

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



Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique



UNITE DE RECHERCHE

MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES

Mémoire De Magister ” Ecole Doctorale ”

Spécialité : Energies Renouvelables

Sur le Thème

***Injection de l'électricité produite par les énergies
renouvelables dans le réseau électrique***

Présenté par : M^r MEHDI MERAD-BOUDIA

Devant le jury composé de :

Président : **G. MERAD** Professeur, Université de Tlemcen

Directeur de Thèse : **B. BENYOUCEF** Professeur, Université de Tlemcen

Examineurs : **M. HADDADI** Professeur, ENP d'Alger

A. KHEROUS Maître de conférences, Université de Tlemcen

A. ZERGA Maître de conférences, Université de Tlemcen

Année universitaire : 2009 – 2010

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à l'unité de recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) du département de Physique de la faculté des Sciences de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

Mes remerciements, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

*Je tiens à souligner l'estime que je porte à Monsieur **B.BENYOUCEF** Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen et Directeur du Laboratoire de Simulation de l'URMER, pour son soutien et son encadrement scientifique qui m'ont été bénéfiques pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury à savoir le président M^r **G. Merad** ainsi les examinateurs : M^r **M. Haddadi**, M^r **A. Kherous** et M^r **A. Zerga** pour leurs participation et leurs évaluation de mon travail.*

*Je tiens à remercier plus particulièrement M^r **A. Kherous** pour le soutien qu'il m'a apporté pour mener à bien ce travail*

Enfin Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	<i>01</i>
<i>Chapitre I Généralités sur les énergies renouvelables</i>	
<i>Introduction</i>	<i>03</i>
<i>1-Génération d'énergie renouvelable :</i>	<i>04</i>
<i>2- Génération de la chaleur :</i>	<i>05</i>
<i>2-1- Thermo solaire :</i>	<i>05</i>
<i>2- 2- Géothermie</i>	<i>06</i>
<i>2-3- Biomasse</i>	<i>07</i>
<i>3- Génération d'électricité</i>	<i>08</i>
<i>3-1 Photovoltaïque</i>	<i>08</i>
<i>3-2 Hydraulique</i>	<i>08</i>
<i>3-3 Energie de la mer</i>	<i>09</i>
<i>3-4 Production éolienne</i>	<i>09</i>
<i>Conclusion :</i>	<i>10</i>
<i>Références bibliographiques</i>	<i>11</i>
<i>Chapitre II Le Photovoltaïque</i>	
<i>Introduction :</i>	<i>12</i>
<i>1- Cellule photovoltaïque :</i>	<i>13</i>
<i>1-1 Structure physique d'une cellule photovoltaïque:</i>	<i>13</i>

<i>1-2 Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale :</i>	<i>14</i>
<i>1-3 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle:</i>	<i>15</i>
<i>2- Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :</i>	<i>16</i>
<i>2-1 Caractéristique courant - tension (I-V) :</i>	<i>16</i>
<i>2-2 Paramètres externes</i>	<i>18</i>
<i>2-3 Influence des résistances série et shunt :</i>	<i>20</i>
<i>2-4 Influence du flux lumineux :</i>	<i>21</i>
<i>2-5 Influence de la température :</i>	<i>22</i>
<i>3- Le panneau solaire :</i>	<i>22</i>
<i>4- Champ photovoltaïque :</i>	<i>26</i>
<i>4-1 Mise en série et en parallèle de modules</i>	<i>26</i>
<i>5-Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque :</i>	<i>28</i>
<i>5-1 Le hacheur survolteur</i>	<i>28</i>
<i>5-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) :</i>	<i>29</i>
<i>5-2-1 Les méthodes analogiques :</i>	<i>29</i>
<i>5-2-2 Méthodes micro – programmées :</i>	<i>29</i>
	<i>30</i>
<i>6- Options de raccordement au réseau public de distribution</i>	<i>31</i>
<i>Conclusion :</i>	<i>33</i>
<i>Références bibliographiques</i>	<i>34</i>

Chapitre III La conversion de l'énergie électrique

<i>1-Introduction :</i>	<i>35</i>
<i>2-Les convertisseurs de puissance en électrotechnique:</i>	<i>35</i>
<i>3-Les convertisseurs en électronique de puissance :</i>	<i>37</i>
<i>4-Approche théorique des convertisseurs de puissance :</i>	<i>38</i>
<i>4-1 Structure matricielle des convertisseurs :</i>	<i>38</i>
<i>4-1-1 but :</i>	<i>38</i>
<i>4-1-2 Modélisation des convertisseurs statique :</i>	<i>38</i>
<i>4-1-2-1 : Description du fonctionnement :</i>	<i>38</i>
<i>4-1-2-2 : Description du modèle :</i>	<i>38</i>
<i>4-2 Modélisation des convertisseurs à topologie matricielle :</i>	<i>41</i>
<i>4-2-1 Les interrupteurs statiques :</i>	<i>41</i>
<i>4-2-2 Présentation et notation :</i>	<i>42</i>
<i>4-2-3 la fonction de connexion:</i>	<i>44</i>
<i>4-2-4 La matrice de connexion:</i>	<i>44</i>
<i>4-2-5 La fonction de commutation :</i>	<i>45</i>
<i>4-2-6 La matrice de conversion:</i>	<i>46</i>
<i>4-3 Le modèle de connaissance :</i>	<i>48</i>
<i>5- Application aux convertisseurs usuels :</i>	<i>51</i>
<i>5-1 Transformation monophasée / monophasée :</i>	<i>51</i>

5-2 Transformation monophasée / triphasée :	53
Conclusion :	54
Références bibliographiques	55
 <i>Chapitre IV Injection de l'électricité dans le réseau</i>	
1- Introduction :	56
2-Exemples de Structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :	57
2-1 Les systèmes à connexion directe au réseau	57
2-1-1 Structure à convertisseur unique :	57
2-1-2 Structure avec bus à basse tension alternative :	58
2-2 Système à bus continu intermédiaire :	58
2-2-1 Structure avec convertisseur forward :	58
2-2-2 Structure avec un convertisseur de type fly-back :	59
2-2-3 Structure avec hacheur et onduleur :	60
3- Adaptation de l'énergie produite par le photovoltaïque avec le réseau :	60
3-1 Introduction :	60
3-2 Qu'est-ce qu'un onduleur ?	61
3-3 Structure de connexion avec trois onduleurs monophasés :	61
3-3-1 Exemple d'une Centrale PV Connectée au Réseau :	61
3-3-2 Modélisation de l'Onduleur de tension monophasé :	62
3-3-3 Commande de l'Onduleur de tension monophasé :	63
3-3-4 Le filtrage des harmoniques :	69

<i>4-2 Structure de connexion avec un Onduleur triphasé :</i>	<i>78</i>
<i>Choix des interrupteurs</i>	<i>85</i>
<i>Conclusion :</i>	<i>86</i>
<i>Références bibliographiques</i>	<i>88</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>90</i>

Introduction générale

Dans le système électrique actuel, la majorité de l'énergie est injectée à partir des centrales de grandes puissances (de la centaine aux milliers de MW) sur le réseau, et une exploitation centralisée permet d'optimiser la gestion de la production pour le bénéfice des clients. Les réseaux de distribution ne sont pas conçus pour accueillir de la production d'énergie, leurs structures et leurs exploitations sont fortement marquées par le fait que l'énergie y est transportée des niveaux de tension les plus hauts vers le plus bas.

Poussée par un contexte favorable (volonté politique, intérêt économique...), la production décentralisée se développe dans de nombreux pays. Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La production de l'électricité à partir des énergies renouvelables peut se faire par plusieurs façons que nous citons à titre d'exemple :

- L'électricité produite par le photovoltaïque
- L'électricité produite par l'éolien
- L'électricité produite par l'hydraulique
- L'électricité produite par Energie de la mer

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

Le déroulement de cette thèse se fera de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, on va donner quelques définitions concernant les énergies renouvelables où on va parler brièvement des différents types de ces derniers.

Dans le deuxième chapitre, on va détailler le photovoltaïque où on verra les principales notions concernant ce dernier.

Le troisième chapitre, fera l'étude théorique des convertisseurs statiques où on va voir comment décrire et modéliser les convertisseurs afin de pouvoir les commander.

Et dans le quatrième chapitre, on va voir les différents types de systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution tout en appliquant les notions déjà vues dans le chapitre précédent pour modéliser et commander l'onduleur de tension qui représente l'élément clé dans ce chapitre.

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

Introduction :

L'épuisement proche des ressources énergétiques fossiles ainsi que les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, incitent au développement des énergies renouvelables.

Une source d'énergie est renouvelable, si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire. La Figure (1.1) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles [8].

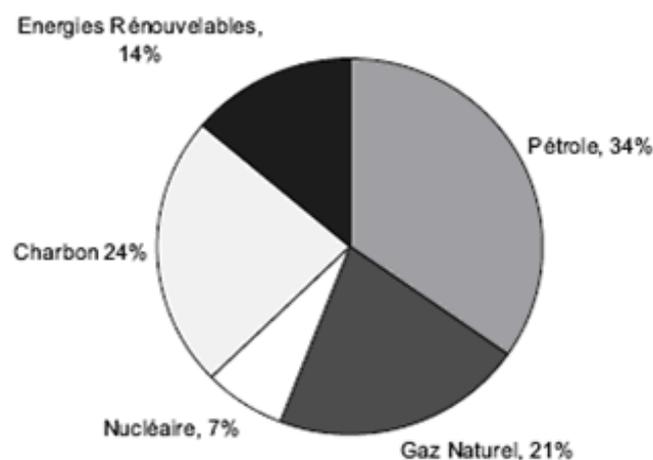


Figure (1.1) : la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde

Un argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en ce type d'énergies. Au cours du 21ème siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître [9]. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les

courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

1- Génération d'énergie renouvelable :

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas il est nécessaire de transformer l'énergie renouvelable en énergie électrique qui est transportable via les lignes électriques.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation.

Les énergies renouvelables peuvent être réparties en trois grandes familles [8] :

- L'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien)
- L'énergie électrique (panneaux photovoltaïques)
- L'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...)

Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. L'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources.

La figure suivante montre la production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien,...) [3] :

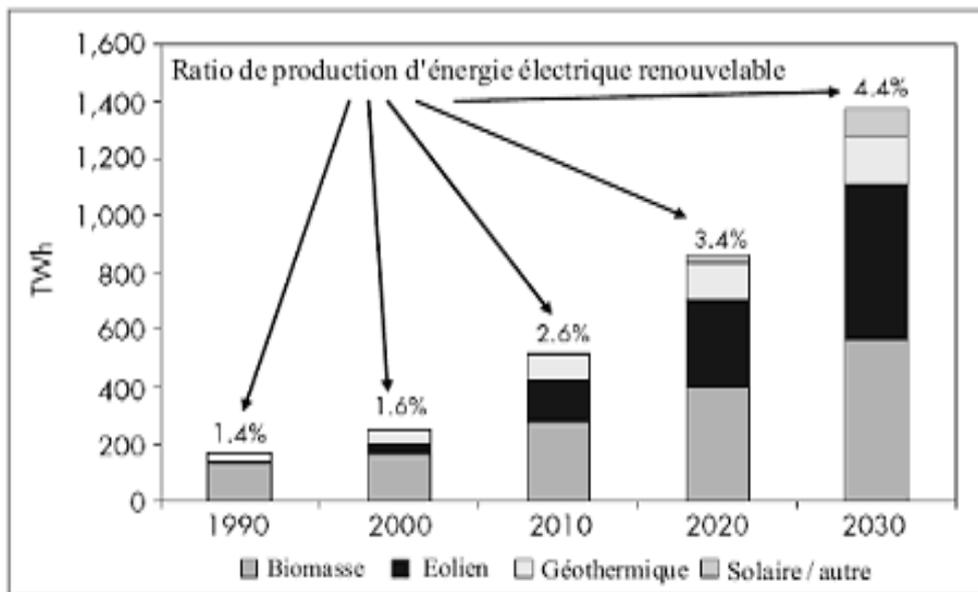


Figure (1.2) : la production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables

2- Génération de la chaleur :

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables. Les sources d'énergies renouvelables permettent de produire de l'énergie thermique, ainsi le bois, le biogaz, le soleil et la géothermie sont largement exploités pour cela.

2-1- Thermo solaire :

L'énergie émise par le soleil peut être exploitée pour le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [8].

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être

direct, ce qui signifie que, même dans les zones couvertes de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. L'inconvénient majeur est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines...).

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement. La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [11].

2- 2- Géothermie

La géothermie est l'extraction d'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [12].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

- La haute (>180°C)
- moyenne (>100°C)
- basse (>30°C)
- et très basse énergie

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [10].

En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW (il s'agit de production de l'électricité donc de la géothermie grande et moyenne énergie). En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1000MW de puissance sous forme de la chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50MW installés [4].

2-3- Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer tel que le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz.

* Le bois – énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie [5]. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW.

*Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères [13].

L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir.

3- Génération d'électricité

3-1 Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560 MW de puissance installée. La Figure (1.3) montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle (la production est équivalente à la puissance installée) [6].

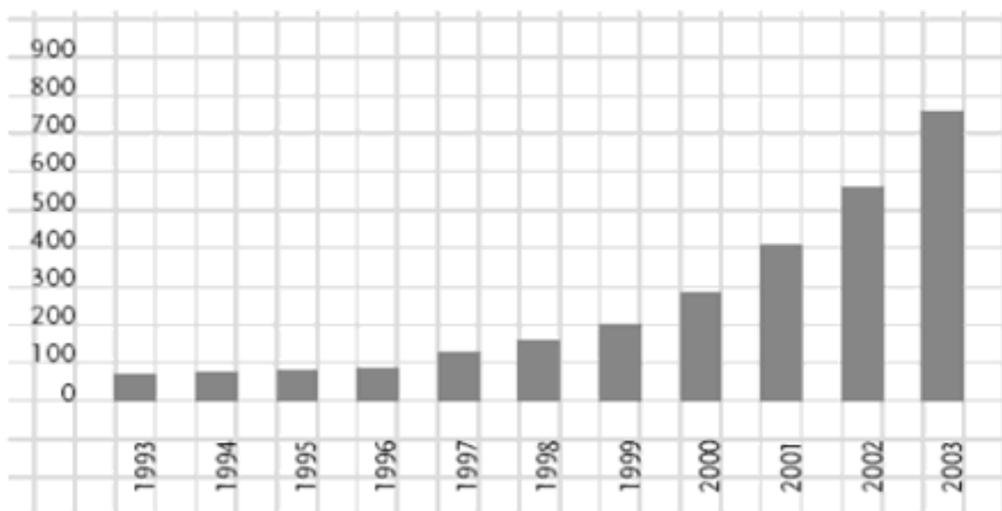


Figure (1.3) évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïque en MW

3-2 Hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et stockable.

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [1].

3-3 Energie de la mer

Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique. Un des exemples très innovateur est le projet de Système Electrique Autonome pour la Récupération de l'Energie des Vagues (SEAREV) [8].

Une autre façon de récupération de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [8].

3-4 Production éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.1015 kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.1012 kWh/an pour la part terrestre exploitable [2].

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui sont dues indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après

avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent dû notamment aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient depuis une dizaine d'années, une croissance de 30% par an [8].

