulées par le modèle de la batterie grâce aux paramètres déterminés et la courbe de décharge obtenue expérimentalement.

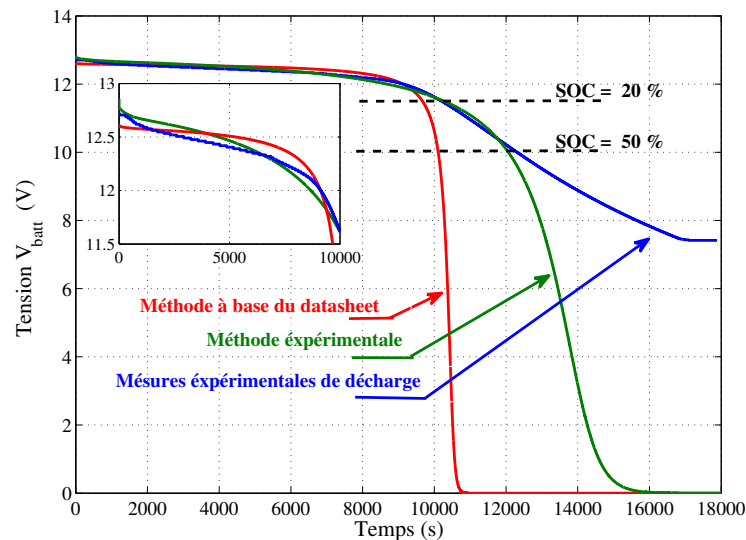


FIGURE IV.10 – Comparaison des caractéristiques de décharge de la batterie "Power Kingdom PS7-12".

La courbe des mesures expérimentales présente le comportement réel de la batterie utilisée dans les conditions d'opérations typiques du système PV. La comparaison des courbes simulées avec la courbe expérimentale montre les limites du modèle de la batterie, qui s'avère incapable

de reproduire la totalité de la courbe expérimentale, surtout lors d'une décharge profonde. La méthode d'identification des paramètres graphiquement grâce aux données du datasheet présente une précision de 2% si le SOC est à 90% et diminue jusqu'à 10% si le SOC est à 80%, au-delà de cette valeur d'état de charge SOC, le modèle est considéré injuste et ne reproduit pas le comportement réel de la batterie. Pour la méthode d'identification grâce aux mesures expérimentales, on remarque une précision meilleure de 1% jusqu'à un état de charge SOC égal à 50% au-delà de cette valeur, le modèle devient injuste. La méthode expérimentale permet une identification meilleure des paramètres du modèle de la batterie et la précision est assez suffisante dans l'intervalle de fonctionnement, surtout si on met en évidence que l'observateur de batterie conçu assure la protection contre la décharge profonde et ne permet pas de décharger la batterie à un SOC inférieur à 50%.

IV.4.3 Système d'observation de la batterie :

Dans ce paragraphe, on présente un observateur de batterie conçu pour évaluer l'état de charge et pour protéger la batterie contre la surcharge excessive et la décharge profonde [99]. On a présenté dans la figure IV.2 le schéma du circuit électrique élaboré pour commander les relais à distance par ouverture ou fermeture suivant la valeur d'état de charge estimée. La figure IV.11 présente l'organigramme de l'algorithme d'estimation de l'état de charge (SOC) à chaque échantillon de mesure et de contrôle des relais.

L'état de charge SOC de la batterie est généralement évalué par l'expression mathématique suivante :

$$SOC(\%) = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int i(t) dt \right) \quad (IV.23)$$

IV.5 Conception, Modélisation et Dimensionnement du convertisseur DC-DC

Dans les paragraphes précédents, on a conduit une linéarisation de la source PV puis de la charge de sortie autour du point de puissance maximale (MPP) considéré comme le point idéal pour optimiser le système PV.

Dans cette partie, on propose d'étudier l'étage de conversion $DC - DC$ intercalé entre le module PV et la charge, et qui sera dimensionné en tenant compte des linéarisations faites auparavant.

Le hacheur est un convertisseur continu-continu de puissance qui transforme une tension continue d'entrée en une autre tension de sortie continue mais de valeur différente. La valeur de la tension de sortie dépend essentiellement de la topologie du convertisseur choisie [100].

Pour les convertisseurs à entrées variables dédiés aux applications PV, la tension de sortie V_S est fixée par la tension de l'élément de stockage V_{bat} et la tension d'entrée V_{pv} varie de 0 à V_{oc} (tension de circuit ouvert). Dans ce cas, le choix de la topologie dépend du choix de l'élément de stockage. Si $V_{bat} > V_{pv}$ le convertisseur doit être élévateur et si $V_{bat} < V_{pv}$ le convertisseur

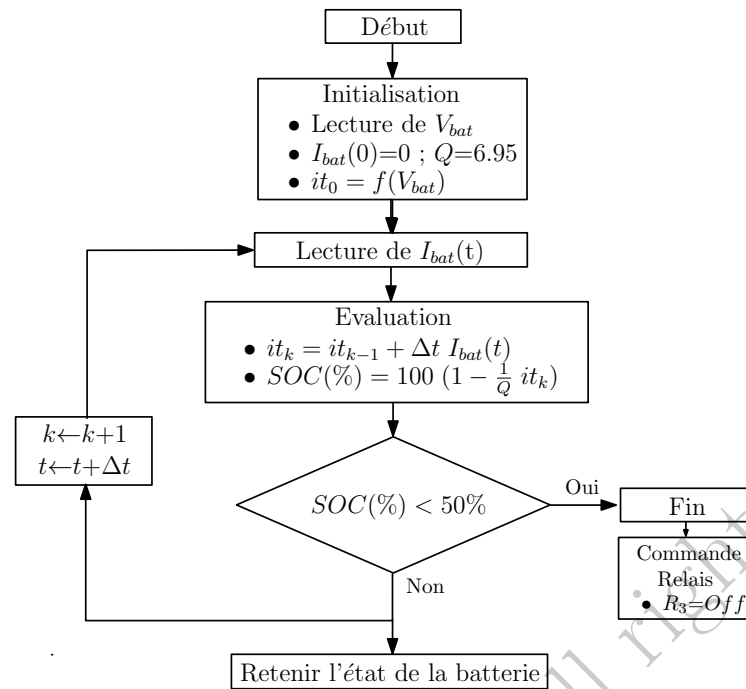


FIGURE IV.11 – Algorithme de l’observateur de batterie.

doit être abaisseur. Il existe des convertisseurs abaisseurs–élevateurs qui peuvent s’adapter à n’importe quel choix de batterie seulement en agissant sur leurs rapports cycliques.

IV.5.1 Dimensionnement optimal des convertisseurs de puissances

Dans la littérature, il existe une multitude de topologies de convertisseurs $DC - DC$ qui peuvent être mises en œuvre [101, 102, 103]. Dans ce travail, on a considéré seulement les topologies dites fondamentales qui constituent les noyaux fondamentaux de toutes les autres topologies. Ces convertisseurs sont appelés : Buck, Boost et Buck-Boost. Ils sont proposés depuis 1977 par “Robert Middlebrook” et “Slobodan’Cuk” [106]. Ensuite, “Cuk” a proposé des améliorations sur la structure du Buck-Boost et il a conçu les convertisseurs Cuk et Sepic [107, 108]. Le convertisseur Zeta, appelé aussi le Sepic inverse, et d’autres structures avancées sont apparus par la suite [109] par la même équipe de recherche.

Les schémas électriques des topologies étudiées dans ce travail sont regroupés dans le tableau IV.5 et leurs matrices d’états sont exhibées dans le tableau IV.6.

L’objectif du dimensionnement optimal des hacheurs consiste à fixer les paramètres de conception du convertisseur, qui sont essentiellement : les éléments de la cellule de commutation, les valeurs des inductances, les valeurs des capacités et la fréquence de commutation, de manière appropriée conduisant aux meilleurs rendements de l’étage de conversion.

Le choix optimal de la fréquence de commutation est un problème multidimensionnel. En effet, il dépend principalement des paramètres suivants :

- La carte de commande : le microcontrôleur choisi est à l’origine de la limitation de la fourchette de fréquence employée. Pour une commande MPPT fondamentale (P&O,

incrémentale, etc.), l'utilisation d'un PIC ou d'un AVR est largement suffisante. Pour des approches plus élaborées (technique floue, neurone, etc.), l'utilisation d'une carte DSP ou bien FPGA, qui sont nettement plus chères, est recommandée.

TABLEAU IV.5 – Schémas électriques des topologies des convertisseurs considérées. [104]

Topologie	Schéma global	Durant $d T$	Durant $(1 - d) T$
Buck			
Boost			
Buck-boost			
Cũk			
SEPIC			
ZETA			

- Les composants de puissance : sont choisis pour supporter la fréquence de commutation employée. Autrement, la période de hachage ne doit pas être inférieure à la somme des temps de montée, de descente et de repos du composant de puissance, ainsi qu'on doit prévoir une marge de temps pour éviter le chevauchement.
- Système de refroidissement : l'augmentation de la fréquence de hachage cause l'échauffement excessif des composants de puissance, ce qui nécessite la conception d'un circuit de refroidissement. Ce circuit a pour conséquence l'augmentation considérable de la taille du système ainsi qu'il augmente le coût du convertisseur.
- Poids et volume du convertisseur : le choix de la fréquence influence la taille des composants passifs employés (Inductances, Capacités...). Plus la fréquence est faible, plus les composants sont de dimension élevée. Il est intéressant, ainsi, d'augmenter la fréquence afin de réduire la taille du convertisseur. Néanmoins, cette augmentation est pénalisée par le circuit de refroidissement imposé pour dégager de la chaleur.
- Coût global du convertisseur : l'optimisation du rendement du système est liée au budget

disponible du projet. Il est évidemment inutile d'optimiser le gain énergétique de 5% contre la multiplication élevée du coût du système. Ainsi, le coût du convertisseur désiré doit être fixé harmonieusement avec le coût global de l'application.

TABLEAU IV.6 – Matrices d'états des topologies des convertisseurs considérées [104].

Topologie	Modèle d'état
Buck	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{R_S C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$
Boost	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-d)}{L} \\ \frac{1-d}{C} & \frac{-1}{R_S C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$
Buck–boost	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L(1-d)} \\ \frac{1-d}{C} & \frac{-1}{R_S C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$
Cũk	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{d}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d-1}{L_2} & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{d}{C_1} & \frac{1-d}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{C_2 R_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(1-2d)}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$
SEPIC	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1-d}{L_1} & \frac{1-d}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{1-d}{L_2} & \frac{1-d}{L_2} \\ \frac{1-d}{C_1} & \frac{d-1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-d}{C_2} & \frac{1-d}{C_2} & 0 & \frac{1-2d}{C_2 R_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1-2d}{L_1} \\ \frac{d-1}{L_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$
ZETA	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{L_1} & 0 & \frac{d-1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_2} & \frac{d}{L_2} & \frac{-1}{L_2} \\ \frac{1-d}{C_1} & \frac{-d}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{C_2 R_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L_1} \\ \frac{d}{L_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_{pv}]$

Par conséquent, le choix de la fréquence de commutation est un compromis technique-économique. Dans cette étude, on a fixé la fréquence de hachage f à 62.5 kHz, comme c'est la fréquence maximale offerte par le microcontrôleur utilisé (Arduino 2560). Cette fréquence est admissible par la majorité des composants de puissance existants sur le marché et elle ne nécessite pas un circuit de refroidissement spécifique. Le poids global de la carte du convertisseur

sera autour de 150 g et le coût est limité à environ 100 € ; ce qui peut être considéré comme un choix acceptable.

TABLEAU IV.7 – Expressions mathématiques des paramètres des différentes topologies des convertisseurs considérés [104].

	Buck	Boost	Buck-boost	Cük	SEPIC	ZETA
$G_V(d)$	d	$\frac{1}{1-d}$	$\frac{d}{1-d}$	$\frac{d}{1-d}$	$\frac{d}{1-d}$	$\frac{d}{1-d}$
d_m	$\frac{V_{S_m}}{V_m}$	$1 - \frac{V_m}{V_{S_m}}$	$\frac{V_{S_m}}{V_{S_m} - V_m}$	$\frac{V_{S_m}}{V_{S_m} - V_m}$	$\frac{V_{S_m}}{V_{S_m} + V_m}$	$\frac{V_{S_m}}{V_{S_m} + V_m}$
R_{S_m}	$(d_m)^2 R_m$	$\frac{R_m}{(1-d_m)^2}$	$\left(\frac{-d_m}{1-d_m}\right)^2 R_m$	$\left(\frac{-d_m}{1-d_m}\right)^2 R_m$	$\left(\frac{-d_m}{1-d_m}\right)^2 R_m$	$\left(\frac{d_m}{1-d_m}\right)^2 R_m$
L_1	$\frac{d_m (1-d_m) V_m}{f \Delta I_L}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_L}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_L}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_{L1}}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_{L1}}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_{L1}}$
L_2	–	–	–	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_{L2}}$	$\left(\frac{V_m}{\Delta I_{L2}}\right) \frac{d_m (1-d_m)}{d_m - 1}$	$\frac{d_m V_m}{f \Delta I_{L2}}$
C_e	$\frac{(1-d_m) I_m}{f \Delta V_m}$	$\frac{d_m V_m}{8 L \Delta V_m f^2}$	$\frac{(1-d_m) I_m}{2 \Delta V_m f}$	$\frac{(1-d_m) I_m}{2 \Delta V_m f}$	$\frac{(1-d_m) I_m}{2 \Delta V_m f}$	$\frac{(1-d_m) I_m}{\Delta V_m f}$
C_1	$\frac{(1-d_m) V_{S_m}}{8 L \Delta V_{S_m} f^2}$	$\frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{S_m}}$	$\frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{S_m}}$	$\frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{c1}}$	$\frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{c1}}$	$\frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{c1}}$
C_2	–	–	–	$\frac{-d_m V_m}{L_2 \Delta V_{c2} f^2 d_m}$	$\frac{(1-d_m) (I_m L_2 - d_m V_m)}{\Delta V_{c2} f L_2}$	$\frac{\Delta I_{L1}}{(8 \Delta V_{c2} f)}$

Les éléments de la cellule de commutation pour un convertisseur de puissance fonctionnant dans un seul quadrant sont généralement une diode de puissance qui commute naturellement et un transistor Mosfet commandé à l'amorçage et au blocage. Les composants sont choisis pour supporter la fréquence f et la puissance appliquées aux composants à chaque instant. Il est préférable de sélectionner des composants présentant les plus faibles résistances internes afin de minimiser les pertes de conduction et les plus courts temps de montée et de descente afin de minimiser les pertes de commutation, tout en respectant le budget admissible (les composants les plus robustes causant les moindres pertes sont les plus chers sur le marché).

De même, les éléments de filtrage (inductances et capacités) sont évalués adéquatement pour garantir d'une part, le fonctionnement en mode de conduction continue du convertisseur et d'autre part l'oscillation minimale des grandeurs de sortie (courant I_S et tension V_S). Ces éléments sont calculés à partir des relations résumées dans le tableau IV.7 en considérant l'amplitude d'ondulation de courant $\Delta I_L = 2\% I_m$ et les amplitudes d'ondulations des tensions $\Delta V_{pv} = 2\% V_m$ et $\Delta V_S = 2\% V_S$. Les valeurs numériques calculées des inductances et des

capacités de toutes les topologies considérées sont résumées dans le tableau IV.8.

Les travaux de modélisation et de simulation des différentes topologies des convertisseurs, grâce au module PV 50 W à l'entrée et à la batterie de stockage 24 V à la sortie tout en considérant les différents éléments parasites et les diverses pertes de conduction, sont élaborés dans l'environnement MATLAB-Simulink à l'aide de la boîte à outils " *SimPowerSystems* "

La comparaison entre les rendements des différentes topologies montre que le convertisseur boost est le plus approprié dans ce contexte de travail, car il possède le plus fort rendement de conversion qui dépasse 82%.

TABLEAU IV.8 – Calcul numérique des paramètres des différentes topologies de convertisseurs étudiées.

	Buck	Boost	Buck-boost	Cük	SEPIC	ZETA
V_{S_m} (V)	7.5	30	-15	-15	15	15
G_{V_m}	0.310	1.24	0.62	0.62	0.62	0.62
d_m	0.388	0.3556	0.4369	0.4369	0.4369	0.4369
I_{S_m} (A)	7.1284	1.7821	-3.5642	-3.5642	3.5642	3.5642
R_{S_m} (Ω)	1.0521	16.8342	4.2085	4.2085	4.2085	4.2085
L_1 (mH)	0.515	2	1.1	2.4	2.4	2.4
L_2 (mH)	---	---	---	1.9	2.4	2.4
C_e (μF)	70.044	0.286	64.441	32.221	32.221	64.441
C_1 (μF)	3.8018	33.798	166	72.573	128.88	166.1
C_2 (μF)	---	---	---	17.403	128.88	0.737

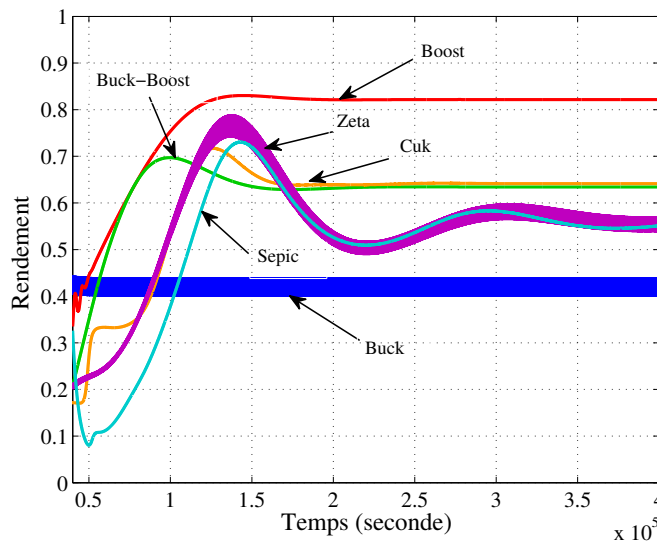


FIGURE IV.12 – Comparaison du rendement des différentes topologies de convertisseurs.

