

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème:

**Modélisation et simulation d'un système
photovoltaïque associé à la commande prédictive**

Devant le jury composé de Présenté par :

.....

Président

- Zid Elhabib Abealkacem

.....

Examineur

- Hechifa Youcef seddik

.....

Examineur

- Zid Ahmed

Labiod Chouaib

Encadreur

-Ghedeir Amar Abdelghani

2023/2022



Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Allah et Nous Le remercions pour Ses innombrables bienfaits, Sa générosité inégalée et Sa bienveillance sans faille. C'est grâce à Sa grâce que nous avons été bénis avec la santé, la volonté, la patience, le courage et la force nécessaires pour mener à bien nos études.

Nous tenons également à exprimer notre sincère reconnaissance envers le : « **Dr. Chouaib Labiod** », notre encadreur, qui a joué un rôle essentiel dans la direction de ce travail. Sa supervision scientifique de grande qualité a été d'une valeur inestimable. Nous sommes profondément reconnaissants pour ses conseils pertinents et éclairés, sans lesquels la réalisation de ce travail aurait été bien plus difficile.

Nos remerciements vont également à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'examiner attentivement notre travail et d'évaluer nos efforts. Leur engagement envers l'excellence académique est très apprécié.

- ❖ Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers tous les enseignants qui ont guidé notre parcours tout au long de ces cinq années, en particulier le « **Dr. Bebboukha Ali** » et le « **Dr. Hechifa Abdelmoumene** » et le « **Dr. Hettiri Messaoud** » et le « **Dr. Mahmoudi Abdelkader** ». Leurs connaissances, leur expertise et leur dévouement ont été une source d'inspiration pour nous.
- ❖ Nous tenons également à remercier chaleureusement toutes les personnes administratives du département de génie mécanique de l'université d'El-Oued pour leur soutien constant et leurs efforts pour créer un environnement propice à l'apprentissage.
- ❖ Enfin, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers toute la promotion électromécanique 2023. Votre soutien mutuel, votre camaraderie et votre esprit d'équipe ont été des éléments précieux de notre parcours académique.
- ❖ Nous sommes profondément reconnaissants envers tous ceux qui ont contribué à notre réussite et nous leur sommes redevables pour leur soutien indéfectible.

Dédicace

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع

إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آماله، إلى من كان يدفعني قدما نحو الأمام لنيل

المبتغى، إلى الإنسان الذي امتلك الإنسانية بكل قوة، إلى الذي سهر على تعليمي بتضحيات جسام مترجمة في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة،

"أبي الغالي" أطال الله في عمره

إلى من حملتني وهنأ على وهن إلى من جعل الله الجنة تحت قدميها إلى ريحانة حياتي التي غمرتني بعطفها وحنانها إلى من أنارت درب حياتي إلى من تنبت أزكى الأزهار إلى من يسعد قلبي بقلبيها...

"والدتي الغالية" أطال الله في عمرها

إلى شموع متقدة تنير ظلمة حياتي إلى من بوجودهم اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها

إلى من عرفت معهم معنى الحياة

"اخوتي"

إلى من أرى التفاؤل بعينيها.. والسعادة في ضحكتيها

إلى من شاركهم كل حياتي

"اخواتي"

إلى كل من الاخوين الغاليين: "علي ببوخة" و "عبدالمومن حشيفة"

وأخيرا إلى كل من ساعدني، وكان له دور من قريب أو بعيد في إتمام هذه الدراسة،

سائلا المولى أن يجزي الجميع خير الجزاء في الدنيا والآخرة

زيد الحبيب أبا القاسم

Dedicate

الحمد لله الذي وهبنا التوفيق والسداد ومنحنا الثبات واعاننا علي اتمام هذا العمل

بعد ان سافرنا لنضع النقاط علي الحروف ونكشف ما وراء ستار والعلم

والمعرفة فها هي الاثمار علمنا قد اينعت وحان قطافها .

هذه كلماتنا المبعثرة نهمس بها في اذن كل من سيفتح هذه المذكرة

هي ايضا كلمات شكر إلى كل من حثنا وغرس فينا الامل والارادة

هي ذي ثمرة جهدي اجنيها اليوم هي هدية اهديها الي :

والدي الغالي حفظه الله

أمي العزيزة اطل الله في عمرها

وجميع اخوتي واخواتي واصدقائي

إلى كل من الاستاذ المشرف الايض شعيب

ومساعديه ببوخة علي و حشيفة عبد المؤمن

وإلى من ساندني في انجاز هذا العمل

حشيفة يوسف الصديق

Dédicace

أهدي ثمرة جهدي المتواضع
الى من وهبوني الحياة والأمل، والنشأة علي شغف
الاطلاع والمعرفة، ومن علموني ان ارتقي سلم الحياة بحكمة وصبر؛
برا وأحسانا؛ ووفاء لهما: والدي العزيز، ووالدتي العزيزة
الى من وهبني الله نعمة وجودهم في حياتي الي العقد المتين
من كانوا عوناً لي في رحلة بحثي : اخوتي واخواتي
إلى من كانوا عوناً لي في رحلة بحثي: ببوخة علي ، حشيفة عبد المؤمن
واخيراً إلى كل من ساعدني، وكان له دور من قريب او بعيد في اتمام هذه الدراسة سائلي المولي ان يجزي
الجميع خير الجزاء في الدنيا والاخرة
ثم إلى كل طالب علم سعي بعلمه ، ليفيد الاسلام والمسلمين
بكل ما أعطاه الله من علم ومعرفة.

أحمد زيد

Dédicace

" وقل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون "

أحمد الله عز وجل على منه و عونه لإتمام هذه المذكرة

إلى من لا يمكن للكلمات أن توفي حقها

إلى من لا يمكن للأرقام أن تحصي فضائلها

إلى من كلفه الله بالهبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار.. إلى من أحمل اسمه بكل افتخار ...
أرجو من الله أن يد في عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها
..اليوم وفي الغد وإلى الأبد

"اي الغالي"

إلى اللؤلؤة التي تلالأت في فضاء الفضيلة والإخلاص ، إلى رمز الحب وبلسم الشفاء إلى من أرضعتني الحب
والحنان ، إلى من حرمت نفسها وأعطتني إلى أحلى كلمة نطقها شفتاي

" إليك أمي الغالية "

إلي ملاك رزقني الله به لأعرف من خلاله طعم الحياة الجميلة الذي غير مفاهيم الحب في حياتي ابني البكر
المعتصم بالله

إلى مرشدتي في الدنيا إلى من كانت معي وستبقى معي ما بعد الوجود إلي التي اعتبرها حياة علي شكل
إنسان ...نصفي الآخر زوجتي

إلى إخواني الأعزاء

إلى أخواتي العزيزات إلى كل عائلتي العزيزة

لجميع أصدقائي المقربين وخاصة **يونس جاب الله**

غدير عمر عبد الغني

Résumé:

Ce projet présente un modèle de simulation de la partie électrique d'un système photovoltaïque associé à la commande prédictive d'un onduleur triphasé. Le convertisseur DC/DC est une partie très importante pour le bus DC de l'onduleur et il est développé afin d'extraire le maximum du générateur photovoltaïque. L'association d'un onduleur avec un système photovoltaïque donne de nombreux avantages à ce système lorsque nous pouvons être exploités pour de nombreuses applications telles que : charge AC pour les zones isolées, utilisation pour l'alimentation sans coupure UPS, préparé pour être connecté au réseau... ect

Le plan de ce projet sera présenté comme suit :

- La littérature sur les énergies renouvelables et les techniques MPPT pour le système photovoltaïque.
- Le modèle mathématique du système photovoltaïque et de l'onduleur avec sa technique de contrôle.
- Techniques MPPT liées au système photovoltaïque .
- L'association de système photovoltaïque avec onduleur triphasé commandé par l'approche prédictive. - Résultats de simulation avec interprétation et discussion.

Mot clé : système photovoltaïque-techniques MPPT- technique de contrôle prédictive .

الملخص :

قمنا في هذا المشروع بتطوير نموذج محاكاة للجزء الكهربائي لنظام الطاقة الشمسية المتصل بمحول ثلاثي الطور والمتحكم به بواسطة التحكم التنبؤي. يعتبر المحول DC/DC جزءًا حاسمًا لحافلة التيار المستمر للمحول، وتم تطويره لاستخراج الحد الأقصى من مولد الخلايا الشمسية. بالإضافة إلى ذلك، يقدم ارتباط المحول بنظام الطاقة الشمسية العديد من المزايا في هذا النظام، حيث يمكن استغلاله في تطبيقات عديدة مثل تشغيل أحمال AC في المناطق المعزولة واستخدامه كمصدر طاقة غير قابل للانقطاع UPS وتحضيره للاتصال بالشبكة.

تشتمل خطة هذا المشروع على النحو التالي:

- دراسة شاملة للأدبيات المتعلقة بالطاقة المتجددة وتقنيات نقطة الطاقة القصوى MPPT لأنظمة الطاقة الشمسية.

- تطوير نموذج رياضي لنظام الطاقة الشمسية والمحول مع استخدام تقنية التحكم المستخدمة.

- استكشاف تقنيات نقطة الطاقة القصوى MPPT المرتبطة بنظام الطاقة الشمسية.

- ارتباط نظام الطاقة الشمسية بمحول ثلاثي الطور المتحكم به بواسطة النهج التنبؤي.

- تحقيق النتائج المحاكية وتفسيرها ومناقشتها.

الكلمة المفتاحية : النظام الكهروضوئي - تقنيات التحكم في تقنية - التحكم التنبؤي

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ÉTUDE GENERALE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	
I INTRODUCTION	3
I.2 SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE	3
I.2.1 L'éolienne	4
I.2.2 La biomasse.....	4
I.2.3 énergie hydroélectrique	5
I.2.4 L'énergie géothermique	5
I.2.5 Énergie solaire.....	6
I.2.6 Énergie solaire thermique.....	6
I.2.7 énergie solaire thermodynamique	7
I.2.8 ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	7
I.3 Le rayonnement solaire	7
I.4 Les systèmes photovoltaïques	8
I.4.1 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE	8
I.4.2 CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	9
I.4.3 Assemblage des cellules photovoltaïques en modules	10
I.4.4 Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	12
I.5 APPLICATIONS DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	13
I.5.1 Applications agricoles des systèmes photovoltaïques	13
I.5.1.1 Alimentation en eau de pompage à partir d'un système photovoltaïque	14
I.5.1.2 Systèmes de dessalement d'eau de mer à partir de l'énergie photovoltaïque	15
I.5.1.3 Serres photovoltaïques pour la production de légumes	15
I.5.1.4 Éclairage et sécurité des zones agricoles à partir de l'énergie photovoltaïque.....	16
I.5.1.5 Systèmes d'irrigation à énergie solaire	16
I.5.1.6 Réfrigération des produits agricoles à partir de l'énergie photovoltaïque.....	16
I.6 Systèmes de stockage d'énergie	17
I.6.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE.....	17
I.6.2 TYPES DE BATTERIES UTILISEES POUR LE STOCKAGE DE L'ENERGIE	18
I.6.2.1 Les batteries d'accumulateurs :	19
I.6.2.2 Les batteries au plomb :.....	19
I.6.2.3 Les batteries au Cadmium-Nickel :	19
I.6.2.4 Les batteries au Nickel-Zinc :.....	19
I.6.2.5 Les batteries au Lithium :	20
I.6.3 CARACTERISTIQUES DES BATTERIES UTILISEES POUR LE STOCKAGE DE L'ENERGIE	20
I.6.4 DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE POUR LES SYSTEMESPHOTOVOLTAÏQUES :.....	20
I.7 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	21
I.7.1 FACTEURS INFLUENÇANT LA PERFORMANCE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	21
I.7.2 MESURE DE LA PERFORMANCE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	21

I.7.3	ANALYSE ECONOMIQUE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES DANS LE SUD ALGERIEN.....	21
I.8	CONCLUSION	22
CHAPITRE II :CONVERTISSEURS DC/DC ET TECHNIQUES MPPT POUR LES SYSTEMES PV		
II.1.	INTRODUCTION.....	23
II.2.	CARACTERISTIQUES DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.....	23
I.2.4	Structure du système photovoltaïque :	24
II.2.4	Modèle mathématique d'une cellule PV (cas de cellule réel/pratique):.....	25
II.3.	CONVERTISSEURS DC/DC POUR LES SYSTEMES PV :	26
II.4.	LES DIFFERENTS TYPES DE CONVERTISSEURS DC/DC UTILISES DANS LES SYSTEMES PV :	27
I.2.4	Principe de fonctionnement des convertisseurs DC/DC :	27
II.4.1.3	CONVERTISSEUR DC-DC BOOST	27
II.4.1.3	CONVERTISSEUR DC-DC BUCK.....	30
II.4.1.3	CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.....	33
II.5.	RESULTATS DES CARACTERISTIQUES D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	36
II.6.	TECHNIQUES MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING) DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :	38
I.2.4	Perturbation et Observation (P&O) :	39
II.2.4	Algorithme MPPT par conductance incrémentale (INC) :	41
II.7.	CONCLUSION	42
CHAPITRE III: PV SYSTEM ASSOCIE A UN ONDULEUR CONTROLE PAR MPCIII.		
MODÉLISATION DE L'ONDULEURTRIPHASÉ		
III.1.	INTRODUCTION :	43
III.2.	METHODES DE CONTROLE PREDICTIF POUR LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE ET LES VARIATEURS	43
III.3.	COMMANDE DE COURANT PREDICTIVE	45
III.4.	FONCTION DE COUT	45
III.5.	MODELE DE CONVERTISSEUR	45
III.6.	CHARGER LE MODELE	49
III.7.	MODELE EN TEMPS DISCRET POUR LA PREDICTION	50
III.8.	MPPT DU SOLAIRE PV POUR ONDULEUR ASSOCIE AVEC CONVERTISSEUR BOOST :	52
III.9.	SIMULATION ET RESULTATS :	52
III.10.	CONCLUSION	57
CONCLUSION GENERALE		58
BIBLIOGRAPHIE		59

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [03]	4
Figure I. 2 : La biomasse	4
Figure I. 3: Un barraged'eau	5
Figure I. 4: Une centrale géothermie	6
Figure I. 5: Types d'énergie solaire	6
Figure I. 6: Diagrammes schématiques des bandes d'énergie pour les matériaux typiques. (a) Isolateur. (b) Conducteur (métal.) (c) Semi-conducteur	9
Figure I. 7: Mode cellule solaire unique	9
Figure I. 8 : Caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque .	10
Figure I. 9 : ruban métallique d'une cellule.	11
Figure I. 10: Encapsulation des cellules.	11
Figure I. 11: Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$.	12
Figure I. 12: (A) Moissonneuse-batteuse équipée d'un système AutoTrac utilisant un Green Star 2630 Display pour faire fonctionner le système de guidage et une foule d'autres applications d'agriculture de précision, développé par John Deere et (B) Corrections RTK mobiles utilisant les communications 3G/4G [13]	14
Figure I. 13: Schéma d'un système d'irrigation PVP.	16
Figure I. 14: (a) Le système mis en œuvre à Anand, en Inde, (b) Schéma du système proposé.	17
Figure I. 15: Schematic diagram of a battery energy storage system operation.	18
Figure II.1: Circuit équivalent simplifié du panneau PV.	24
Figure II.2: Synoptique de la structure du système pv	24
Figure II.3: Equivalent circuit of real model for PV panel: Circuit équivalent du modèle réel pour panneau PV	25
Figure II.4 : Principe de base d'un hacheur	27
Figure II.5: schéma de base d'un convertisseur Boost	27
Figure II.6: les deux configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de l'interrupteur S.	28
Figure II.7: formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.	29
Figure II. 8 : Schéma de base d'un convertisseur Buck	31
Figure II.9: Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteurs	31
Figure II.10: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck	32
Figure II.11: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost	34
Figure II.12: Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost suivant l'état de l'interrupteur S	34
Figure II.13: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost	35
Figure II.14: Caractéristiques I-V, variation de l'irradiance à température constante.	37
Figure II.15: Caractéristiques P-V, variation de l'irradiance à température constante	37
Figure II.16: Caractéristiques I-V, variation de la température à une radiation solaire constante	38
Figure II.17: Caractéristiques P-V, variation de la température à une radiation solaire constante	38
Figure II.18: Diagram of convergence towards the PPM by P&O	40
Figure II.19: Basic MPPT P&O algorithm	40
Figure II.20: Conductance incrément command algorithm	42
Figure III.1: Classification des méthodes de commande prédictive utilisées en électronique de puissance	44
Figure III.2: Schéma fonctionnel de la commande de courant prédictive	46
Figure III.3: Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension	46

Liste des Figures

Figure III.4: Configurations de charge équivalente pour différents états de commutation.	47
Figure III.5: Vecteurs de tension dans le plan complexe	49
Figure III.6: Organigramme du contrôle de courant prédictif	51
Figure.III.7: Schéma du MPPT basé sur l'algorithme P&O pour le système solaire PV Onduleur associé à un Boost Convertir Onduleur associé à un Boost Converter	52
Figure.III.8: Simulation d'un panneau photovoltaïque associé Inverte avec Boost Convertir Contrôlé par MPPT basé sur P&O	52
Figure.III.9: Température d'entrée [C°]	52
Figure.III.10: Rayons solaires [w/m2]	52
Figure.III.11: PV panel voltage extraction profile based on MPPT P&O	53
Figure.III.12: Tension du panneau PV et convertisseur tension	54
Figure.III.13: Courant PV correspondant à le contrôleur MPPT basé sur P&O	54
Figure.III.14: Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT basé sur P&O	55
Figure.III.15: MPPT basé sur P&O. PV profil d'extraction de puissance du panneau	55
Figure.III.16: Courant du convertisseur Charge RL	56
Figure.III.17: Tension de l'onduleur	56

Liste des Tableaux

List des Tableaux

Tableau I.1: Comparaison entre les différents types des énergies renouvelables	3
Tableau III.1: Predictive current control algorithm	46
Tableau III.2 : États de commutation et tension vecteurs	48

Liste des Symboles

Liste des Symboles

DC/DC :courant continu - courant continu.

PV :photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque

$MOSFET$:Transistors à effet de champ à oxyde de métal.

PM :puissance maximale.

FF : Facteur de forme.

D :diode de roue libre.

T_c : Température de la cellule.

R_p : Résistancesparallèle shunt.

P_m : La puissance maximale produite (PV).

V_m : Tension qui correspond à la puissance maximale.

I_m : Courant qui correspond à la puissance maximale.

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

I_{ph} : Photo-courant (A).

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) (Ω).

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

K : Constante de Boltzmann.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 :courant de saturation.

p_0 : Puissance incident.

V_s : la tension de sortie.

V_e :la tension d'entrée.

α : Rapport cyclique.

ΔI_L : L'ondulation du courant dans l'inductance

Introduction générale

Introduction générale

Dans les sociétés modernes , le niveau de développement et de prospérité économique est directement mesuré par la production et la consommation d'énergie. L'énergie joue un rôle important dans la santé économique des pays , ce qui se manifeste dans le produit national brut (PNB).Le revenu national brut par habitant dans le pays est corrélé avec la consommation d'énergie par habitant . Il existe un besoin continu d'augmenter la capacité de production d'énergie dans le monde entier en raison de l'augmentation de la consommation d'énergie mondiale. Les principales raisons en sont les développements technologiques ,la révolution industrielle et l'augmentation de la population . Dans la société moderne et développée , l'énergie est utilisée dans toutes les activités humaines .Voici quelques exemples principaux : (BONN, june 2004).

*Les applications domestiques telles que le chauffage, la cuisson, l'éclairage et la climatisation.

*Le transport - voiture de passagers, autobus, trains, camions et avions.

*La production de chaleur et d'électricité ainsi que de produits industriels ou destinés à l'utilisateur final.

*L'irrigation et la fertilisation dans les organisations agricoles. La consommation mondiale. D'énergie a augmenté de manière constante et rapide après la révolution industrielle.

La croissance mondiale de la demande d'énergie et les réserves finies des ressources de combustibles fossiles ont conduit à l'utilisation intensive des sources d'énergie renouvelables (SER). D'autres problèmes majeurs qui ont fortement stimulé le développement des SER sont l'impact croissant des technologies énergétiques sur l'environnement et le fait que les SER sont devenues aujourd'hui une technologie mature. La nécessité de disposer de systèmes d'énergie durables pour remplacer progressivement les systèmes conventionnels nécessite de changer le paradigme de l'approvisionnement en énergie en utilisant des ressources d'énergie propres et renouvelables.

L'énergie solaire se caractérise comme une source d'énergie propre, non polluante et inépuisable, qui est également abondamment disponible n'importe où dans le monde. Ces facteurs ont contribué à faire de l'énergie solaire la technologie renouvelable la plus rapidement en croissance dans le monde.

Actuellement, la production photovoltaïque (PV) joue un rôle crucial en tant qu'application basée sur l'énergie solaire en raison d'avantages uniques tels que l'absence de coûts de combustible, une fiabilité élevée, une simplicité d'installation, une faible maintenance et l'absence de bruit et d'usure en raison de l'absence de pièces mobiles. En plus de ces facteurs, il y a la baisse du coût des panneaux solaires PV, l'augmentation de l'efficacité des cellules solaires PV, l'amélioration des technologies de fabrication et les économies d'échelle.

Ce projet visait à la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque associé à un onduleur contrôlé par des techniques MPPT. Ce travail est présenté en trois parties comme suit :

Le premier chapitre est divisé en trois parties, la première partie traite des ressources d'énergie renouvelable et du rayonnement solaire de manière générale. La deuxième partie identifie les éléments photovoltaïques et leurs applications, et dans la dernière partie de ce chapitre, une étude générale sur le système photovoltaïque est menée afin de connaître les composants et les matériaux utilisés pour leur fabrication et leur application.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques du panneau photovoltaïque, ainsi que le principe de fonctionnement de MPPT et leurs différents algorithmes. Ainsi, le convertisseur élévateur DC/DC sera modélisé pour être utilisé comme outil pour atteindre le MPPT dans le panneau solaire.

Plusieurs techniques MPPT sont présentées dans la littérature, mais dans ce chapitre, les algorithmes P&O et d'augmentation de conductance sont présentés, puis la modélisation et la simulation du convertisseur DC/DC Boost sont développées pour être utilisées comme outils pour implémenter MPPT dans Simulions dans le prochain chapitre.

Dans le dernier chapitre de notre projet, la modélisation de l'onduleur triphasé et du convertisseur élévateur DC/DC a été développée, puis l'association du convertisseur élévateur avec l'onduleur sera effectuée après le contrôle de tension par des techniques PWM. Ensuite, nous associerons le système photovoltaïque avec le MPPT en utilisant le convertisseur DC/DC Boost converti. Sinon, le MPPT du système photovoltaïque est connecté à l'onduleur où il régule la puissance du panneau solaire et est converti de DC en AC par l'onduleur. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons simulé un système MPPT avec un panneau solaire PV connecté à un onduleur DC/AC.

