



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE

Faculté des Sciences et Techniques

Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques

Formation Doctorale : Mathématiques et Physique Appliquée

THÈSE

Présentée par

ABOUNADA ABDELOUAHED

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Génie Electrique

Option : Automatique

Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes

électriques : régulations et optimisation

Application au pompage solaire

Soutenue le Mercredi 26 Juillet 2017 à 10h devant la commission d'examen:

J. BENGOURRAM	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane ,F.S T. Béni-Mellal, Maroc	Président
H. AISSAOUI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S T. Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
A.BALOUKI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S T. Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
J. FOSHI	Professeur, Université Moulay Ismail, F.S T.. Errachidia, Maroc	Rapporteur
M. AIT LAFKIH	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S T. Béni-Mellal, Maroc	Directeur de Thèse

Remerciements

Cette thèse a été effectuée au sein du laboratoire d'automatique, de Conversion d'énergie et de microélectronique (LACEM) de la faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal.

Je tiens à remercier vivement les membres du jury de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Monsieur, Jamaa BENGOURRAM, Professeur à l'université Sultan Moulay Slimane pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Messieurs, Abdessamad BALOUKI, Jaouad FOSHI, Hicham AISSAOUI pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Monsieur, Mustapha AITLAFKIH, pour avoir accepté d'être parmi les examinateurs de ma thèse.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs encouragements pour l'accomplissement de ce travail.

Avant-propos

Lieu de réalisation : Laboratoire d'Automatique, de Conversion d'Energie et de Microélectronique. (LACEM) Faculté des sciences et techniques Université sultan moulay slimane.

Publications et communications

<p>Abounada A, Brahmi A, Chbirik G* and Ramzi M</p> <p>“Implementation of a New Compact Inverter Structure Controlled by Numeric Sinusoidal Pulse Width Modulation for Photovoltaic Applications” Journal of Electrical & Electronic Systems DOI: 10.4172/2332-0796.1000188 Volume 5 Issue 3.</p>
<p>G. Chbirik1*, A. Abounada1, A. Brahmi2</p> <p>“A Study of a Photovoltaic Production Line Controlled with a PI Corrector” Journal of Energy Technologies and Policy www.iiste.org ISSN 2224-3232 (Paper) ISSN 2225-0573 (Online) Vol 8, No.1, pp 1-5 2018</p>
<p>A.Brahmi, A.Abounada, G.Chbirik.</p> <p>“Design and optimal choice of a photovoltaic pumping system for irrigation” Accepté dans le Journal of Renewable and Sustainable Energy - AIP en cours de publication.</p>
<p>M Adar, Hasnaa Bazine, A Abounada, Mustapha Mabrouki.</p> <p>«Simulation and comparative study of different PV Modules technologies of silicon (Monocrystalline, polycrystalline and Amorphous) in Beni Mellal.» IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) DOI: 10.9790/1676-110304112121 e-ISSN: 2278-1676,p-ISSN: 2320-3331 volume 11, Issue 3 pp 112-121 (2016).</p>
<p>Mohammed Aftatah, Abdelkabar Lahrech, Abdelouahed Abounada, Aziz Soulhi.</p> <p>“GPS/INS/Odometer Data Fusion for Land Vehicle Localization in GPS Denied Environment”. Modern Applied Science, Vol. 11, No. 1, pp 62-75, 2017. http://dx.doi.org/10.5539/mas.v11n1p62</p>
<p>Aftatah, M., Lahrech, A., & Abounada, A.</p> <p>Fusion of GPS/INS/Odometer measurements for land vehicle navigation with GPS outage. In Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech), 2016 2nd International Conference on (pp. 48-55). IEEE. DOI: 10.1109/CloudTech.2016.7847724 (May 2016).</p>

A. Brahmi (1), A. Abounada (2), M. Ramzi (2), J. Foshi(3) et S. Bri(4)

"Conception et réalisation d'une nouvelle structure de conversion continue-alternative compacte pour les applications photovoltaïques autonomes" Colloque international TELECOM'2015 & 9èmes JFMMA 13, 14, 15 mai 2015 Meknès- Maroc.

CHBIRIK Ghizlane, ABOUNADA Abdelouahed, Jaouad ELHABBAZI

“ REGULATION DE LA TENSION DE SORTIE DU HACHEUR SURVOLTEUR” La deuxième édition du colloque international sur les énergies renouvelables & les emplois verts. Casablanca les 24-25 avril 2017

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

«A GPS/SINS Integrated Navigation System for Continuous Land Vehicle Navigation in Urban Areas», The Second Workshop on Advanced Signal Processing and Information Technology (AspiT'16), 23 & 24 Mai 2016, Tétouan.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

“Fusion of GPS/INS/Odometer measurements for land vehicle navigation with GPS outage”, The Second International Conference of Cloud Computing Technologies and Applications (IEEE CloudTech'16), 24-26 Mai 2016, Marrakech

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada, A. Errkik,

«New fusion approach to bridge the period of GPS outages using INS and odometer», Congrès Méditerranéen des Télécommunications (CMT'2016), 12 & 13 Mai, Tétouan.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

«Fusion des mesures GPS, inertielles et odométriques pour la localisation d'un véhicule en milieu urbain», Conférence Internationale Journées Scientifiques en Sciences Appliquées (JSSA'16), 25 & 26 Mars 2016, Larache.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

«Fusion des mesures GPS/Centrale inertielle pour la localisation d'un véhicule en milieu urbain», The 1st International Symposium on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES 2016), 3-6 Mars 2016, Errachidia.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

«GPS and Odometer Aided Inertial Sensors for Continuous Land Vehicle Navigation in Urban Environments », Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb (CISTEM 2016), 26-28 Octobre 2016, Marrakech.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

«Localisation 3D de mobile en milieu urbain par fusion GPS/Centrale inertielle», Les 9èmes Journées d'Optique et du Traitement de l'Information (JOTIM2016), 4 & 5 Mai 2016, Errachidia.

M. Aftatah, A. Lahrech, A. Abounada,

Résumé

L'énergie solaire est la ressource future susceptible de répondre aux besoins énergétiques croissants, c'est une source d'énergie inépuisable et non polluante pour l'environnement. L'énergie solaire photovoltaïque est un axe principal de l'énergie solaire, elle permet la conversion de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

L'application la plus développée de l'énergie solaire photovoltaïque au cours de ces dernières années est certainement celle permettant l'extraction de l'énergie maximale et l'alimentation de tous types d'appareils ou de systèmes électriques. En cas d'excès, le surplus d'énergie fourni par le générateur photovoltaïque peut être injecté dans le réseau électrique.

Ces applications doivent inclure nécessairement un onduleur, qui est la pièce principale de ce type d'installation constituée de :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur DC/DC pour la poursuite du point de puissance maximale.
- Un onduleur utilisé comme interface entre le générateur PV et la charge ou le réseau.

L'objectif de ce travail de recherche est l'intégration des énergies renouvelables particulièrement les énergies photovoltaïques dans les alimentations des charges alternatives ou dans les installations de production et d'injection dans le réseau électrique. Pour ce faire, une nouvelle topologie d'onduleur a été étudiée, simulée et réalisée afin de produire une onde sinusoïdale de bonne qualité amplitude et fréquence constantes.

Un nouveau concept est proposé dans ce travail pour améliorer la chaîne de conversion photovoltaïque classique formée par des panneaux solaires, un hacheur élévateur et un onduleur classique à commande analogique. Le système proposé évite les inconvénients majeurs des systèmes classiques, entre autres, le nombre de composants, l'encombrement ainsi que les pertes et l'utilisation

des transformateurs. Ce dernier est basé sur un onduleur survolteur à entrée régulée en tension. Dans l'objectif de minimiser les pertes dans de tel système connu par son faible rendement, toutes les commandes sont implantées sur un système embarqué à base de microcontrôleurs. Ce système numérique exécute simultanément des commandes MPPT, la commande MLIS de l'onduleur ainsi que les commandes du régulateur numérique de la tension à la sortie de l'hacheur BOOST.

Au début, un aperçu de la littérature scientifique sur l'énergie solaire photovoltaïque et les différents convertisseurs en rapport avec le sujet de cette thèse a été présenté.

La réalisation, après étude et simulation, de l'onduleur survolteur dans sa nouvelle structure constituée par deux hacheurs élévateurs montés en mode différentiel a été décrite. Après sa mise au point pratique nous nous sommes intéressés à la réalisation de l'hacheur survolteur permettant la poursuite du point de puissance maximale par la technique "Maximum Power Point Tracking" (MPPT) de type Perturbation et Observation "PO" à pas adaptatif.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la synthèse d'un correcteur proportionnel intégral auto ajustable pour réguler la tension de sortie de l'hacheur survolteur dans tous les points de fonctionnement du système.

A la fin, une application sur un système réel a été présentée afin de lier ces travaux de recherche à l'application pratique. Ce système concerne l'alimentation d'une motopompe à moteur asynchrone triphasé commandé par un onduleur à fréquence variable.

Mots clés :

Générateur PV, Hacheur DC-DC Boost, Onduleur, Commande MPPT, Perturb and Observe PO, microcontrôleurs, Régulateur PI auto ajustable.

Abstract

Solar energy is the future resource likely to meet the growing energy demands, it is an inexhaustible and non-polluting source of energy for the environment. Photovoltaic solar energy is a main axis of solar energy, it allows the conversion of energy from solar radiation into electrical energy.

The most developed application of photovoltaic solar energy in recent years is certainly that allowing the extraction of maximum energy and the power supply of all types of appliances or electrical systems. In case of excess, the surplus energy supplied by the photovoltaic generator can be injected into the electrical grid.

These applications must necessarily include an inverter, which is the main piece of this type of installation that is constituted of:

- A photovoltaic generator.
- A DC/DC converter to track the maximal power point.
- An inverter uses as interface between the generator and the load or grid.

The objective of this research work is the integration of renewable energies, especially photovoltaic energies, to supply alternative loads or to inject the energy produced in the electrical grid. To do this, a new topological inverter has been studied, simulated and realized in order to produce a high-quality sine wave with constants amplitude and frequency.

A new concept is proposed in this work to improve the conventional photovoltaic conversion chain formed by solar panels, a Boost converter and a conventional inverter with analog control. The proposed system avoids the major disadvantages of conventional systems, including the number of components, the size and the losses and the use of transformers. The latter is based on a voltage-regulated input voltage booster. In order to minimize the losses in such a known system by its low efficiency, all the commands are implemented on a single microcontroller. This microcontroller simultaneously executes MPPT commands, the MLIS command of the inverter and the commands of the digital regulator of the output voltage of the BOOST converter.

Keywords- PV generator, DC-DC Boost, Inverter, MPPT, perturb and observe, Interface Controller (PIC), PI Controller.

Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM).

Table des matières

Résumé.....	v
Abstract.....	vii
Table des matières.....	viii
Liste des tableaux.....	xii
Liste des illustrations	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Les Générateurs Photovoltaïques.....	4
1. Introduction générale à l'énergie solaire	4
2. Le soleil: Immense source d'énergie	5
3. Intermittence de l'énergie solaire	6
4. La conversion de l'énergie solaire.....	6
i. Energie thermique(chaleur)	7
ii. Energie photovoltaïque: (conversion directe).....	8
5. De la photopile aux générateurs photovoltaïque.....	9
i. La photopile	9
ii. Le module photovoltaïque	19
iii. Les chapms photovoltaïques	25
6. Conclusion:	26
CHAPITRE II : Les Convertisseurs DC/DC de type Boost	27
1. Introduction.....	27
2. Généralités	27
i. Convertisseurs DC-DC non isolés de la source :	27
ii. Convertisseurs DC-DC isolés de la source	30
3. Pertes dans le convertisseur	31
i. Pertes par conduction :	32
ii. Pertes par commutation :	32

4.	Dimensionnement des radiateurs de refroidissement	33
5.	Synthèse et dimensionnement du convertisseur Boost	33
i.	Hypothèse d'étude :	34
ii.	Règles de synthèse d'un convertisseur statique	34
6.	Exigences du cahier de charge :	35
7.	Synthèse du convertisseur de type Boost :	36
8.	Etude du convertisseur de type Boost	38
9.	Conclusion	41
CHAPITRE III : Les onduleurs photovoltaïques.....		42
1.	Introduction.....	42
2.	Fonctionnement et étude des performances des onduleurs photovoltaïques.	43
i.	Classification des onduleurs selon la structure	43
ii.	Type d'onduleur.....	44
iii.	Autres types de classification (norme EN 62040-3).....	45
iv.	Applications aux divers fonctionnements.....	46
3.	Les topologies des onduleurs photovoltaïques sans transformateur	47
i.	Le pont complet :	47
ii.	Pont complet avec AC bypass : HERIC	49
iii.	Topologie H5 :	49
iv.	Demi-pont :	50
v.	NPC :	51
vi.	Pont complet en cascade :	52
4.	L'onduleur survolteur	52
5.	La commande MLIS	53
6.	Conclusion	54
CHAPITRE IV : Régulations et optimisation.....		55
1.	Introduction.....	55
2.	Régulations	55
i.	Techniques de la régulation MPPT.....	55
ii.	Régulation de la tension à la sortie du Boost.....	59

3.	Choix et calcul du régulateur de la tension du bus continu	60
4.	Resultats de simulation	61
i.	simulation de la chaine de production sans régulation	62
ii.	simulation de la chaine de production avec régulation	63
5.	Conclusion	65
CHAPITRE V : Simulations et expérimentations		66
1.	Introduction.....	66
2.	Résultats de simulation et expérimentation.	66
iii.	Simulation.....	66
iv.	Expérimentation.....	75
3.	Résultats de simulation de la régulation	84
i.	Simulation de la chaine de production Sans régulation	85
ii.	Simulation de la chaine de production avec régulation	86
4.	Conclusion	86
CHAPITRE VI : Application au pompage solaire.....		87
1.	Introduction.....	87
2.	Dimensionnement de l'installation photovoltaïque	87
i.	Méthode de dimensionnement	88
ii.	Lieu de l'installation	88
a.	Évaluation des besoins en eau.....	89
b.	Données météorologiques de Beni-Mellal.....	92
c.	Calcul de la puissance crête	94
d.	Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	94
e.	Dimensionnement à l'aide du logiciel PVSYST	96
3.	Dimensionnement et choix de la pompe solaire.	99
i.	Puissance électrique	99
ii.	Débit crête de la pompe	99
iii.	Type du moteur	100
4.	Dimensionnement du Convertisseur Boost.....	100
i.	Le dimensionnement du condensateur et de l'inductance :	102

ii.	Choix du condensateur de sortie	102
iii.	Dimensionnement et mise en forme de l'inductance	103
iv.	Réalisation pratique	103
v.	Les matériaux magnétiques et les corps de bobines	114
5.	Conclusion	120
Conclusion générale		121
Références		123

Liste des tableaux

Tableau I.	pertes par conduction dans les interrupteurs	32
Tableau II.	pertes dans le convertisseur Boost	33
Tableau III.	Classification des onduleurs selon la norme EN 62040-3	45
Tableau IV.	Table climatique Beni Mellal pour l'année 2016	89
Tableau V.	Coefficient K_{ac} pour différents types d'accessoires dans la tuyauterie	91
Tableau VI.	Tableau récapitulatif de l'énergie consommée lors des heures d'utilisation.....	92
Tableau VII.	Irradiation solaire mensuelle.....	93
Tableau VIII.	Énergie annuelle des PV et les besoins des utilisateurs	98
Tableau IX.	résultats du dimensionnement à l'aide de PVSYST	98
Tableau X.	Valeurs critiques minimales calculées et normalisées	102
	des composants du convertisseur Boost.....	102
Tableau XI.	Perméabilité relative de quelques matières.....	117

Liste des illustrations

Figure 1.	La conversion de l'énergie solaire.....	7
Figure 2.	Principe de fonctionnement d'une centrale à tour permettant de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.....	8
Figure 3.	Diagramme énergétique montrant le gap d'un matériau sémi-conducteur.	10
Figure 4.	Configuration électronique d'un atome de silicium.	11
Figure 5.	Dopage du silicium par le phosphore.....	12
Figure 6.	Jonction PN.....	13
Figure 7.	Cellule monocristalline.	14
Figure 8.	Cellule poly cristalline.	14
Figure 9.	Cellule à couche mince (amorphe).	15
Figure 10.	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure 11.	Schéma caractéristique d'une cellule photovoltaïque.	16
Figure 12.	Influence des résistances R_s et R_{sh} sur la caractéristique I-V de la cellule.	17
Figure 13.	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I-V de la cellule.....	18
Figure 14.	Influence la température sur la caractéristique I-V de la cellule.	19
Figure 15.	Association de N_s cellules en série.	20
Figure 16.	Association de N_s modules en série.....	21
Figure 17.	Utilisation de diodes by-pass.	22
Figure 18.	Exemple de panneaux sur le marché.....	23
Figure 19.	Association de N_p cellules en parallèle.	23
Figure 20.	Association de N_p modules en parallèle équipés de diodes anti-retour.....	24
Figure 21.	Schéma récapitulatif de l'ensemble: cellule, module, panneau et champ PV.	26
Figure 22.	Principales configurations de convertisseurs DC-DC non isolés de la source.	30
Figure 23.	Configuration de base du convertisseur Flyback.....	31
Figure 24.	configuration de base à liaison indirecte.....	36
Figure 25.	Structure du convertisseur Boost.....	37
Figure 26.	Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	38
Figure 27.	la topologie pont complet.....	48

Figure 28.	La topologie HERIC	49
Figure 29.	la topologie H5.....	50
Figure 30.	La topologie demi-pont.....	51
Figure 31.	La topologie NPC	51
Figure 32.	La topologie pont complet en cascade	52
Figure 33.	L'onduleur survolteur	53
Figure 34.	Principe de la MLIS numérique.....	54
Figure 35.	Schéma du principe de la méthode P&O	57
Figure 36.	Algorithme de la Perturbation et Observation (P&O)	58
Figure 37.	Boucle de régulation	60
Figure 38.	Boucle de régulation	61
Figure 39.	chaîne de production sans régulation.....	62
Figure 40.	Simulation de la chaîne sans régulation.....	62
Figure 41.	chaîne de régulation	63
Figure 42.	: Simulation de la chaîne avec régulation	64
Figure 43.	le hacheur BOOST	67
Figure 44.	Courant IL1 dans l'inductance L1 et le signal de commande Vgs1	68
Figure 45.	Tensions de sortie Vb, d'entrée Vg et du signal de commande Vgs1 pour $\alpha_1=50\%$. 68	
Figure 46.	Tension de sortie Vb et celle d'entrée Vg pour $\alpha_1=25\%$	69
Figure 47.	Tension de sortie Vb et celle d'entrée Vg pour $\alpha_1=75\%$	69
Figure 48.	la tension d'entrée Vg et celle de sortie de l'élévateur Vb pour $\alpha_1=66\%$	70
Figure 49.	hacheur élévateur avec régulation de la tension.	71
Figure 50.	onduleur survolteur	72
Figure 51.	les deux tensions de sortie Vo1 et Vo2 de chaque hacheur Boost.....	73
Figure 52.	La tension de sortie Vo résultante (cas d'une charge résistive).....	73
Figure 53.	Le courant de sortie Io de l'onduleur survolteur pour une charge résistive.....	74
Figure 54.	La tension Vo et Io de sortie pour une charge RL	74
Figure 55.	La tension de sortie Vo et le courant Io pour une charge RC	75
Figure 56.	l'adaptateur MPPT	76
Figure 57.	l'hacheur élévateur.....	76

Figure 58.	commande et régulateur du hacheur élévateur.....	77
Figure 59.	Le signal de commande V_{gs1} du Boost.....	78
Figure 60.	Les tensions d'entrée et de sortie V_g et V_b du Boost.....	78
Figure 61.	La régulation de la tension de sortie V_s pour V_e constante.....	79
Figure 62.	la régulation de la tension de sortie pour V_e variable.....	80
Figure 63.	Réalisation de l'onduleur	81
Figure 64.	Réalisation du circuit d'isolement de l'onduleur	81
Figure 65.	Tension de sortie pour une charge résistive.....	82
Figure 66.	Le courant de sortie I_o pour la charge résistive	82
Figure 67.	Tension de sortie pour une charge capacitive.....	83
Figure 68.	Tension de sortie pour une charge inductive.....	83
Figure 69.	Schéma de simulation	84
Figure 70.	Simulation de la chaine sans régulation.....	85
Figure 71.	Simulation de la chaine avec régulation	86
Figure 72.	La configuration de l'installation photovoltaïque.....	95
Figure 73.	Configuration du GPV pour une tension de sortie nominale égale à 100V	96
Figure 74.	Résultats obtenus du pré dimensionnement.....	97
Figure 75.	capteur de tension LV 25-P.....	104
Figure 76.	principe de fonctionnement du capteur LV25-P.....	105
Figure 77.	branchement du capteur LV 25-P	107
Figure 78.	résultat du test du capteur LV 25-P avec le PIC16F877A	108
Figure 79.	capteur de courant LAH 25-NP	109
Figure 80.	Branchement du capteur LAH 25-NP dans le circuit de mesure	111
Figure 81.	Carte de commande avec capteur LAH 25-PN et PIC16F877A.....	112
Figure 82.	Réalisation BOOST avec circuit d'aide à l'amorçage	113
Figure 83.	exemple de noyaux toriques magnétiques	115
Figure 84.	dimensionnement d'une inductance torique	116

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Ce développement est dopé par les politiques internationales et nationales qui visent la diminution de l'utilisation des énergies fossiles polluantes et en voie de disparition (agency, renewable information 2017).

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance et de la commande numérique (Pinard. s.d.).

Au Maroc, l'énergie renouvelable s'est développée après l'indépendance grâce à une politique centrée sur la construction des barrages, de ce fait, jusqu'à présent, l'hydroélectricité détient la plus grande part de contribution de l'énergie renouvelable dans la production globale du pays avec 1770 MW (agency, renewable energy in the arab region- overview of developments 2016) suivi par l'énergie éolienne avec 850 MW (agency, renewable information 2017). Constituant ainsi la deuxième capacité en hydroélectricité après l'Egypte ayant 2874 MW et la première capacité en énergie éolienne dans les pays arabes. Pour ce qui est énergie solaire, le Maroc a lancé des projets importants d'une capacité globale de 500MW à travers les projets NOOR de Ouarzazate. Une puissance de 160MW est installée en février 2016 (NOOR I), suivi d'une extension de la puissance de l'ensemble à 500MW à travers les projets NOOR (I, II, III et IV). A terme, les projets NOOR visent l'objectif de 2000MW en énergies renouvelables à l'horizon 2020 (africaine 2011). D'autres sites sont concernés par ces projets d'énergies renouvelables à savoir : Layaoune, Boujdour, Taroudant, Guercif ... le domaine de l'agriculture est également visé pour l'utilisation de l'énergie photovoltaïque en accordant des subventions aux agriculteurs désirant l'installation des panneaux solaires pour le pompage de l'eau (H. Belmili 2008).

Les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour l'alimentation des appareils électriques ou pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système photovoltaïque.

Cependant, les problèmes de production non uniforme du champ photovoltaïque ont pour causes les variations climatiques. Ces problèmes ont un impact direct sur la forme de l'onde de tension délivrée par l'installation photovoltaïque susceptible d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés en sortie dans le cas d'une installation autonome ou les déconnexions dans le cas où elle est raccordée au réseau.

Dans ces conditions et face à ces problèmes, un algorithme de poursuite et une régulation de la tension et de la fréquence s'imposent ainsi qu'une récente topologie de convertisseurs.

L'objectif de cette thèse constitue une contribution à l'intégration des énergies renouvelables et particulièrement les énergies photovoltaïques dans les systèmes électriques aussi bien dans les applications autonomes que dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électriques. Après une bonne phase de bibliographie, nous avons travaillé sur le redimensionnement et l'optimisation des nouvelles architectures d'onduleurs utilisées dans les chaînes de conversion de l'énergie combinés avec les commandes numériques les plus satisfaisantes.

Les objectifs de cette thèse consistent donc à :

- ✓ Etudier le comportement des panneaux solaires,
- ✓ Etudier le comportement dynamique des convertisseurs statiques face aux variations de la charge. Notamment, la variation de la nature de la charge (résistive, inductive ...)
- ✓ Etudier les différentes topologies d'onduleur pour sélectionner le mieux adapté dans notre cas.
- ✓ Proposer des solutions pour la régulation du bus DC combinée à l'extraction du maximum d'énergie.
- ✓ Proposer des solutions innovantes, numériques et adaptatives de commande.
- ✓ Le travail vise aussi la gestion numérique de toute l'installation avec adaptateur MPPT et l'intégration des méthodes avancées de l'automatique pour la régulation aussi bien de la tension du bus continu que de la fréquence de l'onduleur

En fin pour rallier recherche et développement, nous avons reçu un financement de l'Université sultan Moulay Slimane pour la réalisation d'une installation de pompage solaire. Ce projet a pour objectif l'étude, la conception ainsi que la réalisation pratique d'une installation photovoltaïque de pompage solaire qui peut être connectée au réseau en cas de surplus d'énergie électrique produite. Cette installation de pompage sera un support pratique pour l'application et la vérification de toutes les solutions de recherche proposées dans le cadre de cette thèse. Cette installation sera utilisée, après sa mise au point, comme banc didactique pour l'étude des différents circuits électriques et de leurs commandes par les étudiants.

Dans cette optique, nous avons organisé notre travail de la façon suivante :

Le premier chapitre présente un aperçu sur les bases de la conversion photovoltaïque ainsi que les caractéristiques importantes dans notre étude d'un champ photovoltaïque.

Le deuxième chapitre et le troisième chapitre décrivent le fonctionnement des convertisseurs statiques de type Boost et onduleurs, l'état de l'art sur le comportement de ces systèmes face aux changements climatiques. Nous nous intéressons dans ce qui suit et en particulier à l'onduleur solaire ou photovoltaïque.

Le chapitre IV va présenter les régulateurs MPPT et PID adaptatif combinés afin d'assurer simultanément la poursuite du point de puissance maximale et la régulation de tension du bus continu indépendamment des variations climatiques et de charges.

Les topologies ressortant de ces chapitres seront étudiées en simulation dans le chapitre V.

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude, la conception et la réalisation pratique d'une installation de pompage solaire.

CHAPITRE I : Les Générateurs Photovoltaïques

1. Introduction générale à l'énergie solaire

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1 000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1 400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme:

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- la période de l'année et l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

Les zones les plus favorables sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des gisements solaires à la surface de la terre.

La conversion directe de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le physicien Français E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV) dont le principe est brièvement décrit dans la partie 2-ii de ce chapitre. La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant tension I(V) spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM)

dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble.

2. Le soleil: Immense source d'énergie

Le soleil est une étoile parmi les autres de forme pseudo-sphérique dont le diamètre est de l'ordre de 1 391 000 km, environ cinquante fois celui de la Terre. Sa lumière, à la vitesse fantastique de 300 000 kilomètres par seconde, met un peu plus de huit minutes pour nous parvenir. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il peut être considéré comme étant une gigantesque bombe thermonucléaire en perpétuelle explosion transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans le noyau du soleil à la température de 25 millions de degrés centigrades (environ 107 K) et les 4 millions de tonnes dont le soleil est ainsi allégé à chaque seconde étant dispersées sous forme de rayonnement. La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des milliards d'années. On évalue à environ 100 milliards de milliards de kilowatts-heures l'énergie rayonnée à chaque seconde dans toutes les directions par le soleil, et la Terre avec son atmosphère n'en reçoit qu'environ 30 milliards par seconde. Parmi les causes de l'affaiblissement du rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère terrestre on peut citer: l'absorption proprement dite par les gaz et vapeurs de l'atmosphère, la diffusion moléculaire par ces gaz et vapeurs et l'affaiblissement par les particules de toutes sortes en suspension dans l'atmosphère.

L'atmosphère terrestre reçoit le rayonnement solaire à une puissance moyenne de 1,37 kw/m² à plus ou moins 3%, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toujours une partie de sorte que la quantité atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1,2 kw/m². La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. En fin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rend diffus.

3. Intermittence de l'énergie solaire

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose un problème bien particulier. Le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; en outre on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter. Ainsi, le concepteur d'un système qui exploite le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible. Il faut d'abord comprendre que la rotation (moment de la journée) et l'inclinaison (saison de l'année) de la terre affectent l'effet du rayonnement solaire. L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le soleil est directement au dessus de l'endroit visé. C'est le midi solaire moment où le rayonnement solaire directe est plus intense. Comme le soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est grande qu'en hiver. La latitude a aussi un effet important: L'intensité maximale (à midi) et la quantité totale du rayonnement solaire sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'on augmente la latitude. Rappelons aussi que, le rayonnement atteint son intensité maximum lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons solaires, donc l'intensité du rayonnement solaire sur un plan quelconque augmente quand on l'incline vers le soleil. On maximise par conséquent la quantité d'énergie solaire directe captée quand on change constamment l'inclinaison du plan pour le maintenir à angle droit avec les rayons du soleil. Si le plan est xe, la quantité d'énergie reçue sera moindre, car les rayons du soleil la frapperont de biais de la majorité du temps.

4. La conversion de l'énergie solaire

la souplesse de l'utilisation de l'électricité pour l'habitat et pour l'industrie fait considérer la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique comme un problème de la plus haute importance. Pour cette conversion, on distingue les moyens directs (photopiles) utilisant l'effet photovoltaïque, et les moyens indirects comprenant au moins une conversion intermédiaire qui peut être thermique, chimique ou photo biologique.

Ainsi, nous distinguons généralement l'énergie solaire thermique qui, via des capteurs solaires convertit directement l'énergie solaire en chaleur qui est aussi utilisable à son tour pour

produire de l'électricité et l'énergie solaire dite photovoltaïque qui, quant à elle est convertit directement en électricité grâce à des modules photovoltaïques (effet photovoltaïque).

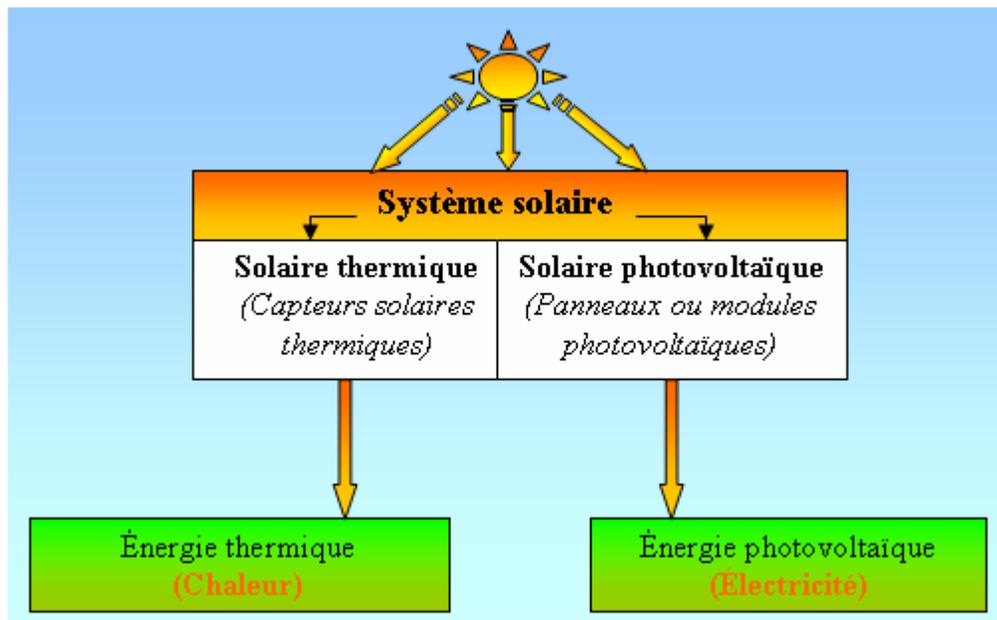


Figure 1. La conversion de l'énergie solaire.

i. **Energie thermique(chaleur)**

Le solaire thermique consiste à utiliser des capteurs solaires afin de capter l'énergie du rayonnement solaire et produire de la chaleur qui est restituée par un fluide caloporteur (liquide ou gaz). Nous pouvons utiliser cette énergie thermique ainsi récupérée, dans la production d'eau chaude sanitaire (ECS), chauffage de piscines et d'habitations ainsi que le séchage de céréales. Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air. L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications:

- La production d'eau chaude,
- Le chauffage des maisons,
- Le chauffage de l'eau des piscines,
- Le séchage des récoltes,

- La réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- La production de très haute température.

Au delà de ces applications, cette énergie thermique peut être utilisé pour faire tourner des turbines an de produire de l'énergie électrique c'est le cas notamment des centrales à tour dont le principe de fonctionnement est expliqué ci-dessous:

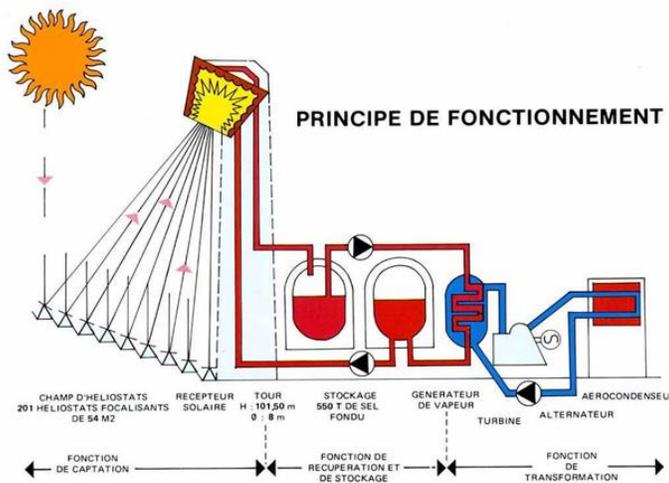


Figure 2. Principe de fonctionnement d'une centrale à tour permettant de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.

Le principe des centrales à tour est le suivant : des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000 °C. Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité. On dénombre aujourd'hui dans le monde plusieurs centrales à tour, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.

ii. Energie photovoltaïque: (conversion directe)

Contrairement à l'énergie thermique, l'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement (solaire ou autre) en électricité, c'est-à-dire l'énergie solaire

photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. C'est ainsi, grâce à cette conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique, que nous parlerons de la notion de générateur photovoltaïque (GVP).