Dans la suite, on propose d'étudier le fonctionnement du régulateur de charge conçue autour d'un convertisseur élévateur de type boost pour le module photovoltaïque de 50W.

IV.5.2 Conception de la chaîne de conversion PV par hacheur Boost

Dans ce paragraphe, on propose de modéliser la chaîne de conversion PV présentée dans la figure IV.2 à base d'un hacheur de type boost schématisé dans la figure IV.13. Ce hacheur est un quadripole où les grandeurs d'entrée sont V_{pv} et I_{pv} (tension et courant de la source PV) et les grandeurs de sortie sont V_S et I_S . Le filtre passe-basse se compose d'une inductance L et d'une capacité de sortie C_S . La capacité d'entrée C_e est une capacité de découplage qui sert à palier les ondulations en tension de la source PV. La cellule de commutation basique est composée d'un Mosfet M et d'une diode de roue libre D . Le convertisseur opère par la commutation commandée périodique du Mosfet et c'est un hacheur élévateur vu que la tension de sortie est toujours supérieure à l'entrée.

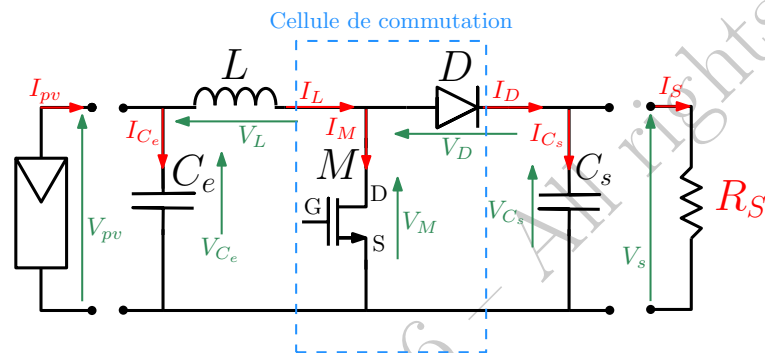


FIGURE IV.13 – Structure du convertisseur boost.

Le Mosfet est commandé par amorçage pendant la période $d T$ et par blocage pendant la période $(1 - d) T$, où d est le rapport cyclique qui varie entre 0 et 1 ($T = \frac{1}{f}$ est la période de commutation).

L'élaboration des relations mathématiques qui relient les variables d'état du convertisseur avec les grandeurs d'entrées et de sorties ainsi que l'expression de L et C en fonction de ΔI_L et ΔV_S sont largement discutées dans la littérature [105]. Les différentes relations nécessaires pour le dimensionnement des convertisseurs considérées sont présentées dans le tableau IV.7.

Dans la suite, on présente un rappel de ces relations pour le convertisseur boost. L'étude des séquences de fonctionnement du Boost est montrée par les figures IV.14.a et IV.14.b.

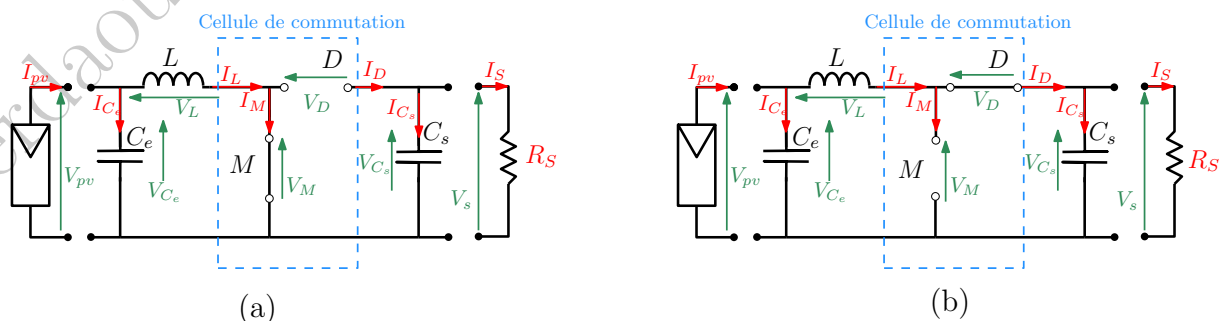


FIGURE IV.14 – Schémas des séquences du fonctionnement du convertisseur boost.

— Analyse lorsque le Mosfet est amorcées (Durant dT) :

Lorsque l'interrupteur commandé M est passant, le courant traversant la bobine L croît linéairement. Les expressions mathématiques qui relient les variables d'états du convertisseur avec les grandeurs d'entrées et de sorties s'écrivent comme suit :

$$i_{C_e}(t) = C_e \frac{d v_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (IV.24)$$

$$i_{C_s}(t) = C_s \frac{d v_S(t)}{dt} = -i_S(t) \quad (IV.25)$$

$$v_L(t) = L \frac{d i_L(t)}{dt} = v_{pv}(t) \quad (IV.26)$$

— Analyse lorsque le Mosfet est bloquée (Durant $(1-d)T$) :

Lorsque l'interrupteur commandé M est bloquée, l'énergie emmagasinée dans l'inductance est transférée à travers la diode polarisée en direct vers la capacité de sortie C_S et la charge. Le courant dans la bobine et les tensions aux bornes des capacités s'écrivent comme suit :

$$i_{C_e}(t) = C_e \frac{d v_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (IV.27)$$

$$i_{C_s}(t) = C_s \frac{d v_S(t)}{dt} = i_L(t) - i_S(t) \quad (IV.28)$$

$$v_L(t) = L \frac{d i_L(t)}{dt} = v_{pv}(t) - v_S(t) \quad (IV.29)$$

— La matrice d'état du convertisseur s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{C_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-d)}{L} \\ 1-d & \frac{-1}{R_S C_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{C_s} \end{bmatrix}$$

— On exprime l'inductance en fonction de l'amplitude d'ondulation ΔI_L désirée comme suit :

$$L = \frac{d V_{pv}}{f \Delta I_L} \quad (IV.30)$$

— On exprime la capacité de sortie en fonction de l'amplitude d'ondulation ΔV_S désirée comme suit :

$$C_s = \frac{d I_S}{f \Delta V_S} \quad (IV.31)$$

— On exprime la capacité d'entrée en fonction de l'amplitude d'ondulation ΔV_{pv} désirée comme suit :

$$C_e = \frac{d V_{pv}}{8 L \Delta V_{pv} f^2} \quad (IV.32)$$

— Pour le dimensionnement optimal du convertisseur, le rapport d est choisi égal à d_m , alors l'évaluation des valeurs appropriées de l'inductance et des capacités est faite en utilisant les relations suivantes :

$$L_m = \frac{d_m V_m}{f \Delta I_L} \quad (IV.33)$$

$$C_{s_m} = \frac{d_m I_{S_m}}{f \Delta V_{S_m}} \quad (IV.34)$$

$$C_{e_m} = \frac{d_m V_m}{8 L \Delta V_m f^2} \quad (IV.35)$$

Les calculs numériques des paramètres du convertisseur Boost ainsi que pour les autres topologies considérées sont présentés dans le tableau IV.8.

IV.5.2.1 Simulation de la chaîne de conversion PV par des composants idéaux

Le travail élaboré dans cette partie consiste à implanter le modèle du convertisseur boost sur MATLAB et l'associer avec les autres blocs constituant la chaîne PV élaborée auparavant (PV et batterie). On considère un transfert idéal de la puissance $P_S = P_{pv}$ (où P_S est la puissance de sortie $P_S = V_S I_S$ et P_{pv} est la puissance d'entrée $P_{pv} = V_{pv} I_{pv}$). On néglige, alors, les diverses pertes de puissance existantes réellement (Les éléments parasites, les pertes de conduction, les pertes de câblages...).

Le modèle de simulation de la chaîne PV dans l'environnement MATLAB-Simulink est présenté à la figure IV.15.

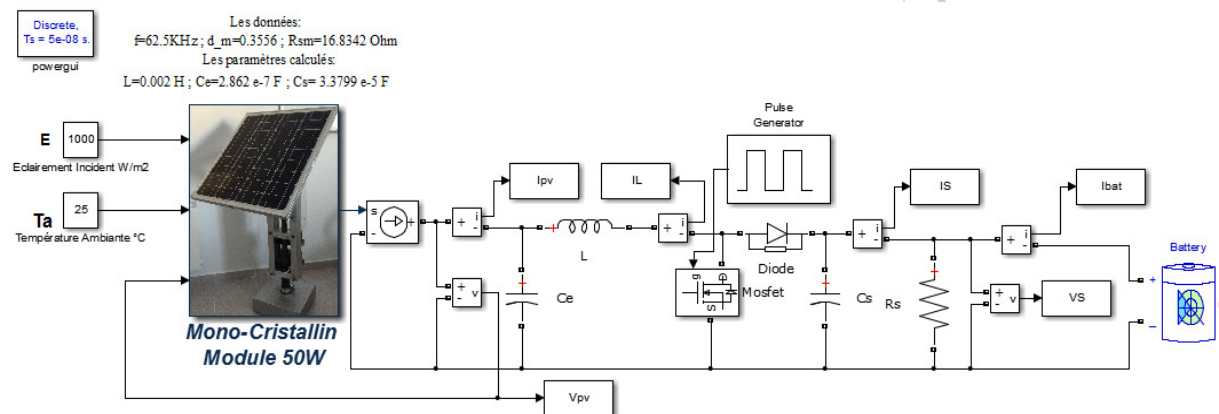


FIGURE IV.15 – Modèle de simulation de la Chaîne PV à travers des composants idéaux.

Les travaux de simulations s'intéresse à l'analyse de la variation en fonction du temps des grandeurs électriques d'entrées et de sorties de la chaîne de conversion tout en conservant l'éclairage et la température du module PV à $1000W/m^2$ et $25^\circ C$ et en appliquant un rapport cyclique fixe $d_m = 35.56 \%$ pour une fréquence de 62.5 kHz, et ceci en considérant tout d'abord une charge resistive R_{S_m} optimale égale à 16.8342Ω . Ensuite, on considère l'intégration d'une batterie de stockage chargée à moitié (SOC=50%) et finalement en considérant une batterie complètement chargée (SOC=100%).

Le but de cette partie est de s'assurer que les travaux de dimensionnement des composants élaborés conduisent aux valeurs souhaitées des grandeurs de sortie et aux amplitude souhaitées des ondulations des différentes grandeurs.

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure IV.16 et l'analyse des différentes grandeurs permet de dégager les remarques suivantes :

- Pour une charge resistive R_S égale à la valeur optimale R_{S_m} alimentée individuellement par la chaîne de conversion PV, on observe les grandeurs d'entrées qui s'installent autour de l'MPP après un certain temps transitoire où V_{pv} est presque égale à V_m , I_{pv} est presque égale à I_m et la puissance P_{pv} est effectivement la puissance maximale P_m du module PV.

Ce résultat montre que le montage dimensionné autour du point MPP conduit exactement aux valeurs souhaités. Le courant dans l'inductance oscille linéairement dans la fourchette ΔI_L désirée, de même la tension de sortie V_S oscille dans la fourchette ΔV_S désirée et la tension atteint la valeur de 30V prévue. Le courant de sortie I_S est presque égale à I_{S_m} et la puissance de sortie P_S est presque égale à la puissance d'entrée P_e . Il est évident que le courant dans la batterie est nul (batterie déconnectée). La tension du module PV oscille fortement lors du régime transitoire et atteint des valeurs négatives. Cet effet peut être limité par l'intégration d'une diode bypass aux bornes du module PV.

- Si on connecte la batterie chargée à moitié (50%), on observe un changement total de toutes les grandeurs. Ceci revient au fait que la batterie est considérée par le système comme une charge additionnelle et la charge globale à la sortie (mise en parallèle de R_{S_m} et de la batterie) n'est plus la charge optimale R_{S_m} . Par conséquent les grandeurs d'entrées V_{pv} et I_{pv} ne convergent plus vers V_m et I_m et la puissance délivrée du module PV P_{pv} n'est plus la valeur maximale P_m . Le courant dans l'inductance diminue par contre l'ondulation est acceptable. Pour les grandeurs de sortie on remarque que la tension de sortie est fixe imposée par la batterie, alors que le courant et la puissance de sortie présentent des fortes ondulations et s'annulent sur une courte durée de la période T . Par contre leurs valeurs moyennes vues par la charge sont acceptables et la puissance moyenne de sortie est identique à la puissance d'entrée. Le courant de la batterie I_{bat} est négatif lors du régime transitoire ; ce qui montre que la batterie est entrain de se décharger dans la charge R_S lorsque la tension V_S est inférieure à la tension de la batterie V_{bat} .
- Si on connecte une batterie complètement chargée (100%) on trouve des résultats similaires au cas précédent sauf que les tensions sont légèrement supérieure vue que le niveau de la tension de la batterie est maximale. La forte ondulation du courant I_{bat} est déconseillée par le fabricant de la batterie car elle cause le vieillissement précoce de l'élément de stockage. Pour palier à ce problème, on peut concevoir un filtre additionnel à la sortie qui limite les ondulations du courant de sortie.

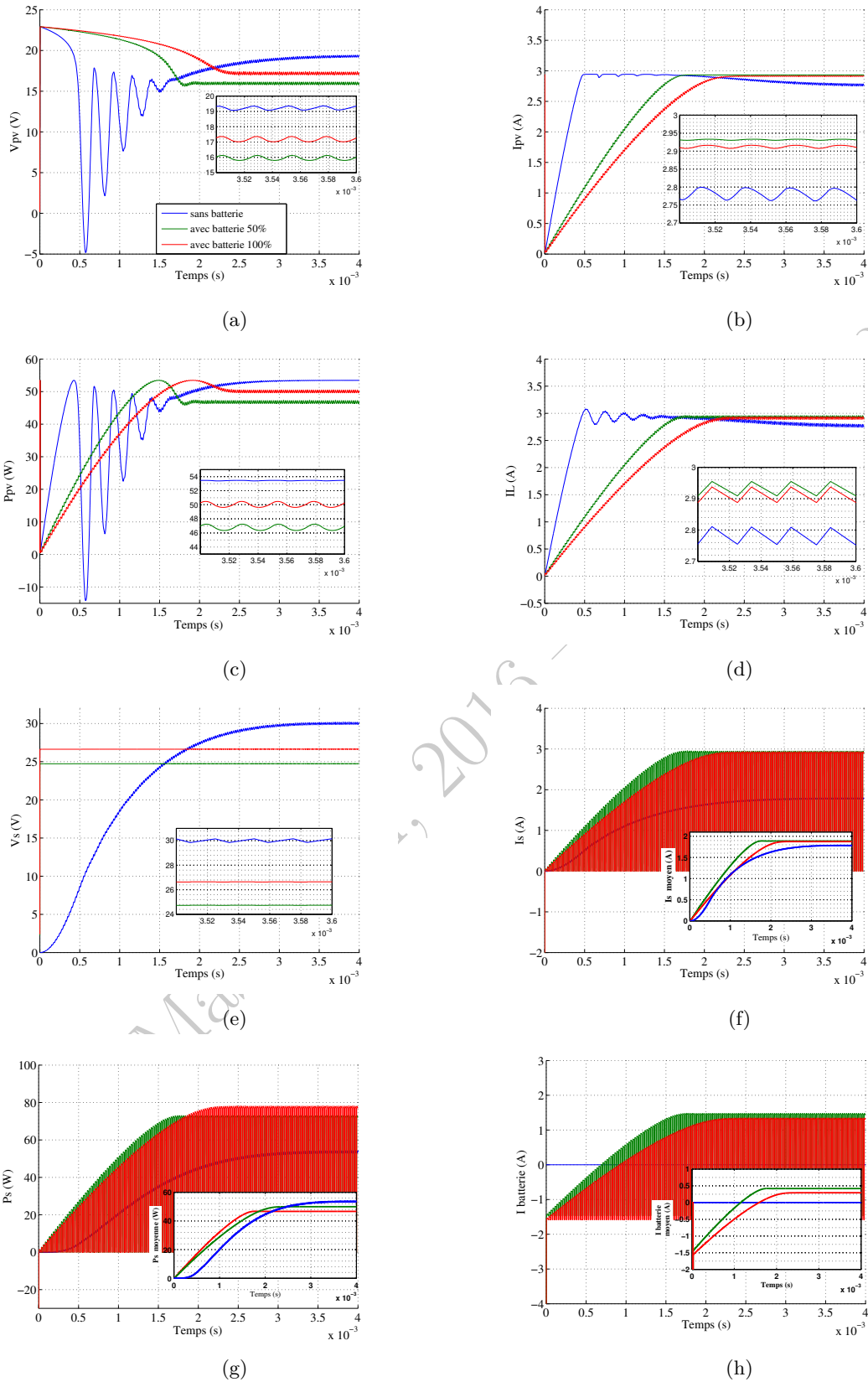


FIGURE IV.16 – Résultats de simulation du convertisseur boost avec des composants idéaux. (a) Tension du module PV V_{pv} . (b) Courant du module PV I_{pv} . (c) Puissance du module PV P_{pv} . (d) Courant dans l'inductance I_L . (e) Tension de sortie V_S . (f) Courant de sortie I_S . (g) Puissance de sortie P_S . (h) Courant de la batterie I_{bat} .

