

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Ahmed Draia Adrar

Faculté Des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de Technologie



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :
Master en Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Thème :

*Etude des différentes topologies des onduleurs triphasés
destinés aux applications photovoltaïques*

Présenté par :

Laala Nouredin

Brahim Fatha

Soutenu publiquement le 23/06/2019

Devant le jury :

Président : Pr. BOUBAKAR Ahmed Professeur Université Africaine. A.D. Adrar

Encadreur : Dr. YAICHI Mohammed M.R.A Unité de Rech URER/MS. Adrar

Examineur : Mr. DAHBI Hassan M.A.A Université Africaine. A.D. Adrar

Année Universitaire : 2018/2019



Remerciement

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
m'avoir donner le courage et la patience pour
réaliser ce travail malgré toutes les difficultés
rencontrées.*

*Nous tenons d'abord à adresser toute nos gratitudees à
Mr Yhaichi Mohammed.*

*Pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur
scientifique, son disponibilité, ses conseils et la confiance qu'il s'accorde
pour permettre de réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier Le Directeur de l'Unité de Recherche en Energie
Renouvelable en Milieu Saharien d'ADRAR «URER-MS» sur le bien
venu.*

*Nous souhaitons également de remercier tous les amis leurs aides, leurs
encouragements surtout mes très chers seours et mes très chers frères.*

*A tous Mes amies d'étude surtout ceux
d'électrotechnique promotion 2019*





Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes parents Dieu les protège et les sauver.

Pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A mes sœurs ainsi que

A mes frères pour leur tendresse.

A toute ma famille ainsi qu'à mes amis.

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2019

Nour eddin





Dédicace

*Au nom d'Allah, Le Clément, Le Miséricordieux
Louange et Gloire à Dieu, le Tout Puissant, qui nous*

A permis de mener

à bien ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail :

mon très chère frère Rabeh

*A mes très chers parents, que dieu les garde et
les protège pour leurs soutien moral et financier,
pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils*

A mes frères

A mes sœurs

A les époux de mes sœurs

et femmes de mes frères

Je le Dédie aussi à :

Mes amies

A toute ma famille Brahim

Mes professeurs et mes collègues

*Je ne saurai oublier de remercier toute personne qui, d'une
manière ou d'une autre, m'a aidé dans l'élaboration de ce travail.*

Fatha



Résumé :

Actuellement, l'utilisation des énergies solaires a émergé récemment comme choix très important dans la vie. Les modules photovoltaïques (PV) sont les éléments de base de tout système PV. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries (ex.: pour une pompe solaire où l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique.

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en deux groupes distincts. Le premier groupe est un système autonome, non relié à un réseau électrique. L'autre type est un système PV relié directement au réseau électrique. La plupart de ces systèmes utilise le convertisseur DC/AC triphasé (Onduleur).

Le but principal de ce sujet est donc, de présenter différentes topologies d'onduleur triphasé en étudiant leur principe de fonctionnement et les relations entre les paramètres d'entrée et de sortie et donc les nombre des panneaux PV nécessaire connectés en série et en parallèle. A cet effet, une étude comparative entre les différentes configurations d'onduleur est effectuée concerne un système PV. Pour ces derniers, on a étudié un système de pompage PV et un système PV connecté au réseau électrique.

On a comparé les différentes configurations de conversion PV afin de trouver la meilleure topologie de l'onduleur en termes d'efficacité, comportement efficacement aux variations atmosphériques à effet d'ombrage et l'adaptions selon de type de couplage de la charge. Les résultats obtenus sont très intéressants et peuvent conduire à dimensionnement et la sélection de la topologie optimale de l'onduleur pour une application PV donnée.

Mots clés : Système PV, Onduleur en pont, Onduleur en pont complet, Pompage PV, Système PV connecté au réseau électrique.

ملخص

في الوقت الراهن اصبح استخدام الطاقة الشمسية كخيار مهم جداً في الحياة. تعتبر الألواح الكهروضوئية إحدى العناصر الأساسية لكل نظام كهروضوئي. يمكن أن تكون مرتبطة على التسلسل لزيادة التوتر الناتج، و على التفرع لزيادة التيار الكهربائي. تسمى هذه المجموعة بالحقل الكهروضوئي. يمكن استخدام الطاقة المنتجة من الحقل الكهروضوئي لشحن البطاريات التي سيتم استعمالها في الوقت المناسب، كذلك يمكن استخدامها مباشرة دون بطاريات (مثلاً: لضخ الماء أين يخزن المياه في احواض بزل من تخزين الكهرباء في البطاريات)، أو عن طريق ربطها في الشبكة الكهربائية.

على الرغم من أن هناك عدة مجموعات متنوعة من الانظمة الكهروضوئية، يمكن ان نصفها إلى مجموعتين متميزتين. المجموعة الأولى عبارة عن نظام مستقل غير متصل بالشبكة الكهربائية، اذن فالنوع الآخر نظام كهروضوئي متصل مباشرة بالشبكة الكهربائية. تستخدم معظم هذه النظم الكهروضوئية محولات ثلاثية الاطوار (الموج DC/AC).

الغرض الرئيسي من هذا الموضوع لعرض طوبولوجيا مختلفة للموجات ثلاثية الاطوار بدراسة مبدأ عملة والعلاقة بين عناصر الدخول والخروج و في الوقت نفسه عدد اللوحات الكهروضوئية اللازمة المتصلة التي يجب ربطها على التسلسل او التفرع. ولهذا الغرض، قمنا بإجراء دراسة مقارنة بين مختلف الموجات من اجل نظام كهروضوئي. من أجل هذا الأخير، قمنا بدراسة نظام ضخ كهروضوئي ونظام كهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية.

قمنا بمقارنة انواع مختلفة للتحويل الكهروضوئي من أجل إيجاد النوع الأفضل للموج من ناحية الكفاءة والسلوك مع تغير درجة الحرارة و الاشعاع الشمسي في حالة الحقل الشمسي تحت تأثير الظل وكذا تكيفه وفقاً لنوع ربط الحمل. النتائج المحصل عليها مهمة جداً ويمكن أن يؤدي إلى تحجيم جيد لنظام كهروضوئي واختيار أمثل طوبولوجيا للموج من اجل تطبيق كهروضوئي محدد.

الكلمات الرئيسية: نظام كهروضوئي PV، الموج من نوع جسر، المموج من نوع جسر كامل، نظام ضخ كهروضوئي، نظام متصل بالشبكة الكهربائية.

Abstract:

Currently, the use of solar energy has emerged recently as very important choice in life. The photovoltaic (PV) modules are the basic elements of all PV system. They can be connected in series and in parallel to increase their power usage. This set is called the field of PV modules. The energy provided by the field PV can be used to charge batteries that will provide electricity at the suitable time. It can also be used by directly linking modules to load without batteries (e.g.: for a solar pump when the water is used for storage), or as an injection of PV electricity to the electrical grid.

Although there are a variety of photovoltaic systems, however we can classify them into two distinct groups. The first group is a stand-alone system not connected to a power grid. The other type is a PV system directly connected to the electric network. Most of these systems use the three-phase converter DC/AC (Inverter).

The main purpose of this topic is, to present different topologies of three-phase inverter by studying their principle of operation and the relationship between the parameters of input and output and so the number of necessary PV panels connected in series and in parallel. For this purpose, a comparative study between different inverter configurations is performed for a PV system. For the latter, we studied a PV pumping system and a grid connected PV System. We have compared the different configurations of PV conversion in order to find the best inverter topology in terms of efficiency, behavior effectively atmospheric variations in shading effect and adapt it according to type the attachment of load. The results are very interesting and can lead to best sizing and selection of the optimal PV topology of the inverter for a given application.

Key words: System PV, Bridge inverter, full bridge inverter, PV pumping system, Grid connected PV System.

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Abstract	IV
Résumé	V
Table des matières	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures.....	IX
Introduction générale	1
Chapitre I: Système Photovoltaïque	
I-1. Introduction.....	3
I-2. Rayonnements solaires.....	4
I-2-1. Facteur de trouble de Link	5
I-2-2. Albédo	6
I-2-3. Rayonnements direct et diffus	6
I-3. L'énergie solaire photovoltaïque.....	7
I-3-1. Introduction.....	7
I-3-2. L'effet photovoltaïque.....	7
i) Module PV	8
ii) String PV.....	10
iii) Champ PV.....	10
I-4. Spectres de référence et caractéristiques d'un module PV	11
I-5. Effet d'ombrage.....	13
I-6. Les systèmes PV	15
I-8. Conclusion.....	15
Chapitre II : Vision sur les onduleurs de tension et leurs différentes topologies	
II-1. Introduction.....	16
II-2. Convertisseur statique et principaux composants électroniques de puissance	16
II-3. Notion sur l'onduleur.....	18
II-3-1. Classification des onduleurs	18
II-3-2. Onduleurs non autonome.....	19
II-3-3. Onduleur de résonance	22
II-3-4. Onduleur autonome.....	22
II-4. Différents types de commande d'un onduleur de tension.....	24
II-4-1. Introduction.....	34
II-4-2.1. MLI triangulo-sinusoidale.....	39
II-4-2.2. MLI vectorielle (SVM)	45

II-5. Conclusion.....46

Chapitre III : Simulation de la technique MLI appliquée aux onduleurs de tension

III-1. Introduction.....47
 III-2. Simulation.....47
 III-2-1. Onduleur à deux niveaux.....48
 III-2-2. Onduleur à trois niveaux.....52
 III-2-3. Etude comparative.....54
 III-2-4. Interpretations et commentaires.....54
 III-3. Conclusion.....56

Chapitre IV : Application aux Système Photovoltaïque

IV-1. Introduction.....57
 IV-2. Description générale de la centrale photovoltaïque connectée au réseau.....57
 IV-2.1. Principe.....57
 IV-2.2. Commande des onduleurs connectés au réseau.....57
 IV-2.3. Exemple sur terrain.....61
 IV-3. Description générale d'un système de pompage photovoltaïque.....63
 IV-3.1. Principe.....63
 IV-3.2. Principe de fonctionnement d'un système de pompage PV.....64
 IV-2.3. Exemple sur terrain.....66
 IV-4. Différents types d'onduleurs de systèmes PV.....69
 • Onduleurs centralisés.....69
 • Onduleur "Phase".....69
 IV-5. Dimensionnement des systèmes PV et synthèse sur quel structure de l'onduleur utilisé ?..70
 IV-6. Choix de la structure de l'onduleur.....71
 IV-7. Conclusion.....71
 Conclusion générale.....73
 Bibliographie.....75
 Annexe.....77

Listes de tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Valeurs du facteur de trouble calculé de l'Atlas solaire Algérien (Capderou) pour le site d'Adrar	08
I.2	Valeur de la constante solaire en fonction de l'épaisseur m d'atmosphère traversée	12
I.3	Quelques types des panneaux PV disponibles et utilisés dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien URER/MS	13
II.1	Synthèse comparatif entre les composants électroniques de puissance commandables	
III.1	Valeurs de tension à l'entrée de l'onduleur pour une tension de sortie V_{effn}	58
III.2	Valeurs moyenne du courant d'entrée : pour l'onduleur en pont complet, la valeur désigne le courant d'entrée de chaque cellule	58
IV.1	Avantages et inconvénients de chaque structure de l'onduleur	75
IV.2	Valeurs de tension à l'entrée de l'onduleur pour une tension de sortie V_{effn}	77

Liste des figures

N°	Titre	Page
I.1	Différentes formes des énergies renouvelables	05
I.2	Composantes du rayonnement solaire Global = direct + diffus + albédo	08
I.3	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	09
I.4	Différents types des panneaux PV	11
I.5	Cellules, Module, Panneau et Champ photovoltaïques	11
I.6	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V	14
I.7	Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V	14
I.8	Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protections	15
II.1	Symbole électrique et caractéristique I-V des composants électroniques de puissance	19
II.2	Synoptique d'une conversion continue-alternative	21
II.3	Classification des onduleurs	21
II.4	Pont redresseur complet à thyristors en conduction discontinue	22
II.5	Pont redresseur à thyristors. Conduction continue sur charge inductive	23
II.6	Topologies de base d'un redresseur de tension à MLI	24
II.7	Tension et courant de sortie du redresseur	20
II.8	Représentation schématique d'un onduleur de tension	24
II.9	Représentation de l'onduleur monophasé en pont	24
II.10	Deux allures de la tension simple de sortie d'une structure monophasée à pont complet et diagramme de conduction correspondants	26
II.11	Onduleur en demi-pont	27
II.12	Onduleur en demi-pont avec diviseur capacitif	27
II.13	Convertisseur à trois niveaux utilisant des interrupteurs électroniques et des diodes	29
II.14	Montage de l'onduleur triphasé à trois niveaux utilisant trois structures monophasées à pont complet	29
II.15	Montage de l'onduleur triphasé à deux ou à trois niveaux utilisant trois structures monophasées à pont complet	30
II.16	Montage de l'onduleur triphasé en pont à deux niveaux avec un point milieu	31
II.17	Montage de l'onduleur triphasé en pont à deux niveaux sans point milieu	31
II.18	Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont complet pilotés en pleine-onde	34
II.19	Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont pilotés en pleine-onde (180°)	35
II.20	Commande et chronogrammes des grandeurs de l'onduleur triphasés plein onde 120°	36
II.21	Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont pilotés en pleine-onde (120°)	36
II.22	Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont complet pilotés en pleine-onde (Insertion d'une capacité)	37
II.23	Principe de la technique MLI triangulo-sinusoïdale du signal à deux niveaux	39
II.24	Porteuse dent de scie	39
II.25	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse bipolaire pour $m=25$ et $r=0.9$	40

II.26	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse bipolaire - Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m	41
II.27	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse dent de scie - Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m	42
II.28	Différents types de porteuses	43
II.29	Représentation de \vec{v}_1	44
II.30	Représentation du polygone de commutation .	45
III.1	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse bipolaire - Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r	49
III.2	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse dent de scie - Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r	50
III.3	Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie SVM - Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r et du taux de modulation m	51
III.4	Résultat de simulation de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse unipolaire - Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m	52
III.5	Résultat de simulation de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse bipolaire - Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m	53
III.6	Profils de THD et l'amplitude du V_{an} produits par les deux techniques de MLI	56
IV.01	Symbole Schéma d'une Centrale Photovoltaïque Connectées au Réseau	64
IV.02	Schéma bloc d'un convertisseur MPPT	64
IV.03	Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage	65
IV.04	Synoptique d'un onduleur connecté au réseau commandé par une PWM	66
IV.05	Centrale installée au niveau de l'URER/MS	67
IV.06	Mini-Centrale installée au niveau de l'URER/MS	68
IV.07	Mini-Centrale installée au niveau du CDER	68
IV.08	Station de pompage PV	69
IV.09	Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil	70
IV.10	Architecture du contrôleur numérique pour le système de pompage PV expérimenté	70
IV.11	Organigramme de fonctionnement du système de pompage PV expérimenté	71
IV.12	Photo du système de pompage PV à évaluer	72
IV.13	Résultats expérimentaux du système de pompage PV installé pour une journée clair	73
IV.14	Système de pompage PV installé à Titaf (Commune de Temest)	74
IV.15	Différents types d'onduleurs couplés au réseau	75

Introduction Générale

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies fossiles d'un côté et la limitation de ces ressources de l'autre côté a conduit à l'apparition d'autres formes d'énergie telle que l'énergie photovoltaïque comme une solution prometteuse parmi les autres. L'absence de la pollution et plus au moins la disponibilité de l'irradiation solaire au cours de l'année dans les quatre coins du globe terrestre encourage son développement [1].

Les énergies renouvelables sont en grande partie liées au soleil. Avec un potentiel énergétique immense, il deviendra lui-même la première source directe d'énergie renouvelable. En trois jours, il fournit à la terre autant d'énergie que celle contenue dans toutes les réserves de combustibles fossiles souterraines connues. Depuis des millions d'années, la terre absorbe son énergie inépuisable et il devrait jouer un rôle majeur dans l'avenir énergétique de notre planète [1].

Les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, requièrent peu d'entretien, sont silencieux et ne produisent aucune émission de polluants. Ce sont des systèmes modulaires : les éléments de base (modules de cellules solaires) sont vendus dans un vaste éventail de capacités d'alimentation électrique qui vont d'une fraction de watt (par exemple les montres et les calculettes à pile solaire) à plus de 300Watts. L'interconnexion des modules permet d'obtenir la puissance qu'exige l'application. Certaines centrales photovoltaïques (PV) de démonstration produisent une puissance allant jusqu'à plusieurs mégawatts, bien que la plupart des systèmes PV installés soient de dimension beaucoup plus modeste [2].

Les cellules solaires génèrent un courant continu. Pour la conversion et/ou l'adaptation de l'énergie électrique, on utilise, le plus souvent, l'onduleur. Ce dernier, délivre, en général, une tension alternative formée de créneaux rectangulaires. Afin de pouvoir obtenir une tension sinusoïdale, il est indispensable de filtrer ces créneaux contenant une importante quantité d'harmoniques. Toutefois, l'utilisation d'un filtre *LC* est coûteuse et ne permet, le plus souvent, d'obtenir que des résultats médiocres.

Des recherches ont été entreprises pour l'amélioration de la distorsion harmonique de l'onde de sortie des onduleurs de tension. Elles ont permis une évolution importante de la conception de ces onduleurs, en particulier dans leur commande, avec l'apparition des techniques de commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Cette technique permet de contrôler la valeur du fondamental de la tension par action sur la commande et consiste à moduler les durées de l'impulsion de commande des interrupteurs statiques. Ceci a pour effet d'éloigner le rang des harmoniques de tension vers les hautes fréquences.

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en deux groupes distincts. Le premier groupe est un système autonome, non relié à un réseau électrique. L'autre type est un système PV relié directement au réseau électrique. La plupart de ces systèmes utilise le convertisseur DC/AC triphasé (Onduleur).

Pour une installation PV, le choix de l'onduleur à installer suivant un cahier de charge est très facile. Le but principal de ce sujet est donc, de présenter différentes topologies d'onduleur triphasé en étudiant leur principe de fonctionnement et les relations entre les paramètres d'entrée et de sortie et donc les nombre des panneaux PV nécessaire connectés en série et en parallèle. A cet effet, une étude comparative entre les différentes configurations d'onduleur sera effectuée concerne un système PV.

Dans la suite dimensionnement l'onduleur destiné aux applications PV, il faut également tenir compte de la plage de tension d'entrée maximum de l'onduleur pour un choix judicieux des composants électronique de puissance.

Organisation générale du mémoire

Ce mémoire est organisé autour quatre chapitres qu'on décrit comme suit :

Dans le premier chapitre on a fait une description détaillée des systèmes photovoltaïques. Il s'agit d'abord de relater l'effet photovoltaïque et plus précisément le phénomène physique exploité pour générer une énergie électrique tout en passant par la fabrication des cellules et module photovoltaïques, et les composants principaux qui le constituent.

Dans le deuxième chapitre, on a fait une description détaillée des différentes topologies des onduleurs. Pour ces derniers, on va étudier l'onduleur triphasé en pont et en pont complet en expliquant leur principe de fonctionnement et les relations entre les paramètres d'entrée et de sortie. Ensuite, nous effectuons une synthèse des différentes modulations MLI appliquées aux onduleurs. Nous donnerons pour chaque stratégie de commande, la tension de sortie d'un bras de l'onduleur, son spectre d'harmonique.

Le chapitre suivant s'intéresse à la simulation d'onduleurs à deux et à trois niveaux commandés par la technique MLI triangulo-sinusoïdale et SVM. Nous étudierons les courants et les tensions de sortie, puis nous analyserons leurs spectres harmoniques et fait une comparaison entre les deux techniques.

En dernière partie, nous proposons d'analyser des deux grandes architectures de systèmes PV : pompage PV au fil de soleil et système PV connecté au réseau électrique, utilise le couplage AC (Onduleurs) en s'intéressant plus particulièrement sur les avantages et inconvénients de chaque structure de l'onduleur et les nombre des panneaux PV nécessaire connectés en série et en parallèle. A cet effet, une étude comparative entre les différentes configurations d'onduleur sera effectuée concerne un système PV a pour objectif de déduire la structure qui nous permet d'avoir de meilleures performances. On termine bien sûr par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Système Photovoltaïque

Systeme Photovoltaïque

I-1. Introduction

Au cours des dernières années, le monde a connu une croissance importante de la demande en énergie dans tous les domaines de la vie, en particulier l'électricité qui provient malheureusement en grande partie des sources d'énergie fossiles, et les problèmes climatiques dus aux gaz à effet de serre.

La solution repose sur le recours aux énergies renouvelables. L'énergie solaire a été utilisée depuis long temps pour produire de la chaleur, l'eau chaude sanitaire ...etc. Bien que l'expérience accumulée soit considérable, ce domaine a connu, avec le développement technologique actuel, un renouvellement important sur la planètes théorique et expérimentale [1]. Dans cette optique, plusieurs pays ont engagé des investissements immenses et semblent de ce fait sur la bonne voie pour réussir le challenge d'allier production et consommation d'énergie d'un cote et le maintien de l'équilibre environnemental de la planète de l'autre [2].

Le soleil reste dans ce cas, que ce soit de manière directe ou indirecte, la source d'énergie la plus prometteuse. Le soleil est à l'origine des ressources énergétiques fossiles, accumulées au cours des ères géologiques, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, et des ressources naturelles renouvelables, comme le rayonnement solaire et l'énergie éolienne ou hydraulique et d'autres énergies (figure I.1). C'est l'étoile la plus proche de la terre, dont elle est distante d'environ 150 Millions de kilomètres [2].

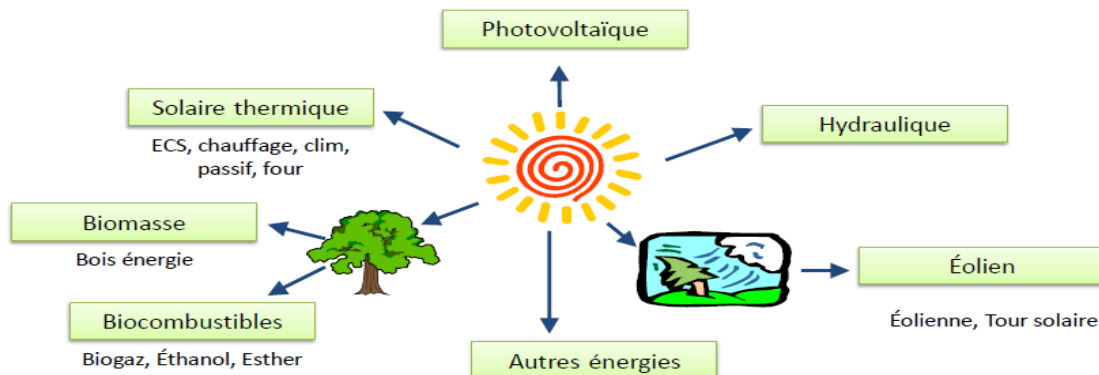


Figure I.1 : Différentes formes des énergies renouvelables

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique liée au rayonnement émis par le soleil. Par l'utilisation de cellules solaires, en produisant de l'électricité sans effet de serre, le solaire photovoltaïque (PV) est de loin le meilleur moyen de satisfaire nos besoins en énergie tout en protégeant notre environnement. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains [1].

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu sur la cellule solaire à semi-conducteur encore appelée photopile, mais seulement à travers ses caractéristiques électriques en fonction de l'éclairement et de la température, aussi on a fait une description sur les différentes configurations de système photovoltaïque.

I-2. Rayonnements solaires

L'ensoleillement (E) correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre-carré (W/m^2) [3]. La valeur du flux de rayonnement solaire E_0 reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne I_0 est appelée la constante solaire, elle vaut $I_0 = 1367 W/m^2$, à plus ou moins 3%, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci [4]. En première approximation, on peut calculer la valeur de G_0 en fonction du numéro du jour de l'année j par [5] :

$$G_0 = I_0(1 + 0.03344 \cos(j' - 0.048869)) \quad (I-01)$$

Où $j' = \frac{2\pi j}{365.25}$, j le numéro du jour dans l'année écoulés depuis 1^{er} Janvier et les angles sont exprimés en radian.

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie (renvoyée dans l'espace, 35 à 40% sont réfléchis et diffusée par les gaz et aérosols atmosphériques et une absorption lors de sa traversée de l'atmosphère). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison, d'une manière que l'ensoleillement varie de zéro, au lever ou au coucher du soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [4], de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1.2 kW/m^2$ ($1200 W/m^2$).

Le rayonnement global au sol dépend de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée, on introduit un coefficient (AM) appelé masse atmosphérique ou nombre d'air masse (la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique). Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7.8km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne (OM) d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale sera donnée par la formule [6] :

$$OM = \frac{OA}{\sin(h)} \quad (I-02)$$

A une pression p différente de 1013mbar et à une altitude $z[km]$, on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre :

$$m = \frac{p_m}{1013} \cdot \frac{1}{\sin(HS)} \cdot \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad \text{ou} \quad m = \frac{p_m}{1013} \cdot \frac{(0.88)^z}{\sin(HS)} \quad (I-03)$$

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale ;

AM1 : pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith) ;

AM1.5 : pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [7].

I-2-1. Facteur de trouble de Link [8]

C'est un coefficient qui détermine l'état du ciel par la présence ou non de nuage, de leur dispersion et d'autres facteurs météorologiques. La plupart des auteurs travaillant dans ce domaine, utilisent le facteur de trouble de Linke. Il est donné par la relation suivante :

$$T_{LK} = T^* + \Delta T \quad (\text{I-04})$$

T^* : représente le facteur de trouble par ciel clair ;

ΔT : représente le facteur additionnel dû à la présence de nuages.

Le facteur de trouble par ciel clair, T^* se décompose en :

$$T^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{I-05})$$

T_0 : correspond à l'absorption par la vapeur d'eau.

T_1 : correspond à la diffusion moléculaire, à l'origine de la couleur bleu foncé du ciel pur.

T_2 : correspond à la diffusion (et à une légère absorption) par les aérosols rendant le bleu du ciel plus ou moins blanchâtre.

Pour mettre en évidence la variation saisonnière, et le lieu géographique du site, une méthode est proposée par *M. Capderou* et qui est utilisée dans son ouvrage [8]. Les formules suivantes sont valables pour des altitudes inférieures à 3.5km. Dans toutes ces formules, l'altitude z est exprimée en km. Ces relations sont établies pour une masse atmosphérique relative unité ($m=1$). La relation entre le facteur de trouble T_{LK} et m est très complexe, et pour les fortes valeurs de m , T_{LK} ne varie que ± 0.2 environ. On fait porter la variation d'altitude z , on considèrera donc les formules de variation $T_{LK}(z)$, comme indépendantes de m .

Les composantes du facteur de trouble sont données par les relations suivantes :

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \sin(\varphi)) + 0.1 \cdot (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.45 \cdot z - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(HS)) \quad (\text{I-06})$$

$$T_1 = (0.89)^z \quad (\text{I-07})$$

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he}) \cdot (0.63)^z \quad (\text{I-08})$$

A_{he} est la fonction sinusoïdale d'alternance hiver/été, donnée par :

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360 \cdot (J - 121)}{365}\right) \quad (\text{I-09})$$

z : est l'altitude géographique du lieu [km].

J : le numéro du jour de l'année.

Pour les besoins de nos calculs, nous avons estimé le facteur de trouble moyen de chaque mois en utilisant le modèle de *Capderou* (pour la région d'Adrar). Ils sont donnés dans le tableau I.1.

I-2-2. Albédo [6]

Nom masculin originaire du bas latin "albédo", noté ρ , blancheur ; c'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

Tableau I.1 : Valeurs du facteur de trouble calculé de l'Atlas solaire Algérien (*Capderou*) pour le site d'Adrar

Mois	T ₀	T ₁	T ₂	T*
Janvier	0.2326	0.9697	0.4426	1.6449
Février	0.4295	0.9697	0.4895	1.8887
Mars	0.6910	0.9697	0.6113	2.2721
Avril	0.9884	0.9697	0.7906	2.7487
Mai	1.2122	0.9697	0.9662	3.1480
Juin	1.3048	0.9697	1.1007	3.3752
Juillet	1.2242	0.9697	1.1506	3.3445
Août	0.9802	0.9697	1.1053	3.0552
Septembre	0.6555	0.9697	0.9741	2.5993
Octobre	0.3742	0.9697	0.7997	2.1436
Novembre	0.1963	0.9697	0.6192	1.7852
Décembre	0.1536	0.9697	0.4910	1.6143

I-2-3. Rayonnements direct et diffus [7, 9]

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes (figure I.2) :

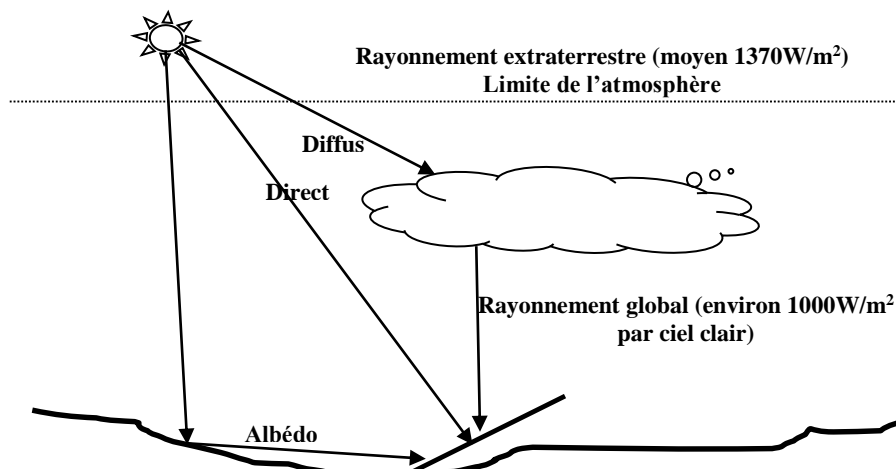


Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire
Global = direct + diffus + albédo

- Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux ;
- Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.
- L'albédo est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

I-3. L'énergie solaire photovoltaïque

I-3-1. Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert par *Antoine Becquerel* au début du XIX^{ème} siècle. *Albert Einstein* en a expliqué les mécanismes au début du XX^{ème} siècle. Il a fallu attendre les années 1950 pour que la première cellule photovoltaïque soit mise au point. Les premières applications du photovoltaïque ont été destinées à la conquête spatiale. Les applications domestiques ont rencontré un développement difficile au cours du XX^{ème} siècle dans un marché dominé par l'exploitation des ressources fossiles : charbon, pétrole, gaz naturel, atome,... ceci malgré un développement des technologies depuis 1950, et une utilisation incontournable dans les lieux inaccessibles au réseau électrique classique à partir des années 1970. Pour cette raison, et dans le but d'un développement rapide de l'énergie solaire, il est nécessaire de réaliser des installations permettant de raccorder des sources photovoltaïques aux réseaux de distribution [10].

I-3-2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [11]. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement [12].

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou [13].

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure I.3). L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [14].

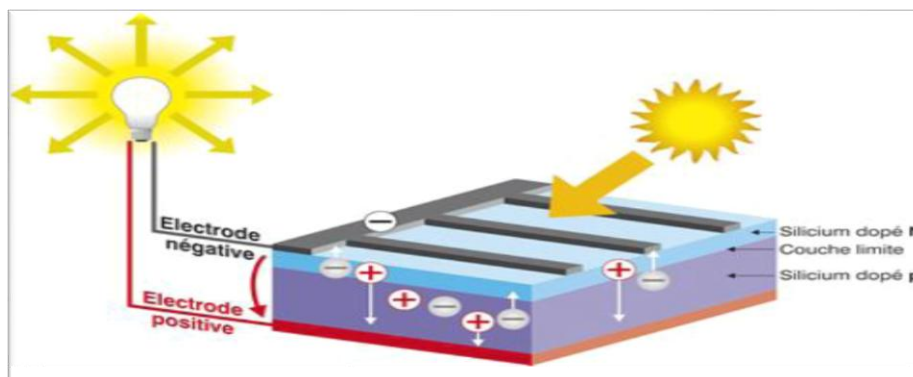


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La tension générée par une cellule photovoltaïque est limitée à la valeur du gap du matériau dont elle est issue. Elle est de l'ordre de 0.6 V pour les cellules de type cristallin et amorphe. Pour le courant, il est en fonction de la surface de la cellule et pour une même surface, il dépend du rendement de la cellule [15].

i) Module PV

La tension et le courant, donc la puissance, d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes, il est donc nécessaire de les associer. De plus, les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur, elles sont donc munies d'une protection mécanique (l'encapsulation). Les chaînes de cellules sont encapsulées dans un plastique E.V.A. (Ethylène Vinyle Acétate) pour les protéger des agressions extérieures (rayons U.V., humidité) et les isoler électriquement. L'ensemble est protégé sur la surface avant par un verre trempé à haute transmission et ayant une bonne résistance mécanique, et sur la face arrière par une feuille de Tedlar ou de polyéthylène. Les différents composants sont soudés à haute température en un laminé protégé de la majorité des agressions extérieures. Le module est placé dans un cadre métallique rigide qui va lui donner une grande rigidité mécanique. Ce cadre est généralement pourvu de moyens de fixation (trous oblongs, barre profilée...). Les modules PV dépourvus de cadre et encapsulés dans une résine sont appelés «laminates» [11, 12]. Pour toutes ces raisons, les cellules sont assemblées en modules photovoltaïques.

On les distingue généralement par la technologie de cellules dont ils sont composés :

- 1) Panneaux monocristallins.
- 2) Panneaux polycristallins.
- 3) Panneaux amorphe.

i.1) Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". Elles offrent meilleur rendement (entre 13 et 17%), mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface ($\eta=13\%$, sa durée de vie : 35ans).

i.2) Les cellules polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets ($\eta=19\%$, sa durée de vie : 20ans).

i.3) Les cellules amorphes

Les cellules amorphes sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites «solaires», car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Le problème c'est que son rendement est 2 à 3 fois plus faible que les cellules monocristallines ($\eta=5$ à 10% , sa durée de vie : 9ans).