La figure (1.4) suivante représente la Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [7]

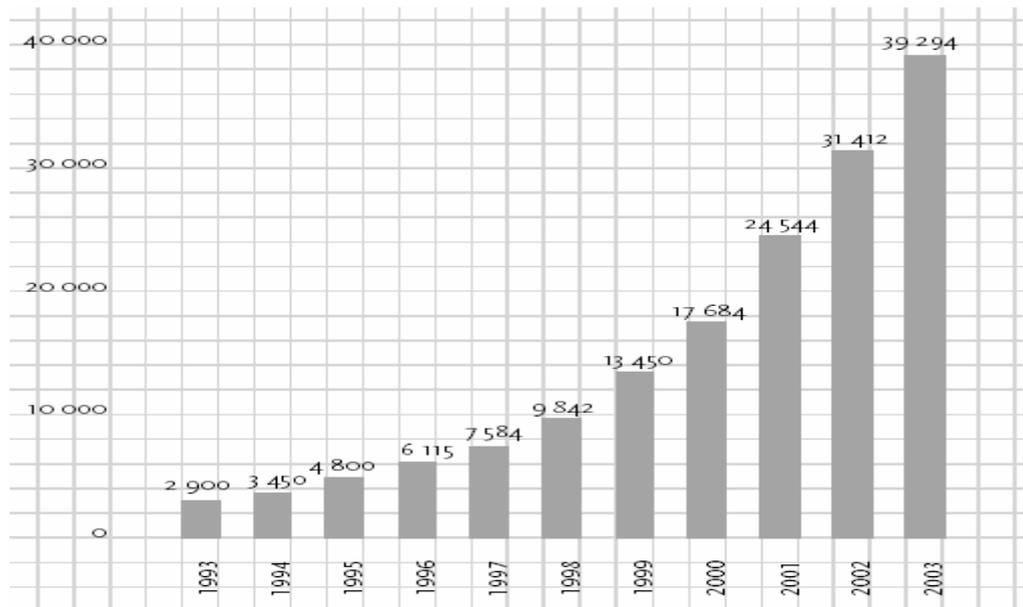


Figure (1.4) Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW

Conclusion :

Dans ce qui précède, nous avons énoncé, de manière générale, les différentes ressources énergétiques permettant de produire de la chaleur et de l'électricité par sources d'énergie renouvelables. Ces derniers représentent une véritable solution vis-à-vis de l'épuisement des ressources énergétique fossiles. Cependant dans le chapitre suivant on faire une étude détaillée concernant l'énergie photovoltaïque.

Références bibliographiques

[1] Systèmes solaires n°140. 2000. EurObserv'ER.

- [2] Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, O.Gergaud These de doctorat, 2002

- [3] World Energy Outlook. R.priddele IEA Publications.2002.

- [4] Baromètre de la géothermie. Systèmes solaires n°156. Août 2003. EurObserv'ER.

- [5] Wood Energy Barometer. Systèmes solaires n°158. Décembre 2003. EurObserv'ER.

- [6] Photovoltaic Energy Barometer. Systèmes solaires n°160. EurObserv'ER.
Avril 2004.

- [7] Le baromètre de l'éolien. Systèmes solaires n°159. Février 2004. EurObserv'ER.

- [8] Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, A.Mirecki thèse de doctorat ENSEEIHT 2005

- [9] Survey Of Energy Resources. <http://www.worldenergy.org> 2007

- [10] Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement. <http://www.ciele.org> 2009

- [11] Solar Power Towers. <http://www.wipp.ws/science/energy/powertower.htm>

- [12] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. <http://www.ademe.fr>

Chapitre II

L'énergie Photovoltaïque

Introduction :

Le Soleil rayonne sur la Terre une puissance moyenne de 340 Watt par mètre carré (avec un maximum $1\text{KW}/\text{m}^2$) soit 16.10^{15} kWh par an, dans toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière visible. Du fait de sa nature et de sa puissance très variable à la surface de la Terre en un point donné, il est difficile d'exploiter ou de stocker l'énergie solaire sans la transformer au préalable.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} .

1- Cellule photovoltaïque :

1-1 Structure physique d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [12]. La figure (2.1) illustre une cellule PV typique.

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium cristallin. Un constituant qui a la propriété d'être semi conducteur : les électrons sont liés aux atomes mais peuvent se détacher et donc circuler avec l'apport d'énergie lumineuse pour ensuite permettre le passage d'un courant comme dans un conducteur électrique.

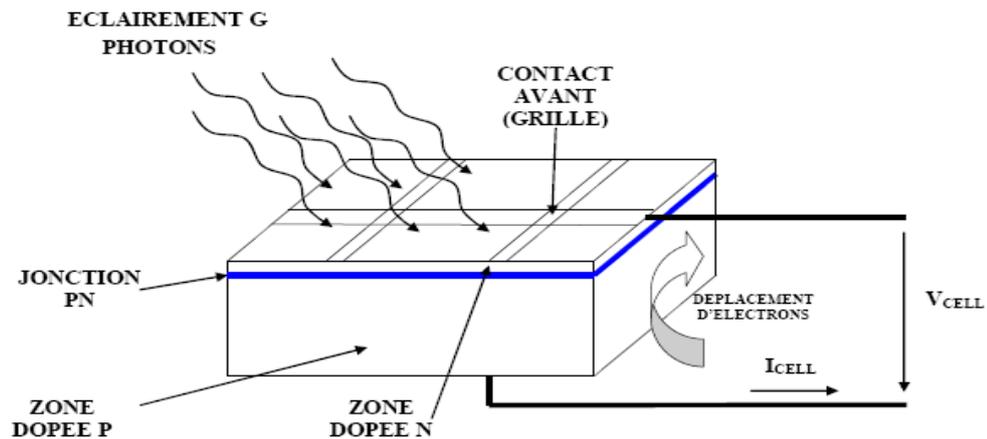


Figure (2.1) : Coupe transversale d'une cellule PV typique.

Les atomes de silicium possèdent 4 électrons. Deux couches vont être dopées afin d'être polarisées. Pour rendre l'une des couches positive (couche P) on lui incorpore un certain nombre d'atomes de Bore ; celui-ci possède 1 électron de moins par rapport aux atomes de silicium (3 électrons). Pour rendre l'autre couche négative (couche N) on lui incorpore un certain nombre d'atomes de phosphore ; celui-ci possède quant à lui 1 électron de plus par rapport aux atomes de silicium (5 électrons). On crée ainsi une barrière de potentiel. Lorsque nous superposons les 2 types de couches, elles se neutralisent mutuellement jusqu'au point où se crée un champ électrique qui exerce une répulsion et qui maintient les différentes charges (+ et -) dans leurs champs respectifs. Les atomes de bores et de phosphore ne sont pas mobiles et définissent les deux couches, contrairement aux atomes de silicium.

Lorsque les photons ayant suffisamment d'énergie sont absorbés par ce semi-conducteur, ils produisent la rupture d'une liaison de valence (liaison entre les électrons et l'atome) pour chacun des atomes de silicium, les atomes de silicium libèrent donc chacun un électron. C'est ce que l'on appelle l'effet voltaïque : c'est la différence de potentiel entre ces deux couches. Grâce au champ électrique de répulsion, cet électron ira inévitablement du côté négatif et les atomes de silicium ayant perdu un électron (Si^+) du côté positif. En reliant ces couches on obtient un mouvement des électrons qui passent d'une couche à l'autre et créent ainsi un courant électrique.

Après utilisation de ce courant électrique, les électrons « dépourvus d'énergie » se relient aux atomes de silicium ayant perdu un électron (Si^+).

1-2 Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale :

Le Schéma du circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque est représenté dans la figure suivante [17]:

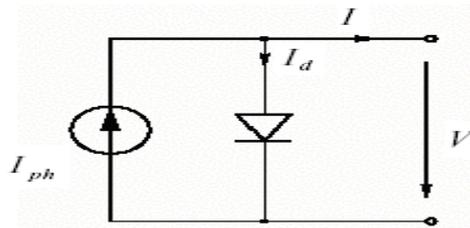


Figure (2.2) : circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque

En appliquant la loi de Kirchhoff sur ce circuit on obtient le modèle mathématique simple suivant :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Avec :

I : le courant de sortie de la cellule

V : Tension de sortie de la cellule

I_{ph} : Le photo-courant produit

I_s : Le courant de saturation inverse de la diode modélisé par l'équation suivant :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

T : la température

q : Charge élémentaire $q = 1,602 \cdot 10^{-19} . C$

k : la constante de Boltzmann $k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

A partir de ce modèle, on peut dire que la caractéristique I - V d'une cellule photovoltaïque peut être assimilée à celle d'une diode normale. La différence est l'existence de la tension V_{oc} de circuit ouvert qui mène au courant I_{sc} de court-circuit comme le courant d'offset de la courbe. Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité totale se comportera comme une diode normale.

1-3 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle:

Les mesures réelles sur de vraies cellules dans des conditions de fonctionnement diverses montrent cependant le besoin de modèles plus sophistiqués. En particulier la résistance interne du dispositif doit être prise en compte. Ceci mène au modèle représenté par la figure (2.3) [12], [17] :

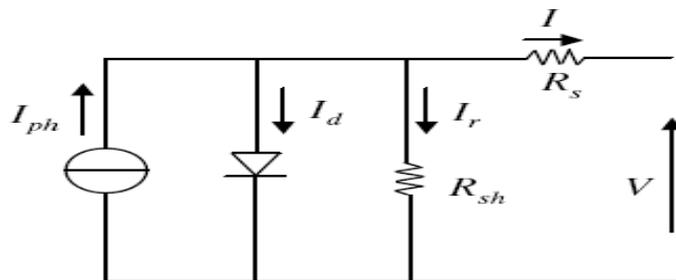


Figure (2.3): circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle

Une cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée. Ces pertes de puissance électrique parviennent au niveau d'une cellule photovoltaïque et diminuent ainsi considérablement le rendement. Parmi les causes de ces pertes, on peut citer [12] :

- La réflexion de la lumière sur la face avant de la photopile
- Le courant réel est inférieur au courant idéal à cause de la recombinaison des paires électron-trou sur les défauts (en particulier sur les impuretés) et des courants de fuite.

- Facteur de forme (ou facteur de courbe) dû aux courants de diffusion et de recombinaison à travers la jonction.
- Résistances série et shunt entraînant des pertes par effet joule.

La figure (2.3) est une représentation du le circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque, d'où on peut écrire l'équation suivant [12], [17]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (2.3)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$I_r = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Avec :

$$V_T = \frac{nkT}{q} : \text{Le potentiel thermodynamique.}$$

I : le courant de sortie de la cellule photovoltaïque

V : la tension de sortie de la cellule photovoltaïque

I_{sh} : Est le photo-courant produit

I_0 : Le courant de saturation de la diode d

n : Les facteurs de pureté de la diode

R_s Et R_{sh} : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle

T : la température absolue en Kelvin.

q : la charge élémentaire constante $q = 1,602 \cdot 10^{-19} .C$

k : constante de Boltzmann $k = 1,380 \cdot 10^{-23} J/K$

2- Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

2-1 Caractéristique courant - tension (I-V) :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (2.3).

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [12].

La Figure (2.4) montre la caractéristique courant - tension pour une cellule photovoltaïque. Ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CD . Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I : la cellule se comporte comme une source de tension

qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température [13].

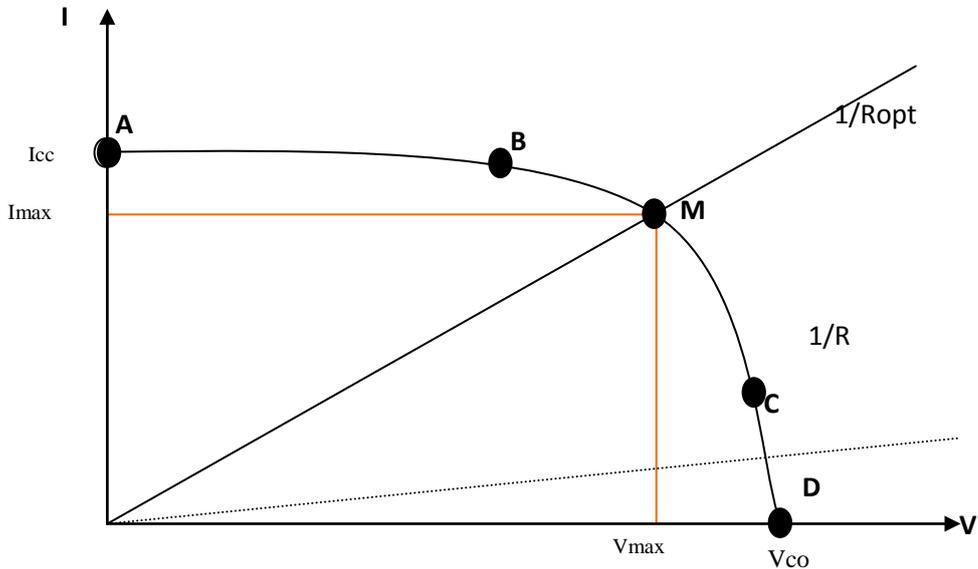


Figure (2.4) Caractéristique courant - tension (I-V)

2-2 Paramètres externes

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I-V, ou de l'équation caractéristique (2.7). Les plus usuels sont les suivants :

* Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photo - courant I_{ph} .

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{(V + R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right] - \left(\frac{V}{R_{sh}} + \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \quad (2.7)$$

En court circuit $V=0$, et pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme I_d devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (2.8)$$

D'où : $I_{cc} \cong I_{ph}$

*** Tension de circuit ouvert :**

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante:

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

Dans le cas idéal ($R_s \rightarrow 0$, $R_{sh} \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$) on obtient :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.10)$$

*** Puissance optimale et facteur de forme**

La puissance utile maximale $P_m = V_m \cdot I_m$, s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_m}{V_m} = - \left(\frac{dI}{dV} \right)_m \quad (2.11)$$

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill factor, il est défini par :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (2.12)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe $I = f(V)$ par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale. Les valeurs de I_m et V_m s'obtiennent à partir des équations (2.6) et (2.11). Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_m par une méthode numérique, et permet donc le calcul de V_m .
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_m par une méthode numérique.

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts - crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C . Pour une photopile en silicium de diamètre de 10 cm la puissance crête est $P_c = 1\text{W}$.

*** Le rendement :**

La puissance $P = I.V$ est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I-V. Ce maximum P_m peut être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique I-V et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (2.5)

Le rendement est $\eta = \frac{P_m}{P_0}$ où P_0 est la puissance incidente. Elle est égale au produit de

l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Pour le silicium le rendement est inférieur à

14%. La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (2.5).

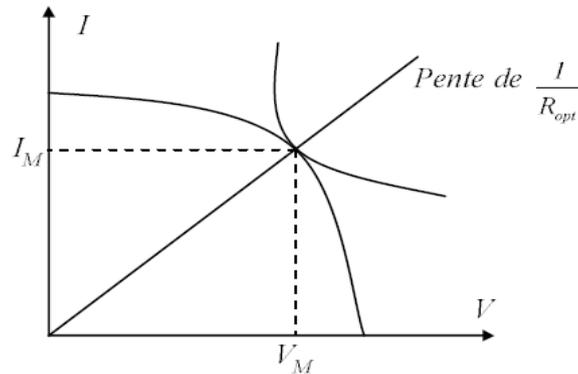


Figure (2.5) : Schéma d'une cellule élémentaire

2-3 Influence des résistances série et shunt :

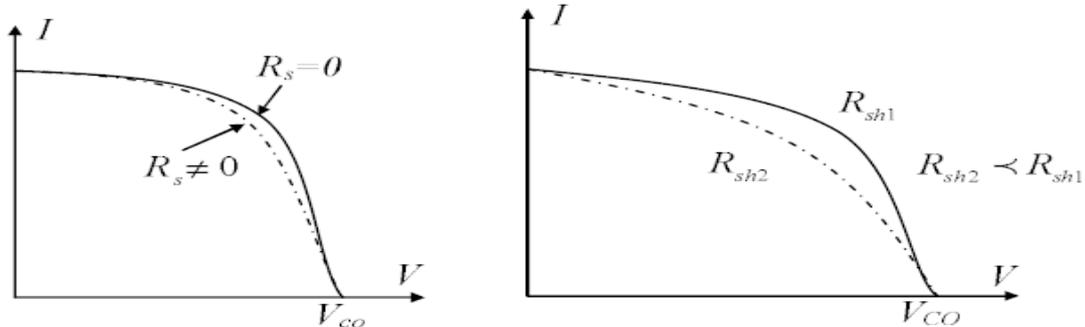
Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. Cependant, il est possible, sous certaines hypothèses, de dégager des valeurs limites acceptables (R_{sl} ; R_{shl}) [2]. En effet, si on suppose que la cellule est en régime optimal, et si les pertes sont attribuées à la résistance série, le rapport de la puissance dissipée dans celle-ci à la puissance délivrée par la cellule est donné par :

$$Q_{Rs} = \frac{R_s I_m^2}{I_m V_m} = \frac{R_s I_{cc}}{V_{co}} \quad (2.13)$$

De même, si on attribue toutes les pertes à la résistance shunt, et en supposant qu'on est au point de fonctionnement optimal, on aura :

$$Q_{Rs} = \frac{V_m^2}{I_m V_m} \cong \frac{V_{co}}{I_{cc}} \quad (2.14)$$

La figure 2.6 (a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillé correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la figure (2.5)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.