Chapitre I : Étude générale sur les systèmes photovoltaïques

I Introduction

Un système d'énergie solaire photovoltaïque convertit l'énergie solaire en électricité utilisable. Il est composé de panneaux solaires contenant des cellules solaires qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Les panneaux sont connectés à un convertisseur qui transforme le courant continu en courant alternatif pour alimenter les appareils électriques. Le système est également équipé de batteries pour stocker l'énergie produite lors des périodes de faible consommation ou lorsque la production dépasse la demande. Les avantages du système solaire photovoltaïque incluent la réduction des coûts d'électricité à long terme et une plus grande indépendance énergétique (B.Flèche & D.Delagnes, 2007). Dans ce chapitre, une étude générale sur le système photovoltaïque est menée afin de comprendre les composants et les matériaux utilisés pour sa fabrication.

I.2 Sources d'énergie renouvelable

Les principales sources d'énergie renouvelable comprennent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie (B.Flèche & D.Delagnes, 2007).

Le tableau suivant résume les différents types des énergies renouvelables :

ENERGIES	COUT	ENCOMBREMENT	RENDEMENT	INTEGRATION DANS LE PAYSAGE	RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT
SOLAIRE	Moins de 1000 €/m ²	Faible pour une installation domestique	De 11 % à 25 %	Facile à la ville et à la campagne	Pas de production de déchets
EOLIENNE	Environ 100000 € pour une de 25 à 80 m ²	Conséquent pour les grandes installations	En fonction du vent, environ 10000 € pour une d'1 kWatt	Pas d'installation en ville et difficile à la campagne	Pas de production de déchets et recyclage des installations
BIOMASSE	Plafond des dépenses éligibles de 40000 € HT	Permettre de dimensionner la taille de l'installation	45 à 65 % de chaleur 15 à 45 % D'électricité	Dans des centrales biomasses. Une technique utilisée par l'industrie	Fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture
HYDRAULIQUE	Coût d'investissement: 1400 à 2000 €/kW Coût de production: 2 à 8 €/kWh	Moins encombrante que la transmission mécanique	Peut développer des forces importantes	Le barrage Centrale produit l'électricité Les lignes électriques	'N'émet pas de gaz à effet de serre Une digestion anaérobie et dégagedu méthane.
GÉOTHERMIQUE	Forages : de 10 à 15 millions \$ Constructions : 60 millions \$ Fonctionnement : 30 millions \$	Peu employée dans un but domestique	Le rendement est de l'ordre de 33 %	Centrale Géothermique	'émet aucun gaz à Effet de serre

Tableau I. 1 Comparaison entre les différents types des énergies renouvelables.

I.2.1L'éolienne

Une éolienne, communément appelée éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre moteur, qui est ensuite convertie en énergie électrique par un générateur (Poitiers, 2003).

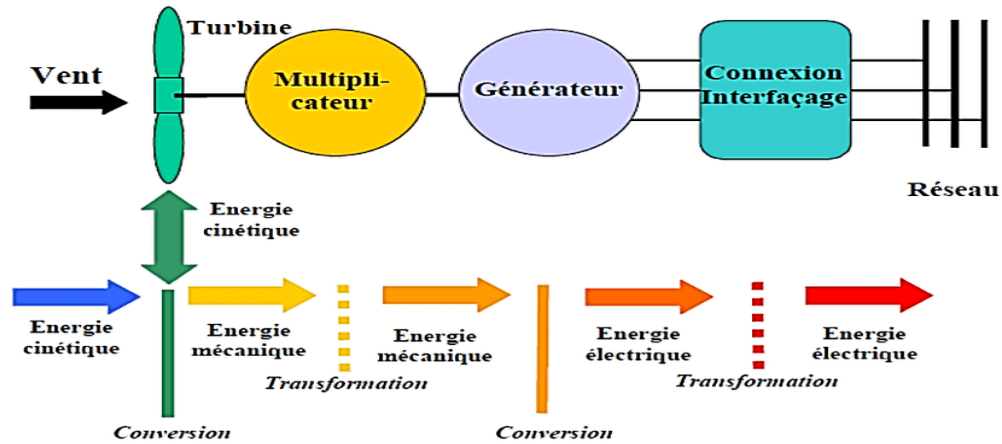


Figure I. 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.2.2La biomasse

La biomasse est une matière organique d'origine végétale (dont les micro algues), animale, bactérienne ou fongique (champignons) pouvant être utilisée comme énergie (bioénergie). Cette énergie peut être extraite par combustion directe (ex : bois énergie) ou par combustion suite à des procédés de conversion de la matière première comme la méthanisations (biogaz, ou sa forme purifiée bio méthane) ou d'autres transformations chimiques (dont la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale et les procédés de production de biocarburants ou « agro carburants »). Il existe trois méthodes de valorisation de la biomasse (Co) : thermique, chimique et biochimique.

La biomasse intéresse de nouveau les pays riches face au changement climatique et à la perspective d'une crise des hydrocarbures fossiles ou des ressources en uranium (A.John, 1991).



Figure I.2: La biomasse

I.2.3 Énergie hydroélectrique

L'eau est également une ressource renouvelable car elle est régénérée par des cycles d'évaporation et de précipitations. Il se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. Une baisse de température sur les continents entraîne des précipitations qui pompent l'eau dans les lacs, les rivières et les océans. Sa puissance est connue et exploitée depuis des milliers d'années grâce à des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Il existe plusieurs techniques pour exploiter l'énergie créée par une cascade ou un ruisseau. Les roues à aubes peuvent la convertir directement en énergie mécanique (moulins à eau), tandis que les turbines et les générateurs la convertissent en énergie électrique.

Le groupe hydraulique se compose de 3 parties :

- Les barrages qui stockent l'eau.
- Centrales électriques.
- Lignes électriques pour l'évacuation et la transmission de l'énergie électrique.

**Figure I. 3:** Unbarraged'eau

I.2.4 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique, Pour capter l'énergie géothermique, des fluides circulent profondément dans la terre. Ce fluide peut être un fluide issu d'une nappe phréatique naturelle captive, ou il peut s'agir d'eau injectée sous pression pour la fracturation d'une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide s'échauffe et monte pour charger les calories (énergie calorifique). Ces calories sont directement ou partiellement converties en énergie électrique.

Une centrale géothermique se compose de trois parties :

- Pompe.
- Les usines qui produisent de l'électricité.

- Le cordon d'alimentation qui le transporte (A.John, 1991).

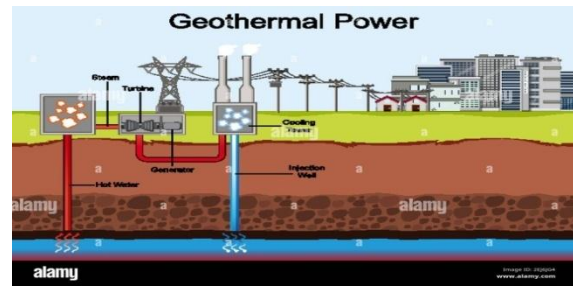


Figure I. 4: Une centrale géothermie

I.2.5 Énergie solaire

L'énergie générée par la conversion du rayonnement solaire est une source d'énergie renouvelable. L'énergie solaire peut être convertie en chaleur ou en électricité.

Les centrales solaires utilisent les rayons du soleil comme énergie. Le système absorbe l'énergie par la concentration du rayonnement solaire. Celle-ci est collectée à l'aide de plusieurs dispositifs adaptés, tels que des capteurs solaires et des panneaux photovoltaïques.

L'avantage de la technologie solaire est qu'elle peut faire baisser les prix de l'électricité. Des installations de centrales électriques sont déployées sur plusieurs hectares de terrain en échange de la production d'électricité suffisante pour alimenter un territoire donné.

Il existe différents types d'énergie solaire, à savoir

- ❖ L'énergie thermique.
- ❖ Énergie photovoltaïque.
- ❖ Énergie thermodynamique.

I.2.6 Énergie solaire thermique

Le solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle spécifie l'utilisation de l'énergie thermique issue du rayonnement solaire pour chauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut alors être utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (génération de vapeur d'eau pour entraîner un alternateur pour l'électricité, le refroidissement, etc.).



Figure I. 5: Types d'énergie solaire

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire, notamment l'énergie solaire photovoltaïque, qui utilise l'effet photoélectrique pour convertir les photons émis par le soleil en énergie électrique.

I.2.7 Énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique génère de l'électricité et stocke l'énergie thermique nécessaire dans des centrales solaires à concentration après le coucher du soleil. Elle utilise des miroirs pour concentrer la chaleur solaire et chauffer un fluide à haute température, produisant ainsi de la vapeur par échange de chaleur. Cette vapeur est ensuite utilisée pour générer de l'électricité à l'aide d'une turbine. Le fluide conserve la chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, permettant ainsi la production d'électricité en soirée, lorsque la demande est la plus élevée (Denoyelle, 2013).

I.2.8 Énergie solaire photovoltaïque

La technologie photovoltaïque convertit l'énergie solaire en électricité en utilisant des matériaux semi-conducteurs. Les modules photovoltaïques sont durables, fiables et nécessitent peu d'entretien car ils ne comportent aucune pièce mobile. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les cellules photovoltaïques, que l'on trouve généralement dans le sable. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont devenus très importants de nos jours parce qu'ils offrent de bonnes solutions pour surmonter les émissions en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles. Surtout en haute puissance PV applications (Aboub, 2022).

La lumière est directement convertie en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque, où les électrons sont libérés par le matériau semi-conducteur (Papadopoulou, 2011)

I.3 Le rayonnement solaire

La vitesse de la lumière est de 300000 km/s, donc les rayons du soleil prennent environ 8 minutes pour atteindre la terre. Le constant solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil, sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m² (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

Le flux reçu par la terre est inférieur aux flux initiaux, c'est à cause de son absorption par le gaz atmosphérique et la vapeur d'eau, alors le flux reçu dépend de l'épaisseur de l'atmosphère

traversé. On peut diviser cette matière première de l'énergie solaire en trois parties ou rayonnements (OUDIAI, 2019):

- **Le rayonnement direct** : les rayons du soleil qui nous parviennent en ligne droite.
- **Le rayonnement diffus** : les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil.
- **Le rayonnement global** : c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
- **Le rayonnement réfléchi** : par le sol et les objets qui se trouvent à la surface.

I.4 Les systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en électricité grâce à des panneaux solaires composés de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ils alimentent divers équipements électroniques, bâtiments et infrastructures. Leur avantage réside dans leur caractère propre, renouvelable, nécessitant peu d'entretien et offrant une longue durée de vie. De plus, l'énergie solaire est disponible partout, en faisant une source d'énergie universelle.

I.4.1 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons Absorbes par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecte aux électrodes .

- la cellule contient des charges électrique : négatives dans le type n (excès e- électrons), positives dans le type p (défaut e- électrons) . Ces charges créent un champ électrique au niveau de la jonction.
- Les photons de la lumière solaire arrachent des électrons aux atomes de silicium et créent des charges positives et négatives.

Les charges sont mises en mouvement par le champ électrique crée par la jonction , ce qui produit un courant électrique (Lakehal, 2011) .

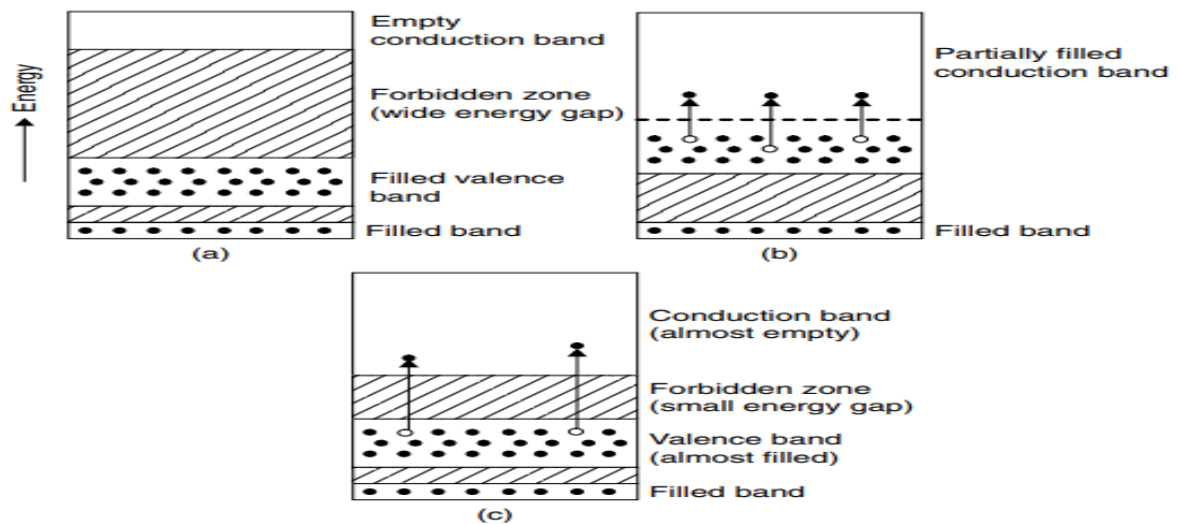


Figure I. 6: Diagrammes schématiques des bandes d'énergie pour les matériaux typiques. (a) Isolateur. (b) Conducteur (métal.) (c) Semi-conducteur

I.4.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est composé de cellules solaires spécialement traitées pour convertir l'énergie solaire en courant électrique et capteur de température pour mesurer la surface température du panneau PV (Medekhel, 2022).

plusieurs travaux scientifiques et recherches visaient à trouver des modèles approximatifs et expressifs de ce comportement non linéaire en utilisant des méthodes et des techniques modernes pour permettre aux chercheurs de trouver des solutions efficaces à ces situations critiques (Boughazala, 2022).

Lorsqu'elles sont exposées à la lumière, des électrons sont libérés dans le matériau semi-conducteur, ce qui génère un courant électrique. Une cellule solaire peut être représentée par un modèle électrique équivalent à une diode unique (E.Lorenzo, 1994).

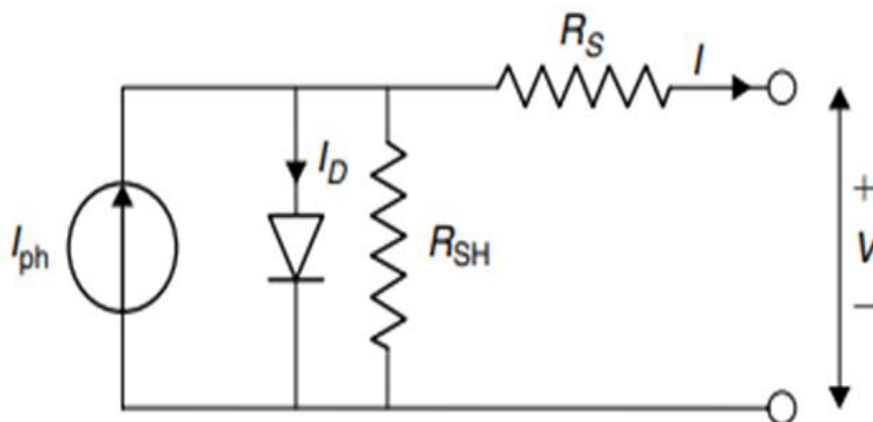


Figure I. 7: Mode cellule solaire unique

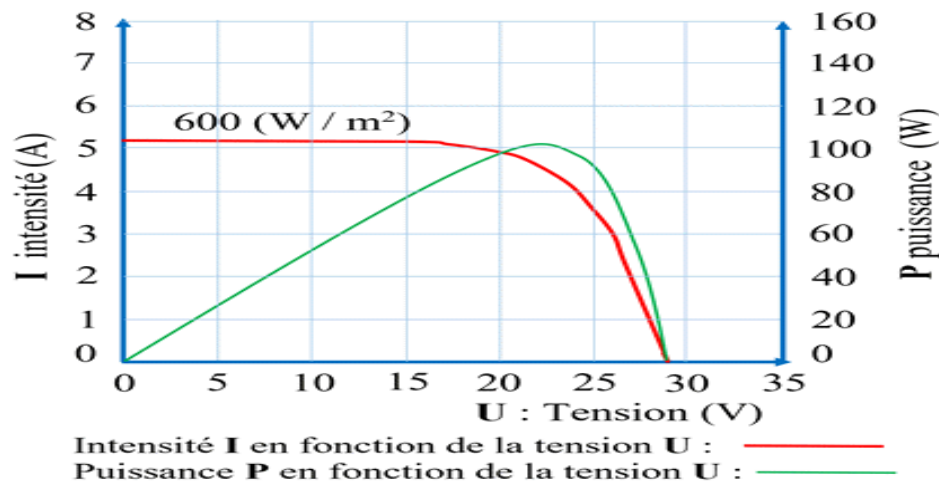


Figure I.8: Caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque .

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m . Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de 24 ce point P où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée P_m . Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert).

On peut regrouper trois zones essentielles (Lakehal, 2011) :

La zone 1 : où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone 2 : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone 3 : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension

I.4.3 Assemblage des cellules photovoltaïques en modules

Câble des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant

(-) au contact en face arrière (+) (figure I.10).

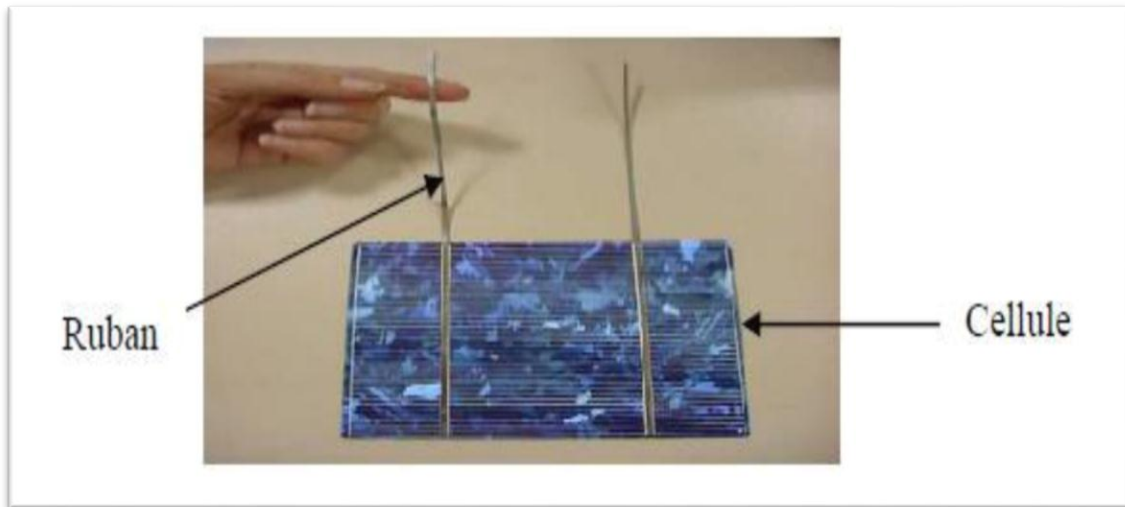


Figure I. 9:ruban métallique d'une cellule.

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films minces Thermoplastique transparent (EVA : éthylène acétate de vinyle). Ce Plus commun est un cadre en aluminium avec des joints Dispositifs qui permettent l'expansion. verre trempé avant protège mécaniquement les cellules tout en permettant Lumière. Dos en verre ou feuille TEDLER (Mabrouk, 2008)

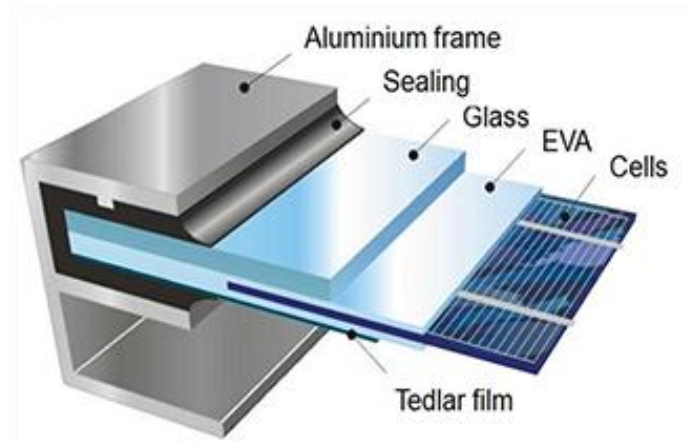


Figure I. 10:Encapsulation des cellules.

La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass. Les deux câbles unipolaires sont raccordés. En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule), ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de

tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec:

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

• Définitions Le module photovoltaïques

Un générateur ou module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de Cellules photovoltaïques primaires connectées en série et/ou en parallèle 37 Afin d'obtenir les caractéristiques électriques souhaitées telles que Puissance, courant de court-circuit et tension de circuit ouvert (Mabrouk, 2008).

I.4.4 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques sont basées sur En fonction de la température, de l'éclairage et de manière générale, environnement de travail. Lors de la connexion d'une charge donner. Dans cette section, nous passons brièvement en revue les Le comportement des générateurs soumis à une contrainte de débordement. ces idées Il faut en effet comprendre le comportement d'une personne Le générateur photovoltaïque est alors optimisé pour un fonctionnement (Figure I.10).

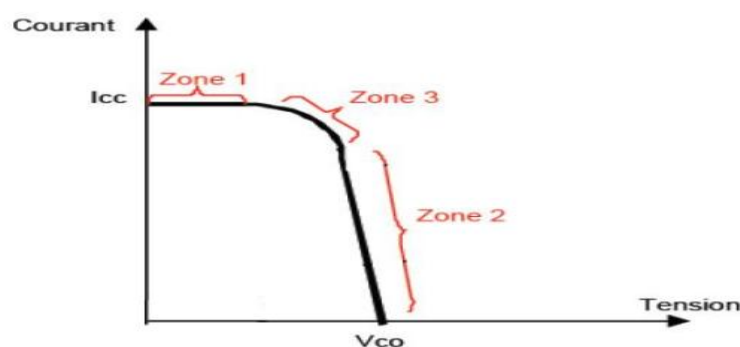


Figure I. 11: Les différentes zones de la caractéristique I (V) .

Caractéristiques des générateurs PV composés de plusieurs cellules L'apparence générale est équivalente à l'apparence de base, à condition qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les propriétés de chaque cellule (irradiation et température uniformes). On peut décomposer la caractéristique $I(V)$ du générateur par le photovoltaïque dans 3 Zones : [A. Mabrouk08].

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone 3). C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple I_{max} , V_{max} et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance disponible dans les conditions considérées (R.P.Mukund, 1999) .

I.5 Applications des systèmes photovoltaïques :

Le système photovoltaïque est utilisé dans plusieurs domaines, notamment :

I.5.1 Applications agricoles des systèmes photovoltaïques

L'origine de l'agriculture de précision (AP) remonte à la fin des années 1980 avec des applications précoces dans la fabrication industrielle. Sur la base de la définition présentée par Blackmore (Blackmore, 2014), l'AP est une approche systémique avec la objectif de réduire l'incertitude décisionnelle grâce à une meilleure compréhension des raisons des variabilités et la gestion des variations incontrôlées des champs agricoles.

Ces dernières années, les techniques d'automatisation, les capteurs intelligents et l'agriculture robots (ag-robots) ont obtenu un succès remarquable dans les applications agricoles et ont suscité beaucoup d'intérêt, ce qui a conduit au développement de machines plus rationnelles et adaptables (B.Zhang & J.Zhou, 2019). Recherche et développement en robotique est toujours en évolution et subit des changements en raison de l'évolution des capteurs, réduction des coûts d'équipement et développement de nouveaux algorithmes de contrôle (SM.Pedersen, 2006).