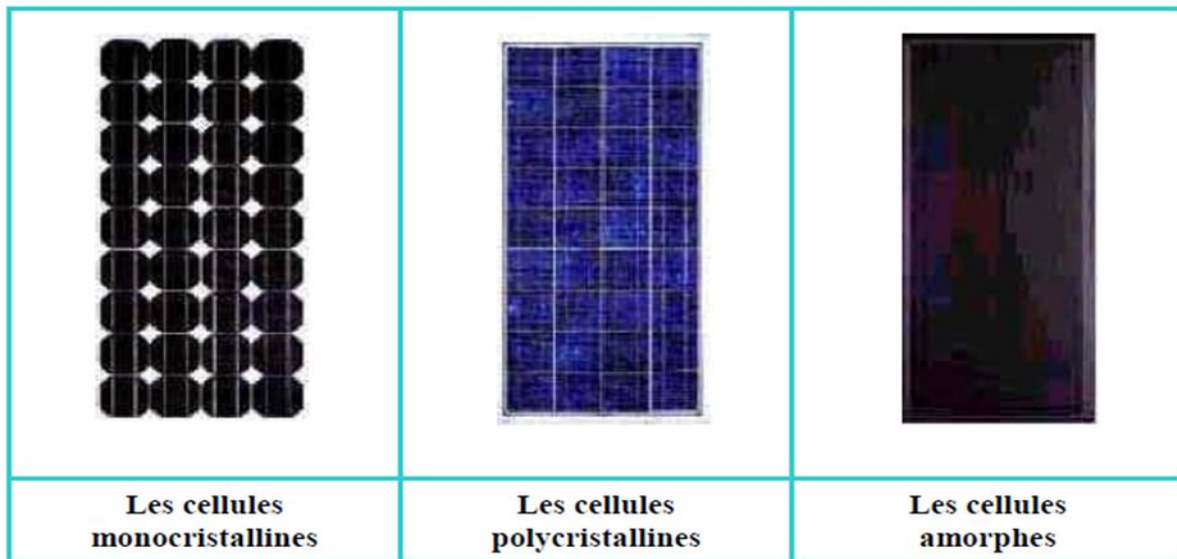


Figure I.4 : Différents types des panneaux PV

ii) String PV

Un string PV, appelé également chaîne PV, est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée.

iii) Champ PV

Les modules eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. Les panneaux sont en général reliés en série entre eux de façon à augmenter la tension du système, puis ces séries de panneaux sont reliée entre elles en parallèles de façon à augmenter le courant [12].



Figure I.5 : Cellules, Module, Panneau et Champ photovoltaïques

I-4. Spectres de référence et caractéristiques d'un module PV [6]

Le groupe de Physique du Solide du CNRS a établi des modèles d'irradiance spectrale pour n'importe quelles conditions. Le tableau I.2 indique les valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse.

Tableau I.2 : Valeur de la constante solaire en fonction de l'épaisseur m d'atmosphère traversée

m	0	1	1.5	2	3	4	5
$E(W/m^2)$	1 353	931	834	755	610	530	430

La constante solaire n'en est une que dans l'esprit de ceux qui ont élaboré les normes. En fait, les valeurs de l'éclairement énergétique global dépendent beaucoup des paramètres qui caractérisent l'atmosphère (coefficient de diffusion moléculaire, humidité, turbidité...).

Ainsi pour AM1.5, la constante solaire peut varier de $760W/m^2$ dans une atmosphère polluée à $876W/m^2$ pour un ciel très clair. Comme ces données sont très importantes pour déterminer avec assez de précision par exemple la puissance crête d'une installation photovoltaïque, il a très vite fallu établir des spectres de référence. Celui qui avait été utilisé pendant la conquête spatiale était bien sûr AM0. Pour s'adapter aux applications terrestres, pour se rapprocher davantage des conditions de répartition spectrale pour toute l'année, ils ont choisie celle qui correspond à AM1.5.

C'est une répartition de l'éclairement énergétique solaire, correspondant artificiellement à un éclairement de $1000W/m^2$ avec une traversée AM1.5 d'atmosphère, sur une surface plane inclinée de 37° par rapport à l'horizontale, l'albédo (facteur de réflexion au sol) étant de 0.2, et le facteur de trouble étant de $T_{LK} = 2.7$ à 5.

Chez la plupart des fabricants, tous les modules sont testés en usine à l'aide d'un simulateur à flash dont la durée de quelques ms permet d'obtenir un éclairement de $1000W/m^2$, spectre AM1.5 et température de $25^\circ C$ sans pour autant réchauffer le module. Ces valeurs sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) et elles sont utilisées par tous les fabricants pour définir leurs produits. Toutes les fiches techniques des modules photovoltaïques apportent essentiellement les informations suivantes : la puissance de sortie maximal expérimentale $P_{crête-expéri}$, la tension V_{coref} , le courant I_{ccref} , la tension et le courant au point de puissance maximum (V_{opref} , I_{opref}), le nombre de cellules n_{cs} , le rendement η , le facteur de forme FF et les coefficients de tension et de courant en température (α, β). La puissance crête (exprimée en W_c) annoncée par les fabricants n'est qu'un point de comparaison. Quelques fabricants fournissent les courbes I-V (courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci) pour différentes valeurs d'éclairement et de température. Ces derniers facilitent l'ajustement et la validation de l'équation mathématique I-V. La puissance utile maximale est en pratique un peu plus faible, et chute en cas de mauvaises conditions.

Le tableau suivant résume quelques types des panneaux photovoltaïques. Ces types sont disponibles et utilisés dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien URER/MS. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de $12Volts$ et multiple de $12Volts$, et les modules auront donc généralement 36 et 72 cellules. Les cellules sont généralement connectées en série dans les modules courants commercialisés. La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance. Le courant reste identique tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules en série. Donc, on peut dire que, les panneaux photovoltaïque à une puissance mois de $80W_c$ contient 36 cellules, c'est-à-dire délivre une tension optimale moyenne de $15V$, tandis que les panneaux photovoltaïque à une puissance plus de $150W_c$ contient 60 ou 72 cellules, c'est-à-dire délivre une tension optimale moyenne de $30V$.

Tableau I.3 : Quelques types des panneaux PV disponibles et utilisés dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien URER/MS

Module photovoltaïque Mono, Poly cristalline ou Amorphe	V_{opref} [V]	I_{opref} [A]	V_{coref} [V]	I_{ccref} [A]	P_{crête} [W]	n_{CS}
PHOTOWATT-500 Poly cristalline	16.5	2.79	21.2	3.05	46	36
UDTS-50 Monocristalline	17.5	2.9	21.6	3.18	50	36
QS solar Amorphe	62.3	0.96	80.3	1.22	60	/
isofotón-75 Monocristalline	17.3	4.34	21.6	4.67	75	36
ET-M53675 Monocristalline	17.4	4.31	21.73	4.72	75	36
Isofoton I-100/2 Monocristalline	34.8	2.87	43.2	3.27	100	72
ENIE Solar Monocristalline	18.9	5.4	22.9	5.7	100	36
SOLARWORLD Poly cristalline	18.3	8.27	22.5	8.81	150	36
ENIE Solar Monocristalline	18.6	8.4	23	8.9	155	36
SHARP SOLAR Monocristalline	35.4	4.95	44.4	4.95	175	60
ENIE Solar Monocristalline	31.6	8.2	39	8.7	245	60
S-ENERGY Monocristalline	38.7	9.13	31.6	7.92	250	60
BJP-250SA Monocristalline	30.75	8.131	36.99	8.768	250	60
ET Towards Excellence Monocristalline	30.34	8.24	8.76	37.47	250	60
ENIE Solar Monocristalline	31.5	8.3	38.7	9	255	60
ENIE Solar Monocristalline	33.7	8.4	46.3	8.9	310	72

Par exemple et pour un module de type *Isofotón-75*. Ses caractéristiques I-V pour une large plage de variation de la puissance de l'éclairement reçue par le panneau photovoltaïque (entre 150 à 850W/m²) et de la température (de 20°C à 55°C). Les résultats de simulation du modèle à une diode sont représentés sur les figures I.6 à I.7.

D'après les caractéristiques I-V obtenues, nous pouvons dire que le module photovoltaïque ne peut donc être assimilé à aucun générateur classique. On peut, en effet, le considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de sa caractéristique.

L'augmentation de l'éclairement induit une forte augmentation du courant de sortie. La tension augmente mais avec une variation plus faible. L'augmentation de la température induit une diminution non négligeable de la tension V_{co} et la puissance maximale P_{max}. Le courant de sortie augmente mais avec une variation plus faible.

La puissance de sortie d'un panneau solaire ne dépend pas uniquement de la température et de l'insolation, mais aussi de la tension V de fonctionnement. Le point de la puissance maximale est le point désiré pour le fonctionnement d'une rangée photovoltaïque pour obtenir un rendement maximal en puissance. Les valeurs correspondantes pour la tension et le courant s'appellent respectivement V_{op} et I_{op}.

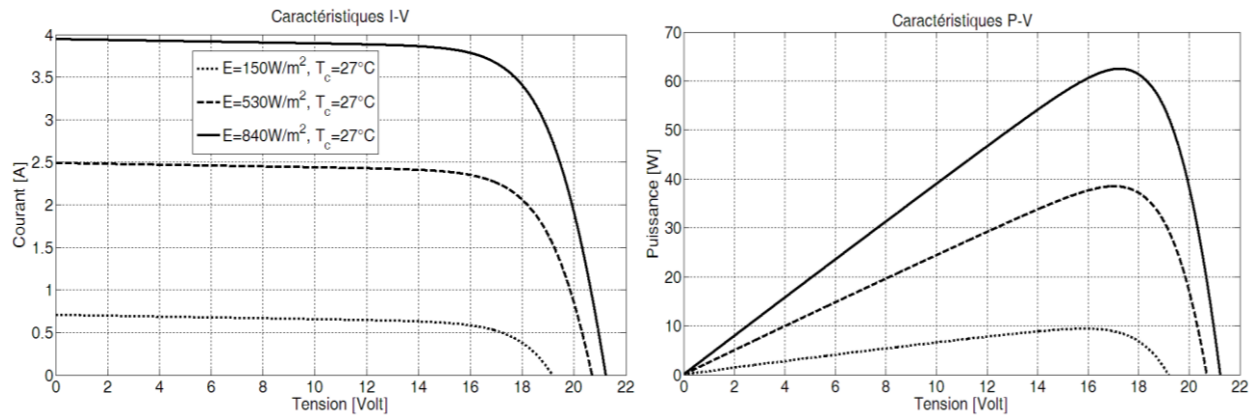


Figure I.6 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

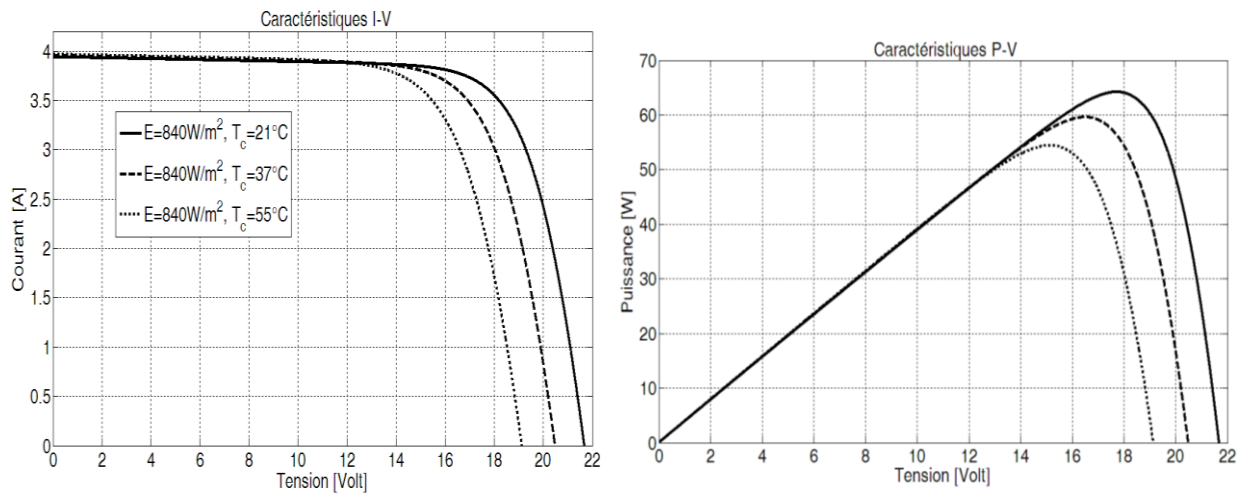


Figure I.7 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

I-5. Effet d'ombrage

Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage (déséquilibre d'un ensemble de cellules). Contrairement aux panneaux solaires thermiques qui peuvent tolérer un peu d'ombrage, les modules photovoltaïques ne peuvent être occultés, principalement à cause des connexions électriques (en série) entre les cellules et entre les modules.

On distingue 2 types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel. L'ombrage complet empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (par exemple, une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture).

L'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (par exemple, une cheminée, un arbre, un nuage). Souvent, les cellules d'un module photovoltaïque sont connectées en série. Ainsi, la cellule la plus faible va déterminer et limiter la puissance des autres cellules.

L'ombrage de la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule, dans ce cas de 50%. L'ombrage total d'une rangée de cellules peut réduire à zéro la puissance du module [12, 14].

Pour éviter les problèmes de "Hot Spot" ou encore point chaud et pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée, qui se traduit par une surchauffe due à l'occultation d'une ou plusieurs cellules (à l'ombrage ou à leur défaillance), ces dernières deviennent des consommatrices de puissance et non des génératrices ce qui cause des pertes d'énergie. Pour y remédier une diode en parallèle appelée diode by-pass est placée dans la boîte de connexion. Ces diodes éviteront que le courant passe à travers les cellules défaillantes lorsque leur tension tombe au-dessous de la tension de seuil de la diode. Une diode série pour les branches en parallèle, sera montée pour éviter le retour de courant des autres modules montés en parallèle lorsqu'un ou plusieurs modules se retrouvent à l'ombre ou sont défaillants [14].

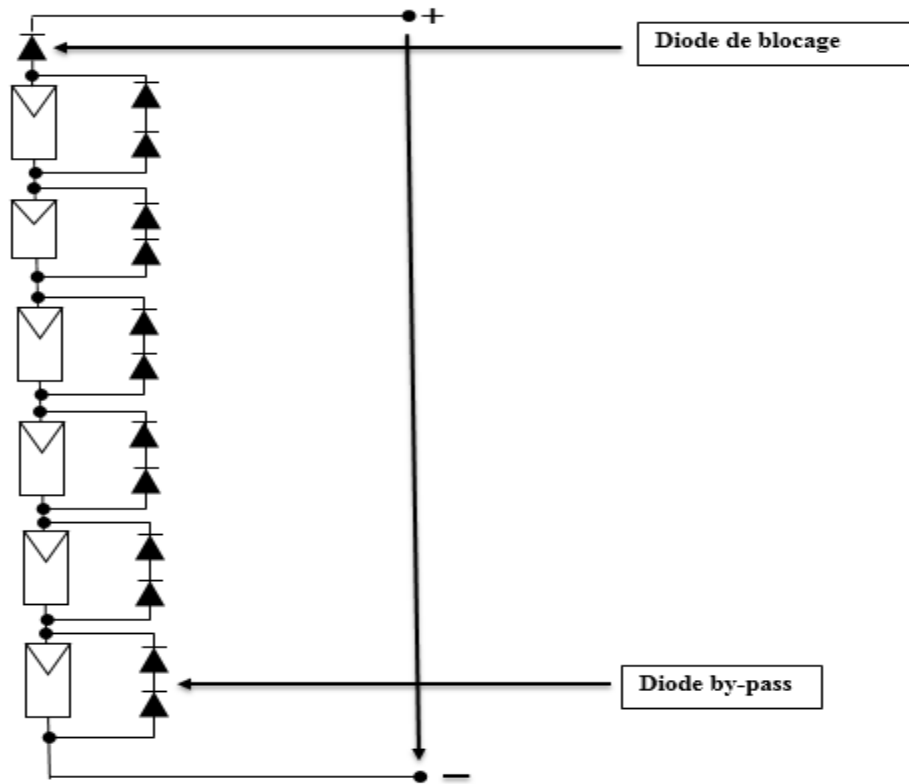


Figure I.8 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protections

I-6. Les systèmes PV [4]

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries (ex.: pour une pompe solaire où l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique. Il est également possible de combiner la sortie du champ PV avec d'autres sources d'énergie telles une génératrice ou une éolienne qui serviront d'appoint, si l'ensoleillement n'est pas suffisant.

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en quatre groupes distincts. Les deux premiers groupes sont des systèmes autonomes, non reliés à un réseau électrique. Les deux autres types sont des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique. Parmi eux :

➤ **Système autonome sans batterie (Système au fil de soleil)**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex.: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex.: pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage).

➤ **Système autonome avec batterie**

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

➤ **Système PV sur réseau décentralisé**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande).

➤ **Système PV centralisé**

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

Dans la suite de notre étude, nous allons analyser un système autonome sans batterie (ici pompage photovoltaïque au fil du soleil) qui est, le plus souvent, adoptée pour alimenter les régions isolées.

I-7. Dimensionnement d'un système PV [4]

Le dimensionnement a pour but de déterminer la puissance-crête du générateur PV, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'utilisateur d'utiliser les équipements requis durant la période demandée (c'est-à-dire tout au long de l'année ou pour une période déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée. Il faut, en premier lieu, estimer les besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement minimal de la région où le système sera installé.

Pour les systèmes PV sans batterie, le champ doit être dimensionné de façon à satisfaire à la charge pour les conditions d'ensoleillement les plus faibles. Le facteur d'utilisation nominal sera égal au nombre d'heures de soleil maximum durant le mois d'exploitation où l'ensoleillement est le plus faible.

Les étapes suivantes vous permettront de dimensionner approximativement notre système photovoltaïque. Vous devrez estimer vos besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement minimal de votre région.

1^{er} étape : Estimation des besoins d'électricité (Wh/j) ;

Les charges CA doivent tenir compte des pertes dues à l'onduleur. Ce rendement η_{ond} se situe entre 80% et 95% (0.80 et 0.95).

2^{ème} étape : Estimation de l'ensoleillement

Consulter la carte d'ensoleillement de votre région. Toujours choisir la période de l'année la moins ensoleillée afin d'obtenir la production d'électricité requise durant cette période. L'ensoleillement est habituellement exprimé en kWh/m²-j ou en heures de plein ensoleillement (heures × 1000W/m²).

3^{ème} Etape : Estimation du champ photovoltaïque requis ($P_{\text{él-crête}}$)

Il est estimé en introduisant les pertes dans le générateur photovoltaïque $p_{\text{gén}}[\%]$ (ou bien le $\eta_{\text{gén1}}$) qui dépend des pertes dues à la poussière, à l'échauffement des modules, au câblage, ...etc.

$$\text{Puissance du champ PV } P_{\text{él-crête}}[W] = \frac{\text{Charge journalière totale } E_{\text{elec}}(Wh-j)}{\eta_{\text{gén1}} \cdot \eta_{\text{ond}} \cdot \text{Ensoleillement(heure)}} \quad (\text{I.10})$$

I-8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur le principe de la conversion de l'énergie photovoltaïque du photon lumineux à l'électricité et aussi sur la jonction PN, le module PV. Ensuite, nous avons présenté les différents types de la technologie des cellules et le système photovoltaïque.

L'énergie PV produite sous forme continue. Généralement, les modules PV sont connectés à un convertisseur DC/DC et à des batteries. Mais, pour les systèmes connectés au réseau ou un système de pompage PV, la plupart des récepteurs sont à courants alternatifs triphasés. L'appareil de conditionnement de la puissance (onduleur) est l'élément clé, le plus délicat de l'installation, situé à l'interface entre le champ PV et la motopompe.

Pour rejeter ou atténuer les harmoniques introduites par la forme d'onde de la tension de sortie et pour une bonne qualité d'énergie électrique fournie, il est nécessaire de prévoir d'autres méthodes pour résoudre le problème de l'apparition des harmoniques. Parmi elles, l'utilisation d'une technique MLI plus performante. Le prochain chapitre est consacré aux des différentes topologies de convertisseur DC/AC et leurs techniques de commande.

CHAPITRE II

*Vision sur les onduleurs de tension et leurs
différentes topologies*

Vision sur les onduleurs de tension et leurs différentes topologies

II-1. Introduction

Aujourd'hui, il y a une utilisation de plus en plus grande de l'électricité sous forme alternative triphasée. Aussi dans le domaine d'entraînement des moteurs électriques, les moteurs à courant alternatif sont en revanche l'avantage d'être plus robustes et meilleur marché que les moteurs à courant continu de point de vue de la gamme de puissance.

Pour les applications PV, l'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique (Courant DC) pour l'adapter aux différents besoins (Courant AC) à travers des convertisseurs statiques, dite l'onduleur. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques. Par ailleurs, et afin d'améliorer beaucoup plus la qualité du signal de sortie, il convient de s'intéresser aux techniques de modulation MLI à appliquer aux onduleurs.

Pour un fonctionnement optimal de l'utilisateur alimenté par cet onduleur, les performances requises de ces convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées : tant de point de vue de la puissance délivrée que de la qualité de la tension générée. Pour concevoir un convertisseur DC/AC délivrant en sortie des tensions triphasées d'une tension dépendent de la charge, le choix de la tension d'alimentation continue s'impose comme étant le premier à définir.

II-2. Convertisseur statique et principaux composants électroniques de puissance [18]

Un convertisseur est un équipement permettant de transférer de l'énergie d'une source vers un récepteur. Ils nécessitent l'utilisation d'interrupteur à semi-conducteur, non commandé comme les diodes ou non comme les thyristors et transistor Les composants semi-conducteurs fonctionnent en général entre deux états, la manière d'un interrupteur : bloqué ou conducteur.

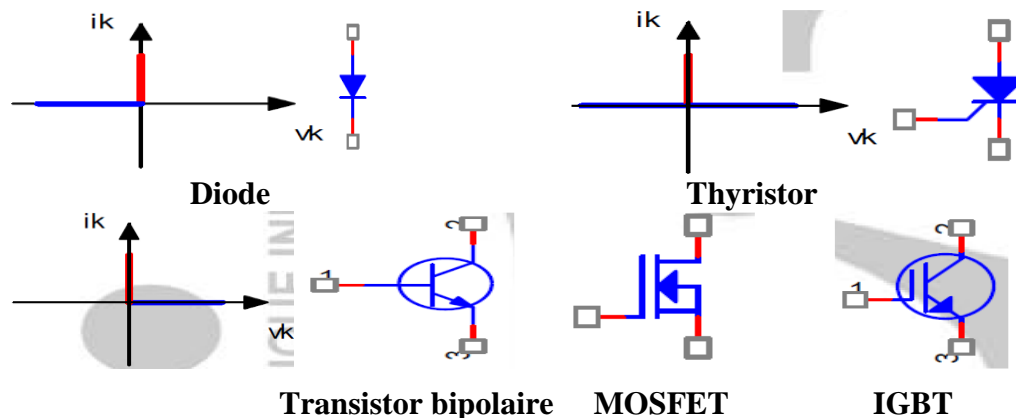


Figure II.1 : Symbole électrique et caractéristique I-V des composants électroniques de puissance

• **Diode** : est une valve électronique possédant deux bornes appelées anode (A) et cathode (K), elle agit effectivement comme un interrupteur. Etat fermé ou ouvert contrôlés par le circuit de puissance. Lorsque la diode est polarisée en direct, elle commence à conduire à partir d'une faible tension directe de l'ordre de 1V. Lorsque la diode est polarisée en inverse, seul un faible courant de fuite négligeable (quelques μA) circule jusqu'à atteindre la tension d'avalanche.

• **Thyristor** : Il possède une anode et une cathode, en plus une troisième électrode appelée gâchette, la gâchette permet de retarder l'amorce de la conduction, il permet de ne laisser passer le courant électrique que dans un sens donné et ce uniquement lorsque son électrode de «commande» est correctement polarisée. Fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.

Il existe des thyristors particuliers, commandables à l'amorçage et au blocage. On les appelle GTO ("gate turn off"). Le GTO peut être commandé de l'état off à l'état on par une impulsion de courant brève appliquée sur la gâchette. Le GTO peut en plus être commandé de l'état on à l'état off par application d'une tension gâchette-cathode négative, créant un fort courant négatif de gâchette. Ce fort courant négatif de gâchette doit seulement être maintenu pendant quelques microsecondes (durant le temps de commutation on-off), mais il doit avoir une amplitude importante, typiquement un tiers du courant d'anode devant être annulé.

• **Transistor** : est un dispositif semi-conducteur à trois électrodes actives qui permet de contrôler un courant ou une tension sur une des électrodes de sortie. Ouverts et fermés par un signal de commande.

On destinaux trois type de transistors :

Transistor bipolaire : est la représentation historique des composants commandés en ouverture et fermeture. C'est un composant a trois électrodes dont électrode appelé «base» B sert à la commande du courant circulant entre les deux autre savoir le «collecteur» C et «émetteur» E. Le transistor est à l'état on (état saturé) lorsque le courant de base B est suffisamment fort.

Transistor MOS : le transistor dit MOS ou (MOSFET pour Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor) a effet de champ. Ce type de composant a été développé pour permettre le contrôle du courant principal qui le traverse. C'est un composant commandé en tension.

IGBT : L'IGBT (Insulated Gate Bipolaire Transistor) est un transistor bipolaire à porte isolée. Il associe le MOS et le Bipolaire. Il cumule les avantages des transistors bipolaires (tensions et courants élevés) et ceux des transistors MOSFET (rapidité des commutations, énergie de commande faible) sans en éliminer totalement les inconvénients. L'IGBT présente l'inconvénient d'un blocage moins rapide que le MOSFET, ce qui limite sa fréquence de commutation à quelques dizaines de kHz.

Tableau II.1 : Synthèse comparatif entre les composants électroniques de puissance commandables

Composant	Puissance d'utilisation	Rapidité de commutation
Thyristor GTO	Forte	Lente
Transistor bipolaire	Moyenne	Moyenne
Transistor MOS	Faible	Rapide
Transistor IGBT	Moyenne	Moyenne

II-3. Notion sur l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif et permet d'obtenir à la sortie une tension et un courant alternatifs de valeur moyenne nulle. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions réseaux à partir de batteries ou de tensions redressées (Les onduleurs à fréquence fixe), ou encore de piloter, par variation de fréquence, sont utilisés particulièrement comme variateur de vitesse pour les moteurs à courant alternatif et particulièrement les moteurs asynchrones et dans la conversion des systèmes d'énergie renouvelable (PV, turbine éolienne).

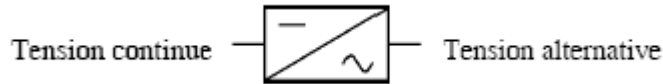


Figure II.2 : Synoptique d'une conversion continue-alternative

II-3-1. Classification des onduleurs [19]

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) .

Les onduleurs sont classés selon les types d'application et les performances désirées, en deux catégories autonome et non autonome. Entre ces deux types d'onduleurs il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge «ou encore onduleur à résonance».

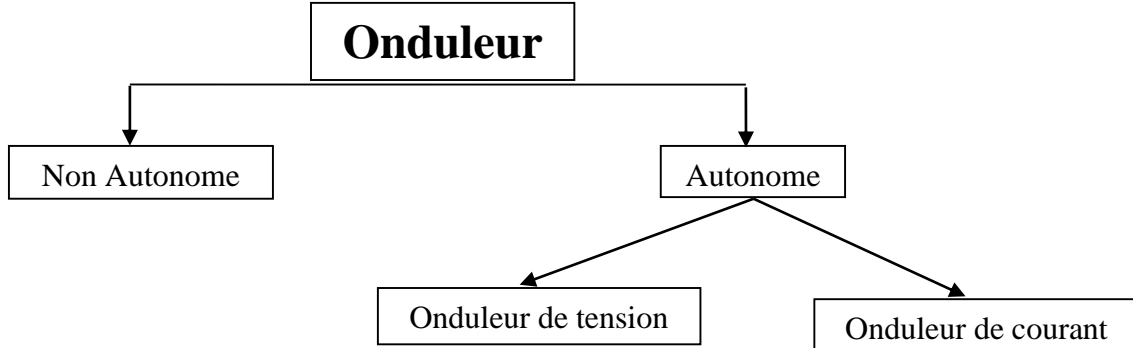


Figure II.3 : Classification des onduleurs

II-3-2. Onduleurs non autonome

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

i) Onduleurs non autonome réversible en tension [20]

Le pont complet, représenté sur la figure II-4, comporte quatre thyristors qui fonctionnent par paires : (T₁, T₂) et (T₃, T₄). Nous le voyons ici en mode discontinu, ce qui signifie que le courant dans les interrupteurs s'éteint spontanément, avant que le composant opposé ne soit amorcé. En pratique, la conduction du thyristor est toujours prolongée au-delà de π , en raison des inductances de la charge. Nous retrouvons sur cette figure la déformation du courant due à l'inductance de la

charge. La première paire de thyristors (T_1, T_2) devient conductrice lorsque la tension d'entrée $v(t)$ est positive, et réciproquement pour l'autre paire.

Le fonctionnement en conduction discontinue se caractérise par l'extinction spontanée du courant $i_s(t)$ dans la charge, avant que la paire de thyristors suivante ne devienne conductrice. Il s'ensuit un passage par zéro du courant à partir d'un instant, qui dépend de la charge.

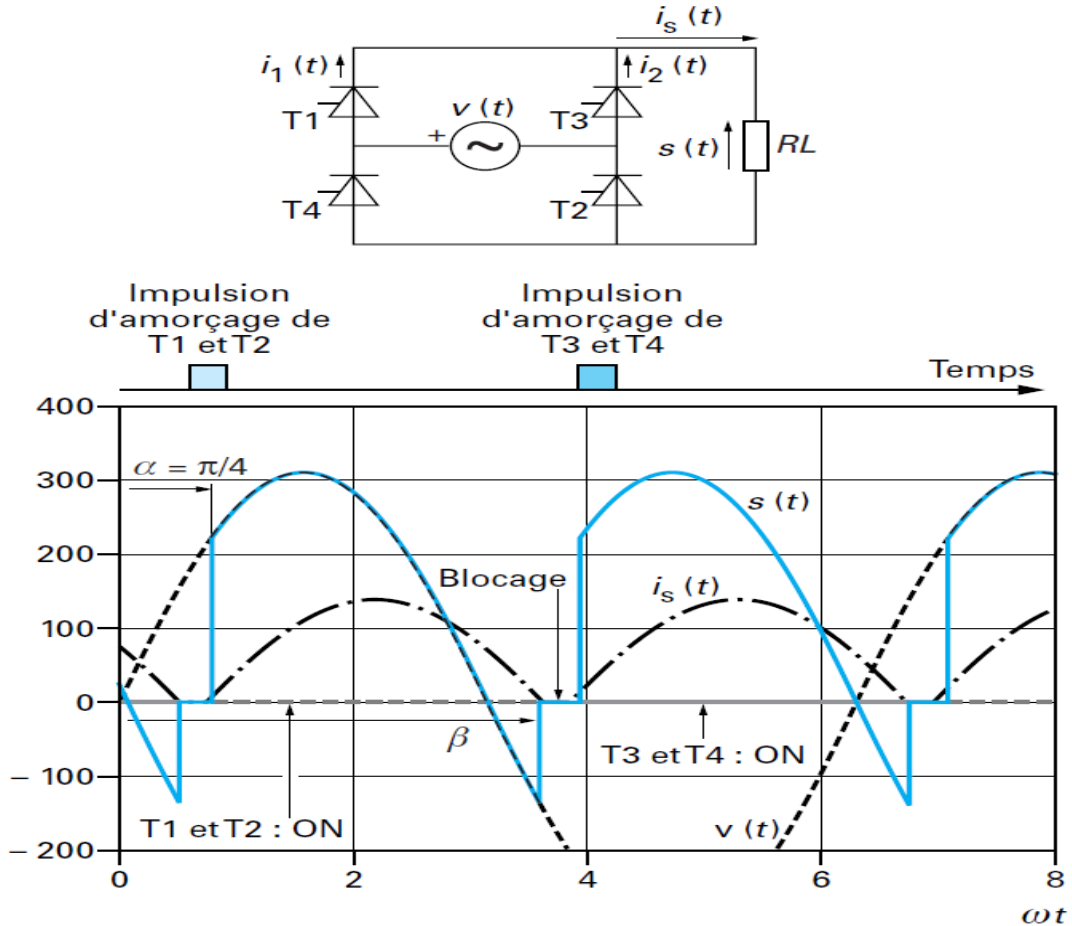


Figure II.4 : Pont redresseur complet à thyristors en conduction discontinue

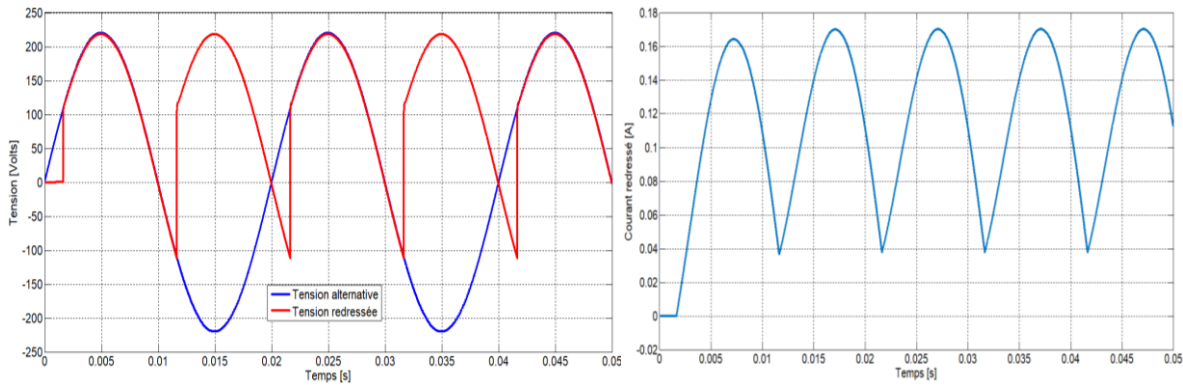
La tension moyenne de sortie S_0 vaut :

$$S_0 = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} [-\cos \beta + \cos \alpha] \tag{II.01}$$

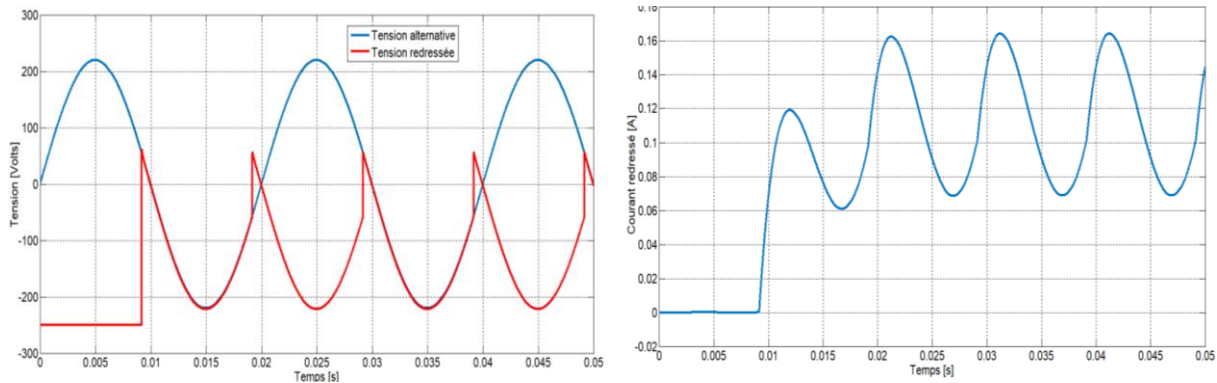
Pour une conduction continue, où lorsque la charge devient suffisamment inductive, son courant ne décroît plus assez vite et les thyristors ne peuvent plus s'éteindre spontanément ; c'est l'amorçage de la paire opposée qui les bloquera.