(a) Influence de la résistance série.

(b) Influence de la résistance shunt

Figure (2.6) : Influence des résistances série et shunt sur les caractéristiques

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. La figure 2.6 (b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la figure (2.5)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo - courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

2-4 Influence du flux lumineux :

Le photo -courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux ψ . Le courant $ID (VD)$, étant par définition le courant direct de la jonction sous

obscurité, est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement.

Le photo - courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

La figure (2.7) représente les caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction p - n sur du silicium monocristallin de 57 mm de diamètre) à $28^{\circ}C$ et sous diverses valeurs de l'éclairement. A chacune de ces valeurs du flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} suite à une chute du flux lumineux [12].

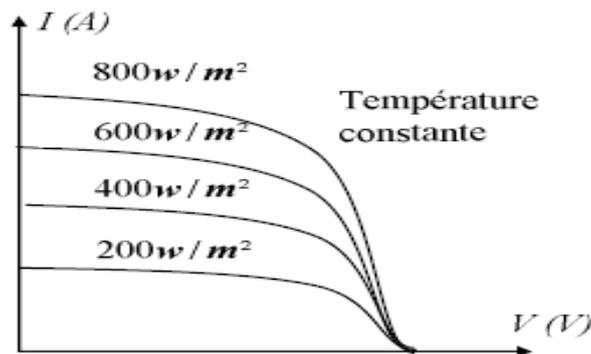


Figure (2.7) : Influence de la lumière

2-5 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo - courant augmente de $3.10^{-2} \text{ mA K}^{-1}$ par cm^2 de cellule, Par contre, le courant I augmente très rapidement avec T . Il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} . Cette diminution est de l'ordre de 2 mV par degré comme la montre la figure (2.8). L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de 5.10^{-5} W / K par cm^2 de cellule, soit une variation de 0; 35% par degré [12]. On peut intégrer le paramètre T dans l'équation 2.6 comme le montre Sukamongkol dans [11] :

$$I = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) + \lambda (T - T_{ref}) - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

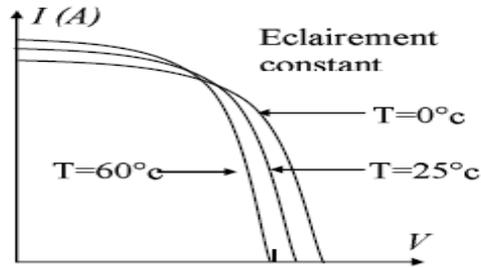


Figure (2.8) : Influence de la température

3- Le panneau solaire :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules (figure (2.9)) pour obtenir des panneaux de puissance compatible avec le matériel électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques watts - crête et quelques dizaines de watts - crête (1 m² de cellules PV produit de l'ordre de 100W) [12].

Le groupement de cellules cité ci-dessus obéit à des règles strictes à respecter [12] :

- Il ne faut connecter en série que des cellules ayant le même courant de court-circuit I_{ph} .
- Il ne faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert V_{co} .

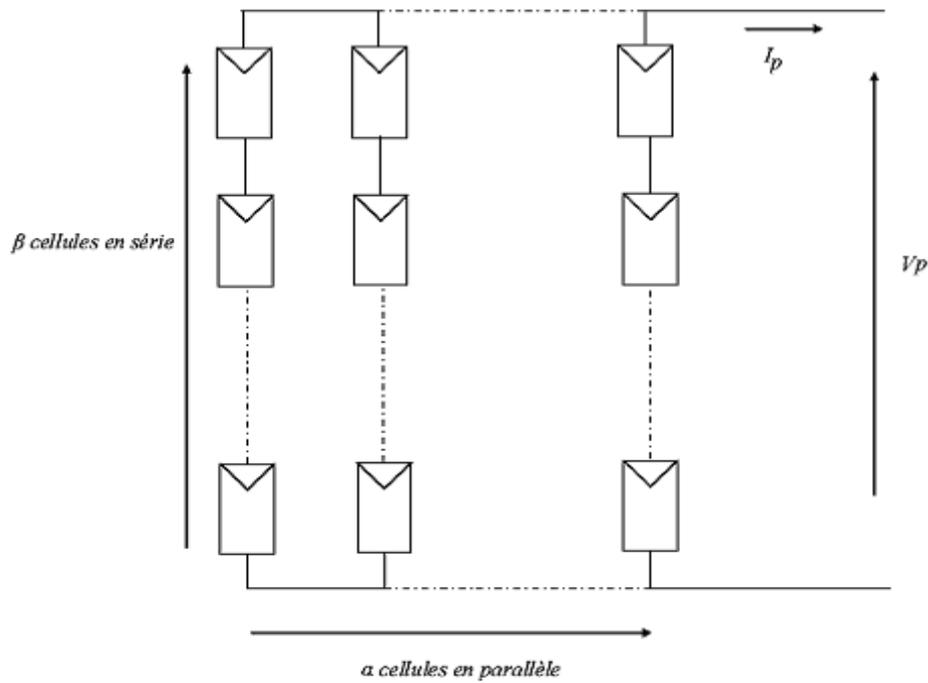


Figure (2.9) Association de α cellules en parallèle et β en série

Si les paramètres électriques des cellules associées sont dispersés et si les règles précédentes ne sont pas respectées, certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse. Elle entraîne une élévation de la température de ces photopiles et peut entraîner la détérioration du module entier. Pour éviter ce problème, on procède souvent à [12]:

- Un tri de cellules avant l'encapsulation des modules PV.
- Un emplacement des modules PV évitant les masques naturels ou artificiels provoquant de l'ombre.
- Une protection du réseau PV par l'association de diodes.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de α cellules et β en Parallèle est la suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_p = \sum_{i=1}^{\beta} V_i \\ I_p = \sum_{j=1}^{\alpha} I_j \\ P_p = \alpha \cdot \beta \cdot P \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Où V_p , I_p et P_p représente respectivement la tension, le courant et la puissance fournie par le panneau. La figure suivante montre que la caractéristique courant en fonction de la tension est identique que celle d'une cellule photovoltaïque.

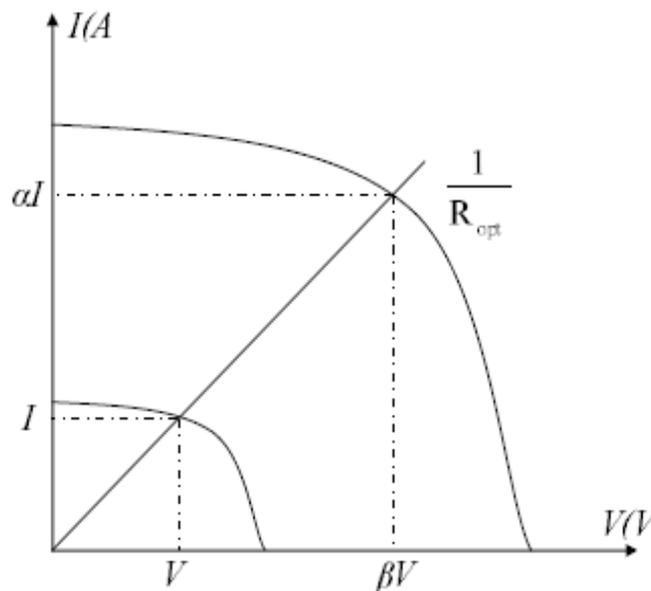


Figure (2.10) : Caractéristique de α cellules en parallèle et β en série

Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Pour certaines applications (individuelles), il est possible d'utiliser un à plusieurs modules de quelques dizaines de cellules (Puissance crête 40 W, 50 W ou 60 W). Pour des utilisations plus importantes, les générateurs photovoltaïques sont groupés dans un champ de plusieurs modules (quelques centaines voir quelques milliers) [12].

La courbe de fonctionnement $I = f(V)$ d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire par changement d'échelle sur l'axe des abscisses. Une association série - parallèle de modules solaires aura de même une courbe de

fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes. Les performances d'un générateur photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes. La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'éclairement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées ainsi que les rendements correspondants. Pour appliquer les caractéristiques courant tension d'un groupement de cellules qui sera en tout point homothétique de la courbe $I = f(V)$ d'une seule cellule PV caractéristique, quelques hypothèses sont nécessaires [9] [6] :

- * Tous les panneaux ont les mêmes caractéristiques électriques.
- * Aucune occultation partielle.
- * Aucune influence thermique.

La courbe de puissance d'un groupement série - parallèle est donc analogue à la courbe de puissance d'une cellule élémentaire. Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température ou l'influence des résistances série et shunt, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas du groupement.

Les figures suivantes montrent les caractéristiques d'un panneau Siemens SP1502 avec une puissance de 150 W, ces caractéristiques sont tracées pour différentes valeurs d'éclairement, pour une valeur constante de la température ambiante (à $T = 20\text{ °C}$) [14].

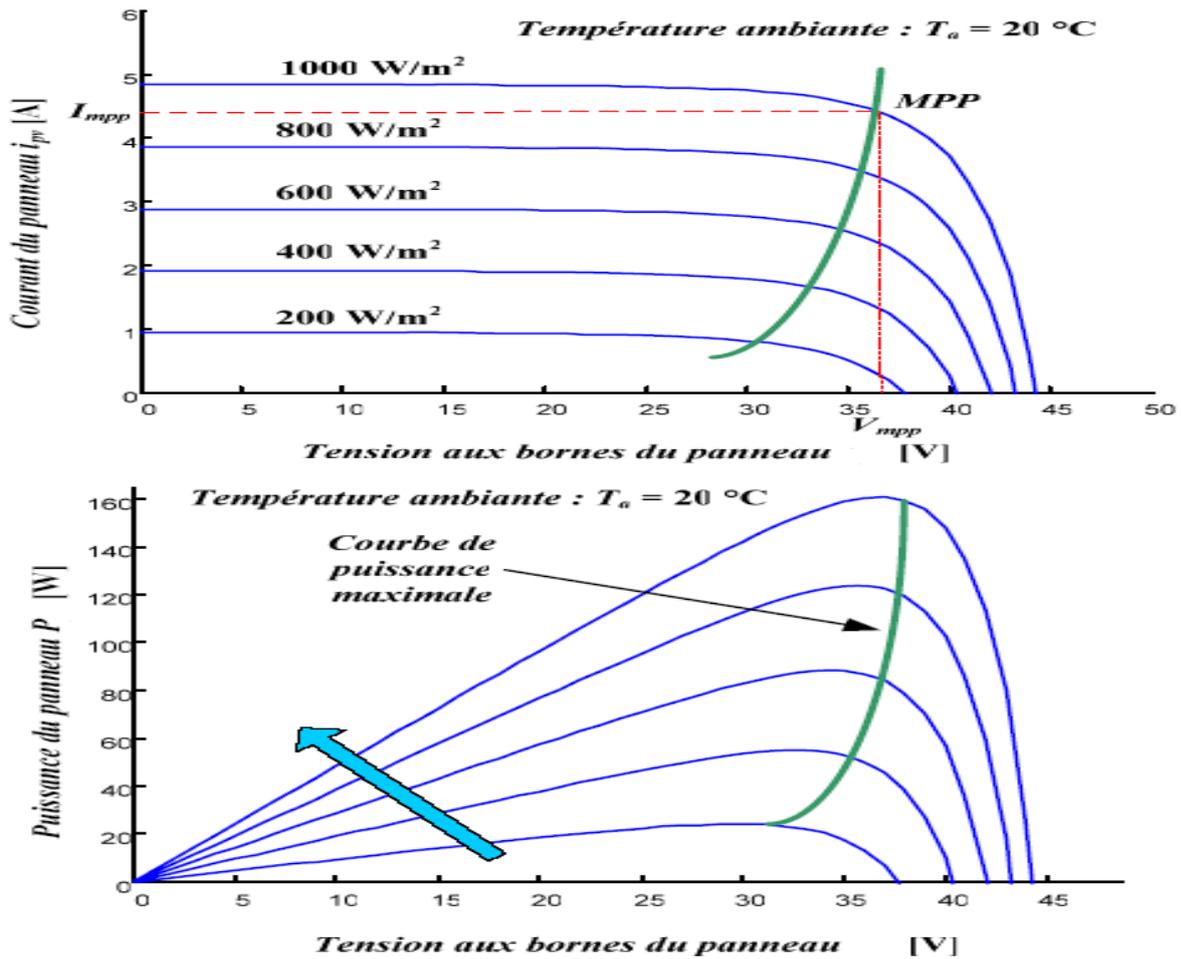
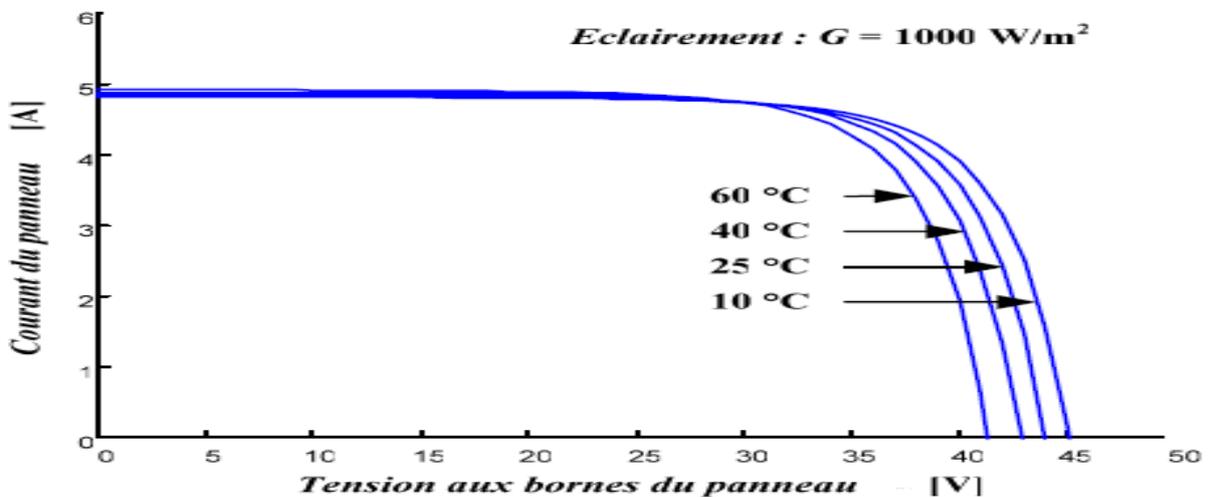


Figure (2.11) : Caractéristiques du panneau Siemens SP1502 sous une température constante

Les figures suivantes présentent les mêmes caractéristiques, tracées cette fois-ci pour différentes valeurs de la température ambiante, la valeur de l'éclairement restant constante (1000 W/m²) [14].



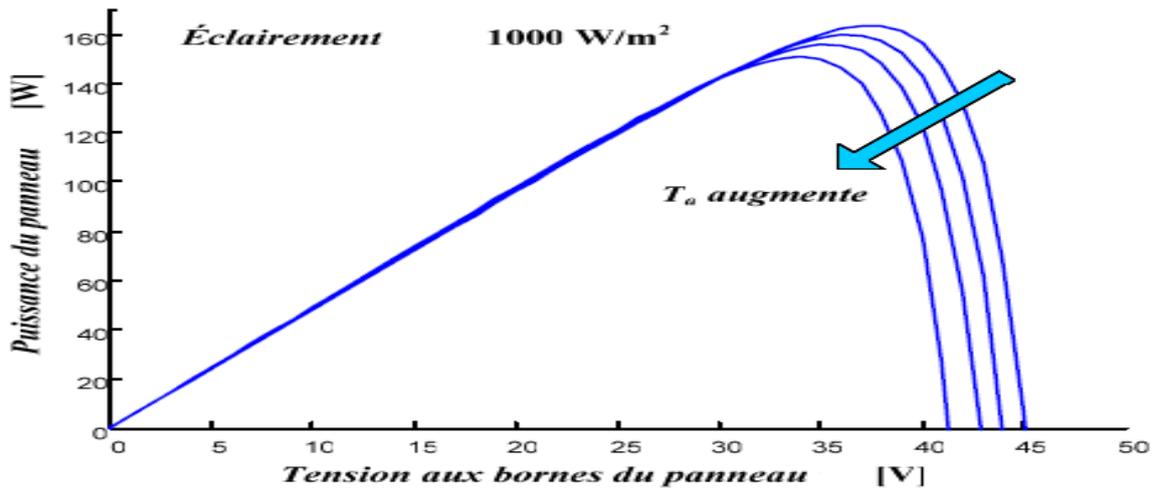


Figure (2.12) : Caractéristiques du panneau Siemens SP1502 sous un éclairement constant

4- Champ photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser en série et en parallèle, on part de la tension nominale à atteindre que l'on divise par la tension au point de puissance maximale d'un panneau au NOCT [8].