IV.5.2.2 Simulation de la chaîne de conversion PV en tenant compte des pertes du convertisseur

Le modèle de simulation présenté à la figure IV.17 consiste à la modélisation de la chaîne de conversion PV en tenant compte des effets parasites dans les divers composants, les pertes de conduction impliquées par les composants de puissance et les pertes de câblages. On a conçu dans cette partie un filtre de sortie et on a ajouté une diode bypass à l'entrée d'un module de PV et une diode anti-retour à la sortie du convertisseur.

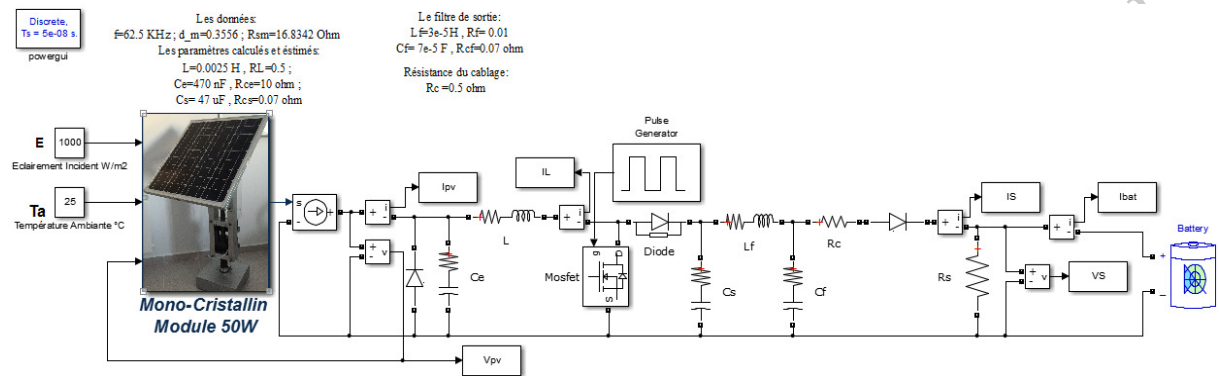


FIGURE IV.17 – Modèle de simulation de la Chaîne PV en tenant compte des pertes de puissance.

Le but de cette partie de travail est de s'assurer du bon fonctionnement du convertisseur et des variations de ses grandeurs électriques en tenant compte des diverses pertes de puissance existantes réellement. Dans les conditions réelles de fonctionnement, il est nécessaire de prévoir une marge de tolérance lors du dimensionnement des composants passifs afin de diminuer le stress et d'éviter leurs saturation et pour garantir un fonctionnement souple du circuit. A ce fait, les composants passifs de toute la chaîne sont sur-dimensionnés de 30%.

On tient les mêmes conditions de fonctionnement de l'éclairement, de température et du rapport cyclique. Les résultats de simulations sont présentés à la figure IV.18 et l'analyse des différentes grandeurs permettent de dégager les remarques suivantes :

- Pour une charge résistive R_{S_m} alimentée individuellement par la chaîne PV, la considération des pertes du convertisseur a provoqué la diminution de la puissance P_{pv} générée par le module PV ; ceci revient au fait que les résistances parasites sont considérées comme des charges additionnelles à la charge R_S et le rapport cyclique d_m n'est plus adéquat à la charge résultante.
- Les grandeurs de sortie sont diminuées par rapport aux résultats précédent. Ceci est observé surtout au niveau de puissance de sortie qui est largement inférieure à la puissance d'entrée à cause des pertes du système.
- Le branchement de la batterie permet d'imposer et de fixer la tension de sortie V_s . Le courant de sortie I_s est bien lissé par effet du filtre de sortie conçu. La puissance de sortie est largement inférieure à la puissance d'entrée ; ce qui reflète le rendement réel de l'étage de conversion.

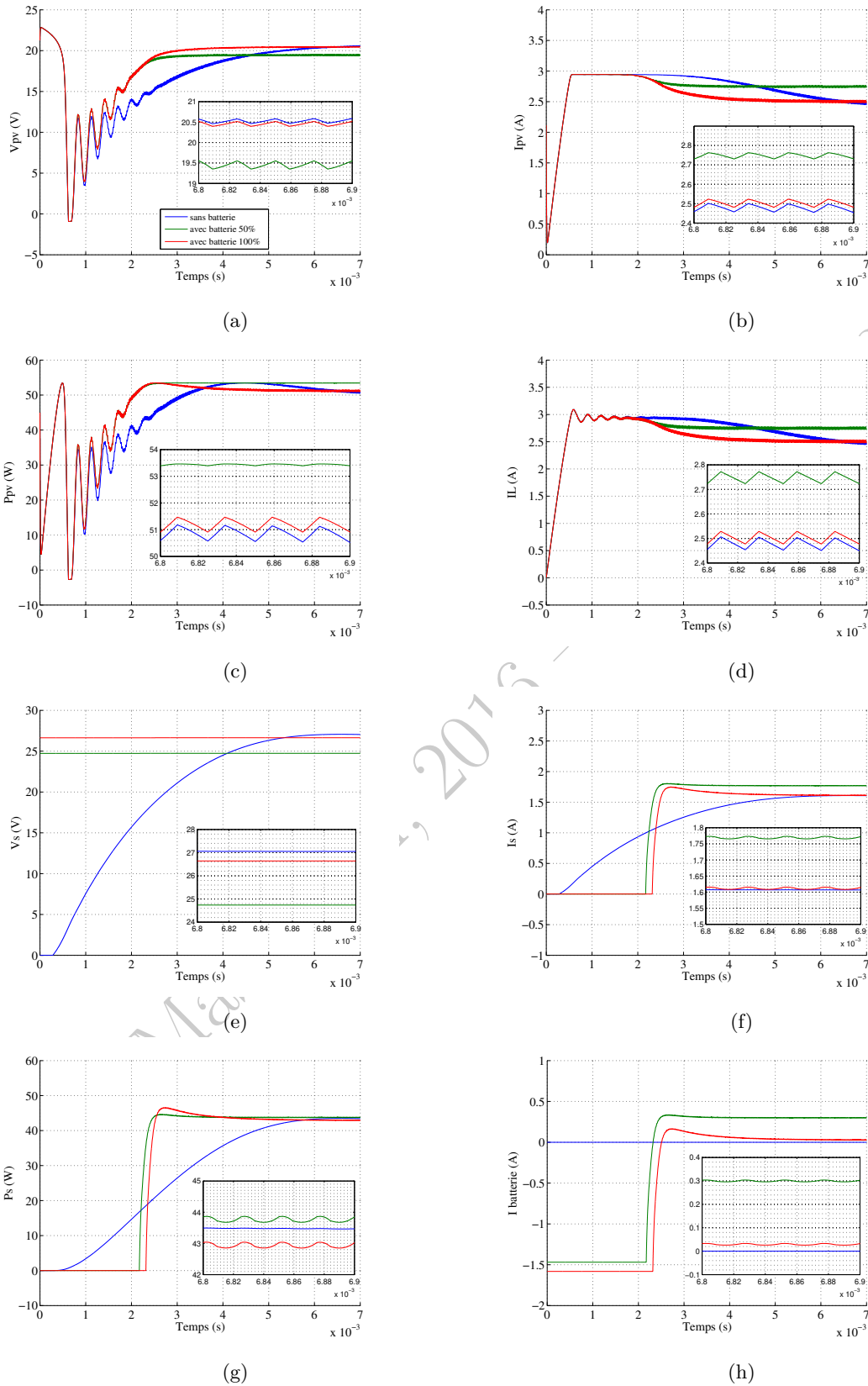


FIGURE IV.18 – Résultats de simulations du convertisseur boost en tenant compte des pertes de puissance. (a) Tension du module PV V_{pv} . (b) Courant du module PV I_{pv} . (c) Puissance du module PV P_{pv} . (d) Courant dans l'inductance I_L . (e) Tension de sortie V_S . (f) Courant de sortie I_S . (g) Puissance de sortie P_S . (h) Courant de la batterie I_{bat} .

- Le retard qui apparaît dans la courbe du courant de sortie est dû à la diode d'anti-retour. En effet, la diode d'anti-retour joue un rôle primordial pour empêcher le retour du courant provenant de la batterie sur le hacheur pendant le régime transitoire. Lorsque V_S devient supérieure à V_{bat} la batterie se transforme en une charge et absorbe le courant résiduel.
- On constate que le convertisseur modélisé en tenant compte des éléments parasites ne permet pas d'extraire de la puissance maximale P_m du modèle à cause du rapport cyclique fixé d_m qui n'est pas adaptée à la charge réelle du système. A ce niveau, on peut conclure que l'intégration d'une stratégie de commande MPPT est primordiale pour l'optimisation de la puissance générée du module solaire PV.

IV.6 Conception et modélisation de la commande MPPT

Ce paragraphe est consacré à l'analyse et la synthèse de la stratégie de commande MPPT intégrée dans la chaîne de conversion photovoltaïque présentée à la figure IV.2 et permettant de contrôler le rapport cyclique d du hacheur Boost [83].

IV.7 Principe de la stratégie de commande MPPT

Afin d'extraire le maximum de puissance du module PV, la commande du hacheur boost nécessite la variation du rapport cyclique d pour basculer le point de fonctionnement du système vers le point MPP. Une telle commande est basée sur la mesure des valeurs de la tension V_{pv} et du courant I_{pv} aux instants t et $t + \delta t$. Ainsi, la variation de la tension V_{pv} et de la puissance P_{pv} entre ces deux instants permet de décider le sens de variation de la tension V_{pv} à l'instant $t + \delta t$, à travers la diminution, le maintient ou l'augmentation du rapport cyclique d .

Ainsi, pour régler la tension d'entrée du hacheur on doit veiller à bien commander l'interrupteur de puissance (MOSFET), ceci pour assurer l'ajustement adéquat du rapport cyclique d du signal de commande du hacheur. L'idée consiste à comparer les valeurs de la tension et de la puissance générées par le module PV par celles mesurées au cycle précédent. Cette comparaison permet de prendre la décision d'amorçage ou de blocage de l'interrupteur de puissance M suivant les écarts ΔV et ΔP observés.

En se référant à la figure IV.19, on peut distinguer quatre situations critiques, à savoir :

- Situation (a) et (c) où $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$: afin d'atteindre le point de coordonnées (V_m, P_m) , on doit augmenter la tension V_{pv} aux bornes du module PV.
- Situation (b) et (d) où $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$: pour se basculer vers le point de coordonnées (V_m, P_m) , on doit diminuer la tension V_{pv} délivrée par le module PV.

La variation (par augmentation ou diminution) de la tension V_{pv} est basée sur la modification (par augmentation ou diminution) du rapport cyclique d .

Dans le but de réaliser la variation adéquate de la tension V_{pv} , il est nécessaire de déterminer la relation entre la variation du rapport cyclique d et celle de la tension V_{pv} . Pour cela, on néglige

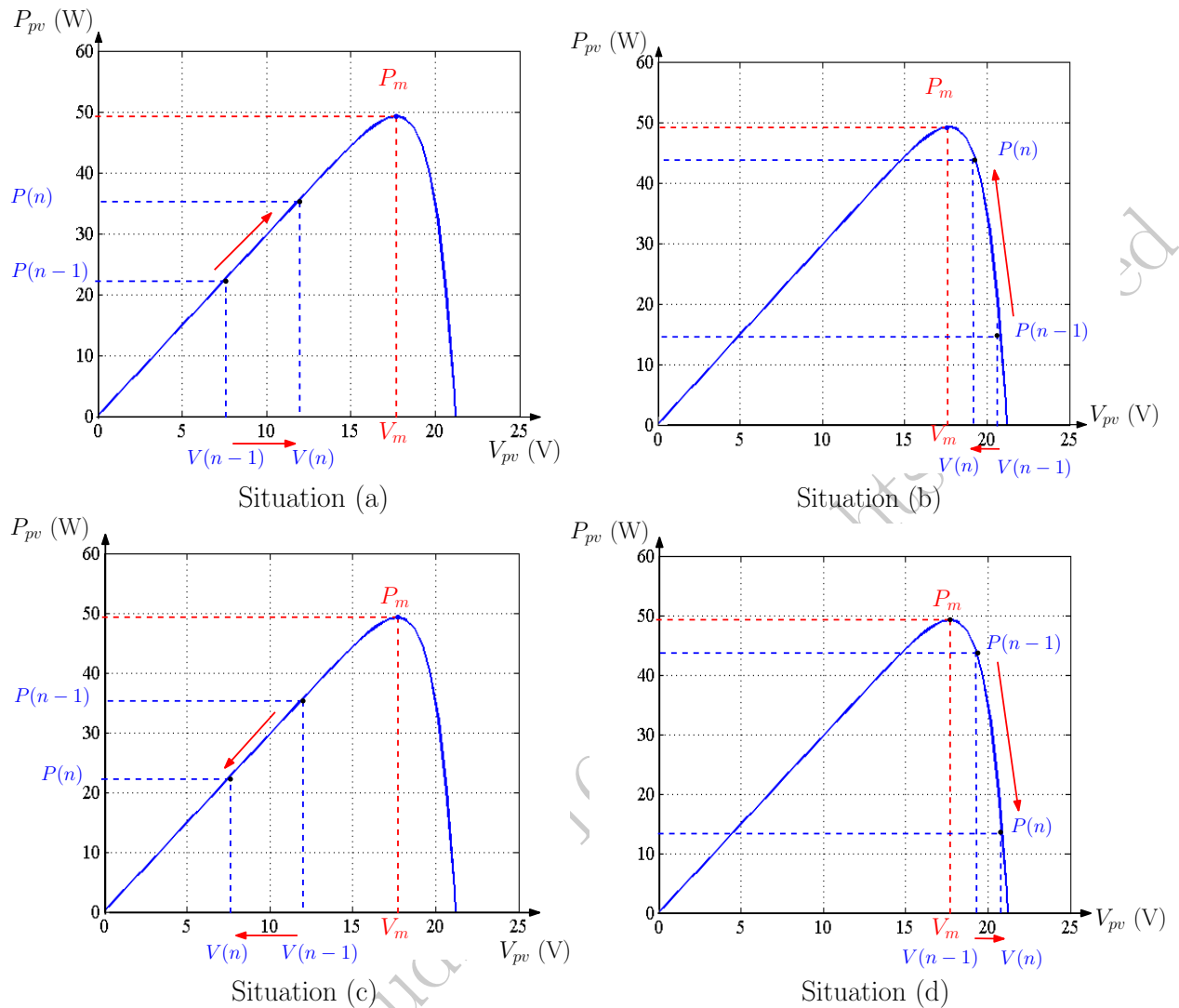


FIGURE IV.19 – Différentes situations considérées par la stratégie MPPT.

la variation de la tension V_S aux bornes de la batterie durant une période de modulation T .

$$V_{pv} = (1 - d) V_S \quad (\text{IV.36})$$

$$\frac{dV_{pv}}{dd} = -V_S \quad (\text{IV.37})$$

Pour tous les hacheurs, la variation de la tension V_{pv} en fonction du rapport cyclique d est une fonction décroissante. Ainsi, l'augmentation de la tension V_{pv} nécessite la diminution du rapport cyclique d , par contre la diminution de la tension V_{pv} est faite à travers l'augmentation du rapport cyclique d .

IV.7.1 La commande MPPT de type P&O

La stratégie de commande par perturbation et observation (P&O) [110, 111, 112, 113] est la stratégie la plus utilisée dans les applications de la conversion photovoltaïque à cause de sa simplicité dans l'implémentation pratique. Le principe de commande d'une telle stratégie est

basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution du rapport cyclique d , puis la génération d'un signal de commande à base de la modulation par Largeur d'Impulsion MLI pour piloter l'interrupteur de puissance M au sein du hacheur. La décision d'augmenter ou de diminuer le rapport cyclique d est basée sur les quatre situations (a), (b), (c) et (d) expliquées précédemment. Afin d'augmenter la tension V_{pv} , on doit diminuer le rapport cyclique d d'une valeur δd , et pour diminuer la tension V_{pv} , il suffit d'augmenter le rapport cyclique d par la même valeur δd . Soit $d(t)$ et $d(t-1)$ les valeurs du rapport cyclique d aux instants t et $t\delta t$, respectivement, avec δt est la période de mesure de la tension V_{pv} et du courant I_{pv} à la sortie du module PV. Le signal du rapport cyclique d est donné par la relation suivante :

$$d(t) = d(t-1) + q \delta d \quad (\text{IV.38})$$

où q est défini par :

- $q = -1$ dans le cas des situations (a) et (c) relatives à l'augmentation de la tension V_{pv} ,
- $q = +1$ dans le cas des situations (b) et (d) relatives à la diminution de la tension V_{pv} .

La comparaison du signal du rapport cyclique d avec un signal en dents de scie de fréquence f , permet de générer le signal de commande MLI qui est capable de régler la tension V_{pv} .