5. De la photopile aux générateurs photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production de d'électricité directement à partir de la lumière, fut observé pour la première fois, en 1839, par le physicien Français Edouard Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux Etats-Unis, parviennent à fabriquer la première photopile (cellule solaire), l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

i. La photopile

Cette photopile qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les diodes ou transistors, on peut les représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. On distingue généralement Les semiconducteurs intrinsèques: ce sont ceux dont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes, peuvent devenir porteur de charge sous l'effet d'une agitation thermique et les Les semi-conducteurs extrinsèques: pour lesquels on arrive à augmenter la conductivité en y introduisant des impuretés (ce procédé est appelé dopage).



Figure 3. Diagramme énergétique montrant le gap d'un matériau semi-conducteur.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite (gap du matériau). Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie nécessaire à cet effet, à noter que le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. La photopile la plus courante de nos jours utilise le silicium, élément très répandu sous forme de silice (sable), mais qui doit être amené à un très grand état de pureté et sous forme de monocristal. Occupant la quatorzième colonne et la troisième ligne du tableau périodique de Mendeleïev, le silicium est un non métal dont l'atome a au total 14 électrons. La répartition électronique de ces électrons sur les différentes couches ($N = 2xn^2$; $N =$ nombre d'électrons sur la couche d'ordre n) donne la structure atomique ci-après (voir figure 4). Sa couche externe (3e couche), saturable normalement avec $18e^-$, contient $4e^-$ périphériques non liés (célibataires).

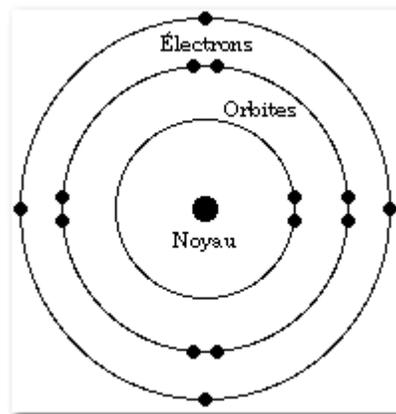


Figure 4. Configuration électronique d'un atome de silicium.

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin (le dopage). Quand on substitue dans le réseau cristallin du silicium quelques atomes des éléments de la 15^{ème} colonne du tableau périodique tels que le phosphore (P) qui, sur sa couche périphérique, a 5e- non liés, celui-ci utilisera quatre de ces électrons célibataires pour former des liaisons covalentes avec le réseau cristallin du silicium et dans ce cas il y aura un électron libre non lié provenant du phosphore au sein du réseau cristallin du silicium. Le semi-conducteur (le réseau cristallin du silicium) ainsi obtenu est en excès d'électrons : On dit qu'il est dopé N . De même si au lieu d'utiliser les éléments de la 15^{ème} colonne du tableau périodique, on se sert de ceux de la 13^{ème} colonne tels que le Bore (B) qui, sur sa couche périphérique, a 3e- célibataires, ce dernier ayant besoin d'un électron pour être stable, va s'emparer d'un électron du silicium et, le silicium sera en défaut d'électron (création des trous). Le semi-conducteur (le réseau cristallin du silicium) ainsi obtenu est en défaut d'électrons: On dit qu'il est dopé P .

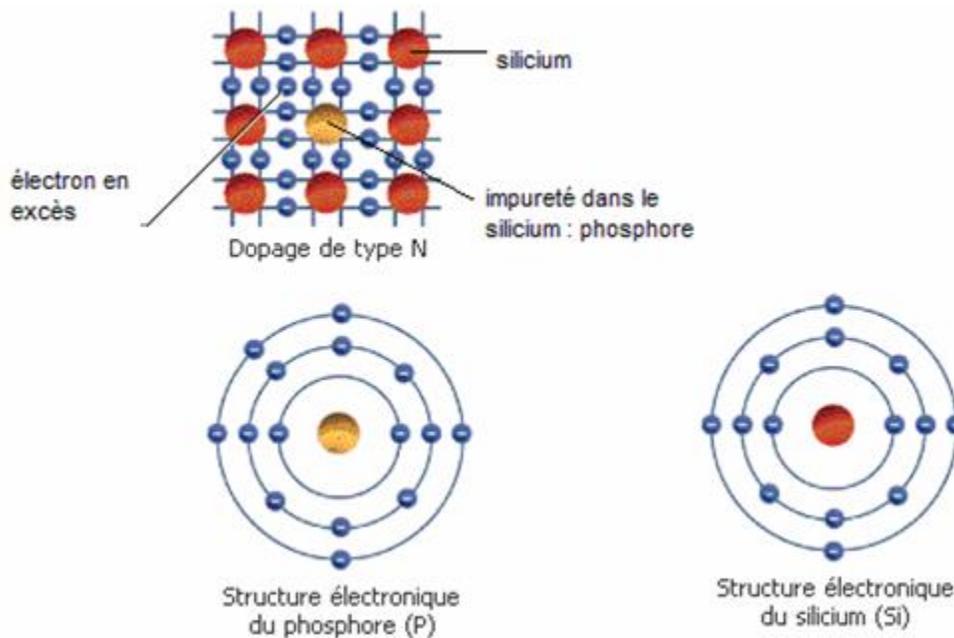


Figure 5. Dopage du silicium par le phosphore.

La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition . Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. C'est cette jonction ainsi réalisé, en fonction de la technologie utilisée pour sa fabrication, de la densité de dopage et du type de matériau utilisé, qui constituera notre photopile (cellule photovoltaïque).



Figure 6. Jonction PN.

Pour réaliser une application pratique de l'effet photovoltaïque il est important de trouver le matériau nécessaire à la réalisation du principe de l'absorption de la lumière incident et de la collection des électrons à la surface. Les Cellules photovoltaïque sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capable de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90% des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin. Une des faces de la cellule est dopé N (par exemple le Phosphore), l'autre est dopé P (par exemple le Bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter des électrons et de réaliser un circuit électrique. La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion. Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons. Il existe diérentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication. Les principales technologies des cellules industrialisées à nos jours sont:

➤ **cellules monocristallines:**

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 μ m d'épaisseur. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.



Figure 7. Cellule monocristalline.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18%, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly cristallines.

➤ **Cellules solaires poly-cristallines:**

Le matériau de base est du silicium ultrapur qui est porté à fusion. On refroidit la fonte de silicium de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires poly cristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 μ m d'épaisseur. La fabrication se termine par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité (voir figure 8). Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 13 et 16%.



Figure 8. Cellule poly cristalline.

➤ **Cellules solaires amorphes:**

En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux. Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support,

comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2µm. Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est plus nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8%.

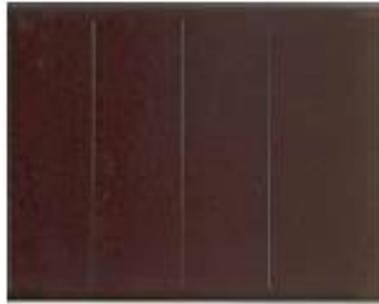


Figure 9. Cellule à couche mince (amorphe).

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Ainsi, quand un photon de lumière, d'énergie ($E = h \times \nu$) suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive avant qu'il n'accomplisse un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'énergie à courant continu, mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile.

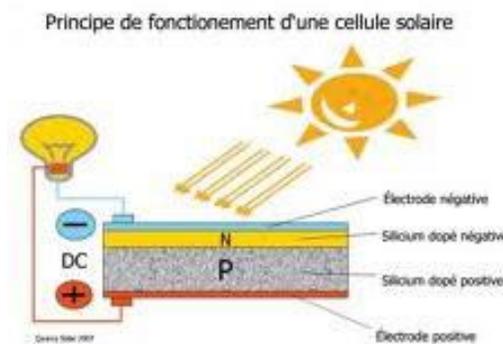


Figure 10. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Caractéristiques de la cellule photovoltaïque:

Les caractéristiques du courant $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque peuvent être modélisées comme suit :

$$I(U) = I_{ph}(\phi) - I_s \left(\exp\left(\frac{eU}{nKT}\right) - 1 \right) - \frac{U + I * R_s}{R_{sh}}$$

Avec

$I(U)$: le courant disponible en fonction de la tension U ;

U : la tension aux bornes de la jonction ;

$I_{ph}(\phi)$: le courant généré par la photopile, c'est le courant de court circuit, ce courant est proportionnel au flux lumineux ϕ et à la température ;

I_s : courant de saturation de la diode;

n : coefficient d'idéalité de la diode ;

$K(J.K^{-1})$: la constante de Boltzmann ;

$T (K)$: la température effective de la cellule ;

$e (C)$: la charge de l'électron ; $KT/e = 26 \text{ mV}$ à 300 K (27° C) pour le silicium ;

$R_{sh}(\Omega)$: la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction ;

$R_s(\Omega)$: la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

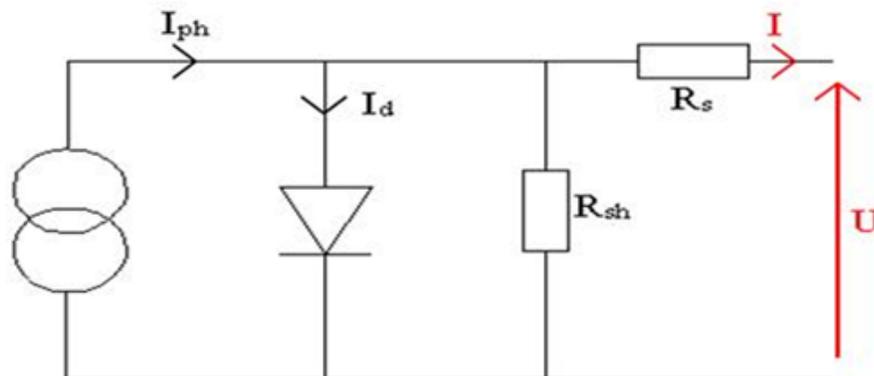


Figure 11. Schéma caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

Cette représentation schématique de la photopile est idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}). Les cellules (photopiles) les plus répandues actuellement sont à base du silicium (différence de potentiel 0,6V). Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile (voir figure 12):

- La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend du semiconducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. Elle a pour effet une chute de tension aux bornes de la cellule;
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. Elle a pour effet une diminution du courant sortant de la cellule.

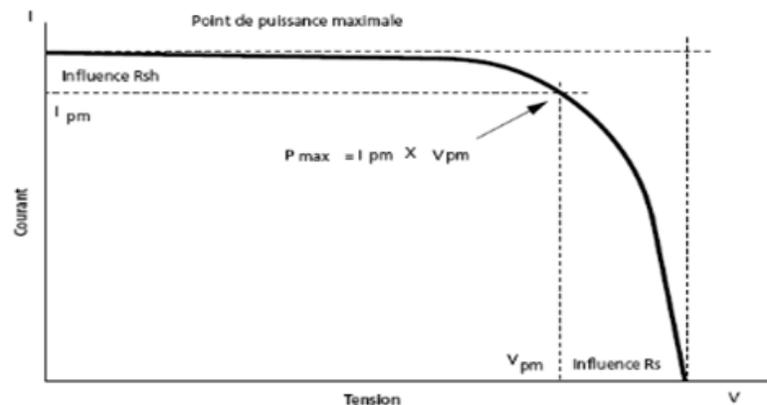


Figure 12. Influence des résistances R_s et R_{sh} sur la caractéristique I-V de la cellule.

Influence de l'ensoleillement et de la température

Nous avons vu que le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (ϕ). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P-N du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux (ϕ). Ceci implique que premièrement, la puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à

l'éclairement et que deuxièmement les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

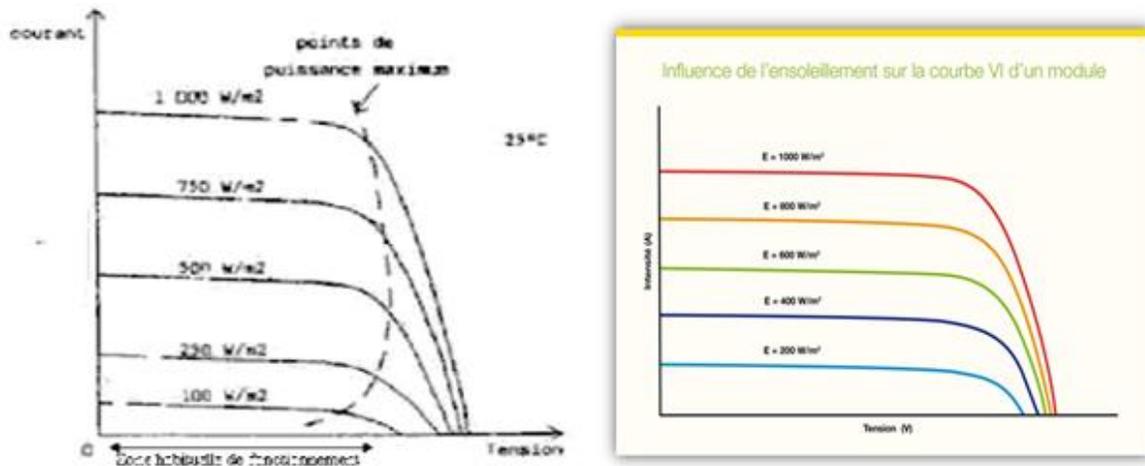


Figure 13. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I-V de la cellule.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant tension d'un semi-conducteur.

Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0,025\text{mA}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ alors que la tension diminue de $2; 2\text{mV}/^\circ\text{C}/\text{cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0,4\%/^\circ\text{C}$.

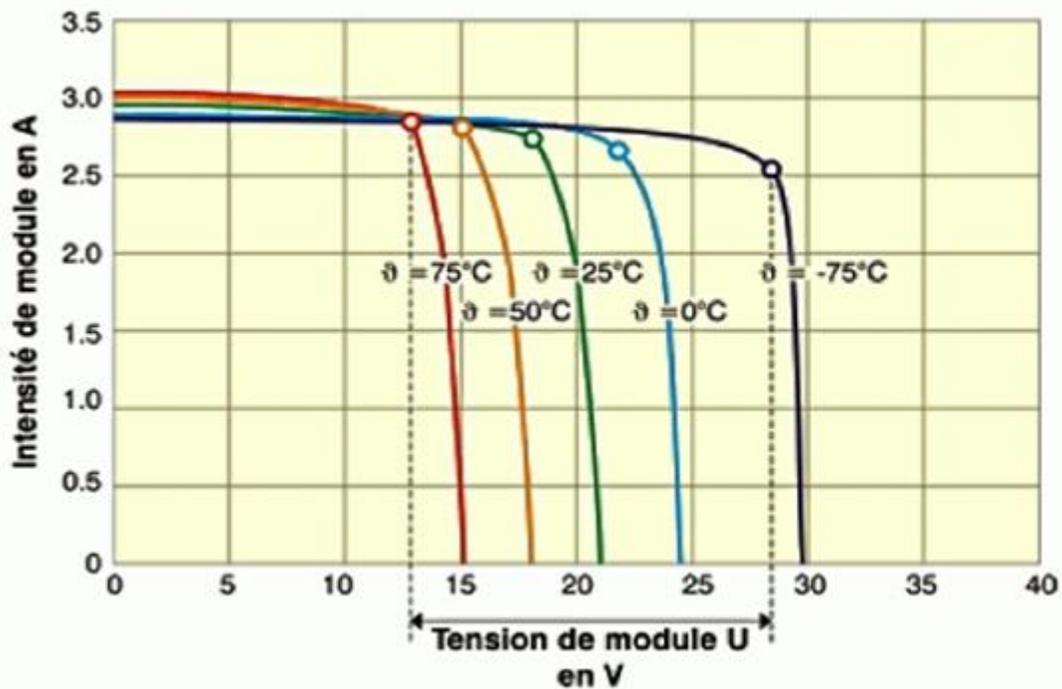


Figure 14. Influence la température sur la caractéristique I-V de la cellule.

Une convention internationale définit la puissance d'une cellule en watt-crête. LeWc (W_p en anglais) est la puissance optimale fournie par la photopile sous des conditions de mesures normalisées, c'est-à-dire pour un ensoleillement de 1 kW/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . Le rendement de conversion (efficacité) d'une cellule est le rapport entre la puissance électrique optimale (P_m) et la puissance solaire reçue à la température de référence.

Ainsi, une simple cellule de silicium monocristallin ayant une surface de 1cm^2 aura une efficacité d'environ 14% et produira environ 1,4 Wc à 0,5 volt.

ii. Le module photovoltaïque

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2), la puissance maximale délivrée par une cellule photovoltaïque en silicium (de surface 150cm^2) est d'environ (2,3 Watt crête) sous une tension de (0,5 V). Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des appareils et applications domestiques et industrielles. Cependant, afin d'augmenter la tension d'utilisation,

les cellules photovoltaïques sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 V et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris (cassure accidentel ou volontaire) et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle afin d'augmenter la tension et/ou l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à l'ombrage, à la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

Association série

En additionnant plusieurs cellules ou plusieurs modules identiques en série, le courant de la branche reste le même tandis que la tension augmente proportionnellement au nombre (N_s) de cellules (modules) en série(voir figure 15).

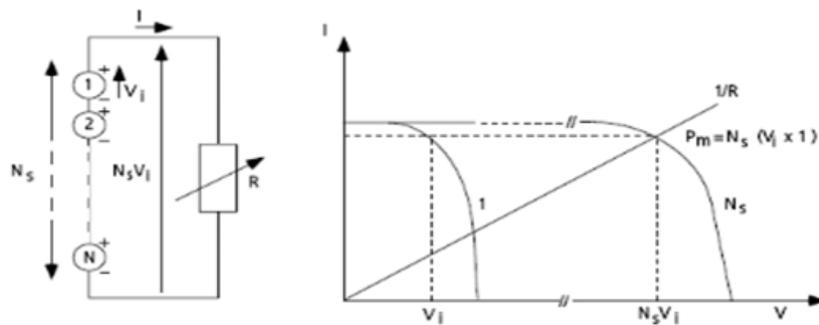


Figure 15. Association de N_s cellules en série.

L'association en série de N_s cellules se résume par l'équation suivante :

$$V_{CO_Ns} = N_s \times V_{CO}$$

$$I_{CC_Ns} = I_{CC}$$

V_{CO_Ns} : Tension en circuit ouvert des N_s cellules en série.

I_{CC_Ns} : Courant en court-circuit des N_s cellules en série.

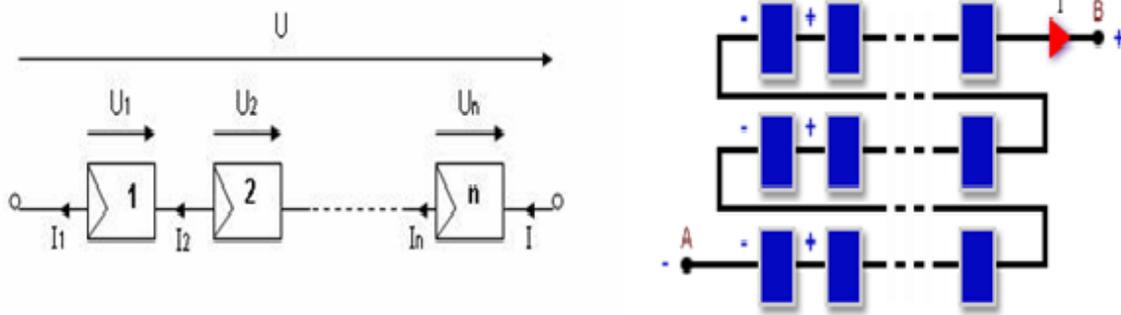


Figure 16. Association de Ns modules en série.

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en séries sera légèrement diminuée.

Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension V_t inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules. La puissance que devra dissiper cette cellule sera de $P = V_t \times I$.

En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (hot spot), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module (figure 17).

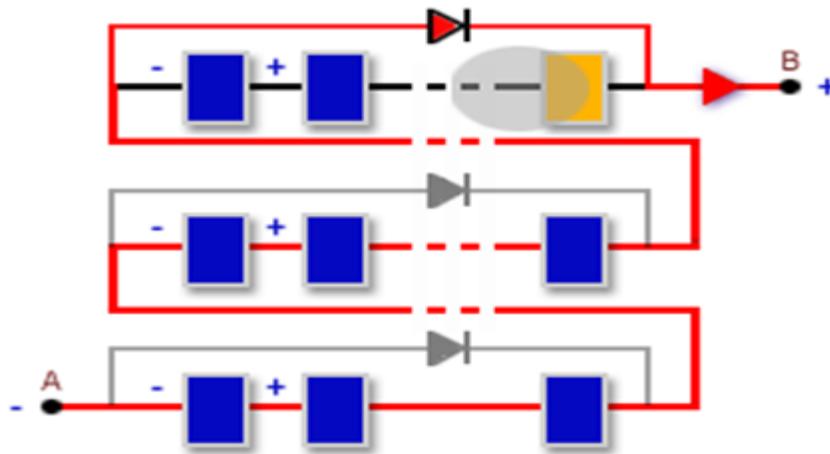


Figure 17. Utilisation de diodes by-pass.

La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. La puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre de watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue pas le rendement des modules (voir figure 18).

Ce type d'association est plus généralement communément utilisé pour les modules photovoltaïques de commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule devient régulièrement grand au fil de l'évolution technologique alors que la tension à ses bornes reste toujours très faible.

Ainsi, l'association en série permet d'accroître la tension aux bornes de l'ensemble donc d'accroître la puissance maximale de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant en série trente-six (36) cellules en série ($V_{CO_NS} = N_s V_{CO} = 360 \times 5V = 18V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau (V_{CO}) proche de celle d'une batterie de 12 V (voir figure 18) ci-dessous.

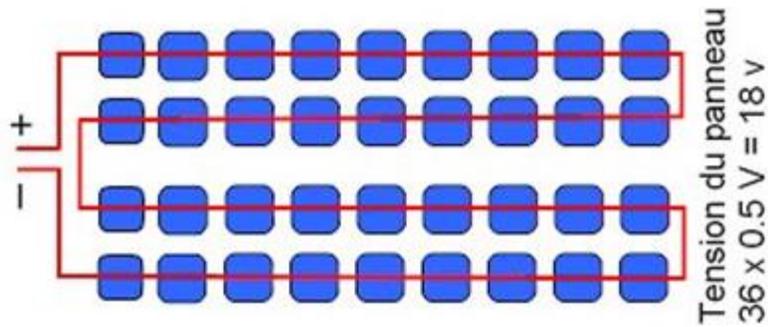


Figure 18. Exemple de panneaux sur le marché.

Association parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre (N_p) de cellules (modules) en parallèle dans la branche (voir figure 19).

L'association en parallèle de N_p cellules se résume par l'équation suivante :

$$I_{CC_Np} = N_p I_{CC} ; V_{CO_Np} = V_{CO}$$

V_{CO_Np} : Tension en circuit ouvert des N_p cellules en parallèle.

I_{CC_Np} : Courant en court-circuit des N_p cellules en parallèle.

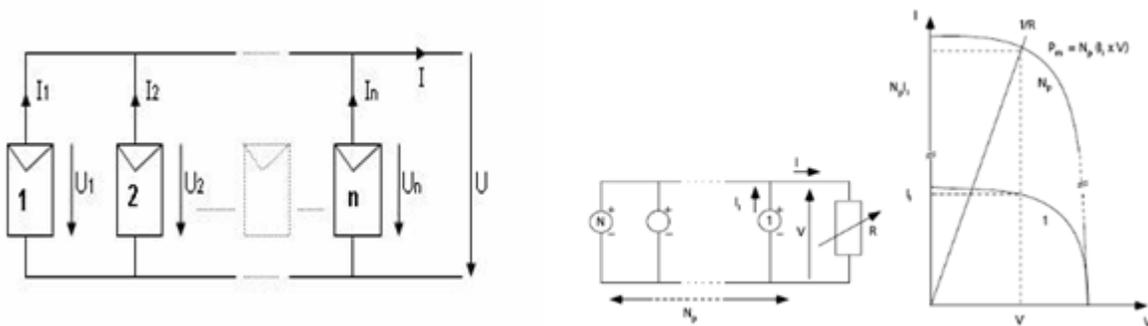


Figure 19. Association de N_p cellules en parallèle.

Si les modules en parallèle ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible.

Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Ainsi, pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

Bien que la cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour (figure 20). Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. En effet, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui traduit une perte de puissance permanente.

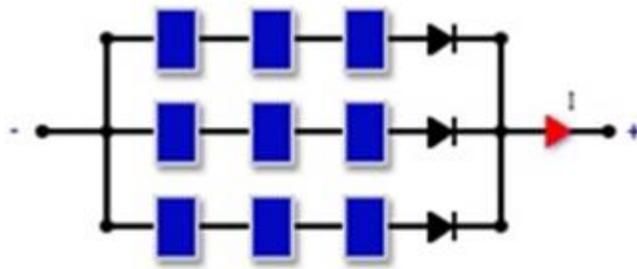


Figure 20. Association de N_p modules en parallèle équipés de diodes anti-retour.

Caractéristiques électriques des modules:

Un module photovoltaïque est généralement caractérisé par sa puissance crête. Elle est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions de mesures normalisées suivantes:

- Lorsqu'il est connecté à une charge optimale ;
- Lorsqu'il reçoit du soleil une puissance de 1000W/m^2 . Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair.
- Lorsque la température à la jonction des cellules est à 25°C .

Il s'agit donc des conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplis dans la pratique.

Rendement d'un module photovoltaïque

Souvent, les vendeurs de matériel photovoltaïque parlent de la puissance crête d'un module mais rarement de son rendement. Or, ce paramètre est évidemment important pour juger de sa qualité.

Heureusement, les deux éléments sont intimement liés. La puissance crête d'un module correspond à la puissance électrique de celui-ci dans des conditions standards (1000W/m², 25C). En connaissant la surface d'un module et sa puissance crête, il est donc aisé de calculer le rendement. Il suffit en fait de calculer la puissance crête par mètre carré et de la comparer à l'ensoleillement des conditions standards : 1000W/m².

Le rendement d'un module est donc égal à sa puissance crête par m² (en W/m²) divisé par 1000W/m².

Exemple:

Un panneau de 200 Wc a une superficie de 1,6m². Sa puissance crête par m² est donc de 200/1,6 soit 125Wc/m². Le rendement de ce panneau est donc de: $125/1000 = 12,5\%$

iii. Les champs photovoltaïques

Les modules photovoltaïques sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter la tension d'utilisation et/ou en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé champ de modules photovoltaïques.

L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fournissent de l'électricité au moment voulu. Elle peut être aussi utilisée en reliant directement les modules à la charge sans batteries (exemple : pour une pompe solaire, l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique. Il est également possible de combiner la sortie du champ photovoltaïque avec d'autres sources d'énergies telles une génératrice ou une éolienne qui serviront d'appoint, si l'ensoleillement n'est pas suffisant.

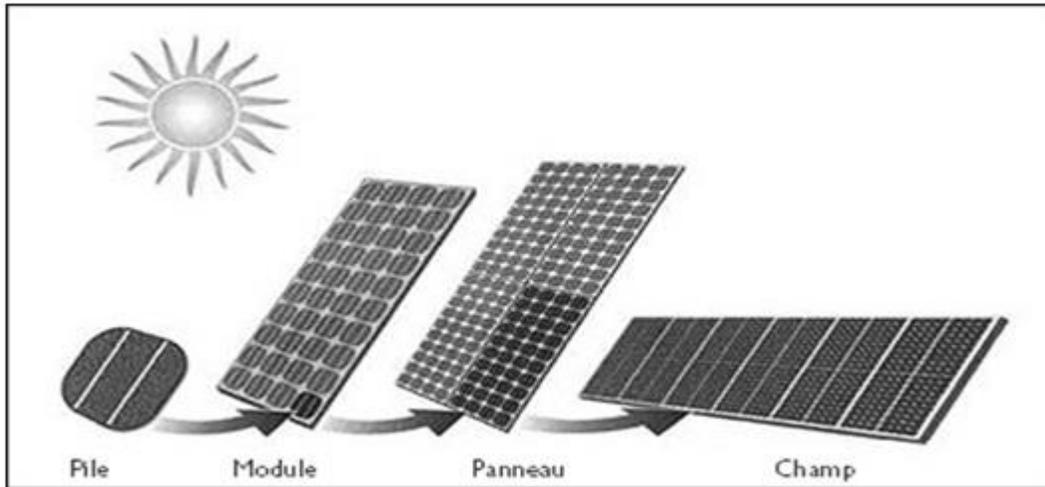


Figure 21. Schéma récapitulatif de l'ensemble: cellule, module, panneau et champ PV.

6. Conclusion:

Ce chapitre fut l'objet d'un bref rappel sur l'origine de cette fameuse énergie solaire qui nous parvient sur terre et qui suscite un grand intérêt dans la vie, notamment dans celle des humains sans oublier son intermittence, les moyens et les techniques dont l'humanité n'a cessé de mettre sur pied pour pouvoir profiter au maximum de cette énergie en la convertissant en énergie électrique notamment, en utilisant le principe de l'effet photovoltaïque découvert pour la première fois en 1839. Nous avons ainsi essayer d'élucider ce principe allant des différentes technologies existant de nos jours, permettant d'obtenir une photopile, élément fondamentale des modules jusqu'aux champs photovoltaïques tout en mettant en évidence l'influence de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique du couple courant-tension de la photopile et le rendement d'un module.

CHAPITRE II : Les Convertisseurs DC/DC de type Boost

1. Introduction

Les convertisseurs de puissance DC/DC sont utilisés dans diverses applications, notamment les alimentations des ordinateurs, les alimentations des engins spatiaux, les équipements de télécommunication ainsi que les entraînements des moteurs à courant continu. Les systèmes photovoltaïques basse tension nécessitent aussi des convertisseurs DC/DC pour fournir plus d'énergie à la charge avec une conversion de tension continue à gain élevé et aussi une adaptation d'impédance afin d'extraire le maximum d'énergie.

Les convertisseurs DC/DC sont des commutateurs statiques, qui peuvent être réalisés à l'aide des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors et les transistors. Ils assurent le transfert d'énergie d'une source de tension continue vers une charge avec des caractéristiques électriques différentes (courant ou tension différents de ceux délivrés par la source).

2. Généralités

On distingue deux types de convertisseur DC/DC couramment utilisés (Lechennadec s.d.):

Les hacheurs dévolteurs : fournissant une tension continue à la sortie avec une valeur inférieure à celle de l'entrée.

Les hacheurs survolteurs : permettant d'avoir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

Il existe d'autres classifications des convertisseurs DC-DC, on peut les différencier aussi selon deux catégories distinctes (Mohammed 2008):

i. Convertisseurs DC-DC non isolés de la source :

On trouve quatre configurations de base :

- ✓ Convertisseur abaisseur "BUCK "

- ✓ Convertisseur élévateur " BOOST " .
- ✓ Convertisseur abaisseur-élévateur " BUCK-BOOST " .
- ✓ Convertisseur "SEPIC" .

- Convertisseur Buck :

Appelé encore hacheur série, il permet de convertir une tension continue en une autre de plus faible valeur. Ce type de convertisseur fréquemment utilisé dans les régulateurs de tension et l'alimentation des circuits électroniques, il peut atteindre jusqu'à 95% de rendement. C'est pour cette raison qu'on trouve couramment des convertisseurs de type Buck dans les ordinateurs réduisant la tension fournie par l'alimentation à une tension plus faible afin d'alimenter le microprocesseur et les différentes composantes. Figure 22- a

- Convertisseur Boost :

Ou hacheur parallèle (Step-Up en anglais) est un convertisseur statique non isolé, il a pour vocation de convertir une tension continue en une autre de plus forte valeur, Il contient deux interrupteurs, une inductance et un Condensateur de sortie. Figure 22- b

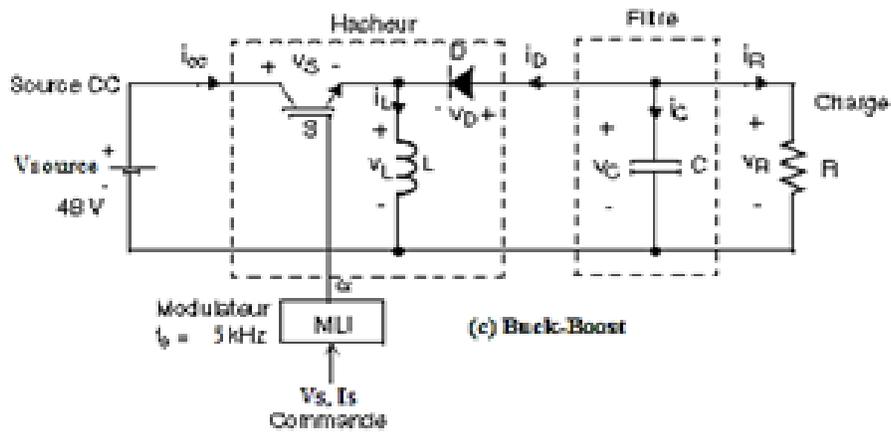
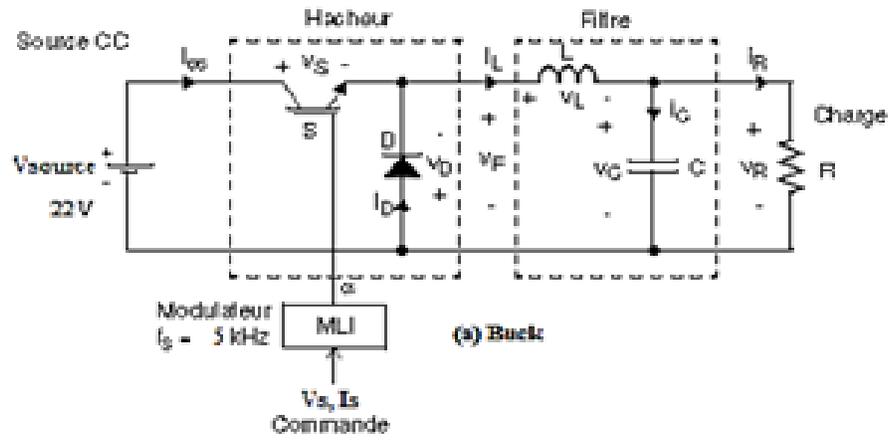
- Convertisseur BUCK-BOOST :

Un convertisseur Buck-Boost est un convertisseur statique qui permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande. Figure 22- c.