Remarque:

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) Température réelle des cellules d'un module fonctionnant aux conditions suivantes:

- température ambiante de 20 °C;
- irradiance solaire de 800 W/m² ;
- vitesse de vent de 1 m/s;

Les valeurs typiques de NOCT sont entre 45 et 60°C.

Le montage d'un champ de panneaux photovoltaïques sur une structure existante (toit, terrasse...) entraîne une charge pondérale supplémentaire de l'ordre de 15 kg/m² de module. Cette masse ne devrait pas dépasser 15% de la charge maximale admise pour le toit ou la terrasse en question [8].

Les effets du vent sont également considérables surtout si les panneaux sont distants et non intégrés au bâtiment.

L'aspect esthétique du champ doit être estimé avant sa construction : on essaiera de limiter au maximum l'impact visuel des panneaux qui reflètent la lumière par leur verre et de les intégrer le plus possible dans la structure déjà construite. Par exemple, on évitera de monter des panneaux sur un toit avec un angle différent de celui du toit. On préférera des supports bas sur une terrasse, moins visibles qu'une structure haute [8].

4-1 Mise en série et en parallèle de modules :

La mise en série des modules permet d'augmenter la tension du champ. Pour déterminer le nombre de panneaux à connecter en série, il faut connaître la tension nominale nécessaire et la tension de fonctionnement des modules.

Pour des systèmes autonomes chargeant des batteries, la tension nominale est le plus souvent un multiple de 12 V, tension de charge prévue pour les panneaux ayant de 33 à 40 cellules. Le choix dans ce cas dépend de la température ambiante du site qui détermine le choix du module, les panneaux à grand nombre de cellules pour les pays chauds, à nombre de cellules plus faible pour les pays tempérés. Ensuite on connecte en série le même nombre de panneaux que de batteries 12 V en série.

Pour les installations reliées au réseau, la tension nominale du champ devra se trouver si possible au milieu de la plage de fonctionnement de l'onduleur. Cette plage de tension correspond aux limites de fonctionnement du MPT (Max Power Tracker) de l'onduleur. Par exemple, un onduleur fonctionnant entre 80 et 120 V de tension d'entrée déterminera une tension nominale de 100 V. Ces 100 V de tension nominale devraient correspondre à la tension de puissance maximale des panneaux en série à NOCT, qui est proche de la valeur moyenne de fonctionnement sous nos latitudes. Un autre facteur est à considérer lorsqu'on connecte plusieurs modules en série: en première approximation, le courant obtenu sera limité par le courant du «plus mauvais panneau» de la chaîne. Il est donc intéressant, avant de monter un champ, de trier les panneaux et de connecter en série ceux ayant des courants à la puissance maximale le plus proche possible [8].

La mise en parallèle des modules ne pose pas de problème particulier. Plusieurs panneaux connectés en parallèle vont travailler à la même tension, leurs courants respectifs s'additionnant.

Un champ de panneaux photovoltaïques alimentant un onduleur comporte le plus souvent plusieurs chaînes de modules connectés en parallèle [8].

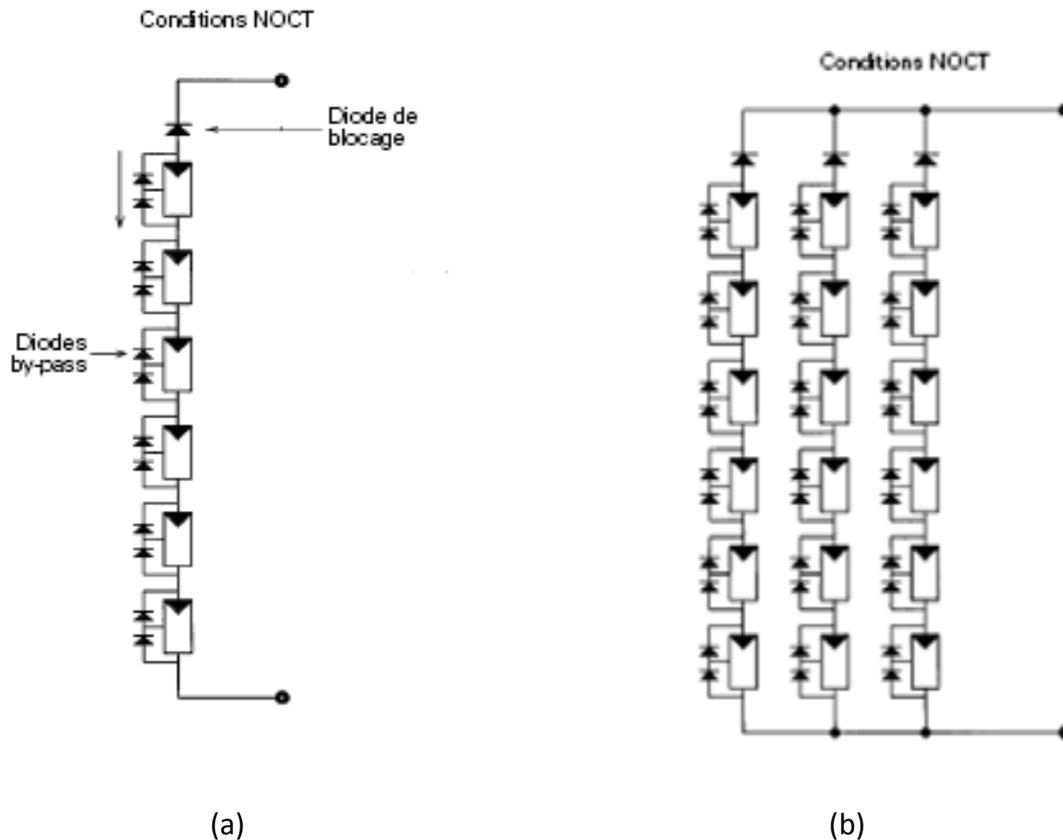


Figure (2.14) : mise série et en parallèle de plusieurs panneaux

5-Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque :

5-1 Le hacheur survolteur :

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est par nature difficile. En effet, coté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Coté charge, que ce soit de nature continue (DC), ou bien alternative (AC), comme le réseau électrique. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution

communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source - charge.

Le convertisseur utilisé est un hacheur survolteur, son schéma électrique est présenté dans la figure (3.6).

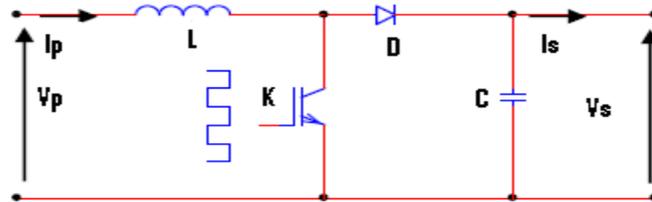


Figure (3.6) schéma électrique d'un hacheur survolteur

Ce convertisseur est utilisé premièrement pour adopter les niveaux de tension et deuxièmement pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale [16].

Pour cela on a les deux équations suivantes :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V_{pv} \quad (2.17)$$

$$I_s = (1 - \alpha) \cdot I_{pv} \quad (2.18)$$

Où :

α : représente le rapport cyclique

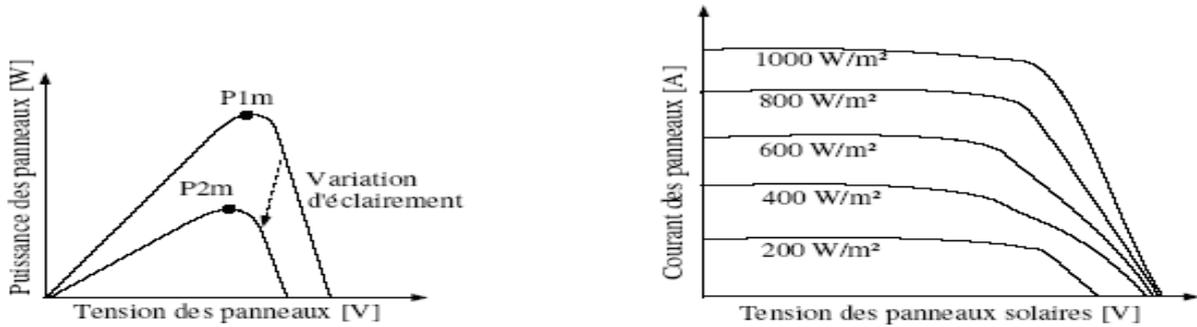
V_p, I_p : représentent respectivement la tension et le courant fournis par le générateur photovoltaïque.

V_s, I_s : représentent respectivement la tension et le courant fournis par le convertisseur.

Donc grâce au rapport cyclique on peut facilement fixer la tension de sortie du convertisseur selon les applications.

5-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

Dans des conditions données, c'est au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension présentée à la figure (3.7a) que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. Nous pouvons voir sur cette figure l'évolution de la puissance pour différents éclairagements.



(a) caractéristique de la puissance

(a) caractéristique de la tension

Figure (3.7) : caractéristiques des panneaux solaire

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT (maximum power point tracker) sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculée à partir du produit tension - courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairage, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Afin de surmonter ces difficultés, plusieurs méthodes sont souvent adoptées telles que les méthodes analogiques et les méthodes numériques utilisant des outils informatiques [12]

5-2-1 Les méthodes analogiques :

Les méthodes analogiques sont souvent simples à réaliser et à bas prix. Parmi ces dernières, nous citons quelques méthodes souvent utilisées :

* La première méthode consiste à commander un convertisseur à travers un circuit électronique utilisant des cellules PV étalons comme consigne de référence afin de déterminer la tension optimale du générateur PV [4] ou le courant optimal [7]. Malgré le fonctionnement à une puissance proche de la puissance maximale, quelques inconvénients sont à soulever :

_ Non prise en compte des dérives des caractéristiques du générateur PV dues aux paramètres extérieurs (vieillessement, vent, température, poussières).

_ Dépendance totale de la cellule étalon qui peut subir des modifications ou anomalies.

* Une deuxième méthode analogique se basant sur la recherche extrême analogique de la puissance maximale a été utilisée dans [1]. Cette méthode est basée sur la dérivation de la puissance P du générateur. L'action de la commande du convertisseur permet de changer la résistance apparente vue du générateur et par conséquent on aura une variation de la puissance débitée par ce dernier. Le générateur travaille à son optimum de puissance lorsque le signal dérivé dP/dt s'annule. Cette méthode, quoique théoriquement séduisante et facile à étudier présente par contre des difficultés de mise en œuvre et ceci pour différentes raisons [3] :

_ nécessité de dériver le signal analogique $P(t)$ ce qui engendre des bruits et des dérives importantes difficiles à filtrer,

_ Instabilité due aux bruits et aux perturbations,

_ nécessité de tenir compte de la dynamique de mesure de puissance,

* La troisième méthode concerne celle de modulation par détection synchrone. Elle consiste à superposer, en série avec le générateur une source de tension sinusoïdale de faible amplitude. La puissance débitée par le générateur sera alors modulée d'une manière sinusoïdale et la phase de la modulation nous renseigne sur la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. Le positionnement du point de fonctionnement se fera aussi par incrémentation ou décrémentation de la tension aux bornes du générateur PV [10].

5-2-2 Méthodes micro – programmées :

L'évolution du domaine de la micro-informatique a permis d'améliorer les conditions de fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Parmi ces conditions, nous citons les procédures micro programmées permettant un fonctionnement du système à puissance maximale. L'élaboration de ces procédures se base sur plusieurs principes tels que :

* L'utilisation d'une base de données climatique, permettant de déterminer pour chaque température et éclairement, la puissance maximale de référence prévue.

* La simulation des équations caractéristiques du générateur PV pour chercher chaque nouvelle référence (puissance référence).

* L'utilisation des techniques de recherche en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale suivant les variations des conditions climatiques.

Les deux premières méthodes nécessitent un modèle de la source PV ainsi que des mesures de la température et de l'éclairement. Quant à la troisième, on n'a besoin ni du modèle de la source ni de la température ni de l'éclairement. Cependant cette dernière méthode nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur PV en temps réel. Une procédure de commande micro programmée calcule la puissance délivrée par le générateur PV ainsi que sa dérivée puis élabore une commande du système qui ne se stabilise que dans le cas d'une dérivée nulle de la puissance correspondant à une puissance maximale [5]

6- Options de raccordement au réseau public de distribution

Pour ceux qui veulent raccorder leurs champs de production photovoltaïque ils doivent impérativement choisir l'une de ces deux options de raccordement [15] (voire le tableau):

Option	Vente du surplus	Vente de la totalité

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

<p>Schéma de principe</p>	<p>Champ PV</p> <p>Utilisations</p> <p>Onduleurs</p> <p>Schéma de connexion : vente du surplus</p> <p>Limite de concession</p> <p>Comptage de l'énergie fournie au client</p> <p>Comptage de l'énergie produite par le client</p> <p>Réseau</p>	<p>Champ PV</p> <p>Utilisations</p> <p>Onduleurs</p> <p>Schéma de connexion : vente de la totalité</p> <p>Limite de concession</p> <p>Comptage de non consommation</p> <p>Comptage de l'énergie produite par le client</p> <p>Comptage de l'énergie fournie au client</p> <p>Réseau</p>
<p>Compteur de consommation</p>	<p>Compte l'énergie que vous soutirez du réseau</p>	<p>Idem</p>
<p>Compteur de production</p>	<p>Compte uniquement l'énergie injectée sur le réseau - déduction faite de la consommation instantanée « au fil du soleil » de vos appareils</p>	<p>Compte la totalité de l'énergie produite par votre centrale PV.</p> <p>Un disjoncteur permet de déconnecter du réseau la branche de la production en cas de besoin (coupure d'électricité)</p>

<p>Compteur de NON-CONSOMMATION installé au frais de l'acheteur</p>	<p>inexistant</p>	<p>Il permet au réseau public de distribution ou « l'acheteur » de vérifier qu'aucun soutirage n'est effectué frauduleusement</p>
<p>Avantages</p>	<p>Une relative autonomie puisque vous consommez « au fil du soleil » l'énergie produite par la centrale PV. Une relative indépendance vis à vis de la hausse du tarif d'achat dans les 20 ans à venir</p>	<p>Une meilleure recette financière du fait de la vente d'une plus grande quantité d'énergie à l'acheteur Vous lisez les chiffres de votre production et de votre consommation</p>
<p>Inconvénient</p>	<p>Aucun compteur n'indique la quantité d'énergie autoconsommée. <i>NB. Pour y remédier il suffit d'ajouter dans votre habitat deux compteurs intermédiaires</i></p>	<p>L'ajout de deux compteurs et d'un disjoncteur occupe nécessairement plus de place et empiète parfois sur votre espace à vivre.</p>

Conclusion :

Comme il est montré dans la Figure (2.5), il existe un seul point sur la caractéristique

I - V d'un panneau photovoltaïque pour lequel la puissance maximale est produite. La puissance délivrée par les panneaux PV dépend de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes. Pour optimiser le rendement énergétique du système PV, une solution est l'utilisation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker). Celui-ci permet de suivre le point de puissance maximale.

De plus l'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue donc pour quelle soit compatible avec le réseau dans le cas où on veut injecter cette électricité dans ce dernier il insérer un onduleur entre le camp de production et le réseau, notons que la modélisation et la simulation de l'onduleur vont être présentées dans le chapitre VI.