Donc : $\beta = \alpha + \pi$ et S_0 devient $S_0 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} [\cos \alpha]$ (II.02)

La formule II.02 montre l'expression de la tension moyenne de sortie en régime continu. Elle met clairement en évidence un point essentiel du comportement d'un redresseur : la tension moyenne de sortie devient négative $S_0 < 0$, pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$, à condition que la conduction soit continue. Il y a une réversibilité de tension. Nous obtenons dans ce cas les courbes représentées sur la figure II.5.



Mode redresseur $\alpha = \frac{\pi}{6} : \alpha < \frac{\pi}{2}, S_0 > 0$



Mode onduleur $\alpha = \frac{11\pi}{12} : \alpha > \frac{\pi}{2}, S_0 < 0$

Figure II.5 : Pont redresseur à thyristors : conduction continue sur une charge inductive

ii) Onduleurs non autonome réversible en courant

Le redresseur MLI, représenté sur la figure II.6, ils sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture aux contraires des redresseurs classiques. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [21].

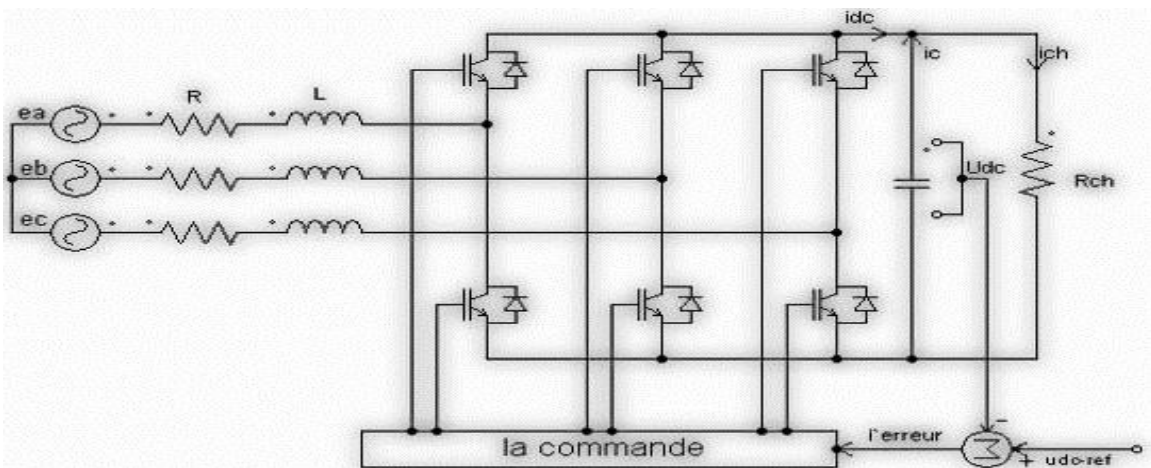
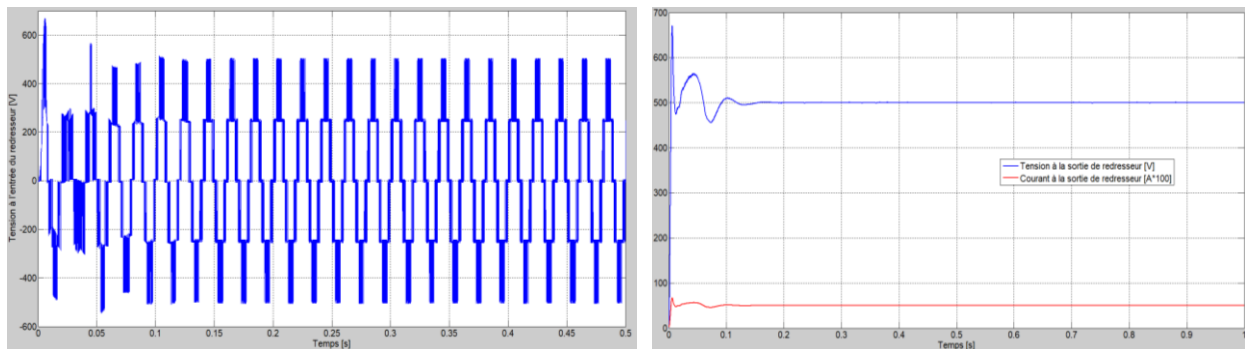


Figure II.6 : Topologies de base d'un redresseur à MLI de tension

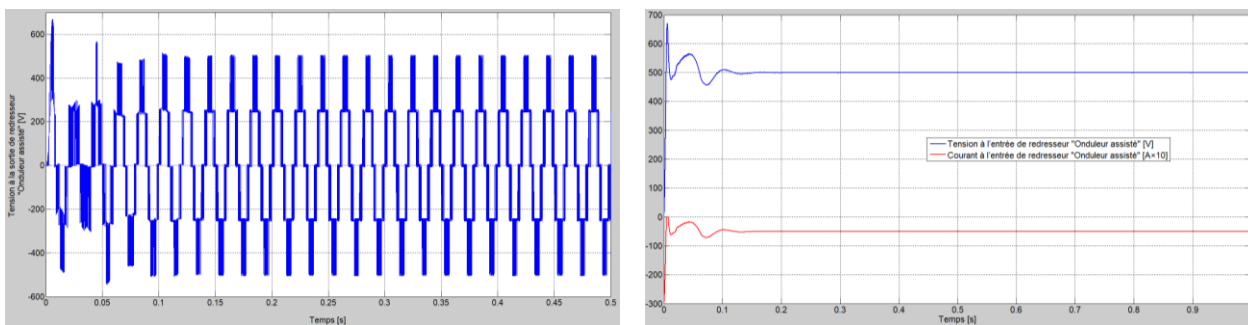
Le fonctionnement du redresseur de tension est en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu est mesurée et comparée avec une référence U_{dref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu mesurée aux bornes du condensateur C. La puissance active délivrée par l'onduleur est négative et transite depuis la source alternative vers la source continue. La valeur moyenne de courant est effectivement négative. L'onduleur fonctionne alors comme un redresseur.

Quand le courant i_h est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande, plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand i_h devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

Nous obtenons dans ce cas les courbes représentées sur la figure II.7, pour un redresseur alimente une charge de 1000Ω . La tension de référence appliquée à l'entrée de la boucle de régulation est $U_{dref}=500V$.



Mode redresseur



Mode onduleur

Figure II.7 : Tension et courant de sortie du redresseur

II-3-3. Onduleur de résonance [22]

Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge.

Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance :

- ✓ les onduleurs série ou à résonance de tension.
- ✓ les onduleurs parallèle ou à résonance de courant.

II-3-4. Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté.

Cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continu.
- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue.

La nature des sources est définie au point de vue des commutations. Pour qu'un onduleur soit totalement commandable (fermeture et ouverture commandées des interrupteurs), il faut respecter la règle de l'alternance des sources : la nature de la source continuée impose celle du récepteur alternatif. Un onduleur de tension continue alimente un récepteur de courant alternatif. Un onduleur de courant alimente une recapture de tension [22].

Dans une cellule de commutation, la tension aux bornes d'un interrupteur bloqué est égale à la tension de la source de tension. Au signe près, le courant dans un interrupteur qui conduit est égal au courant de la source de courant. Par conséquent si la source de tension est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter une tension bidirectionnelle. De même si la source de courant est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter un courant bidirectionnel. En guise de conclusion, la réversibilité des interrupteurs est liée à la réversibilité des sources en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant [21].

II-3-4_1. Onduleur de courant

Un onduleur est dit de courant, s'il est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant qui la traverse n'est pas affecté par la variation de la tension à ses bornes. La source continue impose la forme du courant à l'entrée de l'onduleur et donc celle des créneaux de courant à sa sortie. La ou les tensions à la sortie et donc la tension à l'entrée dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la condition qu'il ne s'agit pas uniquement d'une ou plusieurs autres sources de courant [22].

II-3-4_2. Onduleur de tension

Un onduleur de tension consiste à convertir une source de tension continue E en source de tension alternative $v(t)$ par utilisation de cellule de commutation, est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, c'est-à-dire par une source d'impédance interne négligeable dont la tension E n'est pas affectée par les variations du courant $i(t)$ qui la traverse.

La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et compte tenu des connexions établies par les interrupteurs. Les deux courants d'entrée et de sortie dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension, directement branchée entre les bornes de sortie. Dans ce chapitre, on va étudier les onduleurs de tension.

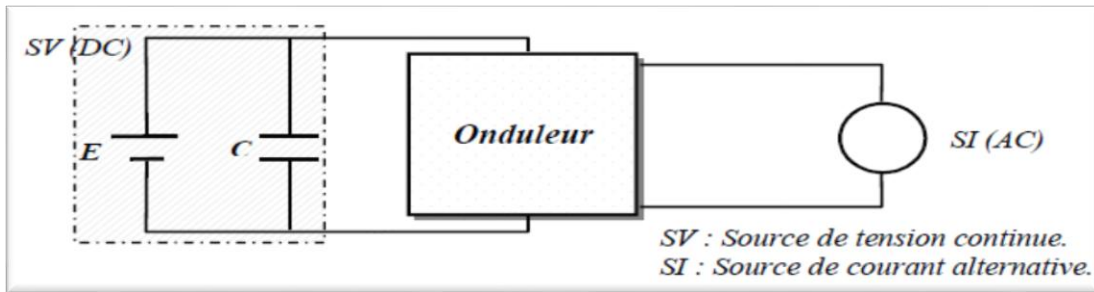


Figure II.8 : Représentation schématique d'un onduleur de tension

II-3-4_2.1. Onduleurs de tension monophasés : Principe de fonctionnement

Les onduleurs monophasés les plus utilisés sont :

- L'onduleur en pont composé de quatre interrupteurs ;
- L'onduleur avec diviseur capacitif à l'entrée (appelé onduleur en demi-pont) n'incorporant que deux interrupteurs.

i) Onduleur monophasé en pont (Pont H)

Avec quatre interrupteurs, on obtient l'onduleur de tension en pont complet. La figure II.9 illustre son schéma de principe.

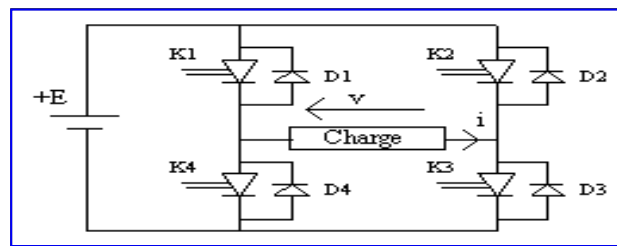
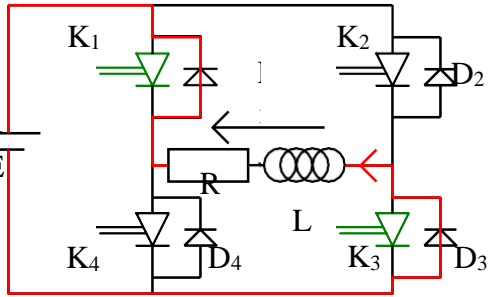
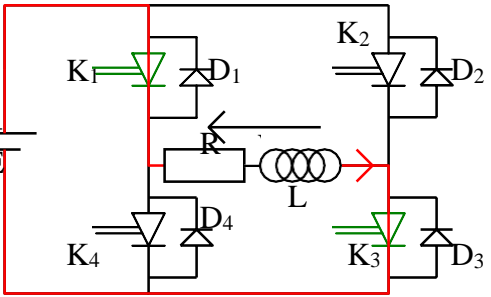
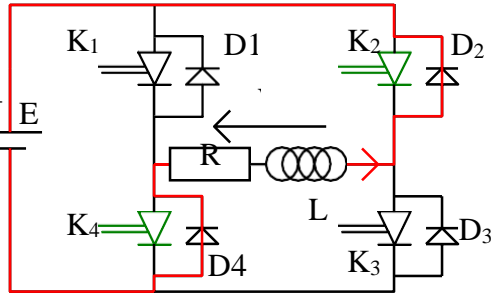
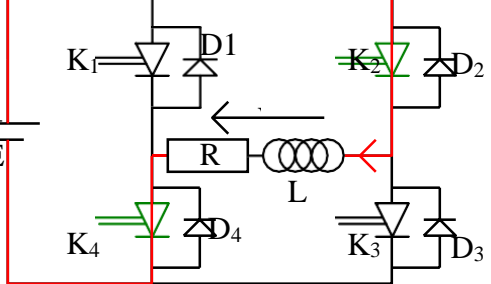


Figure II.9 : Représentation de l'onduleur monophasé en pont

Les contraintes de fonctionnement de cette structure (Une source de tension jamais en court-circuit et une source de courant jamais en circuit ouverte) conduisent à écrire les équations logiques (II.03) pour chacun des deux demi-pont. Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue [23]. Pour une charge inductive, le courant $i(t)$ est en retard par rapport à la tension à la borne de récepteur $v(t)$, donc dans quelques instants de fonctionnement : Les interrupteurs statiques sont bidirectionnels en courant à fermeture et ouverture commandées. Chaque commutateur est muni d'une diode montée en parallèle inverse pour permettre au commutateur d'écouler un courant s'il est négatif, et ne pas avoir à supporter de tension inverse. Quand les interrupteurs k_1 et k_3 , sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs k_2 et k_4 .

$$(K_1 = \overline{K_4} \text{ et } K_2 = \overline{K_3}) \quad (\text{II.03})$$

Remarque : lors du passage d'une configuration à une autre, il faut réaliser la commande des interrupteurs de telle manière qu'il s'écoule un petit intervalle de temps entre la commande à l'ouverture de l'interrupteur devant s'ouvrir et la commande à la fermeture de l'interrupteur complémentaire pour éviter la mise en court-circuit de la source de tension continue. En réalité, chaque transistor est bien commandé à partir d'un signal logique mais un circuit spécialisé appelé "driver" se charge de la mise en forme et de l'amplification du courant de grille.

$0 < t < T/2$	La commande impose K_2, K_4 ouverts et K_1, K_3 commandés : $v = E > 0$
<p>$\square 0 < t < t_1 : i < 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le courant i est négatif, ce qui impose la conduction de D_1 et D_3. - Ces diodes restent passantes tant que l'intensité du courant $i_{D1} = i_{D3} = -i$ qui les traverse reste positive. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = E.i$ négative : il y a donc transfert d'énergie de la charge vers la source, on est alors en phase de récupération. 	
<p>$\square t_1 < t < T/2 : i > 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> - A l'instant t_1, i s'annule et devient positif, ce qui impose la conduction de K_1 et K_3. <i>Les D_1 et D_3 se bloquent spontanément à l'instant t_1 par manqué de courant.</i> - Il y a commutation de D_1 vers K_1 et de D_3 vers K_3. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = E.i$ positive : il y a donc transfert d'énergie de la source vers la charge, on est alors en phase active. 	
$T/2 < t < T$	La commande impose K_1, K_3 ouverts et K_2, K_4 commandés : $v = -E < 0$
<p>$\square T/2 < t < t_2 : i > 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le courant i est positif, ce qui impose la conduction de D_2 et D_4. <i>Mais les composants K_1 et K_3 qui se bloquent à l'instant $T/2$ ne peuvent pas se bloquer spontanément puisque ils sont soumis à une tension v_{k1} positif lorsque K_2 s'enclenche. On devra faire le choix de composants de type transistor, bipolaire ou MOS, l'IGBT (Ces composants convient pour cet usage : On dit qu'il s'agit d'une commutation forcée ou bien pouvoir être commandés à la fermeture).</i> - Ces diodes restent passantes tant que l'intensité du courant $i_{D2} = i_{D4} = i$ qui les traverse reste positive. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = -E.i$ négative : il y a donc transfert d'énergie de la charge vers la source, on est alors en phase de récupération. 	
<p>$\square t_2 < t < T : i < 0$</p> <ul style="list-style-type: none"> - A l'instant t_2, i s'annule et devient négatif, ce qui impose la conduction de K_2 et K_4. - Il y a commutation de D_2 vers K_2 et de D_4 vers K_4. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = -E.i$ positive : il y a donc transfert d'énergie de la source vers la charge, on est alors en phase active. 	

La période T représente la durée d'un cycle. Sachant que la fréquence $f = 1/T$ et par exemple que la fréquence du réseau vaut 50Hz, la durée d'un cycle est de 0.02 seconde.

Par un simple décalage, les deux demi-pont fonctionnent avec la même période T, et leurs commutations sont conformes à la condition (II.03), mais décalées d'un angle β comprise entre 0 et π . La tension $v(t)$ représentée figure II.9 est un créneau à **trois niveaux**, elle fait apparaître des phases de «roue libre» où la charge se retrouve court-circuitée par deux interrupteurs passants par un action simultanément sur les interrupteurs (K_1 et K_2) ou (K_3 et K_4).

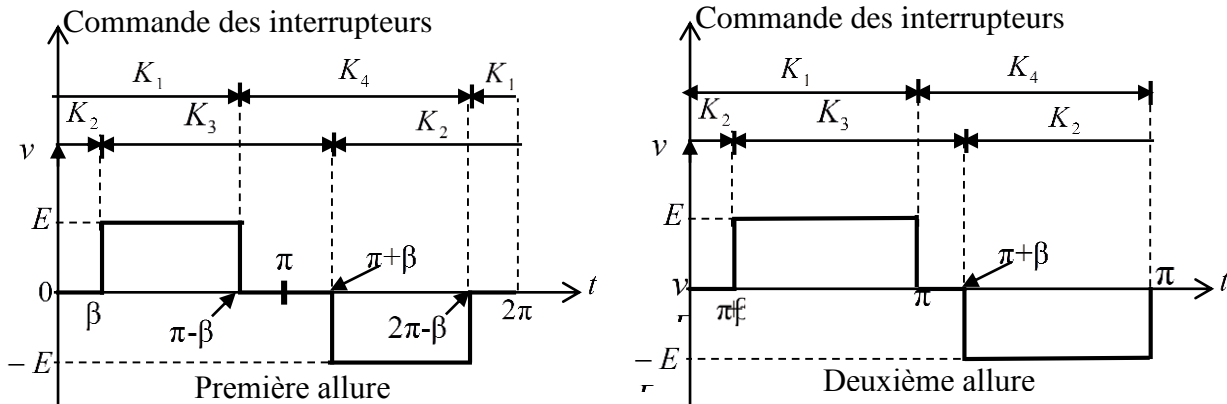


Figure II.10 : Deux allures de la tension simple de sortie d'une structure monophasée à pont complet et diagramme de conduction correspondants

La tension de sortie v ne dépend que de la tension d'alimentation E et de l'angle β puisqu'on a supposé les sources et les interrupteurs parfaits.

Cette tension alternative est, en fait, formée, pour chaque période, de deux créneaux rectangulaires dont la durée de chacun d'eux est, selon l'allure choisie, soit égale à $(\pi - 2\beta)/2 \cdot \pi \cdot f$, soit égale à $(\pi - \beta)/2 \cdot \pi \cdot f$. Sa valeur efficace a comme expressions :

- première allure $v = E \sqrt{1 - \frac{2\beta}{\pi}}$ deuxième allure $v = E \sqrt{1 - \frac{\beta}{\pi}}$ (II.04)

Son fondamental a pour valeurs efficaces :

- première allure $v_1 = \frac{2E\sqrt{2}}{\pi} \cos(\beta)$ deuxième allure $v_1 = \frac{2E\sqrt{2}}{\pi} \cos(\frac{\beta}{2})$ (II.05)

La tension aux bornes de tous les interrupteurs lorsqu'ils sont ouverts est égale à la tension d'alimentation E . Donc, pour les quatre semi-conducteurs commandés ainsi que les quatre diodes, on a :

$$V_{Tmax} = -V_{Dmax} = +E. \tag{II.06}$$

Donc on peut conclure que :

- ❖ si $\beta=0$, la commande est appelée "commande à onde rectangulaire" (elle donne lieu à un signal de sortie à deux niveaux), la valeur efficace de la tension n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée. (**Onduleurs à deux niveaux**).
- ❖ si $\beta \neq 0$, la commande est appelée "commande décalée" (elle donne lieu à une onde de sortie à trois niveaux). Cette onde est obtenue par une commande décalée des interrupteurs. La valeur efficace de la tension de sortie est variable en agissant seulement sur la durée du créneau. (**Onduleurs à trois niveaux**).

ii) Onduleur en demi-pont

L'onduleur en demi-pont représenté figure II.11 ne comporte que deux interrupteurs K_1 et K_2 mais, cette fois, la source de tension continue égale $2E$, donc nécessite deux générateurs de tension identique E , la charge est un dipôle de courant. La commande (180°) définit la durée de conduction de chacune des interrupteurs est alors d'un demi cycle correspondant à la fréquence du signal de sortie requis. Comme le convertisseur en demi-pont ne possède que deux interrupteurs, il semble offrir un avantage marqué sur le convertisseur en pont. Cependant, la tension inverse aux bornes des valves du convertisseur en demi-pont est de $2E$, soit le double de celle apparaissant aux bornes des valves du convertisseur en pont. Par conséquent, si par exemple les interrupteurs IGBT sont limités à une tension inverse de 1kV , il faudra en utiliser deux en série pour chaque valve. Il en résulte que le convertisseur en demi-pont aura besoin de 4 interrupteurs, tout comme le convertisseur en pont.

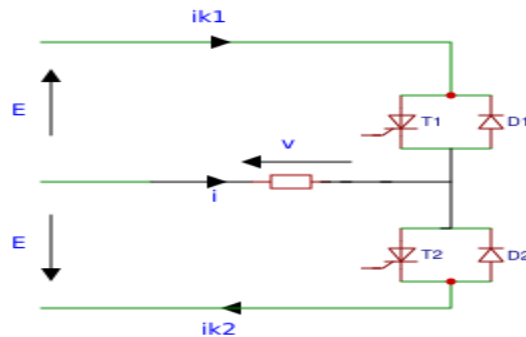


Figure II.11 : Onduleur en demi-pont

Pour simplifier la mise en œuvre de l'onduleur, les deux sources de tension sont souvent réalisées à l'aide d'un générateur unique de valeur $2E$ et d'un diviseur capacitif formé de deux condensateurs de même capacité C dont le schéma est indiqué figure II.12.

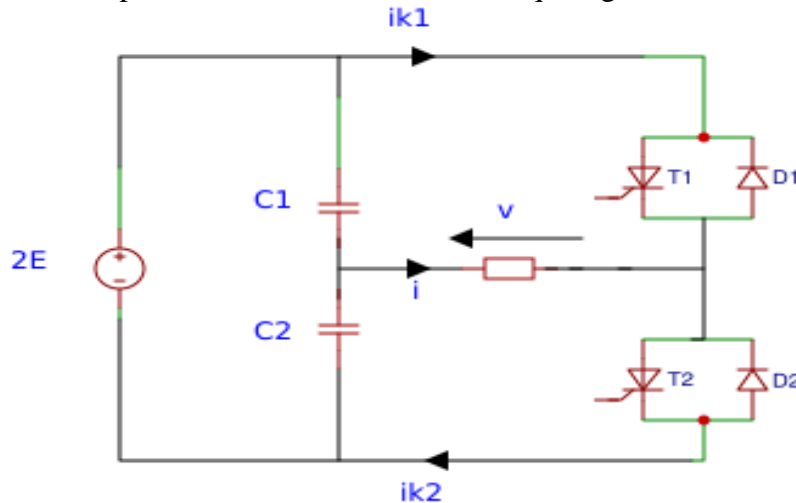


Figure II.12 : Onduleur en demi-pont avec diviseur capacitif

$\square 0 < t < T/2$ T₁ commandé T₂ ouvert Impose v = E	$0 < t < t_1 :$ $i < 0$	- Le courant i est négatif, T ₂ est ouvert, c'est donc D ₁ qui conduit. - D ₁ reste passante tant que l'intensité du courant $i_{D1} = -i$ qui la traverse reste positive. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = E.i$ négative : il y a donc transfert d'énergie de la charge vers la source, on parle alors de phase de récupération .
	$t_1 < t < T/2 :$ $i > 0$	- A l'instant t_1 , i s'annule et devient positif, ce qui impose la conduction de T ₁ . Il y a commutation de la diode D ₁ au transistor T ₁ . - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = E.i$ positive : il y a donc transfert d'énergie de la source vers la charge, on parle alors de phase active .
$T/2 < t < T$ T₂ commandé T₁ ouvert Impose v = -E	$T/2 < t < t_2 :$ $i > 0$	- Le courant i est positif, K ₁ est ouvert, c'est donc D ₂ qui conduit. - Il y a eu commutation de T ₁ à D ₂ à l'instant T/2. - D ₂ reste passante tant que l'intensité du courant $i_{D2} = -i$ qui la traverse reste positive. - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = -E.i$ négative : il y a donc transfert d'énergie de la charge vers la source, on est alors en phase de récupération .
	$t_2 < t < T :$ $i < 0$	- A l'instant t_2 , i s'annule et devient négatif, ce qui impose la conduction de T ₂ . Il y a commutation de la diode D ₂ au transistor T ₂ . - Pendant cet intervalle de temps, on a $p = v.i = -E.i$ positive : il y a donc transfert d'énergie de la source vers la charge, on est alors en phase active .

Il n'y a pas possibilité de réglage de la valeur efficace de sortie $v(t)$. La tension de sortie v ne dépend que de la tension d'alimentation E . Pour régler la valeur efficace de la tension de sortie, on passe à une structure comme montré dans la figure II.13. Ce convertisseur comporte quatre interrupteurs contrôlés (K₁ à K₄) et quatre diodes antiparallèles (D₁ à D₄) de façon à permettre une conduction bidirectionnelle du courant. De plus, deux diodes supplémentaires D₅ et D₆ sont reliées au point milieu M. Pour obtenir l'état 0, on ferme K₂ et K₃ et on ouvre K₁ et K₄. Si le courant de la charge est positif, ce courant est transféré instantanément à la diode D₅ à travers K₂, ce qui a pour effet de relier la sortie A au point milieu M et de produire une tension zéro. Par contre, si le courant circule en sens inverse, c'est la diode D₆ et l'interrupteur K₃ qui conduisent pour produire l'état 0. Le rôle des diodes D₅ et D₆ est donc d'attacher ou de «clamper» la sortie A au point M pour produire l'état zéro.

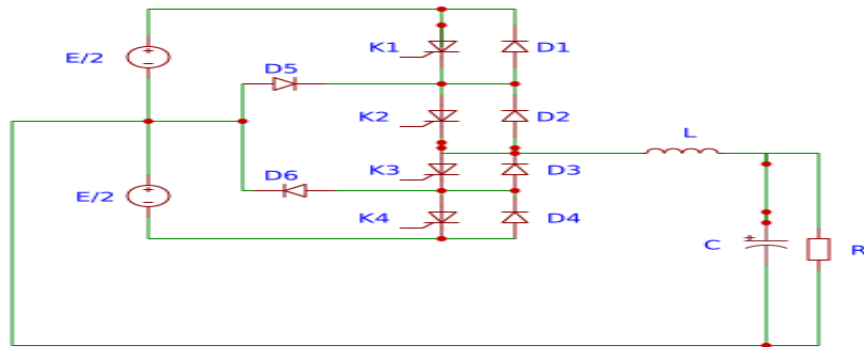


Figure II.13 : Convertisseur à trois niveaux utilisant des interrupteurs électroniques et des diodes

II-3-4_2.2. Onduleurs triphasés

Un onduleur triphasé est très utile pour alimenter à tension et fréquence variable des récepteurs triphasés équilibrés. En groupant trois ponts monophasés, on obtient l'onduleur triphasé. Il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases afin que les trois tensions simples de sortie soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental. On a deux types des onduleurs triphasés.

i) Onduleur triphasé en pont complet (Pont H)

On peut réaliser l'onduleur triphasé de «douze interrupteurs» en pont complet en associant 3 onduleurs monophasés. Une première idée pourrait être envisagée : alimenter par un même 'bus' continu 3 onduleurs monophasés identiques. Malheureusement, ce montage s'avère impossible, le couplage en étoile ou en triangle des trois récepteurs pour constituer un récepteur triphasé conduirait à la mise en court-circuit permanente du dipôle continu. En revanche, l'opération, l'opération est possible avec une séparation galvanique des sources de tension (figure II.15).

Mais pourquoi obligatoirement cette nécessité de séparation galvanique des sources de tension

La configuration de sources continues indépendantes est utilisée pour les onduleurs employant des cellules a ponts complète monophasées afin d'éviter la mise en court-circuit de ces source d'alimentation.

Pour expliquer ceci, plaçons-nous dans le cas où une seule source continue d'alimentation est utilisée pour alimenter l'ensemble de cellules à pont complet. La figure II.14 illustre, respectivement sur un exemple à deux cellules.

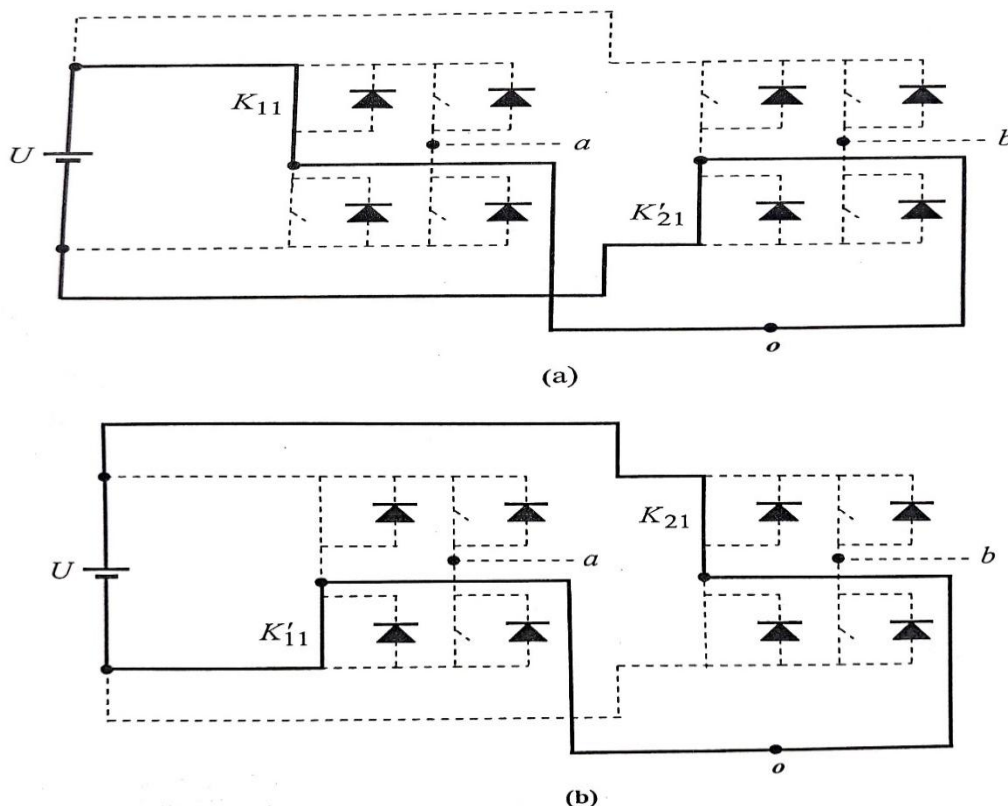


Figure II.14 : Possibilités de production de court-circuit de la deuxième configuration :

- Par la fermeture simultanée de K_{11} et K'_{21}
- Par la fermeture simultanée de K'_{11} et K_{21}

Il convient de remarquer que plusieurs combinaisons peuvent produire des courts-circuits de la source continue d'alimentation. Nous nous contenterons de présenter ici deux possibilités. Pour la première possibilité, le court-circuit aux bornes de la source continue aura lieu si les interrupteurs K_{11} et K'_{21} seront simultanément fermés. Alors que pour la deuxième connexion, le court-circuit se produira lorsque les deux interrupteurs K'_{11} et K_{21} seront fermés en même temps.

Il apparaît clairement de cet exemple qu'il faut utiliser autant de sources continues d'alimentation qu'il y a deux cellules à pont complet monophasé ». Ceci est indispensable et obligatoire pour ne pas avoir des court-circuits. Cette particularité de sources continues d'alimentation indépendante, qui semble être un inconvénient pour la structure d'onduleur en pont. Les interrupteurs fonctionnent comme en monophasé. Ils doivent encore être complémentaires deux à deux (K_{d1} et K_{d1}' , K_{d2} et K_{d2}'), avec $d=1, 2$, ou 3 . Pour de tels cas aussi, il nous faut utiliser la largeur β des intervalles à tension nulle pour les trois phases et décaler leurs commandes d'un tiers de période. Chacune des tensions est égale tantôt à $+E$, tantôt à $-E$ tantôt à 0 .

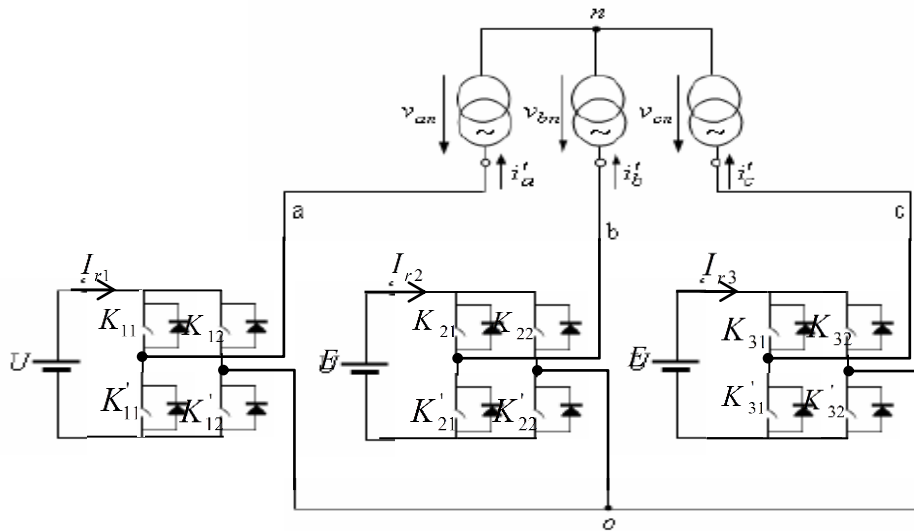


Figure II.15 : Montage de l'onduleur triphasé à deux ou à trois niveaux utilisant trois structures monophasées à pont complet

Pour retrouver les valeurs des courants d'entrée i_{r1} , i_{r2} et i_{r3} de chaque pont, il faut suivre celles des courants à travers les interrupteurs.

$$I_{rd} = i_{Kd1} + i_{Kd2} \quad \text{pour } d=1, 2 \text{ ou } 3 \tag{II.06}$$

ii) Onduleurs triphasés en pont

En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la figure II.16 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires. Quand les interrupteurs K_1 , K_2 ou K_3 sont fermés, la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E/2$, et de $-E/2$. On a supprimé la nécessité du point milieu du côté entrée. Dans ce cas en passant de la structure schématisée dans la figure II.17 et quand les interrupteurs K_1 , K_2 ou K_3 sont fermés, la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de 0 . Dans ce cas, un seul générateur continu de valeur E suffit pour alimenter l'onduleur ; le point commun o est virtuel. Seul le cas d'une charge triphasée équilibrée sera envisagé.