Système agricole avancé (AFS) développé par Case IH et Précision Land Management (PLM) de New Holland utilise des systèmes de guidage (Accu Guide, Autopilote et Intellisteer) qui offrent divers GNSS unités de réception et services de correction différentielle par satellite disponibles auprès de Trimble et Omni star (Center point RTX et Range point RTX)

(MA.Mujeebu, 2016). Récemment, Case IH a annoncé un service propriétaire de correction RTK (AFS RTK+) aux États-Unis et au Canada qui implémente un réseau de stations de base RTK dans lequel les corrections peuvent être diffusées via un mobile réseau téléphonique (Figure I.13). L'appareil Autopilote permet une intégration directe dans le système électro hydraulique du tracteur pour contrôler la direction [Thomasson JA, Baillie19].

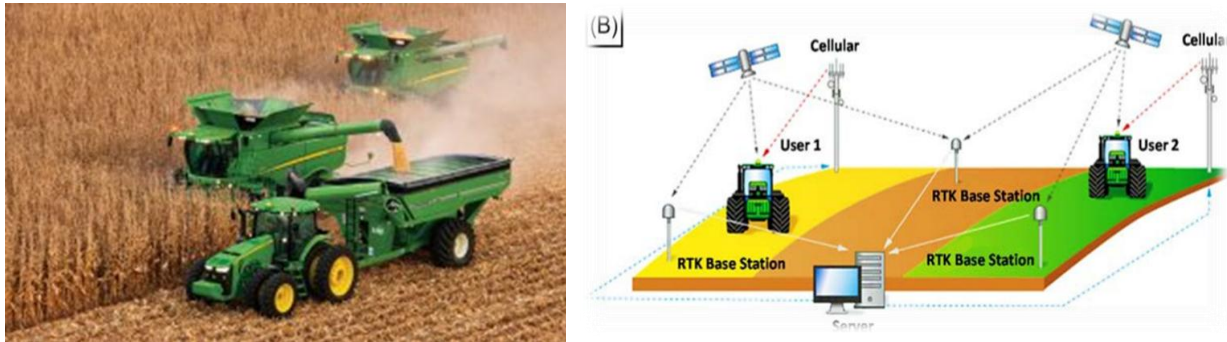


Figure I. 12:(A) Moissonneuse-batteuse équipée d'un système AutoTrac utilisant un GreenStar 2630 Display pour faire fonctionner le système de guidage et une foule d'autres applications d'agriculture de précision, développé par John Deere et (B) Corrections RTK mobiles utilisant les communications 3G/4G [13]

I.5.1.1Alimentation en eau de pompage à partir d'un système photovoltaïque

La sécurité de l'eau est définie comme la possession d'un approvisionnement en eau suffisant pour répondre aux demandes actuelles et futures. Il existe plusieurs mesures pour atténuer rareté de l'eau et donc assurer la sécurité de l'eau, comme la conservation de l'eau, la réparation des infrastructures et l'amélioration de la distribution et du captage systèmes (SS.Seyitoglu, 2017). Bien que ces critères soient suggérés comme des exigences, ils ne peut qu'améliorer l'utilisation des ressources en eau existantes. Par conséquent, le seul méthode applicable pour augmenter les ressources en eau existantes est le dessalement et réutilisation de l'eau (O.Elsharnouby, 2013) (P.Sivagurunathan, 2016).Le dessalement est considéré comme une assurance eau qui fournit de nouveaux niveaux de sécurité qui réduisent à la fois les risques économiques et sociaux de l'eau rareté en réduisant les demandes sur les aquifères et les eaux de surface (SS.Seyitoglu, 2017). Le dessalement est principalement devenu la source d'eau la plus importante au Moyen-Orient, dans les États du Conseil de coopération du Golfe et en Afrique du Nord (MENA), avec plus de 50 % de la capacité mondiale, et certaines parties du Les îles des Caraïbes, où l'eau est particulièrement rare (JL.Levine, 2007) (A.Sgobbi, 2016).Lors du dessalement, tous les sels et minéraux sont éliminés de l'eau salée (eau de mer ou eau saumâtre) et de l'eau douce est produite (M.Carmo, 2013). Au cours des

dernières années, la capacité mondiale de dessalement a augmenté rapidement, avec le plus haut quantité dans les pays arides [14]. Selon l'International Désaliénation Association (IDA), actuellement plus de 18 000 usines de dessalement d'une capacité maximale d'environ 90 mcma de l'eau produite par jour sont opérant dans le monde entier (L.Bartolucci, 2019). Dans ceux-ci, le dessalement de l'eau de mer est prédominant (58,9%) tandis que le reste est attribué au dessalement des eaux saumâtres. eaux souterraines (21,2 %) et autres eaux de surface salines (19,9 %) (MF.Serincan, 2016) (MS.Guney, 2017).

I.5.1.2Systèmes de dessalement d'eau de mer à partir de l'énergie photovoltaïque

L'utilisation de systèmes de production d'énergie PV est la plus bénéfique dans les endroits éloignés avec des applications à faible demande de puissance où la ligne de distribution les coûts ne sont pas raisonnables (K.Rajeshwar, 2008). Les cellules PV sont les dispositifs semi-conducteurs qui produire de l'électricité en courant continu (CC). Les cellules sont ensuite regroupées en modules, avec un capot frontal en verre transparent, un capot étanche pour le dos, et souvent un cadre. Les modules peuvent ensuite être combinés pour former chaînes et tableaux (M.David, 2019) (AS.Tijani, 2014). Les systèmes PV sont généralement classés en deux configurations principales, les systèmes connectés au réseau/sur le réseau et les systèmes autonomes/hors réseau. Les systèmes PV autonomes ne transfèrent pas d'énergie au réseau lorsqu'ils sont connectés au réseau (connectés au réseau) transmettent l'électricité DC générée par l'énergie solaire panneaux à un onduleur, puis dans le système de distribution. L'utilisation de la technologie de dessalement alimentée par PV est un excellent choix pour fournir l'eau pour les petites et moyennes communautés situées dans des régions éloignées et isolées zones à forte disponibilité de rayonnement solaire et d'eau salée.

I.5.1.3Serres photovoltaïques pour la production de légumes

La durabilité des approvisionnements énergétiques et alimentaires est une préoccupation mondiale. Les serres améliorent les rendements et la qualité des cultures, mais l'utilisation de l'énergie pose un défi. Les systèmes photovoltaïques en serre réduisent la consommation d'énergie, mais affectent la photosynthèse des plantes. Des dispositifs sont étudiés pour améliorer la compatibilité. Cette revue traite de la culture sous serre, de la demande énergétique, des systèmes photovoltaïques et des effets de l'ombrage sur les plantes. Perspectives des technologies PV durables sont abordées (SM.Pedersen, 2006).

I.5.1.4Éclairage et sécurité des zones agricoles à partir de l'énergie photovoltaïque

L'agri voltaïque combine agriculture et photovoltaïque sur un même territoire. Cette étude évalue la faisabilité technique de l'agri voltaïque et analyse le rendement électrique ainsi que la productivité de cultures cultivées dans une installation de recherche en Allemagne. L'efficacité des terres a augmenté de 56% à 70% en 2017, avec une augmentation de la productivité de près de 90% en 2018. L'écart de 30° par rapport au plein sud permet une répartition égale du rayonnement. L'agri voltaïque présente un fort potentiel pour relever les défis du 21e siècle (Reviews, 2021)

I.5.1.5Systèmes d'irrigation à énergie solaire

L'irrigation agricole à énergie solaire est une application attrayante des énergies renouvelables.

Ici, une méthode est présentée pour calculer la faisabilité de l'irrigation à énergie photovoltaïque (PVP). La faisabilité est exprimée en fonction de l'emplacement, qui comprend les données climatiques, la profondeur et le coût de l'aquifère, y compris les politiques politiques locales telles que les taxes sur le carbone (B.Zhang & J.Zhou, 2019).

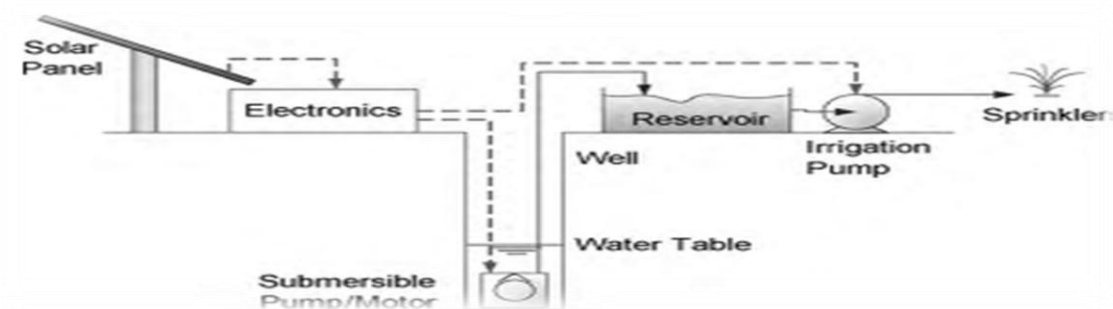


Figure I. 13:Schéma d'un système d'irrigation PVP.

I.5.1.6Réfrigération des produits agricoles à partir de l'énergie photovoltaïque

Dans les zones agricoles à climat chaud et aride, les pertes de produits agricoles augmentent en raison d'un manque d'accès au stockage frigorifique approprié. Dans la zone agricole éloignée du réseau, la solution serait des refroidisseurs à absorption solaires. Cet article vise à l'optimisation de la conception et à l'amélioration du système de refroidissement solaire combiné pour répondre à la charge de refroidissement annuelle requise pour les zones éloignées ; compte tenu de l'effet de différents types d'ETC et du volume de stockage de froid sur les performances d'un refroidisseur à absorption solaire.

Un tel système a été mis en place à Anand, en Inde, et il fournit la demande en froid d'un entrepôt frigorifique de 5 TR. Une comparaison du système avec différents collecteurs montre que lorsque le système est intégré à HP-ETC, les performances du système sont beaucoup plus efficaces. Les HP-ETC présentent une efficacité supérieure de 16,6 % et 6,2 % à celle des FP-ETC et des ETC de type U. L'optimisation montre qu'un refroidisseur 4 TR avec HP-ETC, une chambre froide de 3 m³ et une température de fonctionnement de 82,5 °C fourniraient efficacement la demande de refroidissement requise. Un tel système serait en mesure de conserver 180 et 85 tonnes de pommes de terre et de pommes par an avec un taux de récupération de 11 ans (Reviews, 2021).

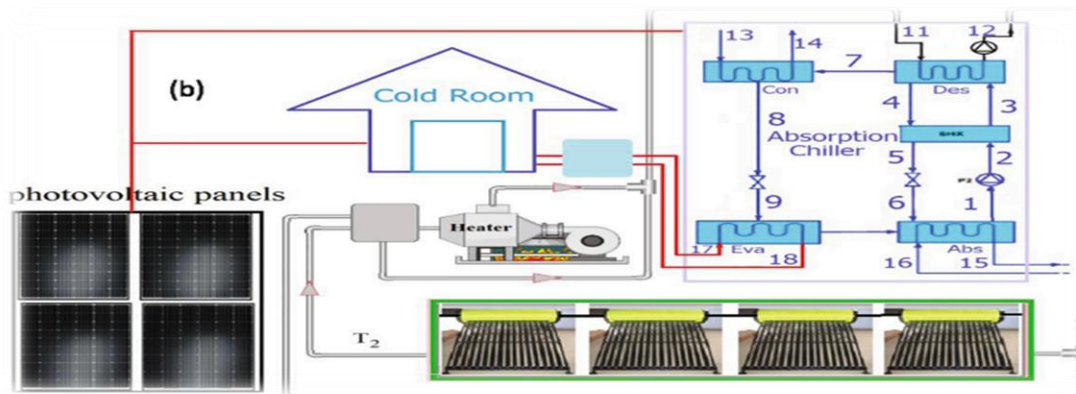


Figure I. 14:(a) Le système mis en œuvre à Anand, en Inde, (b) Schéma du système proposé.

I.6 Systèmes de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie électrique, embarqué ou stationnaire peut rendre service en terme de mobilité, d'efficacité énergétique ou d'amélioration du bilan environnemental. Les caractéristiques fondamentales des moyens de stockage permettent d'appréhender de façon unifiée la diversité des technologies de stockage. Différentes technologies existent ou sont en cours de développement (W.Waghorne, 2001).

I.6.1 Principe de fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie

Nous étudions les systèmes photovoltaïques (PV)-hydrogène/batterie connectés au réseau. Les capacités des composants de stockage et les paramètres de stratégie de fonctionnement basés sur des règles sont simultanément optimisés par l'algorithme génétique. Trois stratégies d'exploitation pour le stockage d'hydrogène, à savoir la stratégie d'exploitation conventionnelle, la stratégie d'écrêtement des pics et la stratégie d'exploitation hybride, sont comparées selon deux scénarios basés sur les coûts pessimistes et optimistes.

Les résultats indiquent que la stratégie d'exploitation hybride, qui combine la stratégie d'exploitation conventionnelle et la stratégie d'écèlement des pics, est avantageuse pour atteindre une valeur actuelle nette (VAN) et un taux d'autosuffisance (SSR) plus élevés. Le stockage de l'hydrogène est en outre comparé au stockage sur batterie. Dans le scénario de coût pessimiste, le stockage de l'hydrogène entraîne de moins bonnes performances à la fois en SSR et en NPV. Alors que dans le scénario de coût optimiste, le stockage de l'hydrogène atteint une VAN plus élevée. De plus, en tenant compte de la fluctuation de la puissance du réseau, le stockage de l'hydrogène atteint de meilleures performances dans les trois objectifs d'optimisation, qui sont NPV, SSR et GI (GridIndicator) (JY.Song, 1999).

I.6.2 Types de batteries utilisées pour le stockage de l'énergie

La batterie rechargeable est l'un des EES les plus utilisés technologies dans l'industrie et la vie quotidienne. La Figure I. 1 montre le schéma simplifié principe de fonctionnement d'un système BES typique. Un système BES consiste de plusieurs cellules électrochimiques connectées en série ou en parallèle, qui produisent de l'électricité avec une tension souhaitée à partir d'une réaction électrochimique. Chaque cellule contient deux électrodes (une anode et une cathode) avec un électrolyte qui peut être solide, liquide ou états filants/visqueux (W.Waghorne, 2001). Une cellule peut convertir de manière bidirectionnelle l'énergie entre l'énergie électrique et l'énergie chimique. Lors de la décharge, les réactions électrochimiques se produisent aux anodes et cathodes simultanément. Au circuit externe, les électrons sont fournis par les anodes et sont collectés aux cathodes. Pendant charge, les réactions inverses se produisent et la batterie est rechargée en appliquant une tension externe aux deux électrodes (Figure I. 2)

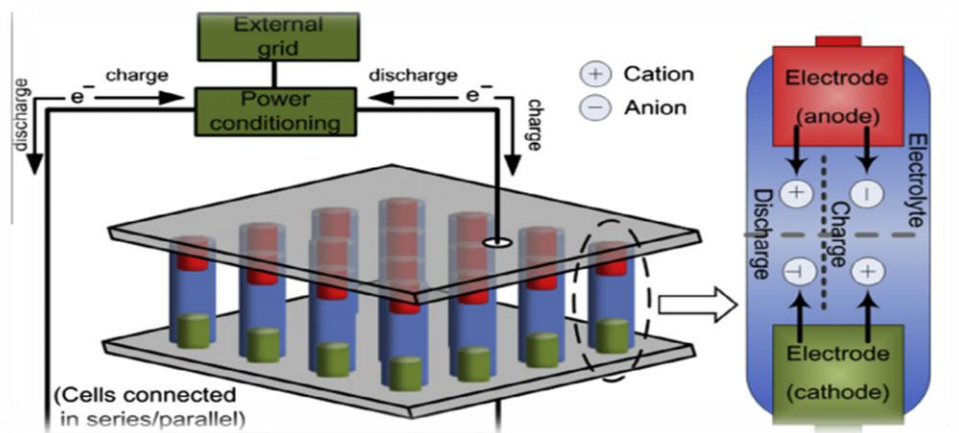


Figure I. 15: Schematic diagram of a battery energy storage system operation.

I.6.2.1 Les batteries d'accumulateurs :

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie générée dans le domaine des modules photovoltaïques, il est donc nécessaire Gérer le temps non productif. En fait, l'énergie solaire a été indisponible pendant toute la période Le fonctionnement du groupe motopropulseur nécessite l'utilisation de batteries dans l'unité Auto-stockage d'énergie (JY.Song, 1999). Dans les systèmes solaires autonomes on utilise principalement :

I.6.2.2 Les batteries au plomb :

Une batterie au plomb est un ensemble de batteries de 2 volts connectées en série pour obtenir la tension de fonctionnement souhaitée. Ces éléments comprennent la plaque positive et Électrodes négatives, montées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matière active, le dioxyde Le fil est le pôle positif et le fil spongieux est le pôle négatif, ces électrodes sont insérées dans la solution d'acide sulfurique, la quantité de substance formée donne la capacité de plus ou plus petit.

La tension de chaque batterie varie entre 1,7 volt et 2,4 volts selon l'état de charge dans les conditions chirurgie générale. Le rendement énergétique de ces accumulateurs est de l'ordre de 70 à 85%. Ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques en raison du besoin de maintenance force.

I.6.2.3 Les batteries au Cadmium-Nickel :

La tension de ce type de batterie varie entre 1,15 et 1.45 Volts pour chaque élément suivant mise en charge. L'efficacité énergétique est d'environ 70%. Bien qu'encore prohibitif, ce type d'accumulateur offre de nombreux avantages (B.Samia, 2004):

- Très bonne résistance mécanique.
- Capacité à résister à une décharge profonde.
- Pas de vapeurs toxiques dans l'électrolyte.
- Ne craint pas le gel

I.6.2.4 Les batteries au Nickel-Zinc :

Ces accumulateurs sont encore dans le domaine de la recherche, mais ils présentent un intérêt Utilisez des matériaux moins chers et moins toxiques, et leur tension varie entre 1 et 1 Les volts et leurs inconvénients majeurs liés à la longévité sont encore limités par de nombreux facteurs rond (W.Waghorne, 2001) (JY.Song, 1999).

I.6.2.5 Les batteries au Lithium :

Ces nouvelles batteries utilisent des électrolytes organiques liquides et leur intérêt réside dans Grande capacité par unité de masse, bonne étanchéité et grande stabilité sur la température. Leur développement dépend de l'augmentation du nombre de leur cycle acceptable

I.6.3 Caractéristiques des batteries utilisées pour le stockage de l'énergie

Comme le marché du stockage évolue rapidement, l'analyse fournit une évaluation à jour des différentes options de stockage en termes d'échelle, de fiabilité et de spécificité du site, entre autres.

Il est conclu que les batteries Li-ion, qui ont aujourd'hui une utilisation limitée dans l'environnement bâti, et les batteries Zn-air qui seront commercialisées en 2013/14 sont parmi les technologies les plus prometteuses pour les bâtiments en raison de leur densité énergétique exceptionnellement élevée. On s'attend à ce qu'ils jouent un rôle important dans la conception de bâtiments fiables, économiques et économes en énergie à l'avenir. Les batteries NaNiCl, qui sont actuellement utilisées dans les véhicules, sont également considérées comme une technologie importante pour les bâtiments, en raison de leur durée de vie élevée et de leur capacité de puissance de crête élevée (J.Koskela)

I.6.4 Dimensionnement des systèmes de stockage d'énergie pour les systèmes photovoltaïques :

Dans cette étude, la rentabilité et le dimensionnement d'un système photovoltaïque avec un stockage d'énergie électrique associé sont analysés d'un point de vue économique. La nouvelle théorie du dimensionnement pour la rentabilité est présentée et démontrée à l'aide d'études de cas d'un immeuble d'appartements et de maisons individuelles en Finlande. Pour maximiser les avantages, plusieurs modèles alternatifs de comptage et de tarification de l'électricité sont utilisés et comparés.

Les résultats ont démontré que la taille optimale du système photovoltaïque pouvait être augmentée en utilisant le stockage de l'énergie électrique et une tarification appropriée de l'électricité. Cela pourrait conduire à une augmentation de la production photovoltaïque dans le secteur résidentiel. De plus, il est possible que lorsque toutes les incitations sont prises en compte, le stockage de l'énergie électrique en combinaison avec la production d'énergie photovoltaïque serait plus rentable que la production d'énergie photovoltaïque seule.

La production d'énergie photovoltaïque a également augmenté la rentabilité du stockage de l'énergie électrique, ce qui pourrait signifier que la mise en œuvre du stockage de l'énergie électrique dans le secteur résidentiel pourrait également augmenter.

I.7 Évaluation de la performance des systèmes photovoltaïques

La conversion de l'énergie solaire en électricité est une technique prometteuse, mais la température des cellules solaires affecte les performances et la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Dans cette étude, nous présentons un panneau photovoltaïque auto-refroidi, conçu pour améliorer ses performances aux heures chaudes en permettant la ventilation et en évitant l'accumulation de poussière. Les résultats montrent que le panneau est plus performant sur un sol blanc et incliné. Un modèle CFD 3D confirme ces résultats et montre une meilleure production électrique grâce à sa température plus basse, comparée aux panneaux photovoltaïques plats (Charfi).

I.7.1 Facteurs influençant la performance des systèmes photovoltaïques

L'irradiance solaire, la température du module, l'accumulation de poussière, l'ombrage et les facteurs de salissure sont quelques-unes des préoccupations environnementales qui ont des effets majeurs (Fouad).

I.7.2 Mesure de la performance des systèmes photovoltaïques

Cette étude analyse les performances d'un système photovoltaïque de 9,5 kWc connecté au réseau pendant 3 ans. Composé de trois sous-systèmes de 3,2 kWc, il couvre les besoins en électricité d'un laboratoire en Algérie. Les résultats montrent un rendement annuel moyen de 4,67 h/jour, avec des pertes du réseau et du système de 1,16 et 0,13 kWh/kWp/jour. L'efficacité du module PV, du système et de l'onduleur est respectivement de 8,62 %, 8,29 % et 96 %. Malgré une performance inférieure aux taux acceptables, le système fonctionne depuis plus de 14 ans avec un taux de performance de 70%. Une inspection est nécessaire pour diagnostiquer les raisons de la faible productivité, notamment l'ombrage proche et le type d'onduleur utilisé. L'investissement dans le photovoltaïque raccordé au réseau reste très prometteur sur ce site (A.Malek).

I.7.3 Analyse économique des systèmes photovoltaïques dans le sud algérien

Cette étude présente une simulation technico-économique d'un système solaire photovoltaïque avec trois types de stockage différents : batterie plomb-acide, batterie lithium-ion et stockage d'hydrogène. L'objectif principal est de couvrir la consommation en électricité des maisons d'un village isolé du sud-ouest algérien en utilisant l'énergie solaire. Les résultats montrent

que le système de stockage d'hydrogène est le plus performant, avec un faible excès d'énergie et une charge non satisfaite minimale. De plus, ce système s'avère économiquement avantageux grâce à son faible coût d'investissement et à sa longue durée de vie. Le coût total de ce système est estimé à 51 282€ (Ammari).