- [1] Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators. J. Appelbaum. IEEE Transaction on Energy Conversion, EC-1(No 1), 1986.
- [2] Influence de la température sur les paramètres électrique, caractéristique des photopiles au silicium polycristallin : modélisation et analyse par thermographie infrarouge. N. Saïd. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille, 1986
- [3] Gestion optimale de l'énergie de systèmes basés sur les énergies renouvelables, étude et réalisation. N. Ben Slama. Thèse ENSET de Tunis, 1986.
- [4] Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter. H. Johan and R. Enslin.. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1991.
- [5] Onduleur autonome triphasé compact asservi pour des générateurs de puissance finie. L. Hamdi. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille, 1991.
- [6] Convertisseurs photovoltaïques. L. Protin and S. Astier. Techniques de l'ingénieur, D3360, 1996.
- [7] Performance analysis of a pv powered dc motor driving a 3-phase self-excited induction generator. S.M. Alghuwainem. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1996
- [8] Centrale PV, guide pour le dimensionnement et la réalisation de projet, PCER, 1996
- [9] Photopiles solaires. A. Ricaud. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [10] Contribution à la commande automatisée d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau. M.N. Mansouri. Thèse ENIT Université de Tunis, 1999.
- [11] A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads. Renewable energy, Y. Sukamongkol, S. Chungpaibulpatana, and W. Ongsakul. 2002.
- [12] Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, Y. PANKOW, thèse doctorat, LEEPL, 2004
- [13] Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans

un réseau autonome. I .VECHIU . Thèse doctorat de l'université du HAVRE, 2005

- [14] Production décentralisée dans les réseaux de distributions. Etude pluridisciplinaire de la modelisation pour le contrôle des sources. Emanuel Florin MOGOȘ Thèse de doctorat l'école nationale supérieur d'arts et métiers. 2007
- [15] Le photovoltaïque (PV) raccordé au réseau public de distribution. www.solagro.org. Avril 2007.
- [16] Intégration d'un Nouveau Système d'Anti-îlotage Dans la Commande de Système Photovoltaïque Connecté au Réseau, R. Kadri, Mohamed Mostefai, 4th International Conférence on Computer Integrated Manufacturing, 2007
- [17] Cellule Solaire : Modèle Spice I.U.T. de Nîmes, 2008

Chapitre III

La conversion de l'énergie électrique

1-Introduction :

Les convertisseurs de l'électronique de puissance ont pour rôle de convertir l'énergie électrique sous différentes formes, cela se fait par connexion et déconnexion de circuits électriques des générateurs et des récepteurs.

2-Les convertisseurs de puissance en électrotechnique:

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, des machines ont été inventées pour réaliser les différentes conversions possibles des formes d'énergie électrique [7].

- Pour convertir l'énergie issue d'une source de tension continue U (dynamo ou batterie d'accumulateurs) en une source de tension U' réglable on utilise une association de machines tournantes moteurs à C-C – dynamo.
- Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension continue U en une source de tension alternative monophasée ou triphasée de valeur efficace réglable, on utilise une association de machines tournantes moteur à courant continu – alternateur.
- Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée de valeur efficace V en une tension continue U , on utilise une association de machines tournantes moteur asynchrone - dynamo.
- Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée de valeur efficace V fixe en une source de tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace réglable V' , on utilise une machine non tournante (transformateur ou autotransformateur).
- Pour convertir l'énergie issue d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée de valeur efficace fixe V en une source de tension alternative de fréquence f' et de valeur efficace V' réglable on utilise deux groupes de machines tournantes :
 1. un groupe Ward-Léonard où la dynamo fournit une tension continue réglable U' .
 2. un groupe où le moteur à courant continu alimenté (à l'induit) par une tension U' , est à vitesse réglable, il entraîne un alternateur.

On obtient ainsi par le groupe tournant Ward-Léonard et le groupe tournant moteur à courant continu – alternateur un générateur alternatif à valeur efficace V' et à fréquence f' réglable.

Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- grande fiabilité et robustesse.
- Grande durée de vie.
- Facilité relative de réglage.
- Assez bon rendement.

Avec le développement de l'automatique, l'électronique et l'informatique, les machines électrotechniques peuvent être remplacées par des convertisseurs statiques utilisant des composants électroniques en commutation.

Les avantages de ces convertisseurs statiques sont nombreux :

- Système moins lourd et moins encombrant.
- Excellent rendement.
- Facilité de mise en œuvre grâce à l'automatisation.
- Coût relatif en baisse grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants.

3-Les convertisseurs en électronique de puissance :

Les types de convertisseurs peuvent être représentés selon le schéma de la figure (3.1) Suivant [7] :

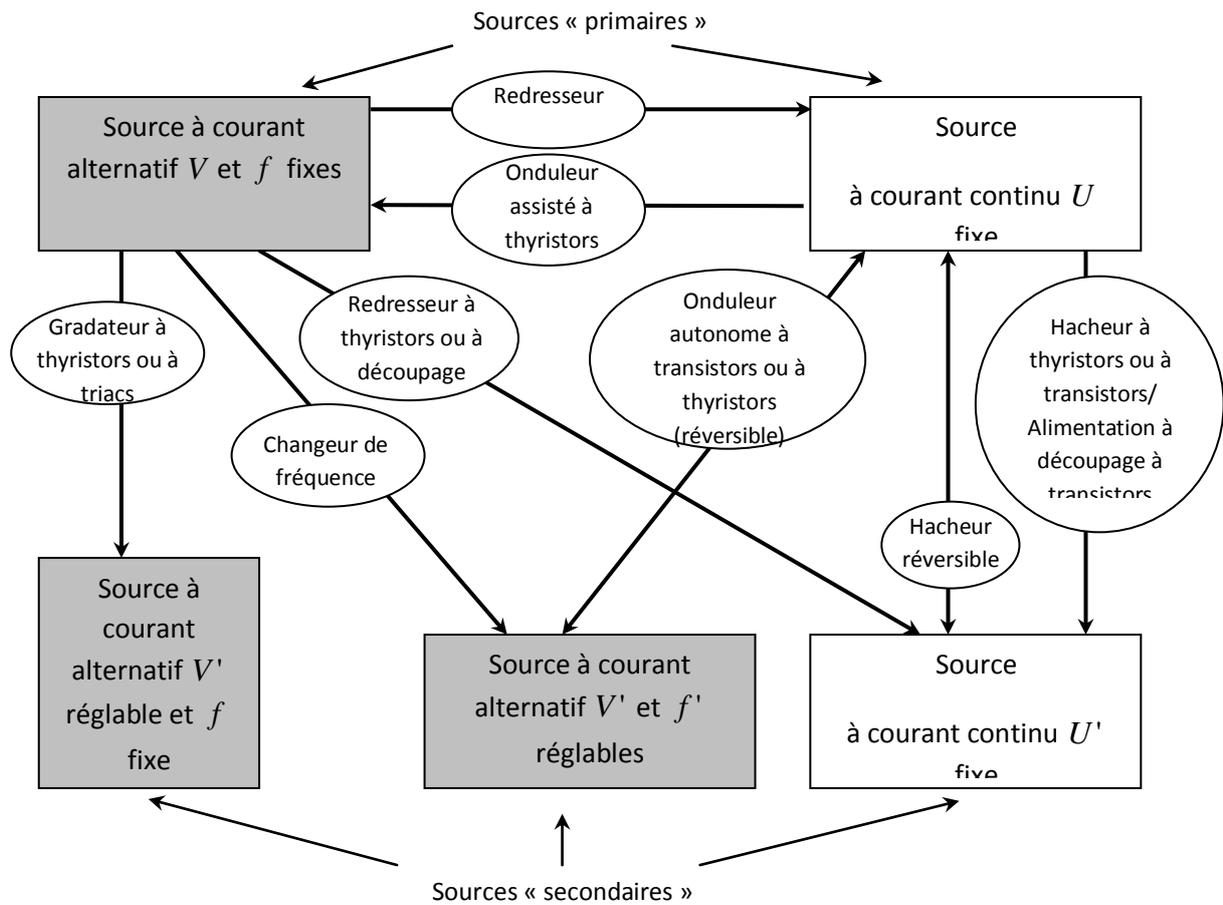


Figure (3.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

On remarque que les sources primaires de l'électronique de puissances sont :

- Le réseau alternatif, sinusoïdal, monophasé ou triphasé, à valeur efficace V de tension imposée constante (source de tension) et à fréquence f constante.
- Le réseau continu, à valeur U imposée constante (source de tension).

Les sources secondaires ou utilisatrice d'un convertisseur sont :

- Soit une charge passive : résistance par exemple.
- Soit un moteur, pouvant fonctionner éventuellement en génératrice.

- Soit un autre réseau.

Si la source secondaire est alternative, on fait varier la valeur efficace V' de la tension, et la fréquence f' .

Si la source secondaire est à courant continu, on fait varier la tension U' .

4-Approche théorique des convertisseurs de puissance :

4-1 Structure matricielle des convertisseurs :

4-1-1 but :

On cherche à transmettre la puissance entre sources électriques de manière que [7] :

- Le rendement soit le plus proche possible de l'unité. Pour cela, on utilise des interrupteurs parfaits.
- Le contrôle du transfert de puissance soit le plus efficace possible. On cherche la souplesse de la commande et sa fiabilité. En particulier, vu la fragilité des convertisseurs de puissance, il est possible, par une commande électronique appropriée de le protéger efficacement contre les courts-circuits et les surtensions.

Le principe fondamental du transfert idéal de puissance consiste à associer, grâce à des interrupteurs, des sources électriques de nature différentes. (Une ou plusieurs sources (s) de tension avec une ou plusieurs sources (s) de courant).

4-1-2 Modélisation des convertisseurs statique :

4-1-2-1 : Description du fonctionnement :

La structure de base de ce type de systèmes est représentée à la figure (3.2) : le convertisseur électronique de puissance est constitué d'une matrice d'interrupteurs intercalée entre deux sous-systèmes électriques : un générateur d'énergie électrique et un récepteur. La commande de l'état des interrupteurs à semi-conducteurs qui constituent le convertisseur permet d'agir sur les connexions existant entre les N bornes de sortie du générateur et les M bornes d'entrée du récepteur et de gérer ainsi le transfert d'énergie entre ces deux sous-systèmes. Les signaux nécessaires à la commande des interrupteurs sont élaborés par une électronique de commande et de régulation qui le plus souvent détermine les intervalles de conduction des interrupteurs à partir de consignes reçues de l'extérieur et des mesures prélevées sur l'état du système [6].

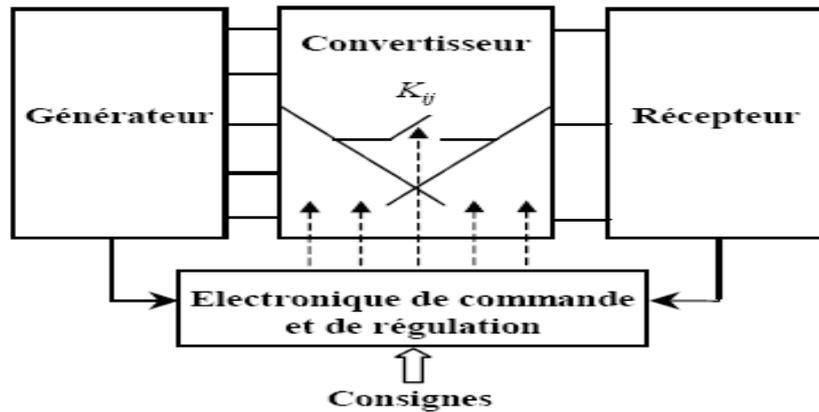


Figure (3.2) : Structure d'un système électronique de puissance

Remarque :

Dans le cas du fonctionnement entièrement commandé, les changements d'état des interrupteurs sont imposés par les signaux de commande extérieurs indépendamment de l'évolution temporelle des tensions et des courants aux accès du convertisseur [6].

4-1-2-2 : Description du modèle :

Les convertisseurs de l'électronique de puissance permettent de convertir de l'énergie électrique sous différentes formes par connexion et déconnexion de circuits électriques comportant des générateurs et des récepteurs. La fonction "interrupteur" est réalisée au moyen de semi-conducteurs qui obéissent à leur propre loi. La nature continue des grandeurs électriques est retrouvée soit par l'emploi d'éléments de filtrage, soit par la nature filtrante des générateurs et des récepteurs qui y sont reliés. Ainsi, les convertisseurs mettent en jeu des grandeurs électriques dont les évolutions peuvent être continues ou discontinues. Cette nature hybride se retrouve naturellement dans leur modèle, que l'on peut ainsi ordonner sous la forme de deux ensembles d'équations mathématiques désignés par le vocable "Partie Commande" et "Partie Opérative" (figure (3.3)) [5].

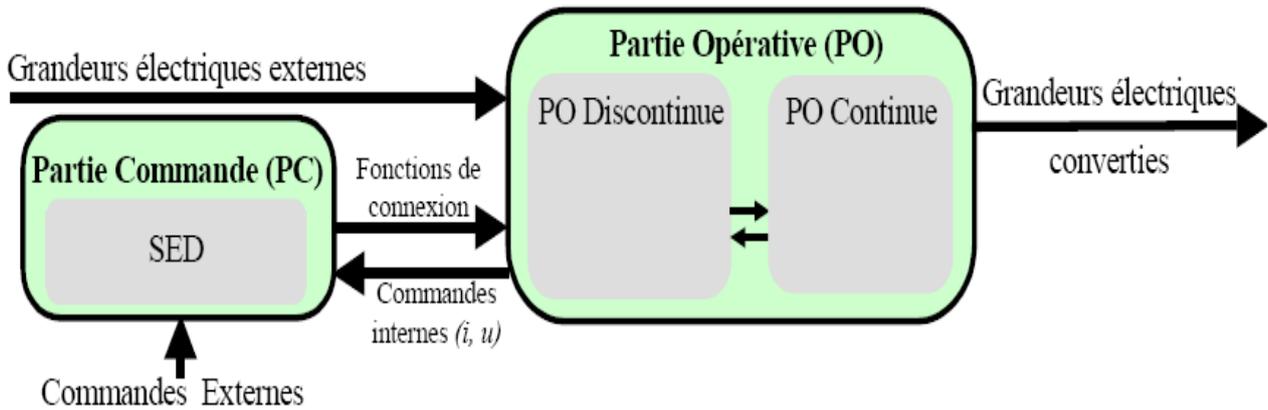


Figure (3.3) : Décomposition du modèle d'un convertisseur

La Partie Commande met en évidence les conditions d'ouverture et de fermeture des semi-conducteurs. Ces conditions dépendent de [5]:

- Les commandes externes appliquées aux semi-conducteurs (commande à l'amorçage, commande au blocage)
- Les commandes internes liées à l'évolution temporelle des grandeurs tension et courant de chaque semi-conducteur.

Remarque :

Cette Partie Commande est un Système à Evènements Discrets (SED) qui peut donc être décrit au moyen d'un réseau de Petri.

La Partie Commande du modèle permet d'établir si des connexions entre phases sont établies ou non. A ce niveau de modélisation, on peut alors raisonner en considérant un convertisseur équivalent constitué uniquement d'interrupteurs idéaux. La connexion établie par ces derniers est décrite par une fonction dite de connexion (notée f) affectant respectivement aux états ouvert et fermé les valeurs numériques 0 et 1.

La Partie Opérative se décompose elle-même en une Partie Opérative Discontinue et une partie opérative continue [5], [4]:

1. Partie Opérative Discontinue :

Elle décrit l'effet des connexions sur la conversion des grandeurs électriques (que l'on nommera par la suite grandeurs modulées). Cette conversion électrique est quantifiée par une matrice de conversion notée M .

2. Partie Opérative Continue :

Elle établit à partir des équations différentielles l'évolution temporelle des grandeurs électriques continues qui ont été converties.

Diverses représentations mathématiques (formalisme d'état, grandeurs de Laplace...) et graphiques (Graphe Informationnel Causal, Schéma-blocs, Représentation Energétique Macroscopique, ...) peuvent être employées pour décrire cette partie.