- Convertisseur SEPIC (single-ended primary-inductor converter)

Pour le SEPIC, lorsque le MOSFET est activé, l'inductance 1 est chargée par la tension d'entrée et l'inductance 2 est chargée par le condensateur 1. La diode est bloquée et la sortie est maintenue par le condensateur 2. Lorsque le MOSFET est désactivé, les inductances restituent l'énergie à la charge à travers la diode et les condensateurs sont chargés.

le convertisseur SEPIC est alimenté par une source de tension mais, grâce à l'inversion de l'inductance et de la diode, peut alimenter une source de tension. Figure 22- d



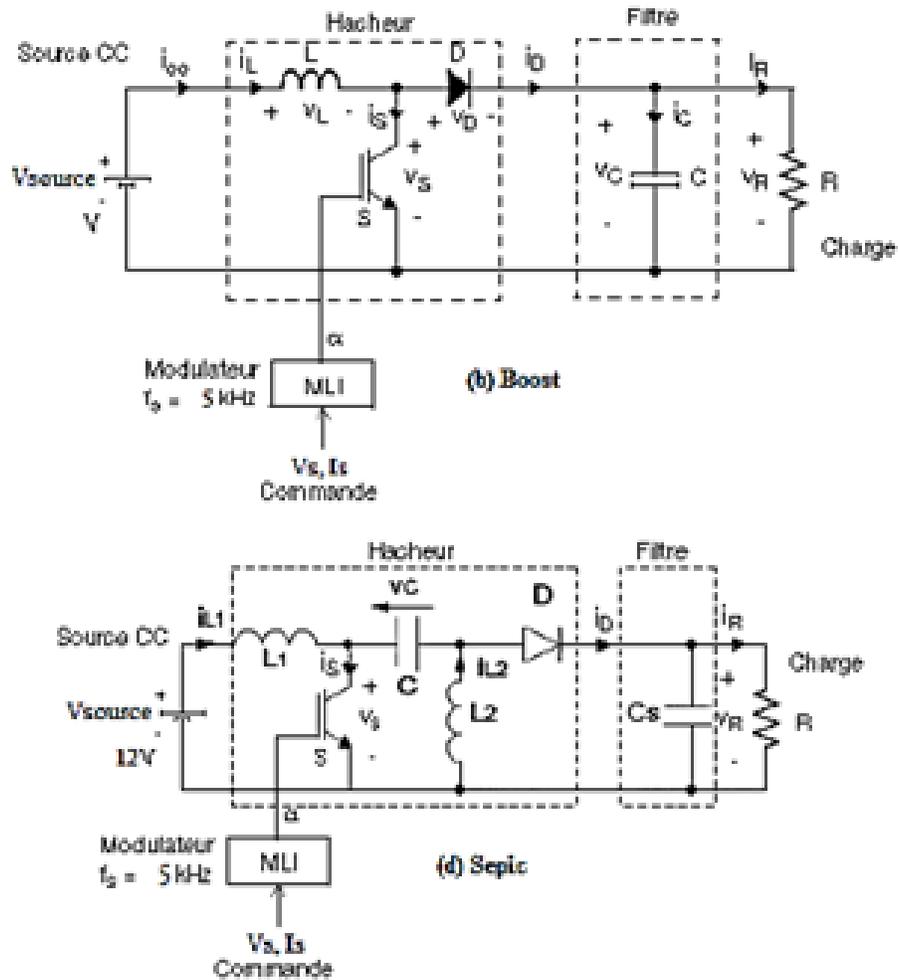


Figure 22. Principales configurations de convertisseurs DC-DC non isolés de la source.

ii. **Convertisseurs DC-DC isolés de la source**

Exemple : Convertisseur de type Flyback :

Le convertisseur de type Flyback est basé sur le principe du hacheur à stockage inductif, c'est un convertisseur statique avec une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie. Son schéma de base est semblable à celui d'un convertisseur Buck-Boost dans lequel on a l'inductance est remplacée par un transformateur (en réalité deux inductances couplées). Le convertisseur Flyback est généralement utilisé dans les applications de puissance (moniteur LCD, télévision CRT, lecteur de DVD, ...). Figure 23 ci-après

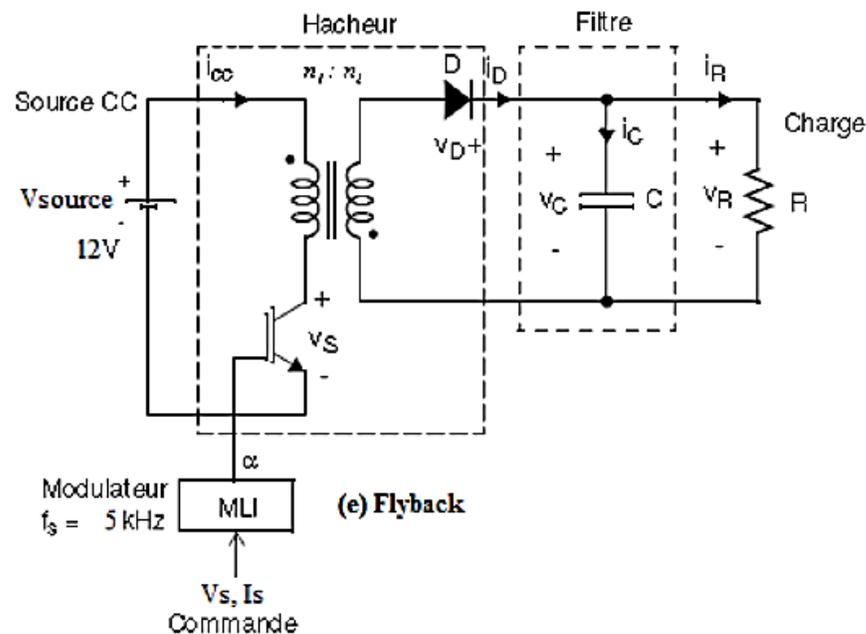


Figure 23. Configuration de base du convertisseur Flyback

3. Pertes dans le convertisseur

L'un des problèmes les plus importants, pour les experts en électronique de puissance est la réduction des pertes et l'amélioration de l'efficacité de la puissance.

L'évaluation des pertes par commutation et par conduction est une étape nécessaire dans le dimensionnement et la conception des convertisseurs de puissances, toute négligence de cette étape conduira à détérioration inévitable des composants du convertisseur.

Une estimation bien établit des pertes par commutation et par conduction permet le dimensionnement des radiateurs adéquats des interrupteurs de commutation et la mise en œuvre des circuits d'aide à la commutation, et donc implicitement l'amélioration du rendement et des performances du convertisseur. La seule méthode rigoureuse pour évaluer les pertes est la mesure expérimentale ; toutefois, elle demande assez du temps et il serait intéressant de prévoir les pertes à partir des données disponibles dans les notices techniques du constructeur. L'importance de cette information a conduit les fabricants à donner des informations de plus en plus complètes dans les notices.

La méthode de calcul des pertes mise en œuvre dans cette partie est basée sur l'extrapolation des informations et spécifications fournies par les constructeurs dans les feuilles techniques des différents composants

i. Pertes par conduction :

Les pertes par conduction sont dues à la résistance des différents composants à l'état passant, Ces pertes par conduction dans les différents composants du convertisseur Boost sont illustrées dans le tableau suivant :

Composant	Pertes par conduction
Diode de commutation	$V_{t0} \cdot \langle I_F \rangle + R_0 \times I_F^2 = 2.52W = 12.4W$
Transistor IGBT par exemple	$V_{CEsat} \times I_{Cmoy} = 50W$

Tableau I. pertes par conduction dans les interrupteurs

Les pertes par effet Joule par conduction dans le transistor IGBT, sont données par le produit de la tension saturée V_{CEsat} et du courant moyen I_{Cmoy} .

D'après la feuille des données en trouve : $V_{CEsat} = 2 V$

ii. Pertes par commutation :

Les pertes par commutation dans le transistor sont données par l'équation suivante:

$$P_{com} = \frac{1}{2} \times V_{CE} \times I_{CEmax} \times (t_f + t_r) \times F$$

F= fréquence de commutation = 10kHz

$$P_{com} = 0.5 \times 100 \times 25.6 \times (45 + 58) \times 10^{-9} \times 10^4 = 1.318 \text{ W}$$

Les pertes par commutation dans la diode sont données par la formule suivante :

$$P_{com} = Q_{rr} \cdot V_F \cdot F \approx 0 \text{ W}$$

En résumé :

	Transistor IGBT	DIODE
Pertes par conduction	50 W	12.4 W
Pertes par commutation	1.32 W	
Total des pertes	67.72 W	

Tableau II.pertes dans le convertisseur Boost

4. Dimensionnement des radiateurs de refroidissement

Tout composant électronique traversé par un courant électrique produit implicitement des pertes thermiques engendrant une élévation de température, les pertes par conduction sont plus faible d'autant que la résistance est aussi faible. Par ailleurs, pour les composants de commutation, il est plus souvent dans le domaine des très hautes fréquences, les pertes par commutation soient plus élevées que celles par conduction et pour des températures qui dépassent la température maximale de la jonction $T_{(\vartheta-j)max}$ le composant en question rencontrera un grand risque de détérioration d'autant plus que sa température est élevée.

Afin de maintenir la température du composant acceptable, il est nécessaire d'ajouter un dissipateur de chaleur, pour savoir si le composant doit disposer d'un radiateur, on peut calculer sa température par la formule suivante :

$$T_{(\vartheta-j)} = P_D \times R_{rth(\vartheta-j)} - T_{amb}$$

En appliquant cette formule sur le transistor IGBT, on en déduit :

$$T_{(\vartheta-j)} = 51.32 \text{ W} \times 40^\circ\text{C/W} - 25^\circ\text{C} = 2027^\circ\text{C} \gg T_{(\vartheta-j)max}$$

Avec : $T_{(\vartheta-j)max} = 150^\circ\text{C}$

5. Synthèse et dimensionnement du convertisseur Boost

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants (Lechennadec s.d.) (Sood 2016).

i. Hypothèse d'étude :

- La tension d'alimentation à l'entrée sera supposée parfaitement continue et constante
- La tension de sortie est supposée suffisamment bien filtrée pour pouvoir la considérer comme continue malgré la présence d'une infime ondulation que nous pouvons la négliger dans cette étude.
- Les interrupteurs sont considérés idéaux (chutes de tension et pertes négligeables devant les caractéristiques électriques du convertisseur).

ii. Règles de synthèse d'un convertisseur statique

Pour concevoir un convertisseur statique, nous suivons les étapes suivantes :

1. Caractériser les entrées sorties pour déduire la configuration de base correspondante.
2. Déduire du cahier des charges les réversibilités des entrées sorties.
3. Identifier, pour la configuration de base correspondante, les séquences de fonctionnement compte tenu des réversibilités en tension et en courant.
4. Observer, pour les différentes séquences, le sens du courant dans les interrupteurs passants et le signe de la tension aux bornes de ceux bloqués pour en déduire les caractéristiques $I(V)$ de chaque interrupteur.
5. Reconnaître chaque interrupteur à partir de la caractéristique statique ou de le synthétiser à partir d'interrupteurs usuels.

6. Exigences du cahier de charge :

Le convertisseur doit assurer l'échange d'énergie entre le champ des panneaux photovoltaïques qui représente la source de tension, et une charge qui n'est que l'onduleur. On en déduit donc que :

- La source à l'entrée du convertisseur est une source de tension continue E .
- La source de tension de sortie est considérée comme une source de tension continue V_s .
- Le convertisseur ne doit pas être réversible, ni en courant ni en tension.

Les règles d'interconnexions imposent :

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée
- Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert
- On ne peut connecter entre elle que deux sources de nature différente
- On ne peut jamais relier deux sources de même nature.

Afin de respecter les règles de connexion entre deux sources de tensions, il faut placer une inductance L entre l'entrée et la sortie du convertisseur, par voie de conséquence la source en tension de l'entrée est transformée en une source de courant.

Pour obtenir une source de tension à la sortie on place un condensateur C en parallèle à la charge.

Une configuration de base est tout schéma permettant toutes les interconnexions possibles entre une entrée et une sortie.

Les règles d'interconnexions fixées ci-dessus imposent deux types de configuration de base distincte (figure 24):

- Les configurations de base à liaison directe lorsque les sources sont de nature différente
- Les configurations de base à liaison indirecte lorsque les sources sont de même nature.

Donc une configuration de base à liaison directe ne permet que l'interconnexion entre source de tension et une source de courant ou inversement, pour cette raison nous adopterons la

structure d'une configuration à liaison indirecte, en modifiant la nature de l'entrée ou de la sortie on obtient les quatre structures de bases suivantes :

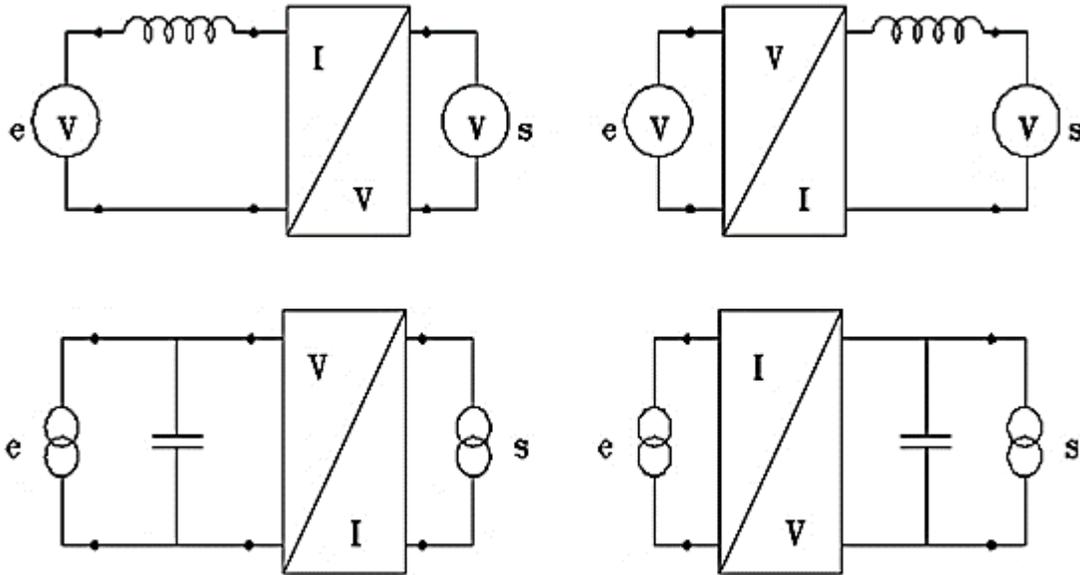


Figure 24. configuration de base à liaison indirecte

7. Synthèse du convertisseur de type Boost :

D'après ce qu'est montré précédemment, la structure du convertisseur est constituée d'une seule cellule de commutation comme il est indiqué dans la figure suivante :

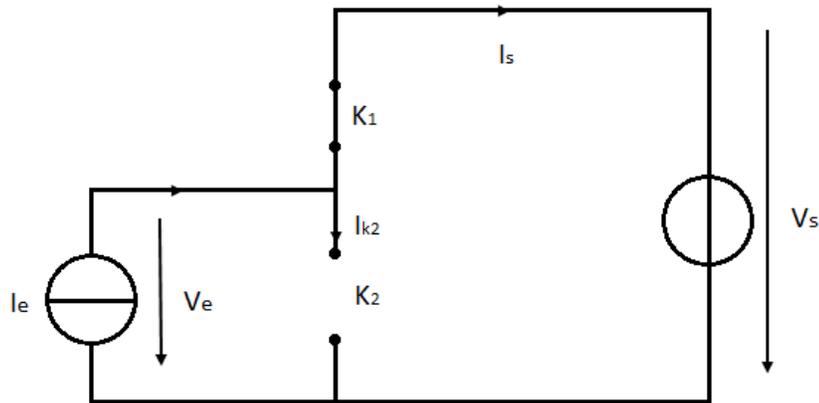


Figure 25. Structure du convertisseur Boost

➤ Commutation des interrupteurs :

K2 est un interrupteur commandable en amorçage et blocage. Il entraîne respectivement l'amorçage et le blocage de l'interrupteur K1 vu que la source de courant ne doit jamais être en circuit ouvert.

➤ Nature des interrupteurs :

L'interrupteur K1 doit supporter une tension inverse et assurer une fonction de non réversibilité du convertisseur. De plus son amorçage et blocage doivent être naturels. En conséquence l'interrupteur K1 ne peut être qu'une diode.

L'interrupteur K2 est commandable en fermeture et en ouverture, donc il ne peut être qu'un transistor ou un thyristor et vu que le découpage se fait à une fréquence très élevée avec une commande MLI, dans ce cas le choix adéquat pour cette application sera l'utilisation d'un transistor MOSFET ou IGBT.

➤ Source d'entrée et de sortie :

Afin de changer la nature de la source en tension de l'entrée en une source de courant, il faut ajouter une inductance en série avec la sortie. Et pour obtenir une source de tension en sortie il suffit de mettre un condensateur en parallèle à la sortie.

Finalement, la synthèse du convertisseur conduit au schéma de la figure ci-dessous, comprenant un interrupteur commandé au blocage et à l'amorçage et une diode.

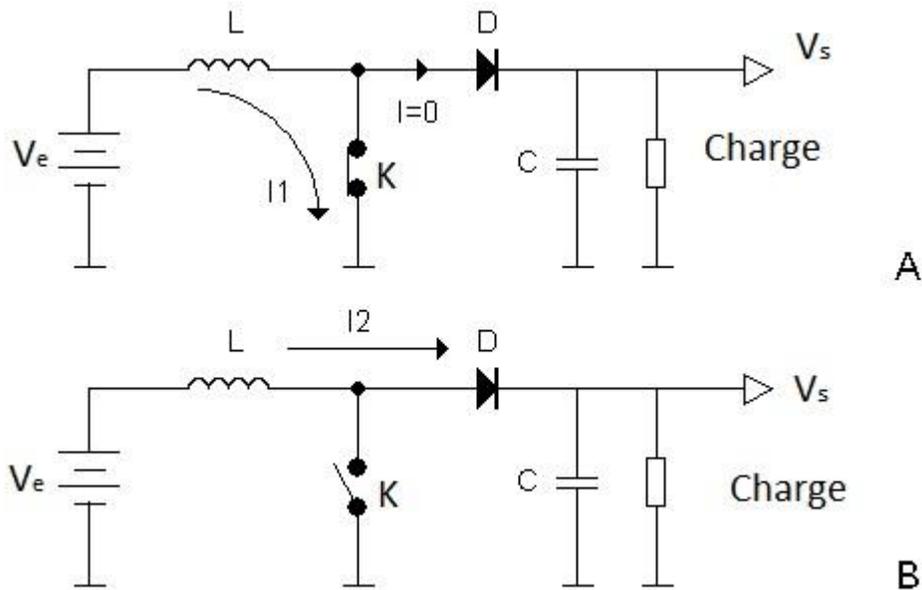


Figure 26. Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'interrupteur conduit pendant le temps T_{on} , au cours duquel l'inductance L emmagasine de l'énergie.

Pendant la durée T_{off} l'inductance restitue à la charge son énergie emmagasinée et étant donné qu'elle est en série avec la source E , on obtient un montage survolteur.

8. Etude du convertisseur de type Boost

La structure du convertisseur Boost représentée sur la figure 26 est constituée principalement par une diode assurant la non réversibilité du courant, une inductance L , un condensateur C et un interrupteur commandable en fermeture et en ouverture.

Suite à la commutation des deux interrupteurs (diode et transistor) deux séquences de fonctionnement sont possibles :

Phase active : phase d'accumulation de l'énergie

Pendant la période $T_{on} = [0, \alpha T]$, le transistor est dans l'état passant, l'inductance L emmagasine de l'énergie magnétique suite à l'augmentation du courant électrique traversant ses bornes. La diode D est bloquée par conséquent la charge est déconnectée de l'alimentation.

Phase roue libre :

De αT à T : le transistor est bloqué, l'inductance L commence à libérer l'énergie emmagasiné pendant la période précédente, et puisqu'elle est en série avec la source d'entrée, Sa f.é.m. s'additionne à cette dernière (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie.

Hypothèse de l'étude :

- Chutes de tension aux bornes des interrupteurs négligeables devant les caractéristiques électriques du convertisseur.
- La capacité du condensateur de sortie sera supposée suffisamment grande pour que la tension à ses bornes puisse être considérée comme constante et fixe jusqu'au prochain cycle.
- Le condensateur et l'inductance sont considérés idéaux.

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

α étant le rapport cyclique, il est compris entre 0 et 1 ;

$T = T_{on} + T_{off}$: période du cycle.

- Conduction continue :

C'est le mode de fonctionnement qui nous intéresse. Dans ce mode le courant traversant l'inductance ne s'annule jamais.

Pour $t \in [0, \alpha T]$: phase active.

Le transistor est fermé, la diode est bloquée, le courant de l'inductance augmente suivant l'équation:

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt}$$

À la fin de la période, le courant I_L augmente de :

$$\Delta I_{L\text{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L} dt = \frac{V_e \times \alpha T}{L}$$

Pour $t \in [\alpha T, T]$: phase roue libre.

Transistor ouvert et diode passante :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_s.$$

$$\Delta I_{L\text{off}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_{\alpha T}^{(1-\alpha T)} \frac{V_e - V_s}{L} dt = \frac{(V_e - V_s) \times (1 - \alpha T)}{L}$$

Expression de V_s et I_s :

- Tension de sortie

En régime permanent, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. il en résulte :

$$I_L = I_{L\text{on}} + I_{L\text{off}} = 0$$

Après simplification on trouve :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha T}$$

- Courant en sortie :

Pendant l'amorçage du transistor : la diode D est bloquée le courant de sortie est nul

Pendant la période de blocage du transistor la diode D conduit afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance L, par conséquent on : $I_s = I_L = I_e$.

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T dI_e$$

$$I_s = I_e(1 - \alpha T)$$

Vu que α est compris toujours entre 0 et 1, on constate que la tension de sortie est obligatoirement supérieure à la tension d'entrée.

On peut remarquer aussi que le convertisseur Boost est un abaisseur de courant vu que I_s est toujours inférieure au courant d'entrée I_e .

- Ondulation du courant ΔI_L :

L'expression de l'ondulation est définie comme suit :

$$\Delta I_L = \Delta I_{Lmax} - \Delta I_{Lmin}$$

A $t = \alpha T$ on a :

$$I_{Lmax} = \frac{V_e \times \alpha T}{L} + I_{Lmin}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_e \times \alpha}{L \times f}$$

Ou encore :

$$\Delta I_L = \frac{V_s \cdot \alpha(1 - \alpha)}{L \cdot f}$$

9. Conclusion

Cette étude présente d'une part des généralités sur les convertisseurs statiques de type DC/DC, d'autre part la synthèse et le dimensionnement de ces convertisseurs et particulièrement le convertisseur survolteur Boost. Ce convertisseur très utilisé dans les installations photovoltaïques nécessitant une élévation de la tension dans l'objectif de minimiser le nombre de panneaux mis en série et en même temps d'atteindre le seuil de la tension exigée par les onduleurs.

CHAPITRE III : Les onduleurs photovoltaïques

1. Introduction

Un onduleur est un convertisseur statique continu-alternatif permettant de produire une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue. son rôle est d'adapter le flux d'énergie entre une source d'alimentation continue (DC) et une charge alternative (AC). Ce dispositif est réalisé à partir des interrupteurs commandés en blocage et en amorçage (thyristors ou transistors) et diodes antiparallèles. Il est commandé à l'aide d'une séquence de commande adéquate en fonction du signal désiré à la sortie de l'onduleur (tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace dans notre cas) (Violaine 2007).

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatifs associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatifs associés sont des onduleurs de tension.

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelque peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion continue/alternatif est le même.

Il existe d'autres tâches essentielles que l'onduleur photovoltaïque doit accomplir :

- La poursuite du point de puissance maximale.
Si la tension du générateur photovoltaïque est inférieure à la tension de sortie désirée, la tension du générateur solaire doit être amplifiée avec un autre élément (Ritnoom 2012).
- La protection de découplage dans le cas où l'onduleur photovoltaïque est connecté au réseau (Kaliamoorthy 2017).
- Le contrôle de l'isolement de la partie CC de l'installation photovoltaïque.

Les onduleurs sont utilisés pour :

- a- Fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquences et amplitudes variables. c'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif par exemple.

- b- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. C'est le cas des alimentations de sécurité destinées à remplacer ou injecter de l'énergie dans le réseau. Dans ce cas, l'énergie est stockée dans des batteries sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

Dans ce qui suit et après étude des différents types d'onduleur, nous nous intéressons à une nouvelle structure d'onduleur survolteur de tension conçue par la mise en mode différentiel de deux hacheurs Boost, commandé via la stratégie de modulation de largeur d'impulsion de type sinusoïdale MLIS.

2. Fonctionnement et étude des performances des onduleurs photovoltaïques.

i. Classification des onduleurs selon la structure

On peut classer les onduleurs selon la forme d'onde à la sortie (Wolfs 2008):

- Onduleur 2 états (tension en créneaux $+U$, $-U$) :

Comme son nom l'indique l'onde de la sortie alterne entre deux valeurs $+U$ et $-U$, en conséquence la valeur efficace de la tension de sortie n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.

- Onduleurs 3 états ($+U$, 0 , $-U$) :

La valeur efficace de la tension de sortie est réglable en agissant sur la durée du créneau.

- Onduleurs en marche d'escalier :

L'onde de sortie est constituée par la somme ou la différence de créneaux de largeur variable et sa forme générale se rapproche au mieux de la sinusoïde.

L'un des plus grands problèmes de ce type est le nombre important d'éléments utilisés pour sa réalisation.

➤ Onduleurs à modulation de largeur d'impulsions :

L'onde de sortie est sous forme de train d'impulsions de largeur et d'espacement variables. Ceci permet de réduire le taux des harmoniques. En effet. Cette tension de sortie qui n'est pas sinusoïdale peut être considérée comme la somme d'un fondamental (que l'on souhaite) et de tensions de fréquences multiples de celle du fondamental, les harmoniques (que l'on ne souhaite pas). L'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur va nous permettre d'éliminer les harmoniques non désirés dans le signal de sortie. Avec un bon dimensionnement, ce filtre de sortie peut nous rapprocher à un signal de sortie sinusoïdale (a. R. M. D. Patil 2015). Le principe de la modulation de largeur d'impulsion MLI, est d'introduire des commutations supplémentaires à fréquence plus élevées que la fréquence du fondamental, pour qu'elle puisse repousser vers les fréquences les plus élevées les harmoniques non désirés de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.

ii. Type d'onduleur

a) Onduleurs autonomes

Les onduleurs dits autonomes sont caractérisés par une tension de sortie de fréquence fixe ou réglable par l'utilisateur, les onduleurs autonomes sont capables d'imposer leurs fréquences quelle que soit la charge qu'il doit alimenter, la fréquence de sortie de l'onduleur autonome ne dépend pas de la charge, ce type d'onduleur n'a pas besoin du réseau électrique pour fonctionner.

Parmi les utilisations des onduleurs autonomes :

- Alimentation de secours
- Alimentation des moteurs alternatifs à champs tournants

b) Onduleurs non autonomes

Contrairement aux onduleurs autonomes, un onduleur non autonome a besoin de l'assistance d'un réseau électrique pour commander ses interrupteurs de puissances qui sont

généralement des transistors IGBT ou MOSFET, la forme d'onde et la fréquence de sortie de ce type d'onduleur sont imposées par le réseau dont il est raccordé. La partie commande des onduleurs non autonomes est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui en commutation naturelle assistée par le réseau, permet un fonctionnement en onduleur.

Ce type d'onduleur est fréquemment utilisé dans les systèmes de récupération de l'énergie pendant les périodes de freinage dans les moteurs électriques

c) Onduleurs hybrides ou intelligents

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le Soleil est au zénith⁷ : elle est donc fluctuante et non synchronisée avec la consommation des habitations. De ce fait, il est nécessaire de :

- Stocker l'excédent de production avant utilisation
- Vendre l'intégralité ou le surplus de sa production ce qui évite les contraintes de stockage de l'excédent de production.

iii. Autres types de classification (norme EN 62040-3)

On peut trouver plusieurs classifications des onduleurs selon le type de leurs commandes (MLI, MLIS), types d'entrée et sortie (onduleur de courant, de tension ou à résonance). La norme EN 62040-3 définit la classification de l'onduleur selon les performances.

<i>XXX</i>	<i>YY</i>	<i>ZZZ</i>
Dépendance de la Sortie par rapport à l'Entrée	Forme d'onde en Sortie	Performances dynamiques en Sortie

Tableau III. Classification des onduleurs selon la norme EN 62040-3

La première partie de la classification (XXX) définit le type d'un onduleur :

- VFI (Voltage and Frequency Independent) : il s'agit d'un onduleur dont la sortie est indépendante des variations de la tension d'alimentation (réseau) et les variations de fréquence sont contrôlées dans les limites prescrites par la norme IEC EN 61000-2-2.
- VFD (Voltage and Frequency Dependent) : il s'agit d'un onduleur dont la sortie dépend de la variation de la tension d'alimentation (réseau) et des variations de fréquence.
- VI (Voltage Independent) : il s'agit d'un onduleur dont les variations de la tension d'alimentation sont stabilisées par des appareils de régulation électroniques/passifs dans les limites de fonctionnement normal.

iv. Applications aux divers fonctionnements

L'**onduleur** est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance ; il a de multiples applications :

- Les alimentations de secours.
- Les alimentations sans interruption.
- Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique.
- les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique.
- Les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical.
- l'alimentation des lampes dites à cathode froide pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides.
- les variateurs de vitesse des machines alternatives : la tension du réseau est redressée puis un onduleur fabrique une tension dont la fréquence et la forme sont réglables.
- Les convertisseurs de tension continue/continue à découpage : la tension continue est d'abord ondulée en haute fréquence (quelques dizaines ou centaines de kHz) puis appliquée à un transformateur en ferrite et enfin redressée (Gerard 1993);
- dans le domaine de la soudure à l'arc les onduleurs sont souvent appelés "inverters", suivant la terminologie anglo-saxonne. Les onduleurs dans les postes à l'arc vont générer

un courant alternatif monophasé (SLIM s.d.) (Phogat 2014) à moyenne fréquence (entre 5 kHz et 20 kHz), ce qui permet d'utiliser des transformateurs élévateurs de courant nettement plus petits et légers que ceux employés traditionnellement à la fréquence du réseau, soit 50 Hz ou 60 Hz. Ces machines se caractérisent par un rapport poids / puissance faible, un déphasage (cosinus φ) très faible et une bonne adéquation en milieu hostile (conditions de chantier, alimentation fluctuante par groupe électrogène, basses ou hautes températures, etc.).

- dans le domaine de la réception hertzienne nomade TV grand public, les onduleurs (12 V > 230 V) permettent de brancher un téléviseur sur la prise allume-cigare.

3. Les topologies des onduleurs photovoltaïques sans transformateur

Auparavant les topologies des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau sont basées sur des transformateurs qui assurent l'isolation galvanique entre les panneaux photovoltaïques et le réseau (S. M. M. Islam 2015.). Prenant en considération que les transformateurs sont couteux, très grand et présentent des pertes, actuellement la recherche se dirige vers des topologies d'onduleur sans transformateur afin de réduire le prix de l'installation toute en assurant l'efficacité (R. C. VARIATH 2010).

Pour utiliser des onduleurs sans transformateurs, il faut tenir compte de deux facteurs importants qui peuvent engendrer des problèmes au niveau des panneaux:

- La tension du mode commun
- Le courant de fuite qui traverse le panneau

on cherche alors à ce que les topologies sans transformateur assurent un courant de fuite minimal.

Dans ce qui suit nous présentons des topologies sans transformateur avec une étude de performance de chacune.

i. Le pont complet :

Cette structure est composée de quatre interrupteurs connectés comme le montre la figure ci-dessous :

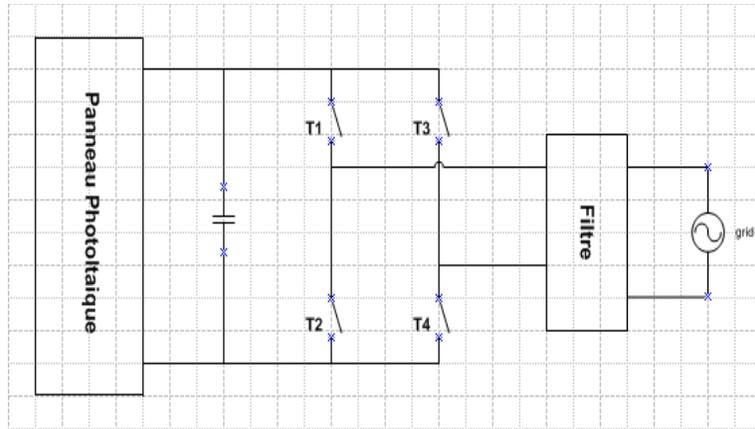


Figure 27. la topologie pont complet

Son fonctionnement se diffère selon le type de la modulation qu'elle subit, soit la modulation unipolaire UPWM ou la modulation bipolaire BPWM.

Fonctionnement du pont complet en appliquant l'UPWM :

Les interrupteurs T1 et T2 commutent à la fréquence 50Hz alors que T3 et T4 commutent à la fréquence haute. Ceci donne une tension de sortie à trois niveaux avec des pertes de commutation faibles. Mais l'inconvénient c'est qu'il présente une tension du mode commun de haute fréquence d'amplitude $V_{dc}/2$ appliquée sur le panneau ce qui génère un courant de fuite causé par la capacité parasite des panneaux photovoltaïques. Cette technique n'est donc pas valable pour les applications d'onduleur sans transformateur.