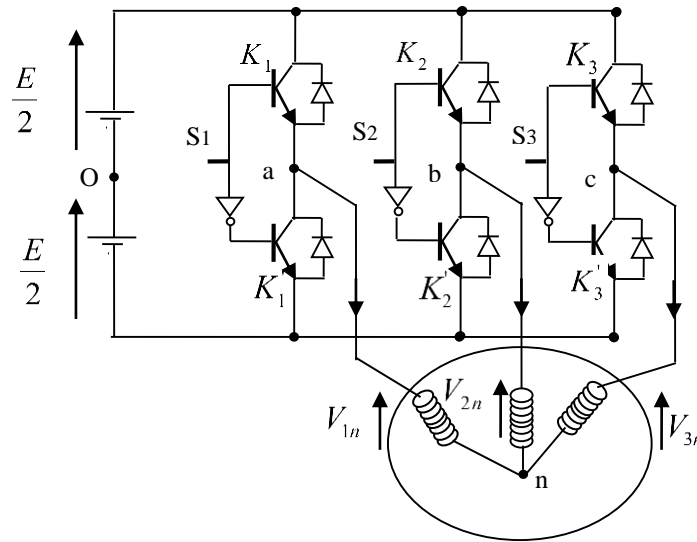


Figure II.16 : Montage de l'ondeur triphasé en pont à deux niveaux avec un point milieu

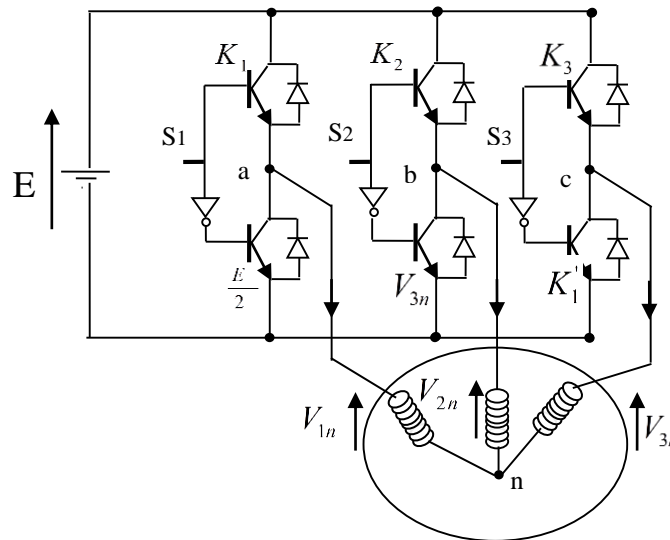


Figure II.17 : Montage de l'ondeur triphasé en pont à deux niveaux sans point milieu

Pour retrouver les valeurs des courants d'entrée I_r de l'ondeur, il faut suivre celles des courants à travers les interrupteurs.

$$I_r = i_{K1} + i_{K2} + i_{K3} \quad \text{pour } d=1,2 \text{ ou } 3 \quad (\text{II.07})$$

II-3-4_2.3. Modèle d'un ondeur de tension triphasé [9, 24]

i) Charge triphasée équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$

Nous définissons tout d'abord les conditions et les hypothèses que nous utiliserons :

- Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge V_{an}, V_{bn}, V_{cn} ;
- Tensions entre le point milieu fictif de l'alimentation continue de l'ondeur V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} ;
- Tension entre le point neutre 'n' et le point milieu de l'alimentation continue de l'ondeur V_{n0} ;

Les équations des mailles du système ondeur – charge

$$V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} = V_{an} + V_{n0} + V_{bn} + V_{n0} + V_{cn} + V_{n0} \Rightarrow V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II.08})$$

Les tensions simples aux bornes de la charge sont :

$$V_{in} = V_{i0} + V_{0n} = V_{i0} - V_{n0} \quad (\text{II.09})$$

A partir des relations (II.08) et (II.09), dans le cas équilibré, il vient le système matriciel liant à tout instant les tensions entre le point milieu fictif de l'alimentation continue de l'onduleur et les tensions simples aux bornes de la charge. La tension de phase peut être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Avec : v_{ao} , v_{bo} et v_{co} sont les tensions simples de sortie de chaque pont. Elles sont exprimées en fonction des signaux de gâchette. Nous expliquons comment faire ça.

Par exemple, pour l'onduleur à pont complet : un pont sur la phase d ($d = a, b$ ou c), est alimentée par une tension continue notée E , et génère à sa sortie une tension notée v_{do} . Chaque couple d'interrupteurs (K_{dx}, K'_{dx}), $x \in \{1,2\}$ est commandé par un couple de fonctions de connexion (S_{dx}, S'_{dx}), telles que :

$$\begin{cases} S_{dx}, S'_{dx} \in \{0,1\} \\ S_{dx} + S'_{dx} = 1 \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

La conversion de la commutation des interrupteurs en tension s'effectue par une fonction de conversion F_{dj} telle que :

$$F_{do} = S_{d1} - S_{d2} \Rightarrow F_{do} = \{-1,0,1\} \quad (\text{II-12})$$

La tension de sortie est donnée par l'équation :

$$v_{do} = F_{do} \cdot E = \{-E, 0, E\} \quad (\text{II-13})$$

Pour un onduleur en pont avec diviseur capacitif.

$$F_{do} = S_d - S'_d \Rightarrow F_{do} = \{-1,1\} \text{ et } v_{do} = F_{do} \cdot \frac{E}{2} = \left\{-\frac{E}{2}, \frac{E}{2}\right\} \quad (\text{II-14})$$

Pour un onduleur en pont sans diviseur capacitif.

$$F_{do} = S_d \Rightarrow F_{do} = \{1,0\} \text{ et } v_{do} = F_{do} \cdot E = \{E, 0\} \quad (\text{II-15})$$

A partir de cette modélisation, on peut montrer que les tensions de sortie obtenues par l'utilisation de l'onduleur triphasé en pont soit sans ou avec un point milieu sont identiques.

i) Par exemple l'état $\{S_1, S_2, S_3\} = \{1,0,0\}$

Pour l'onduleur triphasé en pont avec point milieu

$$v_{do} = \left\{\frac{E}{2}, -\frac{E}{2}, -\frac{E}{2}\right\} \Rightarrow v_{dn} = \left\{\frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{ao} - v_{co}) = \frac{2E}{3}, -\frac{E}{3}, -\frac{E}{3}\right\} \quad (\text{II-16})$$

Pour l'onduleur triphasé en pont sans point milieu

$$v_{do} = \{E, 0, 0\} \Rightarrow v_{dn} = \left\{\frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{ao} - v_{co}) = \frac{2E}{3}, -\frac{E}{3}, -\frac{E}{3}\right\} \quad (\text{II-17})$$

ii) Par exemple l'état $\{S_1, S_2, S_3\} = \{1,0,1\}$

Pour l'onduleur triphasé en pont avec point milieu

$$v_{do} = \left\{\frac{E}{2}, -\frac{E}{2}, \frac{E}{2}\right\} \Rightarrow v_{dn} = \left\{\frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{ao} - v_{co}) = \frac{E}{3}, -\frac{2E}{3}, \frac{E}{3}\right\} \quad (\text{II-18})$$

Pour l'onduleur triphasé en pont sans point milieu

$$v_{do} = \{E, 0, E\} \Rightarrow v_{dn} = \left\{ \frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{ao} - v_{co}) = \frac{E}{3}, -\frac{2E}{3}, \frac{E}{3} \right\} \quad (\text{II-19})$$

On a remarqué que les tensions de sortie pour les deux structures sont identiques.

ii) Charge triphasée équilibrée couplée en triangle $V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$

Les équations des mailles du système onduleur – charge

$$V_{ab} = V_{a0} + V_{ob} = V_{a0} - V_{b0}, \quad V_{bc} = V_{b0} - V_{c0}, \quad V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (\text{II.20})$$

A partir de l'équation (II.20), dans le cas équilibré, il vient le système matriciel liant à tout instant les tensions entre le point milieu fictif de l'alimentation continue de l'onduleur et les tensions entre phases aux bornes de la charge.

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

II-4. Différents types de commande d'un onduleur de tension

II-4-1. Introduction

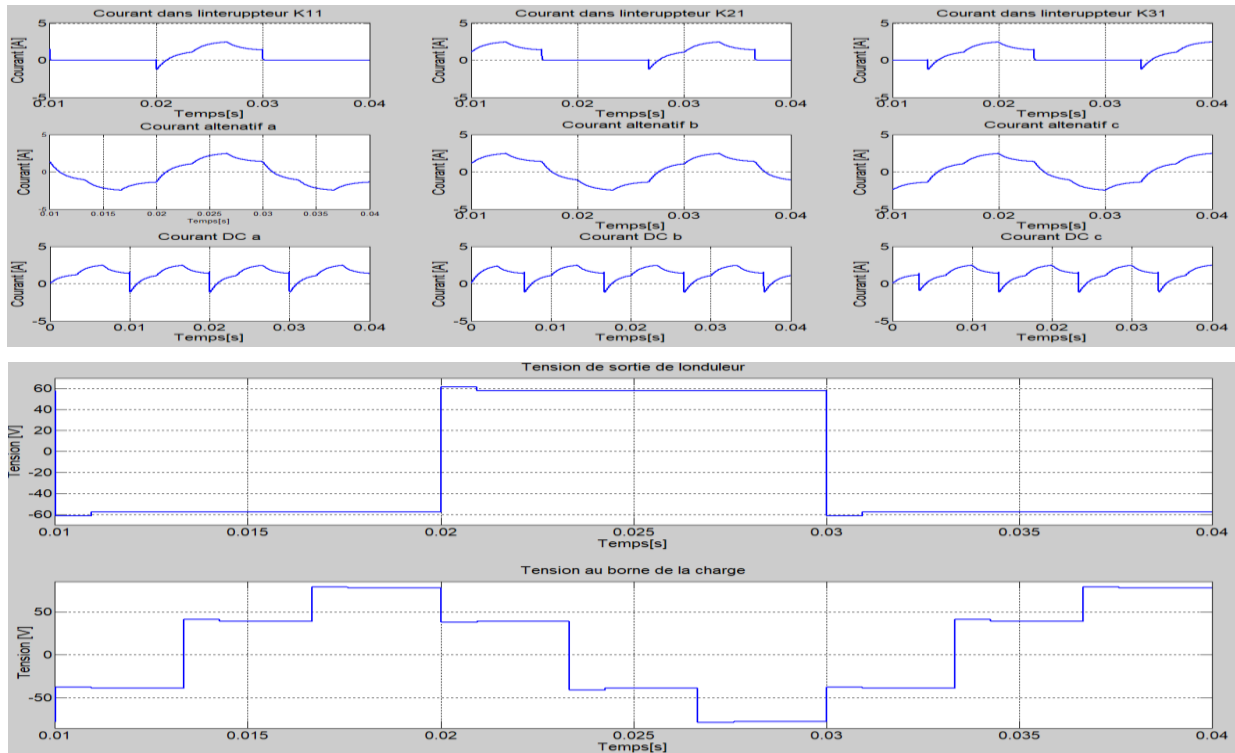
Le fonctionnement principal de l'onduleur décrit dans la figure II.9 porte le nom de commande pleine onde. La tension $v(t)$ aux bornes du récepteur est un créneau symétrique d'amplitude $\pm E$, dont la valeur moyenne est nulle. Nous proposons de simuler le fonctionnement des onduleurs, où la tension d'alimentation est égale à 60V pour l'onduleur triphasé en pont complet et à 120V pour la l'onduleur triphasé en pont, à une fréquence de 50Hz, et un débit sur une charge inductive RL , nous obtenons les figures II.18 et II.19.

Pour l'onduleur triphasé en pont complet, on remarque que la forme du courant de phase de la structure à trois niveaux est meilleure que la forme du courant de phase de la structure à deux niveaux. Cela est dû aux nombres de séquences et aux nombres de niveaux de la tension simple de l'onduleur à trois niveaux qui a augmenté par rapport à la structure à deux niveaux.

La fréquence de l'ondulation résultante du courant d'entrée I_r égale deux fois la fréquence de la tension de sortie ($2 \times 50 = 100\text{Hz}$) pour l'onduleur en pont complet et égale trois fois la fréquence de la tension de sortie ($6 \times 50 = 300\text{Hz}$) pour l'onduleur en pont.

Pour l'onduleur triphasé en pont, nous représentons les tensions de sortie dans la figure II.19. Sur un bras, chaque interrupteur fonctionne pendant 180 degré. Cette commande appelée plein onde 180°. D'après les résultats de simulation, les formes d'ondes de sortie v_{do} ($d = a, b$ ou c) de chaque demi-pont de l'onduleur triphasé sans et avec point milieu ne sont pas identiques. Par contre, les tensions de sortie v_{dn} appliquée aux bornes du récepteur sont identiques. Donc les deux structures de l'onduleur en pont (sans et avec un point milieu) donnent même tension de sortie.

Onduleur à deux niveaux



Onduleur à trois niveaux $\beta = 18^\circ$ (Première allure)

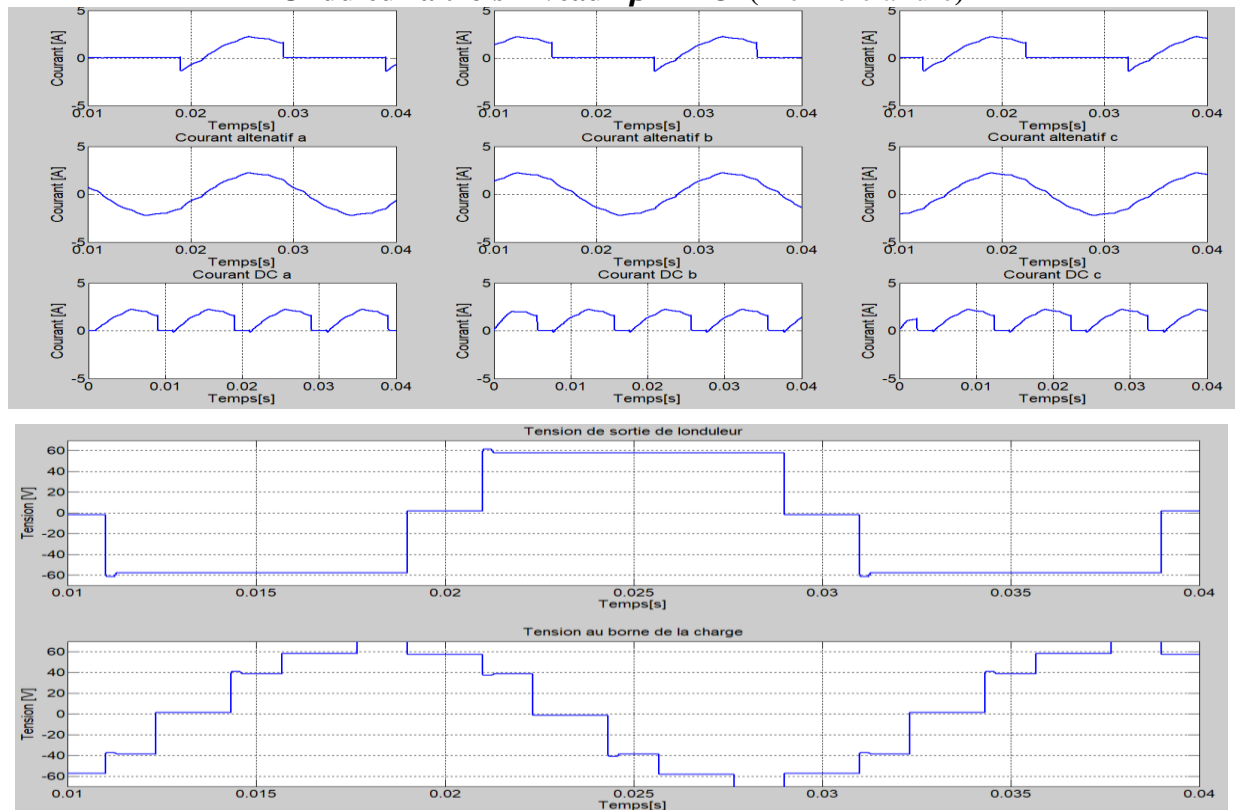


Figure II.18 : Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont complet pilotés en pleine-onde

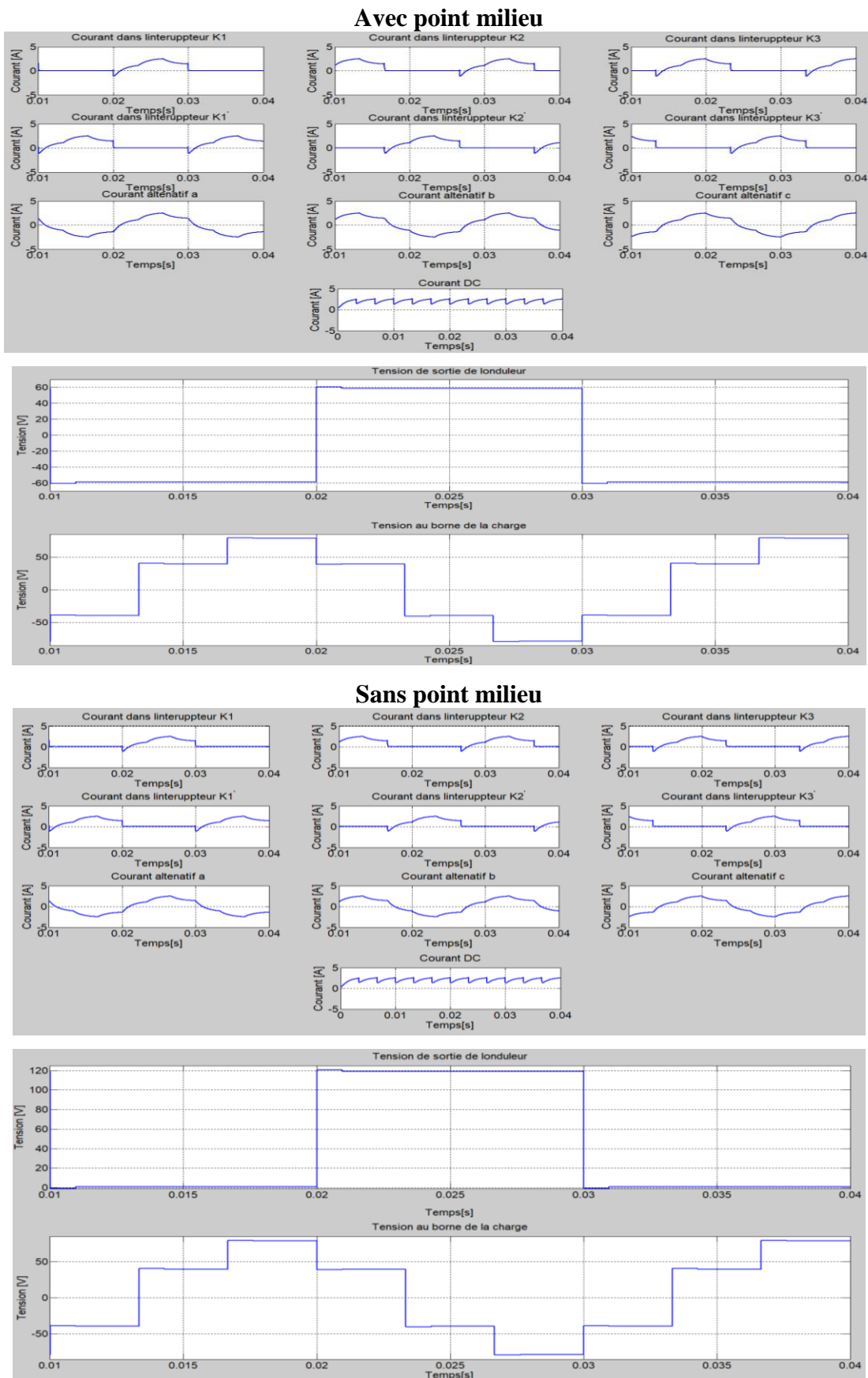


Figure II.19 : Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont pilotés en pleine-onde

Comme on déjà mentionné dans la § II-3-4_2.1, pour de cette façon de fonctionnement, la commande décalée n'est pas transposable en triphasé pour le cas d'un onduleur en pont. Mais, il y a une commande appelée 120° , où chaque interrupteur fonctionne pendant 120° de degré successivement ; la séquence est K_1, K_2 puis K_3 successivement. Les interrupteurs K_1', K_2' et K_3' fonctionnent successivement avec un décalage de 60° par rapport à K_1, K_2, K_3 (figure II.20). Les résultats de simulation sont montrés dans la figure II.21.

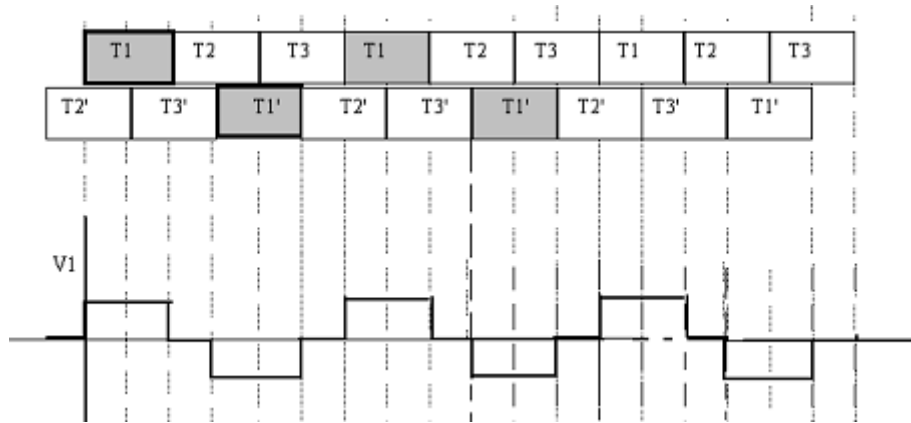
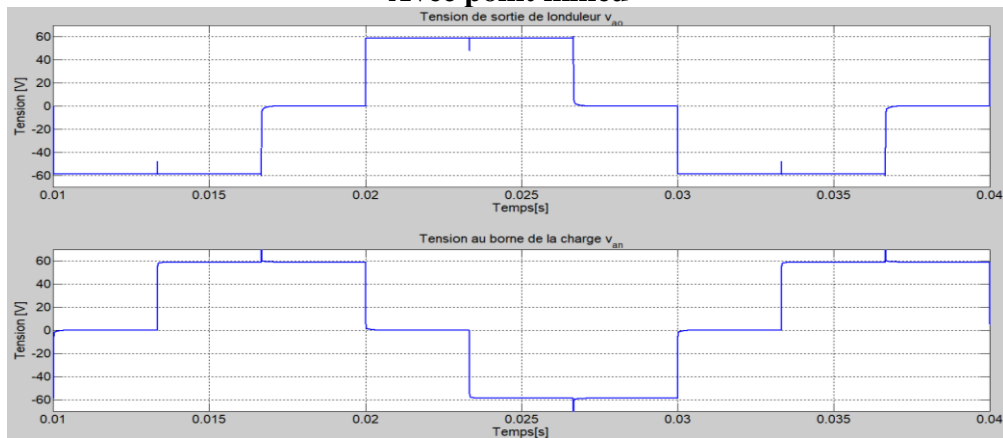


Figure II.20 : Commande et chronogrammes des grandeurs de l'onduleur triphasés plein onde 120°

Avec point milieu



Sans point milieu

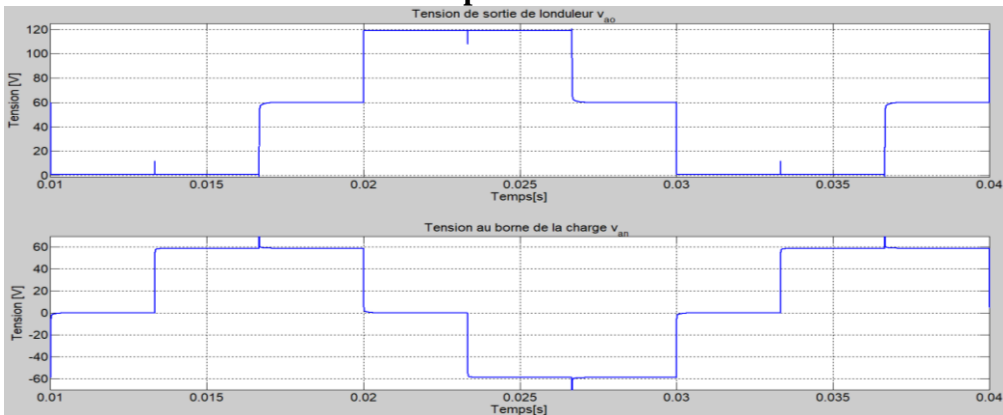


Figure II.21 : Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont pilotés en pleine-onde (120°)

D'après les résultats de simulation, et par la comparaison entre les résultats obtenus dans les figures II.18 et II.19, les tensions de sortie v_{dn} appliquée aux bornes du récepteur sont identiques. Donc les deux structures de l'onduleur en pont et de l'onduleur en pont complet donnent même tension de sortie. Mais pour l'onduleur en pont complet, le courant continu de chaque pont prend des valeurs négatives, donc il y a une récupération du courant du récepteur vers le générateur. Donc, on peut dire que pour l'onduleur en pont, lors de la phase de récupération du courant du récepteur vers le générateur par exemple dans la phase a, le courant n'est pas récupéré, il a réparti dans les phases b et c.

Pour obtenir une tension d'une valeur efficace V_{eff} , la tension d'alimentation pour l'onduleur en pont est double par rapport à celle pour l'onduleur en pont complet, mais dans ce dernier utilise trois tensions d'alimentation séparée.

Comme on déjà dit dans la § I-5, que les panneaux PV se fait par l'ajout de diodes de protection en série pour éviter les courants inverses. Donc pour les applications PV, il est nécessaire d'insérer une capacité d'entrée, d'une importance capitale pour absorber l'énergie magnétisante que renvoie le récepteur pendant la phase de récupération de la puissance. Les résultats après l'insertion d'une capacité à l'entrée de l'onduleur sont montrés que les courants d'entrée sont positifs.

Onduleur à deux niveaux

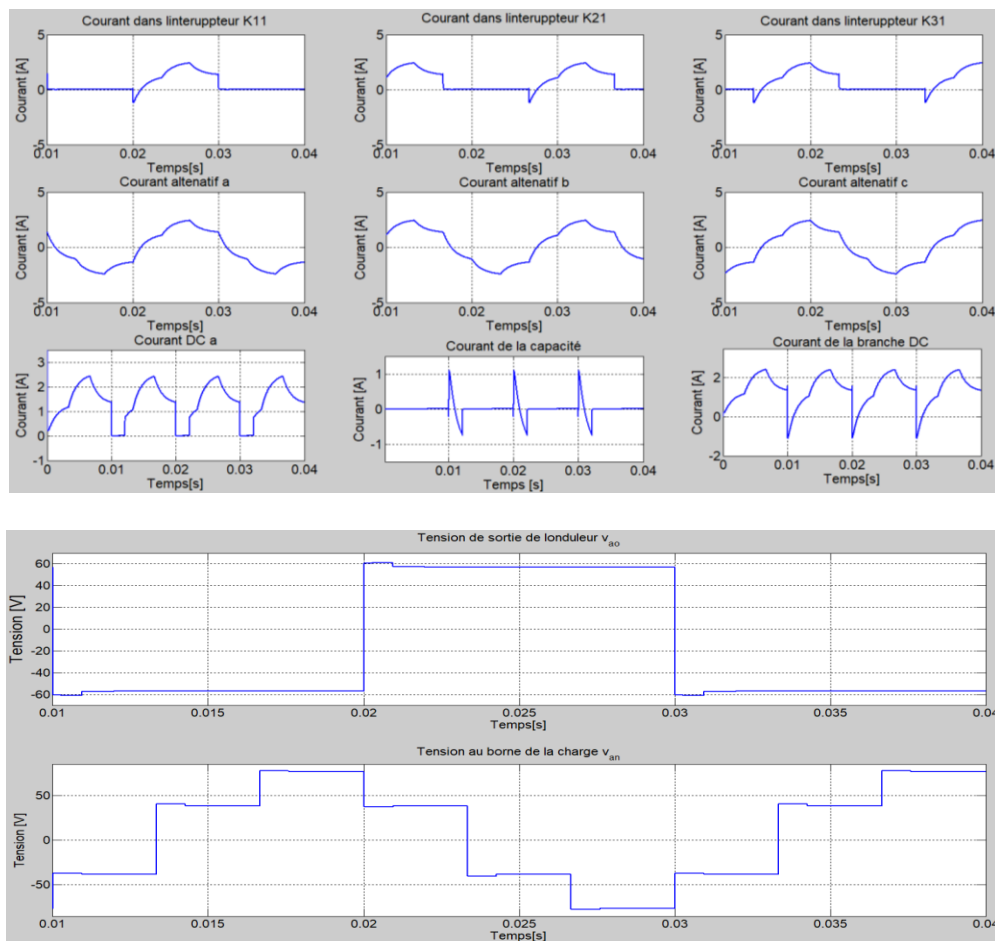


Figure II.22 : Résultats de simulation de l'onduleur triphasé en pont complet pilotés en pleine-onde (Insertion d'une capacité)

Pour la détermination des performances de l'onduleur et de la qualité du signal de sortie, il est nécessaire de citer quelques paramètres. Parmi ceux-là, le facteur de distorsion harmonique totale **THD**.

Ce facteur, ou bien ce taux, de distorsion harmonique totale **THD** est une mesure de similitude de forme c'est-à-dire de proximité et de ressemblance de la forme d'onde avec sa composante fondamentale. Ce paramètre, qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative, représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace de fondamental.

La qualité de l'onde de tension sera évaluée par le **THD** ou taux d'harmonique ramené au fondamental (un **THD** idéal=0%). On pourrait aussi calculer le **THD** de courant, mais celui-ci dépend également de la charge [25].

$$THD = \frac{1}{U_1'} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} U_n'^2 \right)^{1/2} \quad \text{Ou } THD = \sqrt{\frac{U_{eff}^2 - U_1'^2}{U_1'^2}} \quad (\text{II-22})$$

Avec

U_1' : valeur efficace du fondamental de la tension

U_n' : valeur efficace de la tension harmonique de rang n (n^{ième} tension harmonique)

U_{eff} : valeur efficace de la tension de sortie

De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 3500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 3500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 70.

Bien que ce soit la stratégie de commande pleine onde qui est la plus simple à mettre en œuvre, mais, elle affublée de beaucoup d'inconvénients. Parmi eux : les formes des tensions obtenues sont loin d'être sinusoïdales, et les signaux de sortie sont riches en harmoniques d'ordre bas, ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des charges (Les tensions de sortie sous forme carré). La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques. Au niveau de la commande, il suffit de décaler la fermeture de différents interrupteurs dans un ordre précis. L'emploi des techniques MLI permet, de repousser les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

II-4-2. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

On distingue plusieurs types de commande à modulation de largeur d'impulsion. Parmi elles, la MLI naturelle (ou modulation par onde triangulaire et onde sinusoïdale) et la MLI vectorielle.

II-4-2.1. MLI triangulo-sinusoïdale

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion interactive puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Le principe de cette stratégie à deux niveaux (figure II.23) peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$\text{Si } V_{ref} \geq V_p \Rightarrow S_2(t) = 1 \quad \text{sinon } S_2(t) = 0 \quad (\text{II-23})$$

Avec : V_{ref} désigne la référence et V_p la porteuse, $S_2(t)$ est le signal MLI à deux niveaux résultant de la comparaison.

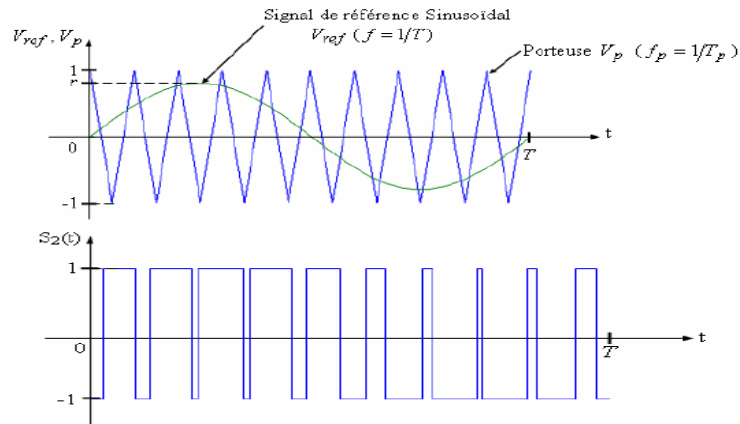


Figure II.23 : Principe de la technique MLI triangulo-sinusoidale du signal à deux niveaux

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoidale :

- ❖ L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f de la référence : $m = \frac{f_p}{f}$,
- ❖ Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_{refm} à la valeur crête V_{pm} de la porteuse : $r = \frac{V_{refm}}{V_{pm}}$.

La technique MLI permet de contrôler la valeur du fondamental de la tension par action sur la commande et consiste à moduler les durées de l'impulsion de commande des interrupteurs statiques par la forme d'onde de la tension de référence à l'aide d'un signal triangulaire.

Pour un système triphasé, le signal de la seconde phase et de la troisième phase sont dérivés d'une référence déphasée de 120° et 240° respectivement.

Dans la figure II.23, les signaux MLI issus de la modulation sinusoidale bipolaire sont obtenus par comparaison entre une porteuse triangulaire bipolaire. Il y a des autres types de porteuse, appelé dent de scie (figure II.24).

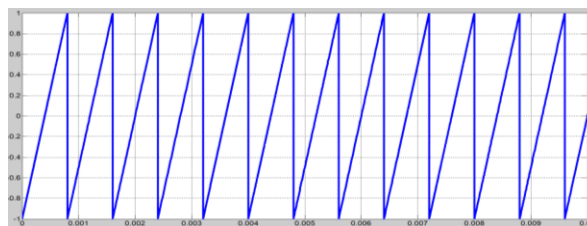


Figure II.24 : Porteuse dent de scie

Nous proposons de simuler le fonctionnement des onduleurs, où la tension d'alimentation est égale à 60V pour l'onduleur triphasé en pont complet et à 120V pour la l'onduleur triphasé en pont, à une fréquence de 50Hz et pour $r=0.9$, nous obtenons les figures en-dessous.