I.8 Conclusion

Ce chapitre contient tous les détails sur les sources d'énergie renouvelables, le rayonnement solaire et une description des éléments photovoltaïques et de leurs applications dans divers domaines.

À travers cette étude, nous montrons l'importance de l'énergie solaire pour la sécurité alimentaire grâce à ses applications dans l'agriculture et la désalinisation de l'eau, ainsi que pour la sécurité énergétique grâce à l'adoption d'une énergie propre et durable.

D'autre part, nous décrivons de nombreux types de cellules photovoltaïques, leurs composants, et comment collecter et protéger les panneaux solaires.

Chapitre II :

Convertisseurs DC/DC et Techniques MPPT pour les Systèmes PV

II.1. Introduction

Le chapitre II de ce document traite des convertisseurs DC/DC et des techniques MPPT pour les systèmes PV. Dans un premier temps, nous présentons les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, leur structure, leur comportement sous différentes conditions environnementales et leurs caractéristiques électriques. Ensuite, nous abordons le principe de fonctionnement des convertisseurs DC/DC.

Nous poursuivons avec les techniques MPPT pour les systèmes PV, expliquant leur principe de fonctionnement, les différentes techniques disponibles telles que la perturbation et observation (P&O), l'incrément de conductance et leur modélisation pour les simulations.

Enfin, nous concluons ce chapitre en abordant la modélisation et la simulation des performances des systèmes PV, en expliquant comment modéliser l'ensemble du système PV et comment simuler ses performances avec différents types de convertisseurs DC/DC

II.2. Caractéristiques du panneau photovoltaïque

La caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance, vis-à-vis de la température, est encore amplifiée par les propriétés du photo courant et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par (Aigrain).

Une cellule solaire est un dispositif crucial qui convertit efficacement l'énergie des photons en électricité propre et respectueuse de l'environnement. En connectant ces cellules dans des configurations en série et en parallèle, un module photovoltaïque (PV) est formé. Ces modules sont ensuite combinés en séries et en parallèles pour construire des panneaux photovoltaïques, responsables de la production d'électricité à la fois propre et durable. Chaque cellule solaire individuelle peut être considérée comme un composant d'un circuit électrique. Il se compose d'une jonction p-n appelée diode, d'un générateur de photo courant qui produit du courant à partir de la lumière et de deux résistances, l'une connectée en série et l'autre en parallèle, qui tiennent compte de l'effet Joule et des pertes de recombinaison. Lorsque ces éléments sont combinés, on parle de modèle de cellule solaire à diode unique. Lors de l'extension de cette approche de modélisation à un module solaire PV, la même méthodologie est appliquée. Le modèle de circuit simplifié d'un panneau solaire peut être observé sur la figure (II .1).

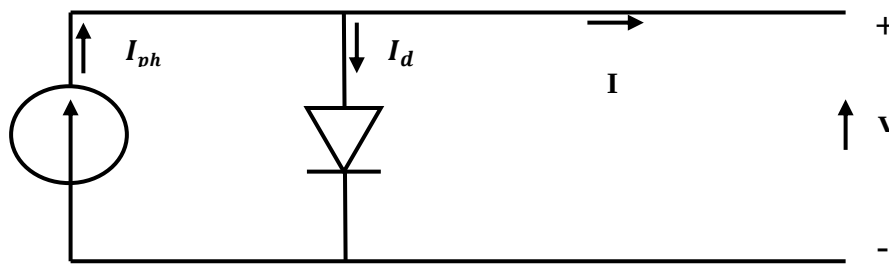


Figure II.1: Circuit équivalent simplifié du panneau PV.

Dans un scénario idéal, une cellule solaire fournit une très bonne approximation du courant généré par les photons, qui est directement proportionnel à l'intensité d'éclairage et à l'irradiante. Cependant, certains paramètres ne sont pas pris en compte dans le modèle de cas idéal et ont en fait un impact sur la sortie d'un appareil PV dans des cas réels ou pratiques. Dans la sous-section suivante, nous présentons un modèle à une seule diode modifié pour le cas réel.

I.2.4 Structure du système photovoltaïque :

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure suivante en Plusieurs parties:

Constitué par un ensemble des cellules photovoltaïques reliées entre elles, un module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose en terme de réponse à un besoin défini il doit donc être associé à un système complet qui comprend (Aigrain) :

- une partie de production (panneau photovoltaïque)
- Un contrôleur de charge ou convertisseur DC/DC (Régulateur) ;
- Un système de stockage (Batteries) ;
- Un convertisseur DC/AC (Onduleur)

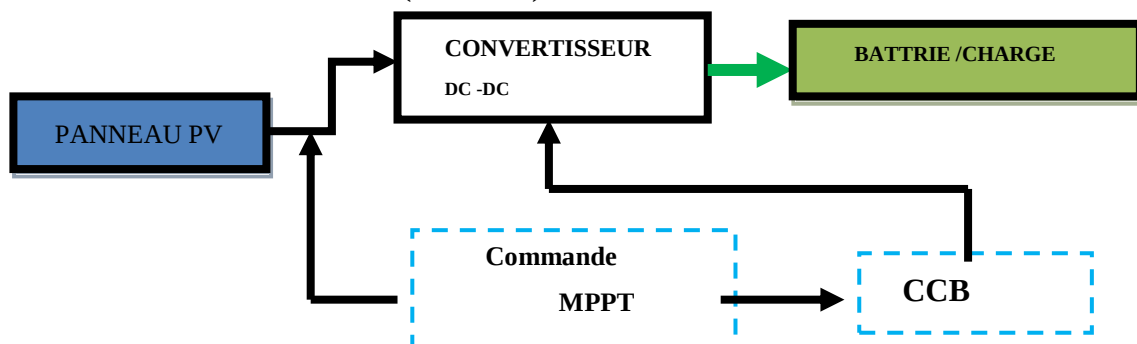


Figure II.2: Synoptique de la structure du système PV

II.2.4 Modèle mathématique d'une cellule PV (cas de cellule réel/pratique):

Un modèle de circuit plus réaliste d'une cellule solaire PV est illustré à la Figure II.4. Ce modèle est également appelé modèle réel à une seule diode avec résistance série (R_s) et résistance parallèle (R_p). Idéalement, R_s et R_p sont ignorés, mais en réalité, il n'est pas possible d'ignorer ces résistances car elles affectent l'efficacité de la cellule solaire PV. Ainsi, le modèle approprié est représenté dans la Figure II.3.

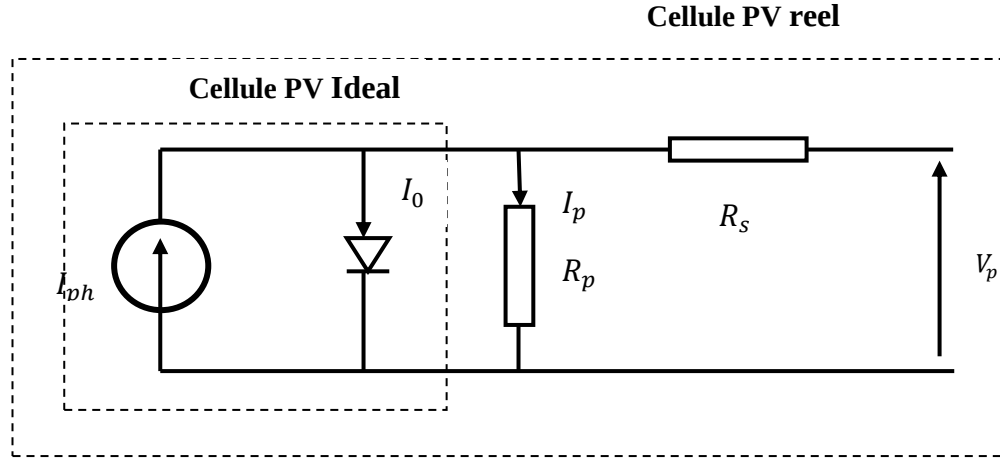


Figure II.3: Equivalent circuit of real model for PV panel: Circuit équivalent du modèle réel pour panneau PV

Tel qu'illustré dans la figure (II.3), le dispositif solaire PV peut être représenté sous la forme d'une cellule solaire idéale avec une source de courant (I_{ph}) en parallèle avec la diode. Le courant de sortie d'une cellule solaire idéale est défini par l'équation (1)

$$I = I_{ph} - I_d \quad \text{II.(1)}$$

L'équation mathématique essentielle qui définit les propriétés I-V de la cellule solaire PV, connue sous le nom d'équation du courant de diode de Shockley, est dérivée de la théorie des semi-conducteurs dans l'équation (2).

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II.(2)}$$

Le courant de sortie I d'une cellule solaire idéale est obtenu en substituant la valeur de I_d dans les équations (1) et (3).

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II.(3)}$$

Lorsqu'un grand nombre de modules PV sont utilisés dans un système solaire photovoltaïque, l'influence de R_p devient apparente. Par conséquent, R_s est pris en compte et R_p est supposé être illimité.

L'équation du courant de diode (Eq. (2)) est alors modifiée en Eq. (3) et Eq. (4).

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II.(4)}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II.(5)}$$

En considérant des cellules PV connectées dans une configuration série-parallèle, l'équation (5) peut être modifiée lorsque le courant de sortie I est calculé, et est présentée comme suit dans l'équation (6).

$$I = N_p + I_{ph} - N_p * I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II.(6)}$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_o - T_r)] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad \text{II.(7)}$$

Il existe divers paramètres qui doivent être déterminés pour la modélisation des cellules PV en utilisant les équations mentionnées ci-dessus. La modélisation dépend du modèle de module PV utilisé par Bellini et ses collègues. Ce modèle exige que nous suivions les équations (II.8) et (II.9).

$$I_{rs} = I_{sc} / \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T_o} \right) - 1 \right] \quad \text{II. (8)}$$

$$I_s = I_{rs} [T_o / T_r]^3 \exp \left[\left(\frac{qE_g}{Ak} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_o} \right) \right] \quad \text{II.(9)}$$

II.3. Convertisseurs DC/DC pour les Systèmes PV :

Un hacheur est un dispositif de conversion de puissance continue qui permet de transformer une énergie continue d'un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation est essentielle pour le stockage de l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter une charge continue. Il est composé de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Idéalement, ces composants ont un rendement élevé et ne consomment aucune puissance active (Fatiha & Aicha, 2014). Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui opèrent en effectuant des commutations sur

une grandeur d'entrée continue, que ce soit la tension ou le courant, pour obtenir une grandeur de sortie également continue ou présentant une faible ondulation..

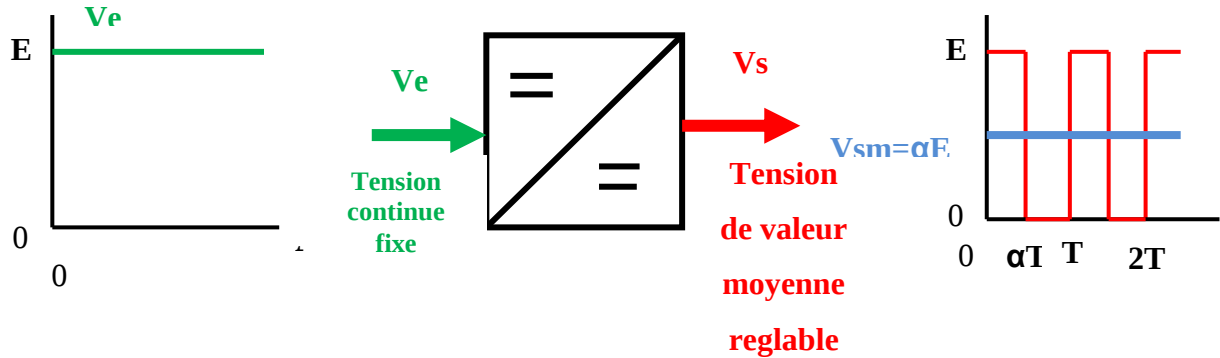


Figure II.4 : Principe de base d'un hacheur

II.4. Les différents types de convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes PV :

I.2.4 Principe de fonctionnement des convertisseurs DC/DC :

II.4.1.3 Convertisseur DC-DC Boost

Il s'agit d'une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure (Abderraouf, 2018). Les transformateurs élévateurs sont utilisés dans de nombreuses applications à faible puissance, telles que les appareils d'éclairage portables. Pour faire fonctionner une diode électroluminescente blanche, celle-ci est principalement composée d'un interrupteur K (par exemple un transistor) et d'une diode D. L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (PWM) avec une période de commutation fixe T_d et un rapport cyclique variable α .

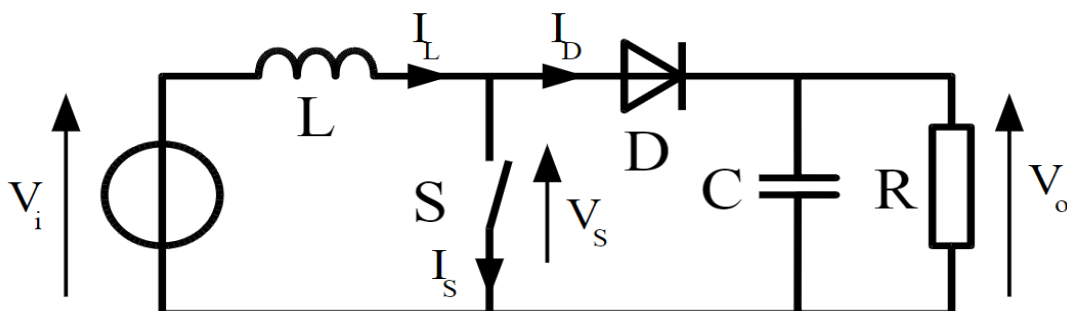


Figure II.5: schéma de base d'un convertisseur Boost

➤ Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes en fonction de l'état de l'interrupteur S, comme illustré dans la figure II.5 :

- Phase d'accumulation d'énergie : Lorsque l'interrupteur S (voir figure II.6) est fermé (état passant), cela entraîne une augmentation du courant dans l'inductance, ce qui permet de stocker de l'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est bloquée à ce stade, et la charge est déconnectée de l'alimentation.
- Phase de transfert d'énergie : Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve en série avec le générateur, et sa force électromotrice (f.é.m) s'ajoute à celle du générateur (effet survolteur). Le courant qui traverse l'inductance passe ensuite par la diode D, le condensateur C, et la charge R. Cela entraîne le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur, alimentant ainsi la charge.

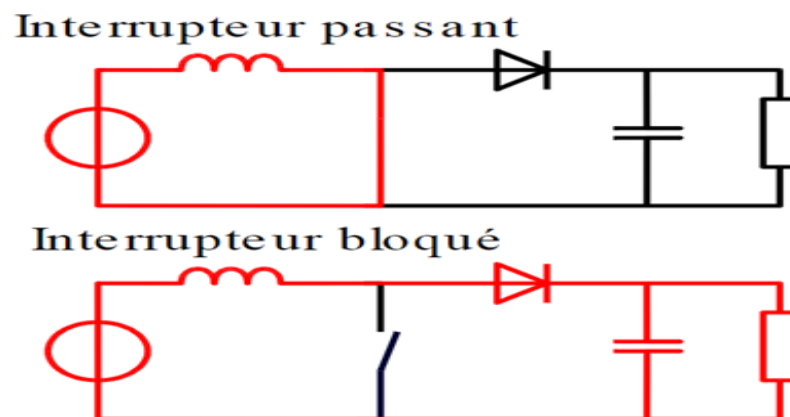


Figure II.6: les deux configurations d'un convertisseur

Boost suivant l'état de l'interrupteur S.

➤ Conduction continue

Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure II.7 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits) :

Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

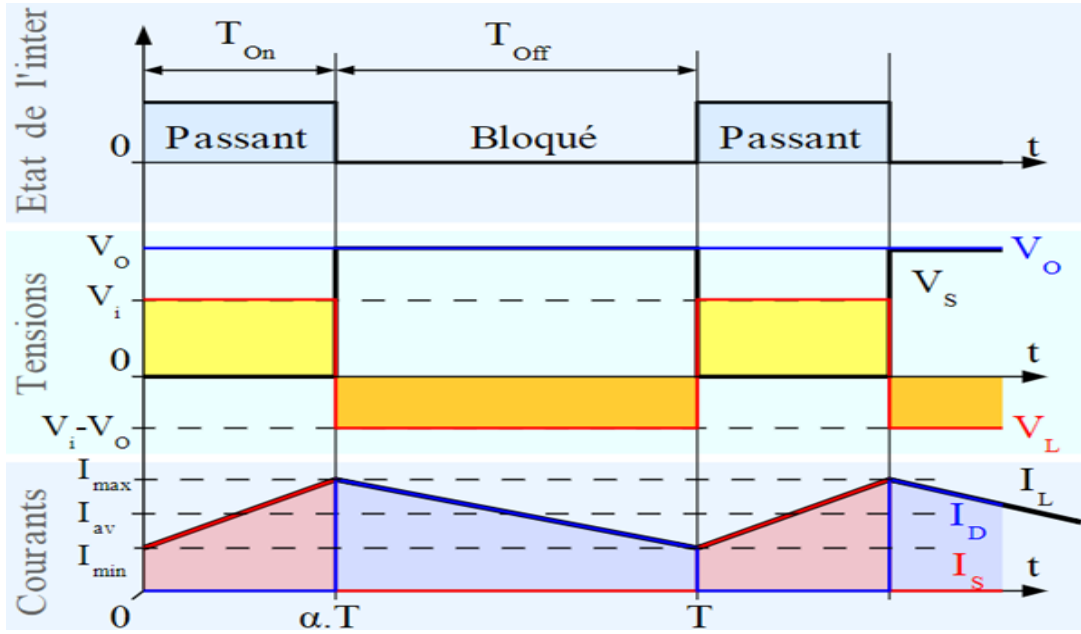


Figure II.7: formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \text{II.}(10)$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \text{II.}(11)$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est :

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \text{II.}(12)$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_i - V_0)}{L} dt = \frac{(V_i - V_0) \cdot (1-\alpha)T}{L} \text{II.}(13)$$

Si on considère que le convertisseur a atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \text{II.}(14)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \text{II.}(15)$$

En remplaçant ΔI_{Lon} et ΔI_{Loff} par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_0) \cdot (1-\alpha)T}{L} = 0 \text{II.}(16)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-\alpha} \text{II.}(17)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur.

II.4.1.3 Convertisseur DC-DC Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue élevée à une autre tension continue de plus faible valeur (Forest & Ferrieux, 1999).

Le convertisseur Buck possède une seule cellule de commutation, composée d'un interrupteur commandable (MOSFET IGBT) et d'une diode qui vont fonctionner simultanément dans des modes opposés.

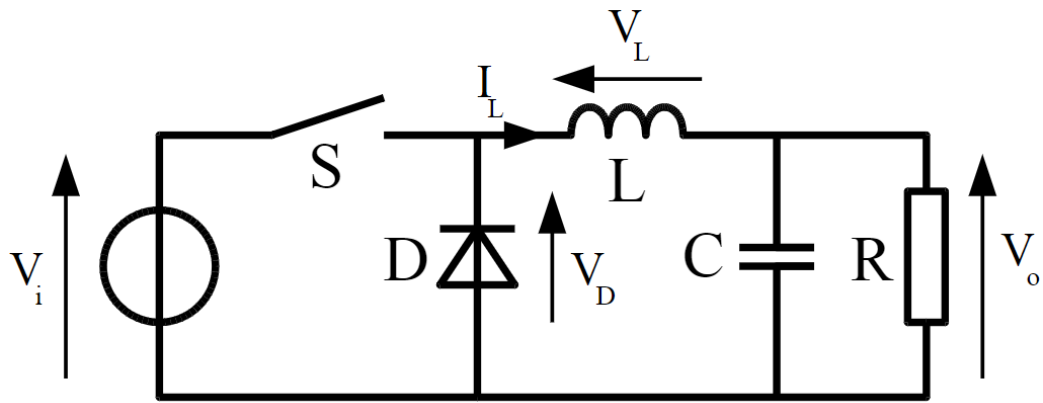


Figure II.8: Schéma de base d'un convertisseur Buck

Il est essentiel de connecter un convertisseur Buck à une charge inductive. En raison de sa capacité de stockage d'énergie, cette charge va osciller entre une consommation de tension pour son fonctionnement (réduisant ainsi la tension fournie par le générateur disponible au circuit en aval) et un comportement similaire à une source de tension (fournissant une tension même lorsque le générateur est hors circuit). Le fonctionnement peut être subdivisé en deux phases en fonction de l'état de l'interrupteur commandable S (voir figure II.9).

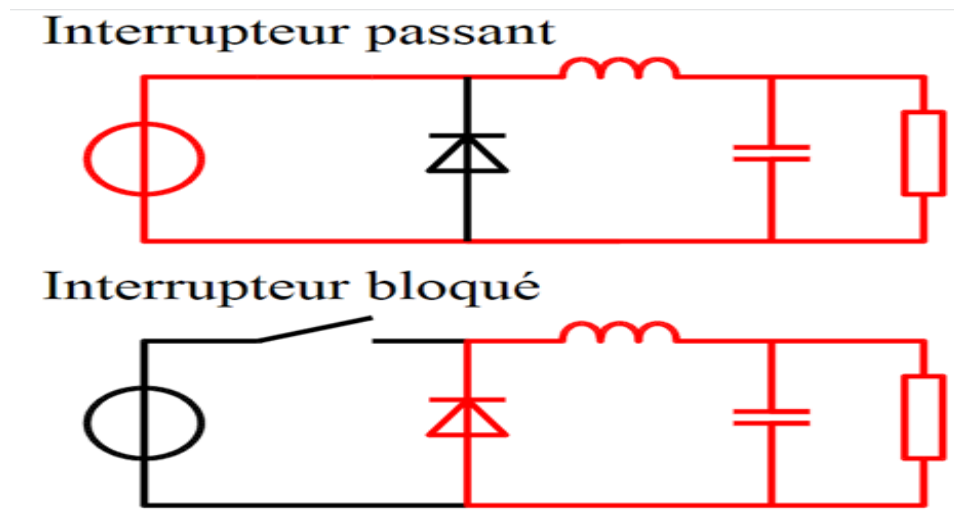


Figure II.9: Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur

- On ferme l'interrupteur S (voir figure II.9). Le courant fourni par le générateur, initialement nul, augmente linéairement et traverse l'inductance. L'inductance s'oppose à cette augmentation du courant, produisant une tension opposée, et elle stocke l'énergie reçue sous forme magnétique. La tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \text{II.}(18)$$

La diode étant polarisée en inverse avec la tension V_i du générateur, aucun courant ne la traverse.

- L'interrupteur est ouvert. Le générateur est mis hors circuit, plus aucun courant ne le traverse. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. Le courant traversant l'inductance décroît. L'inductance s'oppose à cette réduction du courant, produisant une tension qui la met en situation de source pour le circuit aval, en utilisant l'énergie magnétique stockée à la phase précédente. La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = -V_0$

Un circuit de commande de l'interrupteur le fait alterner à un rythme adéquat pour obtenir la tension désirée. La diode peut être remplacée par un autre interrupteur.

➤ Conduction continue

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure II.10 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Buck.