Fonctionnement du pont complet en appliquant le BPWM :

Les interrupteurs T1 et T4 commutent simultanément de même que T2 et T3, les deux paires commutent à la fréquence de commutation ce qui donne naissance à une tension de deux niveaux. Cette technique résout le problème de la tension du mode commun car elle annule son composant de haute fréquence et par la suite réduit le courant de fuite. Mais afin d'éliminer ce dernier il faut avoir une bonne synchronisation de la commande des interrupteur si non le courant de fuite augmente. Cette technique est donc loin d'être utilisée dans des onduleurs sans transformateur.

ii. Pont complet avec AC bypass : HERIC

Cette topologie se diffère par rapport au pont complet par l'ajout d'un couple de bras en parallèle avec le filtre.

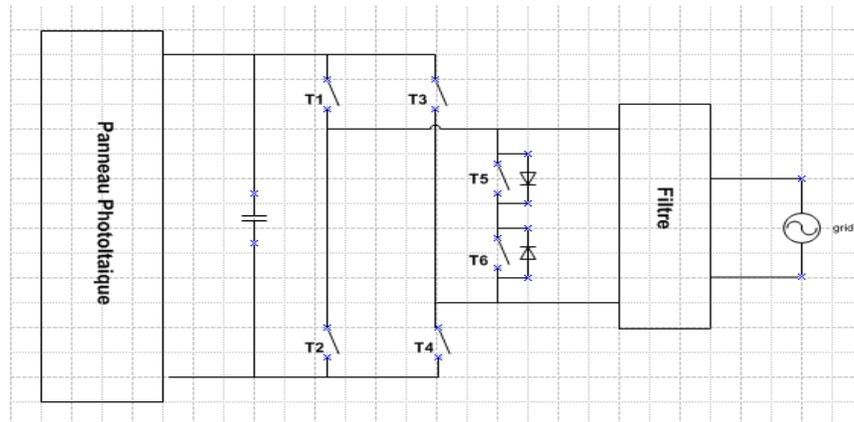


Figure 28. La topologie HERIC

Les interrupteurs du bras ajoutés commutent à la fréquence du réseau de telle sorte que T5 soit passant pendant le demi-cycle positif et bloqué pendant le demi-cycle négatif alors que T6 soit passant pendant le demi-cycle négatif et bloquer pendant le demi-cycle positif. Ceci permet aux diodes antiparallèles de fonctionner pendant la période de roue libre et interdire le passage du courant de fuite vers le panneau. Alors cette topologie permet premièrement d'isoler le panneau du réseau, deuxièmement d'avoir une tension de sortie de trois niveaux et troisièmement la tension du mode commun est égale à $V_{pv}/2$ pendant les deux modes de commutation.

L'inconvénient de cette topologie est le nombre d'interrupteurs élevé par rapport au pont.

iii. Topologie H5 :

Cette topologie conserve le pont toute en ajoutant un cinquième interrupteur T5 qui permet de déconnecter le panneau du pont pendant les périodes de roue libre.

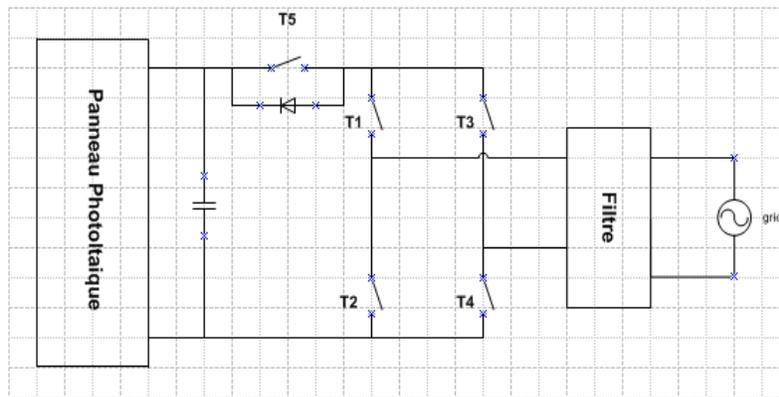


Figure 29. la topologie H5

Les interrupteurs T1 et T2 commutent à la fréquence du réseau tandis que T3, T4 et T5 commutent à la fréquence de modulation. Pendant la période de roue libre positive le courant de fuite passe par l'interrupteur T1 et la diode inverse du T3 et pendant la période de roue libre négative le courant passe par T3 et la diode inverse du T1, ce qui produit une tension de sortie à trois niveaux, une tension du mode commun constante pour les deux périodes et par la suite un courant de fuite minimal.

L'inconvénient c'est qu'un choix inapproprié de l'interrupteur T5 peut engendrer plus de pertes de conduction.

iv. Demi-pont :

Cette topologie est formée par deux interrupteurs et un diviseur de tension capacitif lié au panneau photovoltaïque.

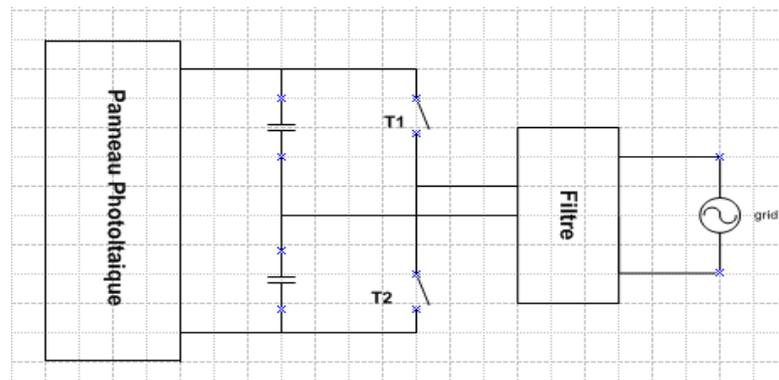


Figure 30. La topologie demi-pont

La liaison du neutre de réseau au point milieu du diviseur capacitif assure une tension du mode commun constante ce qui évite le passage du courant de fuite a travers la capacité parasite du panneau. Cette topologie contient moins de commutateurs comparée au pont et donc il est très simple à envisager mais elle nécessite des commutateurs qui peuvent supporter des tensions importantes et cela présente des fortes pertes de commutation ainsi qu'elle ne permet d'avoir qu'une tension à deux niveaux.

v. NPC :

Cette structure est constituée d'un bras de quatre interrupteurs et deux diodes :

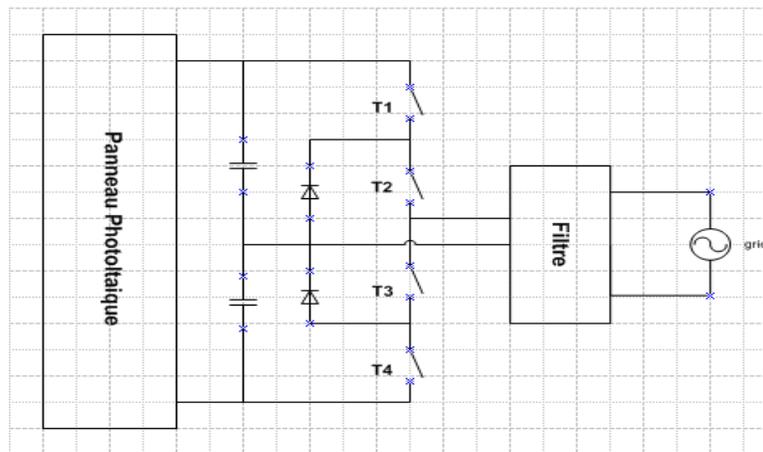


Figure 31. La topologie NPC

Les interrupteurs T2 et T3 commutent à la fréquence du réseau tandis que T1 et T4 commutent à haute fréquence. Les deux diodes fonctionnent en roue libre pour dissiper le courant de sortie ce qui engendre le niveau de tension 0V.

Le NPC fonctionne de même manière que le demi-pont tout en assurant moins d'ondulation du courant, une tension du mode commun constante et plus d'efficacité. Il a aussi les mêmes performances du pont avec la modulation unipolaire car il en résulte une tension à trois niveaux mais il présente aussi des inconvénients comme le nombre des semi-conducteurs utilisés et la tension d'entrée importante.

vi. Pont complet en cascade :

Cette structure se base sur la connexion série des ponts du coté alternatif ou chaque pont possède son propre générateur photovoltaïque.

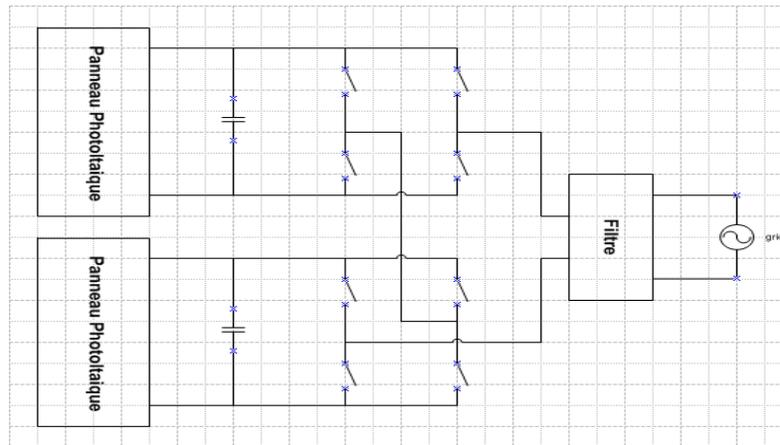


Figure 32. La topologie pont complet en cascade

Cette topologie présente comme avantage l'habilité de générer une tension alternative de valeur importante ce qui permet l'intégration directe au réseau sans l'utilisation d'un transformateur ou d'un convertisseur élévateur car à chaque fois qu'on ajoute des panneaux en série on augmente ainsi le nombre de niveaux de la tension de sortie ($V_s = V_{pv1} + V_{pv2}$). Mais le nombre de cellule utilisé affecte la valeur du courant de fuite (plus de cellules indique un courant de fuite important) de même que le nombre des semi-conducteurs utilisés qui défavorise le coût et la fiabilité à chaque fois qu'on ajoute des pont.

4. L'onduleur survolteur

Dans la littérature, il existe d'autres structures d'onduleurs plus performants que celles citées auparavant, parmi ces structures on trouve : L'onduleur survolteur qui est une structure récente et peu étudiée. Il permet en un seul étage, de transformer une tension continue en une tension alternative filtrée et amplifiée. Cette topologie de conversion est basée sur le principe d'un montage différentiel. On associe deux convertisseurs survolteurs fournissant chacun une tension continue et une composante alternative grâce au mécanisme de commande à modulation de

largeur d'impulsion sinusoïdale MLIS. Les composantes continues sont de même tension tandis que celles alternatives sont sinusoïdales et en opposition de phase.

Le schéma électrique de cet onduleur est donné selon la figure 33 ci-dessous :

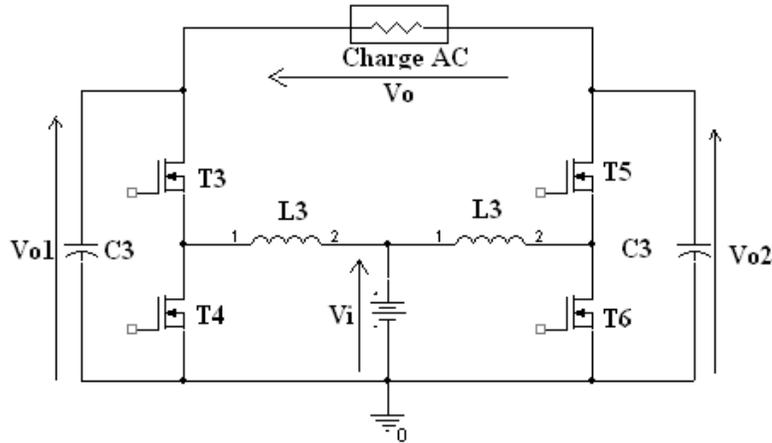


Figure 33. L'onduleur survolteur

Les deux équations donnant les deux tensions de sorties V_{o1} et V_{o2} sont:

$$V_{o1}(t) = V_{dc} + V_{\max} \times \sin(2\pi ft) \quad \text{et} \quad V_{o2}(t) = V_{dc} - V_{\max} \times \sin(2\pi ft)$$

avec V_{dc} est la composante continue, f est la fréquence, et V_{\max} étant l'amplitude maximale de la composante sinusoïdale.

la tension résultante en sortie de l'onduleur est :

$$V_o(t) = V_{o1}(t) - V_{o2}(t) = 2 \times V_{\max} \times \sin(2\pi ft)$$

ainsi la composante continue V_{dc} disparaît en mode différentiel.

5. La commande MLIS

Pour la commande de l'onduleur, plusieurs méthodes ont été élaborées (K. Ghedamsi 2001) (M. Adouane 2009), les plus utilisées sont la technique la logique floue, celle du mode glissant, la commande vectorielle, la technique SHE, de la stratégie de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale et la commande de modulation delta-segma.

La technique MLI de type sinusoïdale sous sa version numérique est généralement inspirée de celle analogique. Son principe de base est représenté selon la figure comme suit :

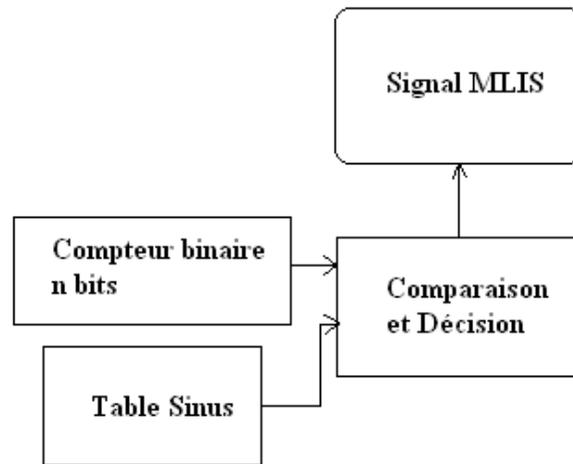


Figure 34. Principe de la MLIS numérique

6. Conclusion

Après une introduction dans laquelle nous avons donné une définition générale des onduleurs, nous avons procédé à une première classification des onduleurs selon la forme d'onde délivrée à leurs sorties puis rappelé quelques circuits de base à cet effet en fonction des différentes manière dont ces circuits sont commandés. L'accent est mis ensuite sur les onduleurs survoleurs et leurs avantages par rapport aux anciennes structures. Puis, nous avons présenté une deuxième classification des onduleurs cette fois-ci, en fonction de leurs utilités avant de terminer par une brève description la commande MLI qui est sans doute la plus utilisée dans le monde de la technologie des onduleurs à cause de la facilité d'extraire de son signal de sortie, un fondamental quasiment sinusoïdal grâce à un filtre d'ordre moins élevé.

CHAPITRE IV : Régulations et optimisation

1. Introduction

Pour un éclairement et une température donnés, le courant en court-circuit I_{cc} est pratiquement constant (le système étant assimilable à une source de courant), tandis qu'en circuit-ouvert la tension V_{co} est pratiquement constante (le système étant assimilable à une source de tension). On peut dire donc que le générateur photovoltaïque n'est ni vraiment une source de tension ni une source de courant. Ceci rend le choix de l'onduleur (de tension ou de courant) un peu difficile. D'après la caractéristique $P(V)$, le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance est maximale PPM (ou **MPP pour Maximum Power Point**) (Boitier V 2008) (Thanh 2001). En régime permanent, la tension et le courant sont considérés comme constants et donc l'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiel.

Une deuxième tâche ou fonctionnalité de l'onduleur photovoltaïque est la poursuite du PPM du système pour assurer l'extraction du maximum de puissance à chaque instant.

Notre travail discute la synthèse d'un adaptateur MPPT pour se placer à tout instant au point de puissance maximale et d'un régulateur de tension PI pour assurer une tension constante à l'entrée de l'onduleur. Les résultats ont été validés par simulation sous Matlab-Simulink.

2. Régulations

i. Techniques de la régulation MPPT

Dans la littérature il existe plusieurs techniques permettant la recherche du point de puissance maximale d'une installation photovoltaïque. Par ailleurs parmi les méthodes les plus utilisées dans le monde industriel on peut citer :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)
- Contrôleur flou

Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente).

a) Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale et celle en circuit ouvert est approximativement constant, cela est la base de l'algorithme a tension constante qui peut se traduire par :

$$\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \approx cst < 1$$

L'algorithme CV-MPPT est l'algorithme le plus simple en terme d'implantation. Pour le mettre en œuvre, on isole le panneau solaire temporairement pour mesurer V_{oc} et le MPPT corrige le point de fonctionnement en utilisant l'équation ci-dessus.

b) Algorithme du Courant constant (Constant Current)

D'une façon similaire à l'algorithme précédent, Cet algorithme permet d'obtenir un rapport constant du courant de MPP sur le courant de court-circuit.

$$\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \approx cst < 1$$

Pour mettre en application cet algorithme on utilise un commutateur qui est relié aux bornes de l'entrée du convertisseur, quand ce commutateur est activé on mesure le courant de court-circuit et on calcule le courant optimal et la MPPT corrige le point de fonctionnement en utilisant l'équation ci-dessus.

Cet algorithme est rarement utilisé, d'une part parce que les autres méthodes sont plus performantes et présentent moins de risque, et d'autre part, il est plus simple de mesurer des tensions et mettre des modules photovoltaïques en circuit ouvert, que de mettre un module photovoltaïque en court-circuit.

c) Méthode de perturbation & observation

Le principe de cette commande est de générer des perturbations en réduisant ou en augmentant le rapport cyclique α du convertisseur DC-DC et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV. Le principe de cette méthode est illustré par la figure suivante :

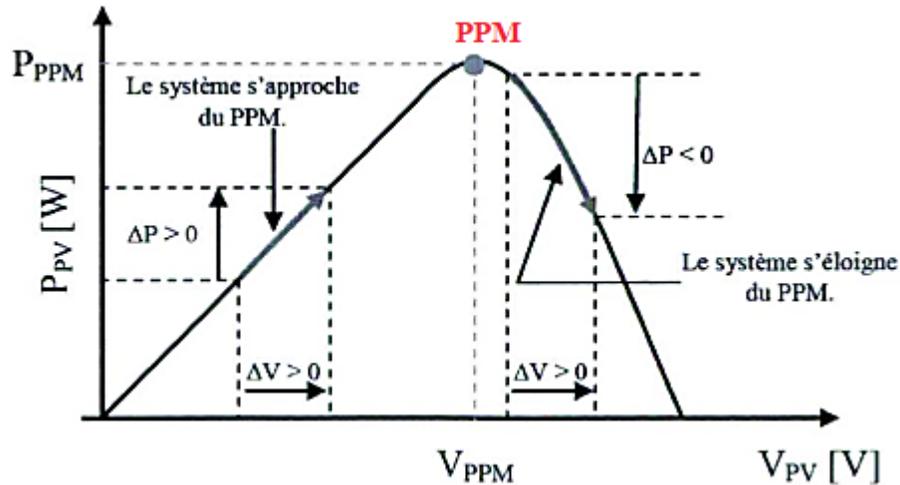


Figure 35. Schéma du principe de la méthode P&O

L'algorithme de cette commande est donné par la figure ci-dessous :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, la tension est augmentée, cela induit une augmentation du rapport cyclique $\alpha(k) = \alpha(k-1) + C$. C étant une constante d'incrément
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, la tension est réduite cela se traduit par une diminution du rapport cyclique : $\alpha(k) = \alpha(k-1) - C$.

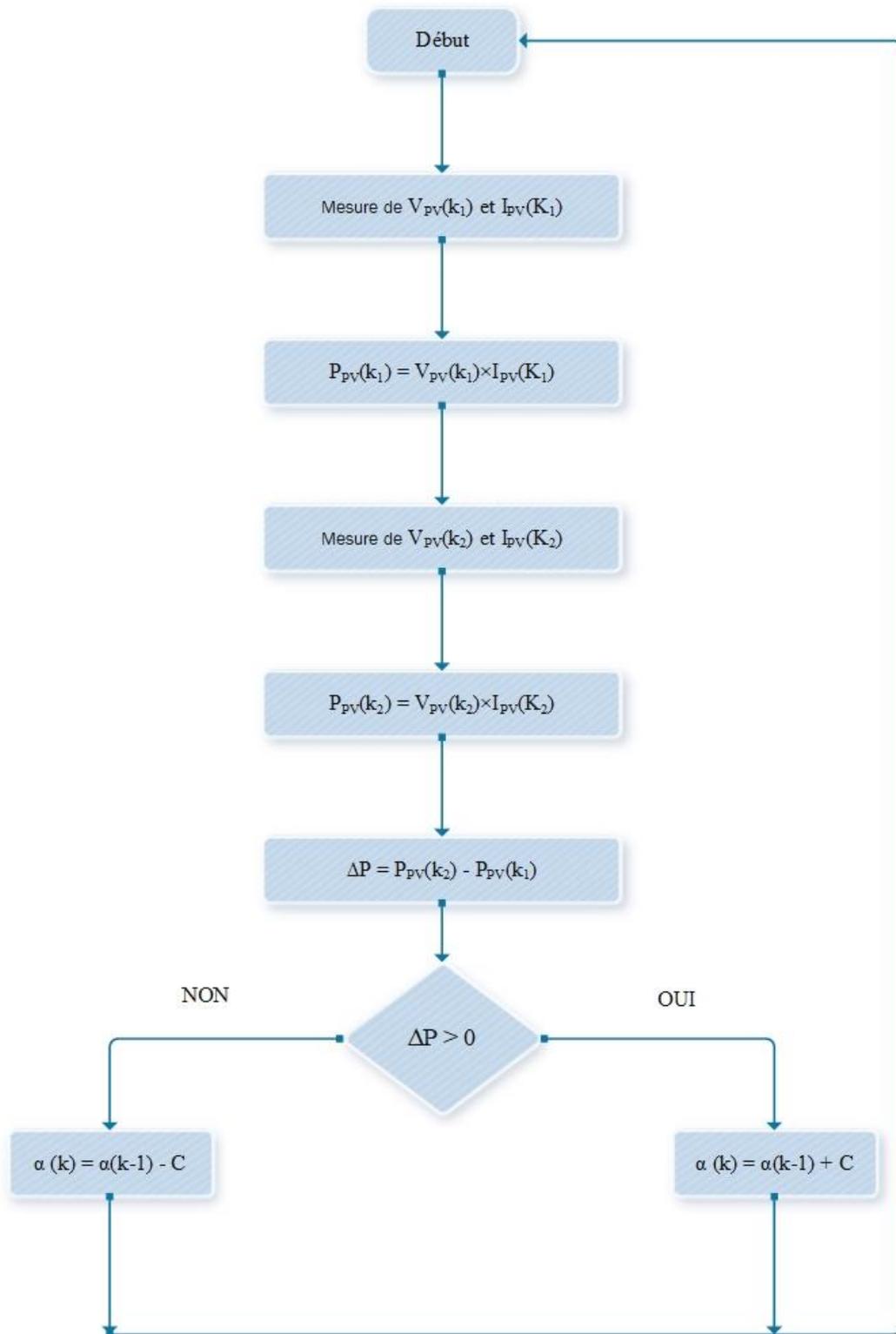


Figure 36. Algorithme de la Perturbation et Observation (P&O)

ii. Régulation de la tension à la sortie du Boost

Tout système photovoltaïque est affecté par la variation de la température et l'irradiation. De ce fait dans la majorité des application nécessite d'extraire à partir des panneaux solaires une puissance suffisante pour alimenter une motopompe d'une puissance nominale de 1.1KW et d'une tension de 240V. Pour ce faire, on a insérer un hacheur élévateur doté d'une régulation PI dans la chaine de production afin de transférer la puissance nécessaire à l'application envisagée tout en gardant une tension constante à la sortie du boost.

Notre travail consiste à dimensionner l'hacheur élévateur ainsi que le choix et le paramétrages du régulateur de la tension. Les résultats ont été validés par simulation sous Matlab-Simulink

La variation des conditions climatiques implique la variation de la tension de sortie des panneaux, ceci engendre la variation de V_s pour un rapport cyclique D constant. Afin de maintenir la valeur de V_s à la valeur désirée on agit sur le rapport cyclique D à partir d'un régulateur PI.

Un système d'ordre n a n pôles et sa réponse à une impulsion ou à un échelon comprend donc un certain nombre de termes correspondants aux pôles réels et aux paires de pôles complexes conjugués.

Lorsque le temps s'écoule, ces termes s'éteignent les uns après les autres, les pôles les plus petits correspondant aux termes qui durent le plus longtemps. Ces pôles sont les pôles dominants. Or Les pôles d'un système en boucle fermée avec un régulateur dépendent des paramètres du régulateur, nous pouvons donc, par le bon choix des paramètres, imposer des pôles en boucle fermée qu'on peut déduire du comportement désiré (amortissement, dépassement et temps de réponse).

Les paramètres du régulateur proportionnel intégral ont été calculés par la méthode des pôles dominants afin de conférer au système bouclé un temps de réponse plus réduit par rapport à celui du système en boucle ouverte avec un coefficient d'amortissement de 0.7.

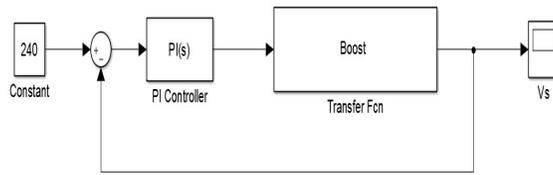


Figure 37. Boucle de régulation

3. Choix et calcul du régulateur de la tension du bus continu

Ce correcteur permet de stabiliser la valeur de la sortie du système à la valeur de la consigne le plus rapidement possible. Sa fonction de transfert est donnée par (R. Mitulkumar Dave, Analysis of Boost Converter Using PI Control Algorithms 2012) (A. Durgadevi, An Improved PI Regulator Based Load Regulation in Constant Photovoltaic Power Supply System 2012) :

$$C(p) = A * \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \quad (4)$$

Où

A : Gain de correcteur.

T_i : Constante d'intégration.

Le dimensionnement du régulateur fait appel à la modélisation mathématique du hacheur. Ainsi, la fonction du transfert qui lie la tension de sortie V_s au rapport cyclique D est donnée par (R. Naim, H_∞ control applied to boost power converters 1997).

$$\frac{V_s}{D} = \frac{V_s^2 (1-D)^2}{V_e LC} * \frac{\left(1 - \frac{LV_s^2}{RV_e^2} p\right) (1 + R_c C_s)}{p^2 + \frac{(1-D)^2}{RC} p + \frac{(1-D)^2}{LC}}$$

Où

R : Résistance de charge.

R_c : Résistance interne du condensateur.

C_s : valeur de la capacité de sortie.

Après l'implantation du modèle du hacheur sous Matlab Simulink, la création du schéma bloc de la boucle de régulation et la détermination des paramètres du régulateur proportionnel intégral choisi. Les paramètres du régulateur PI ont été calculés par la méthode des pôles dominants.

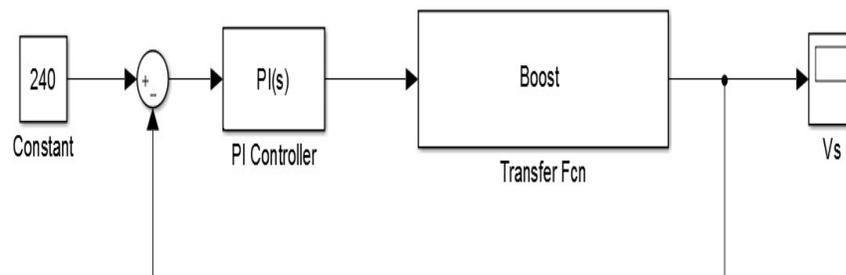


Figure 38. Boucle de régulation

4. Resultats de simulation

La chaîne de production de base utilisée contient un bloc modélisant les panneaux photovoltaïques, le hacheur élévateur et une charge.

Pour vérifier l'effet du régulateur choisit on a simulé deux chaînes de production de deux types de commandes différentes. La première délivre un rapport cyclique constant. Tandis que la seconde, elle fournit un rapport cyclique variable calculé par le régulateur.

i. simulation de la chaine de production sans régulation

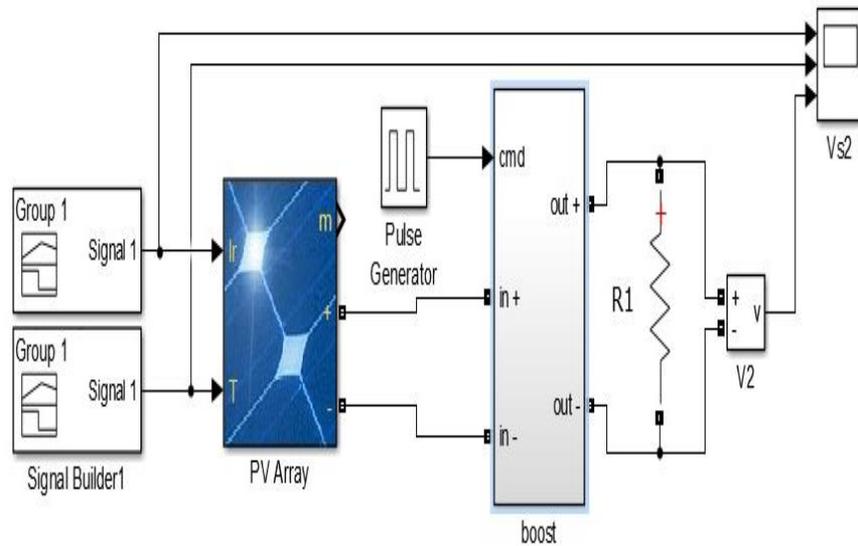


Figure 39. chaine de production sans régulation

Les résultats de simulation sont donnés par la figure 40 :

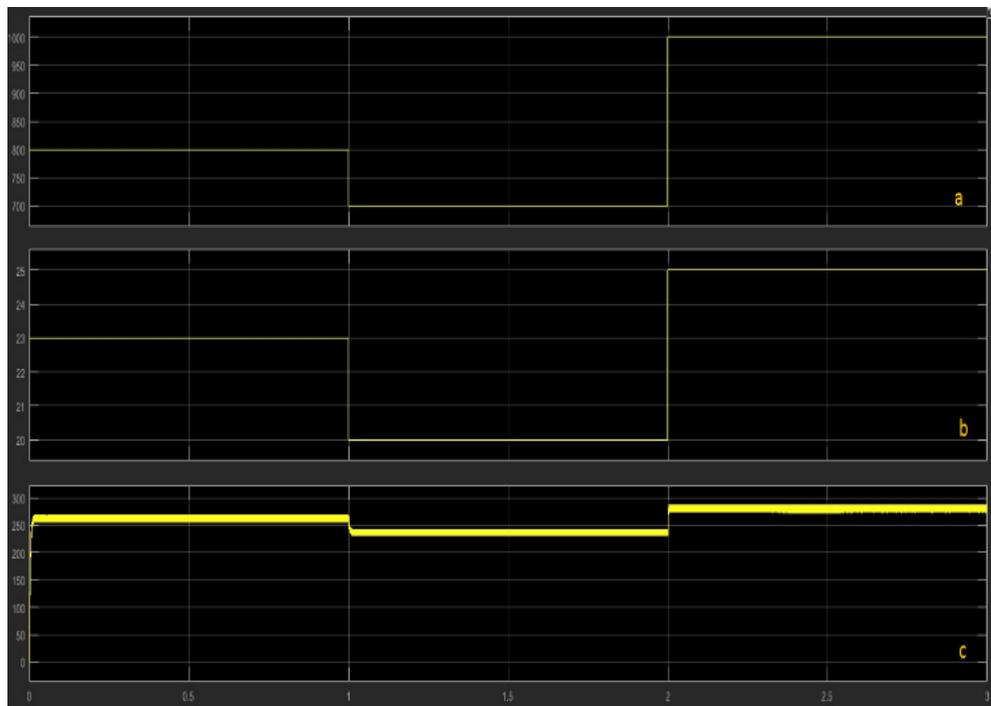


Figure 40. Simulation de la chaine sans régulation

a. Irradiation, b. Température, c. Tension de sortie du hacheur

Les résultats de simulation montrent que la valeur de la tension de sortie de hacheur varie en fonction de la variation de la température et de l'irradiation.

ii. simulation de la chaine de production avec régulation

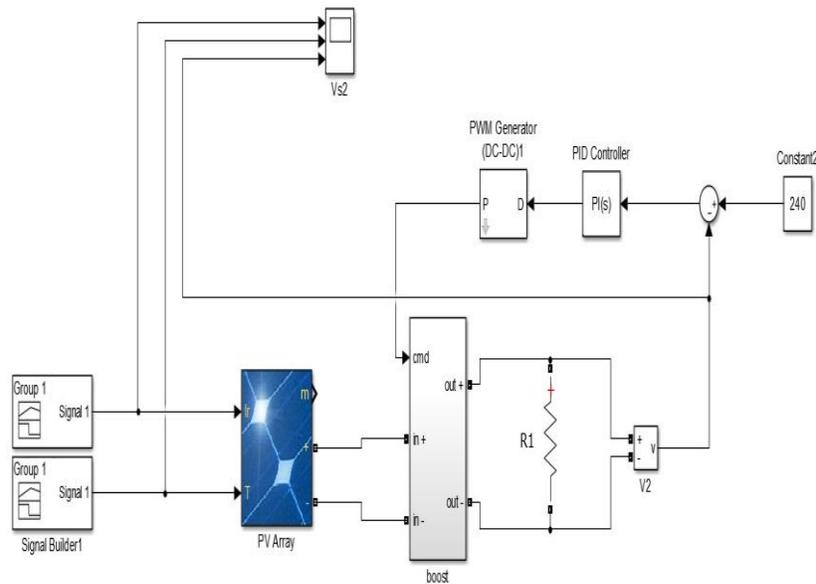


Figure 41. chaine de régulation

Les résultats de simulation sont donnés par la figure 42 :

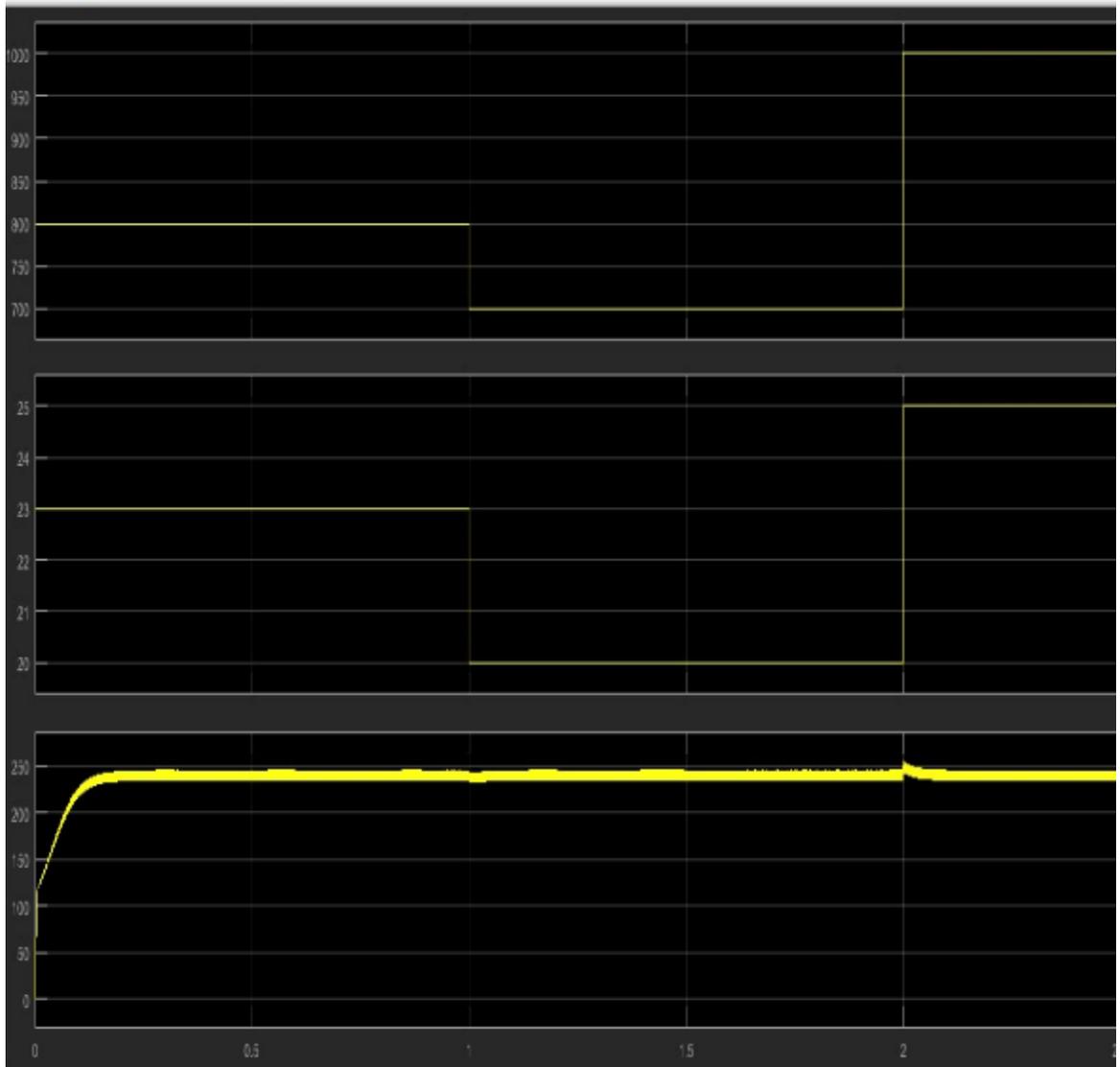


Figure 42. : Simulation de la chaîne avec régulation
Irradiation, b. Température, c. Tension de sortie du hacheur

La simulation prouve que la variation de la température et l'irradiation affecte peu la tension de sortie du hacheur après l'ajout du régulateur PI.

5. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les deux régulateurs MPPT basé sur la méthode Observ & Perturb (J. Jiang s.d.) pour l'extraction maximale de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque et l'algorithme de régulation proportionnel intégral de la tension de sortie du boost. L'algorithme MPPT robuste implémenté permet entre autres de réduire les oscillations de l'algorithme traditionnel 'Perturbation et Observation' d'une part par la réduction du pas de la variation de la consigne et d'autre part en gardant la consigne correspondante au point optimum au bout d'environ de 26 secondes, durée pendant laquelle les conditions climatiques restent presque inchangées. Afin de tester, en simulation, les performances de la boucle de régulation PI, nous avons procédé à des variations de la température et de l'irradiation. La tension de sortie du hacheur élévateur suit, après un certain temps bien réduit et sans trop s'éloigner de la valeur désirée, la valeur de référence. Les résultats de simulation obtenus prouvent que ce système permet effectivement de poursuivre continûment le point de puissance maximale que peuvent débiter ces panneaux solaire et de garder une tension de sortie constante.

CHAPITRE V : Simulations et expérimentations

1. Introduction

Les différents étages étudiés précédemment ont été simulés pour les structures retenues. Vu l'importance de la chaîne de conversion photovoltaïque résultante et le caractère innovant de ses constituants elle mérite d'être validée et testée expérimentalement. Dans ce qui suit et pour des fins de vérification nous présentons tous les essais de simulation pour une puissance de 300W. Ces essais portent surtout sur l'extraction maximale de l'énergie, la régulation et la qualité de l'onde de sortie de l'onduleur. Finalement et après validation par simulation, nous avons passé à l'étape expérimentale sur maquettes d'essais et réalisation sur circuits imprimés des convertisseurs statiques et de leurs commandes.

2. Résultats de simulation et expérimentation.

iii. Simulation

Dans cette partie, des simulations sur les modèles mathématiques du boost et de l'onduleur sont réalisées autour d'un point de fonctionnement donné pour des conditions climatiques variables (température et irradiation solaire)

Les objectifs de ces simulations sont multiples :

- ✓ Recueillir des données pour pouvoir analyser le comportement dynamique du système en fonction des paramètres ;
- ✓ Valider tous les modèles des différentes composantes du système.
- ✓ Vérifier et ajuster le dimensionnement des composants du Boost et de l'onduleur.
- ✓ Vérifier et valider les algorithmes des régulations étudiées auparavant.

L'adaptateur MPPT et le hacheur élévateur

Nous présentons premièrement le hacheur Boost utilisé pour les deux premiers étages : le MPPT et le hacheur élévateur (Figure 43).

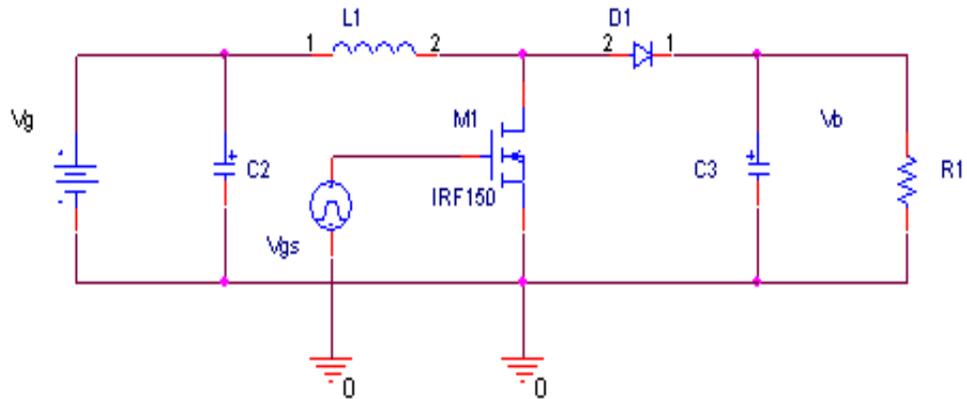


Figure 43. le hacheur BOOST

Caractéristiques du premier hacheur (Dondon s.d.) (J. Jiang s.d.) (Lechennadec s.d.) (Texas instruments 2014):

Inductance : $0.23\mu\text{H}$

Capacité : $160\mu\text{F}$

Mosfet : IRFP250

Diode : BYT30P-1000

Caractéristiques de deuxième hacheur :

Inductance : 0.14mH

Capacité : $200\mu\text{F}$

Mosfet : IRFP250

Diode : BYT30P-1000

Après simulation nous obtenons les formes d'ondes suivantes pour différentes valeurs du rapport cyclique du signal de commande.

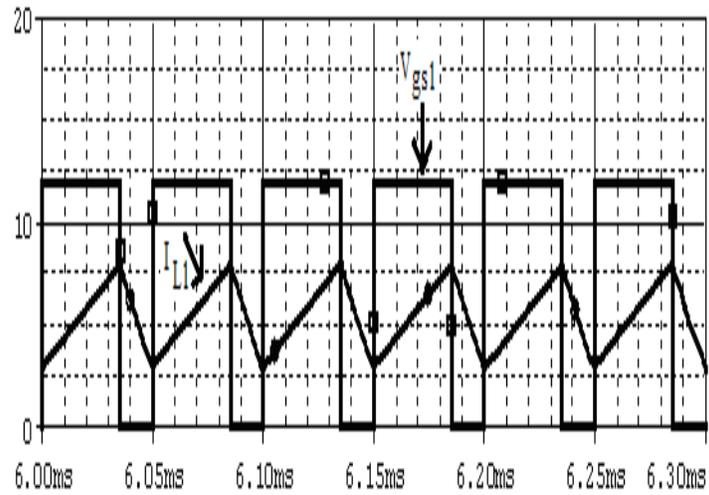


Figure 44. Courant I_{L1} dans l'inductance $L1$ et le signal de commande V_{gs1}

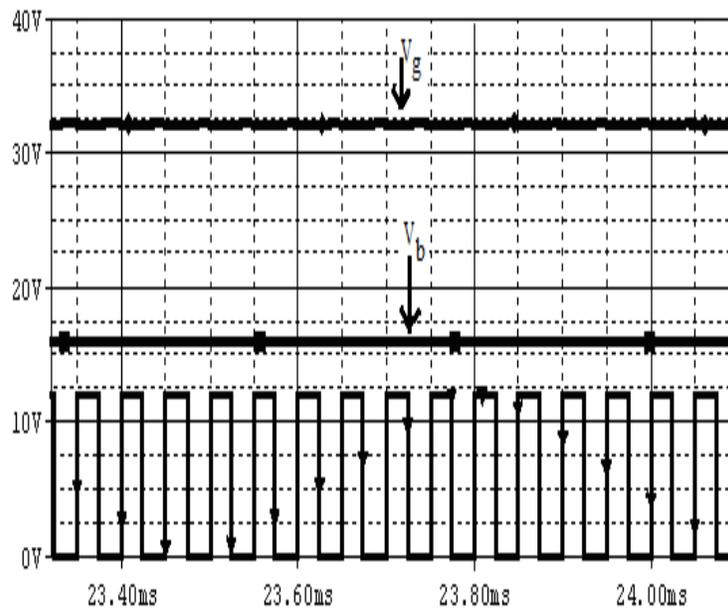


Figure 45. Tensions de sortie V_b , d'entrée V_g et du signal de commande V_{gs1} pour $\alpha_1=50\%$.

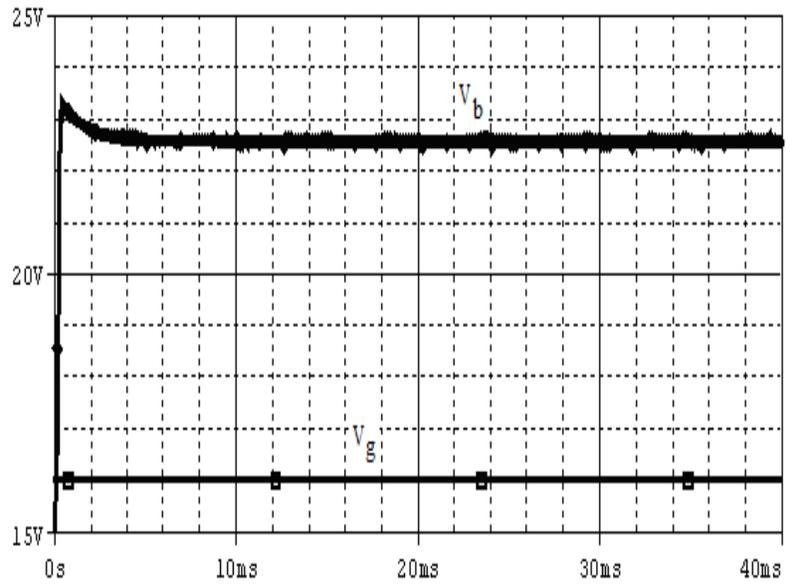


Figure 46. Tension de sortie V_b et celle d'entrée V_g pour $\alpha_1=25\%$.

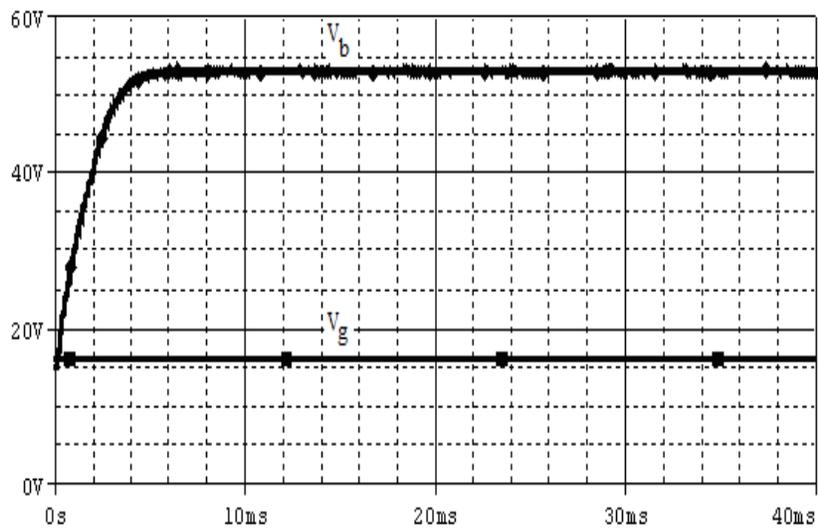


Figure 47. Tension de sortie V_b et celle d'entrée V_g pour $\alpha_1=75\%$.

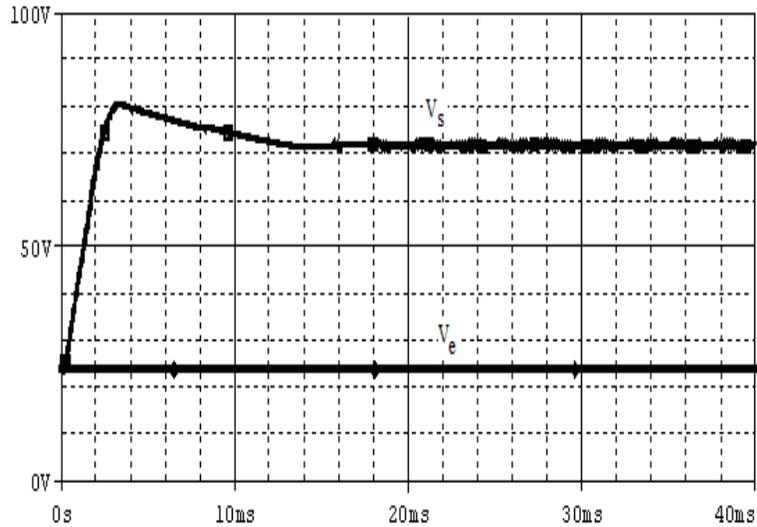


Figure 48. la tension d'entrée V_g et celle de sortie de l'élevateur V_b pour $\alpha_1=66\%$

Les résultats obtenus en simulation avec les deux hacheurs sont très satisfaisants. La visualisation des divers signaux au niveau des composants des deux hacheurs montre bien leur bon comportement. Aussi pour divers rapports cycliques, la fonction d'élévation de la tension est vérifiée. En particulier pour une tension de 24 Volt et un rapport cyclique de 66% la tension de sortie est de 70 Volt.

Notons aussi que lorsqu'on fixe la sortie V_b la tension d'entrée change avec la variation du rapport cyclique, ce qui montre que le point de fonctionnement peut être choisi en agissant sur le rapport cyclique.

Après avoir testé en simulation le fonctionnement de l'hacheur, nous passons à la simulation de la régulation de la tension au niveau de l'hacheur élévateur en utilisant le circuit spécialisé SG1842 permettant la mise en œuvre pratique du régulateur PI. Les composants externes au circuit sont bien calculés pour réaliser le régulateur PI assurant des meilleures performances de la régulation de tension, le schéma global de simulation est donné par la figure 49 ci-dessous :

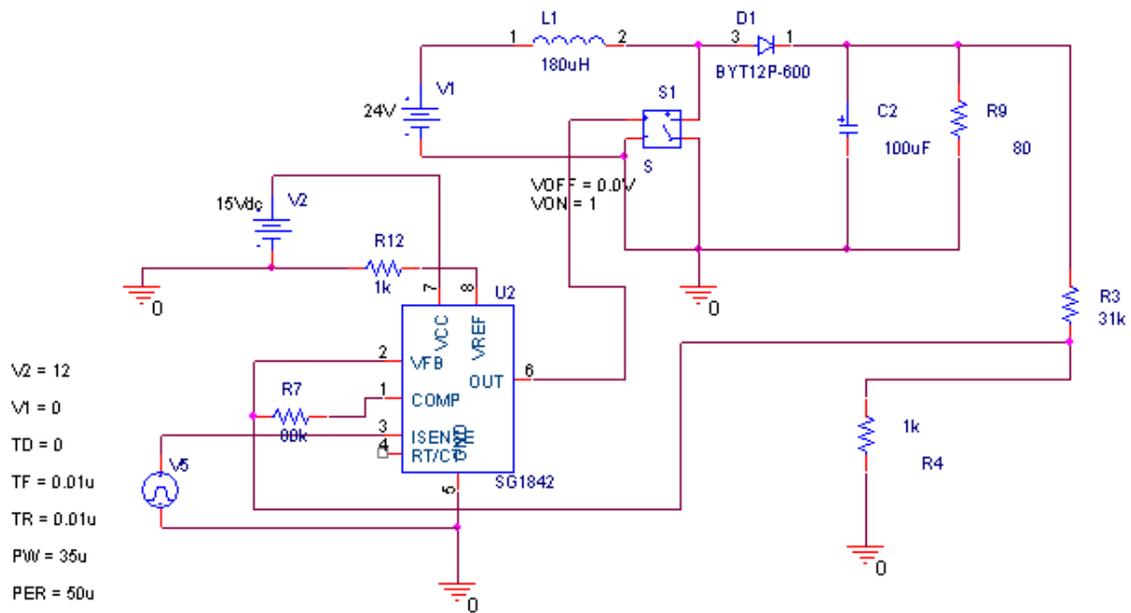


Figure 49. hacheur élévateur avec régulation de la tension.

Les tests de la régulation en tension par le circuit SG1842 ont donné des résultats très satisfaisant tant pour la régulation amont que pour la régulation aval.

Le hacheur alternatif

La figure 50 donne le montage de simulation du circuit de puissance de l'onduleur et du circuit de commande.

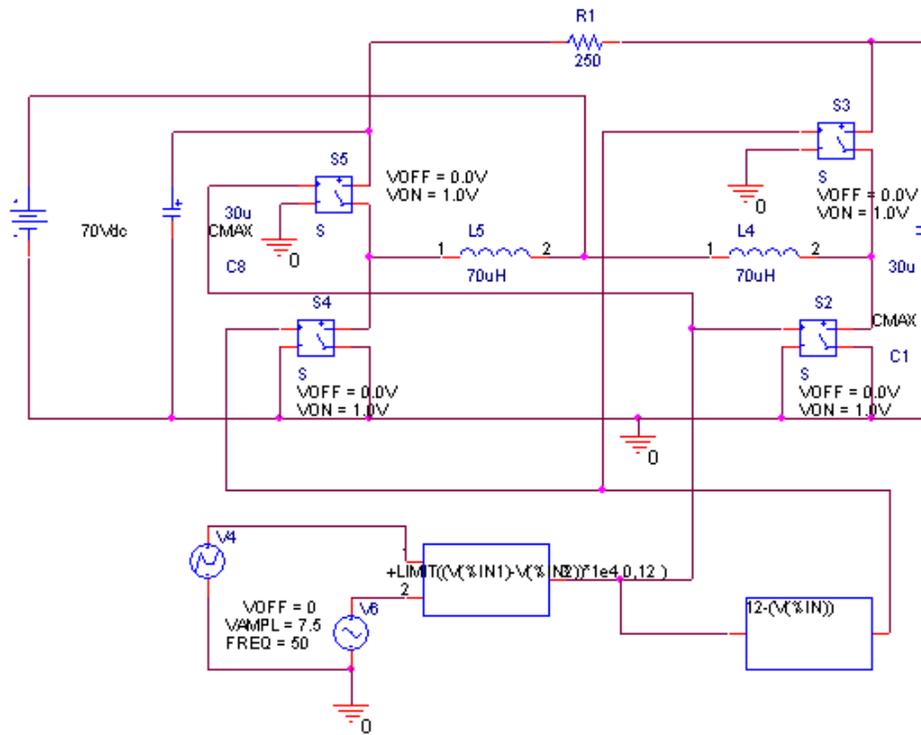


Figure 50. onduleur survolteur

Caractéristiques de l'onduleur (Roslan 2009) (Thanh 2001)

Inductance : $0.23\mu\text{H}$

Les capacités : $260\mu\text{F}$

MOSFET : W45NM50

Circuit magnétique	EI40
La section du fil	$5,27\text{ mm}^2$
La valeur de l'entrefer	2 mm
Le nombre de spires	45

Les figures 51-55 suivantes illustrent les formes d'ondes obtenues en simulation pour différents types de charge. La figure 51 donne les tensions aux bornes des deux hacheurs et la figure 53 le courant de sortie.

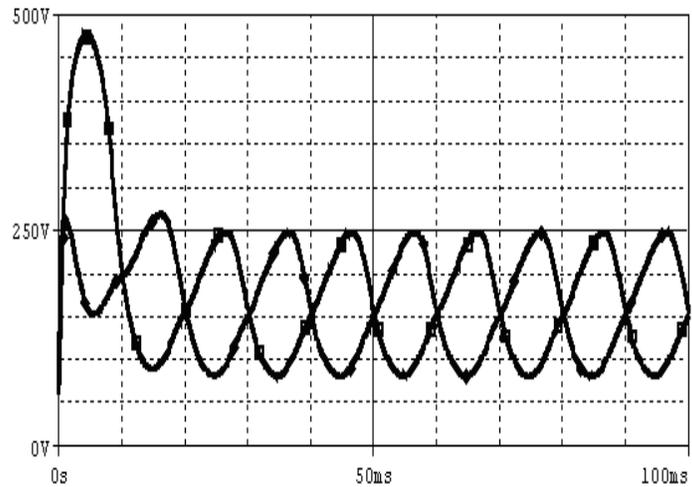


Figure 51. les deux tensions de sortie V_{o1} et V_{o2} de chaque hacheur Boost

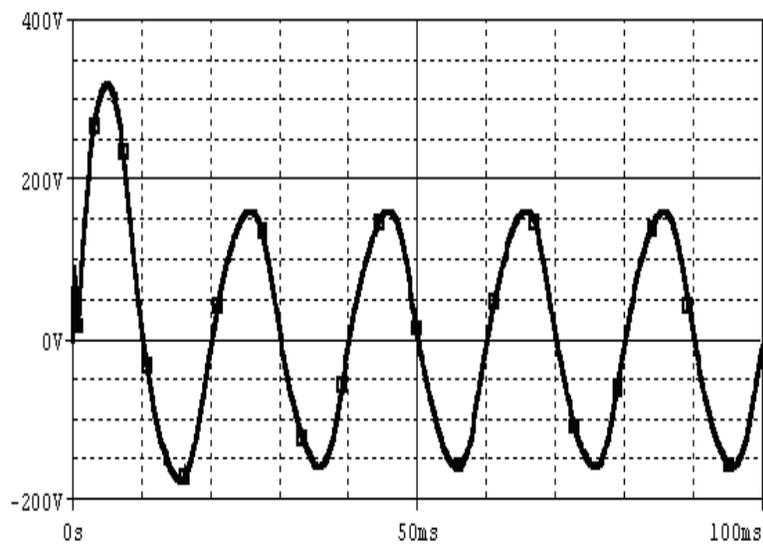


Figure 52. La tension de sortie V_o résultante (cas d'une charge résistive).

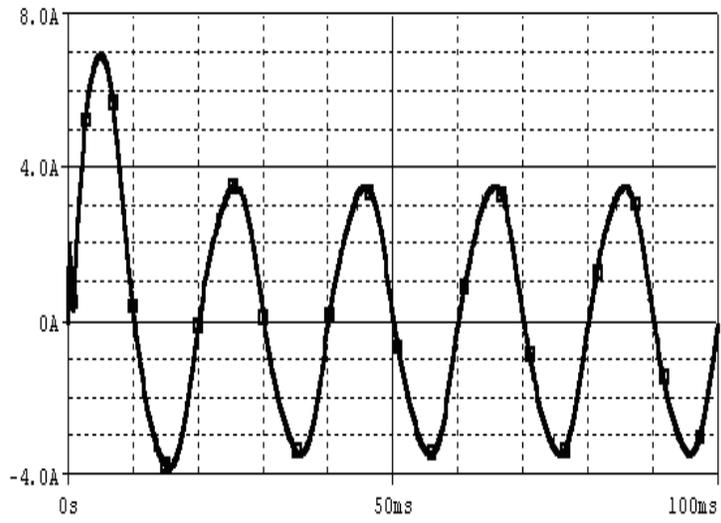


Figure 53. Le courant de sortie I_o de l'onduleur survolteur pour une charge résistive.

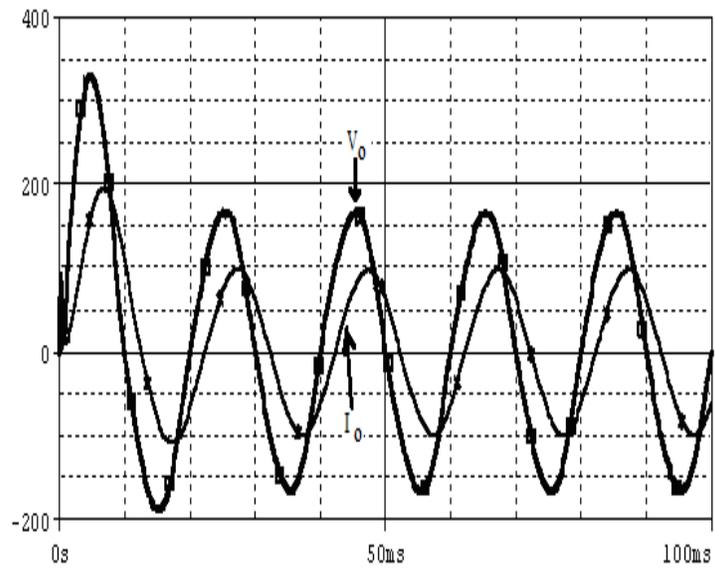


Figure 54. La tension V_o et I_o de sortie pour une charge RL

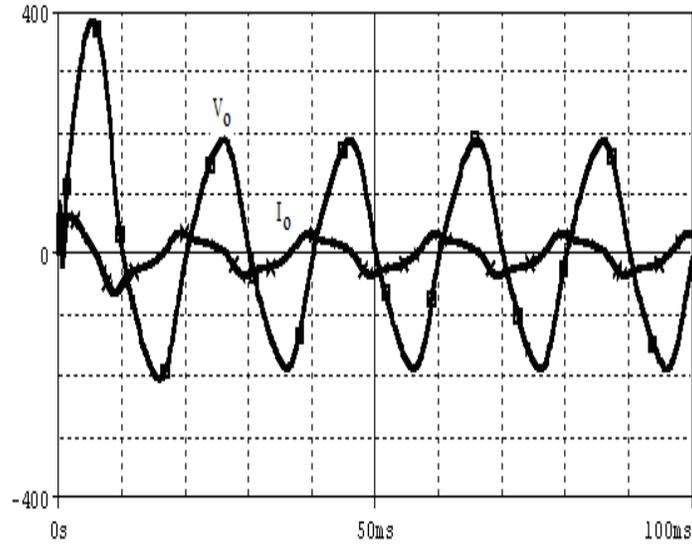


Figure 55. La tension de sortie V_o et le courant I_o pour une charge RC

Comme nous pouvons le voir, les formes d'onde des tensions à la sortie des boost sont sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz et une amplitude de 110V

iv. **Expérimentation**

Après avoir tester tous les circuits et algorithmes en simulation, nous passons maintenant à la réalisation pratique de la chaîne de conversion photovoltaïque. Elle est formée par quatre cartes : trois cartes de puissance réalisant l'adaptateur MPPT, le hacheur élévateur et l'onduleur survolteur et une carte de commande constituée autour du microcontrôleur PIC16F876 pour commander à la fois l'adaptateur MPPT et l'onduleur.

Le hacheur boost

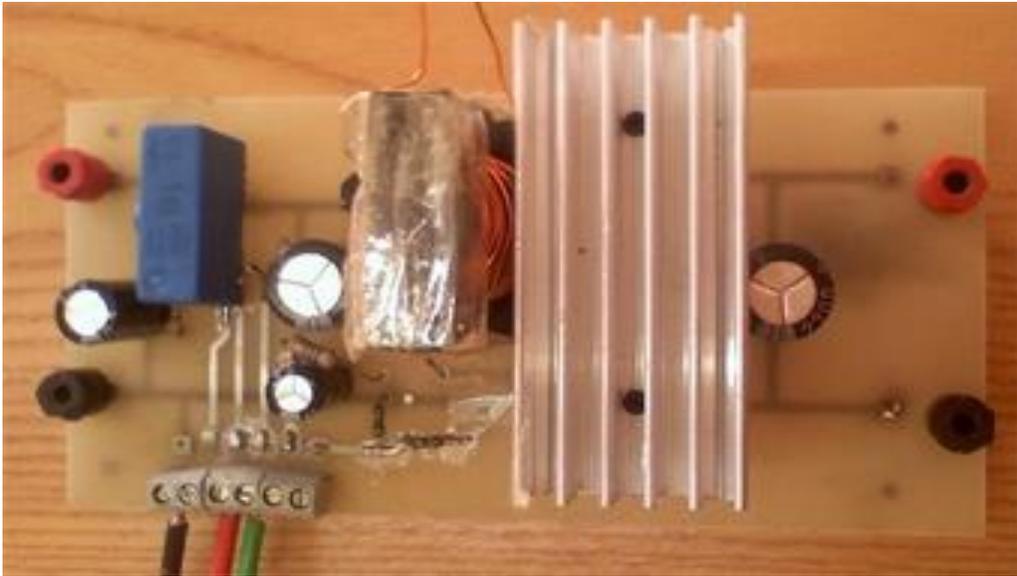


Figure 56. l'adaptateur MPPT

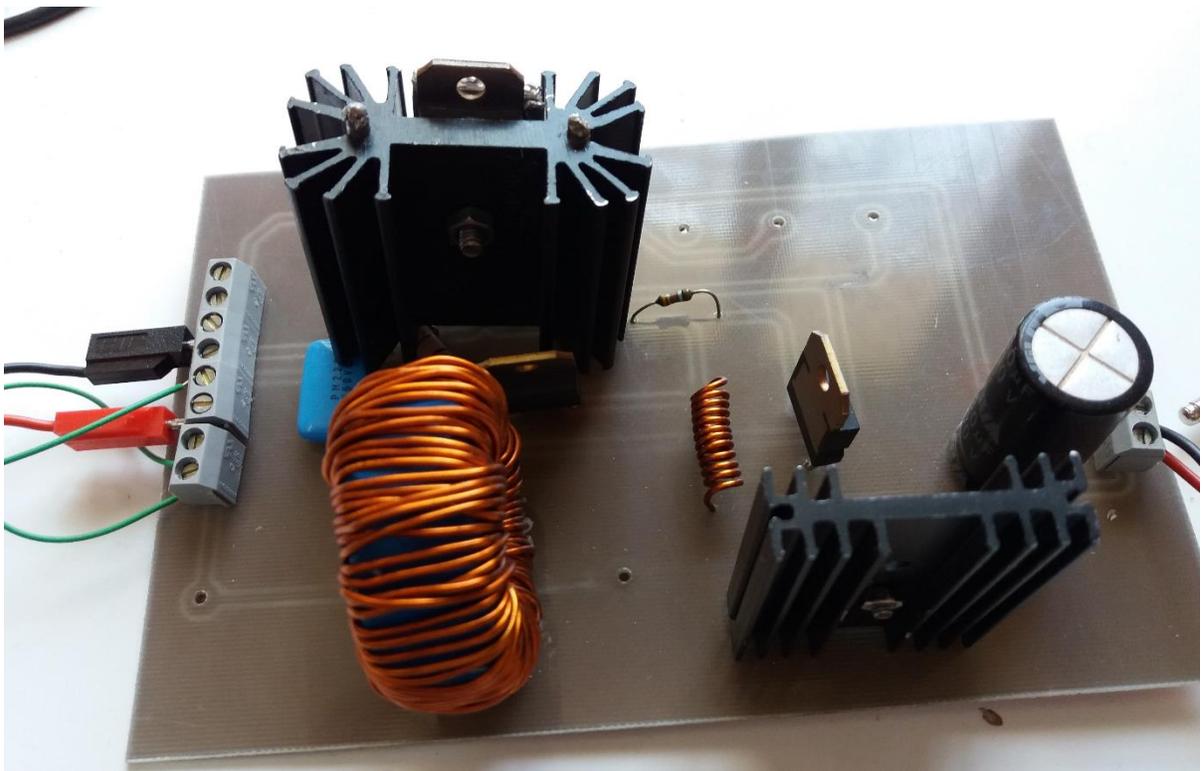


Figure 57. l'hacheur élévateur

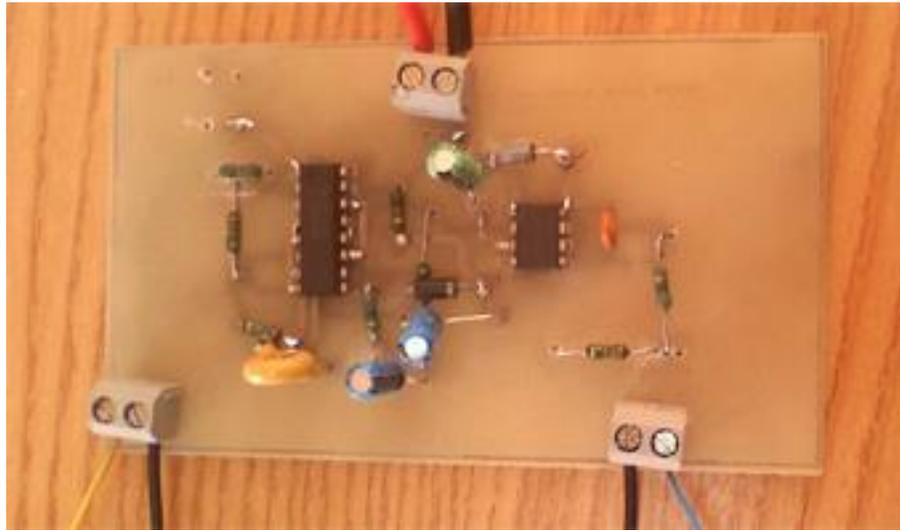


Figure 58. commande et régulateur du hacheur élévateur

Ci-dessus les cartes de puissance que nous avons réalisées : le hacheur Boost (figure 56) pour l'adaptation afin d'extraire le maximum de puissance délivrée par les panneaux et le hacheur élévateur de tension (figure 57) pour élever la tension ainsi que le circuit numérique implémentant l'algorithme MPPT et le circuit SG1842 pour la réguler (figure 58).