Les formes de courant et tension d'entrée et de sortie de la commande pleine onde (figure II.18) n'est autre que celle de la MLI (figure II.25), sauf pour la commande MLI, les tensions et les courant sont modulés sinusoidalement afin d'obtenir un grand rendement. C'est avantageux pour un fonctionnement fiable de l'onduleur.

D'après les résultats de simulation, et par la comparaison entre les résultats obtenus dans la figure II.25, les valeurs fondamentales de la tension et du courant d'entrée et de sortie sont identiques.

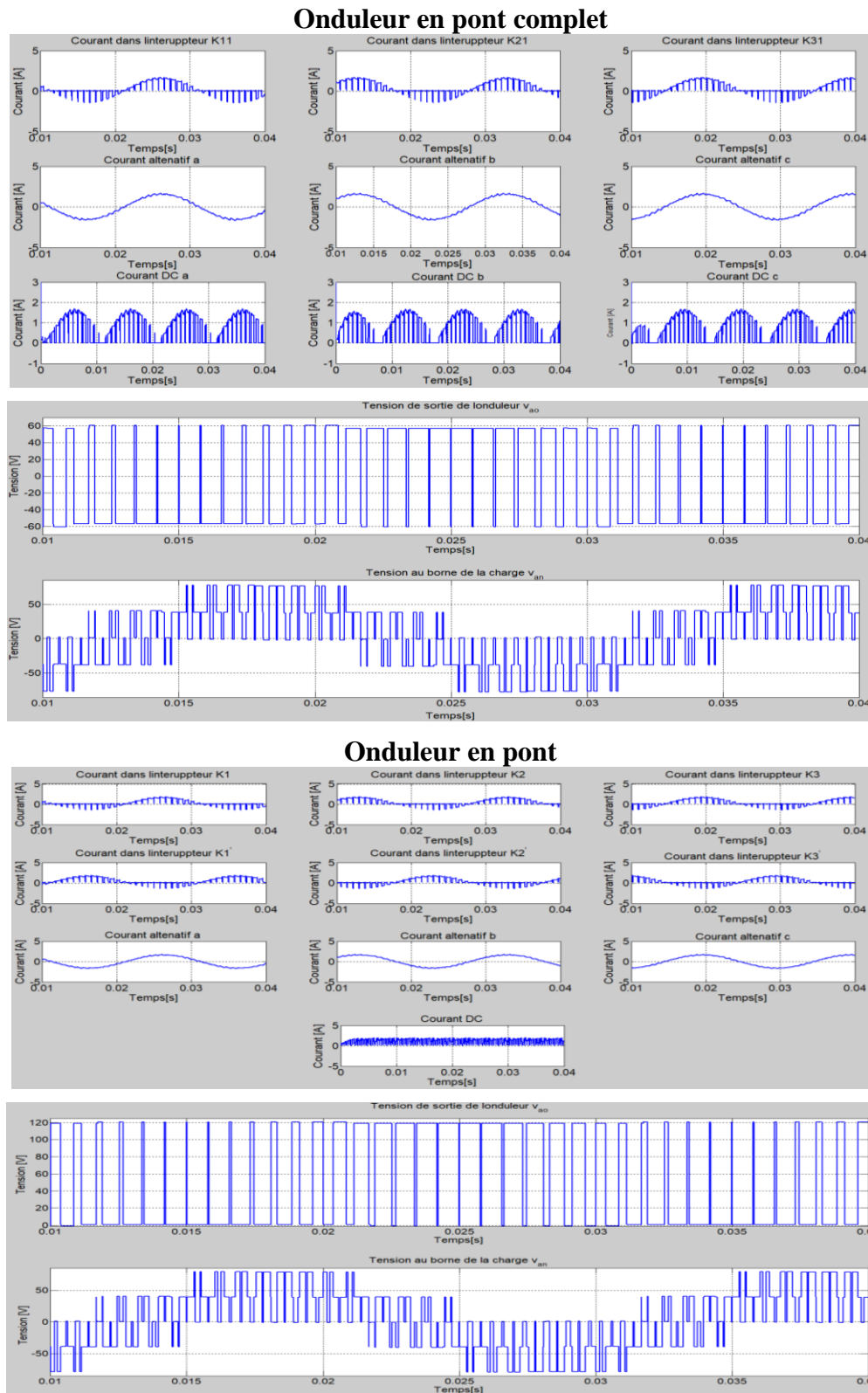
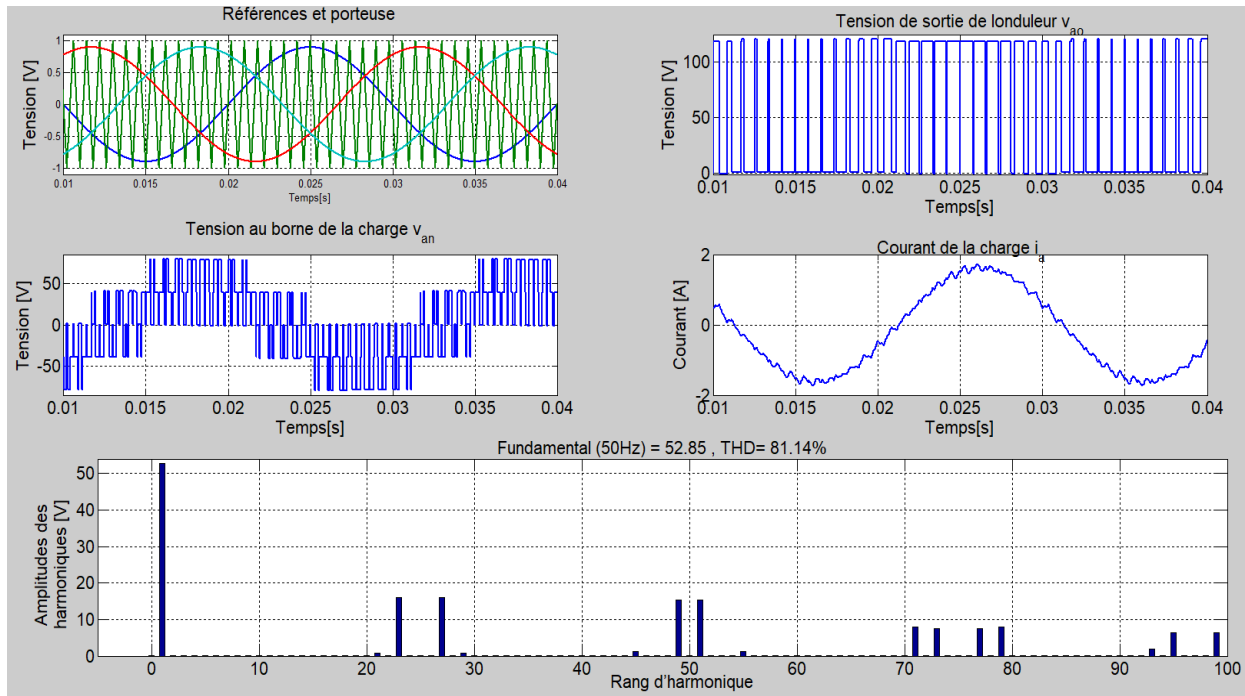


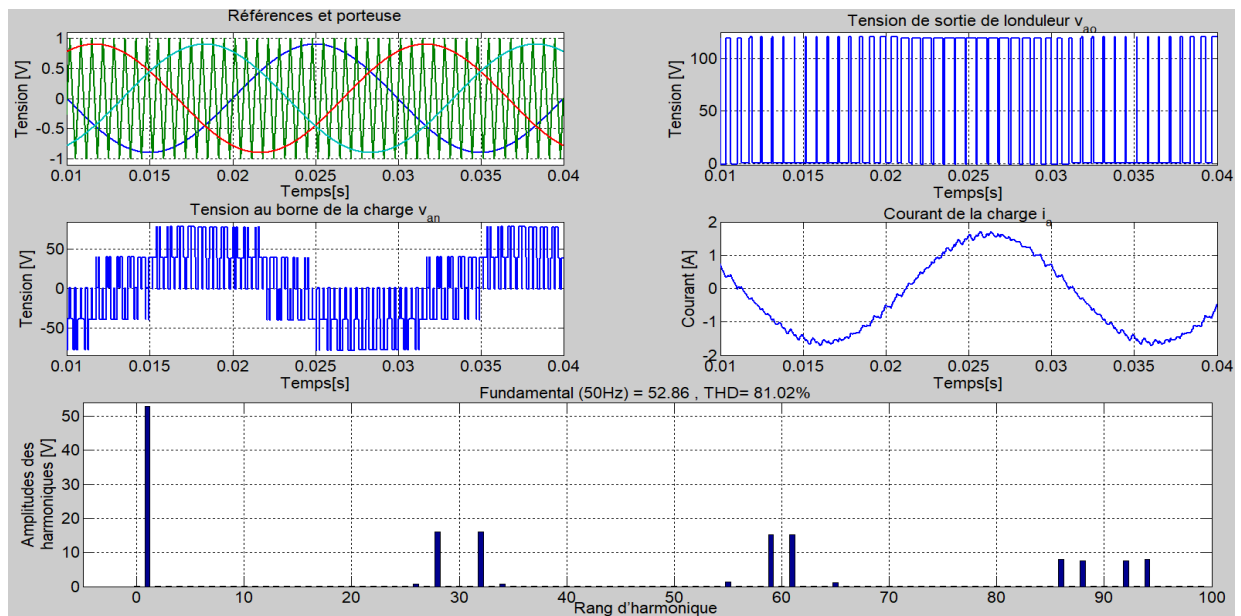
Figure II-25 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoidale avec un porteuse bipolaire pour $m = 25$ et $r = 0.9$

Sur les figures suivantes, nous avons représenté :

- la tension v_{ao} de sortie de la première phase,
- la tension v_{an} ainsi que son analyse spectrale,
- le courant de sortie de la première phase.

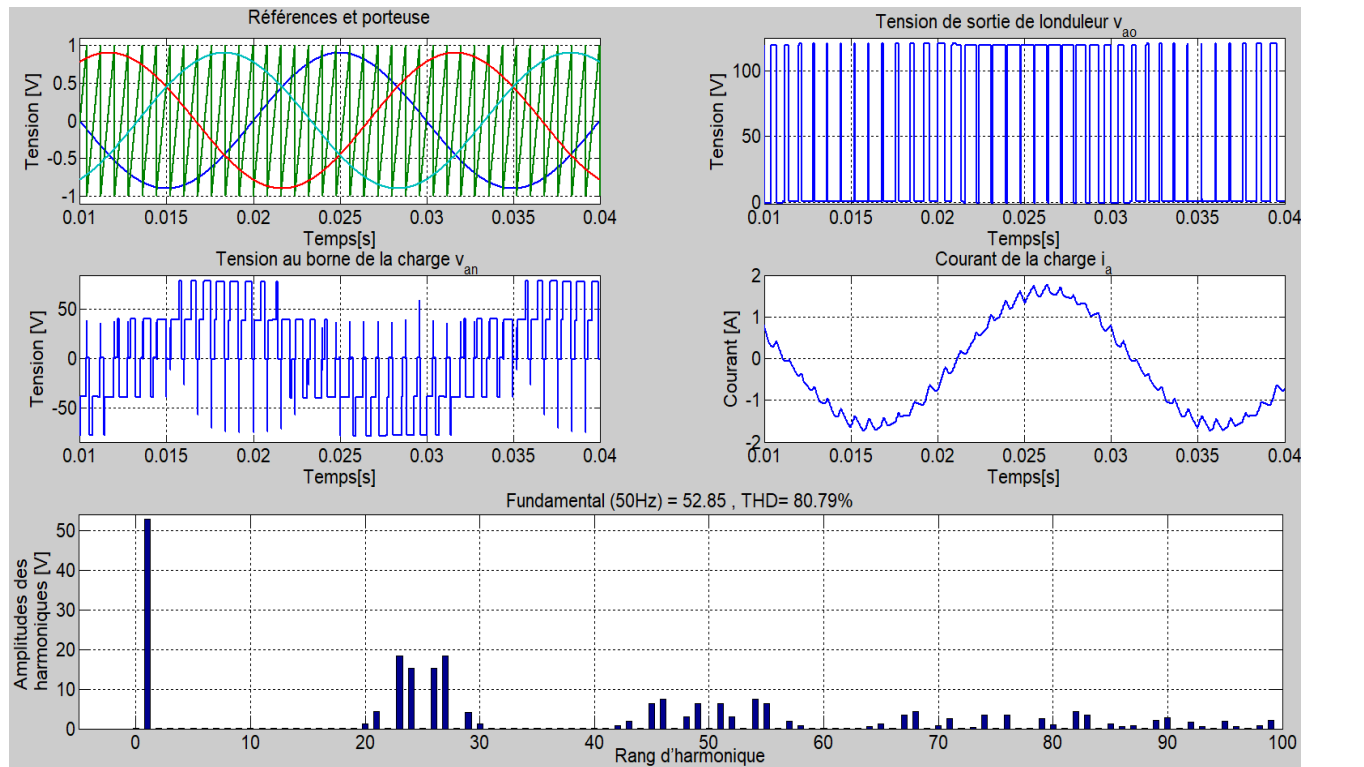


$$m = 25 \text{ et } r = 0.9, THD_{courant} = 5.12\%$$

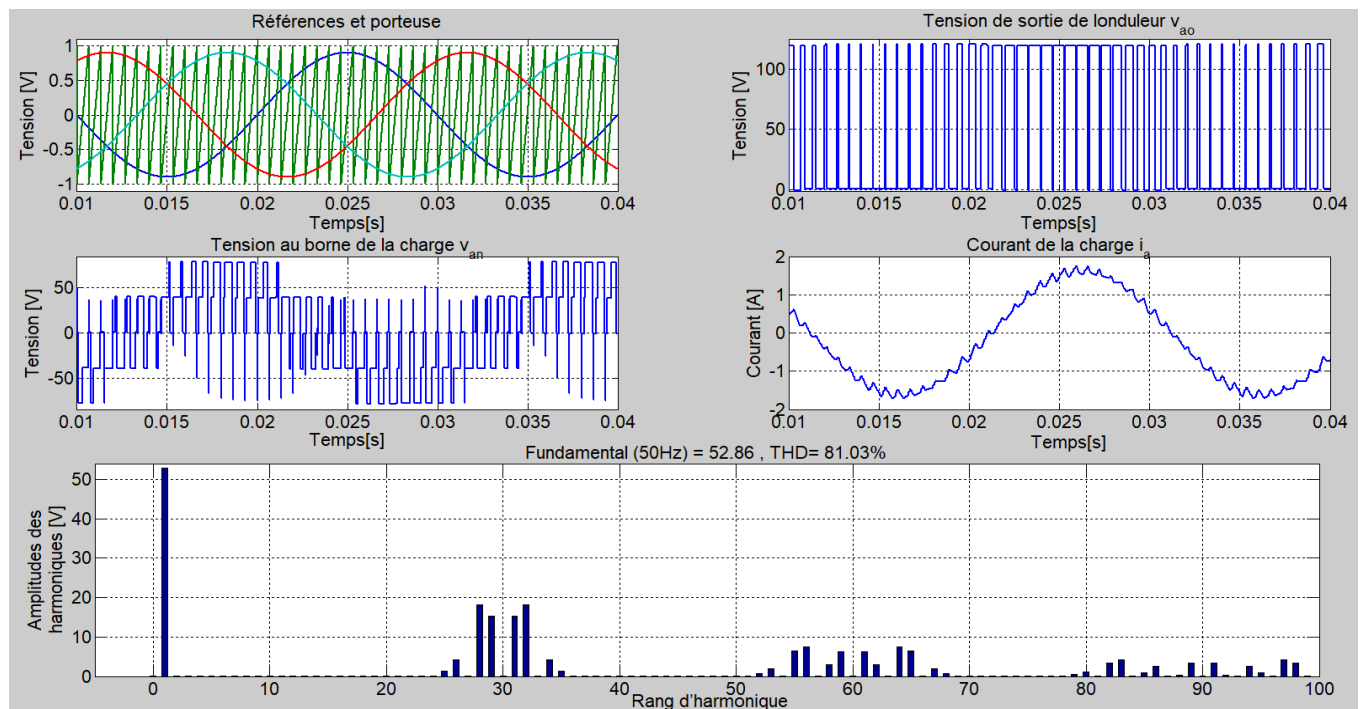


$$m = 30 \text{ et } r = 0.9, THD_{courant} = 4.26\%$$

Figure II-26 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoidale avec un porteuse bipolaire - *Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m*



$$m = 25 \text{ et } r = 0.9, THD_{courant} = 6.99\%$$



$$m = 30 \text{ et } r = 0.9, THD_{courant} = 5.82\%$$

Figure II-27 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse dent de scie - *Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m*

L'augmentation de la fréquence d'échantillonnage (donc m) permet de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilite leur filtrage.

Les résultats de simulations effectuées sur les onduleurs à deux niveaux avec une porteuse bipolaire montrent que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de la porteuse $f_p = mf$ avec f fréquence de la référence. Le spectre de la tension montre la présence d'harmoniques pairs et impairs pour le cas m pair (pair pour un multiple impaire et impaire pour un multiple pair), donc on constate qu'il n'y a pas de symétrie de la tension simple v_{ao} pour les valeurs de m pair et seulement des harmoniques impairs pour le cas m impair.

Les résultats de simulations effectuées sur les onduleurs à deux niveaux avec porteuse dent de scie montrent que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de la porteuse $f_p = mf$ avec f fréquence de la référence. Le spectre de la tension montre la présence d'harmoniques pairs et impairs pour le cas m pair et impaire (pour tous les multiples pairs et impairs).

Suivant la note indiquée dans la § II-4-1. Cependant et malgré pour l'onduleur triphasé en pont, il n'y pas une récupération du courant, l'application dans les systèmes PV, nécessitent une capacité d'entrée afin de réaliser une source de tension puisque le générateur PV n'en est pas une. Cette capacité est nécessaire, sans elle, à cause des appels de courant, le point de fonctionnement du GPV se verra bouger sans cesse, au point de rendre le système PV inopérant. Aussi, cette capacité est nécessaire pour absorber l'énergie magnétisante que renvoie le récepteur pendant un arrêt inattendu et limiter la surtension à une valeur convenable ne risque pas de détériorer les transistors de puissance.

Concernant l'onduleur en pont complet et pour obtenir une tension à trois niveaux pour la MLI triangulo-sinusoïdale, on applique la stratégie à 2 porteuses. L'algorithme correspondant à cette stratégie de commande est la détermination des signaux intermédiaires S_{2i} .

S_{2i} : représente les signaux à deux niveaux nécessaires pour la production du signal à 3 niveaux, appelés encore les signaux intermédiaires.

$$\begin{cases} \text{si } V_{refk} \geq V_{pi} \Rightarrow S_{2i} = 1 \text{ pour } i = 1,2 \\ \text{si } V_{refk} < V_{pi} \Rightarrow S_{2i} = 0 \text{ pour } i = 1,2 \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Où $k=a, b$ ou c : représente l'indice ou le numéro de la phase.

Il y a des plusieurs types de porteuse, on distingue la MLI bipolaire, unipolaire et dent de scie (figure II.28).

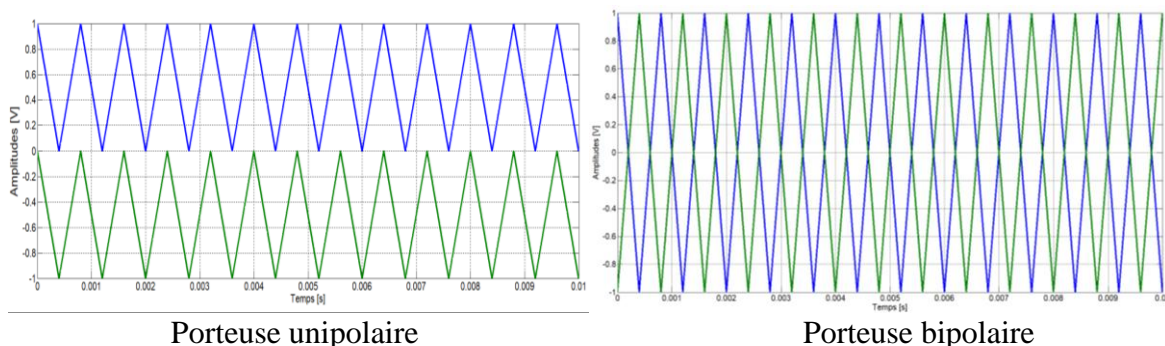


Figure II.28 : Différents types de porteuses

II-4-2.2. MLI vectorielle (SVM)[25]

La modulation vectorielle est un cas particulier de la modulation de largeur d'impulsion. L'objectif de la modulation vectorielle est la détermination des portions de temps (durée de commutation) qui doivent être allouées à chaque vecteur durant une période d'échantillonnage T_e .

Considérons comme exemple pour l'onduleur à pont complet, le premier état de commutation de convertisseur (100). Le vecteur \vec{V}_1 représente les pôles de sortie a , b et c qui sont reliés respectivement à la source positive, négative, négative.

$$v_{do} = \{E, -E, -E\}_{d=a,b \text{ ou } c} \quad (\text{II-25})$$

$$\text{Donc } v_{dn} = \left\{4\frac{E}{3}, -2\frac{E}{3}, -2\frac{E}{3}\right\} \quad (\text{II-26})$$

Le vecteur résultant de ces trois vecteurs est \vec{V}_1 (figure II.29)

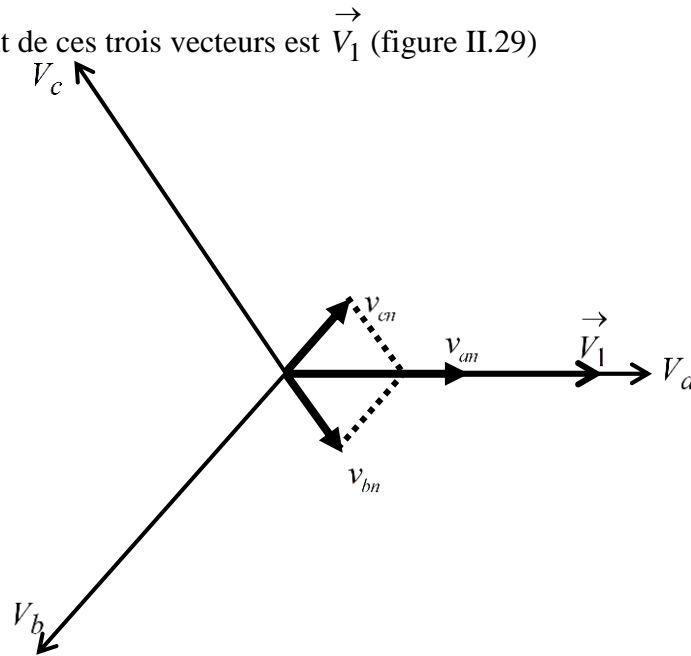


Figure II.29 : Représentation de \vec{V}_1

Puisque chacun d'eux peut être dans deux positions distinctes, il existe huit combinaisons possibles. Nous pouvons ainsi dissocier huit vecteurs dont six, non nuls, ont une norme égale à $2\sqrt{\frac{2}{3}}E$. Ils sont appelés "vecteurs actifs". Les deux autres, de norme nulle, sont désignés comme « vecteurs de roue libre ». Deux vecteurs actifs successifs sont déphasés de 60° l'un par rapport à l'autre. Ils définissent un hexagone (figure II.30). Ces huit vecteurs sont les seuls disponibles pour réaliser des consignes vectorielles de tension.

Pour l'onduleur en pont complet, l'onduleur délivre les tensions de sortie V_s qui doit être fidèle à un objectif fixé à l'entrée (la consigne $v_{ref}(t)$).

$$\begin{cases} V_{ref} = rE \sin(\omega_s t) \\ V_{ref} = rE \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref} = rE \sin\left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II-27})$$

r : Taux de modulation. Il donne le rapport entre l'amplitude de la modulante v_{ref} à la valeur crête de la tension continue.

La transformation dans le repère (α, β) donne :

$$\begin{cases} V_{ref\alpha} = r \sqrt{\frac{3}{2}} E \sin(\omega_s t) \\ V_{ref\beta} = r \sqrt{\frac{3}{2}} E \cos(\omega_s t) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

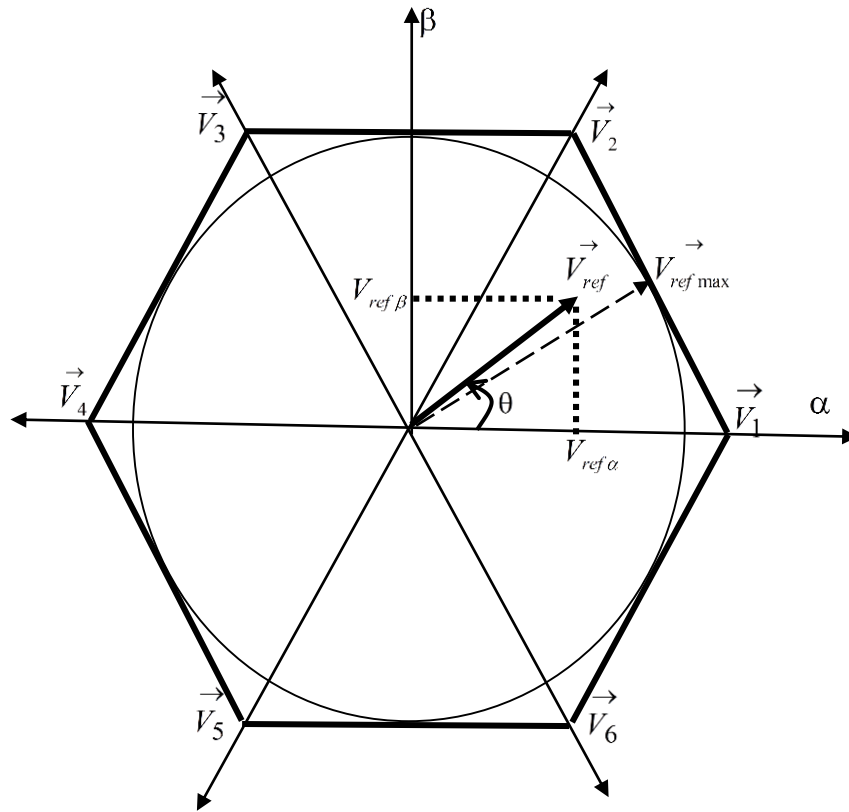


Figure II.30 : Représentation du polygone de commutation

La valeur maximale de la tension de référence est égale à :

$$V_{smax} = \left| \vec{V}_1 \right| \cos(30^\circ) = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} E \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{2} E \quad (\text{II-29})$$

Par ailleurs, la relation (II.28) montre que l'amplitude maximale de la tension désirée est :

$$V_{refmax} = r_{max} \sqrt{\frac{3}{2}} E \quad \text{donc} \quad r_{max} = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{\frac{3}{2}} E} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (\text{II-30})$$

Donc tant que l'extrémité du vecteur \vec{V}_{ref} reste à l'intérieur de l'hexagone défini par les extrémités des vecteurs \vec{V}_1 à \vec{V}_6 , le taux de modulation $r \leq \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.154$. Par contre, pour la MLI triangulo-sinusoïdale le taux de modulation $r_{max} = 1$.

II-5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée de l'onduleur à deux niveaux et le principe de fonctionnement de la configuration de l'onduleur en pont et en pont complet.

D'après l'étude comparative et les résultats de simulation entre la technique pleine onde et la technique MLI, on peut dire que ce dernier est de loin plus performant. L'emploi de cette technique permet, en augmentant l'indice de modulation, de repousser les harmoniques vers des fréquences plus élevées. Le but principal de cette technique est de régler la fréquence et la valeur efficace de la tension de sortie et de rejeter les harmoniques indésirables vers les fréquences élevées, leurs amplitudes devenant alors négligeables.

Pour les applications photovoltaïques et quel que soit le type de l'onduleur, nécessitent une capacité d'entrée afin de réaliser une source de pour soulager la caractéristique I-V du GPV pendant les appels de courant dus aux commutations.

Après cette étude théorique, nous allons effectuer au chapitre suivant une simulation complète de la technique MLI.

CHAPITRE III

*S*imulation de la technique *MLI* appliquée
aux onduleurs de tension

Simulation de la technique MLI appliquée aux onduleurs de tension

III-1. Introduction

Dans le chapitre précédent, une étude des deux techniques de modulation MLI triangulo-sinusoidale et SVM a été effectuée. Le but de ce chapitre consiste en la simulation de ces types de modulations et l'analyse spectrale des signaux de sorties.

Après avoir étudié la structure les deux technique MLI, nous allons réaliser une étude comparative entre les performances d'un onduleur à deux niveaux commandé par une MLI sinus-triangle et celui commandé par une MLI vectorielle. Aussi on va réaliser une étude des performances obtenues par l'onduleur à trois niveaux.

III-2. Simulation

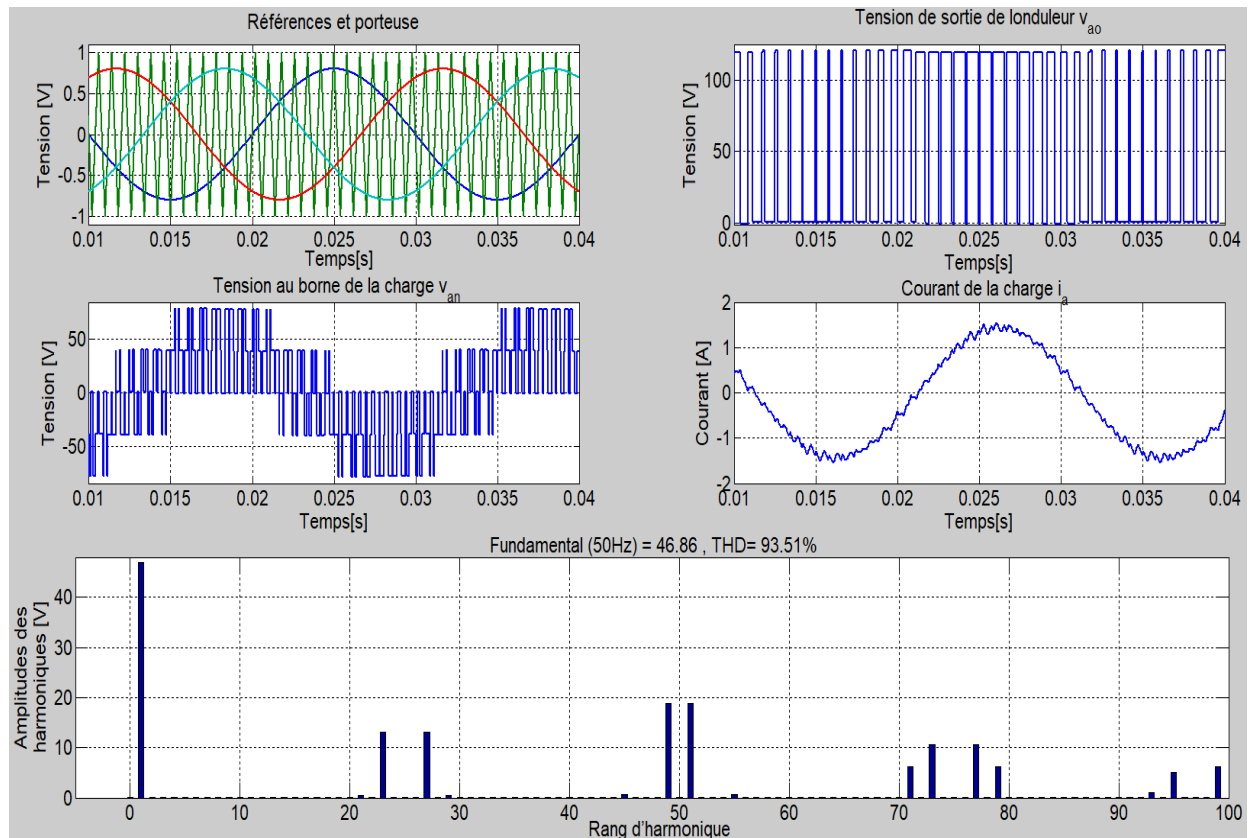
Pour pouvoir vérifier le fonctionnement de notre système, un test de simulation est nécessaire. Nous avons utilisé le logiciel Matlab et son outil de simulation très puissant qui est le SIMULINK. Nous proposons de simuler le fonctionnement des onduleurs, où la tension d'alimentation est égale à 60V pour l'onduleur triphasé en pont complet et à 120V pour la l'onduleur triphasé en pont, à une fréquence de 50Hz, et un débit sur une charge inductive RL .

Sur les figures suivantes, nous avons représenté :

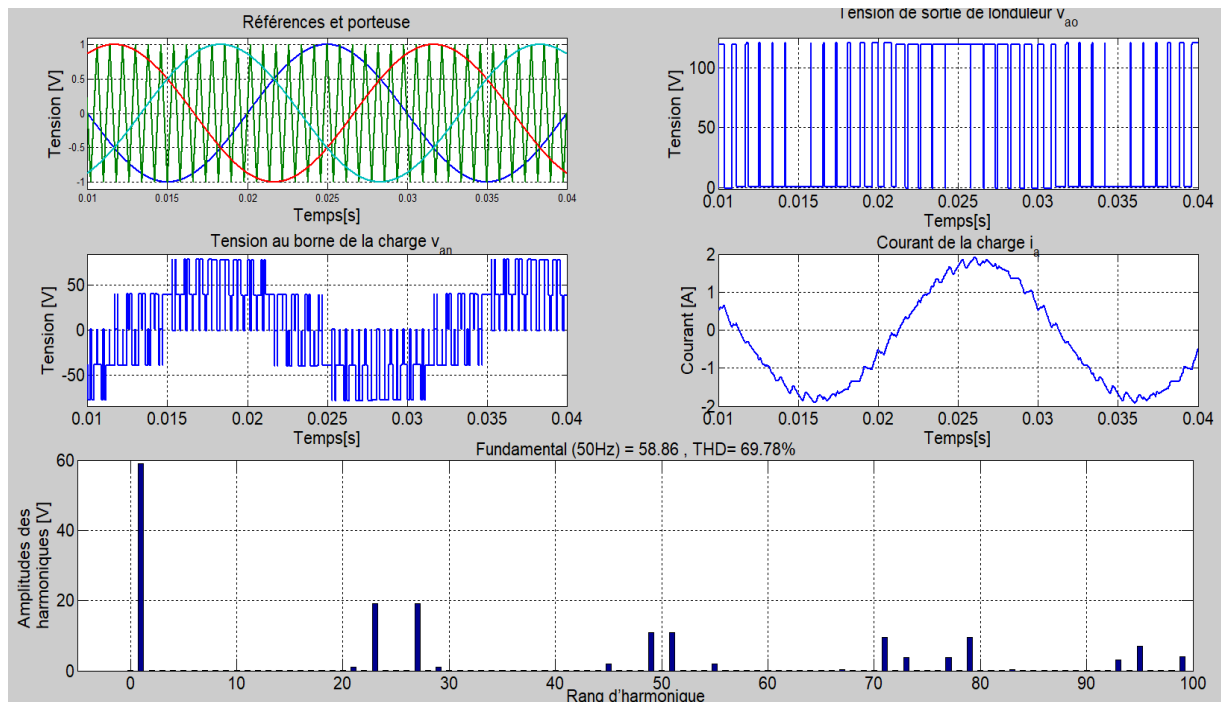
- la tension v_{ao} de sortie de la première phase,
- la tension v_{an} ainsi que son analyse spectrale,
- le courant de sortie de la première phase.