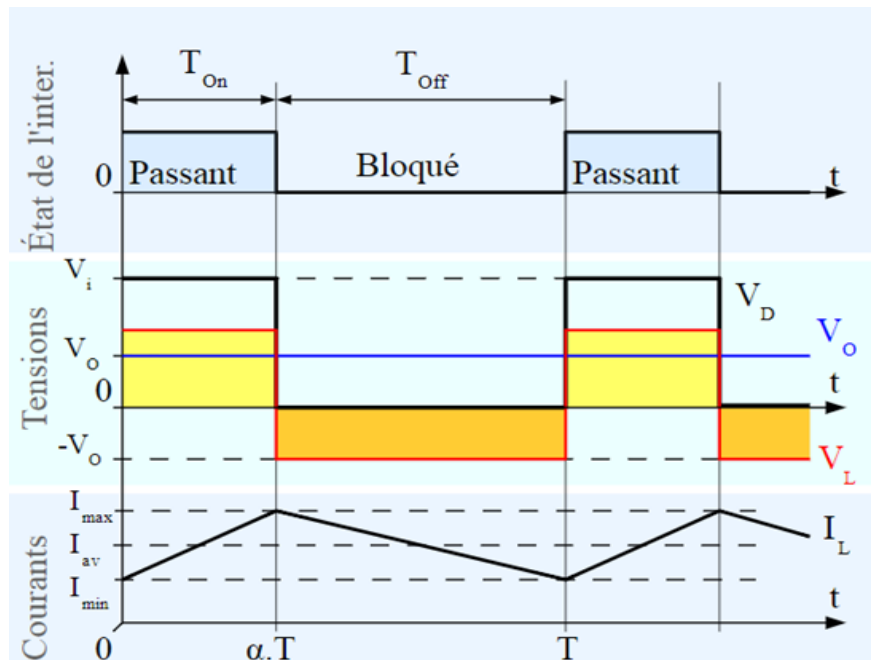


Figure II.10: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \text{II.}(19)$$

Avec V_L égale $V_i - V_0$ pendant l'état passant et $-V_0$ durant l'état bloqué. Par conséquent, l'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_0) \cdot \alpha \cdot T}{L} \text{II.}(20)$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta I_{Loff} = \int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_0 \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} \text{II.}(21)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \text{II.}(22)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante : $\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0$

En remplaçant ΔI_{Lon} et ΔI_{Loff} par leur expression, on obtient :

$$\frac{(V_i - V_0) \cdot \alpha \cdot T}{L} - \frac{V_0 \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} = 0 \text{II.}(23)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_0 = \alpha V_i \text{II.}(24)$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_0 est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que le rapport de conversion est toujours inférieur à 1.

II.4.1.3 Convertisseur Buck-Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure II.12) :

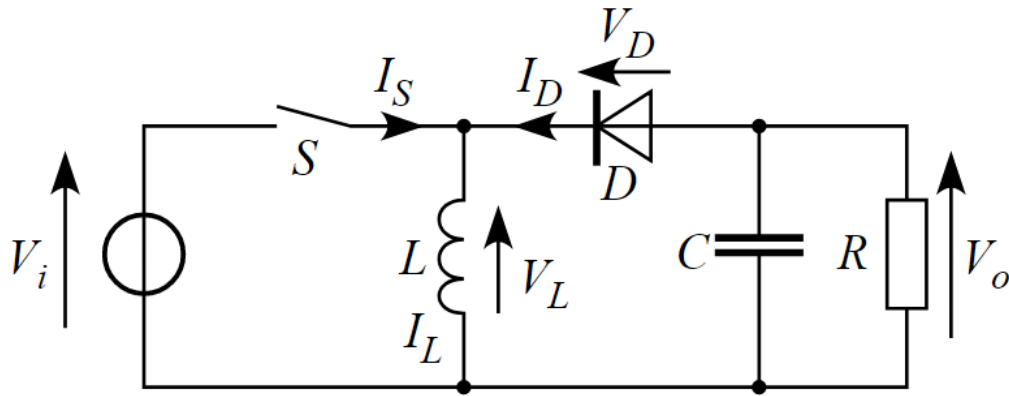


Figure II.11: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost

- Dans l'état passant, l'interrupteur S (voir figure II.11) est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs [Buck](#) et [Boost](#), les principales différences sont:

- La tension de sortie est de polarité

inverse de celle d'entrée .

- La tension de sortie peut varier

de 0 à $-\infty$ (pour un convertisseur idéal).

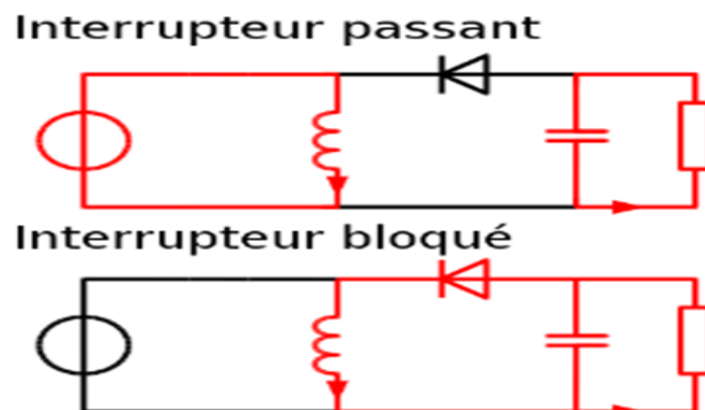


Figure II.12: Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost suivant l'état de l'interrupteur S

Conduction continue

Lorsqu'un convertisseur Buck-Boost fonctionne en mode de conduction continue, le courant I_L qui traverse l'inductance ne s'annule jamais. Dans le cas d'un convertisseur Boost, la figure II.13 illustre les formes d'onde du courant et de la tension.

La tension de sortie est calculée de la manière suivante (en supposant que les composants sont idéaux):

Durant l'état passant, lorsque l'interrupteur S est fermé, cela entraîne une augmentation du courant selon la relation suivante: $V_i = L \frac{dI_L}{dt}$ II.(25)

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de:

$$\Delta I_{L\text{On}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \text{ II.}(26)$$

α étant le [rapport cyclique](#). Il représente la durée

de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit.

α est compris entre 0 (S ne conduit jamais)

et 1 (S conduit tout le temps).

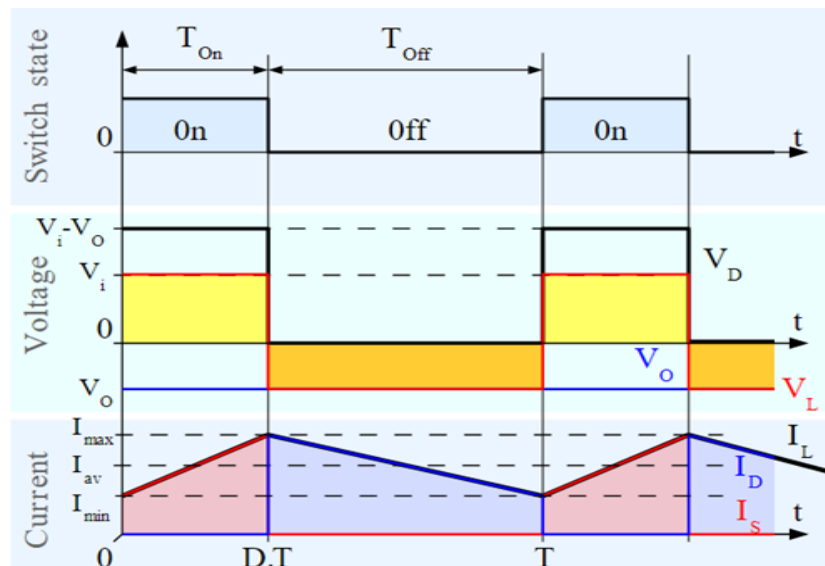


Figure II.13: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est:

$$\frac{dI_L}{dT} = \frac{V_0}{L} \text{II.}(27)$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est:

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{V_0 \cdot dT}{L} = \frac{V_0(1-\alpha)T}{L} \text{II.}(28)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par : $E = \frac{1}{2} L \times I_L^2$ II.(29)

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante : $\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0$

En remplaçant ΔI_{Lon} et ΔI_{Loff} par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{V_0(1-\alpha)T}{L} = 0 \text{II.}(30)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \text{II.}(31)$$

II.5. Résultats des caractéristiques d'un système photovoltaïque.

Le comportement du module PV est très sensible aux variations de l'irradiance (G) et de la température (T) car ces variations ont un effet significatif sur la puissance fournie par le module. La Figure II.14 montre que pour une température constante de 25°C, le courant I PV et la tension varient en fonction de la tension V PV pour différentes valeurs d'éclairage, et il existe plusieurs courbes P(V) correspondant aux points de puissance maximale MPP (V_{mp}, I_{mp}). Selon la Figure II.15, une tension de circuit ouvert et un courant de court-circuit varient proportionnellement à l'éclairement. La Figure II.16 montre que si l'éclairement est constant (1000 W/m²) et que la température augmente, la tension V_{oc} diminue mais le courant I_{sc} peut varier légèrement. Ainsi, le fonctionnement du module PV dépend essentiellement des conditions environnementales auxquelles il est soumis. Pour cela, ces facteurs doivent être

pris en compte pour dimensionner correctement le générateur PV afin d'obtenir la puissance souhaitée.

Les effets de l'irradiance sur le module solaire PV sont illustrés dans les courbes caractéristiques I-V et P-V de la Figure II.14 et de la Figure II.15 en faisant varier l'intensité de l'irradiance de 100 W/m² à 1000 W/m² à une température constante de 25°C. On observe que le courant reste constant avec l'augmentation de la tension jusqu'à 30 V, après quoi il diminue. De plus, le courant augmente avec l'augmentation de l'intensité de l'irradiance. Cela démontre que l'irradiance a un effet substantiel sur le courant de court-circuit, tandis que la tension de circuit ouvert est assez faible, comme le montre la Figure II.14. La preuve de la puissance maximale se trouve sur les courbes de performance de puissance.

Nous remarquons à partir de cette figure, et lorsque la température varie de 0 à 80°C, que lorsque la température augmente, la puissance [W] diminue avec le changement de [V].

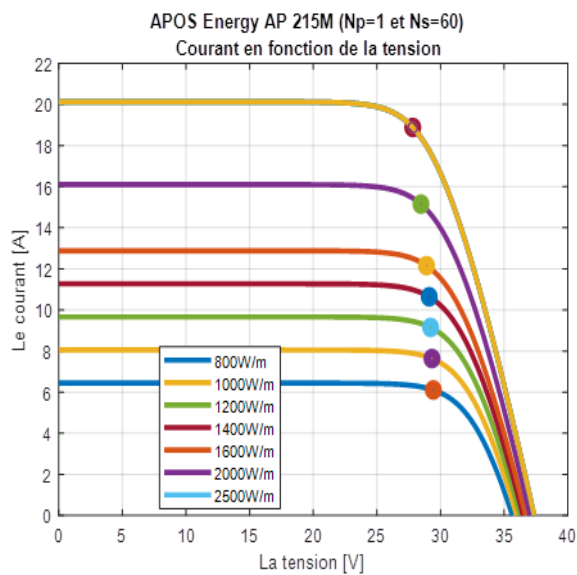


Figure II.14: Caractéristiques I-V, variation de l'irradiance à température constante

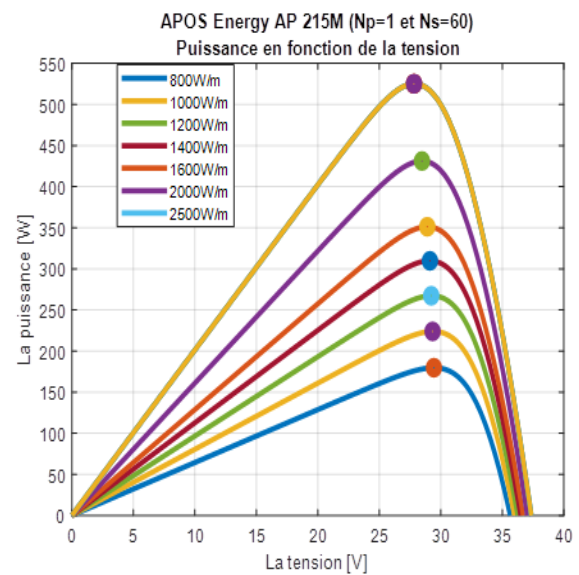


Figure II.15: Caractéristiques P-V, variation de l'irradiance à température constante.

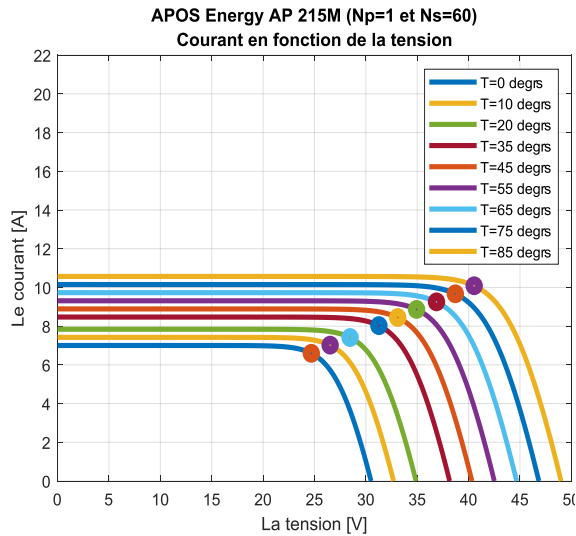


Figure II.16: Caractéristiques I-V, variation de la température à une radiation solaire constante.

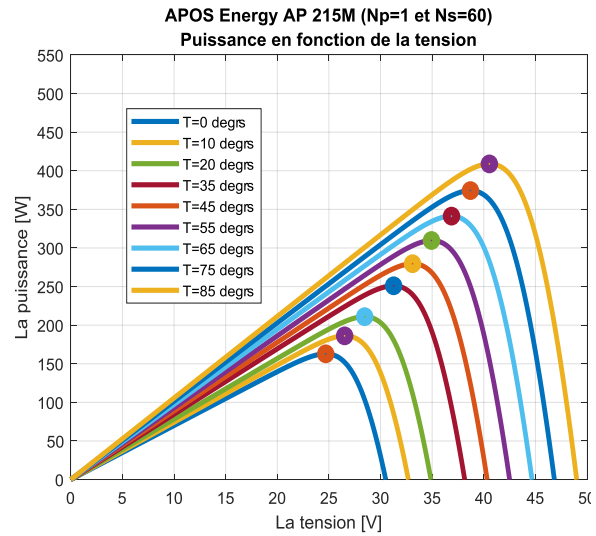


Figure II.17: Caractéristiques P-V, variation de la température à une radiation solaire constante

II.6. Techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking) du solaire photovoltaïque :

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur CC/CC à commutation de haute efficacité qui remplit trois fonctions : détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée, conversion CC/CC et régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (en vrac, absorption et flottante). Pour cela, le convertisseur CC/CC est utilisé comme dispositif de réduction de tension. Cela signifie que la tension du point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension de la batterie. Le champ solaire est connecté à l'entrée du régulateur et la batterie à sa sortie. Lorsque la tension de la batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à la puissance maximale P_{mpp} et transfère cette puissance à la sortie. Par conception, le régulateur MPPT permet un gain de production de 5 à 30 % par rapport à un régulateur PWM.

Ce gain augmente en hiver et pendant les périodes de faible ensoleillement. Le régulateur de charge MPPT offre une plus grande flexibilité dans le choix des panneaux. En effet, tous les types de modules photovoltaïques peuvent être utilisés tant que l'on reste dans les tolérances de tension (V) et de courant (A) du régulateur (J.M.Cottier, 1996).

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les éoliennes ont un effet significatif sur la production d'énergie renouvelable (Zine, 2022).

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est un algorithme mis en œuvre dans les onduleurs photovoltaïques pour ajuster en continu l'impédance observée sur le réseau solaire afin qu'il continue à fonctionner à son point de puissance maximale (ou presque) dans des conditions variables, telles que les variations de l'irradiance solaire, de la température et de la charge. Les ingénieurs qui développent des onduleurs mettent en œuvre des algorithmes MPPT pour maximiser la puissance générée par les systèmes photovoltaïques. Les algorithmes contrôlent la tension pour garantir que le système fonctionne à son "point de puissance maximale" (ou tension maximale) sur une courbe tension/puissance, comme illustré ci-dessous. Les algorithmes MPPT sont généralement utilisés dans les contrôleurs des systèmes photovoltaïques. Ils prennent en compte des facteurs tels que les variations de l'irradiance (ensoleillement) et de la température pour s'assurer que le système photovoltaïque génère constamment la puissance maximale.

I.2.4 Perturbation et Observation (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de puissance résultante. Ainsi, comme illustré dans la Figure II.18, on peut en déduire que si une augmentation positive de la tension entraîne une augmentation de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM (Point de Puissance Maximale) (Eddine & slimane, 2015). Si, au contraire, la puissance diminue, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension diminue. À partir de ces différentes analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique, il est alors facile de localiser le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers la puissance maximale à travers une commande de régulation.

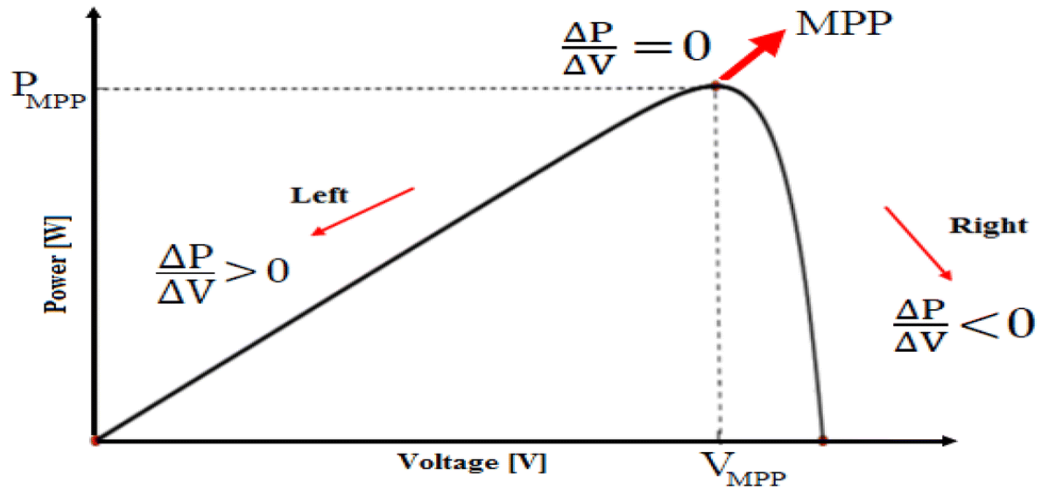


Figure II.18: Diagram of convergence towards the PPM by P&O

Cet algorithme perturbe la tension de fonctionnement pour garantir la puissance maximale. Bien qu'il existe de nombreuses variantes avancées et plus optimisées de cet algorithme, voici un algorithme MPPT P&O de base.

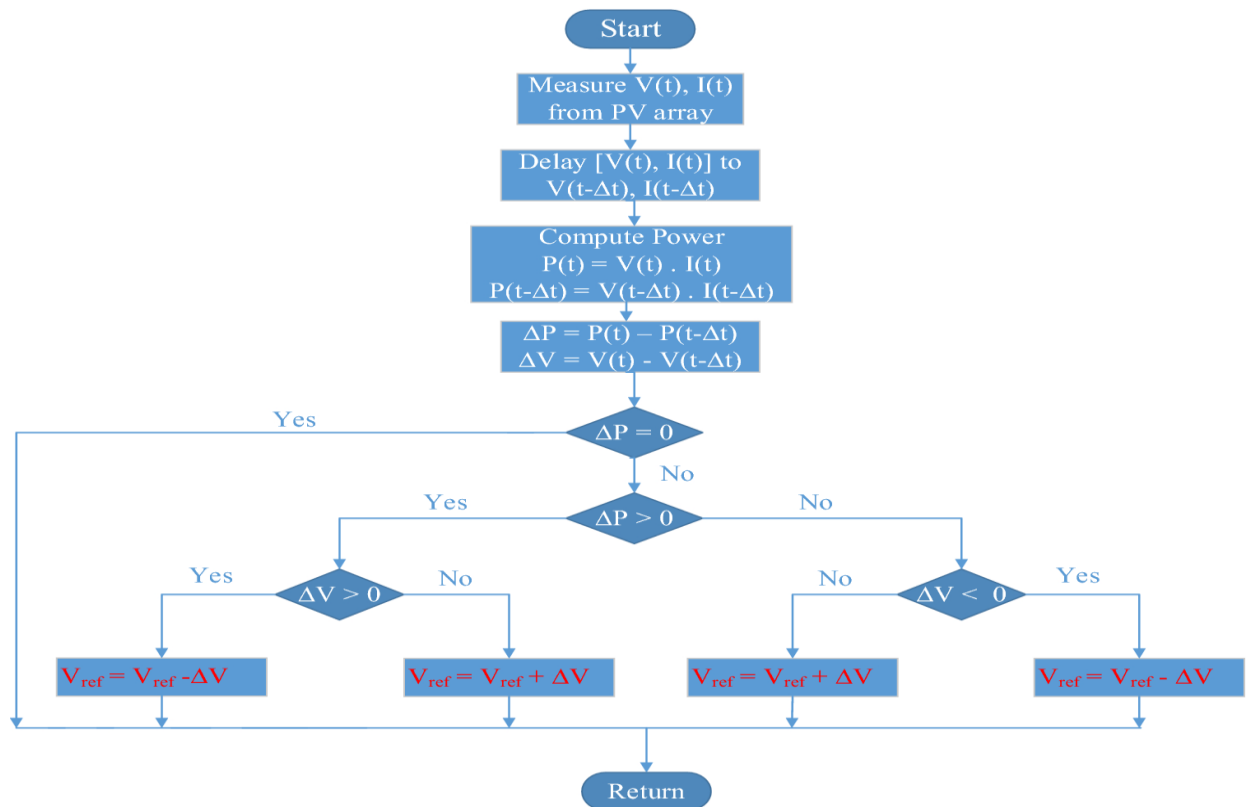


Figure II.19: Basic MPPT P&O algorithm

II.2.4 Algorithme MPPT par conductance incrémentale (INC) :

Dans l'algorithme de conductance incrémentale (INC), le contrôleur mesure les changements incrémentiels de la tension et du courant du générateur photovoltaïque pour prédire l'effet d'une variation de tension. Cette méthode nécessite davantage de calculs dans le contrôleur, mais elle peut suivre plus rapidement les conditions changeantes par rapport à l'algorithme P&O (M.El-Sayed, 2014) (M.Lamnad, 2016). Comme l'algorithme P&O, il peut produire des oscillations de puissance de sortie. Cette technique utilise la conductance incrémentale ($\Delta I/\Delta V$) du générateur photovoltaïque pour calculer le signe de la variation de puissance par rapport à la tension ($\Delta P/\Delta V$). L'algorithme INC calcule le point de puissance maximale en comparant la conductance incrémentale ($\Delta I/\Delta V$) avec la conductance du générateur (I/V). Lorsque ces deux valeurs sont identiques ($\Delta I/\Delta V = I/V$), la tension de sortie correspond à la tension du point de puissance maximale. Le contrôleur maintient cette tension jusqu'à ce que l'irradiation change, puis le processus est répété. L'algorithme INC est basé sur le fait que, au point de puissance maximale, $\Delta P/\Delta V = 0$ et $P = VI$. L'algorithme de conductance incrémentale ne nécessite que deux capteurs, des capteurs de tension et de courant, qui permettent de mesurer respectivement la tension et le courant de sortie du dispositif photovoltaïque (FL.Tofoli, DC.Pereira, & WJ.Paula, 2015). Le diagramme de flux pour la mise en œuvre de l'algorithme INC est représenté dans la Figure 8. L'équation correspondante qui décrit mathématiquement l'algorithme INC peut être exprimée comme suit : la puissance de sortie de la source peut être écrite comme suit :

$$P = V \times I$$

Le fait que $P=V \cdot I$ et la règle en chaîne pour la dérivée des produits par rapport au rendement en tension :