Sur les figures 59 et 60 suivantes, nous présentons respectivement le signal de commande V_{gs1} du boost pour un rapport cyclique de 25% et une fréquence d'horloge de 20KHz avec une amplitude de 12Volt et les tensions d'entrée et de sortie.

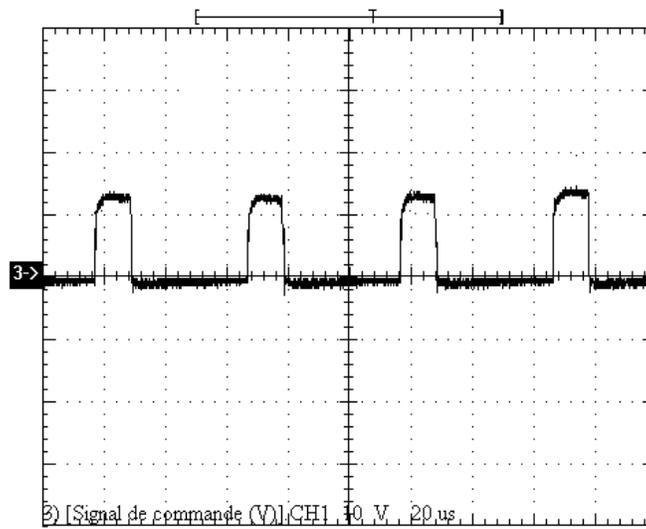


Figure 59. Le signal de commande V_{gs1} du Boost

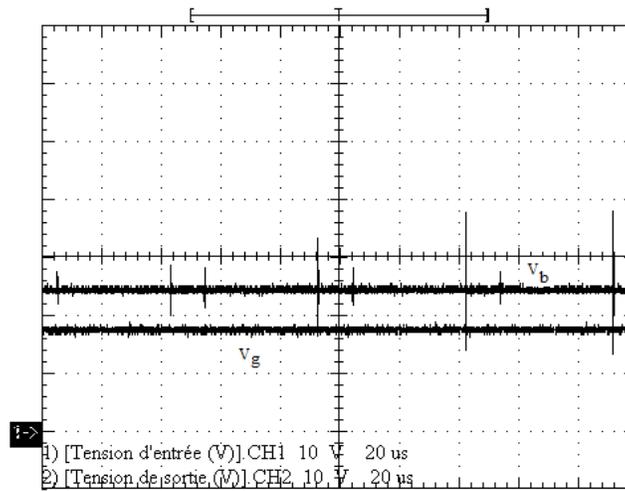


Figure 60. Les tensions d'entrée et de sortie V_g et V_b du Boost

Pour tester expérimentalement le bon fonctionnement des deux premiers hacheurs, nous avons procédé aux tests suivants.

- Pour le premier boost, nous avons fixé la tension de sortie à 24 Volt et nous avons appliqué une commande avec rapport cyclique variable. Nous avons observé une variation de la tension d'entrée d'où le fonctionnement désiré.
- Pour le deuxième boost, nous avons fixé la tension d'entrée à 24 Volt et nous avons constaté que la tension de sortie peut atteindre 70 Volt requise par l'étage suivant.
- Finalement pour tester la régulation de tension au niveau du deuxième boost, nous avons branché à sa sortie un rhéostat (20 Ω , 300 W). Les deux cas qui influent sur la tension de sortie désirée qui est de 70 Volt sont testés: la régulation amont lorsque l'entrée est variable et la régulation avale lorsque la puissance fournie change en fonction de la charge branchée.

Dans les deux cas et d'après les figures 61 et 62 ci-dessous, nous pouvons constater :

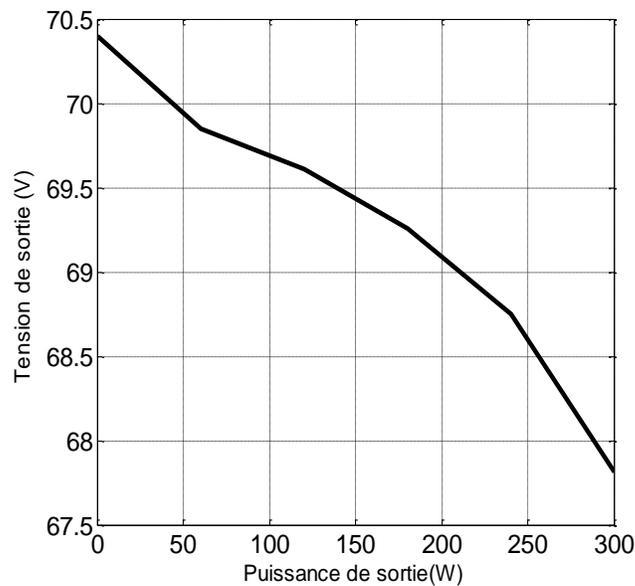


Figure 61. La régulation de la tension de sortie V_s pour V_e constante

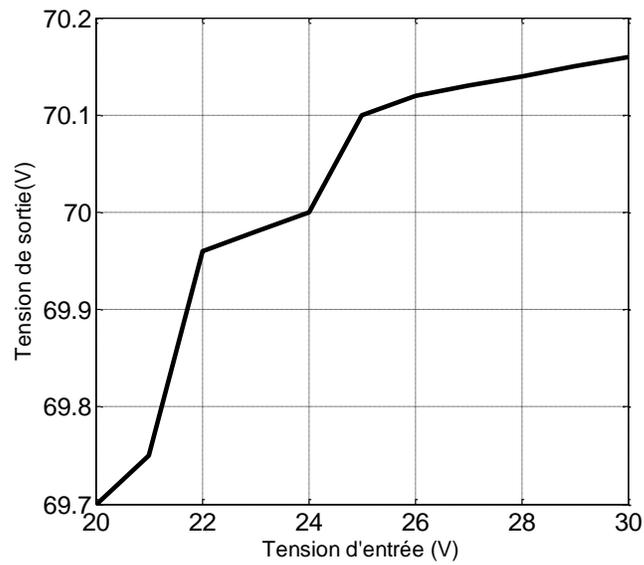


Figure 62. la régulation de la tension de sortie pour V_e variable

- Variation de la tension de sortie pour une entrée inférieure à 22 Volt.
- Chute de tension d'environ 3% à pleine charge.
- Le rendement est d'environ 93% à cause des pertes par commutations et par effets joule.

Ces résultats montrent que ce type de régulateur est parfaitement adapté à ce type de convertisseur.

L'onduleur :

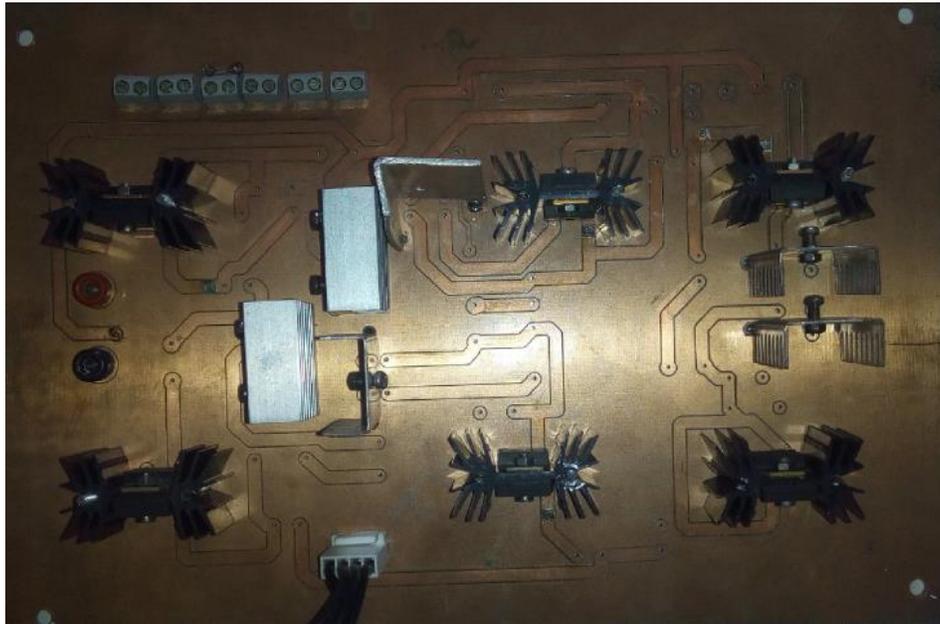


Figure 63. Réalisation de l'onduleur

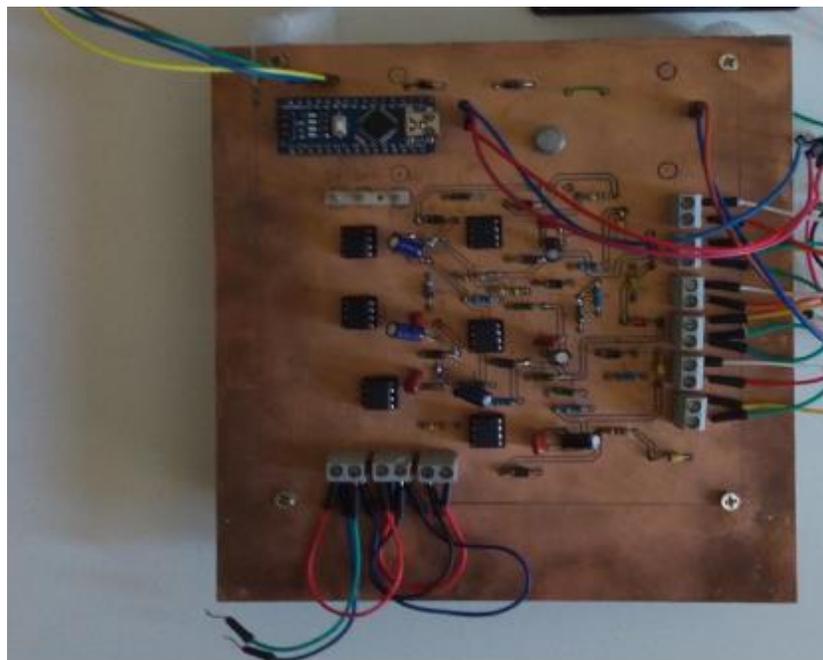


Figure 64. Réalisation du circuit d'isolement de l'onduleur

Les résultats obtenus sont présentés selon les figures qui suivent pour trois types de charges : résistive, capacitive et inductive.

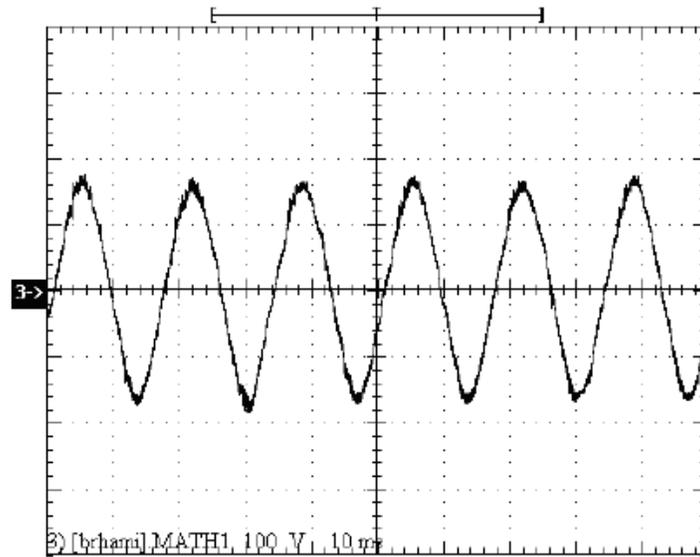


Figure 65. Tension de sortie pour une charge résistive.

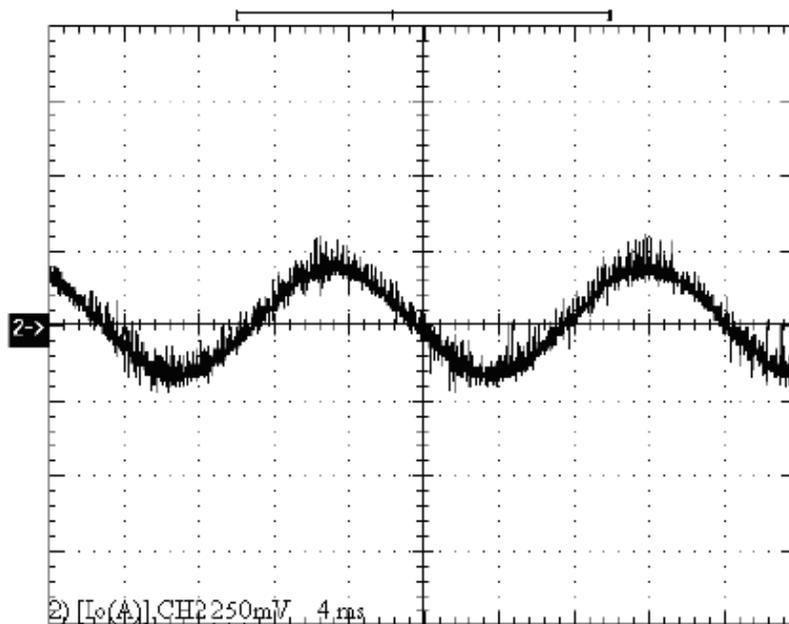


Figure 66. Le courant de sortie I_o pour la charge résistive

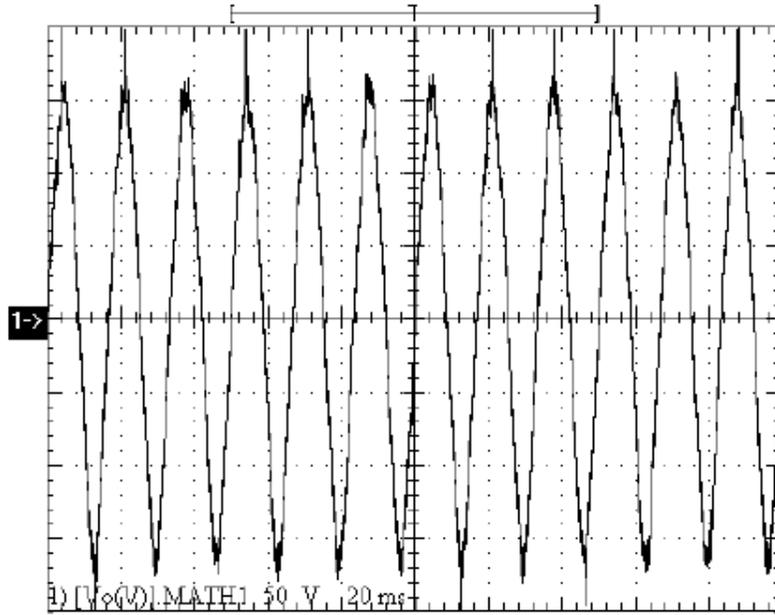


Figure 67. Tension de sortie pour une charge capacitive.

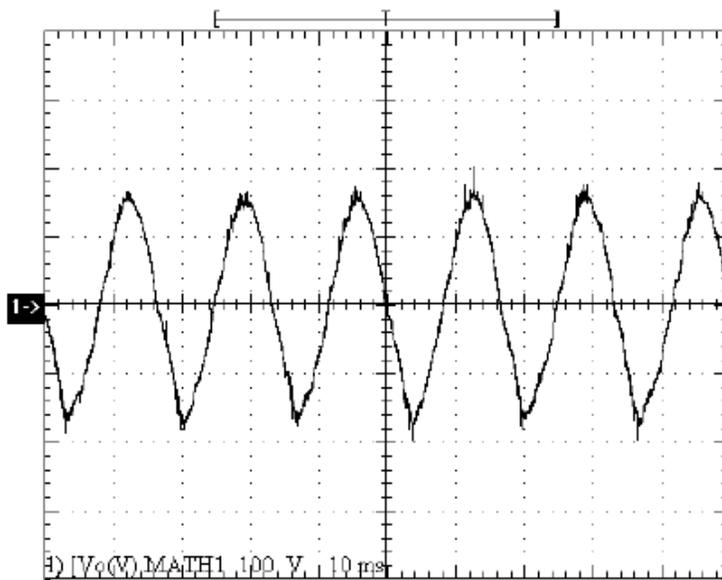


Figure 68. Tension de sortie pour une charge inductive.

La présentation des résultats expérimentaux avait pour but de vérifier la faisabilité de la structure de la chaîne de conversion PV proposée et de tester les performances qui en font son originalité, à savoir un comportement correct quelle que soit la nature et la valeur de la charge alimentée ainsi que la génération d'une tension sinusoïdale.

3. Résultats de simulation de la régulation

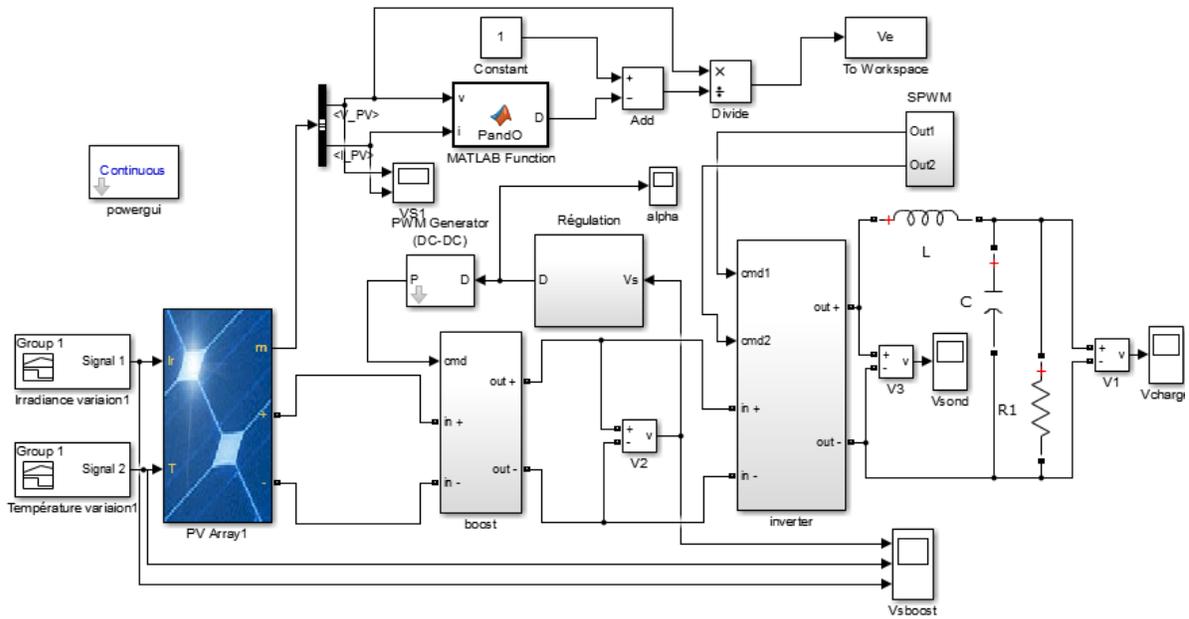


Figure 69. Schéma de simulation

La chaîne de production de base utilisée contient un bloc modélisant les panneaux photovoltaïques, l'hacheur élévateur, l'onduleur et une charge.

Pour vérifier l'effet du PI choisit on a simulé deux chaînes de production de deux différentes commandes. La première délivre un rapport cyclique constant. Tandis que la seconde fournit un rapport cyclique variable provenant du régulateur.

i. Simulation de la chaine de production Sans régulation

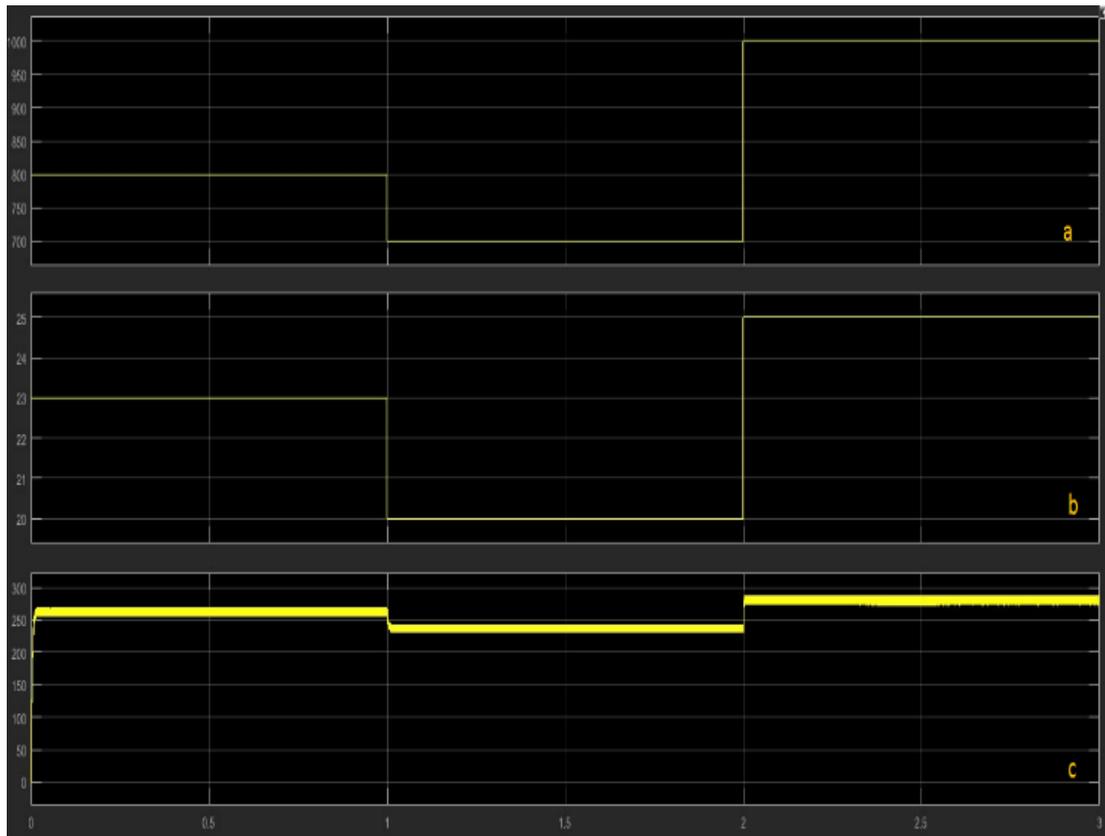


Figure 70. Simulation de la chaine sans régulation
Irradiation, b. Température, c. Tension de sortie du hacheur

Les résultats de la simulation montrent que la valeur de la tension de sortie de l'hacheur varie en fonction de la variation de la température et de l'irradiation.

ii. Simulation de la chaine de production avec régulation

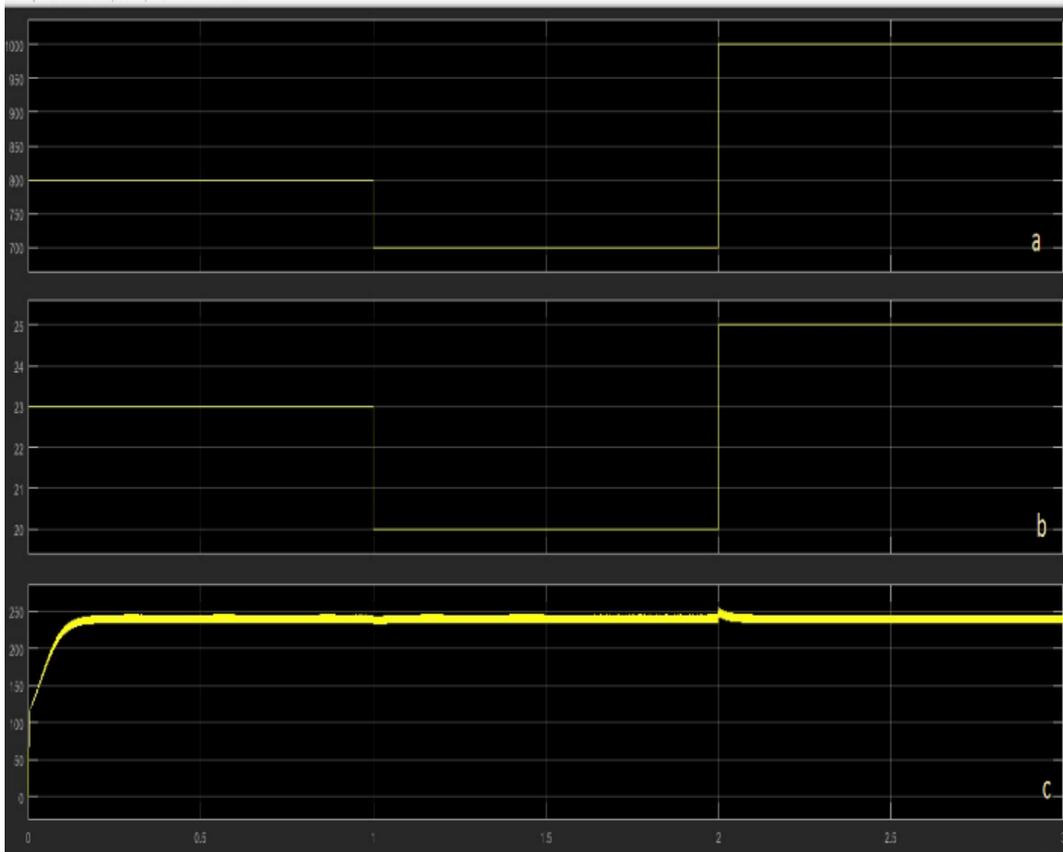


Figure 71. Simulation de la chaine avec régulation

Irradiation, b. Température, c. Tension de sortie du hacheur

La simulation prouve que la variation de la température et l'irradiation n'affecte pas la tension de sortie du hacheur après l'ajout du régulateur PI

4. Conclusion

Ce travail a été orienté vers l'utilisation d'un correcteur PI afin de réguler la tension de sortie du hacheur élévateur à une valeur fixe. Afin de tester en simulation les performances de la boucle de régulation, nous avons procédé à des variations de la température et de l'irradiation. La tension de sortie du hacheur élévateur suit, après un certain temps bien réduit et sans trop s'éloigner de la valeur désirée, la valeur de référence.

CHAPITRE VI : Application au pompage solaire

1. Introduction

À la lumière des défis économiques, sociaux et environnementaux auxquels le gouvernement marocain fait face, et face aux grands problèmes dus au déficit en eau affrontés dans les zones rurales isolées (M. N. S. S. Chandel 2015). Le pompage solaire photovoltaïque représente la solution idéale pour l’approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent (Rajini 2013). C’est dans cette optique que plusieurs travaux sur le dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque (SPPV) ont été publiés (Swe 2011). Dans ce qui suit, nous présentons l’étude, le dimensionnement et les résultats de simulation obtenus du système de pompage photovoltaïque avec suiveurs solaires ainsi que des résultats pratiques partiels (Sontake 2016) (Malla 2011).

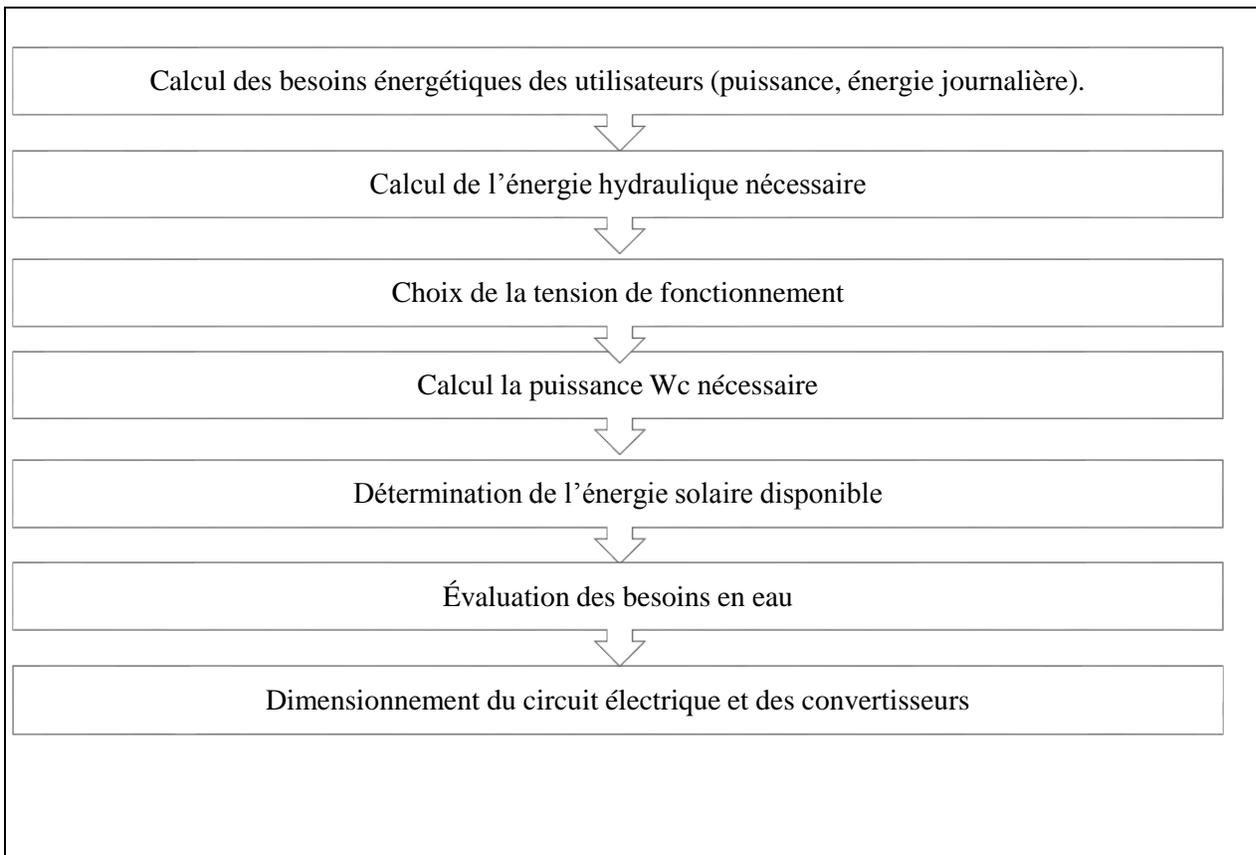
2. Dimensionnement de l’installation photovoltaïque

Le présent projet porte sur une méthode de conception d’un système de pompage solaire photovoltaïque. L’objectif de cette conception est de faire un choix optimal des différents équipements industriels de ce système en assurant optimisation, régulation et sécurité. Cette méthode de dimensionnement est basée sur les équations mathématiques qui régissent le système ainsi que sur les diagrammes de grandeurs électriques et mécaniques. Le système en question est composé de trois équipements: le générateur photovoltaïque, l’entraînement de l’onduleur solaire et le groupe motopompe (C. Feraga 2016). Cette conception permet non seulement de concevoir le système de pompage pour répondre aux spécifications techniques souhaitées, mais également l’application des résultats de recherche étudiés dans les chapitres précédents. Elle permet aussi la compatibilité afin de garantir un fonctionnement correct et une fiabilité optimale (S. I. Khan 2014). Il repose essentiellement sur l’évaluation des besoins en eau, le calcul de l’énergie hydraulique nécessaire, le calcul de la puissance électrique nécessaire, celle fournie par le générateur photovoltaïque et l’optimisation des composants du système de pompage (Lakhdr 2017). La conception et le choix des éléments sont faits sur une véritable installation pour répondre aux besoins en eau des jardins de la Faculté des sciences et techniques

de Beni-Mellal. Ainsi, le débit estimé est de 3,5 m³ / h pour une hauteur dynamique totale de 65 m (N. Rebei 2014).

i. Méthode de dimensionnement

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont les suivantes :



ii. Lieu de l'installation

Ce présent projet vise l'irrigation des jardins de la Faculté des sciences et techniques de Beni-Mellal, le surplus de l'énergie produite sera injecté dans le réseau électrique.

Béni Mellal est située entre le Moyen Atlas et la plaine de Tadla, située à 600 m d'altitude, au pied d'un mont Tassemit (« le mont du froid ») couvert de neige en hiver et au printemps. Elle connaît le climat continental du Moyen Atlas.

Le climat de Beni Mellal est dit tempéré chaud. L'été, à Beni Mellal, les pluies sont moins importantes qu'elles ne le sont en hiver. En moyenne la température à Beni Mellal est de 18.3°C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 493 mm (M. Adar 2016).

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	10.5	11.8	14.5	16.8	19.4	23.4	26.7	26.5	23.7	19.6	15	11.4
Température minimale moyenne (°C)	3.6	4.7	7.1	8.9	10.9	14.4	16.7	16.8	15.2	11.9	8.4	4.6
Température maximale (°C)	17.4	19	21.9	24.8	27.9	32.5	36.7	36.3	32.2	27.4	21.7	18.2
Précipitations (mm)	48	69	79	62	33	12	1	4	7	39	71	68

Tableau IV. Table climatique Beni Mellal pour l'année 2016¹

a. Évaluation des besoins en eau

Les besoins en eau pour l'irrigation des cultures dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale pour une évaluation correcte des besoins. La

capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système.