III-2-1. Onduleur à deux niveaux

Dans cette section, ne nous simulons le cas de la structure de l'onduleur à pont complet à cause des mêmes résultats obtenus pour les deux structures de l'onduleur, concernant les tensions et les courants de sortie.

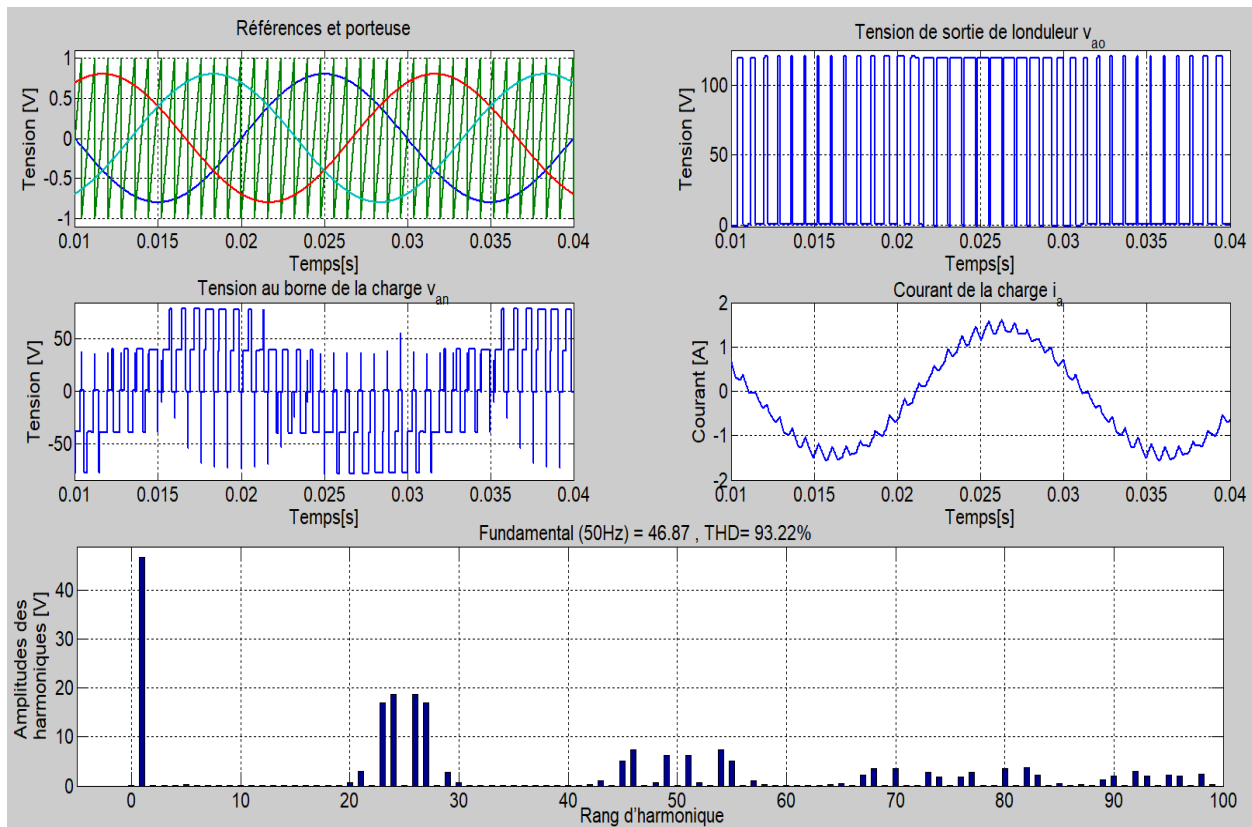


$$m = 25 \text{ et } r = 0.8, THD_{courant} = 5.82\%$$

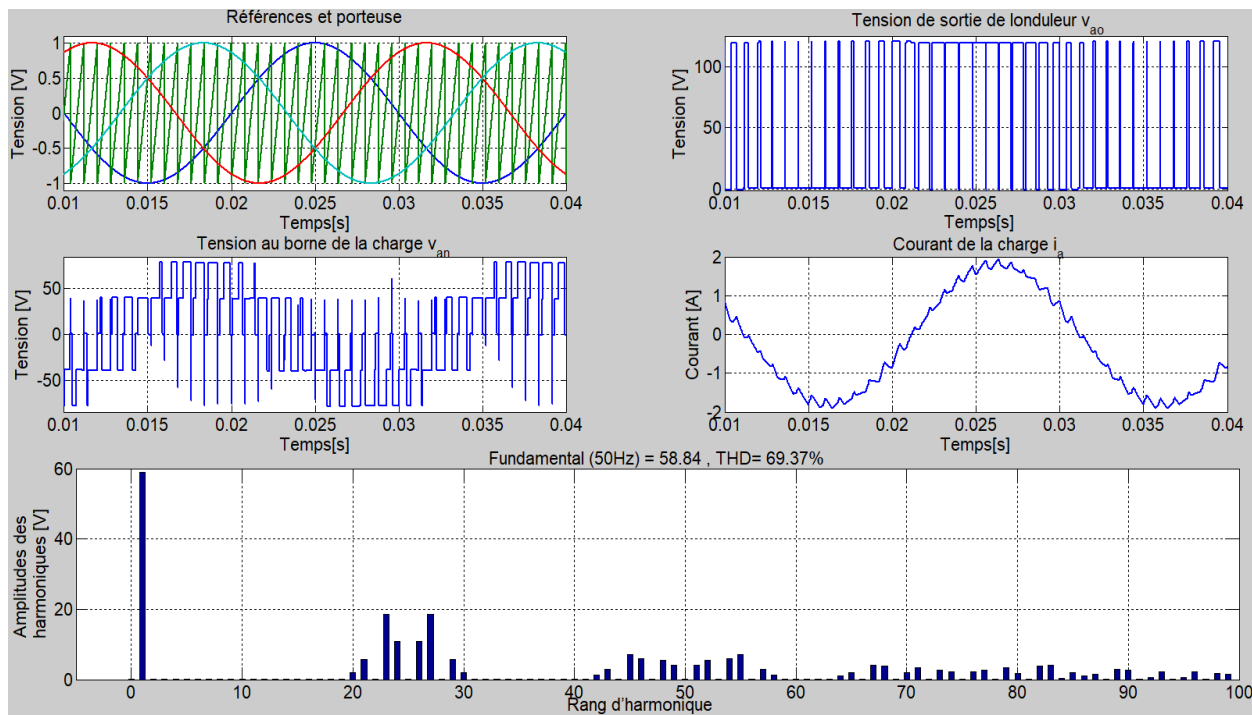


$$m = 25 \text{ et } r = 1, THD_{courant} = 5.07\%$$

Figure III.1 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoidale avec un porteuse bipolaire - *Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r*

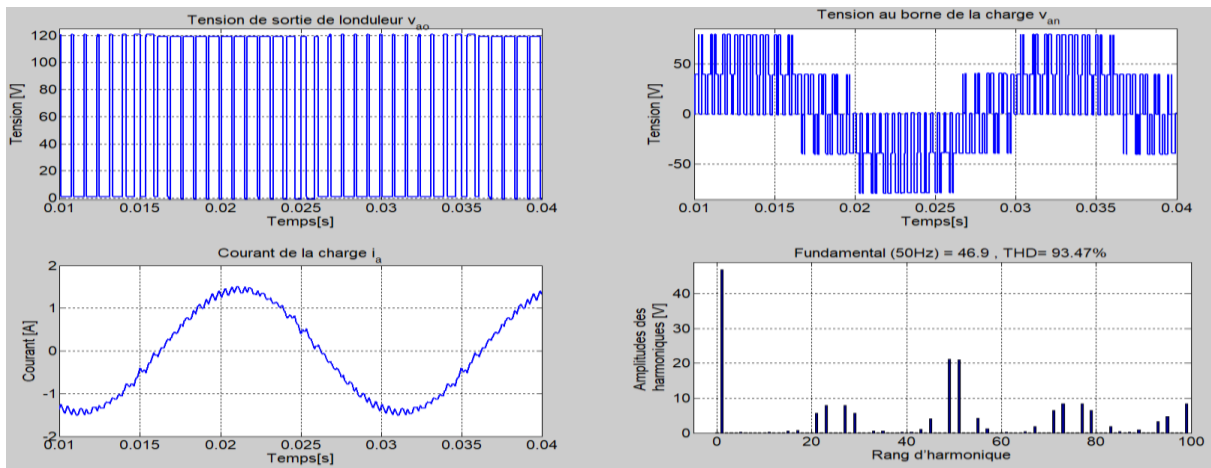


$m = 25$ et $r = 0.8$, $THD_{courant} = 8.24\%$

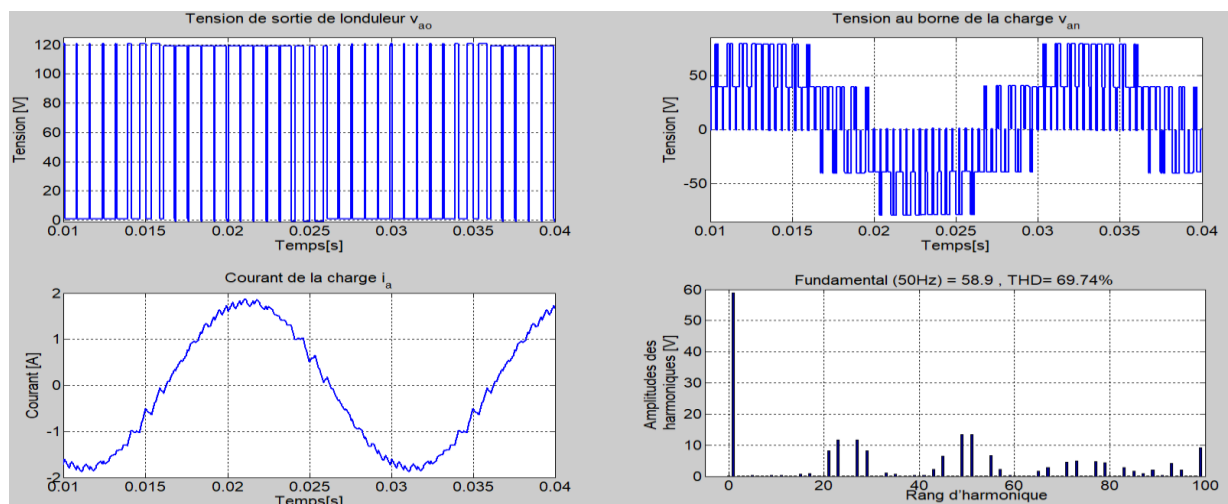


$m = 25$ et $r = 1$, $THD_{courant} = 5.84\%$

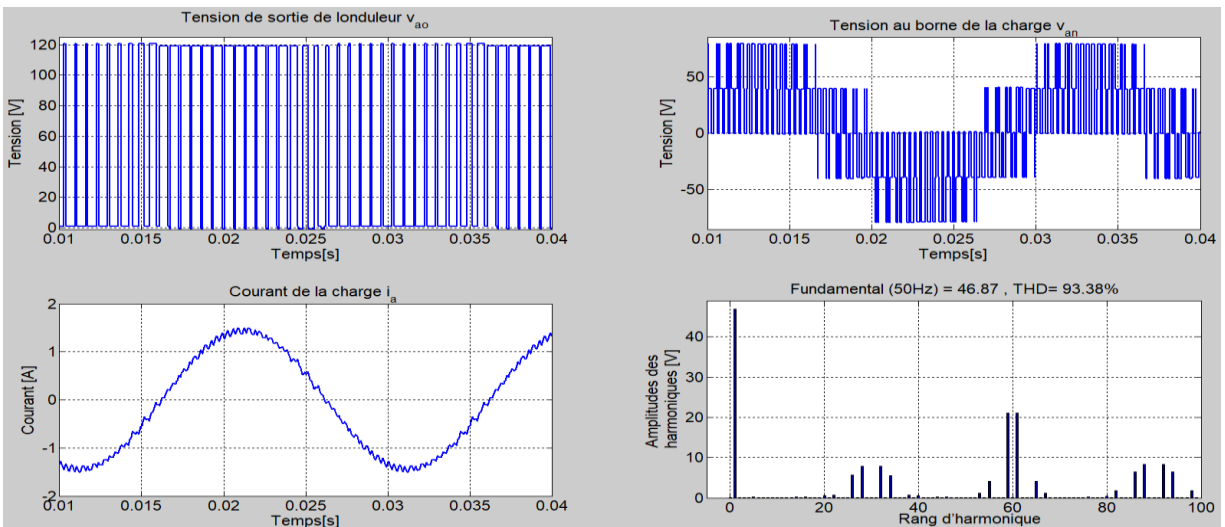
Figure III.2 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse dent de scie - *Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r*



$m = 25$ et $r = 0.8$, $THD_{courant} = 4.81\%$



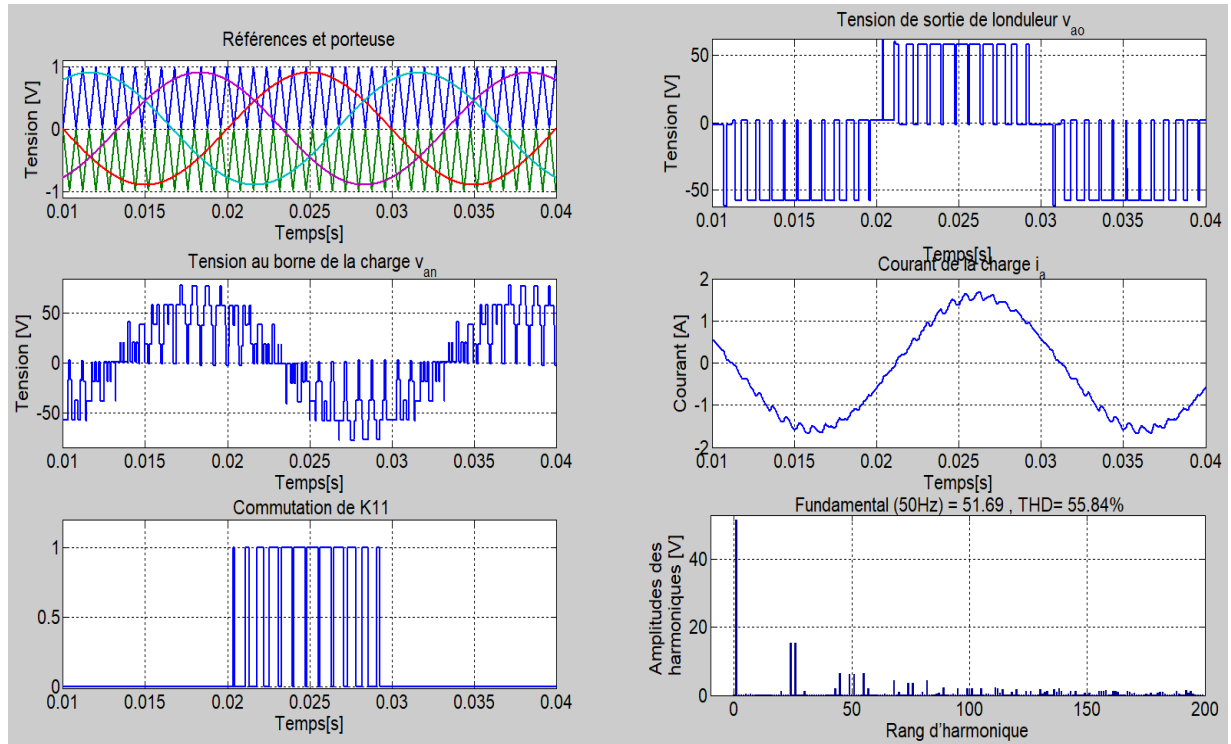
$m = 25$ et $r = 1$, $THD_{courant} = 4.24\%$



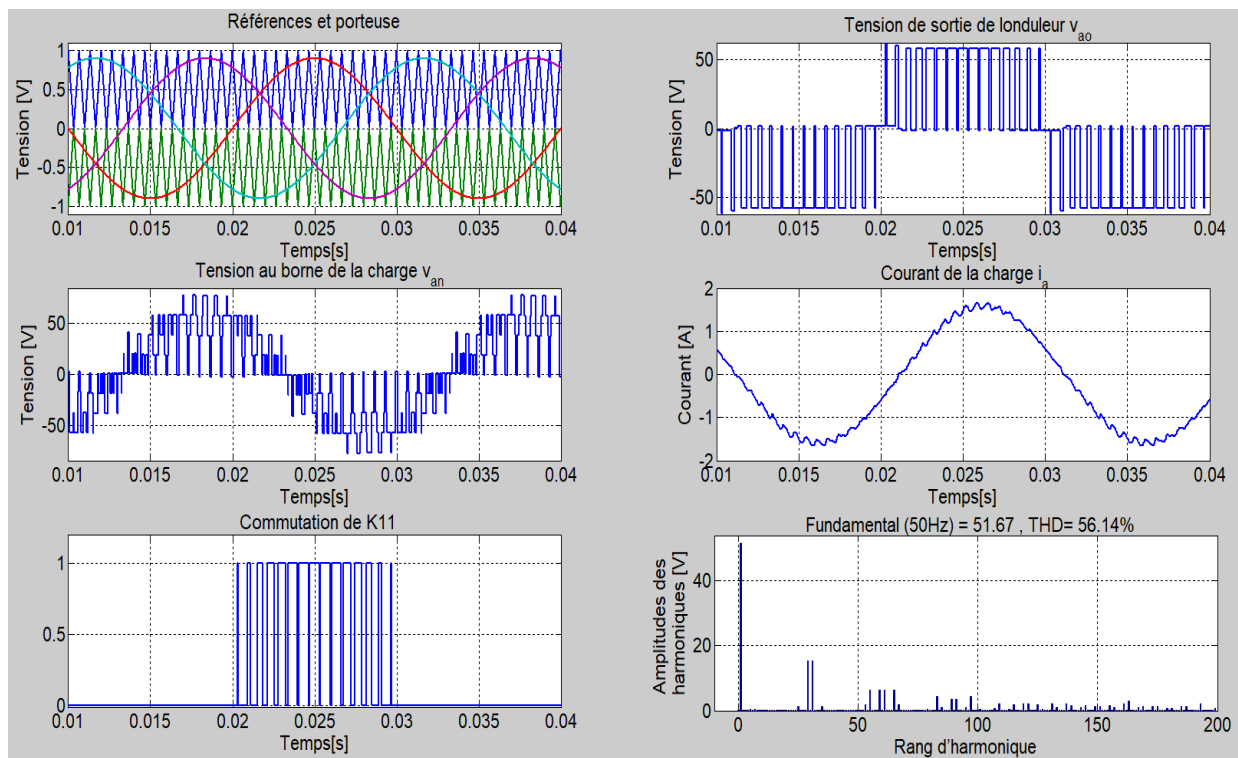
$m = 30$ et $r = 0.8$, $THD_{courant} = 3.99\%$

Figure III.3 : Résultat de simulation de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie SVM - *Observation de l'effet de la variation du coefficient de réglage r et du taux de modulation m*

III-2-2. Onduleur à trois niveaux

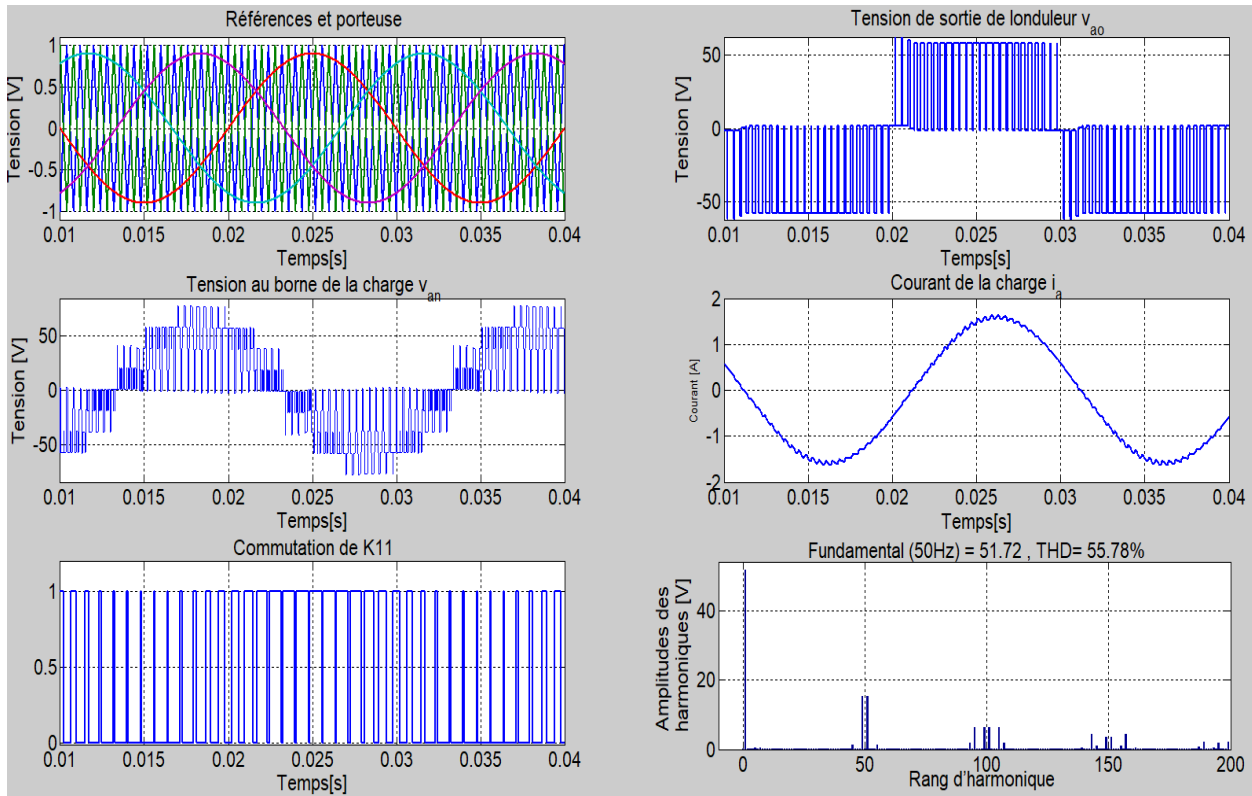


$m = 25$ et $r = 0.9$, $THD_{courant} = 4.58\%$

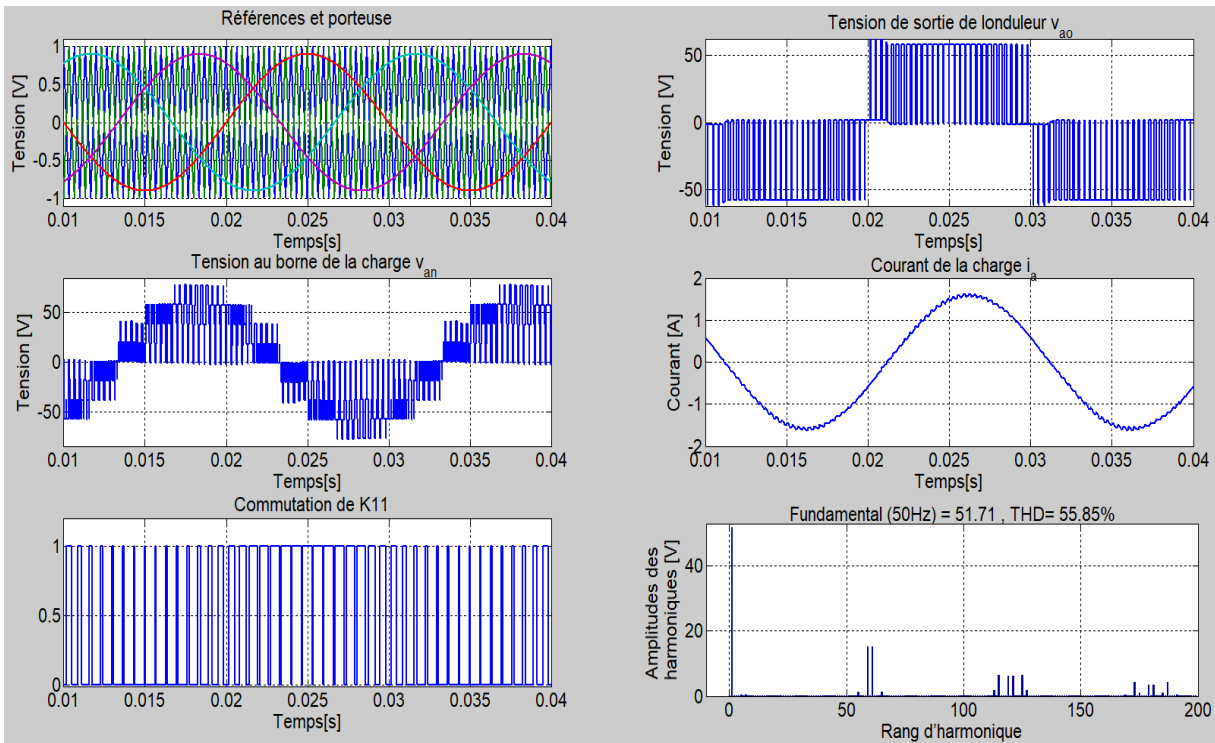


$m = 30$ et $r = 0.9$, $THD_{courant} = 3.83\%$

Figure III.4 : Résultat de simulation de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoïdale avec un porteuse unipolaire - *Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m*



$m = 25$ et $r = 0.9$, $THD_{courant} = 2.32\%$



$m = 30$ et $r = 0.9$, $THD_{courant} = 1.95\%$

Figure III.5 : Résultat de simulation de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie MLI triangulo-sinusoidale avec un porteuse bipolaire - *Observation de l'effet de la variation du taux de modulation m*

III-2-3. Etude comparative

Pour les deux techniques de modulation (triangulo-sinusoidale, SVM), et pour l'onduleur à deux niveaux, les amplitudes et THD de la tension de sortie v_{an} sont donnés, en fonction du taux de modulation r dans les mêmes conditions (m constant), sur la figure III.6.

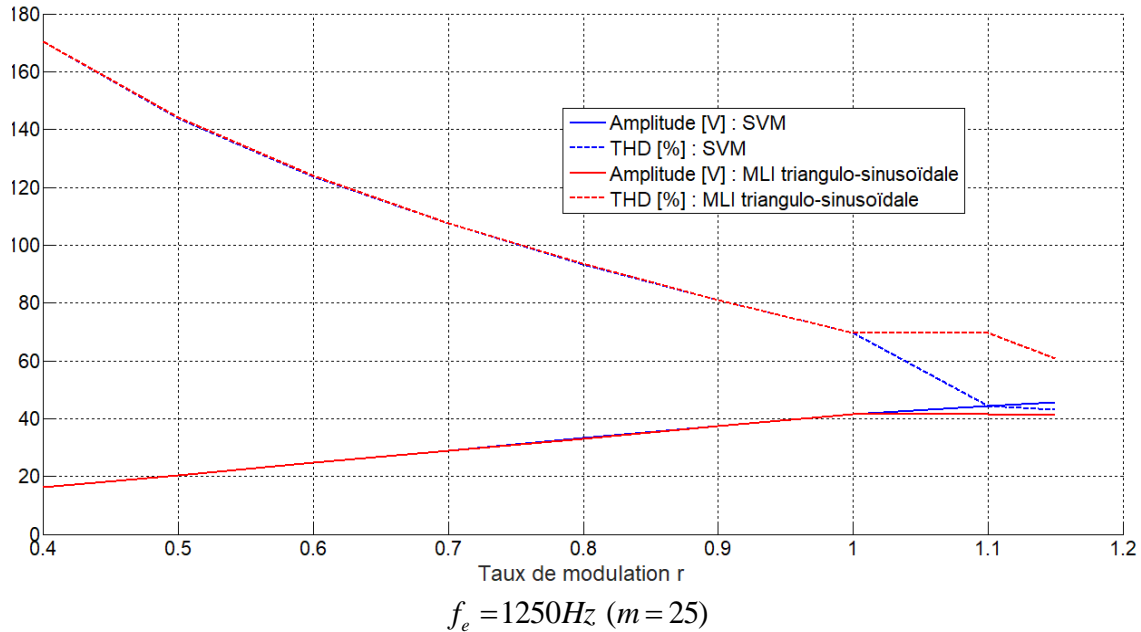


Figure III.6 : Profils de THD et l'amplitude du V_{an} produits par les deux techniques MLI de l'onduleur à deux niveaux

III-2-4. Interpretations et commentaires

Le THD de la tension et du courant diminue avec l'augmentation de r .

Les résultats de simulations effectuées sur les onduleurs à deux niveaux avec la technique SVM montrent que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de la porteuse $f_p = mf$ avec f fréquence de la référence. Le spectre de la tension montre la présence d'harmoniques pairs et impairs pour le cas m pair (pair pour un multiple impaire et impaire pour un multiple pair), donc on constate qu'il n'y a pas de symétrie de la tension simple v_{ao} pour les valeurs de m pair et seulement des harmoniques impairs pour le cas m impair.

L'augmentation du nombre de niveaux permet d'obtenir des performances équivalentes à celles de la forme sinusoidale. Les allures globales de la tension et du courant de sortie (courant de charge) de la structure à trois niveaux ont des formes meilleures que celles des courbes des tensions et des courants de sortie à deux niveaux. Ce résultat est visible sur les THD de tension et de courant et sur les spectres des signaux de sortie.

Les résultats de simulations effectuées sur les onduleurs à trois niveaux avec porteuse unipolaire montrent que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de la porteuse $f_p = mf$ avec f fréquence de la référence. Le spectre de la tension montre la présence d'harmoniques pairs et impairs pour le cas m pair et impair (pair pour un multiple impaire et impaire pour un multiple pair), donc on constate qu'il n'y a pas de symétrie de la tension simple v_{ao} .

Les résultats de simulations effectuées sur les onduleurs à trois niveaux avec porteuse bipolaire montrent que les harmoniques de tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence de la porteuse $f_p=2mf$ avec f fréquence de la référence. Le spectre de la tension montre la présence seulement d'harmoniques impairs pour le cas m pair ou impair.

Les formes d'ondes de de commutation pour la MLI avec porteuse unipolaire et bipolaire ne sont pas identiques. Pour la MLI avec porteuse unipolaire, les interrupteurs repose certain moment, donc les pertes de commutation sont diminuées. Les porteuses triangulaires bipolaires sont meilleures que les porteuses unipolaires du point de vue de la pollution harmonique.

Pour la MLI triangulo-sinusoïdale, le mécanisme de génération du modèle de commutation, y compris l'intersection entre un vecteur de référence et un porteuse, sont les mêmes pour les trois types de porteuses. La seule différence est que la forme de porteuse est prend des différentes formes.

Nous avons comparé les valeurs des THD obtenus par la technique MLI triangulo-sinusoïdale aux valeurs des THD obtenus par la technique MLI vectorielle dans les même conditions (r , m constants). Les résultats montrent les profils de THD de V_{an} produit par les deux techniques de MLI, sont presque identiques. Une comparaison effectuée en se basant sur de la THD et l'amplitude de la composante fondamentale entre $r=1$ et $r=1.15$, montre la supériorité de la modulation vectorielle SVM.

La figure III.6 montre la variation de l'amplitude du fondamental de la tension de sortie en fonction du taux de modulation r . Le taux de modulation r pour la modulation triangulo-sinusoïdale permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de 0 ($r=0$) à E ($r=1$). L'amplitude de ce fondamental, se sature à E . Pour la modulation SVM, ce taux de modulation r permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de 0 ($r=0$) à $1.15E$ ($r=1.15$). L'amplitude de ce fondamental, se sature à $1.15E$. Cette remarque reste valide pour l'onduleur à trois niveaux.

Donc pour une tension de sortie V_{eff} , pour la MLI triangulo-sinusoïdale il faudra une tension d'alimentation E qui comparer à $\frac{E}{1.15}$ obtenu avec la technique SVM.

L'onduleur délivre les tensions de sortie v_s qui doit être fidèle à un objectif fixé à l'entrée (la consigne $v_{ref}(t)$).

$$\begin{cases} v_{refao} = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t) = rU \sin(\omega t) \\ v_{refbo} = \sqrt{2}V_{eff} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = rU \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{refco} = \sqrt{2}V_{eff} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = rU \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (III.01)$$

r : Taux de modulation, ou coefficient de réglage en tension, ou encore rapport cyclique. Il donne le rapport entre l'amplitude de la modulante v_{ref} à la valeur crête de la tension continue.

U est la tension d'alimentation, elle prend une valeur de E pour l'onduleur en pont complet et elle prend une valeur de $\frac{E}{2}$ pour l'onduleur en pont (E est la tension doit appliquer à l'entrée de l'onduleur).

Si m est assez grand, le fondamental de la tension nominale de sortie d'une phase V_{effn} est pratiquement égal à la tension de référence pour $r=1$, on prend alors :

$$U = \sqrt{2}V_{effn} \quad (III.02)$$

Donc, pour choisir la valeur de la tension d'alimentation, on prend $r=1$. Le tableau III.1 résume comment calculer la valeur de tension à l'entrée de l'onduleur selon le type de l'onduleur et le mode de couplage du récepteur (étoile, triangle).

Tableau III.1 : Valeurs de tension à l'entrée de l'onduleur pour une tension de sortie V_{effn}

Type de l'onduleur Couplage du récepteur	Pont complet	Pont
Etoile	$U = E = \sqrt{2}V_{effn}$ $\Rightarrow E = \sqrt{2}V_{effn}$	$U = \frac{E}{2} = \sqrt{2}V_{effn}$ $\Rightarrow E = 2\sqrt{2}V_{effn}$
Triangle V_{effn} est la tension pour un brin a	$U = E = \sqrt{2} \frac{V_{effn}}{\sqrt{3}}$ $\Rightarrow E = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{effn}$	$U = \frac{E}{2} = \sqrt{2} \frac{V_{effn}}{\sqrt{3}}$ $\Rightarrow E = 2\sqrt{\frac{2}{3}}V_{effn}$

Comme on a déjà mentionné dans la § II-4-1 pour obtenir une tension d'une valeur efficace V_{eff} , la tension d'alimentation pour l'onduleur en pont est double par rapport à celle pour l'onduleur en pont complet, mais dans ce dernier utilise trois tensions d'alimentation séparée. Nous proposons de simuler le fonctionnement des onduleurs, pour voir les courant et d'entrée de l'onduleur à une fréquence de $50Hz$ et pour $r=1$, où la tension d'alimentation est égale à $60V$ pour l'onduleur triphasé en pont complet et à $120V$ pour la l'onduleur triphasé en pont pour une charge couplée en étoile. Pour une charge couplé en triangle, la tension d'alimentation est égale à $\frac{60}{\sqrt{3}}V$ pour l'onduleur triphasé en pont complet et à $\frac{120}{\sqrt{3}}V$ pour la l'onduleur triphasé en pont. Nous obtenons le tableau III.2.