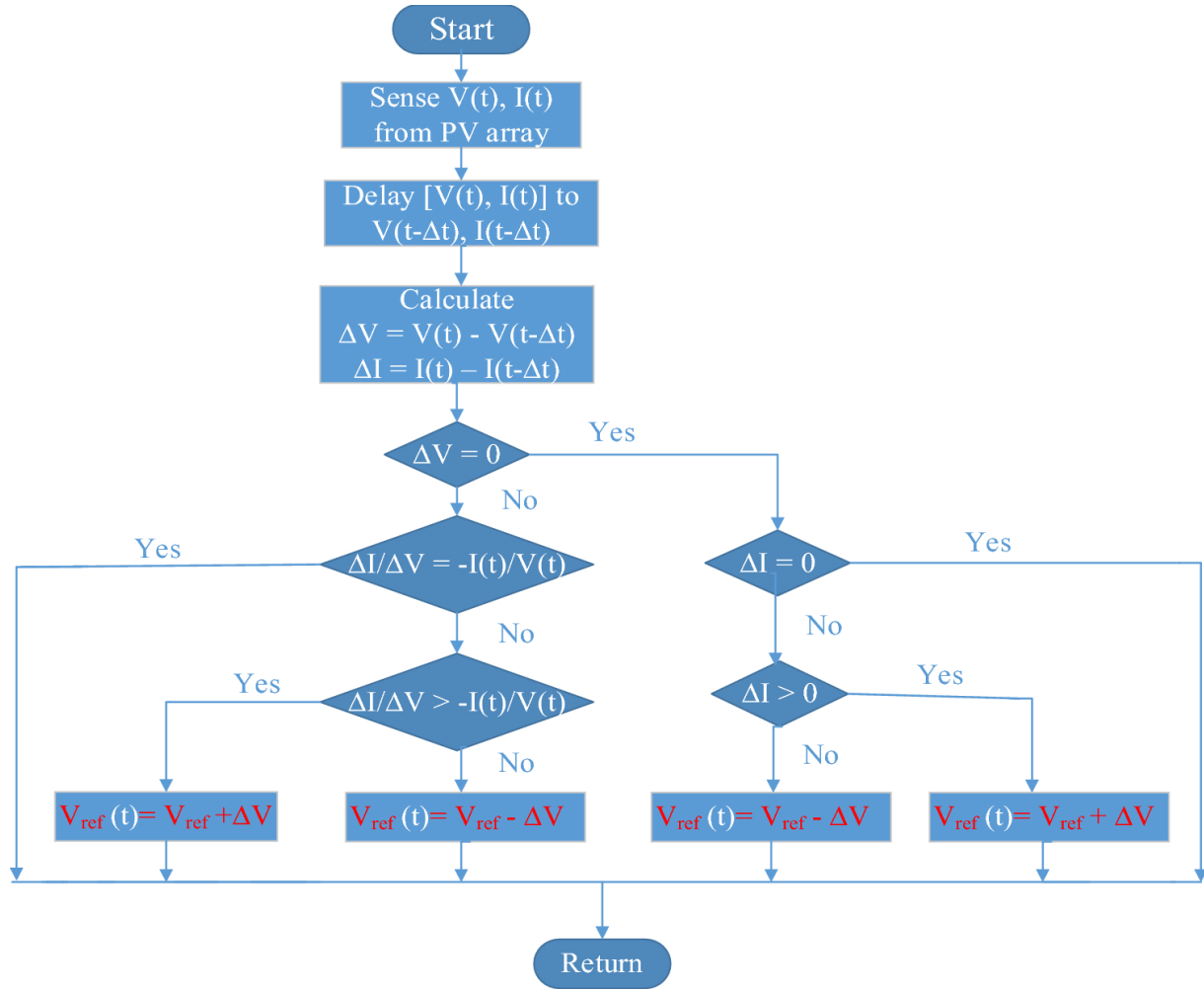


Figure II.20: Conductance increment command algorithm

II.7. Conclusion

Les caractéristiques du système photovoltaïque présentent un comportement fortement non linéaire. Par conséquent, les traqueurs du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle important dans l'extraction de l'énergie des panneaux photovoltaïques (PV), car ils tirent le maximum de puissance de sortie disponible (MPP) indépendamment des variations continues des conditions de température et d'irradiation. Ainsi, le convertisseur élévateur DC-DC amplifie la tension DC générée pour être utilisée comme outil dans le MPPT du système photovoltaïque. Dans ce chapitre, les algorithmes MPPT Perturbé and Observe (P&O) et de l'incrément de conductance ont été présentés afin de les mettre en œuvre dans le chapitre suivant. Ensuite, la modélisation et la simulation du convertisseur élévateur DC/DC ont été réalisées, où les résultats valident le modèle utilisé.

**Chapitre *III*: PV System
associé à un onduleur
contrôlé par MPCIII.
Modélisation de
l'onduleur triphasé**

III.1. Introduction :

Le contrôle du courant est un sujet très recherché en électronique de puissance, comme en témoignent de nombreuses études (Holtz, 1994) (Mohan, 2003). Par conséquent, il est crucial d'étudier l'utilisation de MPC dans un schéma de contrôle actuel dans un premier temps. De plus, l'onduleur triphasé à deux niveaux est une topologie bien établie qui est couramment utilisée dans de nombreuses applications d'entraînement.

Le présent chapitre présente une approche MPC pour le contrôle du courant dans un onduleur triphasé. L'approche est fondée sur le schéma de contrôle noté dans (Íiguez, 2007).

Le schéma de contrôle et le principe de fonctionnement de l'approche MPC de contrôle actuel seront expliqués plus en détail que d'autres applications dans ce livre. En effet, les mêmes concepts et explications peuvent être étendus à tous les exemples présentés dans les chapitres suivants.

III.2. Méthodes de contrôle prédictif pour les convertisseurs de puissance et les variateurs

Le domaine du contrôle prédictif est vaste et englobe une large gamme de contrôleurs qui ont été de plus en plus utilisés dans les convertisseurs de puissance ces derniers temps. Une catégorisation des diverses techniques de contrôle prédictif est présentée dans la figure III.1 , comme indiqué dans (Corte, 2008).Le contrôle prédictif se distingue principalement par sa dépendance à un modèle de système pour prédire le comportement futur des variables contrôlées. Ces informations sont ensuite utilisées par le contrôleur pour déterminer le plan d'action optimal sur la base d'un critère d'optimisation prédéfini. Dans le contrôle prédictif basé sur l'hystérésis, le critère d'optimisation est de maintenir la variable contrôlée dans les limites d'une zone d'hystérésis, comme indiqué dans (Stadtfeld, 1983). D'autre part, dans le contrôle basé sur la trajectoire, les variables contrôlées sont contraintes d'adhérer à une trajectoire prédéfinie, comme indiqué dans (Mutschler, 1998). Dans le contrôle deadbeat, le plan d'action idéal est celui qui se traduit par une erreur de zéro dans l'instant d'échantillonnage suivant, comme décrit dans (Kawabata, 1990) (Kukrer, 1996).La commande prédictive des modèles (MPC) utilise un critère plus flexible, qui s'exprime sous la forme d'une fonction de coût à minimiser (Kouro, 2009).

Le contrôle prédictif offre l'avantage d'avoir des concepts simples et intuitifs, et sa mise en œuvre peut être simple selon le type de contrôle prédictif choisi. Le contrôle à temps mort et

l'ensemble de contrôle fini MPC, en particulier pour un convertisseur à deux niveaux avec un horizon $N = 1$, sont des exemples d'implémentations relativement simples. Cependant, la mise en œuvre du MPC peut être plus complexe si l'ensemble de contrôle continu est pris en compte. De plus, les variations de la commande deadbeat pour une robustesse accrue peuvent devenir complexes et difficiles à appréhender.

Le contrôle prédictif peut obtenir des réponses transitoires rapides sans nécessiter la structure en cascade que l'on trouve généralement dans les schémas de contrôle linéaire. Un exemple de ceci est le contrôle de la vitesse à l'aide d'un contrôle prédictif basé sur la trajectoire. Les non-linéarités du système peuvent être prises en compte dans le modèle, supprimant l'exigence de linéarisation du modèle à tout point de fonctionnement donné et améliorant les performances globales du système.

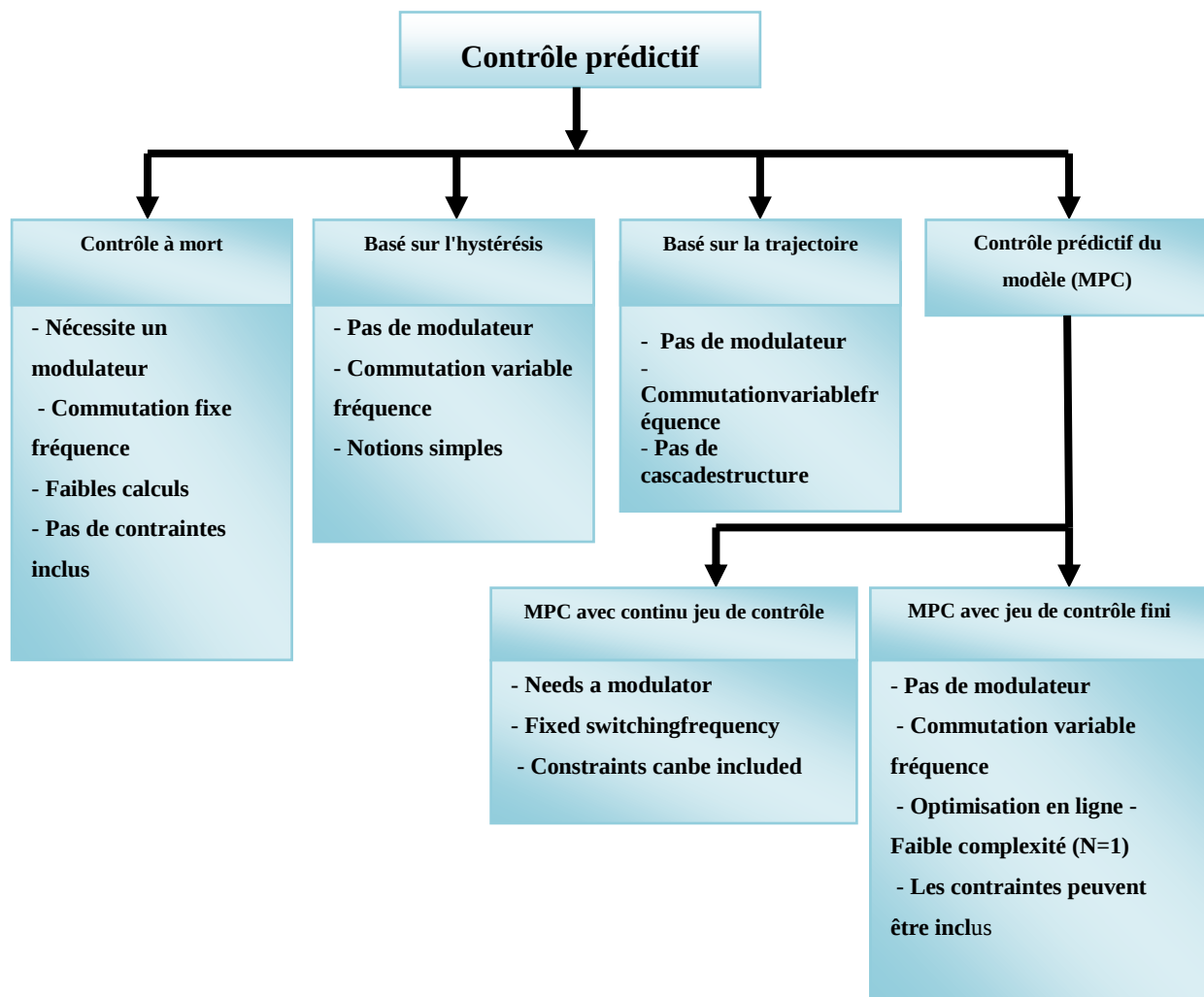


Figure III.1: Classification des méthodes de commande prédictive utilisées en électronique de puissance

III.3. Commande de courant prédictive

L'approche de commande prédictive suggérée repose sur la prémisse qu'un convertisseur de puissance statique ne peut générer qu'un ensemble limité d'états de commutation. De plus, en utilisant des modèles de système, il devient possible d'anticiper le comportement des variables pour chaque état de commutation. Pour déterminer l'état de commutation optimal, un critère de sélection est nécessaire. Ce critère comprend une fonction de coût, qui évalue les valeurs anticipées des variables contrôlées. Des prévisions pour les valeurs futures de ces variables sont calculées pour chaque état de commutation imaginable, et par la suite, l'état qui minimise la fonction de coût est choisi.

Cette stratégie de contrôle peut être résumée dans les étapes suivantes :

- Définir une fonction de coût g .
- Construire un modèle du convertisseur et de ses états de commutation possibles.
- Construire un modèle de la charge pour la prédiction.

Un modèle en temps discret de la charge est nécessaire pour prédire le comportement des variables évalués par la fonction de coût, c'est-à-dire les courants de charge.

III.4. Fonction de coût

L'objectif principal de la stratégie de contrôle actuelle reste inchangé, qui est de réduire l'écart entre les courants mesurés et les valeurs souhaitées. Cet objectif peut être formulé comme une fonction de coût, représentant l'écart de coordonnées orthogonales, évaluant l'écart entre les courants souhaités et les valeurs anticipées.

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad \text{III.(1)}$$

III.5. Modèle de convertisseur

La conversion de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative est réalisée via le circuit d'alimentation de l'onduleur triphasé, en utilisant l'arrangement électrique illustré à la figure III.3. Pour éviter tout court-circuit potentiel, les deux interrupteurs de chaque phase de l'onduleur fonctionnent de manière complémentaire, assurant le bon fonctionnement du système.

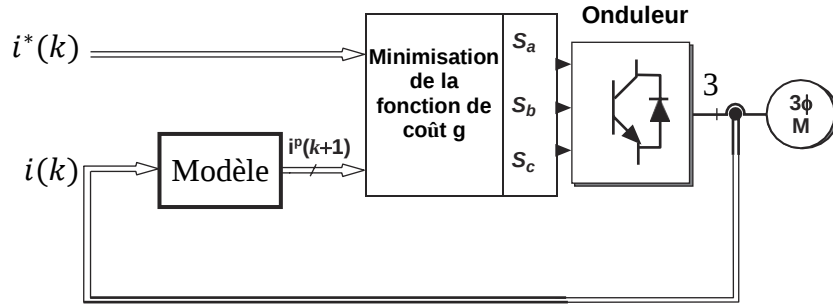


Figure III.2: Schéma fonctionnel de la commande de courant prédictive

Tableau 4.1 Predictive current control algorithm

- 1- On obtient la valeur du courant de référence $i^*(k)$ à partir d'une boucle de commande externe, tandis que le courant de charge $i(k)$ est mesuré.
- 2- Le modèle du système est utilisé pour prédire la valeur du courant de charge $i(k+1)$ dans le prochain intervalle d'échantillonnage, pour chaque vecteur de tension.
- 3- La fonction de coût g évalue l'erreur entre les courants de référence et les prédictions pour le prochain intervalle d'échantillonnage, pour chaque vecteur de tension.
- 4- On sélectionne la tension qui minimise l'erreur de courant, et les signaux d'état de commutation correspondants sont générés.

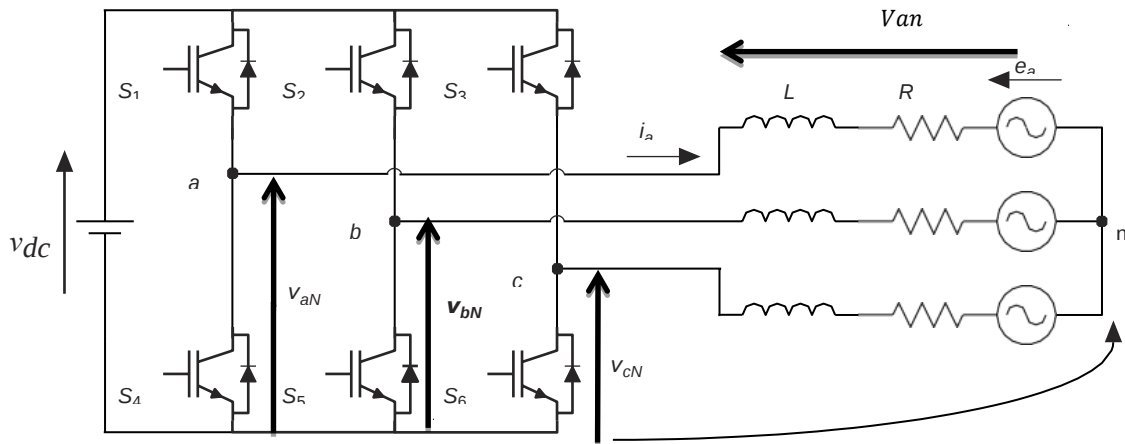


Figure III.3: Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension

la source DC, l'état de commutation des interrupteurs de puissance S_x , avec $x = 1, \dots, 6$, peut être représenté par les signaux de commutation S_a , S_b et S_x définis comme suit :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{if } S_1 \text{ on et } S_4 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_1 \text{ off et } S_4 \text{ on} \end{cases} \quad \text{III.(2)}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{if } S_2 \text{ on et } S_5 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_2 \text{ off et } S_5 \text{ on} \end{cases} \quad \text{III.(3)}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{if } S_3 \text{ on et } S_6 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_3 \text{ off et } S_6 \text{ on} \end{cases} \quad \text{III.(4)}$$

Ces signaux de commutation définissent la valeur des tensions de sortie

$$U_{an} = S_a V_{dc} \quad \text{III.(5)}$$

$$U_{bn} = S_b V_{dc} \quad \text{III.(6)}$$

$$U_{cn} = S_c V_{dc} \quad \text{III.(7)}$$

où V_{dc} est la tension de la source continue.

Considérant le vecteur unitaire $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}$, qui représente les 120 déphasage

entre les phases, le vecteur de tension de sortie peut être défini comme

$$V = \frac{2}{3}(U_{an} + aU_{bn} + a^2U_{cn}) \quad \text{III.(8)}$$

Où U_{an} , U_{bn} et U_{cn} sont les tensions phase-neutre (N) de l'onduleur.

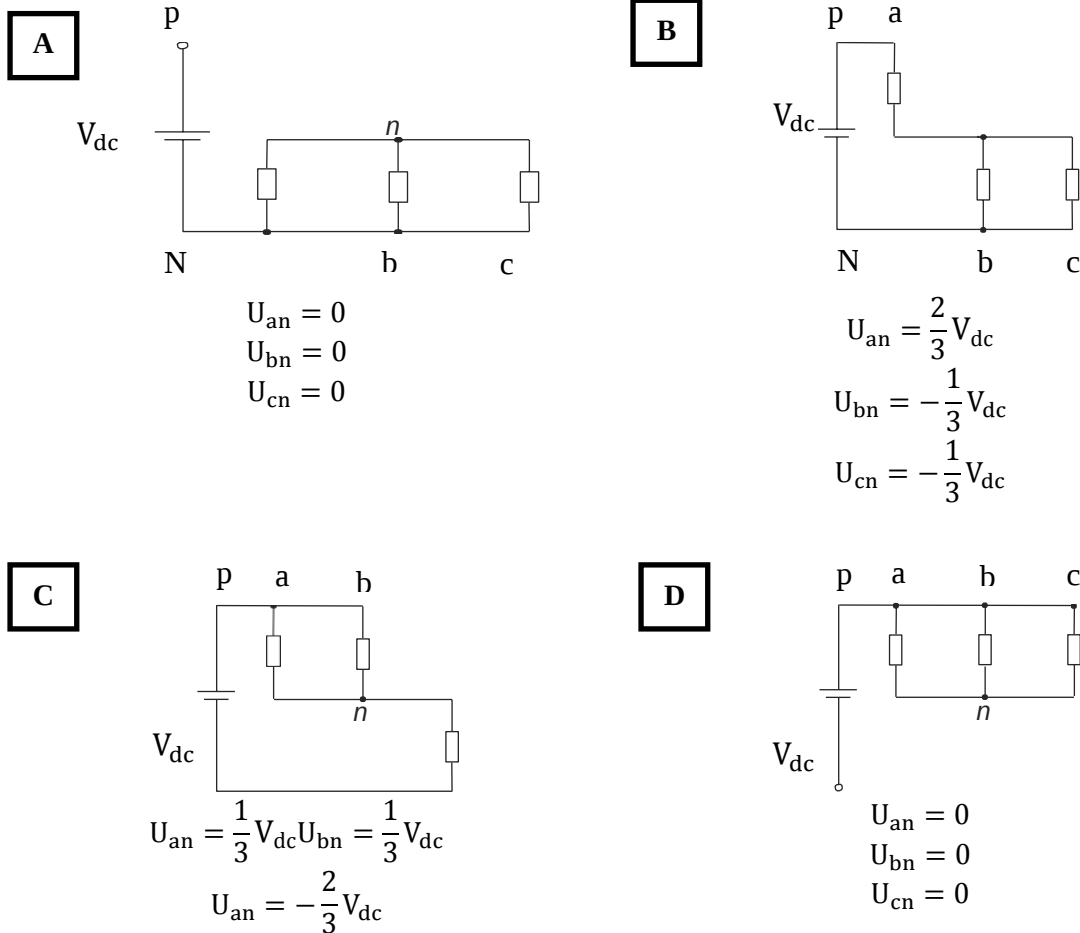


Figure III.4: Configurations de charge équivalente pour différents états de commutation. De cette manière, l'état de commutation $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$ génère le vecteur tension V_0 défini comme

$$V_0 = \frac{2}{3}(0 + a0 + a^20) = 0 \quad \text{III.(9)}$$

Et correspond au circuit représenté sur la figure III.4 a

L'état de commutation (1, 0, 0) génère un vecteur de tension V_1 défini comme

$$V_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + a0 + a^20) = \frac{2}{3}V_{dc} \quad \text{III.(10)}$$

Le vecteur de tension V_2 est généré par l'état de commutation (1, 1, 0) et est défini comme

$$V_2 = \frac{2}{3}(V_{dc} + aV_{dc} + a^20) = \frac{2}{3}(V_{dc} + (-\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2})V_{dc}) = \frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc} \quad \text{III.(11)}$$

Et correspond au circuit représenté sur la figure III.4 b

L'état de commutation (1, 1, 1) génère un vecteur de tension V_7 qui est calculé comme

$$V_1 = \frac{2}{3}(V_{dc} + aV_{dc} + a^2V_{dc}) = \frac{2}{3}V_{dc}(1 + a + a^2) = 0 \quad \text{III.(12)}$$

Différentes dispositions de la charge triphasée connectée à la source de courant commutée peuvent être réalisées, comme illustré à la Figure III.4 En considérant toutes les combinaisons possibles des signaux de porte S_a et S_b et S_c un total de huit états de commutation sont obtenus, qui produisent en conséquence huit vecteurs de tension, comme indiqué dans le tableau II.2. Il est important de noter sur la Fig. III.4 que $V_0 = V_7$, ce qui conduit à un ensemble limité de seulement sept vecteurs de tension distincts dans le plan complexe.