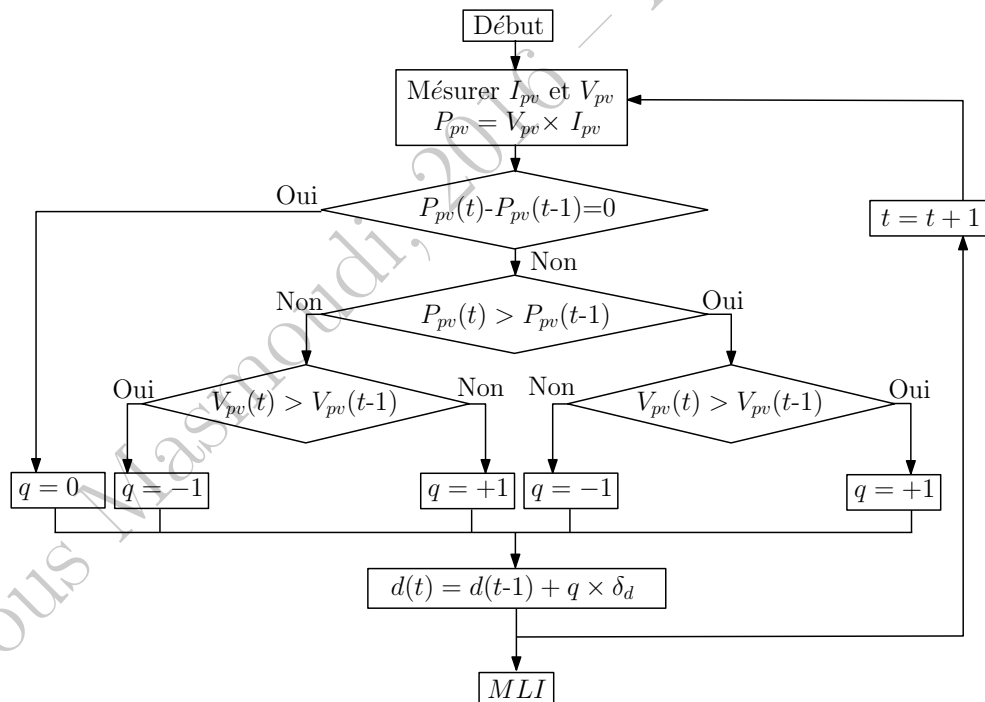


FIGURE IV.20 – Algorithme de la stratégie de commande MPPT de type P&O

La figure IV.20 illustre l'algorithme de la stratégie de commande P&O du système photovoltaïque. Dès que le point qui correspond à la puissance maximale est atteint, la tension V_{pv} oscillera autour de ce point par action sur le rapport cyclique d . Si la valeur de la perturbation δd est grande, l'algorithme répondra rapidement au changement brusque des conditions de fonctionnement. Toutefois, les pertes de puissance ainsi que les oscillations autour du point correspondant à la puissance maximale deviennent importantes. Par contre, si δd est petite,

les pertes seront réduites en régime permanent, mais la caractéristique dynamique du système devient très lente.

Le modèle de simulation de la stratégie de commande MPPT mis en œuvre dans l'environnement MATLAB-Simulink est présenté par la figure IV.21

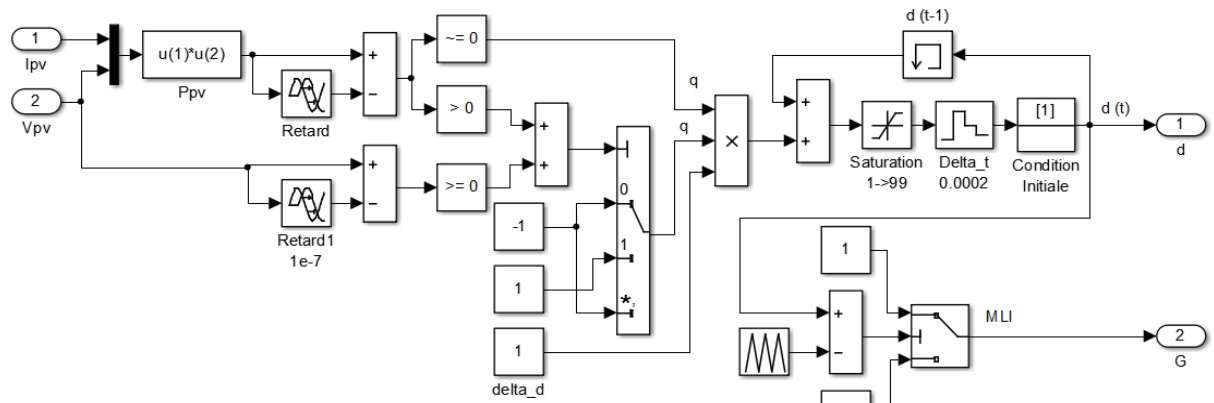


FIGURE IV.21 – Implémentation du modèle de l'MPPT dans l'environnement MATLAB-Simulink

IV.7.2 Simulation de la chaîne de conversion PV commandée par la stratégie MPPT de type P&O

La chaîne PV qui fait l'objet des travaux de simulation est la même que celle considérée dans le paragraphe précédent (figure IV.17) en intégrant la stratégie MPPT conçue préalablement. L'analyse des résultats des simulations sont organisées en trois parties.

IV.7.2.1 Effet de la variation de charge

L'objectif de cette partie est de discuter l'effet de la charge de sortie sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV.

L'étude consiste à augmenter la charge de sortie à l'instant $t=0.025$ s et d'observer le comportement du système via ce changement. On maintient des conditions climatiques stables $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T_a = 25^\circ\text{C}$.

Les résultats de simulations sont présentés par la figure IV.22 et l'analyse des différentes grandeurs permet de dégager les interprétations suivantes :

- Les grandeurs électriques de la chaîne PV présentent un régime transitoire relativement lent à cause des filtres considérés dans le montage. Néanmoins, le retard observé surtout au niveau des courbes de tension et de puissance d'entrées V_{pv} et P_{pv} qui s'éteint de 0.001 s jusqu'à 0.01 s est causé par la dynamique lente de l'algorithme MPPT. En effet, la figure IV.22.a montre la variation du rapport cyclique d qui augmente progressivement avec faible variation δd . L'algorithme MPPT agit soigneusement sur d en cherchant la valeur adéquate pour la poursuite du point MPP. A l'instant 0.01 s l'algorithme MPPT converge vers une valeur du rapport cyclique d oscillatoire autour de 49 %.

- Par effet de la diode anti-retour, les grandeurs de sorties I_S et P_S n'apparaissent qu'à partir de l'instant 0.007 s. C'est à ce moment que le convertisseur commence à alimenter la charge de sortie R_S .
- Entre les instants 0.01 s et 0.025 s, la charge R_S est maintenue fixe. On constate que le rapport cyclique imposé par l'algorithme MPP oscille régulièrement autour d'une valeur bien déterminée. A l'instant 0.025 s, on impose une charge auxiliaire au circuit, on remarque tout d'abord les perturbations appliquées sur les grandeurs électriques d'entrées et de sortie, surtout le pic de courant et de puissance (I_S et P_S). Après un temps transitoire considérable (0.003 s), l'algorithme MPPT réussit à retrouver la nouvelle valeur du rapport cyclique d relative au point MPP. Le rapport cyclique s'installe autour de la valeur 32 % et la puissance générée du module PV, qui est optimale et égale à P_m .

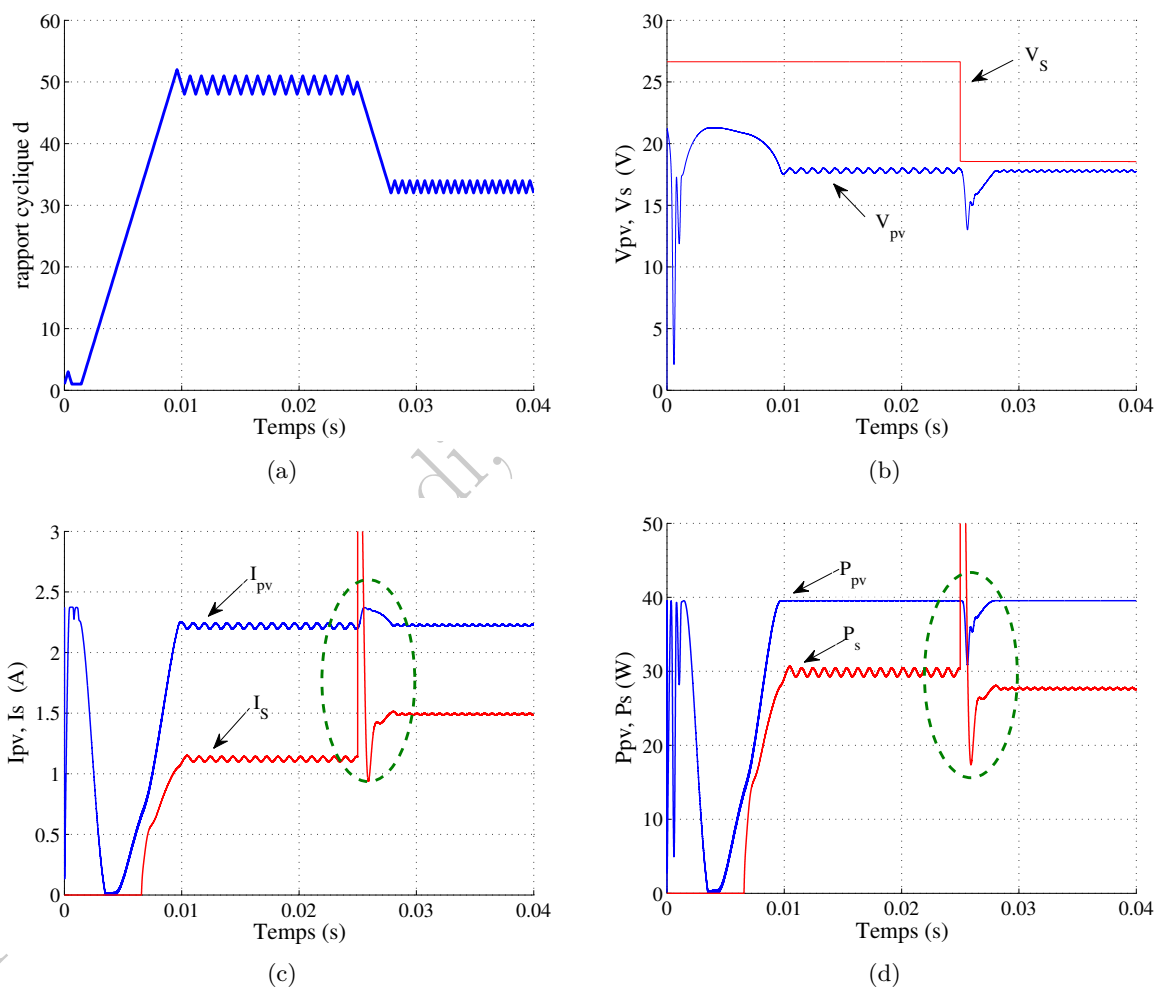


FIGURE IV.22 – Effet de la variation de la charge sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Rapport cyclique. (b) Tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_S . (c) Courants d'entrée I_{pv} et de sortie I_S . (d) Puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_S .

IV.7.2.2 Effet de la variation de l'éclairement

Dans cette partie, on propose d'analyser l'effet de la variation du profil de l'éclairement G sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV.

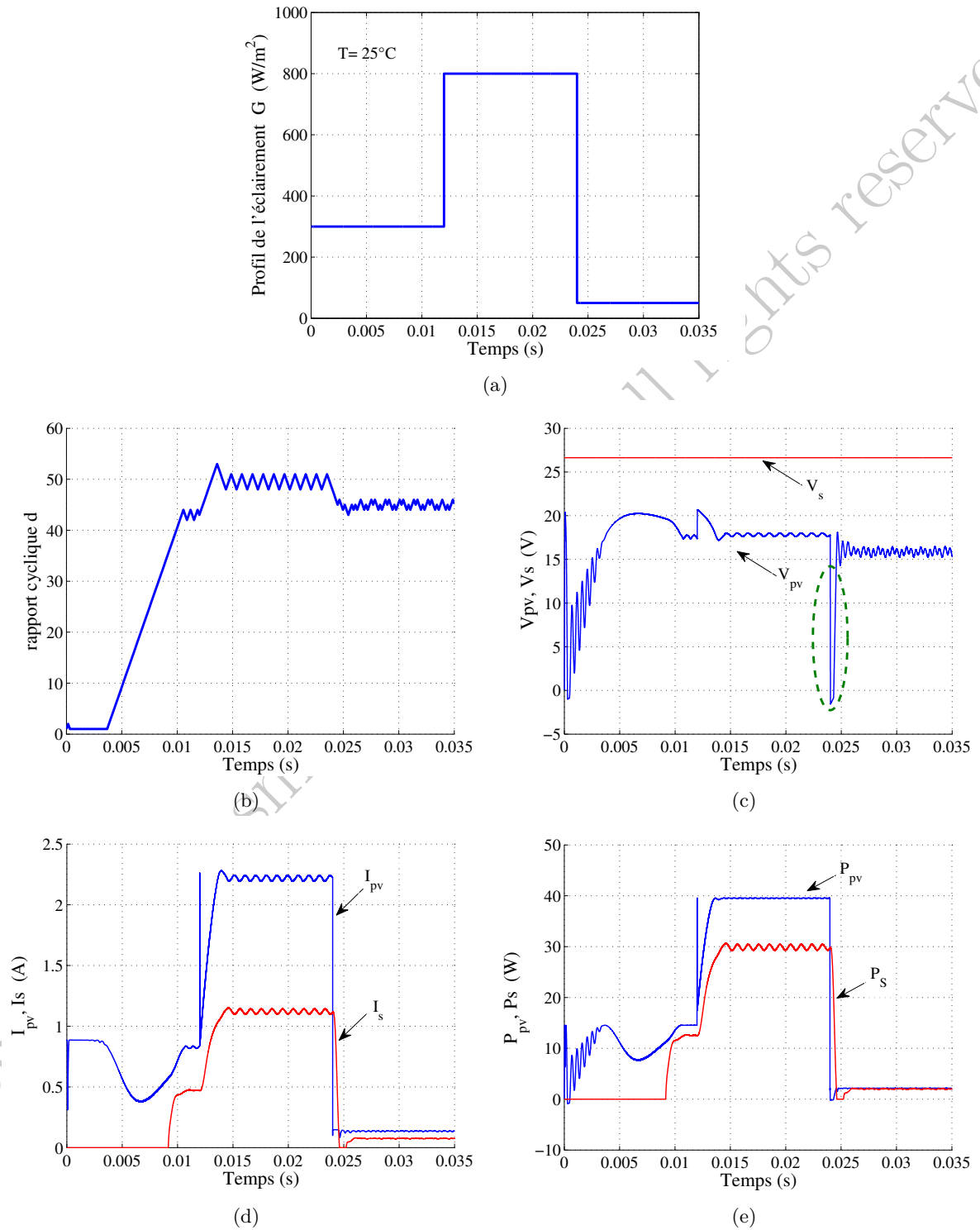


FIGURE IV.23 – Effet de la variation de l'éclairement sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Profil de l'éclairement. (b) Rapport cyclique. (c) Tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_s . (d) Courants d'entrée I_{pv} et de sortie I_s . (e) Puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_s .

L'étude consiste à varier la valeur de l'éclairement aux instants $t=0.012$ s et $t=0.024$ s et à observer le comportement du système via ce changement. On maintient une charge constante ainsi que la température ambiante $T_a = 25^\circ C$.

Les résultats de simulation sont présentés à la figure IV.23 et l'analyse des différentes grandeurs permettent de dégager les interprétations suivantes :

- La mise en marche initiale du système passe par un régime transitoire relativement lent. En revanche, dans le régime permanent le système acquiert une dynamique plus rapide et commence à suivre les variations impliquées d'une manière plus souple.
- L'augmentation brusque de l'éclairement à l'instant 0.012 s qui passe de $300W/m^2$ à $800W/m^2$ cause un dépassement important visible sur la courbe du courant d'entrée I_{pv} , et moins intense sur la courbe de tension V_{pv} , ce qui peut être un élément perturbateur sur le fonctionnement du module PV. Néanmoins, ce changement n'influence pas sur les grandeurs de sorties.
- La diminution brusque de l'éclairement à l'instant 0.025 s qui passe de $800W/m^2$ à $50W/m^2$ engendre un dépassement violent de la tension d'entrée V_{pv} , moins intense sur le courant I_{pv} . En conséquence la puissance d'entrée P_{pv} et de sortie P_S s'annulent pendant quelques seconde. Le régime permanent s'établit après quelques instants et l'MPPT réussit à attraper le point de puissance maximale MPP par la recherche du rapport cyclique adéquat.

IV.7.2.3 Effet de la variation de la température

Pour cette partie, on considère une variation du profil de la température T_a et on propose de discuter l'effet de cette variation sur les grandeurs électrique de la chaîne de conversion PV.

L'étude consiste à varier le profil de température aux instants aux instants $t=0.012$ s et $t=0.024$ s et d'observer le comportement du système via ce changement. On maintient une charge constante ainsi que l'éclairement $G = 800W/m^2$.

Les résultats de simulations sont présentés par la figure IV.24 et l'analyse des différentes grandeurs permettent de tirer les remarques suivantes :

- En générale, l'influence de la variation de la température est toujours moins lourd sur les grandeurs électriques comparées aux effets de la variation de l'éclairement et de la charge.
- L'effet de la variation de la température est opposé à l'effet de la variation de l'éclairement. En effet, l'augmentation de la température cause la dégradation de la puissance et la diminution de la température engendre l'augmentation de la puissance.
- Les variations brusques des valeurs de température, par augmentation à l'instant 0.012 s et par diminution à l'instant 0.024 s provoque la perturbation des grandeurs électriques du système. Cependant cette perturbation n'est pas violente comparée par celles casées par la variation de l'éclairement ou de la charge.
- L'algorithme MPPT réussit pour ce type de variations ; aussi bien pour les autres types à s'adapter aux divers variations et à retrouver le rapport cyclique adéquat d pour forcer

le module PV à gérer de la puissance maximale disponible.