Les cultures légumières sont très consommatrices en eau. On estime qu'il faut au moins 2000 à 3000 m³ d'eau par an pour 1 ha de cultures en plein champ. Ces valeurs dépendent bien évidemment de différents paramètres cités ci-dessus, mais elles peuvent servir de base à une personne souhaitant s'installer et développer une activité de production maraîchère.

Les jardins de la faculté des sciences et techniques contiennent une variété de plantes, différents types d'aromatiques, arbres fruitiers, herbes... dont les besoins restent difficiles à évaluer, en se référant à la pratique les besoins en eau en période de pointe sont environs 22m³/J et entre 12m³/J et 16 m³/J dans le reste des périodes de l'année.

Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

L'énergie hydraulique nécessaire est donnée par la relation suivante (R. A. Khan 2015):

$$E_h = g \cdot \rho_a V_a h / 3600$$

Où :

E_h : Énergie hydraulique (Wh/jour)

h : Hauteur totale (m)

V_a : Volume d'eau (m³/jour)

ρ_a : Densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : Accélération de la pesanteur

(9,81m/s²)

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d$$

Où

h_s : Niveau statique (m)

h_d : Niveau dynamique (m)

La hauteur statique h_s est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

La hauteur dynamique h_d représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$h_d = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Où

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie V : vitesse moyenne du fluide (m/s)

L : longueur de la tuyauterie (m) D : diamètre de la tuyauterie (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

D'autres types de pertes doivent être pris en considération, tel que les pertes de charges dans les vannes, coudes, jonctions ... Dans ce cas nous devons ajouter les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

$$h_d = K_{ac} \frac{v^2}{2g}$$

Où K_{ac} est un coefficient dépendant du type d'accessoire.

Accessoire	Coefficient K_{ac}
Jonction du réservoir à tuyauterie connexion au ras de la paroi	0,5
Jonction de tuyauterie au réservoir	1,0
Coude 45°	0,35 à 0,45
Coude 90°	0,50 à 0,75
Tés	1,50 à 2,00
Vannes de contrôle (ouverte)	3,0

Tableau V. Coefficient K_{ac} pour différents types d'accessoires dans la tuyauterie

En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

Étant donné que le surplus de l'énergie électrique produite sera injecté dans le réseau électrique, le calcul de l'énergie hydraulique journalière nécessaire est basé sur les besoins en eau dans les périodes de pointe.

$$E_h = 9.81 \times 1000 \times 22 \times 77/3600$$

$$E_h = 4616,15 \text{ Wh/jour}$$

Bilan des besoins en énergie électrique :

L'énergie hydraulique calculée dans la partie précédente ne tient pas compte du rendement de la pompe, l'énergie consommée par le système de pompage doit prendre en considération le rendement de la pompe (généralement entre 0.8 et 0.9), facteur de puissance dans le cas d'une pompe asynchrone, rendement de l'onduleur ($\rho_{\text{onduleur}} = 0.9$) et rendement du convertisseur DC/ DC, on en déduit donc :

$$E_{\text{système de pompage}} = 4616,15 / (0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9) = 8904,68 \text{ W}$$

	Énergie consommée	Nombre d'heures d'utilisation
Système de pompage	8904,68 Wh/Jour	
Système de contrôle et de Commande	20	24/24
Suiveur de soleil	35wh	12
charge totale journalière	9804Wh/Jour	

Tableau VI. Tableau récapitulatif de l'énergie consommée lors des heures d'utilisation

b. Données météorologiques de Beni-Mellal

Irradiation solaire mensuelle (M Adar 2016)

- Coordonnées géographiques du site: 32°22'37" Nord, 6°19'12" Ouest, Élévation: 525 m.
- Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-CMSAF

- L'angle d'inclinaison optimale est : 31 degrés
- Irradiation annuelle perdue à cause des ombres (horizontale): 0.1 %

Soit :

H_h : Irradiation sur un plan horizontal (Wh/m²/jour)

H_{opt} : Irradiation sur un plan avec l'inclinaison optimale (Wh/m²/jour)

$H_{(90)}$: Irradiation sur un plan incliné:90deg. (Wh/m²/jour)

I_{opt} : Inclinaison optimale (deg.)

Mois	H_h	H_{opt}	$H_{(90)}$	I_{opt}
Jan	3340	5120	4870	58
Fev	4160	5660	4670	50
Mar	5540	6490	4290	36
Avr	6170	6380	3020	20
Mai	6870	6430	2180	6
Juin	7710	6880	1790	0
Jui	7710	7050	2010	4
Aug	6970	6950	2820	15
Sep	5720	6450	3760	31
Oct	4740	6100	4640	45
Nov	3490	5140	4670	55
Dec	3070	4870	4810	60
Année	5470	6130	3620	31

Tableau VII.Irradiation solaire mensuelle

c. Calcul de la puissance crête

L'irradiation journalière minimale (journée d'hiver) E_{jmin} : (Wh/j/m²) est :

$$E_{jmin} = 4870 \text{ (Wh/j/m}^2\text{)}$$

La puissance crête d'une installation photovoltaïque est donnée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{E_{besoin} P_i}{E_j P_R}$$

Où :

E_j : L'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, exprimée en kWh/m²/jour.

E_{besoin} : L'énergie électrique journalière consommée, exprimée en kWh/jour.

P_c : La puissance crête du champ photovoltaïque.

P_i : La puissance radiative dans les conditions standards de test (conditions STC), exprimée en kW/m². Donc, $P_i = 1 \text{ kW/m}^2$.

P_R : Le ratio de performance de l'installation photovoltaïque, il se situe entre 0,7 et 0,8 pour des installations classiques correctement conçues.

La puissance crête minimale pour notre installation photovoltaïque est :

$$P_c = 2,684 \text{ kWc}$$

d. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Les panneaux choisis pour cette installation ont une puissance crête de 250Wc et une tension nominale de 24V.

L'installation photovoltaïque est constituée de 12 panneaux, trois convertisseurs Boost élévateur de tension et un onduleur triphasé.

Chaque quatre modules PV constitue un champ PV alimentant un convertisseur Boost, les trois convertisseurs Boost sont mis en série afin d'obtenir une tension de 400V à l'entrée de l'onduleur.

Chaque champ photovoltaïque est constitué de deux string, chaque string est composé de deux modules PV.

La configuration de l'installation photovoltaïque est représentée dans la figure 72 ci-dessous :

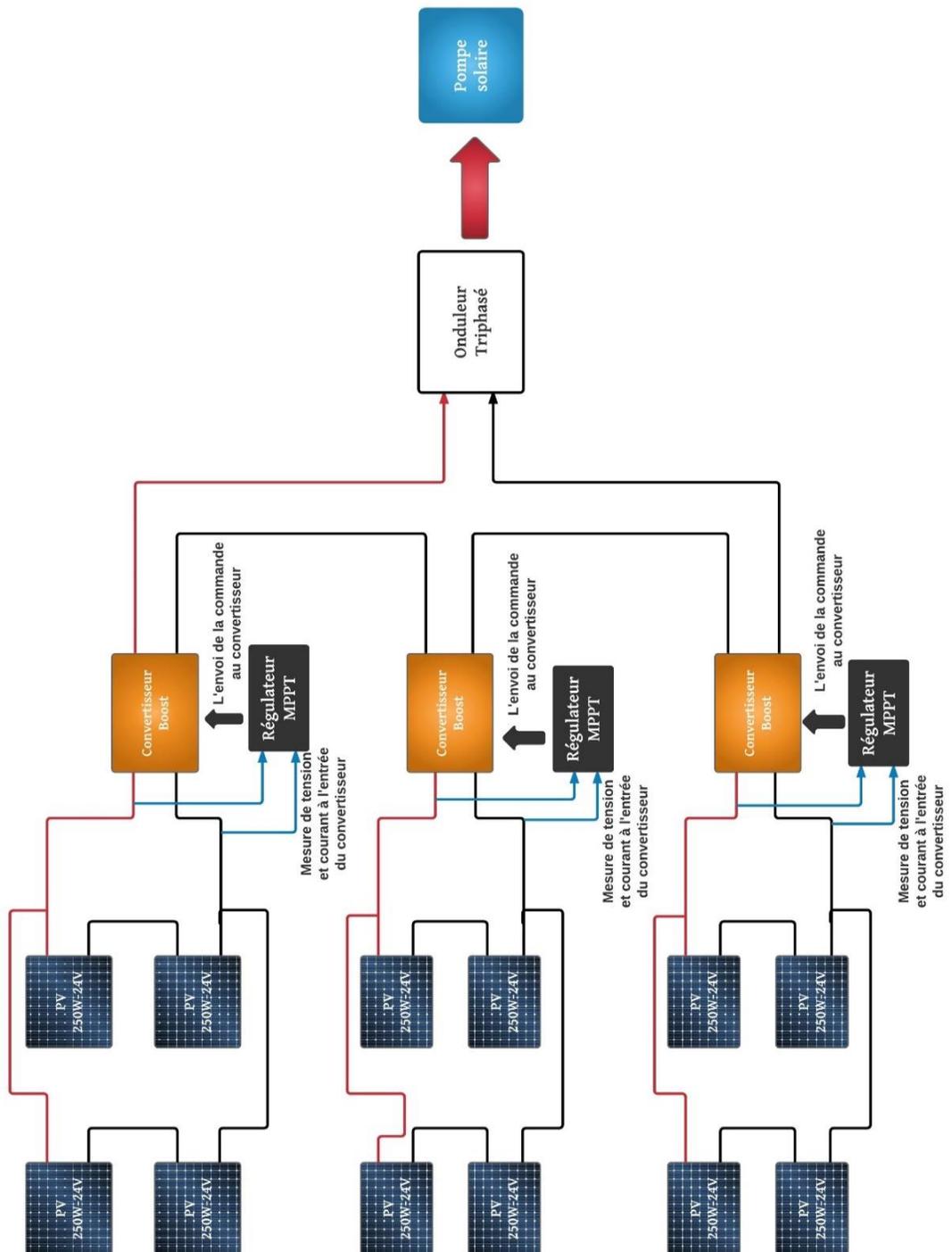


Figure 72. La configuration de l'installation photovoltaïque

On peut envisager aussi l'installation de la figure 73 suivante formée par trois string de quatre panneaux et un seul convertisseur BOOST.

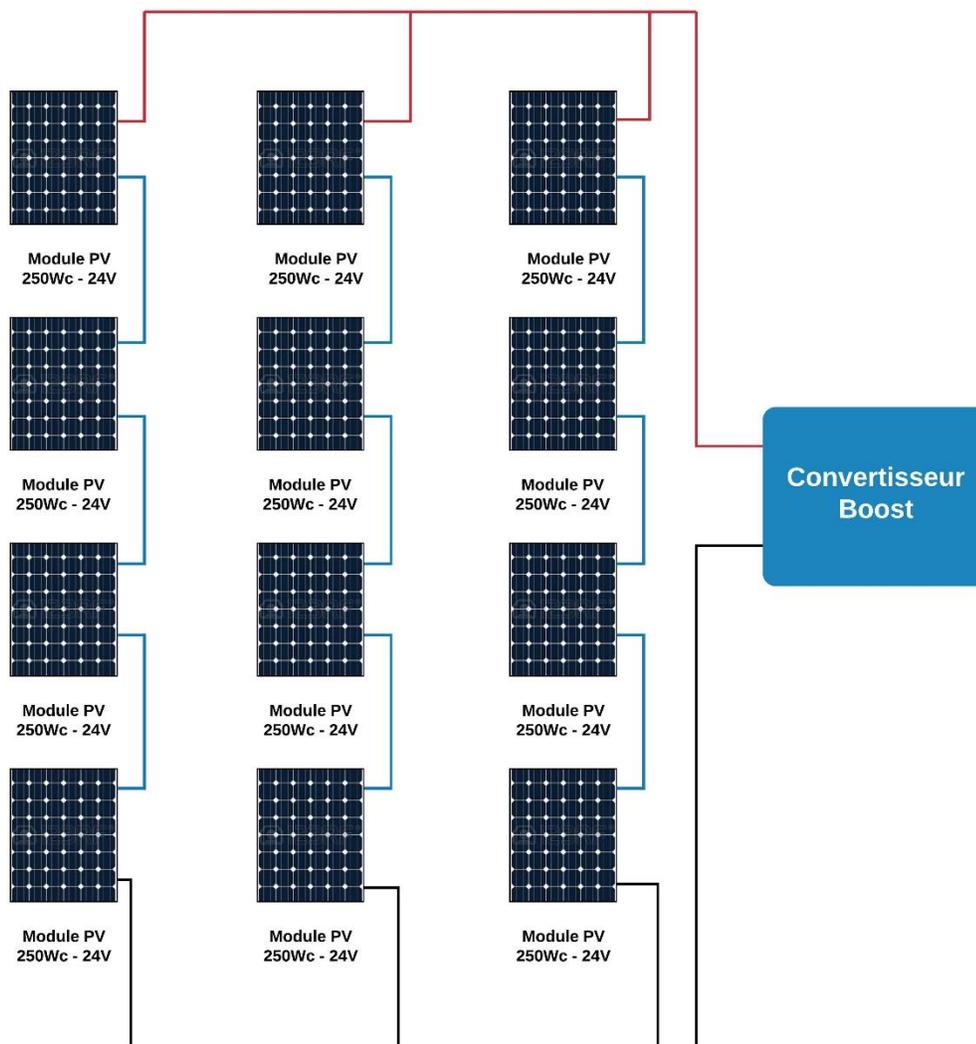


Figure 73. Configuration du GPV pour une tension de sortie nominale égale à 100V

e. Dimensionnement à l'aide du logiciel PVSYSY

Le logiciel PVSYSY permet de réaliser des études détaillées, dimensionnement et simulation horaire, des systèmes photovoltaïques. La conception du système est basée sur une procédure rapide et simple:

- Spécifier la puissance désirée ou la surface disponible,
- Choisir les modules PV dans la base de données interne,
- Choisir l'onduleur dans la base de données interne,

Le logiciel PVSYST propose aussi une configuration du système qui permet de réaliser une première simulation/évaluation.

Les résultats obtenus du dimensionnement et la simulation horaire de notre installation photovoltaïque par le logiciel PVsyst sont présentés dans les tableaux suivants :

PVSYST V6.43					13/06/17
Pré-dimensionnement système isolé					
Site géographique	Beni-Mellal			Pays	Morocco
Situation	Latitude	32.6°N	Longitude	6.5°W	
Temps défini comme	Temps solaire		Altitude	600 m	
Orientation plan capteurs	Inclinaison	30°	Azimut	0°	
System pre-sizing evaluation					
Average use of energy	Daily	9.8 kWh/day	Yearly	3564 kWh	
Autonomy		0.5 days			
Loss-of-Load	Time fraction	4.0 %	Missing energy	37 kWh	
Battery system	Voltage	48 V	Capacity	120 Ah	
PV array	Nominal power	500 kW	Nominal Current	8 A	
Economic gross evaluation	Investment	140986 MAD	Energy price	3.87 MAD/kWh	

Figure 74. Résultats obtenus du pré dimensionnement

PV energy yield and user's needs

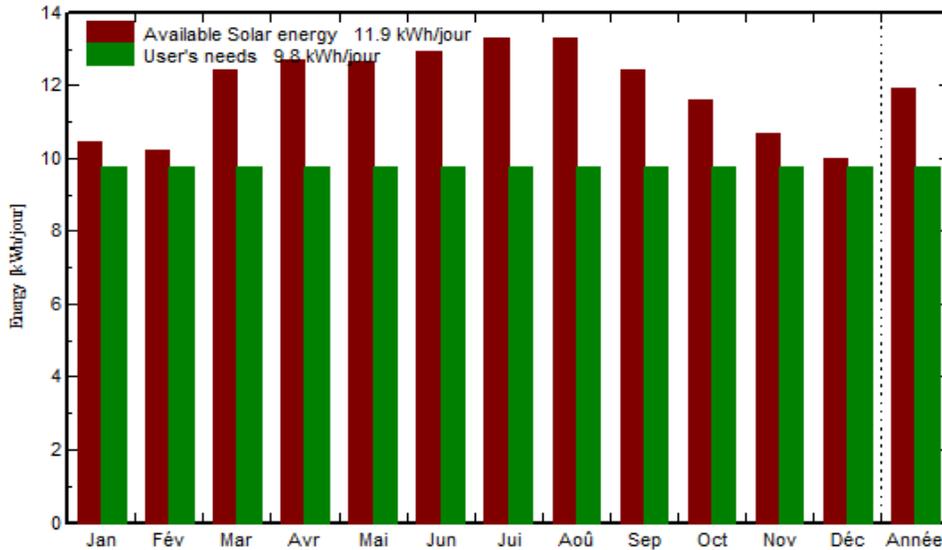


Tableau VIII. Énergie annuelle des PV et les besoins des utilisateurs

	Incid. kWh/m ² .jr	PV avail. kWh	Demand kWh	Excess kWh	Missing kWh	SOC %	Pr. LOL %	Fuel liter
Jan.	5.7	324.0	302.7	21.3	7.3	56	12.7	4.9
Fév.	5.6	286.2	273.4	16.3	9.4	67	9.4	6.2
Mars	6.8	386.0	302.7	80.0	0.5	92	1.7	0.3
Avr.	7.0	381.5	292.9	87.5	1.6	89	5.4	1.1
Mai	6.9	392.6	302.7	87.5	0.0	95	0.0	0.0
Juin	7.1	388.2	292.9	94.0	0.0	99	0.0	0.0
Jui.	7.3	412.3	302.7	108.2	0.0	98	0.0	0.0
Août	7.3	412.5	302.7	107.8	0.0	97	0.0	0.0
Sep.	6.8	372.8	292.9	79.7	2.3	94	2.1	1.5
Oct.	6.4	359.8	302.7	56.7	1.8	86	2.4	1.2
Nov.	5.8	320.1	292.9	25.0	4.1	69	5.5	2.7
Déc.	5.5	309.3	302.7	8.9	10.6	63	9.0	7.1
Année	6.5	4345.3	3563.9	772.9	37.5	84	4.0	25.0

Tableau IX. résultats du dimensionnement à l'aide de PVSYST

3. Dimensionnement et choix de la pompe solaire.

i. Puissance électrique

L'installation photovoltaïque dimensionnée dans le paragraphe précédent produit en moyenne une énergie journalière de 11.9KW/Jour, pour une durée de fonctionnement de 9h par jour. En conséquence la puissance électrique disponible est de 1057W (en tenant compte des pertes dans les convertisseurs DC-DC et l'onduleur).

ii. Débit crête de la pompe

Le débit crête Q (m³/h) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6 \times P_h}{g \times h}$$

Où :

P_h : Puissance hydraulique nécessaire (W) g : Accélération de la pesanteur
(9.81m/s²)

h : Hauteur manométrique totale (m)

La puissance hydraulique nécessaire est calculée par la formule suivante :

$$P_h = P_e \times \eta_{moteur-pompe}$$

Où :

P_e est la puissance électrique fournie et $\eta_{moteur-pompe}$ est le rendement du système moteur-pompe.

$$Q = \frac{3.6 \times 1057 \times 0.75}{9.81 \times 77}$$

$$Q = 3.78 \text{ m}^3/\text{h}$$

On en déduit donc le débit normalisé de la pompe choisi pour ce système est de $4\text{m}^3/\text{h}$

iii. Type du moteur

Les pompes DC ont habituellement des balais de commutation qui doivent être changés périodiquement, ce qui n'est pas facile pour les pompes immergées. Les moteurs AC ne demandent pratiquement pas de maintenance et s'avèrent souvent plus efficaces que les moteurs DC. Par contre L'alimentation électrique des pompes AC nécessite l'emploi d'un onduleur pour leur fonctionnement.

De ce fait notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une pompe asynchrone, vu son rendement, elle n'utilise pas un système de commutation exigeant un entretien permanent et ce type de pompe offre une large gamme de débit et de puissance de fonctionnement.

4. Dimensionnement du Convertisseur Boost

Le convertisseur doit assurer l'échange d'énergie entre le champ des panneaux photovoltaïques qui représente la source de tension et une charge qui n'est que l'onduleur triphasé dont le rôle est d'alimenter un moteur asynchrone. On en déduit donc que :

La source à l'entrée du convertisseur est une source de tension continue nommée E.

La source de tension de sortie est considérée comme une source de tension continue Vs.

Le convertisseur ne doit pas être réversible, ni en courant ni en tension.

Afin de respecter les règles de connexion entre deux sources de tensions, il faut placer une inductance L entre l'entrée et la sortie du convertisseur, à cet effet la source en tension de l'entrée est transformée en une source de courant.

Pour obtenir une source de tension à la sortie on place un condensateur C en parallèle à la charge.

Dans cette partie nous présentons le dimensionnement des éléments constituant le convertisseur Boost, tout en répondant aux exigences du cahier de charge. Ce qui nous amène à déterminer les valeurs de l'inductance L et du condensateur C. d'autre part le choix de la

fréquence de hachage doit être un compromis entre les pertes par commutation et l'encombrement du circuit, en effet :

Plus la fréquence est grande, plus les dimensions des éléments seront faibles.

Plus la fréquence est grande, plus les pertes par commutation seront grandes.

Il faut noter aussi que les composants sont limités en fréquence. Il n'est donc pas possible de choisir une fréquence de hachage trop élevée lorsque des contraintes d'encombrement sont imposées.

Exigences du cahier charge :

Puissance nominale d'entrée du convertisseur : $P_s = 1.7 \text{ kw}$

Puissance nominale à la sortie du convertisseur : 1.5 Kw

Tension de sortie et d'entrée :

Pour la première configuration :

$$V_{e\text{-nominale}} = 100\text{v}$$

$$V_{\text{emax}} = 148\text{v}$$

$$V_s = 400\text{V}$$

Pour la deuxième configuration :

$$V_{e\text{-nominale}} = 48\text{v}$$

$$V_{\text{emax}} = 74\text{v}$$

$$V_s = 134\text{V}$$

Ondulation :

$$\Delta I_s < 0.1\text{A}$$

$$\Delta V_s < 5\% V_s$$

i. Le dimensionnement du condensateur et de l'inductance :

L'ondulation maximale du courant en sortie et par conséquent la valeur de l'inductance L se détermine en fonction du cahier de charge qui exige surtout une variation maximale de courant de sortie, on peut en déduire donc

$$I_s = P_s / V_s = 4.25 \text{ A}$$

$$\alpha_{\text{nom}} = \frac{V_s - V_{e.\text{ nominale}}}{V_s}$$

$$C > \frac{\alpha I_s}{f \times \Delta V_s}$$

$$L > \frac{V_s \times \alpha (1 - \alpha)}{\Delta I_L \times f}$$

F (KHz)	V _s (en V)	α	C _{cal} (en μF)	C _{norm} (en μF)	L _{cal} (minimale)
10	400	0.82	318.75	330	60mH
20	400	0.82	159.38	220	37.5mH
80	134	0.55	29.22	33	4.15mH

Tableau X. Valeurs critiques minimales calculées et normalisées
des composants du convertisseur Boost

ii. Choix du condensateur de sortie

Les condensateurs rencontrés dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent de réservoir d'énergie lors des variations de commande ou de charge, et ils servent également de condensateur de découplage ou de filtrage vis à vis du fonctionnement haute fréquence de l'alimentation.

Afin de remplir ces deux fonctionnalités il existe une gamme de condensateurs spécifiques pour les alimentations à découpage et autres systèmes d'électronique de puissance. Ce sont les

condensateurs chimiques dits à faible résistance série, qui présentent des valeurs de capacité importantes, tout en ayant une excellente tenue en fréquence.

Le choix du condensateur adapté à cette application correspond à un condensateur chimique de valeur $330\mu\text{F}$ fonctionnant sur une tension de 600V .

iii. Dimensionnement et mise en forme de l'inductance

Le choix et le dimensionnement adéquat de l'inductance dans les convertisseurs statiques est la partie la plus délicate de la mise en œuvre des convertisseurs, en effet l'inductance représente une partie importante des composants passifs dont le volume est inversement proportionnel à la fréquence de découpage.

Les inductances ont un rôle primordial dans le stockage de l'énergie électrique qu'elle sera transmise à la charge et aussi à l'atténuation des ondulations du courant électrique à la sortie du convertisseur.

Actuellement les technologies des composants actifs offrent généreusement la possibilité de faire fonctionner les convertisseurs à des fréquences de découpage supérieures à 1 MHz . Cette montée en fréquence aura un effet bénéfique sur le volume des composants passifs mais elle peut engendrer des pertes importantes dans les matériaux magnétiques. À cet effet, et afin de réduire les pertes thermiques dans notre convertisseur Boost et optimiser son rendement, une méthode de dimensionnement est mise en œuvre dans la suite de cette partie du rapport, permettant la détermination des paramètres de construction de l'inductance en tenant compte de la puissance que le convertisseur doit transmettre et la réduction des pertes engendrées.

iv. Réalisation pratique

L'implantation de la commande MPPT et la régulation de la tension du hacheur nécessitent la connaissance en permanence de la valeur de la tension et du courant à l'entrée du convertisseur Boost ainsi que la tension à sa sortie, pour cela, l'utilisation des capteurs de grande précision de mesure et une isolation galvanique entre partie puissance et le circuit électronique de commande est indispensable. La carte de commande contient deux capteurs de tension pour mesurer les tensions d'entrée et sortie du Boost, un capteur de courant et deux microcontrôleurs. Les deux PIC sont utilisés pour exécuter les deux algorithmes de régulation : l'algorithme MPPT

pour le suivi du point de puissance maximale et l'algorithme du régulateur PI permettant d'avoir une tension stable à la sortie du convertisseur Boost. D'autre part la carte de commande permet aussi la régulation de la température de l'IGBT afin d'optimiser son fonctionnement. Une interface utilisateur composée de quatre afficheur 7-segments et des bouton poussoir pour que l'utilisateur aie la possibilité de visualiser les valeurs mesurées, ainsi qu'un bus de donnée pour la communication entre la carte de commande la carte Raspberry PI 3 utilisée pour la gestion globale de l'installation.

a) **Mesure de tension capteur LV 25-P**



Figure 75. capteur de tension LV 25-P

Le module « LEM LV 25-P » est un capteur conçu pour la mesure électronique des tensions: DC, AC, IMPL., etc., offrant une isolation galvanique entre le primaire (circuit de puissance) et la mesure (circuit électronique).

Pour mesurer une tension, il faut prélever un courant proportionnel à la tension à mesurer. Le primaire du capteur LV 25-P sera raccordé à la tension à mesurer avec une résistance $R1$, en série. Cette résistance va permettre de transformer la tension à mesurer en un courant traversant le primaire du capteur. La figure ci-dessous montre le principe de fonctionnement du capteur LV25-P.

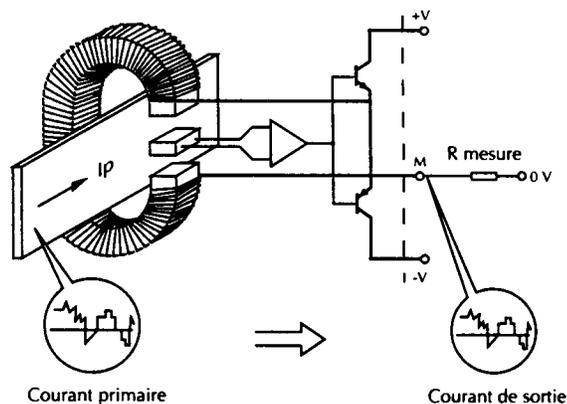


Figure 76. principe de fonctionnement du capteur LV25-P

Le champ magnétique généré par le courant à mesurer traversant le primaire du capteur est compensé par un champ créé par le bobinage secondaire, incorporant une sonde à effet de Hall, associé à un circuit électronique de compensation. Le courant de mesure est l'image du courant primaire réduit par le nombre de spires du bobinage secondaire. Ce capteur convient pour la mesure de tension nominale de 10 V à 500V.

b) AVANTAGES PRINCIPAUX

- Mesure de toutes les formes de courant (CC, CA, impulsionnel) ;
- Haut niveau d'isolation galvanique entre circuit primaire et circuit de mesure ;
- Plage de mesure étendue et haute capacité de surcharge ;
- Grande précision, excellentes performances dynamiques ;
- Temps de réaction inférieur à 1 μ s ;
- Bonne sensibilité ;
- Fiabilité éprouvée MTBF supérieur à 105 heures ;
- Adapté au fonctionnement en environnement hostile
- Simplicité d'emploi ;
- Facilité d'implantation (encombrement et poids faibles) ;
- L'insertion d'un module LEM dans un circuit de puissance ne perturbe et ne modifie aucunement ce circuit
- Excellent rapport prix /fonction.

c) Caractéristiques électriques

Courant nominal du primaire IN	10 mA eff.		
Plage de mesure	0 à ± 14 mA		
Résistance de Mesure	RM min		RM max
	à ± 10 mA max	100 ohms	350 ohms
	à ± 14 mA max	100 ohms	190 ohms
Tension d'alimentation	+ et - 15 V (± 5 %)		
Précision globale à +25°C	± 0,6 % de IN		
Température de service	de 0°C à +70°C		
Consommation	10 mA + courant de mesure		
Résistance interne primaire	250 ohms (à +70°C)		
Résistance interne secondaire	110 ohms (à +70°C)		
Boîtier	moulé dans un boîtier injecté en matière isolante		
Poids	22g		
Fixation	pour montage sur circuit imprimé par 5 picots ϕ 1 mm		
Sens du signal sortie/entrée	Un courant de mesure positif est obtenu sur la borne M lorsqu'une tension positive est appliquée à la borne + HT du circuit primaire.		

d) Raccordement pour utilisation:

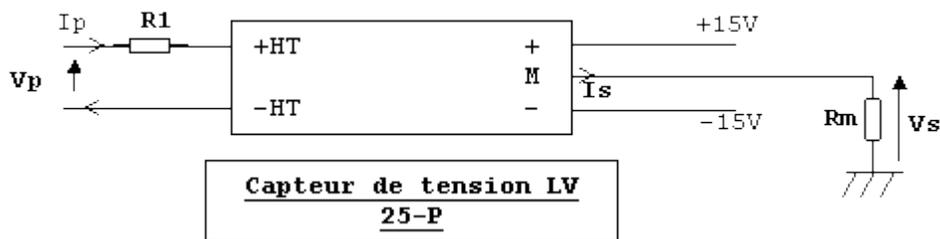


Figure 77. branchement du capteur LV 25-P

La tension de mesure à la sortie du capteur est donnée par la formule suivante :

$$V_s = K_v \times V_p \quad \text{avec} \quad K_v = K_N \times \frac{R_m}{R_1}$$

(KN : rapport de transformation du capteur égal à 2500/1000)

e) Dimensionnement de la résistance R1

La précision optimale du capteur est obtenue avec le courant primaire nominal. Dans la mesure du possible, R1 sera dimensionnée pour que la tension nominale à mesurer corresponde à un courant primaire de 10 mA.

Soit une plage de tension à mesurer à l'entrée du convertisseur Boost de 0V à $U_e = 74$ V

- a) R1 = 7.4 kohms/10 W, I prim. 10 mA : précision = $\pm 0,6$ % de U_N (à +25°C)
- b) R1 = 15 kohms/5 W, I prim. 5 mA: précision = $\pm 1,2$ % de U_N (à +25°C)

f) Montage et programmation avec PIC16F877A

Les tensions mesurées à l'entrée du Boost sont de l'ordre de 60V, la figure ci-dessous montre le résultat du montage réalisé avec le capteur LV 25-P et un PIC microcontrôleur PIC16F877A, le but est de réaliser un dispositif permettant la mesure des tensions et l'affichage des valeurs de la tension mesurée sur quatre afficheurs 7 segment. Le montage et le programme du PIC microcontrôleur doivent être optimisés et utilisant le minimum de composant afin de réduire l'encombrement de la carte de commande.

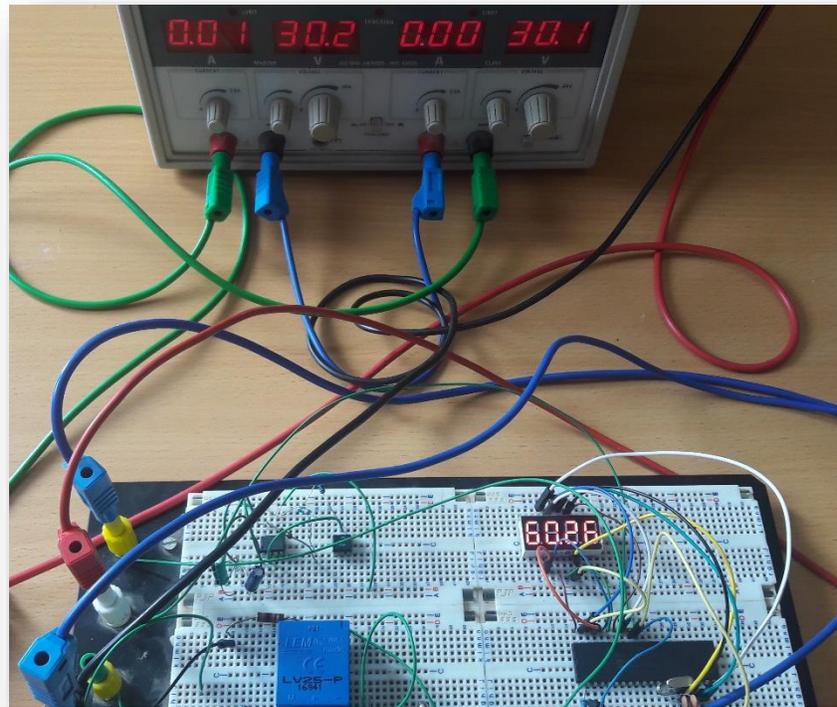


Figure 78. résultat du test du capteur LV 25-P avec le PIC16F877A

On a alimenté l'entrée du capteur par une tension de 60.3V par deux générateurs en série comme l'indique la figure ci-dessus, (avec des tensions respectives de 30.1V et 30.2V) on remarque que la valeur de la tension affichée sur les quatre afficheurs 7-segments est assez précise.

g) Mesure de courant

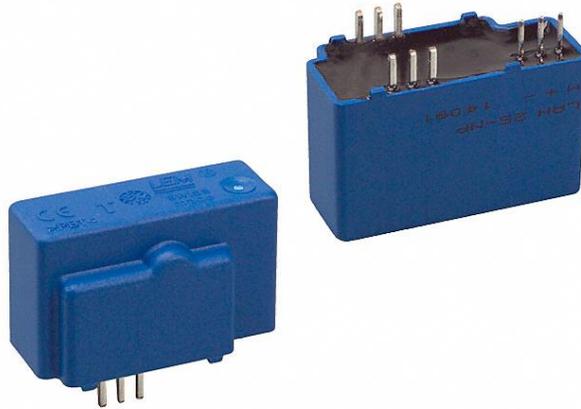


Figure 79. capteur de courant LAH 25-NP

Le module LEM LA 25-NP est un capteur de courant multi-calibres. Basé sur le principe de la compensation magnétique, il permet une mesure électronique des courants continus, alternatifs, impulsionnels et mixtes avec une haute isolation galvanique.