Compte tenu des techniques de modulation, telles que PWM, il est possible d'approximer l'onduleur comme un système linéaire. Cependant, pendant la durée de ce chapitre, l'onduleur sera considéré comme un système non linéaire discret, avec seulement sept états distincts représentant les sorties possibles.

Tableau III.2 États de commutation et tension vecteurs

S_a	S_b	S_c	Vecteur de tension V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{V_{dc}}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{V_{dc}}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{V_{dc}}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

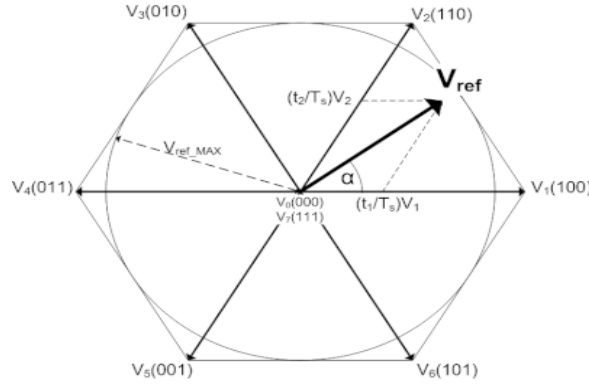


Figure III.5: Vecteurs de tension dans le plan complexe

Il faut admettre que pour atteindre des fréquences de conversion plus élevées, un modèle de transformateur plus complexe peut être utilisé. Ce modèle amélioré peut inclure des facteurs tels que la modélisation du temps mort, la tension de saturation de l'IGBT et la chute de tension directe de la diode, entre autres. Cependant, dans ce livre, l'accent reste mis sur la simplicité, et par conséquent, un modèle direct de l'onduleur sera utilisé.

III.6. Charger le modèle

Compte tenu des définitions des variables du circuit illustré à la Figure III.3, les expressions décrivant la dynamique du courant de charge pour chaque phase peuvent être formulées comme suit.

$$U_{an} = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + U_{nN} \quad \text{III.(13)}$$

$$U_{bn} = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + U_{nN} \quad \text{III.(14)}$$

$$U_{cn} = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + U_{nN} \quad \text{III.(15)}$$

Où R est la résistance de charge et L l'inductance de charge.

Une équation vectorielle pour la dynamique du courant de charge peut être obtenue en substituant les équations (III.13) à (III.15) dans l'équation (III.8).

$$V = L \frac{d}{dt} \left[\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \right] + R \left(\frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) + \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) + \frac{2}{3} (U_{nN} + aU_{nN} + a^2 U_{nN}) \right) \quad \text{III.(16)}$$

En tenant compte de la définition du vecteur spatial donnée dans l'équation (III.8) pour la tension de l'onduleur, ainsi que des interprétations ultérieures des vecteurs de courant de charge et des vecteurs spatiaux de fond.

$$i = \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) \quad \text{III.(17)}$$

$$e = \frac{2}{3}(e_a + ae_b + a^2 e_c) \quad \text{III.}(18)$$

et en supposant que le dernier terme de (III.16) est égal à zéro

$$\frac{2}{3}(U_{nN} + aU_{nN} + a^2 U_{nN}) = U_{nN} \frac{2}{3}(1 + a + a^2) = 0 \quad \text{III.}(19)$$

alors la dynamique du courant de charge peut être décrite par l'équation différentielle vectorielle

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad \text{III.}(20)$$

Où v est le vecteur tension généré par l'onduleur, i est le vecteur courant de charge, e est le vecteur load back-emf.

Please note that for simulation and experimental outcomes, it is assumed that the load's back electromotive force (emf) follows a sinusoidal waveform with a consistent amplitude and frequency.

III.7. Modèle en temps discret pour la prédiction

Le processus d'estimation de l'équation du courant de charge (III.20) pour le temps d'échantillonnage T_s est décrit dans cette section. Afin de prédire la valeur future du courant de charge, le modèle à temps discret utilise les tensions et courants mesurés lors de l'échantillonnage k . Il existe plusieurs méthodes d'estimation qui permettent d'obtenir un modèle adapté au calcul des prédictions en temps discret. Lorsque la charge peut être modélisée comme un système du premier ordre, une approximation dérivée simple peut être utilisée pour obtenir le modèle à temps discret. Cependant, pour des systèmes plus complexes, cette approximation peut ne pas être suffisante.

L'approximation directe d'Euler est utilisée pour substituer la dérivée du courant de charge di/dt .

Dans cette approximation, la dérivée est estimée de la manière suivante :

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad \text{III.}(21)$$

La substitution effectuée dans l'équation (III.20) permet d'obtenir une expression qui permet de prédire le courant de charge futur au temps $k + 1$, pour chacune des sept valeurs du vecteur de tension $v(k)$ générées par l'onduleur. Cette expression est

$$i^p(k + 1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (V(k) - \hat{e}(k)) \quad \text{III.}(22)$$

Le symbole $\hat{e}(k)$ représente la contre-féminitude Estimée où le exposant p indique les variables prédites. L'expression fournie dans l'équation (III.20) peut être utilisée pour calculer

la force contre-électromotrice (back-emf) en utilisant les mesures de la tension et du courant de charge de la manière suivante:

$$\hat{e}(k-1) = V(k-1) - \frac{L}{T_s} i(k) - \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i(k-1) \quad \text{III.(23)}$$

Où $\hat{e}(k-1)$ est la valeur estimée de $(k-1)$. L'excitation arrière présente (k) , nécessaire dans (12.2), peut être estimée en extrapolant les valeurs passées de l'excitation arrière estimée. Alternativement, étant donné que la fréquence de l'excitation arrière est bien inférieure à la fréquence d'échantillonnage, nous supposons qu'elle ne change pas considérablement dans un intervalle d'échantillonnage et nous posons donc

$$\hat{e}(k) = \hat{e}(k-1)$$

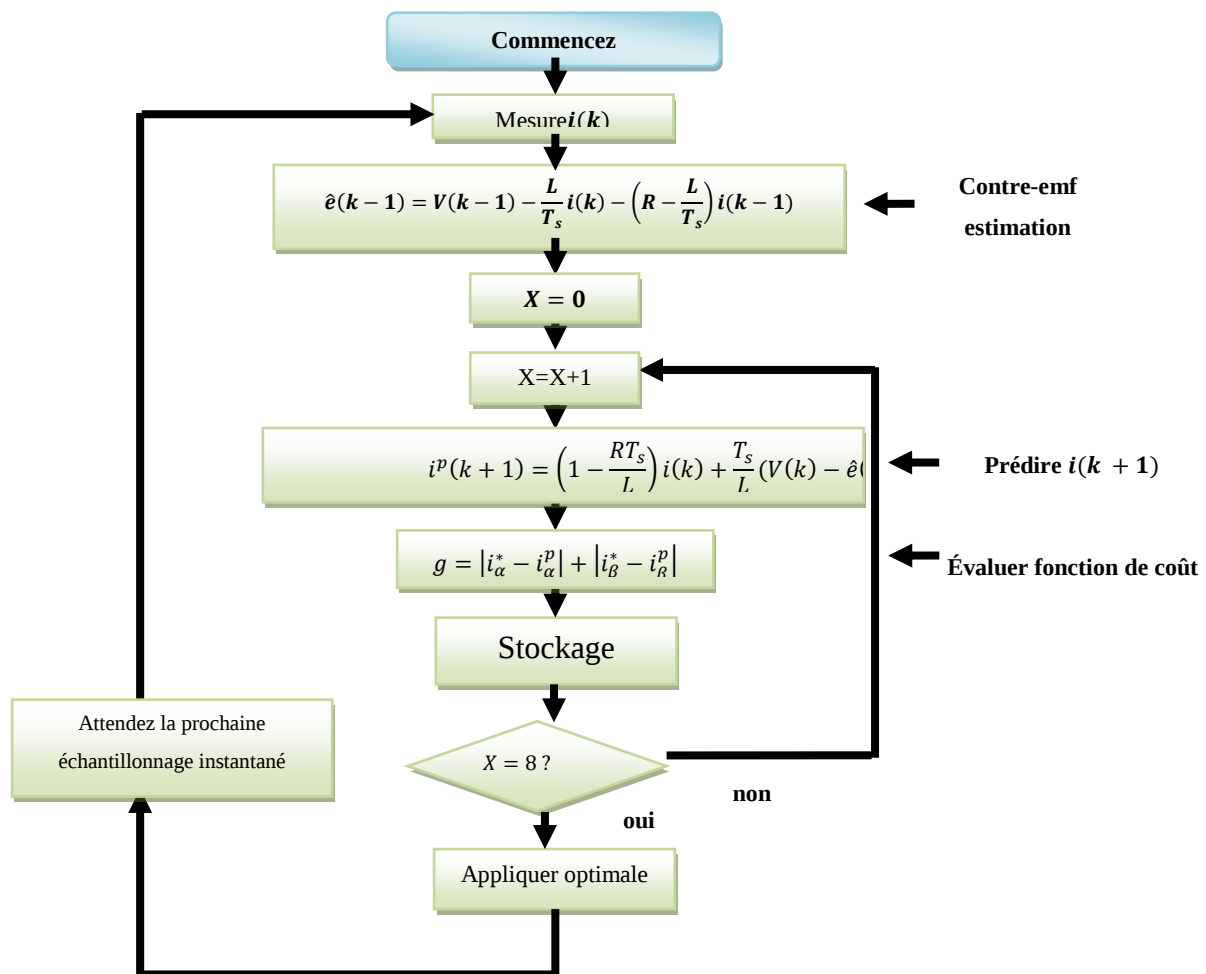


Figure III.6: Organigramme du contrôle de courant prédictif

III.8. MPPT du solaire PV pour onduleur associé avec convertisseur boost :

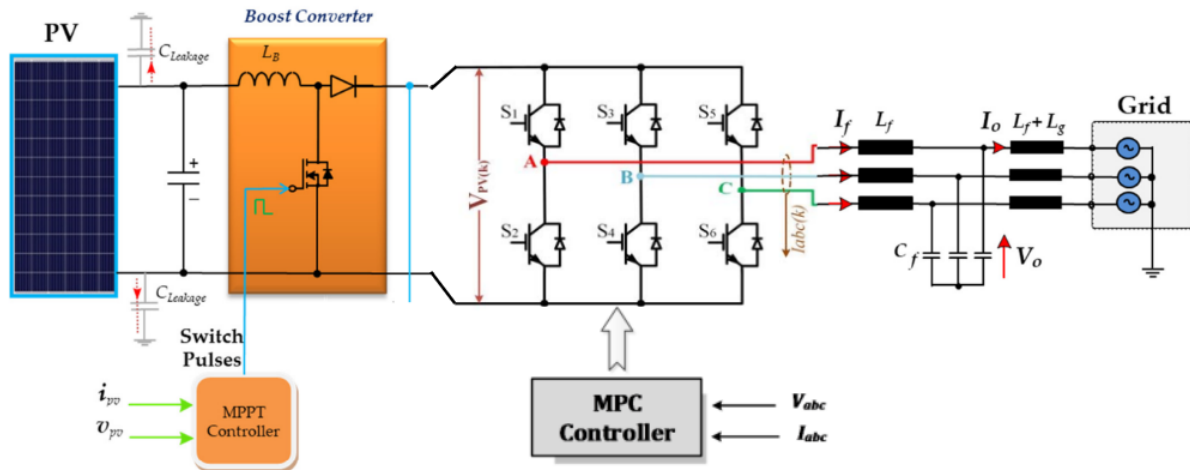


Figure.III.7 : Schéma du MPPT basé sur l'algorithme P&O pour le système solaire PV
Onduleur associé à un BoostConverter

III.9. Simulation et résultats :

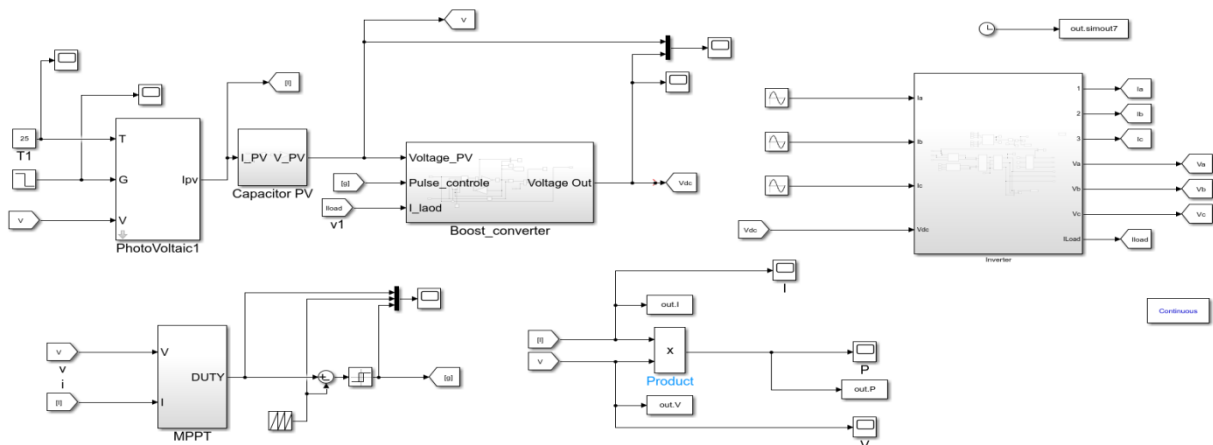


Figure.III.8 : Simulation d'un panneau photovoltaïque associé Inverte avec BoostConverter
Contrôle par MPPT basé sur P&O

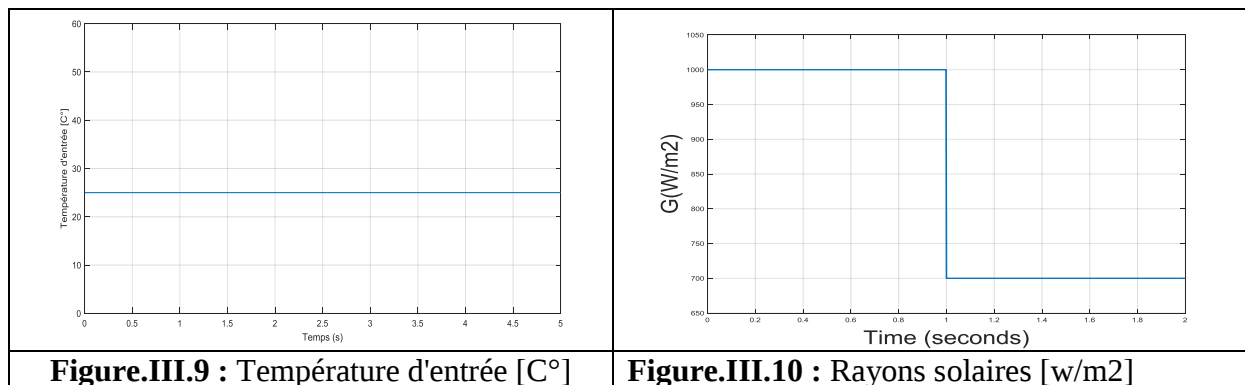


Figure.III.9 : Température d'entrée [C°]

Figure.III.10 : Rayons solaires [w/m2]

La figure III.9 et affiche figure III.10 la configuration finale du panneau PV couplé à un onduleur et un convertisseur élévateur. Le panneau solaire reçoit à la fois la température et la lumière du soleil, qui sont régulées par le MPPT. Pour établir la connexion entre le panneau solaire et le convertisseur élévateur, nous contrôlons soigneusement la tension du panneau et le courant à travers le MPPT. Cela se fait en le comparant à une séquence répétitive pour en déduire la valeur de service. Une fois la tension de référence obtenue, elle est appliquée à la charge R. La charge R est ensuite chargée selon un rapport proportionnel via le convertisseur élévateur, ce qui entraîne le calcul du courant dans la charge R. Tout au long de l'expérience, la température reste constante à $T=25^{\circ}\text{C}$, tandis que l'intensité solaire initiale est de 1000w/m^2 à 0 seconde, et diminue à 700w/m^2 après 2 secondes. En conséquence, les résultats obtenus sont les suivants

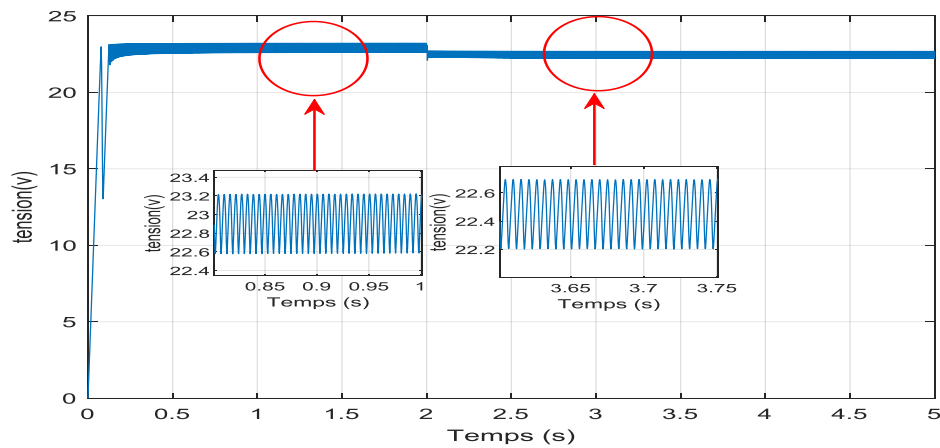


Figure.III.11:PV panel voltage extraction profile based on MPPT P&O

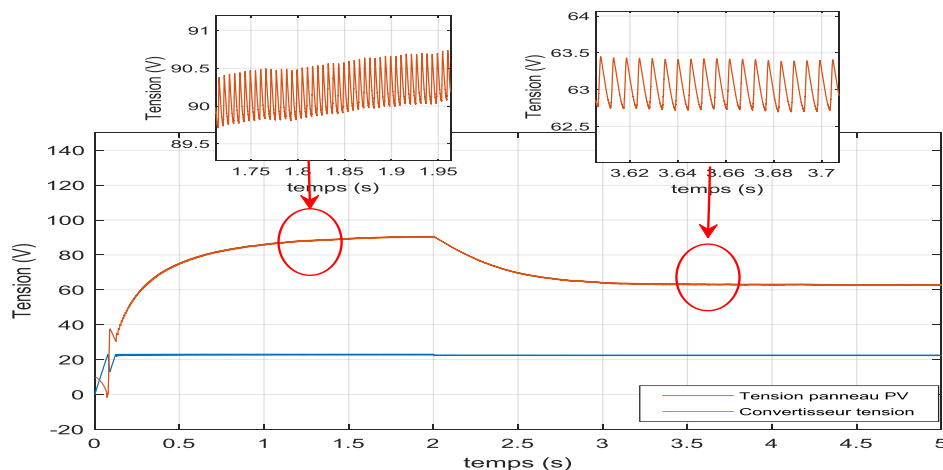


Figure.III.12 : Tension du panneau PV et convertisseur tension

Les Figure III.11 et Figure III.12 mettent en évidence la tension au niveau du panneau solaire et du convertisseur boost. Une comparaison des deux figures révèle que la puissance du convertisseur boost est plus élevée en raison de sa nature boost, avec des fluctuations attribuées à l'inductance de charge et de décharge. De plus, on observe une diminution de la puissance du convertisseur boost après 2 secondes, causée par une baisse des rayons solaires dont les propriétés sont non linéaires, tandis que la tension au niveau du panneau solaire augmente. Lorsque la puissance manque, le système MPPT tente de maximiser la capacité en augmentant la valeur de V_{in} , ce qui nécessite une adaptation de l'expulsion et entraîne une valeur plus basse de V_{out} pour le convertisseur boost.

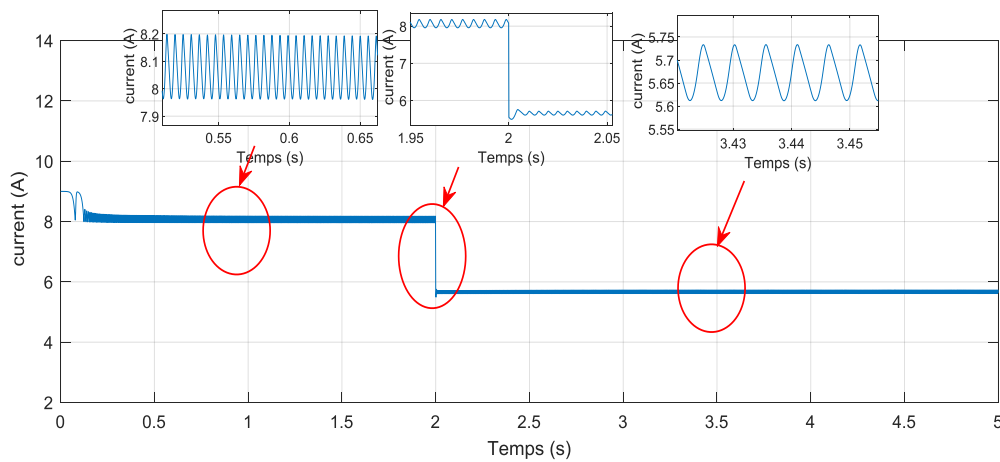


Figure.III.13 : Courant PV correspondant à le contrôleur MPPT basé sur P&O

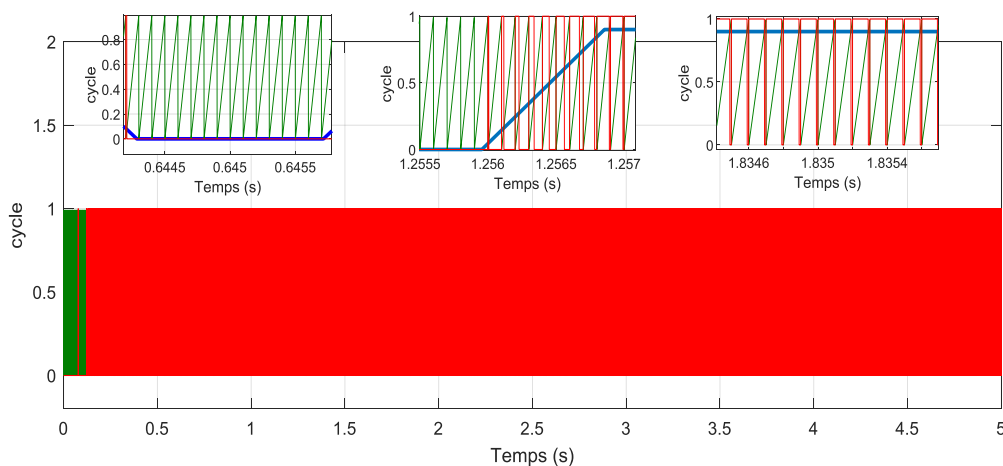


Figure.III.14 : Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT basé sur P&O

La figure III.13 illustre les valeurs de courant dans les panneaux solaires et indique une diminution de l'énergie au bout de 2 secondes en raison d'une augmentation de la température. Lorsque la puissance manque en raison de ce changement de température, le contrôleur MPPT tente d'identifier la capacité de puissance maximale en utilisant les caractéristiques des panneaux solaires. Par conséquent, la valeur actuelle est inférieure à celle d'avant.