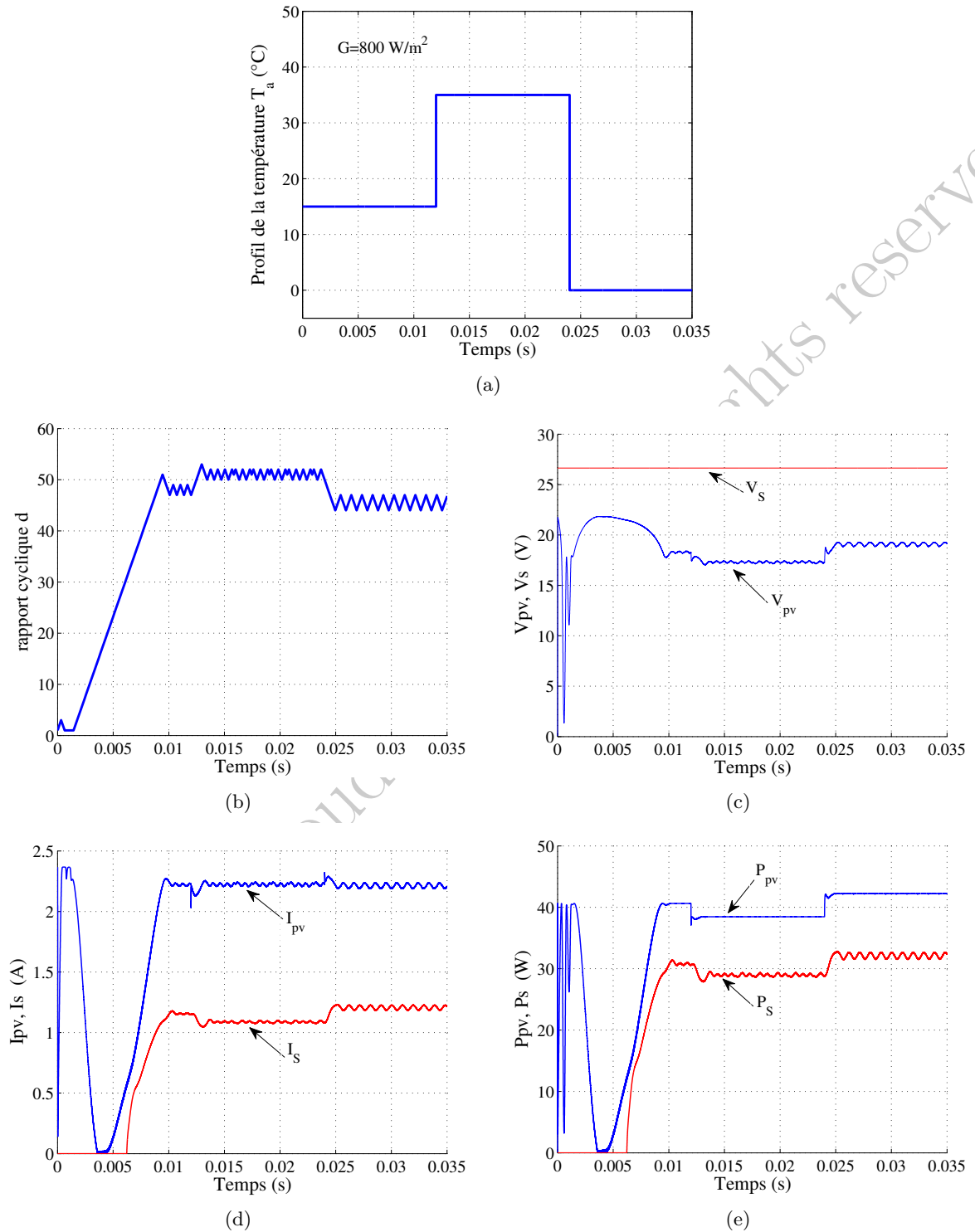


FIGURE IV.24 – Effet de la variation de la température sur les grandeurs électriques de la chaîne de conversion PV. (a) Profil de température. (b) Rapport cyclique. (c) Tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_s . (d) Courants d'entrée I_{pv} et de sortie I_s . (e) Puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_s

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception optimale d'une chaîne de conversion PV constituée par l'association d'un module solaire PV, d'un étage de conversion de type hacheur, d'une charge de sortie et d'une batterie de stockage avec l'intégration d'une stratégie de commande MPPT. Nous avons mis l'accent sur la linéarisation autour du point de puissance maximale (MPP) permettant de dimensionner de manière optimale les divers composants du circuit électrique de puissance. Nous avons présenté ainsi une méthode d'identification des paramètres du modèle de la batterie plomb-acide établie à partir des mesures expérimentales. La modélisation de l'étage de conversion continu-continu a permis la comparaison des différentes topologies fondamentales du point de vue rendement et a permis de proposer l'architecture boost comme un choix optimal pour maximiser le rendement du système. Dans ce travail, on a discuté des diverses pertes de puissance qui existent réellement dans les circuits de conversion et de leurs effets sur la dégradation du rendement global de la chaîne PV. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons mis en considération l'intégration de la stratégie de commande MPPT de type P&O afin d'améliorer le rendement du module PV et du système de conversion en général. Ces travaux de conception, de dimensionnement et de simulation ont permis d'optimiser les choix des composants électroniques lors de la réalisation expérimentale de la carte de puissance et ont conduit à une meilleure compréhension du comportement électrique résultant de l'association des divers équipements électriques de caractéristiques non-linéaires (module PV – convertisseur boost – batteries).

Chapitre V

Travaux et Résultats Expérimentaux

Résumé : *Ce cinquième et dernier chapitre des travaux de thèse s'articule autour de la réalisation pratique et de la concrétisation expérimentale des études théoriques faites dans les chapitres précédents et expose la première version du prototype du système d'alimentation PV fabriqué pour les applications embarquées tout en présentant quelques résultats de mesures expérimentales récupérées à travers les essais réels accomplis jusqu'à l'instant.*

Mots-clés : Prototype du système d'alimentation PV,
Prototype Suiveur solaire à deux axes,
Prototype Régulateur de charge,

V.1 Introduction

Les chapitres précédents de cette thèse ont discuté à travers des études théoriques et des travaux de simulation les méthodes d'optimisation de la puissance générée par le module solaire photovoltaïque. On a présenté la conception d'un système suiveur solaire à deux axes ainsi qu'on a élaboré le dimensionnement et la conception d'un régulateur de charge avec la stratégie MPPT adéquate pour la commande du convertisseur Boost.

Les connaissances acquises à travers ces études sont primordiales pour la maîtrise du sujet d'une part, et d'autre part, elles fournissent le savoir nécessaire pour la conception initiale du système désiré. Cependant les travaux de simulations dépourvus de validation expérimentale présentent peu d'importance et moins de valeurs scientifiques.

À ce fait, la contribution à la construction du système mécanique et physique réel consolide non seulement le processus d'apprentissage, mais elle souligne également les atouts du processus d'ingénierie dans la transformation de l'idée en un produit tangible.

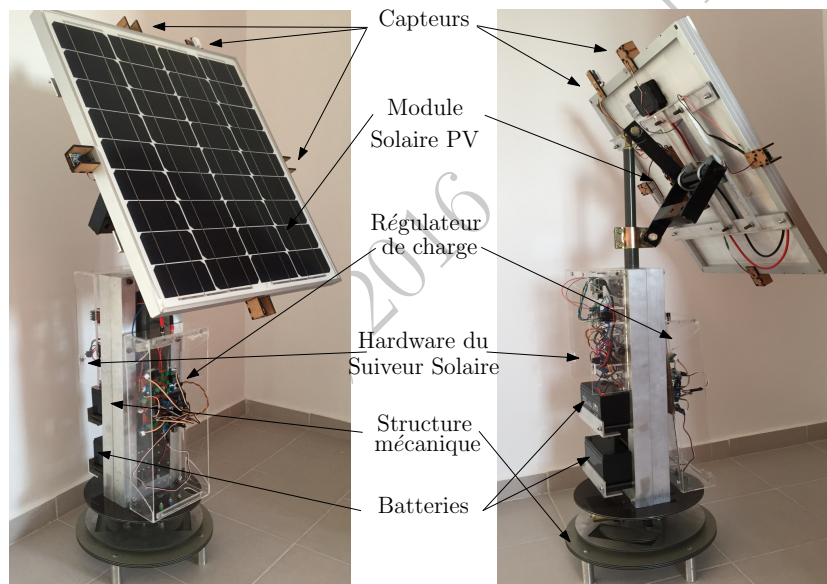


FIGURE V.1 – Prototype du système d'alimentation en énergie solaire PV dédié aux applications embarquées.

Dans ce chapitre, on présente l'aboutissement des travaux de thèse. On traite alors la mise en œuvre matérielle de l'ensemble du système d'alimentation en énergie solaire photovoltaïque dédié aux applications embarquées. La figure V.1 montre la première version du système fabriqué. On distingue la structure mécanique du suiveur solaire muni de son système de contrôle et de commande. Le module solaire PV est connecté électriquement au régulateur de charge. Le système entier est connecté aux éléments de stockage formés par deux batteries plomb-acide 12V.

Ce chapitre se compose de deux parties distinctes : la première partie présente le prototype du suiveur solaire, suivie par la méthode d'acquisition et de conditionnement des données. On présente ainsi un extrait des premières mesures expérimentales du système de suivi de la trajec-

toire solaire programmée en boucle ouverte. La deuxième partie traite de la conception et de la réalisation du régulateur de charge, sous entendu la carte de puissance contenant le convertisseur Boost.

V.2 Système suiveur solaire à deux axes

On présente dans cette partie le prototype du suiveur solaire réalisé. La figure hardware system montre le module solaire PV installé sur le châssis du système mécanique et équipé par les capteurs nécessaires. Concernant la partie hardware du système, on distingue la couche électronique d'acquisition et de transfert des données qui utilise principalement la carte Arduino Nano. Cette carte permet de lire périodiquement l'état des capteurs connectés aux ports analogiques et numériques. Le processeur Atmega 328 permet de convertir les signaux analogiques et numériques reçus auprès des capteurs en valeurs compréhensibles humainement. Cette couche électronique permet également de transmettre les valeurs acquises à la couche de contrôle et de commande établie sur la carte SoC Raspberry Pi à travers le protocole I2C. Le système sur puce Raspberry-Pi est une interface entre la partie matérielle et la partie logicielle. Cette carte embarque le processeur ARM11 qui présente les caractéristiques d'un micro-ordinateur équipé d'interface réseau tel que le Wifi et les ports GPIO pour la communication avec la couche électronique.

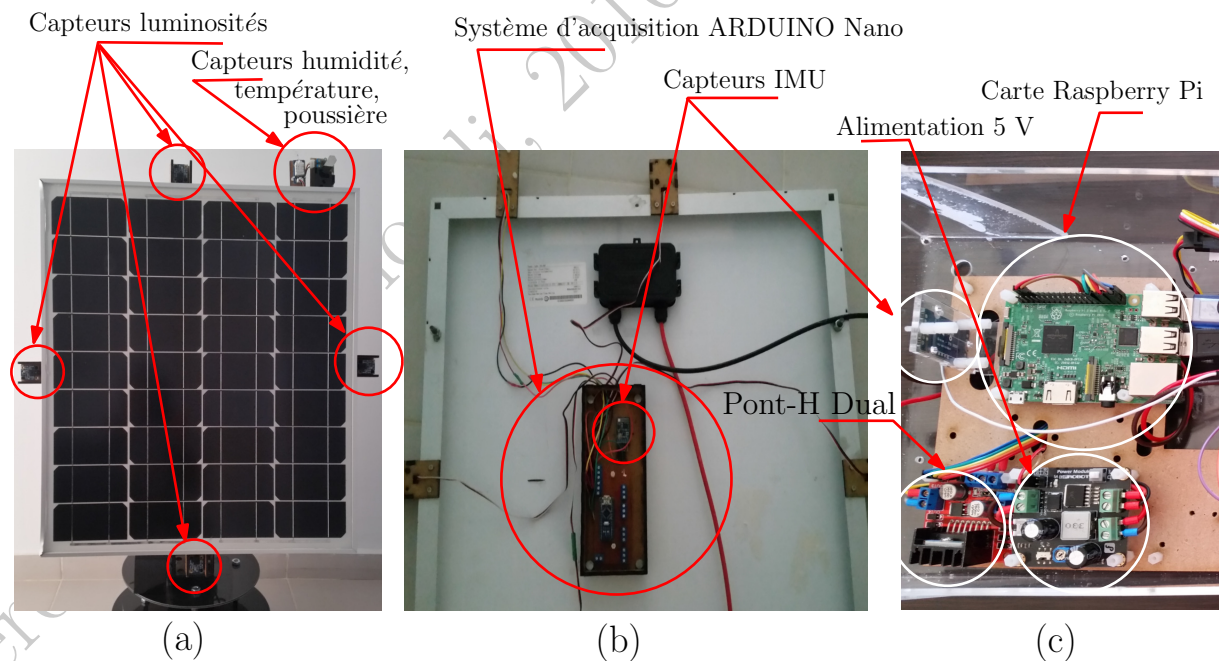


FIGURE V.2 – Partie hardware du suiveur solaire.

V.2.1 Acquisition et conditionnement des données en temps réel

Afin d'automatiser le conditionnement et le transfert des données, le système exploite l'interface Wifi pour la remontée des données acquises via un Webservice. Ce dernier est traité par

un serveur Web distant permettant l'enregistrement et l'affichage des données. À ce niveau, les données sont hébergées dans le cloud pour un post-traitement. Ce service web¹ permet également de contrôler à distance l'état du système. Le processus d'acquisition et de traitement des

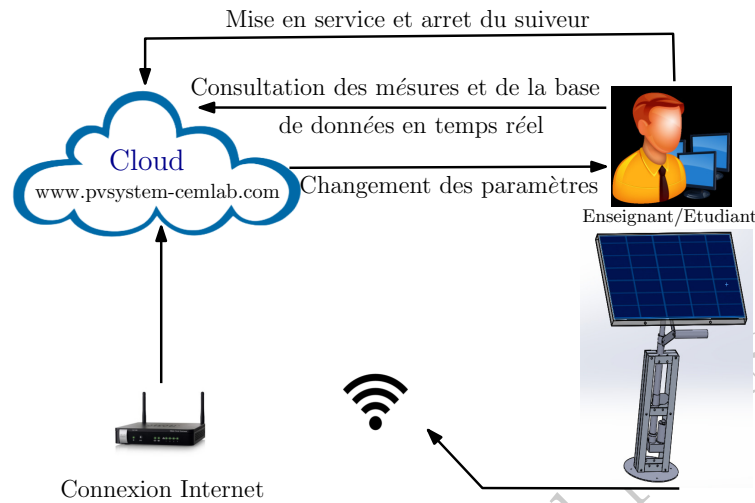


FIGURE V.3 – Processus d'acquisition des données.

données est décrit par la figure V.3. La figure V.4 illustre l'interface graphique du serveur web distant. Elle permet d'afficher les données en temps réel pour le contrôle et l'exportation des données brutes pour un post-traitement ultérieur. Cette technique de l'informatique en nuage (en termes anglo-saxonnes "*Cloud Computing*") est extensible à des plates-formes de "Smart-phones" garantissant un niveau plus élevé de proximité des données et de contrôle du système conçu.

V.2.2 Installation du système et résultats expérimentaux

Le système décrit précédemment a été installé à l'extérieur du bâtiment de CEM Lab pendant une semaine. Les résultats récoltés sont exportés du serveur distant décrit et tracés graphiquement, comme le montrent les courbes de la figure V.5. L'analyse de ces résultats mène à confirmer les résultats obtenus par simulation et documentés dans le chapitre III.4

V.3 Système de régulation de charge

Le prototype du régulateur de charge présenté dans cette partie permet le transfert de l'énergie produite par le module PV vers les batteries de stockage. Le système se compose de deux parties. Le circuit de puissance qui contient principalement le convertisseur Boost dimensionné et conçu dans le chapitre IV. Le circuit de commande est assuré par une carte ARDUINO Mega 2560 permettant l'acquisition des données depuis les capteurs de courants et de tension puis l'exécution du programme de la machine à état du système de régulation de charge schématisée par l'organigramme de la figure V.6.