Caractéristiques techniques

Courant nominal du primaire IN	10 mA eff.		
Plage de mesure (courant du primaire)	0 à ± 55 A		
Résistance de Mesure	RM min		RM max
	Pour une alimentation ± 15V	70 ohms	394 ohms
	Pour une alimentation ± 12V	0 ohms	284 ohms

Tension d'alimentation	+ et - 15 V ($\pm 5\%$) ou (+ et -12V)
Précision globale à +25°C	$\pm 0,3\%$ de IN
Température de service	de -25°C à +85°C
Consommation	10 mA + courant de mesure
Fréquence de fonctionnement	0 à 200KHz
Résistance interne secondaire	72 ohms (à +70°C)
Boîtier	moulé dans un boîtier injecté en matière isolante
Poids	22g
Temps de réaction	200ns

Montage et raccordement

Nombre de tours du primaire	Courant nominal du primaire I_{PN} (A)	Courant maximal du primaire I_{Pmax} (A)	Courant nominal du secondaire I_{SN} (mA)	Rapport de transformation K_N	Résistance du primaire R_{PN} (m Ω)	Inductance du primaire L_{PN} (mH)
1	25	55	25	1 :1000	0.18	0.012
2	12	27	24	2 :1000	0.81	0.054
3	8	18	24	3 :1000	1.64	0.110

Courant nominal du primaire	Raccordement recommandé
25A	
12A	
8A	

Le montage de branchement du capteur LAH 25-NP dans le circuit de mesure est comme le suivant :

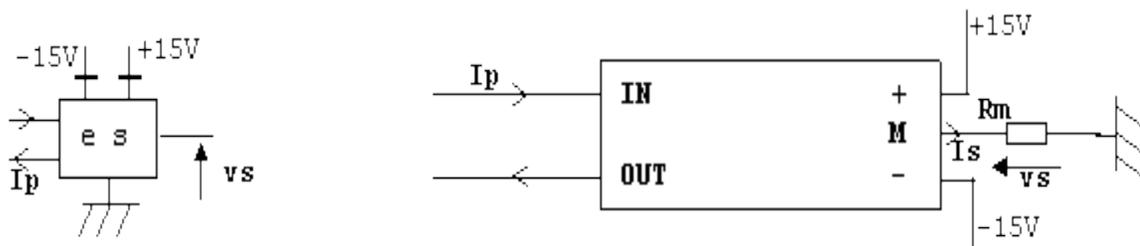


Figure 80. Branchement du capteur LAH 25-NP dans le circuit de mesure

I_p est le courant à mesuré et V_s est la tension image du courant primaire, elle est donnée par l'équation suivante :

$$V_s = K_I \times I_p \text{ avec } K_I = K_N \times R_M$$

(KN : rapport de transformation du capteur de courant: voir ci-dessous)

Montage et programmation avec PIC16F877A

Le courant à mesurer à l'entrée du Boost est de l'ordre de 17A, la figure ci-dessous montre le montage réalisé avec le capteur LAH 25-NP et un PIC microcontrôleur PIC16F877A, le but est de réaliser un montage qui a pour fonction la mesure des courants et l'affichage de ces sur quatre afficheurs 7 segments. La précision du capteur est de l'ordre de 0.075A ce qui est équivalent à 0.3% de la valeur à mesurer.

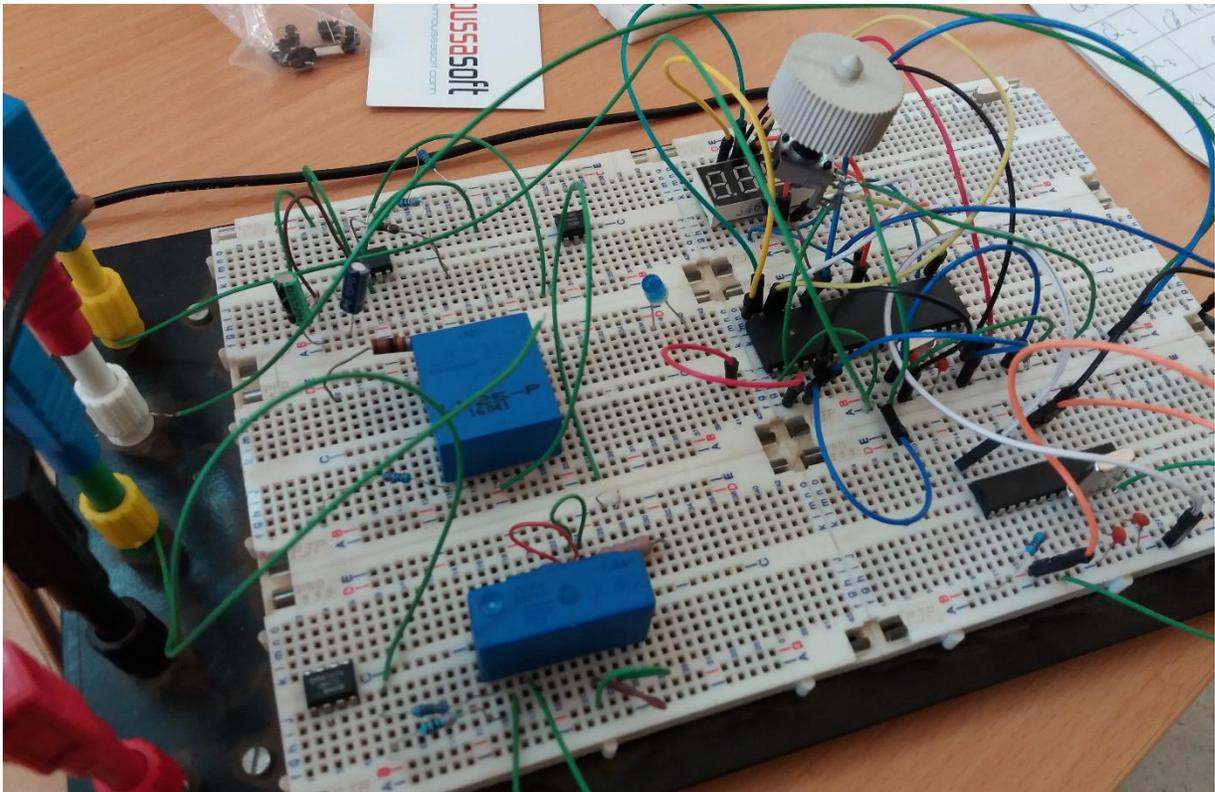


Figure 81. Carte de commande avec capteur LAH 25-PN et PIC16F877A

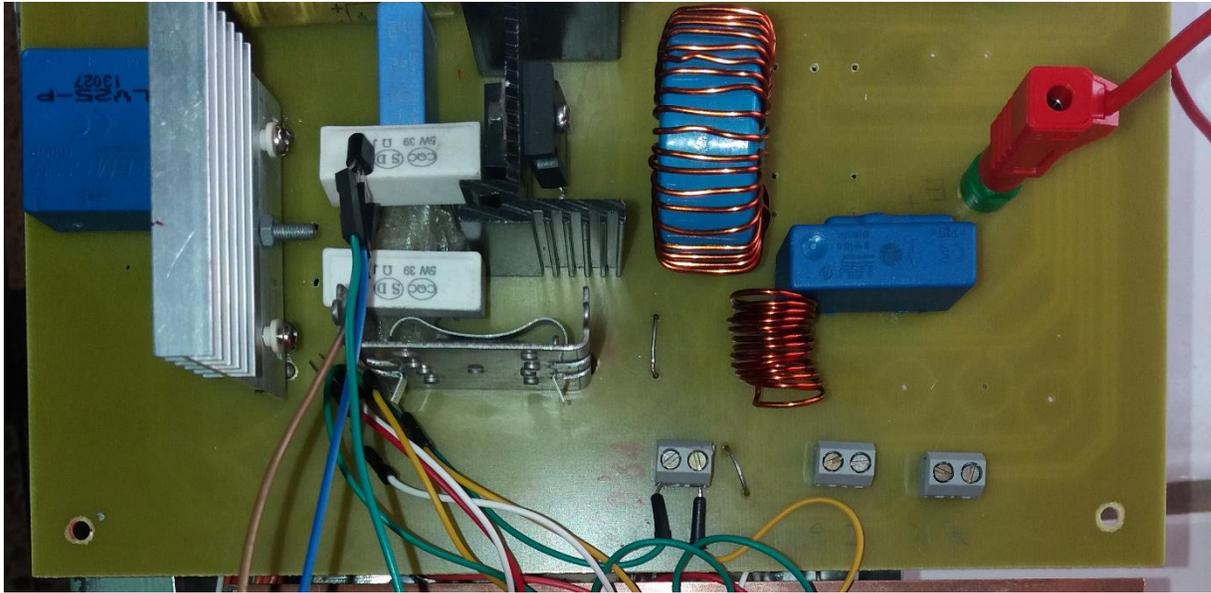


Figure 82. Réalisation BOOST avec circuit d'aide à l'amorçage

Le cahier de charge nous impose une très faible ondulation de courant et de tension de sortie, de ce fait et pour des raisons de simplification de calcul, on peut considérer le courant de sortie comme étant courant continu de valeur constante, dans ce cadre on peut écrire

$$I_c = c \frac{dv_s}{dt}$$

Pour $t \in [0, \alpha T]$: on a $I_c = -I_s$

Donc :

$$V_s = \frac{-I_s}{c} \alpha T + V_{smax}$$

A $t = \alpha T$: $V_s = V_{smin}$

Donc on en déduit :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha T \times I_s}{c}$$

Pour une charge résistive à la sortie du convertisseur, on peut écrire finalement :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha V_s}{CRf}$$

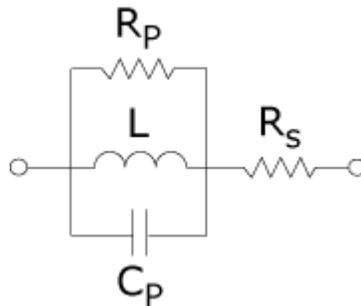
$$\alpha_{lim} = \frac{V_s - V_e}{V_s}$$

v. Les matériaux magnétiques et les corps de bobines

Matériaux magnétiques :

Une inductance peut être réalisée à l'aide d'une bobine, bobinée sans aucun noyau ou autour d'un matériau magnétique, le choix du matériau magnétique dépend de plusieurs facteurs tels que : la fréquence, la température et le courant. De ce fait le modèle réel d'une inductance révèle de nombreux éléments parasites qui peuvent influencer son fonctionnement. Les matériaux utilisés pour la construction des bobines de l'électrotechnique ou électronique de puissance sont les suivants :

- L'air, réservé au domaine des très hautes fréquences et des faibles puissances.
- Les tôles de fer dite aussi bobine à tore de poudre de fer, utilisés pour des faibles fréquences dites industrielles (16.66, 50, 60 et 400 Hz).
- Les ferrites : Céramiques magnétiques, moulées selon la forme désirée du circuit magnétique, utilisées en électronique de puissance à haute fréquence.



modèle équivalent d'une inductance

Vu que les alimentations fonctionnent généralement sur des fréquences très élevées, alors il est impérativement impossible d'utiliser des tôles de fer pour la construction du corps de la

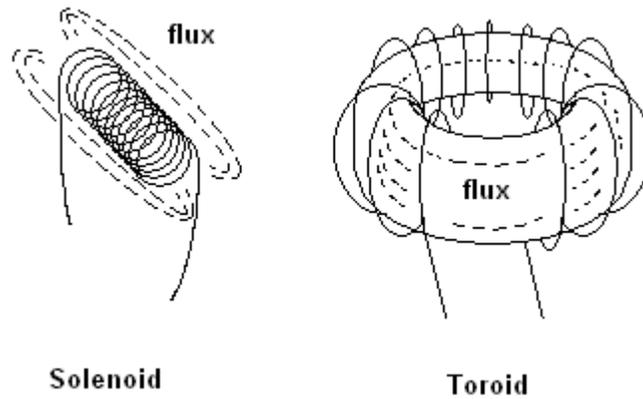
bobines, ce qui nous oblige à utiliser des tores en ferrite pour cette application qui sont plus adaptés aux applications en hautes fréquences. Leur construction se fait à la base des céramiques magnétiques à haute résistivité (de 10^2 à $10^8 \Omega \text{ cm}$), donc présentant des pertes par courant de Foucault particulièrement faibles, et à haute perméabilité (jusqu'à environ 10000). Ils sont disponibles sur des différentes formes et dimensions géométriques, un code couleur existe permettant d'identifier la nature de leurs matériaux facilement et de relever leurs caractéristiques physiques. Leurs inductances de saturation des ferrites sont de l'ordre de 0.4 à 0.5 T. On les emploie généralement hors saturation et l'on retient $B_{\text{max}} = 0.3 \text{ T}$.



Figure 83. exemple de noyaux toriques magnétiques

Géométrie de la bobine :

Selon la construction de la bobine, la géométrie de l'inductance, la section du câble et les caractéristiques du noyau, certains parasites peuvent se révéler plus gênants que les autres. En conséquence la valeur de l'inductance et l'importance de chaque type de parasite par rapport aux autres déterminent la réponse fréquentielle de l'inductance utilisée. La géométrie de certains composants peut augmenter la sensibilité des composants aux facteurs externes, et cet accroissement de la sensibilité peut également influencer sur la valeur de l'inducteur. Les inductances à flux ouvert sont plus sensibles aux matériaux métalliques directement à proximité, car ce type de matériaux modifie le champ magnétique. Les inductances toroïdales confinent le flux à l'intérieur du noyau et sont moins sensibles aux conducteurs externes à proximité directe.



Le calcul d'une bobine réalisée sur un tore est d'une extrême simplicité puisqu'il fait appel à la relation suivante :

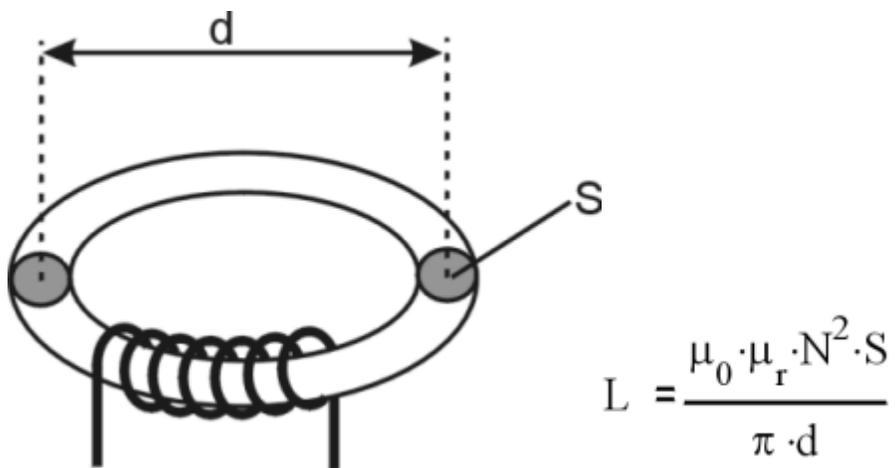


Figure 84. dimensionnement d'une inductance torique

Avec :

- D : diamètre du tore [m]
- S : section du bobinage [m²]
- N : nombre de spires
- Constante : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am
- μ_r : perméabilité relative (dépend de la matière)

- L : inductance [H]

Matière	Perméabilité relative μ_r
Air	1
Fer (Permaloy 45)	2700 à 23000
Mumetal	20000 à 100000
Ferrite (3C3)	2200
Ferrite (3B7 et 3B9)	2300
Ferrite (3D3)	750
Ferrite (4C4)	125

Tableau XI. Perméabilité relative de quelques matières

- Contraintes de dimensionnement

Le dimensionnement de l'inductance ne dépend que des facteurs géométriques, mais aussi des caractéristiques électriques du convertisseur, notamment la fréquence de découpage, la puissance transmise et le rendement :

- Les pertes dans le noyau Pd sont limitées de façon à garantir un rendement de puissance donné : $\eta = (P_{\text{tot}} - P_d) / P_{\text{tot}}$
- Le volume du noyau V est imposé de façon à atteindre une puissance volumique donnée de 100 W/cm³.

Ces deux contraintes induisent des relations de dépendance entre les différents paramètres de construction.

La puissance totale transmise dans l'inductance est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{tot}} = \frac{L^2}{2\mu_0 \mu_r} f \times V$$

Avec :

V : Le volume du noyau

f : fréquence de découpage

L : inductance de la bobine

Cette équation nous permet de fixer un rapport entre volume du tore et la nature de sa matière, Pour une puissance de 1.7 kw et une inductance de 60mH on trouve un rapport volume/perméabilité relative :

$$\frac{V}{\mu_r} > 1.19 \times 10^{-4}$$

Le choix de la matière est un compromis entre un μ_r élevé et la stabilité. En règle générale on s'attache aux conventions suivantes :

- Fréquence < 2MHz : $3000 < \mu_r < 6000$.
- Fréquence < 5 MHz : $\mu_r < 2000$.
- Fréquence < 50MHz : $\mu_r < 250$.

- Fréquence < 100MHz : $\mu_r < 80$.

Les pertes magnétiques

Un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique variable est source de pertes ayant deux origines :

- Les pertes par courant de Foucault :

Le matériau est soumis à un champ magnétique variable, il apparaît alors dans ce matériau des tensions induites, donc des courants induits, et donc des pertes de joule. Ces pertes sont données par la formule suivante :

$$P_f = \frac{(B_{\max} S f)^2}{\rho}$$

Avec :

- B_{\max} : induction maximale
- S : section du circuit magnétique
- f : fréquence du flux traversant la bobine
- ρ : résistivité du matériau

- Pertes hystérétiques.

Elles sont dues à l'énergie mise en jeu pour parcourir le cycle d'hystérésis. Leur expression est donnée par :

$$P_h = V \times A \times f$$

Avec :

- V : volume de circuit magnétique
- A : surface du cycle d'hystérésis du matériau
- f : fréquence de fonctionnement

5. Conclusion

Il est important de noter que le but de ce travail est de trouver la configuration des modules photovoltaïque ainsi que la fréquence de hachage idéales pour un fonctionnement optimal de l'installation photovoltaïque, pour cela deux configurations ont été adopté pour le générateur photovoltaïque et qui sont illustrées dans les figures 72 et 73. Le dimensionnement des composants du convertisseur Boost et la conception ainsi que la réalisation des cartes électroniques ont été élaboré selon trois fréquences de hachage différentes : 10KHz, 20kHz et 80KHz

Les essais pour la première configuration du GPV représentée dans le figure ont été faites selon les deux fréquences de hachage : 10KHz et 20KHz avec :

$$V_{e\text{-nominale}} = 100\text{v}$$

$$V_{\text{emax}} = 148\text{v}$$

$$V_s = 400\text{V}$$

Les essais de la deuxième configuration du GPV représentée dans la figure 73 ont été réalisés pour une fréquence de hachage égale à 80KHz afin de réduire l'encombrement du convertisseur, et une tension optimale du GPV varie entre 28V et 62.4V afin d'avoir une commande MLI avec un rapport cyclique au voisinage de 50%.

Conclusion générale

Après une présentation des principales composantes d'un système photovoltaïque et des améliorations actuelles de la technologie des convertisseurs et de leurs commandes. Ce travail de thèse nous a permis de développer des commandes numériques de tous les circuits de puissance intégrant la régulation automatique de tension.

L'intégration de plus en plus forte des générateurs PV au sein des systèmes de pompage ou le raccordement au réseau électrique engendre des problèmes de stabilisation de tension et de fréquence très importants. Pour résoudre cette problématique, nous avons proposé une régulation numérique de la tension à la sortie du Boost utilisé pour l'extraction de la puissance maximale. De plus, Régulation conçue également pour s'adapter à différents points de fonctionnement du générateur PV par le calcul des paramètres du régulateur d'une façon adaptatif suivant le point de fonctionnement des panneaux qui change avec le changement des conditions climatiques.

D'autre part, la structure choisie est modulaire formé par des convertisseurs boost associés à un onduleur survolteur. Opérant dans les mêmes conditions de température et d'irradiation et associés en série pour augmenter la tension.

Ce travail de thèse s'est efforcé de réaliser une poursuite du point de puissance maximale et une régulation de tension sur le même convertisseur Boost afin d'optimiser le système et diminuer le nombre de composants. Ce cahier des charges très sévères du fait que les deux régulateurs agissent sur la même variable de commande qui est le signal de commande de l'interrupteur du BOOST. Cette corrélation contraigne fortement l'étude et la régulation de tension. En perspectives du présent travail, deux solutions ont été proposées pour pallier à ce problème :

La première consiste à séparer les deux traitements.

La deuxième consiste à appliquer la moyenne des deux commandes.

La combinaison des deux régulateurs ne sera pas sans effet sur les performances de la régulation, ce qui justifie le choix de l'onduleur survolteur muni d'un autre régulateur pour compenser les erreurs de régulation de l'étage hacheur survolteur.

La réalisation d'un prototype a permis de valider le fonctionnement et les performances de l'onduleur survolteur ainsi que l'efficacité du régulateur PI pour la régulation de la tension.

Références

- A. Durgadevi, S. Arulselvi. «An Improved PI Regulator Based Load Regulation in Constant Photovoltaic Power Supply System.» *IJCSI International Journal of Computer Science* 9, n° 3 (2012).
- A. Durgadevi, S. Arulselvi. «An Improved PI Regulator Based Load Regulation in Constant Photovoltaic Power Supply System.» *IJCSI International Journal of Computer Science Issues* 9, n° 2 (2012).
- A. H. Alhamdani, R. T. Hamdi and M. hassan. «Optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping system in Samara.» *Engineering and Technology Journal* 31, n° 16 (2013): 3067-3077.
- A. Khiareddine, C. B. Salah, & M. F. Mimouni. «Control water level of a photovoltaic pumping system.» *International Conference on IEEE*. 2013.
- A. Khiareddine, C. B. Salah, and M. F. Mimouni. «Power management of a photovoltaic/battery pumping system in agricultural experiment station.» *Solar energy* 112 (2015): 319-338.
- A. P. Parikh, P. N. Tekwani and V. Patel. «Design and implementation of solar pumping system with induction motor and submersible pump.» *Nirma University International Conference on Engineering NUICONE, IEEE Conference*. edited by B. A. Modi. Ahmeda, s.d.
- A. P. Parikh, P. N. Tekwani, and V. Patel. «Design and implementation of solar pumping system with induction motor and submersible pump.» *Nirma University International Conference on. IEEE. NUICONE*, 2017.
- africaine, groupe de la banque. «étude d'impact environnementale et social (EIES) projet centrale solaire d'ouarzazate II.» 2011.
- agency, IRENA. «"renewable energy in the arab region- overview of developments.» *the interational renewable energy* , 2016.
- agency, IRENA. «renewable energy in the arab region- overview of developments.» *the interational renewable energy* , 2016.
- agency, IRENA. «renewable information.» *interational renewable energy*, 2017.

- Akhter, R. «A New technique of PWM Boost Inverter for Solar Home Application.» 4, n° 1 (2007): 39-45.
- all, H. A. Al-Waeli et. «Optimum Design and Evaluation of Solar Water Pumping System for Rural Areas.» *International Journal of Renewable Energy Research* 7, n° 4 (2017): 12-20.
- B. M. Hasaneen, & A. A. E. Mohammed. «A new control strategy for the Boost DC-AC Inverter.» *12th International Middle-East, IEEE. MEPCON* , 2008. 335-340.
- Boitier V, Maussion P, Cabal C. « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques.» *Revue 3E.I* 54 (2008): 90-96.
- Buhler, H. «Convertisseur statique.» *Presses polytechnique Romande Lausanne*, 1991.
- Buhler, H. «Convertisseur statique, Presses polytechnique .» *Romande Lausanne*, 1991.
- Buyers, A. «Les systèmes photovoltaïques.» *guide canada*, 2002.
- C. Albea, F. Gordillo and J. Aracil. «A new technique of PWM boost inverter for solar home application.» *BRAC University Journal* 4, n° 1 (2007): 39-45.
- . «Control of the Boost DC-AC Converter by Energy Shaping.» *32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics society*. Paris , 2006. 754-759.
- C. Feraga, A. Bouldjedri. «Performance of a Photovoltaic Pumping System Driven by a Single Phase Induction Motor Connected to a Photovoltaic Generator.» *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications* 57, n° 1 (2016): 163–172.
- CHIKUNI, E. «Program-assisted sizing of a photovoltaic-powered water pumping system.» *Journal of Energy in Southern Africa* 23, n° 1 (2012): 32-38,.
- Dondon, P. «Alimentation à découpage BOOST Elévateur.» *ENSEIRB, Talence*, s.d.
- Ettaik, Z. *Les énergies renouvelables au Maroc, Bilans et Perspectives. Ministère de l'énergie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement*. s.d.
- F. E. Lahouar, J. Ben Hadj Slama, M. Hamouda, and F. Ben Mustapha. «5th International Renewable Energy Congress (IREC).» Hammamet, 2014. .
- Gerard, M. «Les Alimentations à découpage.» *Edisciences*, 1993.
- H. Belmili, M. Ayad, E. M .Berkouk, and M. Haddadi. «Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes-Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil.» *Revue des Energies Renouvelables CICME* 8 (2008): 27-39.

<http://www.energeia.site.voila.fr/index2.html>. «L'électricité éolienne dans le monde .» (consulté le 15/08/2014).

I. PATRAO, E. FIGUERES, F. GONZÁLEZ-ESPÍN, and G. Garcerá. «Transformerless topologies for grid-connected single-phase photovoltaic inverters.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011): 3423-3431.

I. Tsuda, K. Kurokawa, K. Nozaki. «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery, solar energy materials and solar cells.» 1994.

IRENA. «renewables energy: overview 2017".» *global status report*, 2017.

J. Jiang, T. Huang, Y. Hsiao , C. Chen. «Maximum power tracking for photovoltaic power systems, .» *Tamkang Journal of Science and Engineering* 8, n° 2 (s.d.).

J. K. VERMA, R. S. Dondapati. «Techno-economic sizing analysis of solar PV system for Domestic Refrigerators.» *Energy Procedia* 109 (2017): 286-292.

K. Ghedamsi, E. Berkouk, K. Aliouane. *Etudes comparatives entre la stratégie triangulo-sinusoidale et la stratégie de modulation vectorielle associée à la méthode triangulo-sinusoidale de commande d'un onduleur triphasé à trois niveaux*. Alger: SGE, EMP, 2001.

Kaliamoorthy, B.M Sundaram B.V Manikandan M. «Simulation of FPGA controlled Single Stage Boost Inverter for the Applications of Grid Connected Photovoltaic System.» *SAGE journal* 93, n° 12 (2017): 1087-1097.

Lakhdr, M. L. «Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisé pour l'irrigation dans les zones sahariennes-Application zone d'Ouargla.» Thèse de doctorat. Université de Battna, 2017.

Lechennadec, J. «Alimentation à découpage : Etude, choix et dimensionnement des alimentations à découpage usuelles.» *Lycée Louis Armand Strasbourg*, s.d.

M Adar, Hasnaa Bazine, A Abounada, Mustapha Mabrouki. «Simulation and comparative study of different PV Modules technologies of silicon (Monocrystalline, polycrystalline and Amorphous) in Beni Mellal.» *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* 11, n° 3 (2016): 112-121.

M. Adar, H. Bazine, A. Abounada and M. Mabrouki. «Simulation and comparative study of different PV Modules technologies of silicon.» *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* 11, n° 3 (2016): 112-121.

- M. Adouane, M. Haddadi, A. Malek, M. Hadjitat. «Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC16F876A.» *Revue des Energies Renouvelables* 12, n° 4 (2009): 543-550,.
- M. D. Patil, and R. G. Ramteke. «LC filter design implementation and comparative study with various PWM techniques for DCMLI.» *International Conference on Energy Systems and Applications*. 2015.
- M. D. Patil, R. G. Ramteke. *International Conference on Energy Systems and Applications*. 2015.
- M. Islam, M. Hasan, P.Akter, M. M. Rahman. « Electrical Information and Communication Technology (EICT).» *International Conference, IEEE*. 2013.
- M. Islam, S. Mekhilef, and M. Hasan. «Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015.): 69-86.
- Malla, Siva Ganesh, C. N. Bhende, and S. Mishra. «Photovoltaic based water pumping system.» *International Conference on IEEE*. 2011.
- Mohammed, M. Hasaneen and A. A. E. «Design and simulation of DC/DC boost converter.» *12th International Middle East Power System Conference*. Aswan, Egypt, 2008.
- N. Rebei, A. Hmidet, R. Gammoudi and O. Hasnaoui. «Implementation of Photovoltaic water pumping system with optimization controls.» *International Journal of Renewable Energy* 9, n° 2 (2014): 7-19.
- Phogat, S. «Analysis of single-phase SPWM inverter.» *International Journal of Science and Research* 3 (2014): 1793-1798.
- Pinard., Michel. «convertisseurs, électronique de puissance et commande.» s.d.
- R. A. Khan, L. A. Khan and S. Z. Hussain. «Design and Simulation of 0.75 hp Soft Start AC Water Pump Powered by PV Solar System.» *Universal Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, no 4, pp. 113-121 (2015 3, n° 4 (2015): 113-121.
- R. C. VARIATH, M. A. ANDERSEN, O. N. NIELSEN, and A. Hyldgård. «A review of module inverter topologies suitable for photovoltaic systems.» *IPEC, 2010 Conference Proceedings. IEEE*. 2010. 310-316.
- R. M. Dave, K.C.Dave. «Analysis of Boost Converter Using PI Control Algorithms.» *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3 (2012): 71-73.

- R. Mitulkumar Dave, K.C.Dave. «Analysis of Boost Converter Using PI Control Algorithms.» *International Journal of Engineering Trends and Technology* 3, n° 12 (2012).
- R. Mitulkumar Dave, K.C.Dave. «Analysis of Boost Converter Using PI Control Algorithms.» *International Journal of Engineering Trends and Technology* 3, n° 12 (2012).
- R. Naim, G, Weiss, S. Ben-Yaakov. « H_{∞} control applied to boost power converters.» *IEEE Transactions on Power Electronics*, s.d.
- R. Naim, G, Weiss, S. Ben-Yaakov. « H_{∞} control applied to boost power converters.» ”, *IEEE Transactions on Power Electronics* 12, n° 4 (1997).
- Rajini, M. jayakumar and V. «Investigation of photovoltaic water pumping system.» in *International Conference Circuit Power and Computing Technologies ICCCPCT, IEEE conference*. Nagercoil, India, 2013. 275-282.
- Ritnoom, A. Waiprib and N. «The simple embedded system for three-phase solar motor pump using Volt/Hertz maximum power point tracking technique.» in *Computer Science and Software Engineering International Joint Conference JCSSE, IEEE Conference*. Boongkok, Thailand: Kilsirikul and Boonserm, 2012.
- Roslan, R. «A maximum Power point tracking converter for photovoltaic application.» *Bachelor degree Thesis, Universiti Teknologi Malaysia*,, 2009.
- S. Chiang, K. Chang, C. Yen. «Residential photovoltaic energy storage system.» *IEEE Transaction. On Industrial electronics* 45, n° 3 (1998): 385-394.
- S. Chiang, K. Chang, C. Yen,. « Residential photovoltaic energy storage system, IEEE.» s.d.
- S. Chiang, K. Chang, C. Yen,. « Residential photovoltaic energy storage system, IEEE.» *Transaction On Industrial Electronics* 45, n° 3 (1998): 385-394.
- S. I. Khan, M. R. Sarkar and M. Q. Islam. «Design and analysis of a low cost solar water pump for irrigation in Bangladesh.» *Journal of Mechanical Engineering* 43, n° 2 (2014): 98-102 .
- S. S. Chandel, M. N. Naik and R. Chandel. «Renewable and Sustainable Energy Journal, vol.49, pp. 1084-1099 (2015).» *Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies*, s.d.
- S. S. Chandel, M. N. Naik, & R. Chandel. «Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 1084-1099.

- S. S. Chandel, M. N. Naik, and R. Chandel. «Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 1084-1099,.
- SLIM, SOUHEIL. «synthèse d'une nouvelle structure d'onduleur monophasé à bras résonnant: procédure de conception optimale et évaluation des performances .» s.d.
- Sontake, Vimal Chand, and Vilas R. Kalamkar. «Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016): 1038-1067.
- Sood, H. Abdelgawad and V. «Average Model of Boost Converter, including Parasitics, operating in Discontinuous Conduction Mode (DCM).» *International Journal on Power Engineering and Energy* 7 (2016).
- Swe, N. Y. Kyaing and W. «Design Considerations of PV Water Pumping and Rural Electricity System in Lower Myanmar». World Academy of Science, Engineering and Technology.» , *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication engineering* 5, n° 3 (2011): 263-267.
- Texas instruments. «Basic calculation of a boost converter's power stage.» 2014.
- Thanh, N. «Solar panel maximum power tracker.» *University of Computer Science and Electrical Engineering, Queensland*, 2001.
- Violaine, D. «Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques, fonctionnement, état de l'art et études des performances.» *rapport de stage HESPUL*, 2007.
- Wolfs, Q. Li and P. «A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations.» *IEEE Trans. Power Electron* 23 (2008): 1320-1333.