Dans la Figure III.14, les valeurs du rapport cyclique obtenues à partir du contrôleur MPPT à l'aide de la méthode P&O (Perturb and Observe) sont affichées et comparées à des séquences répétées, comme indiqué dans le format fourni.

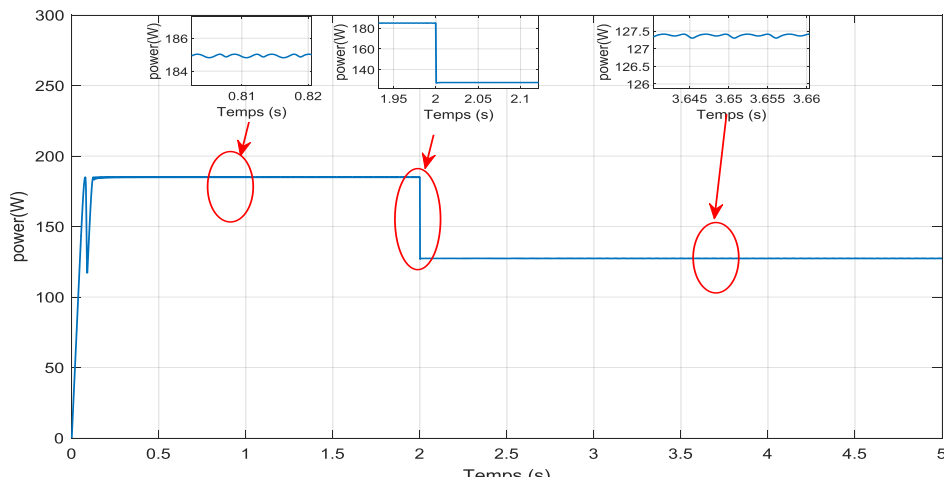


Figure.III.15 : MPPT basé sur P&O. PV profil d'extraction de puissance du panneau

La figure III.15 représente les valeurs de puissance du panneau solaire et du convertisseur élévateur. Lors de la comparaison, il est évident que le convertisseur élévateur a une valeur de puissance plus élevée. Les fluctuations de la puissance du convertisseur élévateur peuvent être attribuées à la charge et à la décharge de l'inductance.

De plus, il y a une baisse de la valeur de puissance à la marque des 3 secondes, qui est le résultat d'un ensoleillement insuffisant ou d'une diminution de l'intensité des rayons du soleil

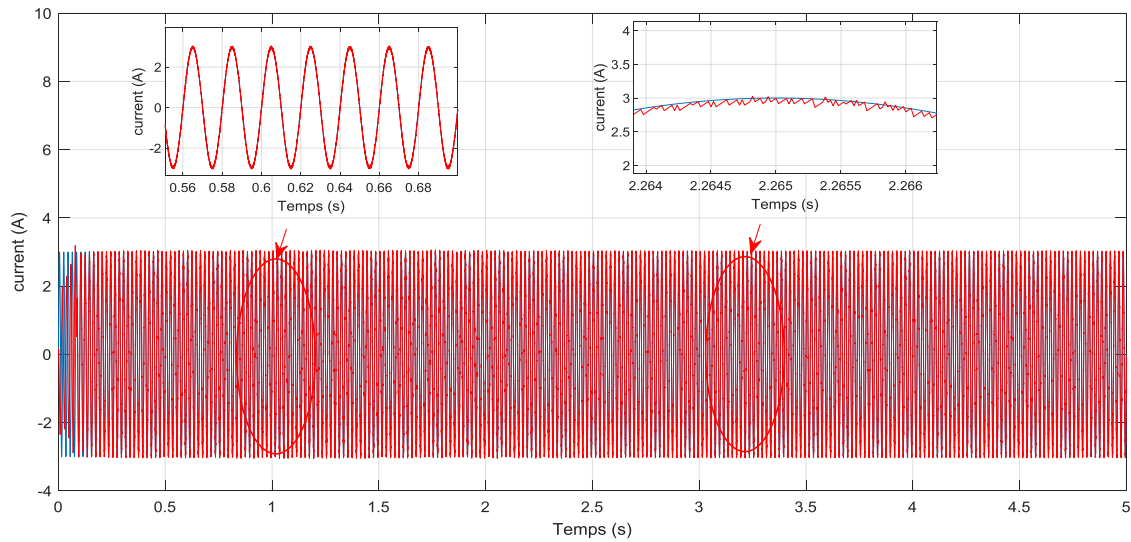


Figure.III.16 : Courant du convertisseur Charge RL

La figure III.16 illustre les valeurs de courant obtenues à la charge RL à partir de l'onduleur connecté au convertisseur élévateur. On observe que la forme d'onde du courant ressemble étroitement à un signal sinusoïdal.

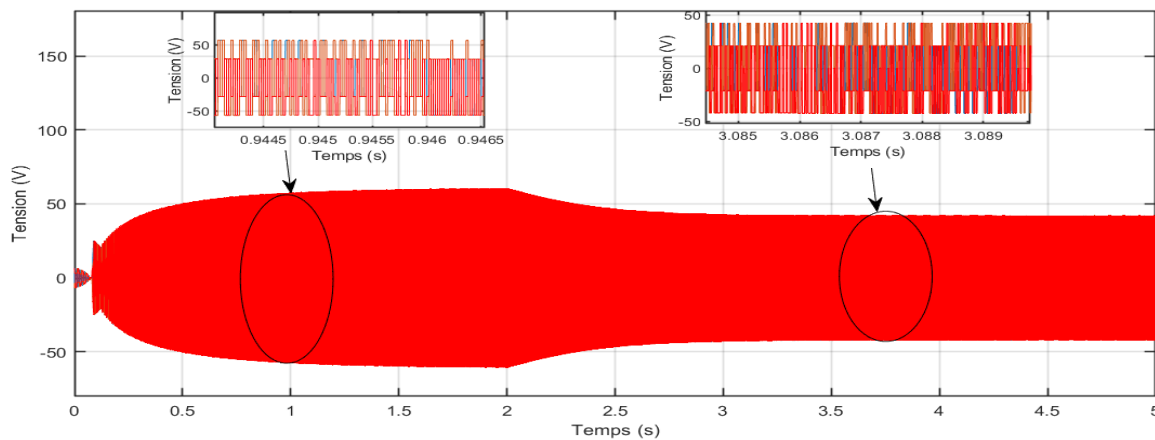


Figure.III.17 : Tension de l'onduleur

La figure III.17 présente les valeurs de tension au niveau de l'onduleur associé au convertisseur élévateur. Il apparaît que la puissance du convertisseur élévateur présente des fluctuations, qui peuvent être attribuées à la charge et à la décharge de l'inductance.

De plus, il y a une diminution de la valeur de puissance à la marque des 3 secondes, ce qui peut être attribué à une augmentation de la température. Le changement de température affecte l'efficacité du système, entraînant une diminution de la puissance de sortie.

III.10. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les méthodes de contrôle prédictif pour les convertisseurs de puissance et les variateurs. Nous avons examiné en détail la commande de courant prédictive, la fonction de coût, les modèles de convertisseurs et les techniques de prédiction en temps discret. En appliquant ces concepts à la maximisation du point de puissance pour les systèmes photovoltaïques associés à un onduleur avec un convertisseur boost, nous avons constaté des résultats encourageants. Les simulations ont démontré l'impact des fluctuations de puissance et de la température sur les performances du système. Les méthodes de contrôle prédictif offrent une approche prometteuse pour améliorer l'efficacité et la stabilité des systèmes d'énergie renouvelable. Des recherches futures peuvent se concentrer sur l'optimisation des paramètres de contrôle et l'intégration pratique de ces techniques pour favoriser une utilisation plus répandue de l'énergie solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce chapitre I englobe tous les détails concernant les sources d'énergie renouvelables, en mettant l'accent sur le rayonnement solaire et en fournissant une description détaillée des composants photovoltaïques et de leurs applications dans divers domaines. Cette étude met en évidence l'importance de l'énergie solaire pour assurer la sécurité alimentaire grâce à son utilisation dans l'agriculture et la désalinisation de l'eau, ainsi que pour garantir la sécurité énergétique grâce à l'adoption d'une source d'énergie propre et durable. Par ailleurs, plusieurs types de cellules photovoltaïques sont décrits, en mettant en évidence leurs composants et les méthodes de collecte et de protection des panneaux solaires.

Ce chapitre II Les caractéristiques des systèmes photovoltaïques présentent un comportement hautement non linéaire. Ainsi, les traqueurs du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle crucial dans l'extraction de l'énergie des panneaux photovoltaïques (PV) en optimisant la puissance de sortie disponible (MPP), indépendamment des variations continues des conditions de température et d'irradiation. Dans cette optique, le convertisseur élévateur DC-DC amplifie la tension DC générée pour être utilisée dans le MPPT du système photovoltaïque. Dans ce chapitre, nous avons présenté les algorithmes Perturbé et Observé (P&O) ainsi que l'incrément de conductance pour leur implémentation dans le chapitre suivant. De plus, nous avons réalisé la modélisation et la simulation du convertisseur élévateur DC/DC, dont les résultats confirment la validité du modèle utilisé.

Ce chapitre III se focalise sur la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque (PV) utilisant la commande prédictive basée sur le modèle (MPC). Nous abordons les limites des systèmes PV conventionnels avec convertisseurs et mettons en avant les avantages des approches basées sur le MPC pour ces systèmes. Le MPC est utilisé pour contrôler l'onduleur et une modulation spécifique est appliquée. Nous analysons les performances et la puissance du système. Le MPC permet d'améliorer significativement les performances des systèmes photovoltaïques avec onduleurs, notamment en termes d'efficacité et de stabilité .

Bibliographie

Bibliography

A.John. (1991). Solar engineering of thermal process. New York/ Chichester/ Brisbane.

A.Malek. *Performance analysis of the first photovoltaic grid-connected system*. Algeria.

A.Sgobbi. (2016). Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. Int J Hydrogen Energy.

Abderraouf, A. (2018). *Analyse Et Commande D ' Un Hacheur Buck- Boost*. Université Mohamed Khider De Biskra.

Aboub, H. (2022). A New Multicarrier Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Strategy based on Rooted Tree Optimization (RTO) Algorithm for Reducing Total Harmonic Distortion (THD) of Switched-Capacitor Nine-level Inverter in Grid-connected PV systems. *INDONESIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY* .

Aigrain, P. *Transformation directe de l'énergie solaire en électricité, les semiconducteurs et l'énergie solaire*.

Ammari, C. *Techno-economic analysis of a stand-alone photovoltaic system with three different storage systems for feeding isolated houses in south Algeria*.

AS.Tijani. (2014). Mathematical modelling and simulation analysis of advanced alkaline electrolyzer system for hydrogen production. *Procedia Technol*.

B.Flèche, & D.Delagnes. (2007). *Energie solaire photovoltaïque*.

B.Samia. (2004). contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque dote de système de suivi du soleil comparaison et application au site de Tlemcen. Thèse de Magister, Université Tlemcen.

B.Zhang, & J.Zhou. (2019). In *Introductory chapter: recent development and applications of agricultural robots* (p. 13). Agric. Robot.—Fundam.

Blackmore. (2014). Developing the principles of precision farming. Conf Precis Agric.

BONN. (june 2004). *International conference for renewable energie*. Germany.

Boughazala, S. M. (2022). A Novel Control Technique Based on Multi-Objective Intelligent Routing Algorithms for Optimum Performances of 12/8 Switched Reluctance Motor. International Journal on Energy Conversion (I.R.E.CON.).

Charfi, A. *Performance evaluation of a solar photovoltaic system* [Author links open overlay panel](#).

Corte, P. (2008). *Predictive control in power electronics and drives*. Transactions on Industrial Electronics.

Denoyelle, F. (2013). Production d'énergie électrique par source renouvelable. Technique d'Ingénieur.

E.Lorenzo. (1994). Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems. Artes Graficas Gala, S.L., Madrid, Spain.

Eddine, T., & slimane, G. (2015). *modélisation et simulation d'un system photovoltaïque*. université El Oued.

Fatiha, H., & Aicha, R. (2014). *Modélisation Et Simulation D ' Un Système Photovoltaïque*. Université Kasdi Merbah Ouargla.

FL.Tofoli, DC.Pereira, & WJ.Paula. (2015). *Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems*. Int J Photo-energy.

Forest, F., & Ferrieux, J. (1999). *Alimentations A Découpage Convertisseurs A Résonance*. 3rd Edition, Dunod.

Fouad, M. *An integrated review of factors influencing the perfomance of photovoltaic panelsl*.

Holtz, J. (1994). *Pulsewidth modulation electronic power conversion*. Proceedings of the IEEE.

íguez, J. R. (2007). *"Predictive current control of a voltage source inverter*. Transactions on Industrial Electronics.

J.Koskela. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization Author links open overlay panel.

j_M.Cottier. (1996). *Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs*. Office fédéral des questions conjoncturelles.

Jl.Levine. (2007). An analysis of hydrogen production from renewable electricity sources. Sol Energy.

JY.Song. (1999). Review of gel-type polymer electrolytes for lithiumion batteries. J Power Sources .

K.Rajeshwar. (2008). Solar hydrogen generation [electronic resource]: toward a renewable energy future. In . Springer.

Kawabata, T. (1990). *“Dead beat control of three phase PWM inverter*. IEEE Transactions on Power Electronics.

Kouro, S. (2009). *model predictive control – a simple and powerful method to control power converters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

Kukrer, O. (1996). *Discrete-time current control of voltage-fed three-phase PWM inverters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

L.Bartolucci. (2019). Fuel cell based hybrid renewable energy systems for off-grid telecom stations: data analysis and system optimization. Appl Energy.

Lakehal, R. (2011). Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire: mesures I-V et extraction des paramètres. mémoire de master université de Tlemcen, Algérie.

M.Carmo. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. Int J HydrogenB Energy .

M.David. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: a review. J Energy Storage .

M.El-Sayed. (2014). *Evaluation of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic electricity*. Kuwai.

M.Lamnad. (2016). *Comparative study of IC, P&O and FLC method of MPPT algorithm for grid connected PV module*. J Theor Appl Inf Technol.

MA.Mujeebu. (2016). Hydrogen and syngas production by superadiabatic combustion_a review. Appl Energy.

Mabrouk, A. (2008). Étude de conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique. mémoire de magister en électricité solaire de l'école nationale polytechnique El Harrach, Alger .

Medekhel, L. (2022). Experimental study of temperature effects on the photovoltaic solar panels performances in Algerian desert. International Journal of Energetica (IJECA).

MF.Serincan. (2016). Validation of hybridization methodologies of fuel cell backup power systems in real-world telecom applications. Int J Hydrogen Energy.

Mohan, N. (2003). *Power electronics*.

MS.Guney. (2017). Classification and assessment of energy storage systems . Renew Sust Energ Rev .

Mutschler, P. (1998). *A new speed-control method for induction motors*. Conference Record of PCIM'98, Nuremberg.

O.Elsharnouby. (2013). A critical literature review on biohydrogen production by pure cultures. Int J Hydrogen Energy.

OU DIAI, F. (2019). Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance. ZIRMI. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI.

P.Sivagurunathan. (2016). Enhancement strategies for hydrogen production from wastewater: a review. Curr Org Chem.

Papadopoulou, E. (2011). Photovoltaic industrial systems: An environmental approach. Green Energy Technol.

Poitiers, F. (2003). Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse de doctorat université de Nantes.

R.P.Mukund. (1999). Wind and solar Power Systems. CRC Press LLC, New York.

Reviews. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany Renewable and Sustainable Energy Reviews., 140, p. 110694.

SM.Pedersen. (2006). Agricultural robots system analysis and economic feasibility. Precis Agric.

SS.Seyitoglu. (2017). Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. Int J Hydrogen Energy .

Stadtfeld, S. (1983). *A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source* . International Power Electronics Conference, IPEC, Tokyo.

W.Waghorne. (2001). Viscosities of electrolyte solutions. Philos Trans Roy Soc A Math Phys Eng Sci.

Zine, M. (2022). Coupled Indirect Torque Control and Maximum Power Point Tracking Technique for Optimal Performance of 12/8 Switched Reluctance Generator-Based Wind Turbines .

A.John. (1991). Solar engineering of thermal process. New York/ Chichester/ Brisbane.

A.Malek. *Performance analysis of the first photovoltaic grid-connected system*. Algeria.

A.Sgobbi. (2016). Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. Int J Hydrogen Energy.

Abderraouf, A. (2018). *Analyse Et Commande D ' Un Hacheur Buck- Boost*. Université Mohamed Khider De Biskra.

Aboub, H. (2022). A New Multicarrier Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Strategy based on Rooted Tree Optimization (RTO) Algorithm for Reducing Total Harmonic Distortion (THD) of Switched-Capacitor Nine-level Inverter in Grid-connected PV systems. *INDONESIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY* .

Aigrain, P. *Transformation directe de l'énergie solaire en électricité, les semiconducteurs et l'énergie solaire.*

Ammari, C. *Techno-economic analysis of a stand-alone photovoltaic system with three different storage systems for feeding isolated houses in south Algeria.*

AS.Tijani. (2014). Mathematical modelling and simulation analysis of advanced alkaline electrolyzer system for hydrogen production. *Procedia Technol.*

B.Flèche, & D.Delagnes. (2007). *Energie solaire photovoltaïque.*

B.Samia. (2004). contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque dote de système de suivi du soleil comparaison et application au site de Tlemcen. Thèse de Magister, Université Tlemcen.

B.Zhang, & J.Zhou. (2019). Dans *Introductory chapter: recent development and applications of agricultural robots* (p. 13). *Agric. Robot.—Fundam.*

Blackmore. (2014). Developing the principles of precision farming. *Conf Precis Agric.*

BONN. (june 2004). *International conference for renewable energie.* Germany.

Boughazala, S. M. (2022). A Novel Control Technique Based on Multi-Objective Intelligent Routing Algorithms for Optimum Performances of 12/8 Switched Reluctance Motor. *International Journal on Energy Conversion (I.R.E.CON.).*

Charfi, A. *Performance evaluation of a solar photovoltaic system Author links open overlay panel.*

Corte, P. (2008). *Predictive control in power electronics and drives.* Transactions on Industrial Electronics.

Denoyelle, F. (2013). Production d'énergie électrique par source renouvelable. *Technique d'Ingénieur.*

E.Lorenzo. (1994). *Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems.* Artes Graficas Gala, S.L., Madrid, Spain.

Eddine, T., & slimane, G. (2015). *modélisation et simulation d'un system photovoltaïque.* université El Oued.

Fatiha, H., & Aicha, R. (2014). *Modélisation Et Simulation D ' Un Système Photovoltaïque*. Université Kasdi Merbah Ouargla.

FL.Tofoli, DC.Pereira, & WJ.Paula. (2015). *Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems*. Int J Photo-energy.

Forest, F., & Ferrieux, J. (1999). *Alimentations A Découpage Convertisseurs A Résonance*. 3rd Edition, Dunod.

Fouad, M. *An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels*.

Holtz, J. (1994). *Pulsewidth modulation electronic power conversion*. Proceedings of the IEEE.

íguez, J. R. (2007). *“Predictive current control of a voltage source inverter*. Transactions on Industrial Electronics.

J.Koskela. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization Author links open overlay panel.

j_M.Cottier. (1996). *Centrales photovoltaïques Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs*. Office fédéral des questions conjoncturelles.

Jl.Levane. (2007). An analysis of hydrogen production from renewable electricity sources. Sol Energy.

JY.Song. (1999). Review of gel-type polymer electrolytes for lithiumion batteries. J Power Sources .

K.Rajeshwar. (2008). Solar hydrogen generation [electronic resource]: toward a renewable energy future. Dans . Springer.

Kawabata, T. (1990). *“Dead beat control of three phase PWM inverter*. IEEE Transactions on Power Electronics.

Kouro, S. (2009). *model predictive control – a simple and powerful method to control power converters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

Kukrer, O. (1996). *Discrete-time current control of voltage-fed three-phase PWM inverters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

L.Bartolucci. (2019). Fuel cell based hybrid renewable energy systems for off-grid telecom stations: data analysis and system optimization. Appl Energy.

Lakehal, R. (2011). Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire: mesures I-V et extraction des paramètres. mémoire de master université de Tlemcen, Algérie.

M.Carmo. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. Int J HydrogenB Energy .

M.David. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: a review. J Energy Storage .

M.El-Sayed. (2014). *Evaluation of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic electricity*. Kuwait.

M.Lamnad. (2016). *Comparative study of IC, P&O and FLC method of MPPT algorithm for grid connected PV module*. J Theor Appl Inf Technol.

MA.Mujeebu. (2016). Hydrogen and syngas production by superadiabatic combustion_a review. Appl Energy.

Mabrouk, A. (2008). Étude de conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique. mémoire de magister en électricité solaire de l'école nationale polytechnique El Harrach, Alger .

Medekhel, L. (2022). Experimental study of temperature effects on the photovoltaic solar panels performances in Algerian desert. International Journal of Energetica (IJECA).

MF.Serincan. (2016). Validation of hybridization methodologies of fuel cell backup power systems in real-world telecom applications. Int J Hydrogen Energy.

Mohan, N. (2003). *Power electronics*.

MS.Guney. (2017). Classification and assessment of energy storage systems . Renew Sust Energ Rev .

Mutschler, P. (1998). *A new speed-control method for induction motors*. Conference Record of PCIM'98, Nuremberg.

O.Elsharnouby. (2013). A critical literature review on biohydrogen production by pure cultures. Int J Hydrogen Energy.

OU DIAI, F. (2019). Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance. ZIRMI. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI.

P.Sivagurunathan. (2016). Enhancement strategies for hydrogen production from wastewater: a review. Curr Org Chem.

Papadopolou, E. (2011). Photovoltaic industrial systems: An environmental approach. Green Energy Technol.

Poitiers, F. (2003). Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse de doctorat université de Nantes.

R.P.Mukund. (1999). Wind and solar Power Systems. CRC Press LLC, New York.

Reviews. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany Renewable and Sustainable Energy Reviews., 140, p. 110694.

SM.Pedersen. (2006). Agricultural robots system analysis and economic feasibility. Precis Agric.

SS.Seyitoglu. (2017). Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. Int J Hydrogen Energy .

Stadtfeld, S. (1983). *A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source* . International Power Electronics Conference, IPEC, Tokyo.

W.Waghorne. (2001). Viscosities of electrolyte solutions. Philos Trans Roy Soc A Math Phys Eng Sci.

Zine, M. (2022). Coupled Indirect Torque Control and Maximum Power Point Tracking Technique for Optimal Performance of 12/8 Switched Reluctance Generator-Based Wind Turbines .