1. Nom du domaine : "www.pvsystem-cemlab.com". Nom d'utilisateur : "ferdaous". Mot de passe : "ferdaous2016".

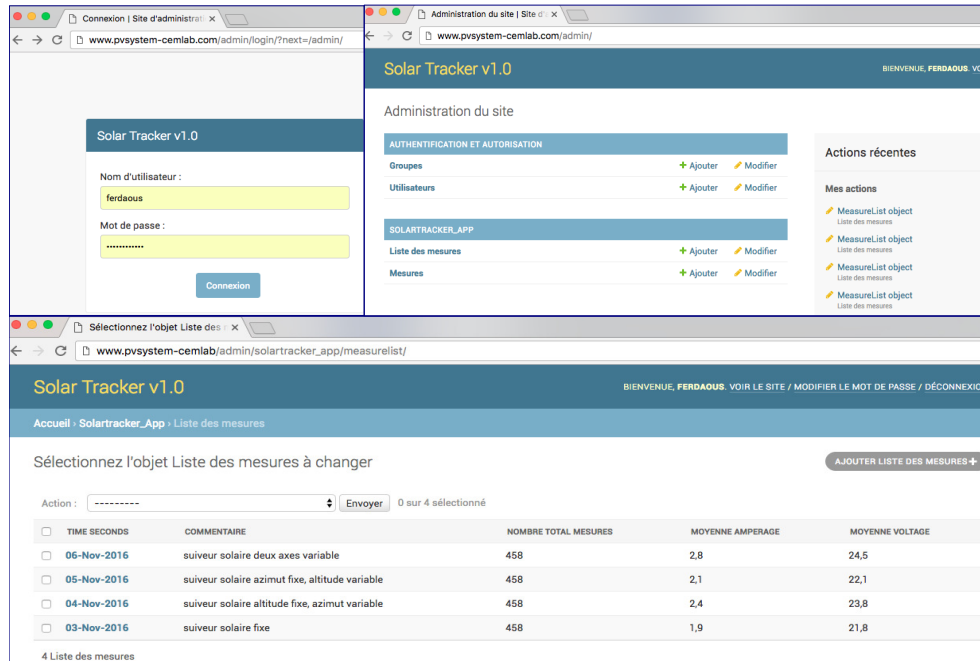


FIGURE V.4 – Interface graphique du Web-Service.

V.3.1 Conception et réalisation du circuit imprimé

Le développement de la carte électronique du convertisseur de puissance “Boost” est élaboré tout d’abord par l’implémentation du système sur le simulateur schématique du logiciel “Proteus ISIS” comme le montre la figure V.7.a. Ensuite, la figure V.7.b montre la configuration en 3 dimensions élaborée pour la visualisation virtuelle de la conception de la carte. Le routage des pistes du circuit imprimé est réalisé par la plate-forme du logiciel “Proteus ARES”; qui aide à minimiser la taille du montage et optimiser les longueurs des conducteurs entre les composants, comme le montre la figure V.7.c. Le typon de préparation du circuit imprimé final en double face est montré par la figure V.7.d, et la réalisation pratique du circuit est montrée par la figure V.7.e.

Les capteurs de tension et de courant ainsi que les relais télécommandés utilisés dans ce travail sont de type “montés en surface”; Cette technologie évoluée des composants électroniques nécessite des équipements rigoureux pour la fabrication des circuits imprimés. À ce fait, on a adopté la solution des modules tout prêts de la marque “Seedstudio”. Les modules sont intégrés dans le circuit comme le montre la figure V.7.f.

Le circuit imprimé complet contient les composants suivants.

- Capteurs courant à effet Hall de référence “ACS714”
- Capteurs de tension à effet Hall “ACS712”.
- Modules relais télécommandés.
- inductance radiale à noyau de ferrite.
- capacités en aluminium électrolytique.
- Diodes Schottky de référence “MBRF10H100”.

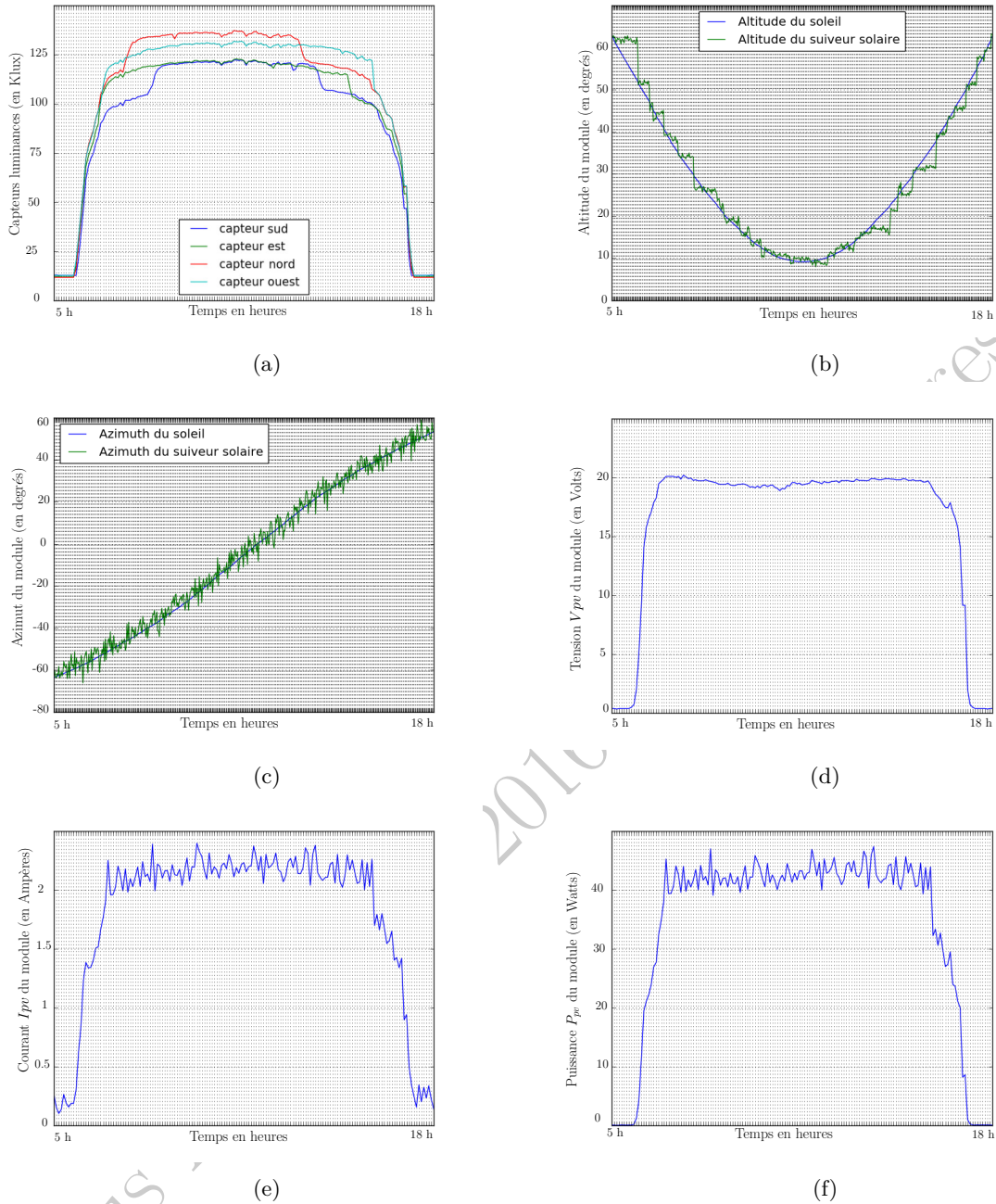


FIGURE V.5 – Résultats expérimentaux du suiveur solaire du 6 novembre 2016.

— Mosfet niveau logique de référence “CSD18532KCS”.

Afin de minimiser les pertes de puissance dans les inductances et les éléments de puissance, on a adopté les réglages suivants :

- Utilisation des conducteurs courts surtout entre le contrôleur et la grille des interrupteurs de puissance Mosfet.
- Utilisation de conducteurs blindés ou torsadés pour les circuits de commande et utilisation minimale de fils non blindés.
- Minimisation des conducteurs entre les composants de puissance et les capacités d’entrée

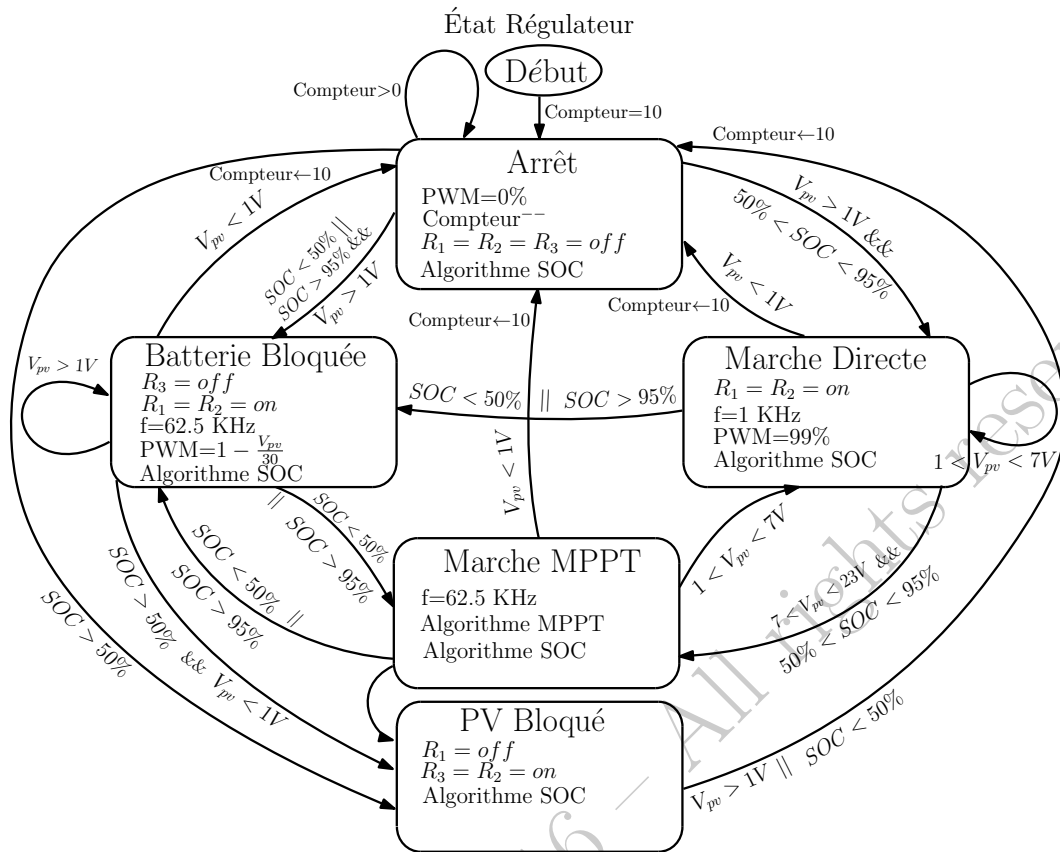


FIGURE V.6 – Organigramme de la machine d'états et des transitions du programme du régulateur de charge.

et de sortie (minimisation de l'air de la cellule de commutation).

- Utilisation des dissipateurs lors du montage des interrupteurs de puissance pour une dissipation efficace de chaleur.

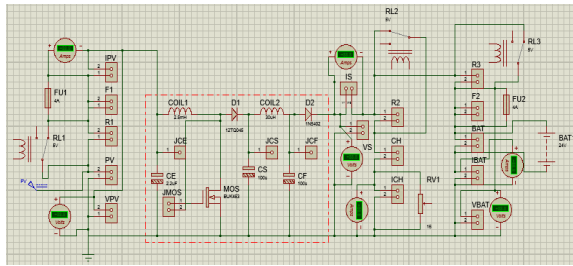
V.3.2 Tests expérimentaux

Le prototype du régulateur de charge réalisé est testé dans le laboratoire, comme le montre la figure V.8. On utilise les instruments suivant :

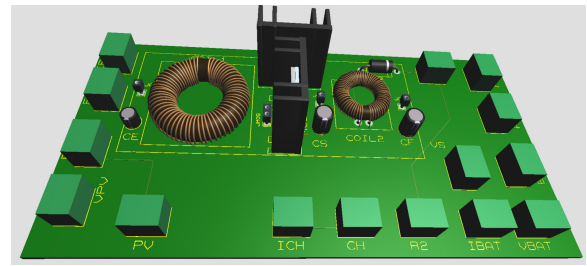
- Oscilloscope numérique HMO1022.
- Alimentation stabilisée 60V 3A.
- Rheostat de résistance variable 100 ohm, 5A.
- Ordinateur pour programmer la carte de commande ARDUINO via un SDK dédié, puis l'acquisition des traces de l'algorithme MPPT implémenté.

On génère les signaux MLI pour la commande de la grille du Mosfet grâce aux ports de sorties analogiques PWM de la carte ARDUINO en utilisant la fonction "analogWrite(port,d)". La figure V.9 montre la visualisation par oscilloscope des signaux V_{gs} de commandes MLI de la grille et la fréquence de commutation du Mosfet.

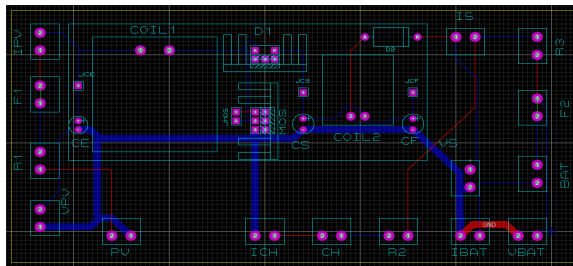
La première mise en marche du système, à l'aide d'une source de tension continue générée par une alimentation stabilisée, a permis de voir la commutation de la tension V_{ds} aux bornes du



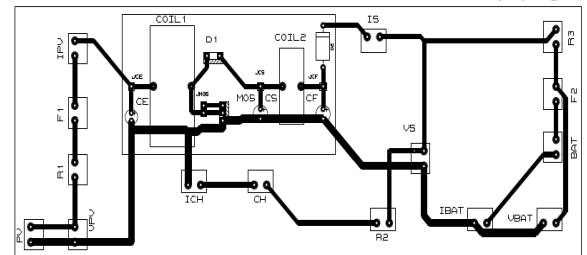
(a) Circuit schématique de la carte de puissance contenant le convertisseur Boost grâce à Proteus ISIS .



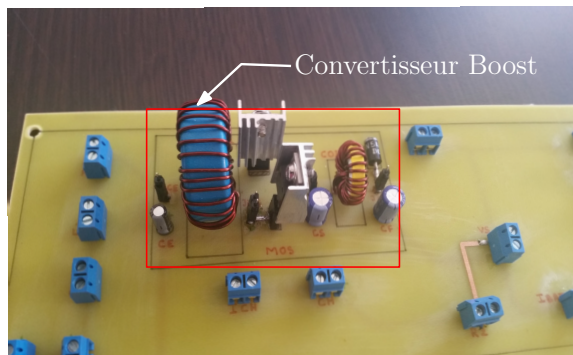
(b) Conception en 3D de la carte électronique du convertisseur Boost.



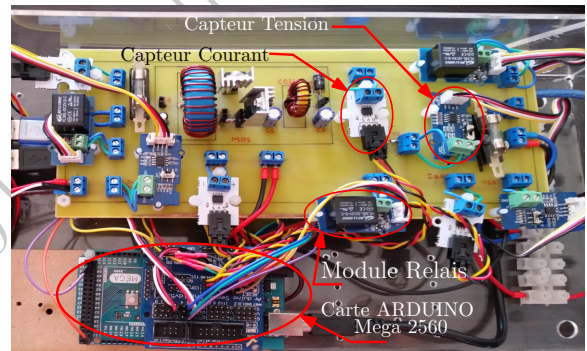
(c) Routage des pistes du circuit imprimé grâce à Proteus ARES.



(d) Typon du circuit imprimé du régulateur de charge.



(e) Réalisation pratique du circuit imprimé.



(f) Montage du système complet du régulateur de charge.

FIGURE V.7 – Étapes de conception et de fabrication du système du régulateur de charge.

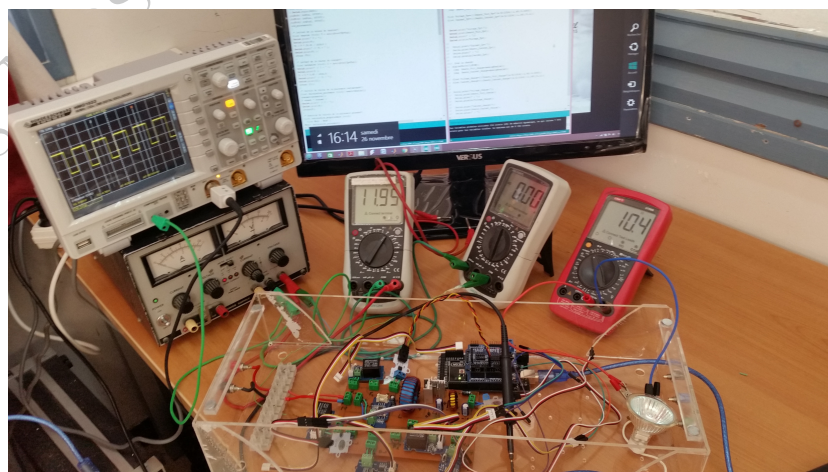


FIGURE V.8 – Test du système de régulation de charge.