4-2 Modélisation des convertisseurs à topologie matricielle :

4-2-1 Les interrupteurs statiques :

Par définition, un interrupteur est un dipôle permettant d'établir une connexion binaire (ouvert - fermé) dans le circuit électrique où il est inséré. La tension à ses bornes à l'état ouvert, le courant qui le traverse à l'état fermé caractérisent son fonctionnement statique et ses directionnalités. Les conditions de ses changements d'état caractérisent son fonctionnement dynamique et sa commandabilité.

La figure (3.4) montre les représentations statiques et dynamiques de l'interrupteur idéalisé qui sont respectivement le référentiel d'axes u, i non borné et un réseau de Petri d'état à deux places [1]. L'interrupteur idéalisé apparaît donc comme un élément énergétiquement neutre puisqu'il n'est le siège d'aucune perte d'énergie ; pratiquement, on admet ainsi la chute de tension nulle (courant nul) à l'état passant (ouvert) quel que soit le signe du courant (de la tension) et les commutations (changement d'état) sont supposées instantanées (durées nulles).

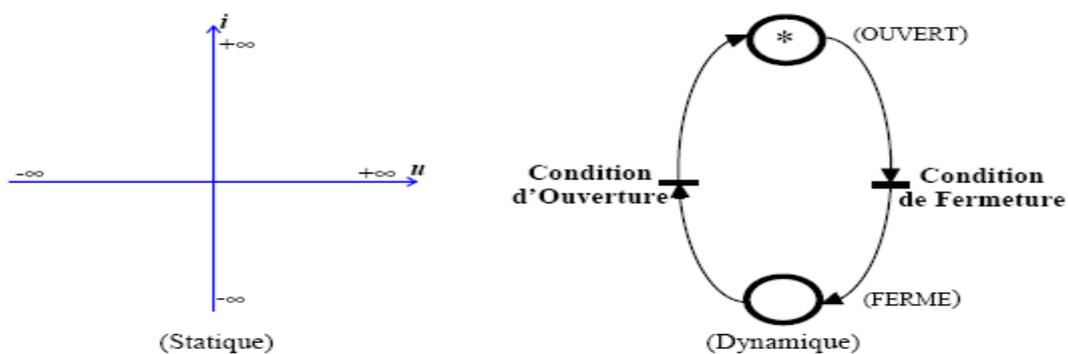


Figure (3.4): Caractérisation de l'interrupteur idéalisé

La figure (3.5) visualise la dégradation imposée par la technologie ; il apparaît des pentes à l'état passant et à l'état bloqué traduisant la présence de résistances internes (R_b : résistance à l'état bloqué, R_p : résistance à l'état passant) [4]. Les caractéristiques statiques sont détachées des axes du référentiel (u, i) et la représentation dynamique doit être enrichie de deux places (ou macroplaces) traduisant globalement le mécanisme des changements d'état.

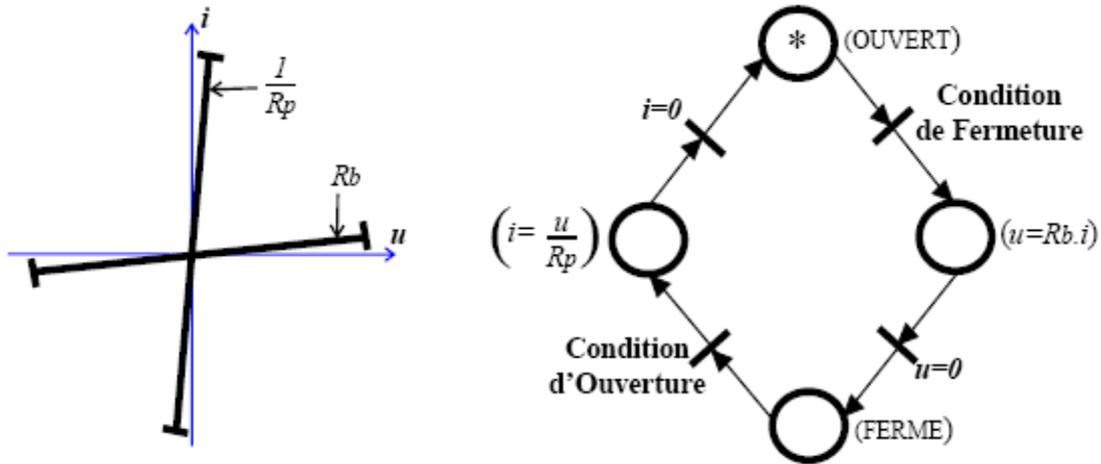


Figure (3.5) Caractérisation d'un interrupteur idéal bidirectionnel

4-2-2 Présentation et notation :

Comme on a déjà vu précédemment, les convertisseurs ont une partie opérative discontinue qui correspond à une distribution des interrupteurs sous forme d'une matrice.

Deux conditions sont imposées par les lois de l'électricité [7], [5], [4]:

- Les sources connectées a chaque coté de cette matrice doivent être de nature différentes.
- $\forall t$, les interrupteurs doivent être dans des états qui ne conduisent pas au court-circuit des sources de tension ni à l'ouverture des sources de courant.

Il s'ensuit la relation impérative suivante :

$$\forall c \in \{1, \dots, C\}, \text{ on a : } \sum_{l=1}^L f_{lc} = 1 \tag{3.1}$$

Où : f_{lc} est la fonction de connexion

Un convertisseur L phasé en tension / C phasé en courant est représenté par une matrice d'interrupteurs reliant les L source de tension alignées verticalement et les C sources de courant alignées horizontalement.

Cette matrice d'interrupteurs est représentée par la figure suivante :

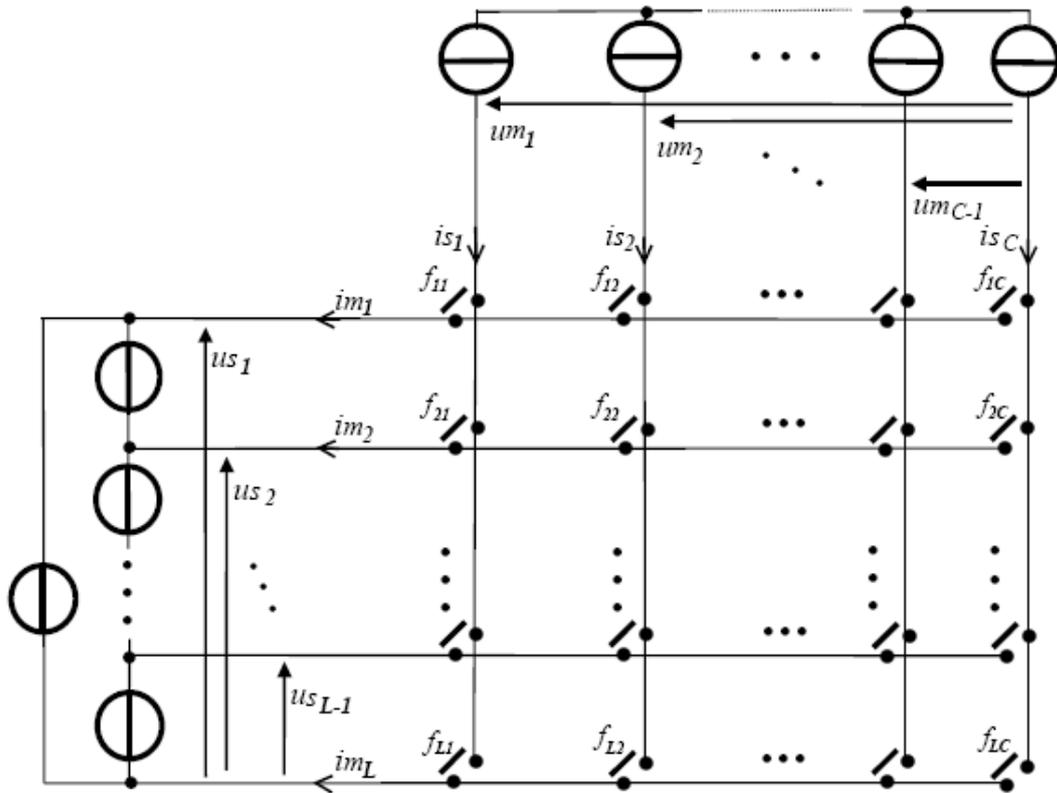


Figure (3.6) : Représentation d'un convertisseur L phasé en tension / C phasé en courant

Représentation formelle :

- Les cellules de commutations sont disposées verticalement.
- La fonction de connexion se trouve à l'intersection de la ligne l et la colonne c est notée f_{lc}
- On se ramène à une configuration o'ù les sources de tension sont couplées en polygone et o'ù les sources de courant sont couplées en étoile, ce choix d'association élimine implicitement la composante homopolaire.

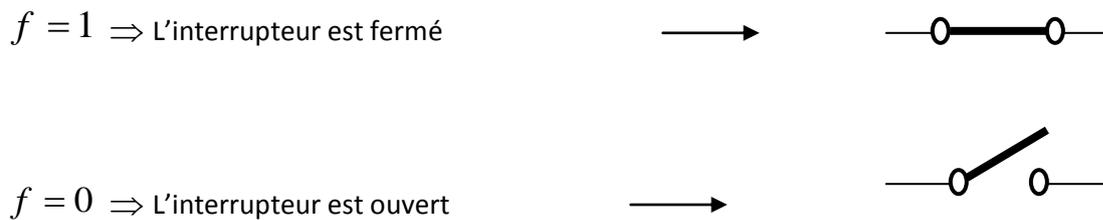
Les notations :

- i_{s1}, \dots, i_{sC} : les courants commutés issus des sources de courant, leurs somme est supposée nulle.

- u_{s1}, \dots, u_{sL-1} : les tensions commutées issus des sources de tension.
- i_{m1}, \dots, i_{mL} : les courants modulés
- $u_{m1}, \dots, u_{mC}, \dots, u_{mC-1}$: les tensions modulées.

4-2-3 la fonction de connexion:

A tout interrupteur idéalisé, on associe une fonction de connexion tel que :



Cette fonction permet de lier les grandeurs propres à l'interrupteur (u_m, i_m) aux grandeurs imposées par la source connecté à cet interrupteur (u_s, i_s) [2]

Il vient :

$$\begin{cases} i_m(t) = f(t) i_s(t) \\ u_m(t) = (1 - f(t)) u_s(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où :

i_s, u_s : Grandeurs commuté

i_m, u_m : Grandeurs modulée

Pour un interrupteur idéalisé et bidirectionnel, la fonction de connexion est une copie exacte de la commande externe. Dans tous les autre cas (unidimensionnalité, commandabilité réduite), la fonction de connexion représente d'un point de vu fonctionnel la partie idéalisée de l'élément considéré.

4-2-4 La matrice de connexion:

On note **[F]** la matrice de connexion regroupant l'ensemble de toutes les fonctions de connexion, elle est donnée par [4], [5] :

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots\dots\dots & f_{1C} \\ f_{21} & f_{22} & \dots\dots\dots & f_{2C} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ f_{L1} & f_{L2} & \dots\dots\dots & f_{LC} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Pour maintenir la continuité des courants délivrés par les sources de courant, on doit fermer au moins un interrupteur relié à cette source. De même, pour éviter le court-circuit d'une source de tension, on ne peut fermer au plus qu'un seul interrupteur relié à cette source de courant. L'application de ces deux conditions a pour conséquence la fermeture systématique d'un seul interrupteur appartenant ainsi à une cellule de commutation verticale, cela conduit à l'équation (3.1) précédente.

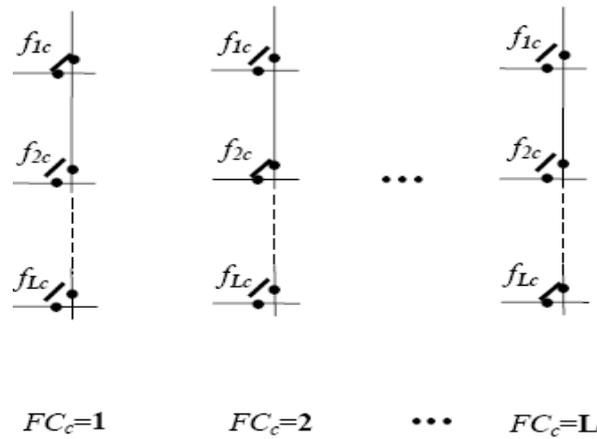
Il y a donc autant de cellules de commutation que de sources de courant. Chaque cellule de commutation comporte autant d'interrupteurs que de sources de tension. Le nombre de configurations physiquement réalisables par un convertisseur statique à topologie matricielle est donc L^C .

4-2-5 La fonction de commutation :

On associe à la cellule de commutation de la colonne c une fonction de commutation notée FC_c . Une valeur numérique est affectée à cette fonction pour chaque configuration possible de la cellule. L'ensemble de ces valeurs numériques constitue le domaine de variation de la fonction de commutation. Un seul interrupteur étant fermé à un instant donné, une cellule de commutation de L interrupteurs

possède une fonction de commutation ayant L valeurs numériques. Chaque configuration se distingue par la localisation de l'interrupteur fermé ; c'est la raison pour laquelle nous choisissons comme valeur numérique pour FC_c l'indice de la ligne l correspondant à cet élément [4].

Exemple de configurations de la cellule de commutation et valeurs numériques correspondantes aux fonctions de commutation:



4-2-6 La matrice de conversion:

Les courant modulé $(i_1, \dots, i_l, \dots, i_L)$ circulant dans les sources de tension sont liés à l'état des cellules de commutation et au courants (i_{s1}, \dots, i_{sC}) . La conversion appliquée sur les sources de courant peut être exprimée par [4], [5], [7] :

$$[I_m] = [F][I_s] \tag{3.4}$$

Avec :

$[I_s] = [i_{s1}, \dots, i_{sc}, \dots, i_{sC}]^T$: est un vecteur contenant les C courants commutés.

$[I_m] = [i_{m1}, \dots, i_{ml}, \dots, i_{mL}]^T$: est un vecteur contenant les L courants modulés

La somme ces courants issus des sources est nulle (loi des noeuds), ce qui donne :

$$\sum_{c=1}^C i_{sc} = 0 \quad (3.5)$$

La connaissance des (C-1) courants des sources de courant et des (L-1) courants des sources de tension suffit donc à caractériser la conversion effectuée sur les courants. On convient d'éliminer dans les vecteurs la dernière composante à l'aide des relations suivantes :

$$i_{mL} = -\sum_{l=1}^{L-1} i_{ml} \quad (3.6)$$

$$i_{sC} = -\sum_{c=1}^{C-1} i_{sc} \quad (3.7)$$

On obtient :

$$\begin{bmatrix} i_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{m(L-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_{11} - f_{1C}) & \dots\dots\dots & (f_{1(C-1)} - f_{1C}) \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ (f_{(L-1)1} - f_{LC}) & \dots\dots\dots & (f_{(L-1)(C-1)} - f_{LC}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{s(C-1)} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Que l'on note :

$$\begin{bmatrix} i_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{m(L-1)} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{s(C-1)} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

[M] : est matrice de conversion et est de dimension **(L-1). (C-1)**.

Tout comme **[F]**, **[M]** est une matrice fonctionnelle dont les éléments m_{lc} sont appelés fonctions de conversion. Elles sont liées aux fonctions de connexion par :

$$\forall l \in \{1, \dots, (L-1)\}, \forall c \in \{1, \dots, (C-1)\}$$

$$m_{lc} = f_{lc} - f_{lc} \quad (3.10)$$

Le courant i_L est également lié à la matrice de connexion. On a en effet la relation implicite :

$$i_{mL} = -(i_{m1} + i_{m2} + \dots + i_{m(L-1)}) = [-1 \quad -1 \quad \dots \dots \dots -1] \cdot \begin{bmatrix} i_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{m(L-1)} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Et on obtient ainsi :

$$i_L = [-1 \quad -1 \quad \dots \dots \dots -1] \cdot [M] \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{s(C-1)} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Remarque :

Dans le cas d'un convertisseur monophasé, la matrice de connexion est une matrice de dimension 2x 2 et la matrice de conversion se réduit à un scalaire.

De même, les tensions modulées aux bornes des sources de courant sont liées à l'état des cellules de commutation et aux tensions commutées délivrées par les sources de tensions.