On peut dire que pour le même récepteur, le courant d'entré pour l'onduleur en pont complet est inférieur par rapport au onduleur en pont, c'est-à-dire les panneaux connectés dans une installation utilise les onduleurs en pont complet à un courant de branche totale inférieur de ceux dans une installation utilise les onduleurs en pont.

Tableau III.2 : Valeurs moyennes du courant d'entrée : pour l'onduleur en pont complet, la valeur désigne le courant d'entrée de chaque cellule

Type de l'onduleur Couplage du récepteur	Pont complet	Pont
Etoile	0.8831A	1.441A
Triangle	1.443A	2.53A

III-3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé différentes stratégies de commande MLI appliquées aux onduleurs de tension à deux et à trois niveaux. Ces stratégies étudiées ont pour but de générer une source de tension alternative la plus sinusoïdale possible.

L'augmentation de la fréquence d'échantillonnage permet, de rejeter les harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et faciliter, donc, leurs filtrages. Cependant, on ne peut plus faire croître ce paramètre indéfiniment car il est limité par les temps de commutation des interrupteurs de l'onduleur et donc par la largeur minimal des impulsions.

Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur de 2 à 3, fait diminuer forcément la distorsion harmonique totale THD. Par contre ce n'est plus le cas pour l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage, le THD diminue un petit peu.

L'avantage de la modulation vectorielle est que la variation de taux de modulation r permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $0 (r = 0)$ à $1.15E$. Donc la technique SVM a un avantage par apport à la MLI triangulo-sinusoïdale.

Ces techniques sont particulièrement intéressantes dans le cas d'onduleurs triphasés. Elles rendent possibles le contrôle de l'amplitude et de la fréquence des tensions aux bornes du récepteur. Dans le chapitre suivant, on va discuter comment choisir les paramètres d'entrée et sortie pour adapter aux applications photovoltaïques.

CHAPITRE IV

Application Aux Système Photovoltaïque

Application aux Systèmes Photovoltaïques

IV-1. Introduction

Dans certaines régions, l'accès de l'électricité représente un des problèmes les plus urgents que rencontrent plusieurs pays en voie de développement. La plus grande partie de la population touchée par ce problème se retrouve en milieu rural, éloignée des grands réseaux de distribution d'électricité dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou à accès difficiles. La technologie du solaire photovoltaïque (PV) fait partie d'une nouvelle famille de petites centrales de production d'électricité à faibles émissions de carbone et arrivant à une certaine maturité technologique, s'avère être une solution de plus en plus viables pour répondre aux besoins en électricité des bâtiments commerciaux et résidentiels dans bien des régions du monde et plus particulièrement en zone urbaine.

Les systèmes PV ne se limitant plus aux sites isolés, n'exigent pas d'investir des sommes colossales dans des grandes centrales et des systèmes de transport et de distribution. La tendance actuelle est de raccorder des installations PV individuelles ou collectives au réseau de distribution électrique.

Les deux grandes architectures de systèmes PV (Ici système autonome : pompage PV au fil de soleil et système PV connecté au réseau électrique) utilise le couplage AC (Onduleurs). Nous proposons dans cette partie une analyse critique basée sur le principe de fonctionnement d'un système PV dans le but de mieux cerner les avantages et inconvénients de chaque structure de l'onduleur étudié dans le chapitre II.

IV-2. Description générale de la centrale photovoltaïque connectée au réseau

IV-2.1. Principe

Une centrale photovoltaïque connectée au réseau, schématisée en figure IV.1 ; est constituée des blocs fonctionnels suivants :

Le générateur est formé par de modules PV montés et fixés sur une structure métallique. Il est dimensionné pour adapter l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Le groupe convertisseur (onduleur) a pour rôle principale de convertir en puissance alternative avant de l'injecter dans le réseau, en synchronisation avec le réseau et permet d'adapter les caractéristiques de l'énergie produite par le générateur PV (DC) aux besoins du réseau électrique, auquel on peut ajouter quelques fonctions supplémentaires de contrôle nécessaires au fonctionnement de l'ensemble de la centrale connectée au réseau qui seront :

- suivi du point de puissance maximale du générateur PV.
- connexion et déconnexion du réseau en fonction des conditions de celui-ci et du rayonnement incident sur le générateur.

- détection des pertes d'isolement.
- mesure d'énergie, etc.

Pour accomplir ce rôle, ce groupe de convertisseurs est composé d'un étage de hacheur (survolteur ou/et dévolteur) ayant pour fonction la poursuite du point de puissance maximum (MPPT). Le contrôle du rapport cyclique du convertisseur DC/DC permettra de maintenir ce point au point de puissance maximale, quelque soit les variations de l'éclairement et de la température comme on peut le voir dans la figure IV.2 [26].

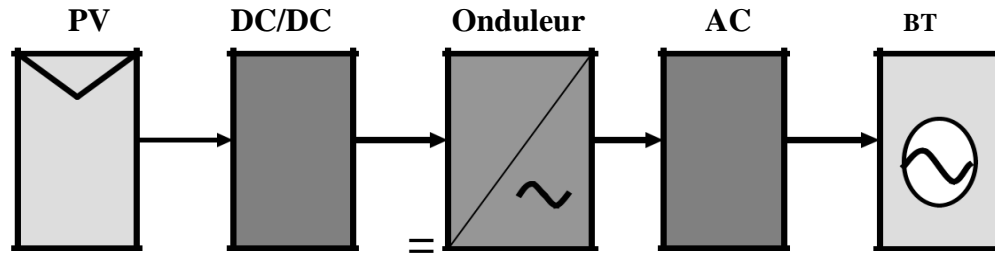


Figure IV.1 : Symbole Schéma d'une centrale photovoltaïque connectées au réseau

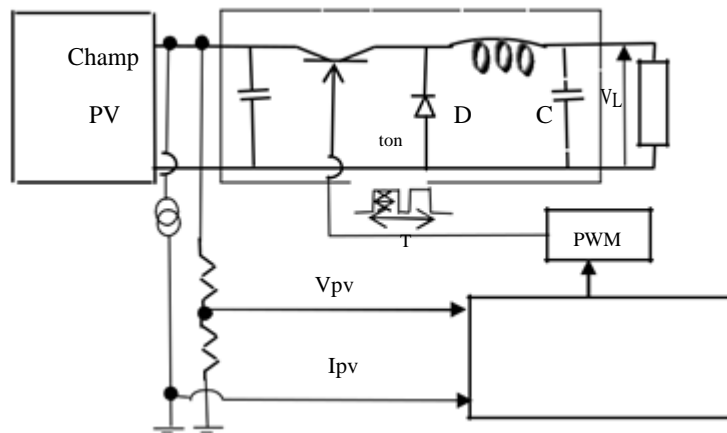


Figure IV.2 : Schéma bloc d'un convertisseur MPPT

La qualité de l'onduleur connecté au réseau se juge essentiellement sur quatre critères [27] :

- Degré d'exploitation du générateur PV ou suivi du point de puissance maximale;
- Rendement de conversion ou pertes introduites par le convertisseur durant le processus;
- Qualité de l'énergie générée (émission d'harmoniques, facteur de puissance, production des interférences.)
- Sécurité pour les personnes, le matériel et le réseau électrique.

La majorité des onduleurs de petite ou moyenne puissance utilisés actuellement sont réalisés à l'aide d'IGBT, avec une fréquence de commutation entre 2 et 20 KHz et de puissance nominale entre 1 et 50 kVA [28].

On peut classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non. Dans ce chapitre, on va étudier les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage. Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité (figure IV.3).

Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions imposées à la qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un panneau de distribution. Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité PV dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. La nuit ou par faible ensoleillement durant les périodes où les besoins des consommateurs sont supérieurs à la production PV, le réseau fournit l'appoint nécessaire, l'équilibre énergétique peut être ainsi obtenue.

Lorsque le réseau est à l'arrêt, le système PV est automatiquement coupé et déconnecté du réseau à partir du panneau de distribution. Ce facteur de sécurité supplémentaire est exigé pour s'assurer que la centrale PV est coupée du réseau lorsque celui-ci est hors service pour raison de maintenance ou autre (cette fonction est appelée îlotage ou islanding).

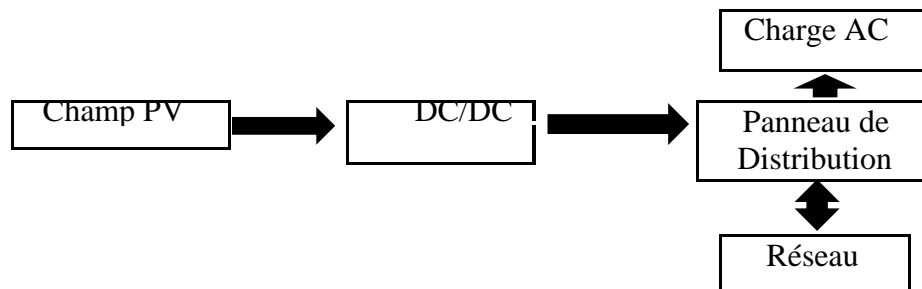


Figure IV.3 : Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque (PV) sont combinées aux besoins des consommateurs d'énergie avec l'échange d'énergie résultant entre l'édifice et le réseau électrique conventionnel suivant les quatre cas de figures suivants :

- L'électricité PV produite est supérieure aux besoins en électricité de l'habitation : l'électricité en surplus est ainsi injectée dans le réseau.
- L'électricité PV produite est égale aux besoins (cas de figure théorique).
- L'électricité PV produite est inférieure aux besoins ou nulle (la nuit).
- L'électricité PV est entièrement injectée dans le réseau.

Dans tous les cas, l'électricité produite n'est pas gaspillée : dès que les conditions minimales de luminosité seront atteintes, la centrale PV produira. L'énergie PV est de plus totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite afin de suivre l'évolution des besoins ou des moyens financiers.

IV-2.2. Commande des onduleurs connectés au réseau

Les onduleurs connectés au réseau peuvent se distinguer par leurs caractéristiques, leurs propriétés et leurs performances mais de manière plus générale ils peuvent être classés de la manière suivante :

- Leur type de sortie : monophasé ou triphasé.
- Leur principe de fonctionnement en commutation : onduleurs auto-commutés et commutés par le réseau.

Les onduleurs commutés par le réseau utilisent comme composants internes de commutation des semi-conducteurs qui sont contrôlés par le réseau [29]. C'est ainsi que si le courant du réseau est déphasé de la tension réseau on obtiendra un mauvais facteur de puissance du système de conversion ; c'est pour cela que les concepteurs d'onduleurs ajoutent des réseaux de compensation pour améliorer le facteur de puissance et des filtres pour réduire la distorsion harmonique.

La figure IV.4 montre un schéma d'un système PV connecté au réseau à travers un dispositif de conditionnement de puissance constitué du convertisseur DC/DC de poursuite du point de puissance maximale et d'un onduleur DC/AC de tension commandé en PWM.

Le contrôle nécessaire à ce dispositif pour convertir l'énergie continue des modules PV en énergie alternative susceptible d'être injectée dans le réseau est aussi présenté dans ce synoptique.

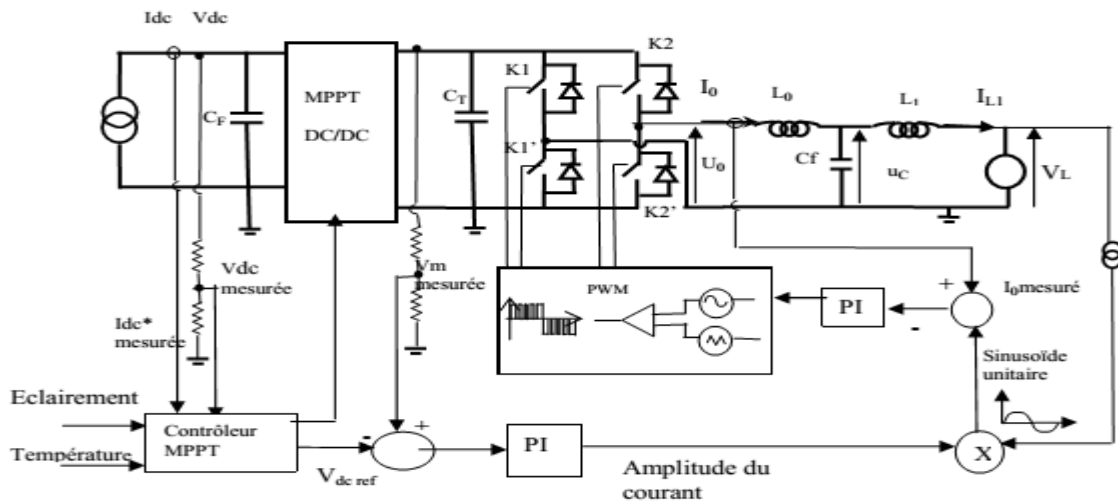


Figure IV.4 : Synoptique d'un onduleur connecté au réseau commandé par une PWM

Un transformateur de fréquence de ligne est parfois utilisé pour élever un niveau d'entrée continue inférieur afin qu'il corresponde à la tension du réseau, et également fournir une isolation.

L'entrée est une onde de référence sinusoïdale dont l'amplitude est proportionnelle à la sortie souhaitée et dotée de la même fréquence. La sortie est le courant I_{L1} qui est injectée dans le réseau. Les commutateurs de l'onduleur sont contrôlés par la méthode de modulation en PWM.

Il est également important de disposer d'un contrôle précis de l'amplitude et de la fréquence de l'onde de référence; c'est ainsi qu'une méthode de synchronisation avec le réseau doit être utilisée [30, 31].

L'entrée de l'onduleur étant un condensateur, pour une tension continue stable, il y a un équilibre entre l'énergie fournie à partir du générateur PV et l'énergie convertie puis injectée dans le réseau.

Le contrôle de la tension continue permet un mode de fonctionnement stable quelque soient les conditions climatiques (irradiation et température). Le contrôle peut être obtenu par un régulateur proportionnel intégral (PI). Des approches plus élaborées permettent un contrôle rapide de la tension avec l'avantage d'un condensateur de plus petite taille [32, 33].

Ceci est important pour la fiabilité puisque ce composant est souvent un des facteurs limitant la durée de vie de l'onduleur.

IV-2.3. Exemple sur terrain

Dans cette partie, on cite types des systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Ces types sont disponibles et utilisés dans le centre de développement des énergies renouvelables (CDER).

Le premier système photovoltaïque connecté au réseau cité dans cette partie est installé sur le toit de l'URERMS, comme indiqué à la figure IV.5, le système photovoltaïque comprend 10 modules. Chaque module PV délivre une tension de 30.36V, donc une tension d'entrée égale à 303V et par suite du type de hacheur est survolteur permet d'élever la tension des panneaux solaires à la tension du bus DC, pour obtenir la tension 220V à la sortie. La technologie de cellules PV utilisée est le modèle SM-250W_c en silicium monocristallin du fabricant Koréen S-Energy avec une puissance installée de 2.5 kW_c. Les modules ont été inclinés à un angle fixe de 28.88° et orientés vers le nord à un angle d'azimut de 12° [34].



Figure IV.5 : Centrale installée au niveau de l'URER/MS

La deuxième centrale est une mini-centrale de 31.5 kW a été installée au niveau de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar (URER/MS) (Figure IV.6). Ce projet entre dans le cadre d'une coopération internationale Algèro-Coréennes entre La Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT, CDER/URER-MS) Algérie et l'Agence Coréenne de Coopération Internationale (KOICA) de Corée du sud. Elle est composée de 3 champs PV, chaque champ PV est composé de 3 branches PV et chaque branche est composée de 14 modules. Les modules PV utilisés sont de type monocristallin de marque BJ Power de 250W. Chaque module PV délivre une tension de 30.36V, donc une tension d'entrée égale à 430V et par suite du type de hacheur est abaisseur permet d'élever la tension des panneaux solaires à la tension du bus DC, pour obtenir la tension 380V à la sortie. La mini-centrale est composée de 126 modules (112 modules fonctionnels et de 14 modules hors usages). Chaque champ PV est connecté à un convertisseur monophasés de 11 kW de marque SMA Solar Technology, l'énergie produite est directement injectée au réseau locale d'Adrar [35].



Figure IV.6 : Mini-Centrale installée au niveau de l'URER/MS

Un système PV connecté au réseau comprend trois sous-réseaux PV, des 30 modules de type PV I-106/12 monocristallins d'une surface totale de 64.8 m² installés sur le toit. Chaque sortie de puissance dans les conditions STC était de 3.15 kW_p, reliant 15 modules en série et 2 en parallèle. Chaque sous-réseau est connecté à un onduleur monophasé via une armoire électrique contenant les protections électriques requises. Chaque module PV délivre une tension de 17.36V, donc une tension d'entrée égale à 255 V, et par suite du type de hacheur est survolteur pour obtenir la tension 380V à la sortie [36].

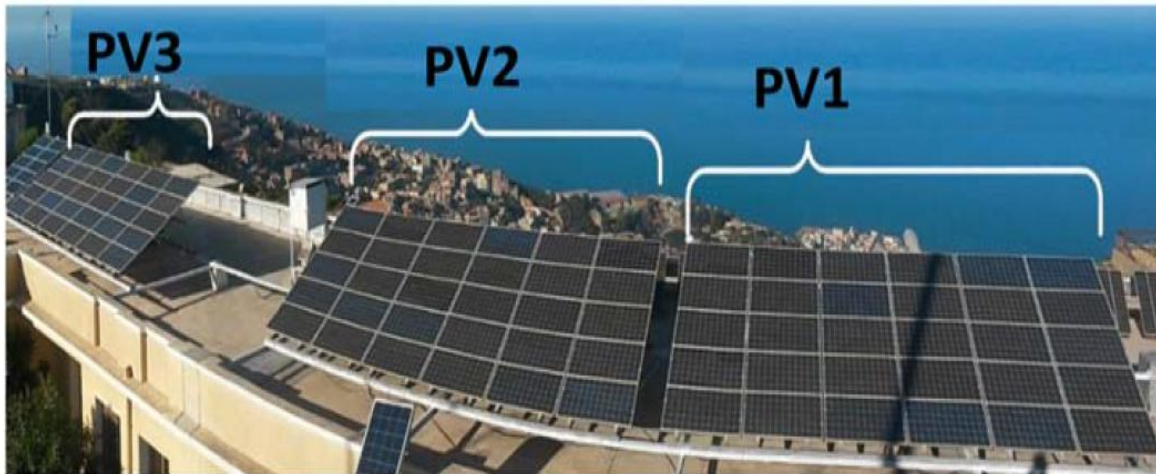


Figure IV.7 : Mini-Centrale installée au niveau du CDER

IV-3. Description générale d'un système de pompage photovoltaïque

IV-3.1. Principe

L'un des plus urgents problèmes auquel on a à faire face dans les régions sahariennes destinées à l'agriculture est l'accès à l'eau potable pour l'irrigation, pour le bétail,...etc. La plus grande partie de la région agraire touchée par ce problème est éloignée des réseaux de distribution d'électricité. Pour tenter de résoudre cette crise, une des solutions est l'introduction de systèmes de pompage photovoltaïques (PV). Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie [4].

En général, la structure de pompage est équipée d'un moteur entraînant une pompe centrifuge immergée (motopompe). L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV) à travers un convertisseur statique. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Les performances demandées aux systèmes de pompage photovoltaïques, qui jouent un rôle très important dans la vie de tous les jours, sont de plus en plus élevées : tant du point de vue des besoins en eau délivrés que de son rendement.

Un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil est représenté comme suit :

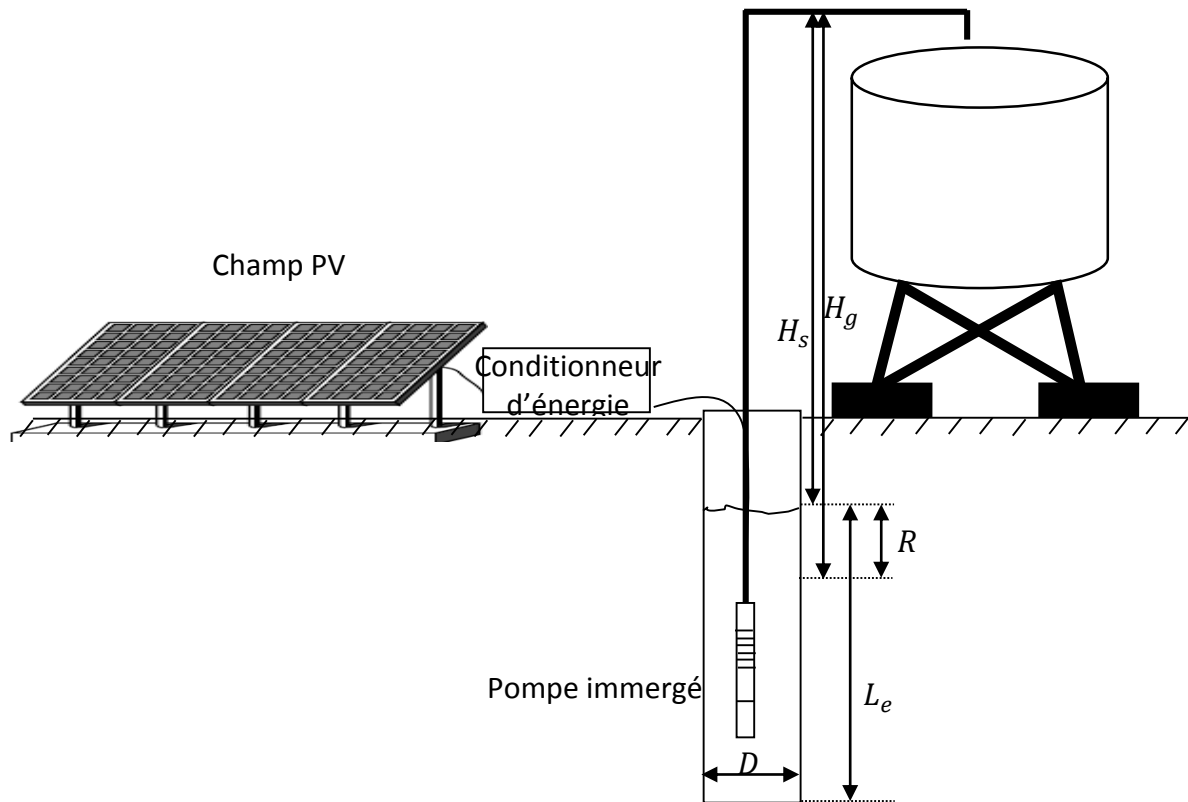


Figure IV.8 : Station de pompage PV

IV-3.2. Principe de fonctionnement d'un système de pompage PV

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Donc l'utilisation d'un onduleur est nécessaire. Le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants où le coût additionnel de l'onduleur est moins significatif (par rapport au coût total de système PV).

Du fait du non linéarité de la caractéristique I-V, nous serons obligé le système PV à fonctionner en fréquence variable selon une commande, une fois l'éclairement ou la température change.

La technique de commande d'un système de pompage PV, basée sur la variation de fréquence statorique selon la variation de l'éclairement et la température de la cellule photovoltaïque. L'optimisation est réalisée sans ajout d'un convertisseur DC/DC à la chaîne. La loi de commande à fréquence variable agit en grande partie sur la minimisation des pertes fer du moment que ces dernières sont fonctions de la fréquence. Alors, pendant la journée, la fréquence de la tension statorique de moteur asynchrone dépend de la valeur d'éclairement tombé sur les panneaux solaire pour extraire la puissance maximale, par l'insertion le dispositif MPPT (maximum power point tracker), induisant une amélioration globale du rendement du système par l'augmentation ou la diminution la fréquence statorique de moteur asynchrone [9]. En plus, le débit et le rendement de la motopompe pour une hauteur manométrique totale (HMT) (si on considère que le diamètre de la roue fixe) dépendent de la vitesse de rotation. Cette dernière est liée à la fréquence statorique. L'onduleur est le composant essentiel. Il a deux rôles : réaliser la conversion DC/AC et assurer le MPPT.

Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon la valeur de l'irradiation. Généralement, la caractéristique du débit en fonction du temps à ciel clair est montrée dans la figure IV.9.

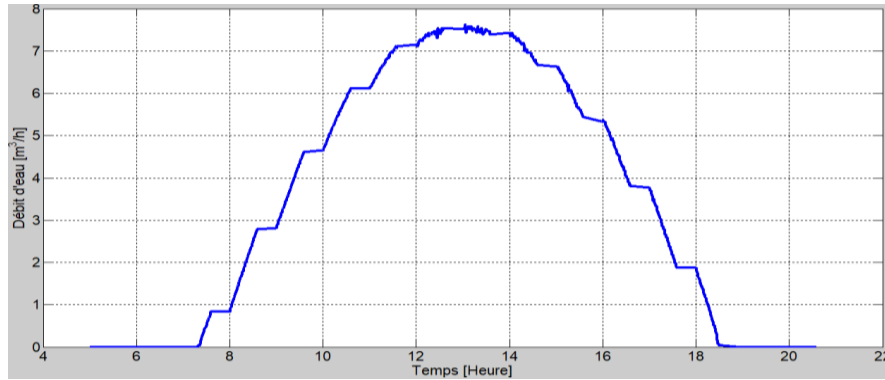


Figure IV.9 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil

La figure IV.11 montre la structure symbolique du système de pompage PV à étudier. Le programme requis pour extraire la puissance maximale de générateur PV est basé sur la contre-réaction de tension pour V_{ref} fixe, utilisant la loi V/f constant.

Cette méthode est basée, essentiellement, sur une simple comparaison entre la tension de sortie de générateur PV avec une tension de référence prédéfinie (figure. IV.10). Celle-ci est une tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales, relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température, pour ajuster continuellement la fréquence de l'onduleur, en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point, afin de générer le maximum de puissance (figure. IV.11). Donc, le système PV ne fournit pas la puissance maximale mais une puissance proche de la puissance maximale.

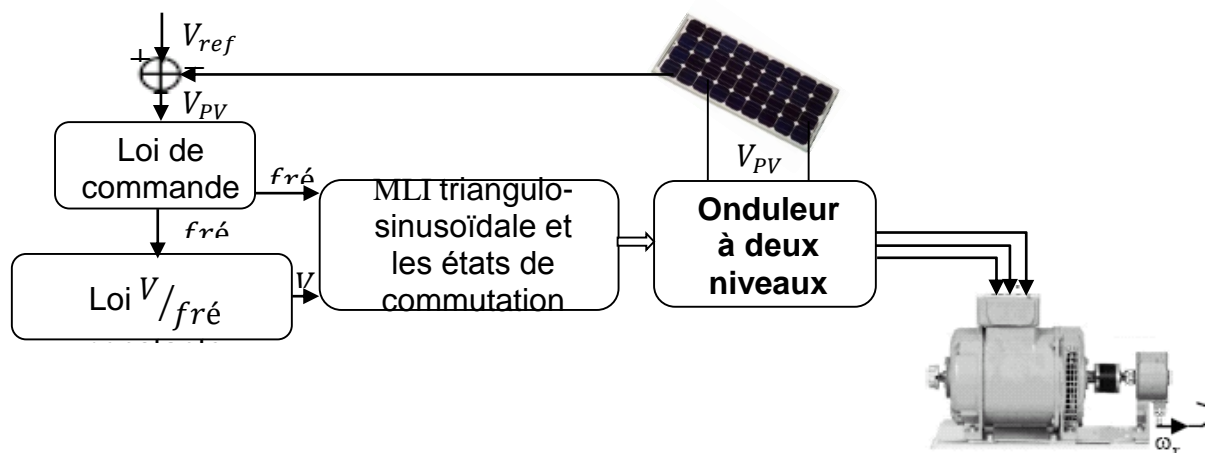


Figure IV.10 : Architecture du contrôleur numérique pour le système de pompage PV expériment

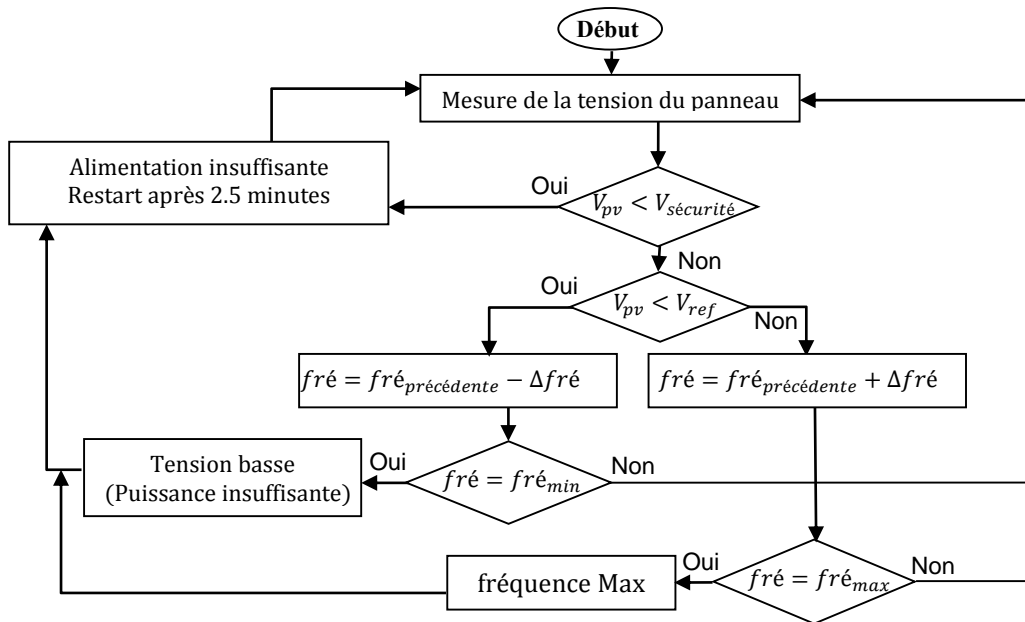


Figure IV.11 : Organigramme de fonctionnement du système de pompage PV expérimenté

Puisque le système PV est autoalimenté, on introduit une condition appelée tension de sécurité $V_{securité}$, pour éviter le dysfonctionnement du système PV suite à une mauvaise alimentation du microcontrôleur.

IV-2.3. Exemple sur terrain

Un système de pompage photovoltaïque installé au niveau de l'URER/MS (figure IV.12) :

Un générateur photovoltaïque de $8N_s \times 2N_p$ de type *IsofotOn* de 75Wc ;

- Un onduleur de 1.5kVA. Il a été réalisé au niveau de l'unité de recherche par l'équipe de l'électronique des systèmes ;
- Une motopompe immergée de 0.55kW.

La partie hydraulique est composée d'un puits, d'un bassin, d'un circuit hydraulique et d'un compteur d'eau.



(a) Générateur photovoltaïque



(b) Onduleur



(c) Puits



(d) Bassin

Figure IV.12 : Photo du système de pompage PV à évaluer

Les figures IV.13 représentent la variation des éclairagements globaux, la température à l'arrière des panneaux PV, la tension, le courant et la puissance de sortie du générateur PV, la tension et le courant de sortie de l'onduleur pour un jour clair.

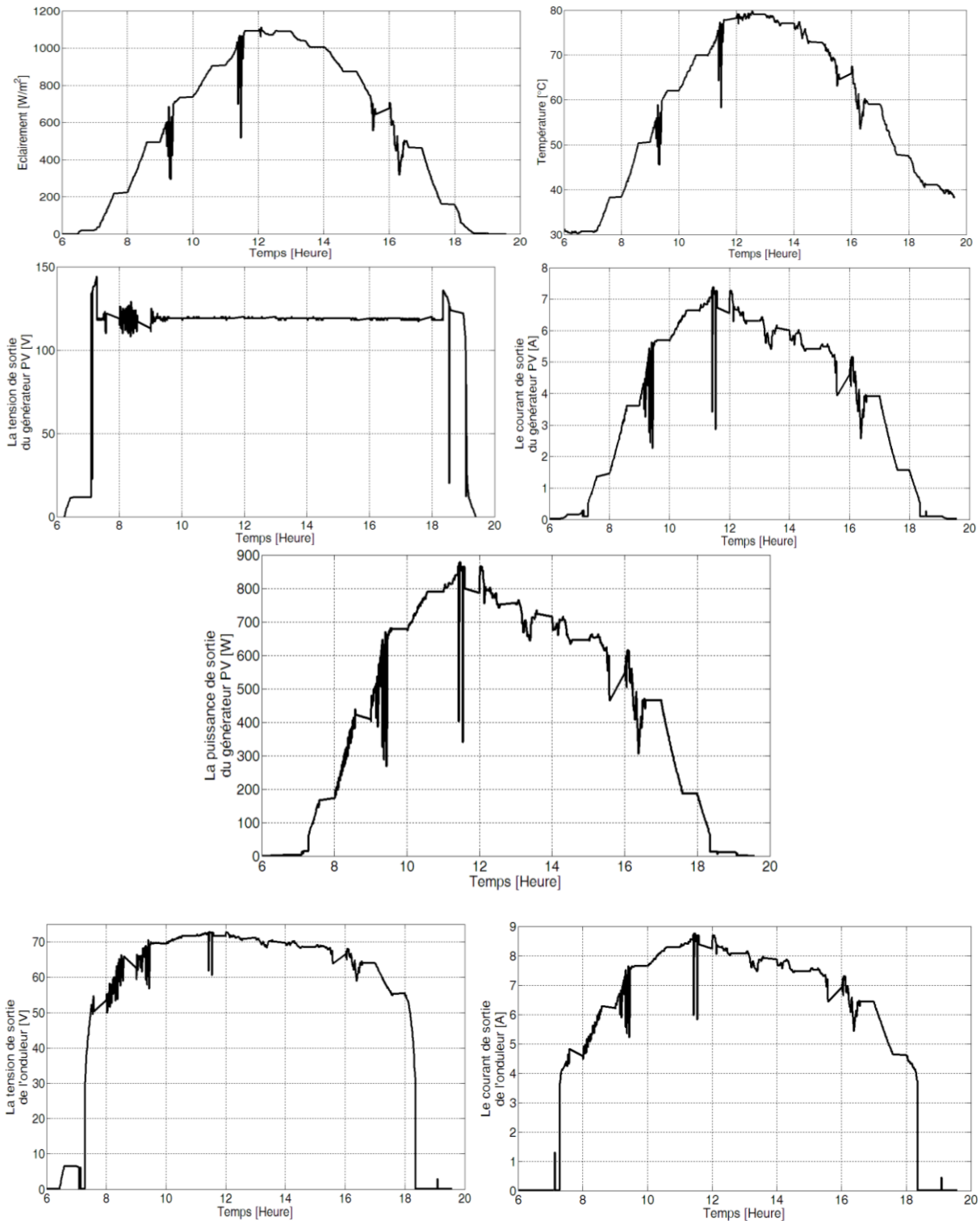


Figure IV.13 : Résultats expérimentaux du système de pompage PV installé pour une journée claire

Le contrôle de la tension et, par conséquent, la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque, basé sur la technique MLI triangulo-sinusoïdale. Ce système utilise la pompe SP5A7 à une tension de 65V Δ (couplé en triangle) et une puissance de 550W. Il y a des possibilités d'augmenter la tension pour les fréquences atteignant 57Hz. Cependant, le taux de modulation maximale est $r=1$, donc le fondamental de la tension nominale de sortie V_{effn} est pratiquement égal à la tension de référence pour $r=0.88$ ($r=1$ correspond à la fréquence 57Hz), on prend alors : Par conséquent, il faut insérer un onduleur de tension à une tension d'entrée E (Onduleur triphasé en pont) :

$$E = \frac{65}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{0.88} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 120V \text{ ou bien } E = \frac{65 \cdot 57}{50 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 120V \quad (\text{IV-01})$$

Si le contrôle de la tension basé sur la technique SVM. Le taux de modulation maximale est $r=1.15$, donc le fondamental de la tension nominale de sortie V_{effn} est pratiquement égal à la tension de référence pour $r=1$ ($r=1.15$ correspond à la fréquence 57Hz), on prend alors : Par conséquent, il faut insérer un onduleur de tension à une tension d'entrée E (Onduleur triphasé en pont) :

$$E = \frac{65}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 106V \text{ ou bien } E = \frac{65 \cdot 57}{50 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1.15} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 106V \quad (\text{IV-02})$$

Une autre pompe disponible dans l'unité URER/MS d'Adrar, à une tension de 220V Δ (couplé en triangle) et une puissance de 2.2kW.