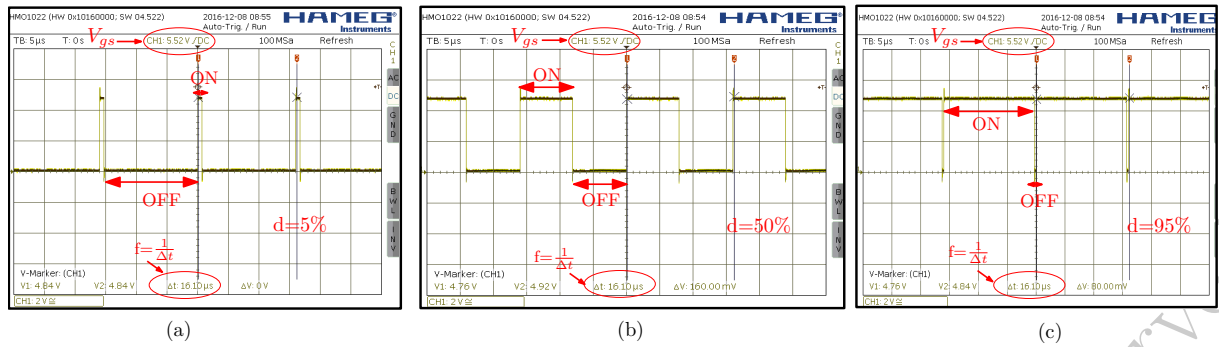
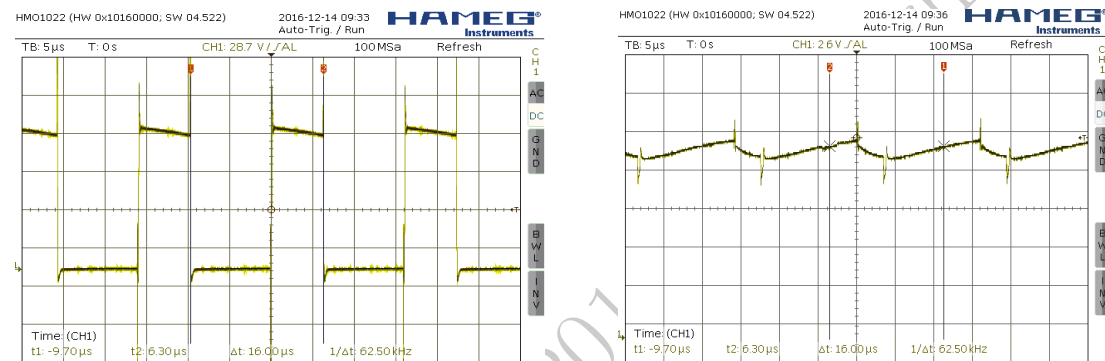


FIGURE V.9 – Fréquence et rapport cyclique de la commande MLI du Mosfet.

Mosfet, comme le montre la figure V.10.a. La tension de sortie V_s est élevée grâce au convertisseur Boost de 15 V à 26 V pour un rapport cyclique de 60% comme le montre la figure V.10.b.



(a) Tension entre le Drain et la Source du Mosfet V_{ds} . (b) Tension de sortie aux bornes de la charge V_s .

FIGURE V.10 – Visualisation par oscilloscope du test expérimental du convertisseur boost avec une source de tension 15 V

Le démarrage du système, à l'aide du générateur photovoltaïque 50 W, a permis de voir les allures des signaux électriques V_{gs} , V_{pv} , V_{ds} et V_s présentées dans la figure V.11 grâce à une charge résistive de 16 Ω .

Les allures des tensions observées montrent la grande similitude avec les résultats de simulation. Cette similitude se manifeste surtout pour la nature ondulatoire de la tension du module V_{pv} et la commutation du Mosfet V_{ds} . Le rapport cyclique est de l'ordre de 63%. Les valeurs de tension sont inférieures aux tensions simulées. Cette différence s'explique par l'existence de pertes plus importantes en pratique qu'en simulation.

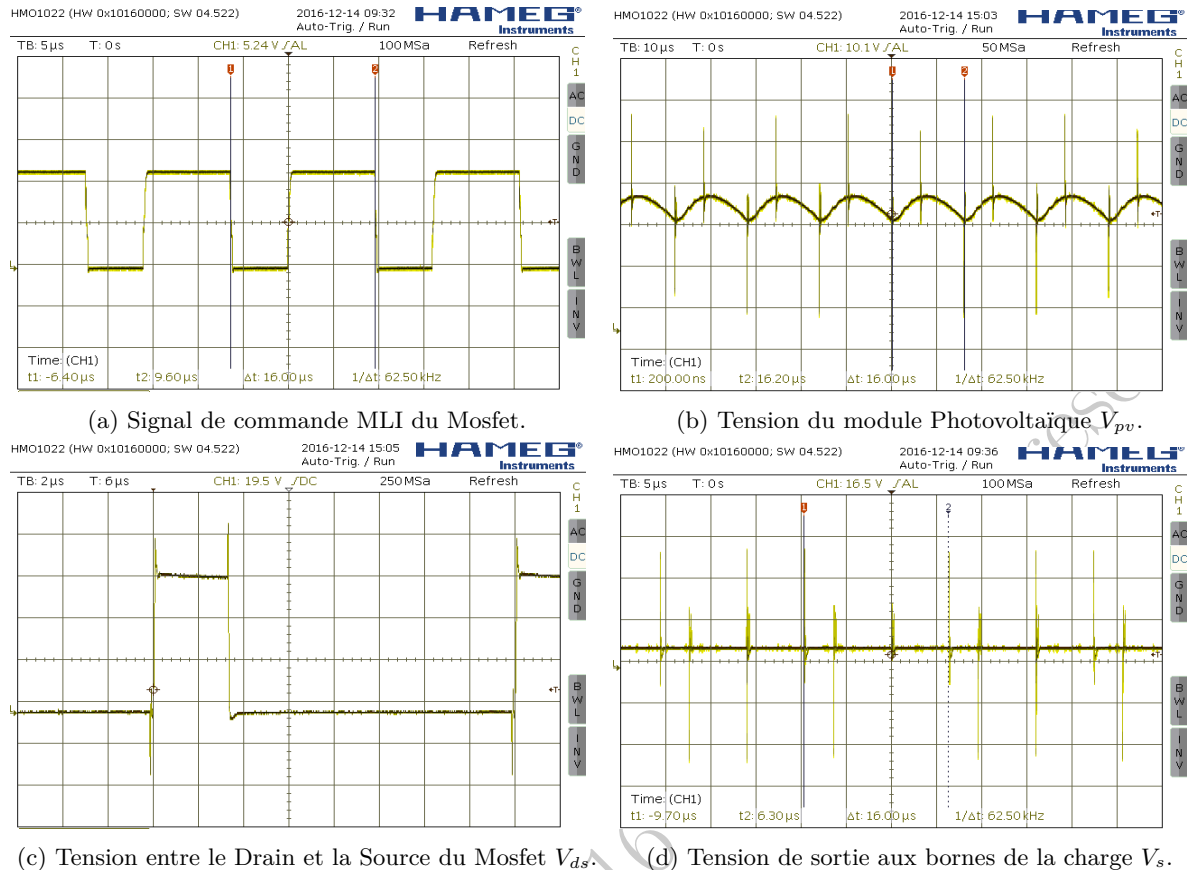


FIGURE V.11 – Visualisation par oscilloscope du test expérimental du convertisseur boost avec le module PV.

V.4 Conclusion

Les travaux élaborés dans ce chapitre ont présenté la réalisation expérimentale et l'implémentation matérielle du système photovoltaïque optimisé.

Les résultats obtenus à travers ces travaux sont très encourageants. En effet, le système conçu est testé pendant une semaine et il a montré sa robustesse, son efficacité et son autonomie, surtout au niveau de l'envoi et de la réception des données à distance. Néanmoins, le système nécessite plus de temps de tests afin de garantir la qualité souhaitée et de surmonter les contraintes extérieures (vents, poussière, pluies).

Le prototype réalisé a permis de récolter une base de données de mesures expérimentales. Les résultats obtenus confirment une partie des résultats de simulations attendus. Ainsi, on a pu valider les études théoriques par des résultats pratiques. La concrétisation réelle du système a permis de mettre l'accent sur de nouveaux problèmes techniques qui touchent à l'endurance et la fiabilité du système, notamment le problème des calibrages de capteurs.

Conclusion Générale

Cette conclusion vise à résumer les travaux réalisés tout au long de cette thèse, en mettant l'accent sur les résultats principaux tirés lors de la synthèse et l'optimisation de la chaîne de conversion photovoltaïque. On clôture par l'exposition de quelques perspectives éventuelles pour l'approfondissement des recherches achevées.

1 Résumé des travaux

Dans ce travail de thèse, qui s'est inscrit dans le cadre du projet de l'alimentation autonome en énergie photovoltaïque d'un système embarqué (un robot mobile comme exemple), l'objectif a été la construction d'un prototype d'un système de conversion photovoltaïque optimisé pour fournir le maximum d'énergie disponible auprès du module photovoltaïque employé.

Ce travail s'est articulé autour de trois axes principaux de recherche. Tout d'abord, on a présenté des travaux sur la modélisation de la cellule solaire photovoltaïque et de ses associations qui amènent à la formation du module PV. Ensuite, on a abordé le thème de l'optimisation du rendement du module PV à travers la poursuite des rayonnements incidents du soleil et l'élaboration d'un prototype du suiveur solaire motorisé sur deux axes. En définitive, on a développé des travaux sur l'optimisation du système de puissance de conversion et de stockage de l'énergie électrique produite ; ce qui aboutit à la réalisation d'un prototype de régulateur de charge fondé sur la topologie de convertisseur Boost.

Les travaux théoriques de modélisation et de simulation ont occupé une large partie du projet et ont contribué à la maîtrise de l'énergie électrique produite par la technologie photovoltaïque. On a étudié d'une manière minutieuse l'acheminement de l'énergie solaire PV, tout en utilisant des méthodes d'optimisation de la production, depuis l'unité élémentaire (la cellule solaire) jusqu'au stockage de l'énergie dans les batteries d'accumulation. On a modélisé toute la chaîne de conversion PV, partant du modèle de la cellule solaire en association pour former un module solaire, ensuite le système de poursuite de la trajectoire solaire, jusqu'au système de conversion de puissance muni de la commande MPPT, ainsi qu'on a pu simuler l'effet d'ombrage et de la maladaptation des cellules solaires en association sur le rendement du module PV. On a souligné l'importance des études théoriques mises en relief à travers les travaux de modélisation et de simulation. En effet, ces travaux ont permis de comprendre et de maîtriser les phénomènes physiques agissant dans la réalité ainsi qu'ils permettent d'estimer et de prévoir l'évolution des grandeurs électriques du système PV au cours du temps et lors de divers changements des

conditions de fonctionnement.

Les connaissances construites théoriquement par des recherches approfondies ont été concrétisées expérimentalement par la fabrication d'un prototype réel de l'ensemble du système d'alimentation PV autonome dédié aux systèmes embarqués. Les résultats expérimentaux tirés de ce prototype ont participé à la validation d'une partie des approches théoriques examinées. Cependant, le système mis en œuvre réellement nécessite plus de temps d'essais et d'améliorations, surtout au niveau du système d'acquisition et du filtrage des données.

En résumé, on a réussi par ce travail à donner naissance à une plate-forme d'étude pratique, qui peut être exploitée dans l'avenir pour valider d'éventuels travaux sur la commande et l'optimisation des chaînes de conversion PV. En outre, le système est prêt à être intégré sur la base du robot mobile, lui permettant ainsi de se jouir de l'énergie propre tout en garantissant son autonomie du point de vue production et consommation d'énergie électrique.

2 Principaux Résultats

Dans le deuxième chapitre, on a étudié cinq modèles électriques différents de la cellule solaire photovoltaïque appliqués sur la technologie de silicium monocristallin. On a élaboré des méthodes itératives pour la recherche des paramètres internes de chaque modèle en fonction de la variation de la température T et de l'éclairement G . La comparaison entre les modèles étudiés a permis de conclure que le modèle électrique équivalent à une seule diode est le plus précis et le plus adéquat pour une cellule solaire monocristalline typique.

Le troisième chapitre est consacré à l'exploitation du modèle de la cellule solaire pour modéliser les associations en série et en parallèle d'un ensemble de cellules permettant ainsi de former un module PV. On a considéré pour ce modèle les divers problèmes imposés par l'interconnexion des cellules et on a intégré l'effet de l'ombrage partiel sur la puissance totale générée à la sortie du module PV. Le modèle du module PV a été exploité à côté de l'algorithme *SOLPOS* pour la simulation et l'estimation du gain en puissance récolté lors de l'utilisation d'un suiveur solaire. Dans cette étude, on a montré l'importance du suiveur solaire dual pour maximiser l'énergie produite par le module solaire, comme on a élaboré un algorithme en boucle fermée pour la gestion des mouvements du suiveur solaire permettant de détecter l'effet d'ombrage partiel et de l'éviter par une orientation appropriée.

Durant le quatrième chapitre, on a discuté la conception de l'étage de conversion de puissance nécessaire pour acheminer l'énergie vers la charge. Dans ce travail, on a proposé une méthode de dimensionnement du convertisseur de type hacheur autour du point de puissance maximale MPP. Cette méthode permet d'optimiser le rendement de l'étage de conversion tout en assurant le mode de conduction continu et la qualité des grandeurs électriques de sortie pour n'importe quelle condition de fonctionnement. Dans ce travail, on a étudié six topologies de hacheurs et on a montré que la topologie Boost possède le meilleur facteur de rendement pour les applications de faible puissance. On a envisagé une stratégie de commande MPPT fondamentale de type P&O intégrée dans un convertisseur Boost et on a prouvé l'efficacité d'une telle commande pour

maximiser l'énergie électrique produite par le module solaire.

Pour conclure, dans le cinquième chapitre, on a présenté le prototype du système d'alimentation PV réalisé et on a présenté quelques résultats récupérés expérimentalement.

3 Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses et diversifiées, comme la problématique abordée dans cette thèse regroupe plusieurs contextes d'exploitation de l'équipement solaire.

Les tentatives faites dans le deuxième chapitre pour contribuer à l'amélioration du modèle électrique équivalent de la cellule solaire photovoltaïque ont été validées pour un seul type de technologie solaire (cellule monocristalline), on compte alors poursuivre ces investigations pour d'autres technologies plus rentables et plus avancées (figure I.2). En outre, les modèles élaborés peuvent être améliorés pour tenir compte de la qualité spectrale de la lumière incidente, ainsi qu'on désire développer un modèle thermique qui relie la température de la jonction avec la quantité de lumière reçue à la surface de la cellule.

Dans ce travail, on a discuté de quelques problèmes d'interconnexion des cellules solaires. On envisage alors plus d'approfondissement dans ce sens en étudiant l'effet de la maladaptation sur le vieillissement des cellules, comme on désire réaliser des travaux de diagnostic sur les jonctions photovoltaïques.

Dans des travaux futurs, on compte étudier l'association de plusieurs modules solaires et poursuivre les enquêtes sur l'ombrage partiel des modules PV et sur les méthodes de détection et de reconnaissance de l'ombre. De plus, on a l'intention d'étudier d'autre phénomène important qui affectent le rendement des systèmes PV comme l'effet du vent, de l'humidité et des rayonnements réfléchis.

À travers les travaux menés pour la conception du convertisseur de puissance, on propose d'élaborer d'autres topologies de conversion ayant des rendements plus élevés permettant de maximiser la rentabilité du système. De plus, on compte mettre en question d'autres types de commandes MPPT plus avancés afin d'éviter les dépassements observés lors de l'utilisation de l'algorithme P&O fondamental et de les implanter dans des microcontrôleurs plus robustes.

Pour finir, il convient de noter qu'on envisage de développer d'autres versions du prototype du système permettant de rectifier les défauts mécaniques et électriques existants et de pourvoir aux outils nécessaires pour garantir la robustesse du système en présence de diverses sources de perturbations et de défauts accidentels.

Bibliographie

- [1] International Energy Agency. IEA, “Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy”, OECD-IEA, 2014 edition.
- [2] International Energy Agency. IEA, “World Energy Outlook 2013, Global Energy Trends”, Renewable Energy Outlook, OECD-IEA, 2013.
- [3] International Energy Agency. IEA, “Trends 2015 in Photovoltaic Applications”, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, Report IEA-PVPS, T1. 27, 2015.
- [4] U.S. Department of Energy’s National Renewable Energy Laboratory (NREL), “2014 Renewable Energy Data Book”, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, DOE-GO. 102015. 4724, November 2015.
- [5] Agence Nationale de Maîtrise de l’Energie. ANME, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. GIZ, DZ, “Énergie renouvelable et efficacité énergétique en Tunisie : emploi, qualification et effets économiques”, Tunis, décembre 2012.
- [6] M.E. Becquerel. “La lumière ses causes et ses effets”, Academie des sciences de l’institut de France, Paris, 1867. Edition : London : Forgotten Books, 2013.
- [7] K. Mertens, “Photovoltaics fundamentals, technology and practice”, First edition, John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [8] T. Markvart and L. Castafier “Solar Cells : Materials, Manufacture and Operation”, ELSEVIER Ltd, 2006.
- [9] P. Y. Yu and M. Cardona, “Fundamentals of semi-conductors physics and materials properties”, Fourth Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [10] S. M. Sze and K. K. Ng, “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [11] H. Mathiru. “Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques”, Edition : Masson, pp. 464-475, 2012.
- [12] T. Markvart and L. Castafier, “Practical handbook of Photovoltaics fundamentals, technology and practice”, Elsevier Ltd, 2003.
- [13] K. Jager, O. Isabella, A. H.M. Smets, R. A.C.M.M. van Swaaij and M. Zeman, “Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems”, Delft University of Technology, 2014.
- [14] V.Lemaur, M. Steel, D. Beljonne, J. L. Brédas, and J. Cornil, “Photoinduced Charge Generation and Recombination Dynamics in Model Donor/Acceptor Pairs for Organic Solar

- Cell Applications :A Full Quantum-Chemical Treatment”, Georgia Institute of Technology, Journal of the American Chemical Society, April 2005, Vol. 127 , pp. 6077-6086.
- [15] J.G. Fossum, D.S. Lee. “A physical model for the dependence of carrier lifetime on doping density in nondegenerate silicon”.J. Elsevier, Solid-State Electronics, Vol. 25, pp. 741-747, 1982.
- [16] A. D. Jones and C. P. Underwood, “A Thermal Model for Photovoltaic Systems”, School of the Built Environment, University of Northumbria, Elsevier, Solar Energy, Vol. 70, Issue 4, pp. 349-359, 2001.
- [17] Z.H. Lu, Q. Yao. “Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers”, Elsevier, Solar Energy, Vol. 81, Issue 5, May 2007, pp. 636-647.
- [18] Vun Jack Chin, Zainal Salam, Kashif Ishaque. “Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review”. J.Applied Energy, Vol. 154, pp. 500-519,2015.
- [19] D.T.Cotfas, P.A.Cotfas, S.Kaplanis. “Methods to determine the dc parameters of solar cells : A critical review”. J.Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 28, pp. 588-596, 2013.
- [20] V.Jack Chin, Z. Salam and K. Ishaque, “Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review”, Applied Energy, Vol. 154, pp. 500-519, 29 May 2015.
- [21] J. Appelbaum n and A.Peled, “Parameters extraction of solar cells - A comparative examination of three methods”, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 122, pp. 164-173, 28 December 2013.
- [22] A. M. Humada, M. Hojabri and S. Mekhilef, “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models : A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, April 2016.
- [23] Basil Jacob et al. “Solar PV modelling and Parameter Extraction using Artificial Immune system”, ELSEVIER, The 7th International Conference on Applied Energy, ICAE 2015, Energy Procedia, Vol. 75, pp. 331-336, 2015.
- [24] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert.“Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays”. Brazilian Journal of Power Electronics, Vol. 14, No. 1, pp. 35-45, 2009.
- [25] W. Xiao, W. G. Dunford, A. Capel, “A novel modeling method for photovoltaic cells”, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany, 2004.
- [26] K. L. Kennerud. “Analysis of performance degradation in CdS solar cells”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. Aes-5, No. 6, November 1969.
- [27] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, J. R. Phillips, “Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters”, Electronics Letters, Vol. 20, No. 10, 10th May 1984.