Puisque le convertisseur ne dissipe pas de l'énergie et qu'il ne contient pas d'éléments de stockage, on peut écrire l'égalité des puissances instantanées sur les variables d'entrée et de sortie on obtient :

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u(C-1) \end{bmatrix} = [M]^T \cdot \begin{bmatrix} u_{s1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{s(L-1)} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

4-3 Le modèle de connaissance :

Fondamentalement, un convertisseur statique est l'association d'une matrice d'interrupteurs à des sources de nature différente. Par conséquent, son fonctionnement interne va mettre en jeu des types de variables [4] :

- Des variables discrètes qui sont les ordres d'ouverture et de fermeture appliqués aux interrupteurs correspondant à la commande externe.
- Des variables issues des sources dont l'état généralisé constitue la commande interne.

Dés lors, le modèle de connaissance de ce convertisseur peut se décomposer en deux parties distinctes (figure (3.7)) :

1. une partie commande qui met en évidence les conditions d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et établit la relation entre les fonctions de connexion et de conversion.
2. une partie opérative qui détermine l'évolution des variables continues affectées par la fonction de conversion.

Cette partie se décompose alors en un bloc discontinu décrivant l'effet des fonctions de conversion sur les grandeurs électriques et un bloc continu contenant les équations d'états associées aux sources et aux éléments passifs.

On regroupe toutes les variables dans des vecteurs et des matrices de la manière suivante [4], [5] :

- [G] la matrice contenant les commandes externes

- [X] le vecteur contenant les grandeurs d'état

-[Y] le vecteur contenant les grandeurs électriques de sortie;

-[UC] le vecteur contenant l'ensemble des variables commutées ([Us] et [Is]), $[UC]^T = \begin{bmatrix} [Us]^T & [Is]^T \end{bmatrix}$

- [UM] le vecteur contenant l'ensemble des variables modulées ([U] et [I]) et correspondant au vecteur de commande. Ce vecteur généralise l'ensemble des conversions effectuées. En effet, on a :

$$\begin{bmatrix} [U] \\ \dots \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M]^T & \cdot & [O] \\ \dots & \cdot & \dots \\ [O] & \cdot & [M] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Us] \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ [Is] \end{bmatrix}$$

D'où :

$$[UM] = \begin{bmatrix} [M]^T & \cdot & [O] \\ \dots & \cdot & \dots \\ [O] & \cdot & [M] \end{bmatrix} \cdot [UC] \quad (3.14)$$

-[W] le vecteur contenant les sources d'énergie fournies par le réseau qui correspond dans le domaine de l'automatique à un vecteur de perturbation. Il a été présenté [3] comme un vecteur contenant les grandeurs électriques externes au convertisseur.

Ces variables sont liées entre elles par les équations d'état qui nécessitent la définition des matrices (considérées constantes) :

- [A] la matrice d'état;

- [B1] et [B2] les matrices d'application des variables modulées et des sources d'énergie;

- [C] la matrice d'observabilité;

- [D1] et [D2] les matrices d'incidence des variables modulées et des sources d'énergie sur les sorties [4], [5].

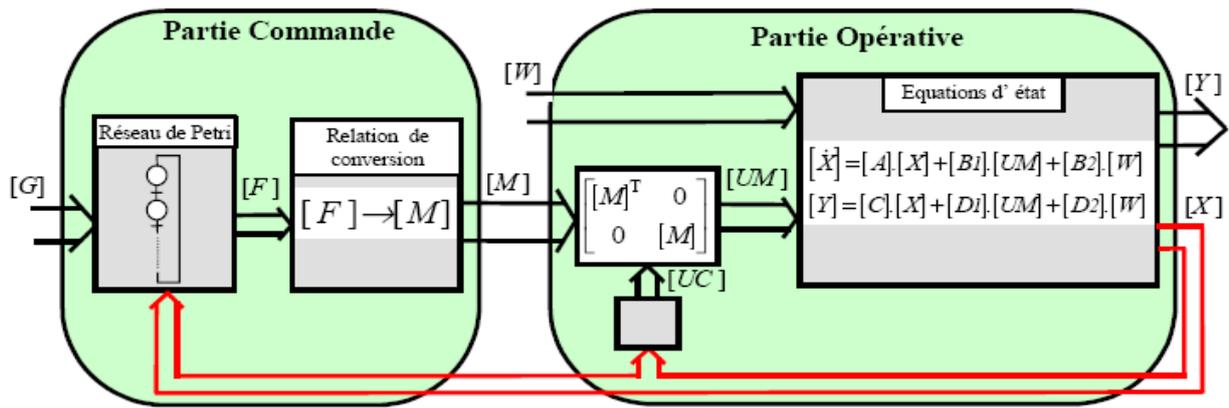


Figure (3.7) : Modèle de connaissance de l'axe de puissance

Lorsque les interrupteurs sont en mode totalement commandable et idéalisés, la commande externe et la fonction de connexion se confondent. La Partie Commande se réduit alors à des fonctions combinatoires de la commande externe et le modèle de connaissance du convertisseur entièrement commandé se simplifie (figure (3.8)).

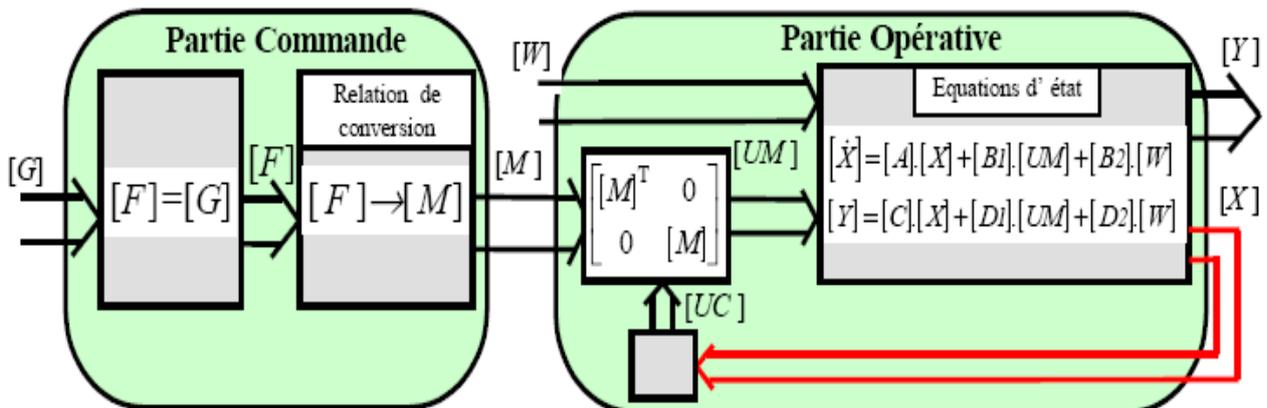


Figure (3.8) : Modèle de connaissance d'un convertisseur totalement commandable

5- Application aux convertisseurs usuels :

Nous allons maintenant appliquer les relations théoriques obtenues sur deux exemples de structures usuelles.

5-1 Transformation monophasée / monophasée :

La représentation générale du convertisseur monophasée / monophasée est donnée par la figure (3.9) [4]:

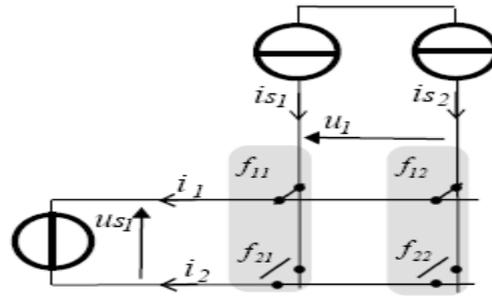


Figure (3.9): Représentation du convertisseur monophasé / monophasé

A partir de la représentation du convertisseur, on sait qu'il faut faire correspondre aux deux colonnes de la matrice de connexion deux fonctions de commutation dont leurs indices sont les numéros de chaque colonne : $FC1$ et $FC2$.

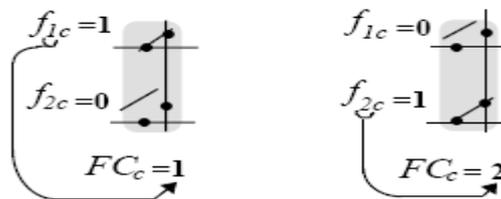


Figure (3.10): Codage des fonctions de commutation

FC_1	f_{11}	f_{21}	FC_2	f_{12}	f_{22}
1	1	0	1	1	0
2	0	1	2	0	1

Tableau 3.1: Correspondance entre les fonctions de connexion et les fonctions de commutation

Les courants sont convertis selon la relation (2.4) :

Etant donné que le convertisseur est monophasé en tension ($L=2$) / monophasé en courant ($C=2$), la matrice $[F]$ est donc une matrice (2x2) qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} i_{m1} \\ i_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix}$$

D'où :

$$i_{m1} = (f_{11} - f_{12}) \cdot i_{s1}$$

$$M = (f_{11} - f_{12})$$

Ces valeurs figurent dans le tableau 3.2 :

FC_1	FC_2	f_{11}	f_{21}	f_{12}	f_{22}	M
1	1	1	0	1	0	0
1	2	1	0	0	1	1
2	1	0	1	1	0	-1
2	2	0	1	0	1	0

Tableau 3.2: Valeurs numériques de $[M]$

Les conversions entre tensions composées sont données par la relation (3.13):

$$u_m = (f_{11} - f_{12}).u_s$$

Avec :

$$M = (f_{11} - f_{12})$$

5-2 Transformation monophasée / triphasée :

La représentation générale des convertisseurs monophasée / triphasée est représentée par la figure suivante [4]:

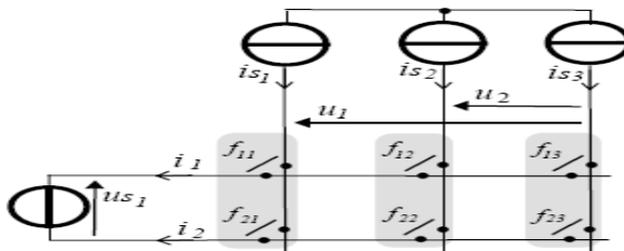


Figure (3.14): Représentation du convertisseur monophasée en tension / triphasée en courant ($L=2 / C=3$)

C'est un convertisseur qui possède trois cellules de commutation à deux interrupteurs. Le tableau 3.3 récapitule les valeurs des fonctions de commutation correspondant aux différentes valeurs des fonctions de connexion.

FC_1	f_{11}	f_{21}	FC_2	f_{12}	f_{22}	FC_3	f_{13}	f_{23}
1	1	0	1	1	0	1	1	0
2	0	1	2	0	1	2	0	1

Tableau 3.3: Valeurs des fonctions de connexion générées

Les courants issus des sources sont convertis selon la relation (2.4) donne :

$$\begin{bmatrix} i_{m1} \\ i_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{211} & f_{22} & f_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix}$$

D'où :
$$i_{m1} = \begin{bmatrix} f_{11} - f_{13} & f_{12} - f_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix}$$

Avec :
$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} - f_{13} & f_{12} - f_{13} \end{bmatrix}$$

Les conversions entre tensions composées sont exprimées par la relation (3.13) :

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = M^T \cdot u_{s1} = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \end{bmatrix} \cdot u_{s1}$$

Conclusion :

Les outils fournis par la théorie établie précédemment, vont nous permettre d'étudier et de modéliser les différents convertisseurs afin de les concevoir.

Dans notre cas deux types de conversion sont envisagés :

- une conversion de type continu / continu : cette conversion est assurée par un convertisseur monophasé en courant / monophasé en tension appelé hacheur
- une conversion de type continu / alternatif : cette conversion est assurée soit par un convertisseur monophasé en tension / monophasé en courant soit par un convertisseur monophasé en tension / triphasé en courant appelé onduleur

Ces deux types de convertisseur vont être traités dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques

[1] Contribution à la conception des commandes dans les systèmes à convertisseurs statiques .J.P.

HAUTIER. Rapport de synthèse d'Habilitation, No H16, Université des Sciences et Techniques de Lille, 1989

- [2] Concepts pour la synthèse des commandes de convertisseurs, G.D.R. Conception de dispositifs et systèmes électrotechniques, Modélisation des convertisseurs statiques. J.P. Hautier, C. Rombaut, X. Guillaud, J.P. Cambronne, Ph. Lemoigne, B. Francois, 1993

- [3] Concepts de modélisation pour la commande des convertisseurs statiques, X. Guillaud, J.P.Hautier, Journal de physique III, Avril 1994.

- [4] Formalisme de modélisation et de synthèse des commandes appliqué aux convertisseurs statiques à structure matricielle, B.Francois, Thèse de doctorat, université de Lille, 1996

- [5] Conception des dispositifs de commande des convertisseurs de puissance par modulation directe des conversions Perspectives pour l'insertion de production d'énergie dispersée dans les réseaux électriques , B.Francois, habilitation a diriger des recherches, université de Lille, 2003

- [6] Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI Application aux actionnements électriques, S.Gusia, Université catholique de Louvain, 2005

- [7] Convertisseur et électronique de puissance : commande, description et mise en œuvre, M.Picard DUNOD, Paris, 2007

Chapitre IV

Injection de l'électricité dans le réseau

(Conversion de l'énergie photovoltaïque)

1- Introduction :

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

L'objectif dans ce chapitre est de mieux faire connaître ces appareils d'électronique de puissance en présentant leur principe de fonctionnement, leur commande ainsi que le filtrage des harmoniques.

2-Exemples de Structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :

Deux types de structures de système photovoltaïque existent :

- *Les systèmes à connexion directe au réseau*

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux exemples [8].

- *Le système à bus continu intermédiaire :*

Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [2]. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable [3] [4].

2-1 Les systèmes à connexion directe au réseau

2-1-1 Structure à convertisseur unique :

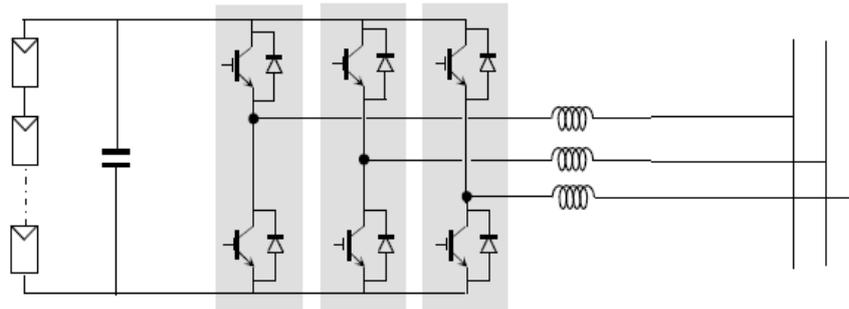


Figure (4.1) : Mise en série de Plusieurs modules PV a un seul onduleur

Le dispositif présenté est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. L'association de plusieurs modules photovoltaïques en série à pour but l'obtention d'une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée. On pourra aussi insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau.

2-1-2 Structure avec bus à basse tension alternative :

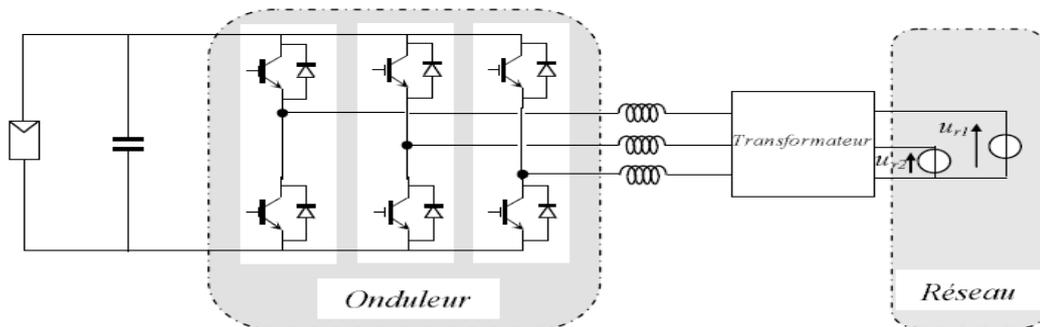


Figure (4.2) : Bus à basse tension alternative

La figure (4.2) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité du personnel. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par le module (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement.