Il faut insérer un onduleur de tension à une tension d'entrée E (Onduleur triphasé en pont) :

$$E = \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{0.88} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 408V \text{ ou bien } E = \frac{220 \cdot 57}{50 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 409V \quad (\text{IV-03})$$

Suites à des enquêtes faites sur l'utilisation de pompages au niveau de régions isolées comme Temest, Titaf et Bamouer, on a trouvé que les irrigants ont motivés pour l'application de ce système au niveau de leurs fermes. Un agriculteur utilise une pompe à une tension de 220V Y (couplé en étoile) et une puissance de 3Hp (2.2kW).

Comme représenté sur la figure IV.14, la pompe est alimentée par un champ de $15N_p \times 1N_s$, où chaque panneau délivre une tension moyenne de 36V avec une puissance de 220W_c, c'est à dire une tension d'entrée de $36 \times 15 = 540V$.

Donc on peut dire que le principe de fonctionnement de cet onduleur, est de fournir une tension de 220V pour un taux de modulation $r=1.15$ parce que :

$$E = \frac{540}{\sqrt{2} \cdot 2} \cdot 1.15 = 220V \quad (\text{IV-04})$$



Figure IV.14 : Système de pompage PV installé à Titaf (Commune de Temest)

IV-4. Différents types d'onduleurs de systèmes PV

• **Onduleurs centralisés**

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de modules en courant alternatif. Le champ PV est en règle générale, constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constitué de plusieurs modules connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

• **Onduleur "Phase"**

Pour chaque phase, un certain nombre de modules sont connectés en série et en parallèle constituant un champ, chaque phase est connecté un seul onduleur.

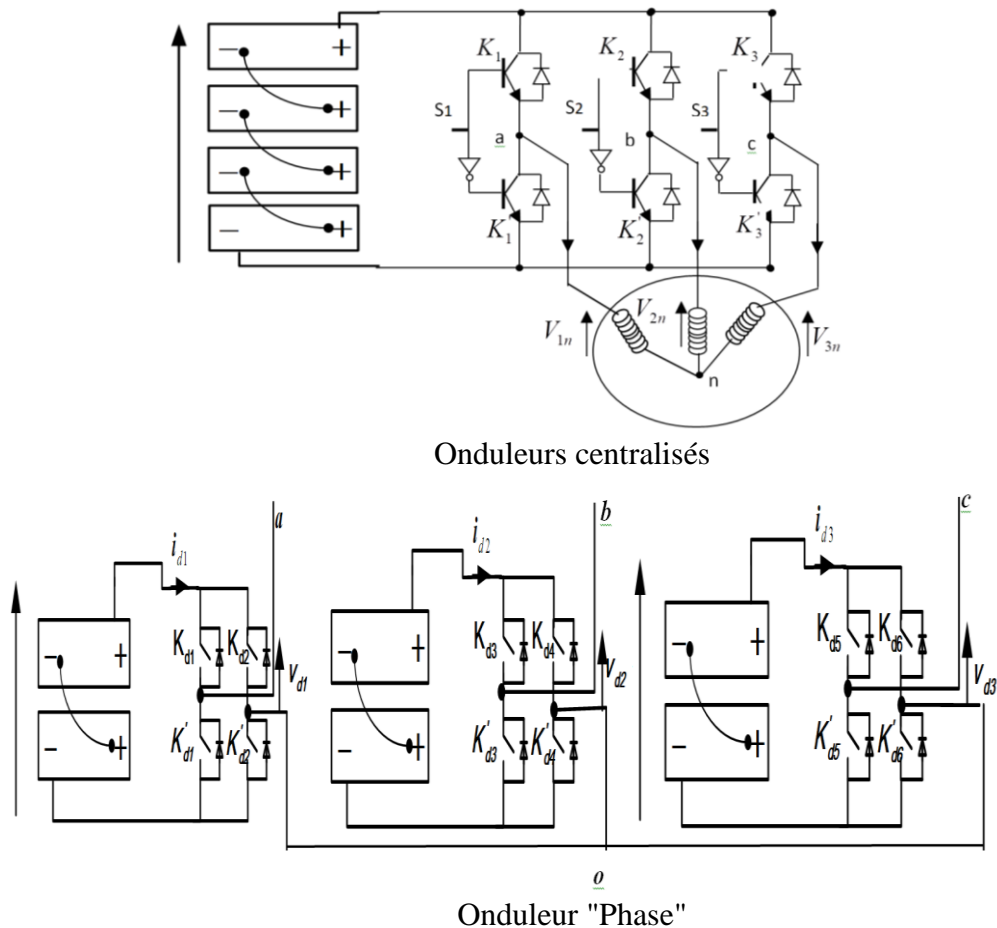


Figure IV.15 : Différents types d'onduleurs couplés au réseau

IV-5. Dimensionnement des systèmes PV et synthèse sur quel structure de l'onduleur utilisé ?

Pour les systèmes PV de type connexion au réseau, qui sont caractérisé par la fréquence industriel 50Hz et la tension d'alimentation 220Volt, le taux de modulation est compris dans un intervalle entre 1 et 1.15. Pour le système de pompage PV au fil de soleil, le taux de modulation r est varié de 0.6 à 1.15 en fonction de la fréquence de l'onduleur.

Le bon dimensionnement d'une installation photovoltaïque est une étape essentielle à maîtriser, en général, c'est la détermination de la taille des éléments constituant un système

photovoltaïque donné en partant des charges à alimenter et le rayonnement du site. Mais dans notre cas c'est l'inverse on a une puissance donnée qui est $P_{gt}=1800W_c$ et une tension de sortie simple de 65V et on veut déterminer la taille du générateur c'est-à-dire le nombre des module en série et en parallèle pouvant générer cette puissance.

Nous proposons d'étudier les possibilités de connexions série/parallèle des panneaux PV constituent le champ PV. Le récepteur est une pompe de 65V avec couplage étoile ou triangle dont les panneaux de générateur PV est le module P_M à utiliser $75W_c$, $100W_c$, $125W_c$ et $300 W_c$ qui sont délivrent une tension moyenne V_m de 15, 30, 15 et 30V respectivement.

Le nombre total de modules N_T de GPV est calculé par la formule suivante :

$$N_T = \frac{P_{gt}}{P_M} \quad (IV-05)$$

La tension de bus continu V_b est calculée suivant les indications citées au tableau III.1.

La mise en série de plusieurs modules PV permet d'assurer la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée. Le nombre de ces modules N_M est calculé par l'expression suivante :

$$N_M = \frac{V_b}{V_M} \quad (IV-06)$$

Les résultats sont résumés dans le tableau IV.1.

IV-6. Choix de la structure de l'onduleur

D'après les avantages et les inconvénients des onduleurs cités dans le tableau IV.1 et le principe de fonctionnement des systèmes PV connecté au réseau électrique et des systèmes de pompage PV, qui sont fondamentalement différents.

Dans les systèmes de pompage PV, l'onduleur alimente une machine synchrone triphasée, donc les tensions et les courants de trois phases doit-être équilibrées. L'utilisation d'un onduleur en pont complet, la forme de la sinusoïde peut être fortement perturbée en cas d'ombrage partiel sur une phase.

Dans les systèmes PV connecté au réseau, l'équilibrage entre les trois phases n'est pas obligatoire. Le système PV fonctionne toujours, même en cas de panne sur l'un des phases dans l'onduleur. L'utilisation d'un onduleur en pont, l'onduleur doit-être équipé par un système d'arrêt automatique complet du système PV quand le réseau n'est pas en fonctionnement

Donc, il est conseillé de choisir un onduleur en pont pour les systèmes de pompage PV et les onduleurs en pont complet pour les systèmes connecté au réseau électrique.

Le tableau IV.2 résume les avantages et les inconvénients de chaque structure de l'onduleur.

Tableau IV.1 : Valeurs de tension à l'entrée de l'onduleur pour une tension de sortie V_{effn}

Type de l'onduleur Couplage du récepteur	Puissance crête du module PV	Onduleur en Pont complet	Onduleur en Pont
Etoile		$E = \sqrt{2} \cdot 65 = 91.92$	$E = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 65 = 183.84$
	$N_T = \frac{75}{1800} = 24$	$N_M = \frac{91.92}{15} = 6$ Donc 6 module chaque phase	$N_M = \frac{183.84}{15} = 12$ Donc le champ est constitué de $12N_s \times 2N_p$
	$N_T = \frac{100}{1800} = 18$	$N_M = \frac{91.92}{30} = 3$ Donc le champ est constitué de $3N_s \times 2N_p$ chaque phase	$N_M = \frac{183.84}{30} = 6$ Donc le champ est constitué de $6N_s \times 3N_p$
	$N_T = \frac{125}{1800} = 14$	$N_M = \frac{91.92}{15} = 6$ Donc on ne peut utiliser ces modules, sauf si on ajoute 4 modules	$N_M = \frac{183.84}{15} = 12$ Donc le champ est constitué de $12N_s \times 1N_p$ donc on élimine 2 modules
	$N_T = \frac{300}{1800} = 6$	$N_M = \frac{91.92}{30} = 3$ Donc on ne peut utiliser ces modules pour cette structure de l'onduleur	$N_M = \frac{183.84}{30} = 6$ Donc le champ est constitué de $6N_s \times 1N_p$
Triangle		$E = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 65 = 53$	$E = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 65 = 106$
	$N_T = \frac{75}{1800} = 24$	$N_M = \frac{53}{15} \cong 4$ Donc le champ est constitué de $4N_s \times 2N_p$ chaque phase	$N_M = \frac{106}{15} = 7$ Donc le champ est constitué de $7N_s \times 3N_p$ donc on élimine 3 modules
	$N_T = \frac{100}{1800} = 18$	$N_M = \frac{53}{30} \cong 2$ Donc le champ est constitué de $2N_s \times 3N_p$ chaque phase	$N_M = \frac{106}{30} \cong 4$ Donc le champ est constitué de $4N_s \times 4N_p$ si on élimine 2 modules et de $4N_s \times 5N_p$ si on ajoute 2 modules
	$N_T = \frac{125}{1800} = 14$	$N_M = \frac{53}{15} \cong 4$ Donc le champ est constitué de $4N_s \times 1N_p$ chaque phase, donc on ajoute 2 modules	$N_M = \frac{106}{15} = 7$ Donc le champ est constitué de $7N_s \times 2N_p$
	$N_T = \frac{300}{1800} = 6$	$N_M = \frac{53}{30} \cong 2$ Donc le champ est constitué de $2N_s \times 1N_p$ chaque phase	$N_M = \frac{106}{30} \cong 4$ Donc le champ est constitué de $4N_s \times 1N_p$ si on élimine 2 modules et de $4N_s \times 2N_p$ si on ajoute 2 modules

Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients de chaque structure de l'onduleur

Avantages	Inconvénients
Onduleurs centralisés	
<ul style="list-style-type: none"> • Cette architecture est très attractive car elle est peu coûteuse, simple à entretenir et à surveiller. • Pour des installations, sans obstacle au rayonnement, les onduleurs centralisés sont recommandés. Les modules du générateur PV sont alors reliés à des rangées (strings) branchées en parallèle avant l'onduleur dans le boîtier de raccordement du générateur. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation d'un seul MPPT pour le champ entier ne rend pas optimale l'extraction de puissance du champ ; en particulier lorsque celui-ci est partiellement ombré. • Dans le cas d'occultation partielle des modules, cette configuration présente des inconvénients. En effet, l'onduleur doit se régler de façon à « faire travailler » les modules solaires occultés et non occultés simultanément. C'est ce qu'on appelle le phénomène de « Mismatching ». Le point de fonctionnement trouvé ne correspond pas au rendement optimal que pourrait fournir l'installation s'il n'y avait pas d'occultation. Dans ce cas particulier, il est conseillé d'installer plusieurs onduleurs « string » ou un onduleur « multistring ».
Onduleurs phase	
<ul style="list-style-type: none"> • cette topologie utilise un hacheur et un onduleur par string. Ceci a pour effet d'augmenter le nombre de MPPT dans le champ et permet une meilleure continuité de service par rapport au montage centralisé, lors d'une défaillance de l'onduleur par exemple. • C'est l'onduleur le plus utilisé. C'est ainsi qu'en cas d'ombrage partiel des modules, il n'y a de perte que pour la rangée ombragée. • Cette topologie permet également de mieux d'extraire la puissance maximale du générateur. • Il est évident que la topologie de chaîne présente certains avantages. Chaque convertisseur de puissance peut commander la conversion de puissance de chaque module individuellement, ce qui entraîne une augmentation de la conversion de l'énergie globale de l'ensemble du système. • Le système de contrôle MPPT dans ce cas peut réagir efficacement aux variations atmosphériques, à effet d'ombrage et à l'évolution de la charge. Le système PV fonctionne toujours, même en cas de panne sur l'un des convertisseurs de puissance dans une chaîne. • On peut installer plusieurs types des panneaux dans le même string : par exemple chaque type pour une phase. • Le système PV fonctionne toujours, même en cas de panne sur l'un des convertisseurs de puissance dans une chaîne. • Un simple décalage sur la commande, on peut générer une tension de trois niveaux : c'est avantage. 	<ul style="list-style-type: none"> • La nécessité de plusieurs sources du côté CC du convertisseur rend la technologie en pont complet attrayante pour les applications photovoltaïques. • Tous les éléments du champ ne peuvent pas fonctionner simultanément à leur point de puissance maximum. De plus, il nécessite un câblage complexe, et l'adaptation du nombre de panneaux dans chaque sous-champ ne peut pas toujours être optimisée. Donc, dans le cas d'un système équilibré (besoin trois tensions pour les trois phases identiques et en cas d'ombrage partiel, la forme de la sinusoïde peut être fortement perturbée.

IV-7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'exposer une description générale sur les deux grandes différentes configurations des systèmes photovoltaïques et leur principe de fonctionnement qui semblent être réellement une solution durable et respectueuse de l'environnement pour remplacer les énergies fossiles. La première les systèmes PV connecté au réseau électrique, la deuxième est un système autonome : Système de pompage PV.

Après, nous avons présenté des différents types des convertisseurs qui ont inséré entre les générateurs PV et les charges et nous avons illustré une méthode utilisée pour la commande du MPPT, suite une présentation de ses avantages et ses inconvénients et le principe pour calculer la valeur de la tension d'entrée.

Dans la suite dimensionnement l'installation PV, il faut également tenir compte de la plage de tension d'entrée maximum de l'onduleur. En fonction de la disponibilité des modules et des onduleurs, il se peut que d'autres contraintes apparaissent au moment de la conception de l'installation, diminuant ainsi les possibilités de choix.

Par exemple, le raccordement des 14 modules prévus en strings de 6 modules chaque phase n'est pas possible pour la structure d'onduleur en pont complet. A ce stade, le client doit être consulté pour savoir si la réalisation d'une installation PV comprenant uniquement 18 modules (sous forme de 1 string de 6 modules chaque phase) lui convient.

Finalement, nous conseillons de choisir un onduleur en pont pour les systèmes de pompage PV et les onduleurs en pont complet pour les systèmes connecté au réseau électrique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet d'une synthèse de structure d'onduleur triphasé et leurs techniques de commande MLI, appliqué aux systèmes photovoltaïques. Ce choix est justifié par la raison qu'en produisant de l'électricité sans effet de serre, le solaire photovoltaïque est de loin le meilleur moyen de satisfaire nos besoins en énergie, tout en protégeant notre environnement.

Le but principal de ce sujet est donc, de présenter différentes topologies d'onduleur triphasé en étudiant leur principe de fonctionnement et les relations entre les paramètres d'entrée et de sortie et donc le nombre des panneaux PV nécessaire connectés en série et en parallèle. A cet effet, une étude comparative entre les différentes configurations d'onduleur est effectuée concerne un système PV. Pour ces derniers, on a étudié un système de pompage PV et un système PV connecté au réseau électrique.

Dans premier lieu, nous avons donné un aperçu sur le principe de la conversion de l'énergie photovoltaïque du photon lumineux à l'électricité et aussi sur la jonction PN, le module PV. Ensuite, nous avons présenté les différents types de la technologie des cellules et le système photovoltaïque.

L'énergie PV produite sous forme continue. Les modules PV sont connectés à un convertisseur DC/DC et à des batteries. Mais pour les systèmes connectés au réseau ou un système de pompage PV, la plupart des charges sont à courants alternatifs triphasés. L'appareil de conditionnement de la puissance (onduleur) est l'élément clé, le plus délicat de l'installation, situé à l'interface entre le champ PV et la motopompe.

Dans le domaine des onduleurs de tension, les techniques de commande soit analogiques soit numériques. Pour la commande pleine-onde, commande très simple à mettre en œuvre, un choix judicieux des angles de décalage des commandes est nécessaire pour avoir de meilleurs résultats en terme de distorsion harmonique totale THD relativement à l'onduleur à deux niveaux. Elle présente, cependant, des inconvénients majeurs liés aux signaux de sortie, très riches en harmoniques de rangs faibles, donc loin d'être sinusoïdaux créant des bruits acoustiques néfastes. Ceci nous a amené à chercher à minimiser, ou plus généralement à repousser, ces harmoniques nuisibles au bon fonctionnement des charges, vers des fréquences plus élevées, pour se rapprocher le plus possible de l'onde sinusoïdale. Cet objectif nous mène à une alimentation en modulation de largeur d'impulsion MLI.

Pour ces commande MLI à échantillonnage dit naturel, triangulo-sinusoïdale basée sur la comparaison des ondes de références avec des porteuses. La technique SVM est basée sur la représentation vectorielle des tensions dans le plan complexe. Elle donne de bonnes performances et offre l'avantage de permettre un traitement entièrement numérique. Pour les deux techniques, les harmoniques générés sont déplacés vers les hautes fréquences.

L'étude comparative des deux techniques MLI (MLI triangulo-sinusoïdale, SVM) basée sur une analyse spectrale, a montré que la tension de l'onduleur de tension pouvait être parfaitement contrôlé par les deux structures de commandes ; notamment, la structure vectorielle, en optimisant le taux d'harmonique total, les pertes de commutation et en augmentant la zone de linéarité afin de diminuer le déchet de tension.

Après, nous avons présenté des différents types des convertisseurs entre les générateurs PV et les récepteurs, suite une présentation de ses avantages et ses inconvénients et le principe pour calculer la valeur de la tension d'entrée. Dans la suite dimensionnement l'onduleur destiné aux applications PV, il faut également tenir compte de la plage de tension d'entrée maximum de l'onduleur pour un choix judicieux des composants électronique de puissance.

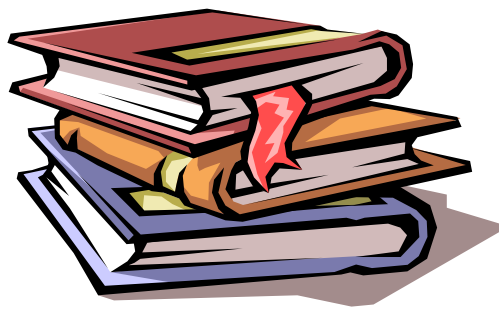
Dans les systèmes de pompage PV, l'onduleur alimente une machine synchrone triphasée, donc les tensions et les courants de trois phases doit-être équilibrées. L'utilisation d'un onduleur en pont complet, la forme de la sinusoïde peut être fortement perturbée en cas d'ombrage partiel sur une phase.

Dans les systèmes PV connecté au réseau, l'équilibrage entre les trois phases n'est pas obligatoire. Le système PV fonctionne toujours, même en cas de panne sur l'un des phases dans l'onduleur. L'utilisation d'un onduleur en pont, l'onduleur doit-être équipé par un système d'arrêt automatique complet du système PV quand le réseau n'est pas en fonctionnement

Donc, il est conseillé de choisir un onduleur en pont pour les systèmes de pompage PV et les onduleurs en pont pour les systèmes connecté au réseau électrique.

Cette étude nous encourage pour la préparation à dimensionner et réaliser des onduleurs de tension destinés aux applications PV.

Bibliographie



Bibliographie

- [1] **L.S. Belaid**, *cours énergie solaire photovoltaïque*, Cours universitaire.
- [2] **Antonio Luque** , **Steven Hegedus**, "*Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*", John Wiley & Sons Ltd, 2003 .
- [3] **A. Ricaud**, *Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés*, Presses polytechniques et universitaires romandes, ISBN 2-88074-326-5, 1997.
- [4] **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B.S. Sy**, *Pompage Photovoltaïque*, IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA. ISBN 2-89481-006-7, Canada 1998.
- [5] **J. Hofierka, M.Suri**, "*The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*", Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [6] **A. Ricaud**, *Gisement solaire et transferts énergétiques*, Cours Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE, Janvier 2016.
- [7] **Office fédéral des questions conjoncturelles Service de la technologie**, "*Centrales photovoltaïques : Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, A l'usage des bureaux d'ingénieurs*", Coordination romande du programme d'action «Construction et énergie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne, Juin 2006.
- [8] **M. Capderou**, *Atlas solaire algérien*, Tome1, Edition école polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Algérie, 1986.
- [9] **M. Yaichi**, "*Etude, Contrôle et Optimisation des performances d'une chaîne de conversion photovoltaïque utilisant des Onduleurs Multiniveaux Asymétriques*", Thèse de doctorat en science, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, Mai 2016.
- [10] **F. Kininger**, *Photovoltaic systems technology*, university of kassel, 2003 .
- [11] **C. Bernard** , *Station solaire autonome pour l'alimentation station pompage*, l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006.
- [12] **Ch. p. De. Brichabaut, Ch.Yauge**, *le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique*, Technique et documentation Lavoisier 1982.
- [13] **Hananou Fatiha, Rouabah Aicha**, "*Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque* " , Mémoire de Master, Université de Ouargla, 09 /06/2014
- [14] **Benseddik Othmane, Djaloud Fathi**, "*Etude et optimisation du fonctionnement d' système photovoltaïque* " , Mémoire de Master, Université de Ouargla, 27/06/2012.
- [15] **L. Bun**, "*Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque*", doctorat de l'université de Grenoble, 2006.

-
- [16] **Farid Berrezzek**, "*Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone*", Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba. 2006
- [17] **A. Boost, P.D. Ziogas**, "*State-of-the-art carrier PWM techniques: a critical evaluation*". Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 2, March/April, 1988, pp 271 – 280
- [18] **G. Segulier, F. Labrique**, *Les convertisseurs de l'électronique de puissance. 4 La conversion continu-alternatif*, Lavoisier, France 1989.
- [19] **M. Pinard**, convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description, mise en œuvre Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [20] **F. Bernot**, *Redresseurs et onduleurs assistés*, Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique.
- [21] **Jmroussel**, *Éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques*, Le site 3 E.I, Copyright 1998.
- [22] **F. Labrique, G. Séguier, R. Bausière**, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Volume 4 : La conversion continue alternative, Editions LAVOISIER.
- [23] **S. Guy, B. Robert, L. Francis**, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la Conversion alternative (volume 4) ». Edition tec-doc, 1995.
- [24] **A. Meroufel**, "*Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique*", Thèse de Doctorat d'Etat, Sidi Bel Abbès, 2004
- [25] **M. Yaichi**, "*Analyse de la technique SVM appliquée aux onduleurs multiniveaux*", Mémoire de Magister de l'université Djillali-Liabes de Sidi-Bel-Abbès, Département d'électrotechnique, 2006.
- [26] **Z. Salameh and D. Taylor**, « *Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays* » Solar Energy, 44(1), 57-61, 1990.
- [27] **Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme**, *1000 Roofs measurement and analysis programme*, Annual Journals 1995 and 1996".
- [28] **D.Schekulin, G. Schumm**, "AC-modules-technology, characteristics and operational experience". XIII Congrès Européen de l'Energie Solaire Photovoltaïque, 1889, Nice, France, 1995.
- [29] **A. T. Veltman, R. Wiecherink**, "Test result of inverters for grid-connected photovoltaic systems". 11th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Montreux, Switzerland, 1992.
- [30] **L. N. Arruda, S. M. Silva**, "PLL structures for utility connected systems", IEEE Industry Applications Conference, 2001, pp 2655-2660.
- [31] **R. Wu, S. B. Dewan, G. R. Slemon**, "Analysis of a PWM AC-dc voltage source converter under predictive current control with fixed switching frequency", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990, pp 287-294.

-
- [32] **A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, M.A.M.Hendrix**, "A predictive control scheme for DC voltage and AC current in grid connected photovoltaic inverters with minimum DC link capacitance" Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001.
- [33] **L. Malesani, L. Rossetto** "AC/DC/AC PWM converter with reduced energy storage in the DC link", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 147, n°6, 2000.
- [34] **A. Necaibia, A. Bouraiou, A. Ziane, N. Sahouane, S. Hassani, M. Mostefaoui, R. Dabou, S. Mouhadjer** , "*Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic system under hot dry climate in the south of Algeria*", Energy Conversion and Management 171 (2018) 778–786.
- [35] **N. Sahouane, R.Dabou, A.Ziane, A.Neçaibia, A.Bouraiou, A.Rouabhia, B.Mohammed**, "*Energy and economic efficiency performance assessment of a 28 kWp photovoltaic grid-connected system under desertic weather conditions in Algerian Sahara* ", Renewable Energy, doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.086.
- [36] **Smail Semaoui, Kamel Abdeladim, Amar Hadj Arab, Saliha Boulahchich, Said Ould Amrouche and Nouredine Yassaa. Sahouane, R.Dabou, A.Ziane, A.Neçaibia, A.Bouraiou, A.Rouabhia, B.Mohammed** , "*Experimental Grid Connected PV System Power Analysis*", Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability AIP Conf. Proc. 1968, 030032-1–030032-7; <https://doi.org/10.1063/1.5039219> Published by AIP Publishing.

Annexe

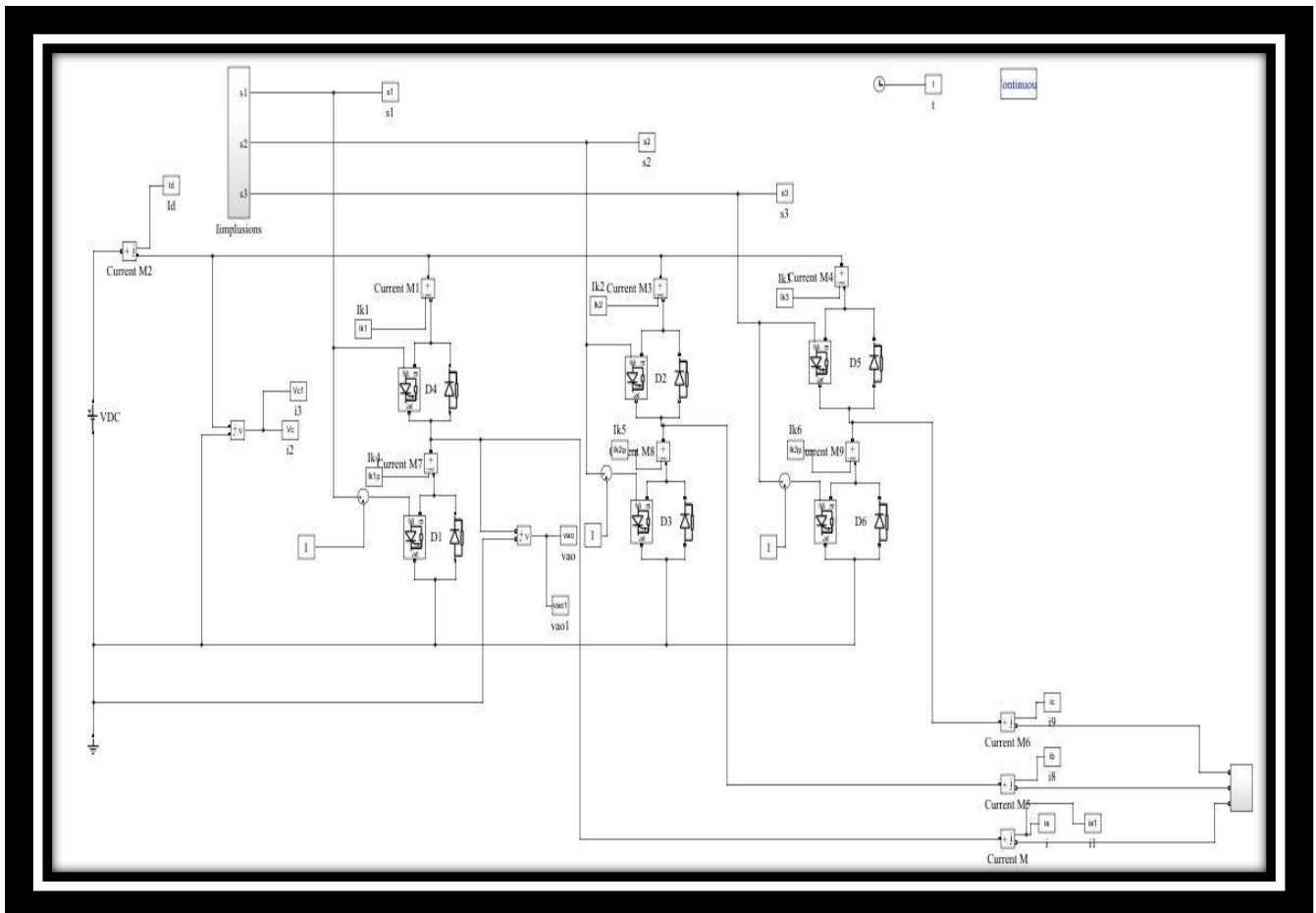


Schéma bloc sous MATLAB de l'onduleur demi_pont

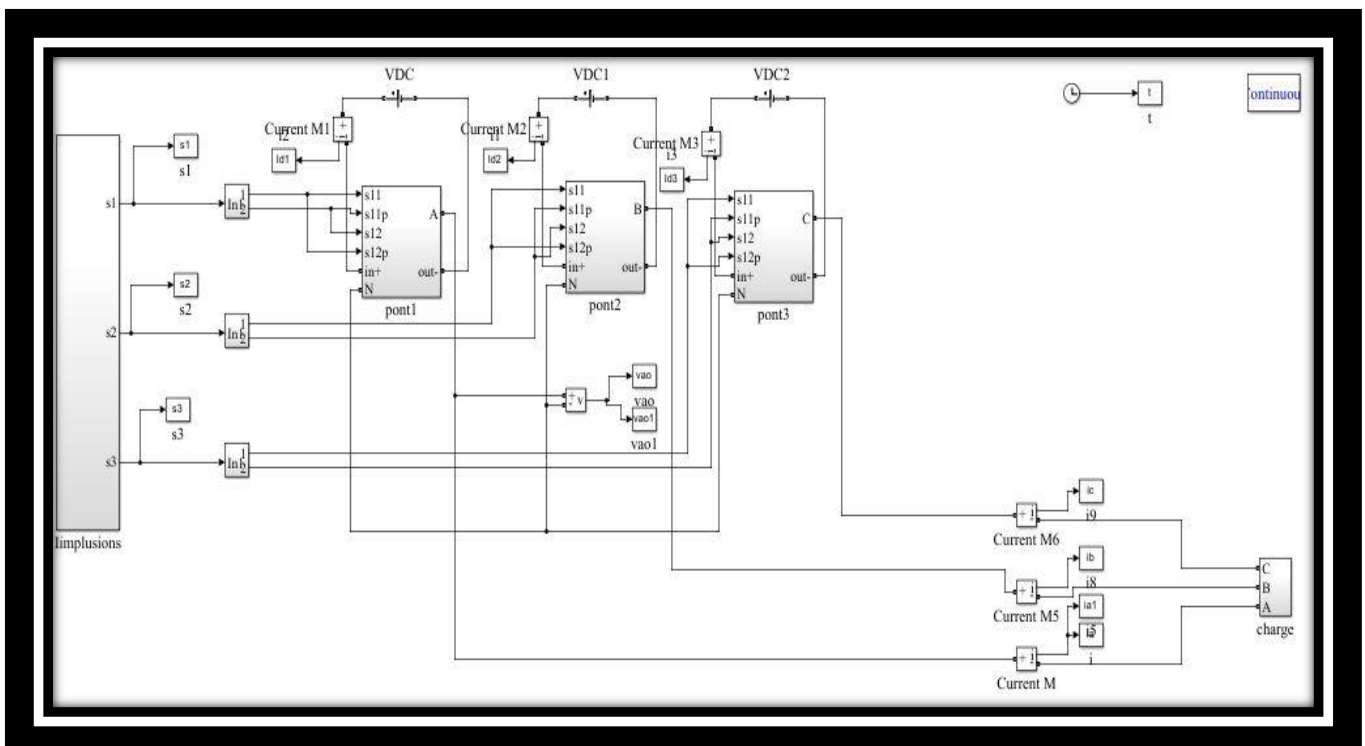


Schéma bloc sous MATLAB de l'onduleur triphasé a pont complet