- [28] S. H. Chan, C. H. Jacob, "Analytical methods for the extraction of solar-cell single and double diode model parameters from I-V Characteristics", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 34, No. 2, February 1987.
- [29] J. A. Gow, C. D. Manning, "Development of a photovoltaic model for use in power-electronics simulation studies", IEE Proc-Electr. Power Appl, Vol. 146, No. 2, Mars 1999.
- [30] J. Jun Soon and K. Soon Low, "Optimizing Photovoltaic Model for Different Cell Technologies Using a Generalized Multidimension Diode Model", IEEE trans. on industrial electronics, Vol. 62, October 2015.
- [31] V. Khanna, B.K. Das, D. Bisht and P.K. Singh, "A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm", Renewable Energy, Vol. 78, pp. 105-113, 17 January 2015.
- [32] S. Li Sheng, "The Theoretical and Experimental Study of the Temperature and Dopant Density Dependence of Hole Mobility, Effective Mass, and Resistivity in Boron-Doped Silicon", NBS special publication, pp. 400-47, 2015.
- [33] S. S. Li, "Semiconductor Measurement Technology : The Dopant Density and Temperature Dependence of Electron Mobility and Resistivity in N-Type Silicon", Nbs special publication, pp. 400-33, March 1977.
- [34] S. S. Li, "Semiconductor Measurement Technology : The Relationship Between Resistivity and Dopant Density for Phosphorus and Boron Doped Silicon", Nbs special publication, pp. 400-64, May 1981.
- [35] P. Y. Yu and M. Cardona, "Fundamentals of semi-conductors physics and materials properties", Fourth Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [36] J. Bai, S. Liu, Y. Hao, Z. Zhang, M. Jiang and Y. Zhang, "Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules", Energy Conversion and Management, Vol. 79, pp. 294-303, 8 January 2014.
- [37] G. Ciulla, V. Lo Brano, V. Di Dio and G. Cipriani, "A comparison of different one-diode models for the representation of I-V characteristic of a PV cell", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, pp. 684-696, 8 February 2014.
- [38] J. Bikaneria, S. Prakash Joshi and A. R. Joshi, "Modeling and Simulation of PV Cell using One-Diode model", International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 3, 2013.
- [39] D. Bonkougou, Z. Koalaga and D. Njomo, "Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, 2013.
- [40] T. Ma, H. Yang and L. Lu, "Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays", Solar Energy, Vol. 100, pp. 31-41, 20 December 2013.

- [41] S. Lineykin, M. Averbukh, A. Kuperman, "An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 282-289, 8 November 2013.
- [42] Y. Shi-Guang, Z. Wan-Hui, A. Bin, S. Jing-Wei and S. Hui, "Analysis of each branch current of serial solar cells by using an equivalent circuit model", *Chin. Phys. B*, Vol. 23, 20 December 2013.
- [43] Y. Li, W. Huang, H. Huang, C. Hewitt, Y. Chen, G. Fang and D. L. Carroll, "Evaluation of methods to extract parameters from current-voltage characteristics of solar cells", *Solar Energy*, Vol. 90, pp. 51-57, 4 February 2013.
- [44] L. Peng, Y. Sun, Z. Meng, Y. Wang and Y. Xu, "A new method for determining the characteristics of solar cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 227, pp. 131-136, 27 July 2012.
- [45] D. Sera, "Series resistance monitoring for photovoltaic modules in the vicinity of MPP", Aalborg University, Department of Energy Technology Pontoppidanstraede, Vol. 101, Denmark, 2009.
- [46] P. Saha, S. Kumar, S. Kr. Nayak and H. Sekhar Sahu, "Parameter Estimation of Double Diode Photo-Voltaic Module", 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at Nerist (ICPDEN), 2015.
- [47] A. Marrekchi, S.Sallem, G. Marco Tina and M.B.A Kammoun, "A new five parameters estimation method for two-diode model of PV module", 6th International Renewable Energy Congress (IREC), 2015.
- [48] M. Herman, M. Jankovec and M. Topič, "Optimal I-V Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level", *International Journal of Photoenergy*, 25 October 2012.
- [49] B. Alsayid, "Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model", *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)*, Vol.1, 2012.
- [50] G.H. Yordanov, O.M. Midtgård, and T.O. Saetre, "Two-diode model revisited : parameters extraction from semi-log plots of I-V data", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, pp. 6-10 September 2010.
- [51] W. Shockley. "The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors", *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 28, pp. 435.
- [52] B.G. Streetman and S. Banerjee, "Solid State Electronic Devices", 5th Edition, Prentice Hall (2000), Chapter 5.6.2, Recombination and generation in the transition region.
- [53] H. Rezk and El-Sayed Hasaneen, "A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, pp. 873-881, 20 April 2015.
- [54] P. Kumar Pandey and K.S. Sandhu, "Multi Diode Modelling of PV Cell", NIT Kurukshetra, Haryana, India, 2014.

- [55] K. Nishiokaa, N. Sakitanib, Y. Uraokab and T. Fuyukib, "Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 91, pp. 1222-1227, 7 May 2007.
- [56] T. Markvart and L. Castafier, "Solar Cells : Materials, Manufacture and Operation", ELSEVIER Ltd, 2006.
- [57] M. Gen and R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Optimization", John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [58] R.J.Kuo, Ferani E.Zulvia. "The gradient evolution algorithm : A new metaheuristic". *J.Information Sciences*, Vol. 316, pp. 246-265.
- [59] M. Garcia, L. Marroyo, E. Lorenzo, "Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in Navarra". John Wiley & Sons, 2010.
- [60] Atrometrics Inc, "The effects of soiling on PV performance, A brief literature survey", DN. 880027, 2012.
- [61] M. R. Maghani, & Al, "Power loss due to soiling on solar panel : A review". Elsevier, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1307-1316, 2016.
- [62] M. Mani, R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance". Elsevier, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 3124-3131, 2010.
- [63] Sean White, "Solar Photovoltaic Basics : A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam", Routledge taylor & francis group, london and new york, 2015.
- [64] A. Ryer, "The light measurement handbook", Second printing, The united states of America, ISBN 0-9658356-9-3, 1997.
- [65] M. Drif, P.J. Perez, "A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems", Elseier, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 2048-2056, 2008.
- [66] P.D. Santos, E.M. Vicente, E.R. Ribeiro, "Relationship between the shading position and the output power of a photovoltaic panel", IEEE, 2011.
- [67] R. Ramaprabha, B.L. Mathur, "MATLAB based Modeling to study the influence of shading on series connected SPVA". IEEE-ICETET, 2009.
- [68] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics", *IEEE Transaction Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1, March 2008.
- [69] J. Guerrero, Y. Munoz, F. Ibanez, A. Ospino, " Analysis of mismatch and shading effects in a photovoltaic array using different technologies". *IOP conf.series : Materials Science and Engineering*, Vol. 59, SN. 012007, 2014.
- [70] H. Habberlin, "Photovoltaics system design and practice", First edition, John Wil ey & Sons Ltd, 2012.

- [71] S.A. Spanoche, J.D. Stewart, "Model based method for Partially shaded PV module Hot-Spot Suppression", IEEE Journals of Photovoltaics, August 2012.
- [72] Michalsky, J. J. "The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position(1950-2050)". Solar Energy. Vol. 40, No. 3, pp. 227-235, USA, 1988.
- [73] I. Reda, A. Andrea, "Solar Position Algorithm for solar radiation applications", NREL, Technical Report, January 2008.
- [74] N.A. Engerer, F.P. Mills, "Kpv : A Clear-Sky Index for photovoltaics", Solar Energy, April 2014.
- [75] C. Marty, R. Philipona, "The Clear-Sky Index to separate Clear-Sky from Cloudy-Sky situations in Climate Research", Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 17, pp. 2649-2652, September 2000.
- [76] G. Prinsloo, R. Dobson, "Solar Tracking...", ISBN 978-0-620-61576-1, February 2016.
- [77] Z. Jayoo, "Tracking Solar Concentrators, A low budget solution", Springer Briefs In Energy, ISSN 2191-5539, 2013.
- [78] L. Guo, J. Han, A.W. Otieno, " Design and Simulation of a Sun Tracking Solar Power System", 120th ASEE Annual Conference and Exposition, ATLANTA, June 2013.
- [79] F.A. Salem, "Mechatronics Design of Solar Tracking System", IJCET, June 2013.
- [80] D. Rekioua and E. Matagne, "Optimization of Photovoltaic Power Systems : Modelization, Simulation and Control", Springer-Verlag London, ISBN 978-1-4471-2348-4 2012.
- [81] R. Teodorescu, M. Liserre and P. Rodríguez, "Grid converters for photovoltaic and wind power systems", First edition, John Wiley & Sons, Ltd. Publication, ISBN : 978-0-470-05751-3, 2011.
- [82] "A guide to Photovoltaics (pv) system design and installation", Endecon Engineering with Regional Economic Research, June 2001.
- [83] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems", CRC press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [84] F. Jackson, "Stand-Alone Solar Electric Systems", Earthscan, 2010.
- [85] P. Gevorkian, "Solar power in building design", The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [86] S. White, "Solar Photovoltaic Basics : A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam", Routledge Taylor & Francis Group, London and New York, 2015.
- [87] C. Doyle, A. Truitt, D. Ina, R. Lawrence, R. Lockhart and M. Golden, "Best Practices in PV System Installation" Version 1, NREL : national Renewable Energy laboratory, March 2015.
- [88] Washington states university extension energy program, "Solar Electric System Design, Operation and Installation", NREL : national Renewable Energy laboratory ,October 2009.

- [89] Sandia National laboratories, "Stand-alone photovoltaic systems a handbook of recommended design practices", Photovoltaic Design Assistance Center, NEW MEXICO, March 1995.
- [90] J. V. M. Caracas, L. F. M. Teixeira, G. C. Farias, L. A. S. Ribeiro, "Implementation of a High efficiency and low Cost Converter for a Photovoltaic Water Pumping System", University of Maranhao Sao Luis, Brazil, 978 1 4577 1216, IEEE 2012.
- [91] C. Ngai-Man Ho, H. Breuninger, S. Pettersson, G. Escobar, L. Augusto Serpa, and A. Coccia, "Practical Design and Implementation Procedure of an Interleaved Boost Converter Using SiC Diodes for PV Applications", IEEE trans. on industrial electronics, Vol.62, No. 6, June 2012.
- [92] F. Nejabatkhah, S. Danyali, S. H. Hosseini, M. Sabahi and S. M. Niapour, "Modeling and Control of a New Thre Input DC/DC Boost Converter for Hybrid PV/FC/Battery Power System", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 27, No. 5, MAY 2012.
- [93] M. G. Villalva , E. R. Filho, "Buck converter with variable input voltage for photovoltaic application", Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) Campinas. SP. Brasil, 2010.
- [94] A. Fasih, "Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead Acid Batteries", The Engineering Honors Committee 119 Hitchcock Hall College of Engineering. The Ohio State University Columbus, OH 43210, April 2006.
- [95] G. L. Plett, "Battery management systems Volume 1". Artech House Publishers, Sempember 2015.
- [96] G. L. Plett, "Battery management systems Volume 2". Artech House Publishers, Nouvember 2015.
- [97] O.Tremblay, L.A. Dessaint, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE, December 2009.
- [98] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and S.Ploix, "Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 3, pp. 309 320, 2011.
- [99] Gregory L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part1". State and parameter estimation, ELSEVIER Journal of Power Sources, Vol.134, pp. 277 292, 2004.
- [100] L. Lasne, "Électronique de puissance : Cours, étude de cas et exercices corrigés", 2ème édition, Dunod, Paris, ISBN 978 2 10 072135 1, 2015.
- [101] S. Roberts, "DC/DC book of knowledge, Practical tips for the User", RECOM Engineering GmbH & Co KG, Austria, 2015.
- [102] F. L. Luo, H. Ye and M. Rashid, "Digital power electronics ans applications", Elsevier academic press (USA), 2005.
- [103] K. Billings and T. Morey, "Switch mode power supply handbook", The McGraw-Hill Companies, 2011.

- [104] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, Kluwer Academic/plenum Publishers, New York, 2001.
- [105] D. W. Hart, "Power Electronics", The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [106] R. D. Middlebrook and Slobodan Cuk, "A General Unified Approach to Modelling Switching-Converter Power Stages", IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1976 Record, pp. 18-34 (IEEE Publication 76 CH 1084 3 AES); also International Journal of Electronics, vol. 42, no. 6, pp. 521-550, June 1977.
- [107] Slobodan M. Cuk, "Modelling, analysis, and design of switching converters", Doctorat of Philosophy, 29 november 1977.
- [108] S. CUK, "General Topological properties of switching structures", CH 1461 379 0000-010900.75, IEEE, California, 1979.
- [109] R. Erickson and D. Maksimovic, "High Efficiency DC-DC Converters for Battery-Operated Systems with Energy Management", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado, Boulder 80309-0425.
- [110] D. Sera, "Real time modeling, diagnostics and optimized MPPT for residential PV systems", Institute of energy technology-Alborg university, Denmark, January 2009.
- [111] M. Youjie, C. Deshu, Z. Xuesong and G. Runrui, "MPPT Control of photovoltaic system based on hybrid modeling and its simulation", IEEE Sustainable Power Generation and supply Conf., pp.1-5, Avril 2009.
- [112] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "A Technique for Improving P&O MPPT Performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems". IEEE Trans. on Industrial Electronics, 56(11), November 2009.
- [113] F. Lui, S. Duan and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems". IEEE Trans. on Industrial Electronics, 55(7), Juillet 2008.



Optimisation de Systèmes Photovoltaïques Autonomes

Ferdaous MASMUDI

الخلاصة: تتناول هذه الأطروحة بالبحث و النقاش إشكاليات إستخلاص و تركيز أنظمة تحويل الطاقة الفوطوضئية المستقلة بصورة مثلى. الغاية الاساسية من تطوير مثل هذه الأنظمة تكمن في توظيفها ضمن الأنظمة المدمجة كأنظمة الأليات الذكية و الانسان الآلي بطريقة تسمح بالإستفادة من الطاقة الكهربائية المتجددة مع إستعمال مصادر نظيفة و هادئة و مرنة في كنف الاستقلالية المطلقة لعملية التشغيل من حيث إنتاج و استهلاك الكهرباء.

Résumé : Les travaux menés dans cette thèse visent à exposer les problématiques de synthèse et d'optimisation des systèmes de conversion Photovoltaïque autonome. L'objectif principal du développement de tels systèmes consiste à les intégrer au sein des systèmes embarqués (Robots et systèmes intelligents) de manière à les permettre de se bénéficier de l'énergie électrique renouvelable tout en utilisant des sources propres, silencieuses et maniables, ceci en garantissant l'autonomie absolue de production et de la consommation de l'énergie électrique au cours du fonctionnement.

Abstract: This thesis aims to expose problems of the synthesis and the optimization of stand-alone photovoltaic conversion systems. The main goal from the development of such systems is their integration within embedded systems (robots and smart systems) to enable them to benefit from renewable electricity by using clean, quiet and handy sources. This guarantees the absolute autonomy while operating by the self production and the consumption of electric energy.

المفاتيح: نظام فوطوضئوي مستقل، تصميم، الطرق المثلى، خلية / وحدة شمسية، متعقب للشمس، محول طاقة متواصل، نظام تخزين، منتبج نقطة الطاقة القصوى.

Mots clés: Système Photovoltaïque autonome, modélisation, optimisation, cellule / module solaire, suiveur solaire, hacheur, système de stockage, charge, MPPT.

Key-words: Stand-alone Photovoltaic system, modeling, optimization, solar Cell/Module, solar tracker, chopper, storage system, load, MPPT.