2-2 Système a bus continu intermédiaire :

2-2-1 Structure avec convertisseur forward :

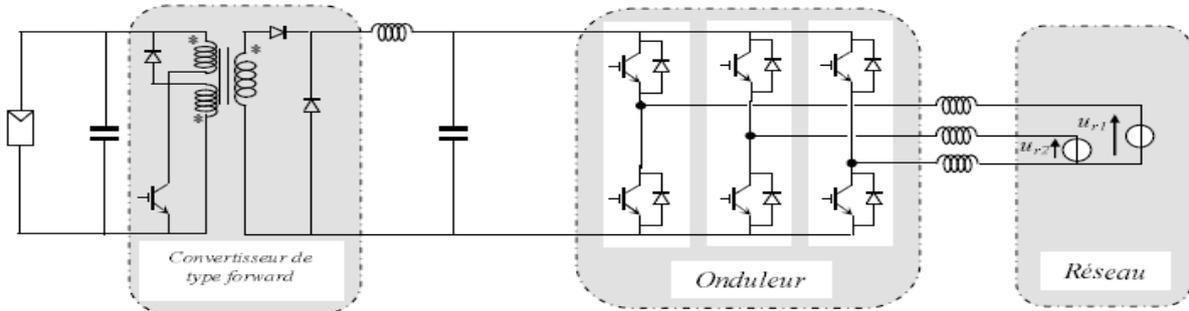


Figure (4.3) : Convertisseur de type forward alimentant le bus continu

La figure (4.3) présente un convertisseur forward qui est capable d'augmenter la tension en sortie du module photovoltaïque à la tension désirée. L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc plus nécessaire, la conversion continue - alternative se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. Les inconvénients majeurs de ce montage sont :

- * La capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module,
- * Le bus continu supportera un signal en créneaux qui induira une grande émission d'ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite ; l'induction du transformateur compris dans le convertisseur générera des pertes de fuite,
- * La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien.

2-2-2 Structure avec un convertisseur de type fly-back :

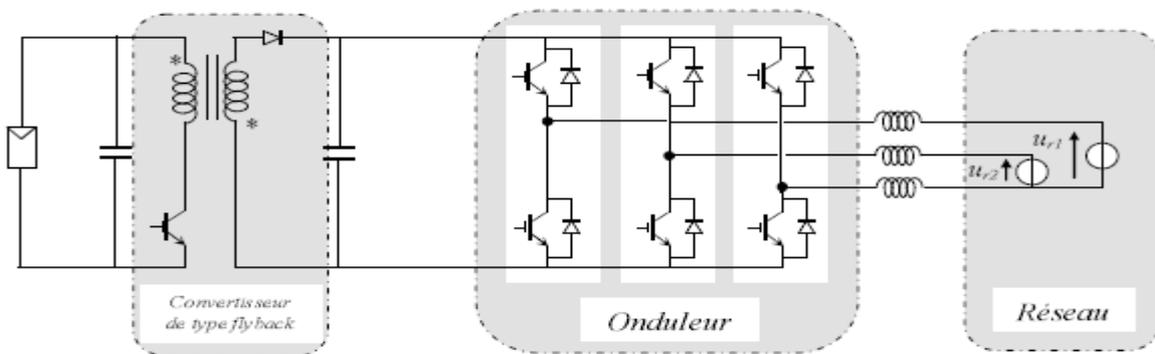


Figure (4.4) : Structure avec un convertisseur de type fly-back

La figure (4.4) montre une structure à base d'un convertisseur de type fly-back qui élève la tension de sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désirée. La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante V_{ac1} et le transfert de puissance vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qu'il augmente le coût de l'installation.

2-2-3 Structure avec hacheur et onduleur :

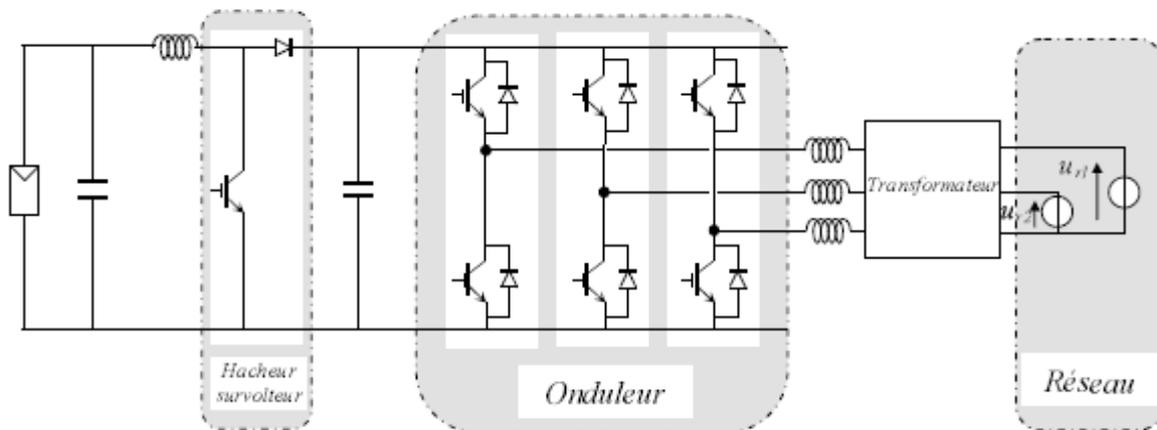


Figure (4.5) : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé

La figure (4.5) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ". L'avantage de ce système c'est que les batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

3- Adaptation de l'énergie produite par le photovoltaïque avec le réseau :

3-1 Introduction :

Dans une installation raccordée au réseau, l'appareil de conditionnement de la puissance est un onduleur qui représente l'élément clé le plus délicat de l'installation. Situé à l'interface entre le champ PV et le réseau, il doit être adapté aux impératifs techniques et doit assurer la sécurité de deux sous-systèmes électriques très différents.

A présent notre travail se fixera sur la modélisation, la commande de ce convertisseur, ainsi le filtrage des harmoniques indésirables qui provoquent la pollution du réseau électrique. Notons que la simulation s'effectuera sous **MATLAB/SIMULINK**.

3-2 Qu'est-ce qu'un onduleur ?

Un onduleur, appelé aussi convertisseur, est un dispositif de l'électronique de puissance, qui permet de transformer la tension continue fournie par les panneaux pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant à une tension alternative de fréquence et d'amplitude standard.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant en fonction de la source continue, mais ce sont les onduleurs de tension qui sont les plus répandus dans les systèmes industriels et dans toutes leurs gammes de puissance (de 1kWc à plusieurs MWc) [11].

La plupart des onduleurs sont des structures en pont, constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et d'un régulateur. Grâce à un jeu de commutation approprié, réalisé souvent par MLI, l'énergie électrique continue est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau [11].

3-3 Structure de connexion avec trois onduleurs monophasés :

3-3 -1 Exemple d'une Centrale PV Connectée au Réseau :

Le schéma représenté dans la figure (4.7) représente Synoptique de la Centrale PV connectée au Réseau du CDER [9] :

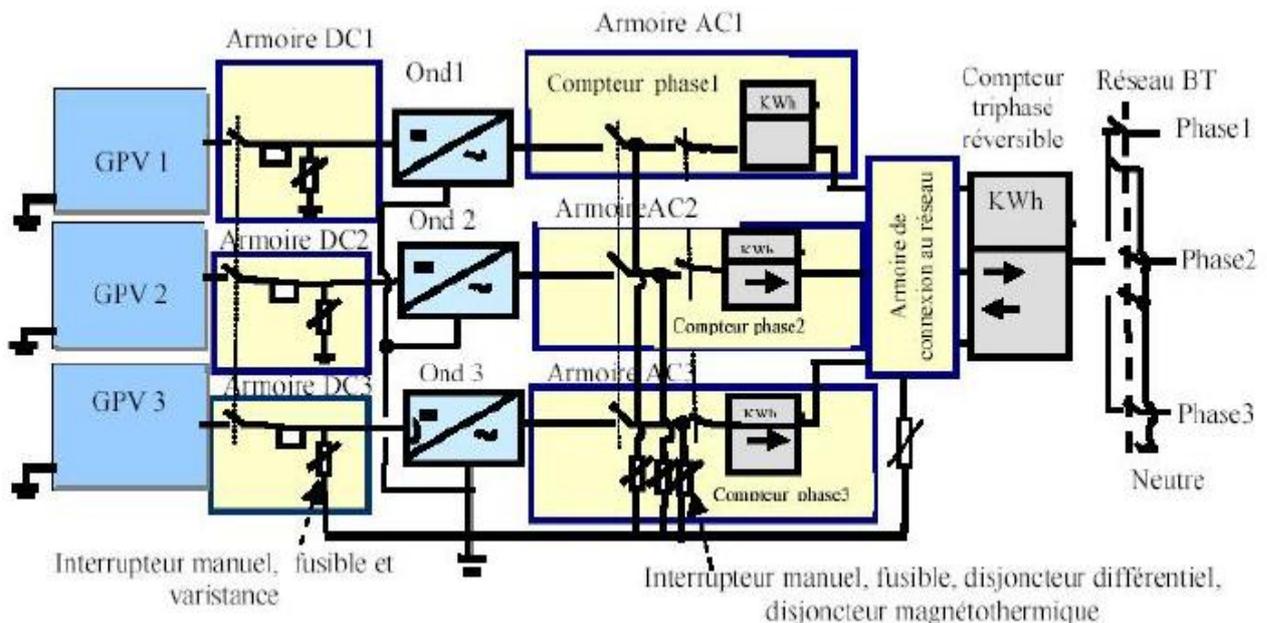


Figure (4.7) : Synoptique de la Centrale PV Connectée au Réseau du CDER

3-3-2 Modélisation de l'Onduleur de tension monophasé :

Le schéma de l'onduleur de tension est le suivant [8] :

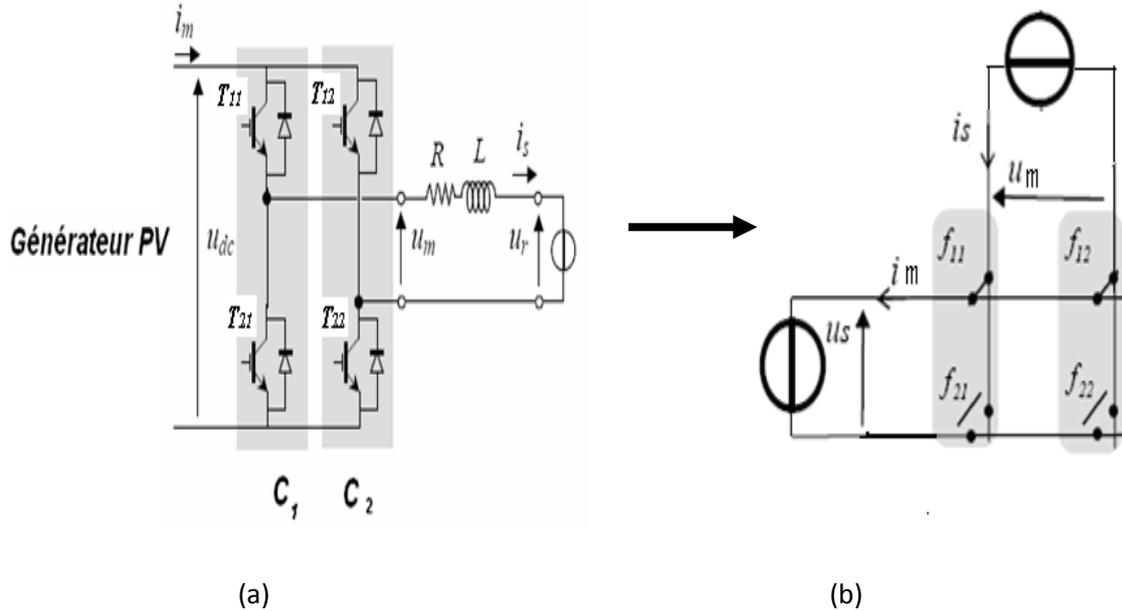


Figure (4.8) : Représentation matricielle de l'onduleur monophasé de tension

L'onduleur de tension monophasé est composé de deux cellules de commutations **C1** et **C2**, le total donne quatre interrupteurs. Chaque cellule comporte deux interrupteurs **T11** et **T21** pour la cellule **C1**, **T12** et **T22** pour la cellule **C2**.

Comme on a déjà vu dans le chapitre deux, ce convertisseur peut être représenté sous la forme matricielle représentée par la figure (4.8.b).

Ainsi la matrice de connexion qui lie la tension modulée noter U_m a la tension commutée (source) notée U_s (U_{dc}) est donnée par :

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Les interrupteurs doivent être dans des états qui ne conduisent pas au court-circuit des sources de tensions ni à l'ouverture des sources de courants, ce qui nous amène à écrire les deux relations suivantes :

- Pour **C1**: $f_{11} + f_{21} = 1$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

- Pour C_2 : $f_{21} + f_{22} = 1$

Donc pour chaque cellule si un interrupteur est à l'état ouvert l'autre doit être à l'état fermé.

La tension modulée est donnée par la relation suivante : $[U_m] = [F].[U_s]$ La matrice de connexion peut être réduite en introduisant la matrice de conversion, pour l'onduleur monophasé on a une seule tension modulée d'où la matrice de conversion qui se réduit à un scalaire, à partir de l'équation (3.10), vue dans le chapitre (3), la fonction de conversion s'écrit :

$$m_{lc} = f_{lc} - f_{lC} \quad \Rightarrow \quad m = f_{11} - f_{12}$$

D'où le courant modulé et la tension modulée s'écrivent :

$$\begin{cases} i_m = m.i_s \\ u_m = m.u_s \end{cases} \quad (4.2)$$

De plus cette matrice de conversion caractérise aussi une modulation réalisée par la connexion des interrupteurs, cette propriété est intéressante pour considérer le transfert de puissance active P dans les onduleurs, c'est ainsi que l'on peut écrire :

$$P = U_m.i_s = U_s.i_m = m.U_s.i_s \quad (4.3)$$

Donc le transfert de puissance ne dépend que d'une seule variable m peut valoir $\{+1, 0, -1\}$.

3-3-3 Commande de l'Onduleur de tension monophasé :

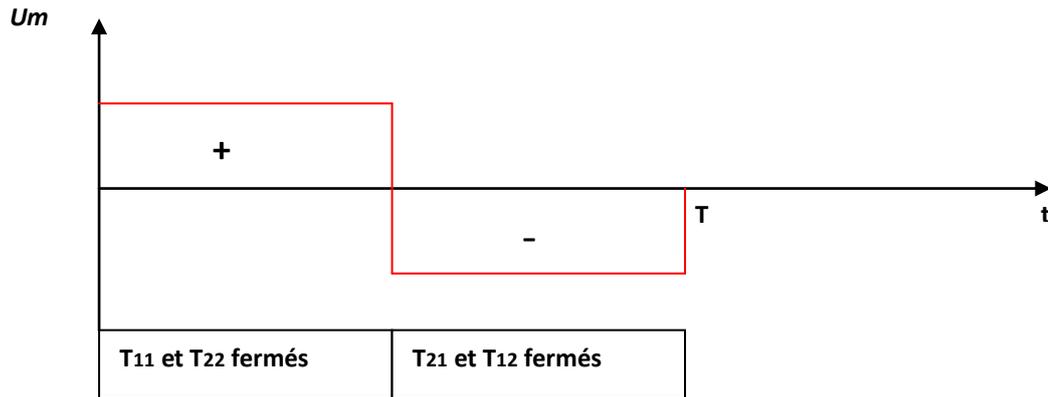
Le convertisseur étant supposé totalement commandable, les commandes externes appliquées aux interrupteurs sont confondues avec les états ouverts ou fermés des interrupteurs idéalisés.

Plusieurs types de commande peuvent être envisagés pour pouvoir commander l'onduleur. On peut citer [10] :

a)- La commande simple :

Fermer les interrupteurs T_{11} et T_{22} pendant la première période, ensuite fermer T_{21} et T_{12} , ainsi on récupère une tension alternative dans la sortie de l'onduleur avec une période déterminée selon le temps de conduction de chaque paire d'interrupteurs, cela est illustré par la figure suivante :

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

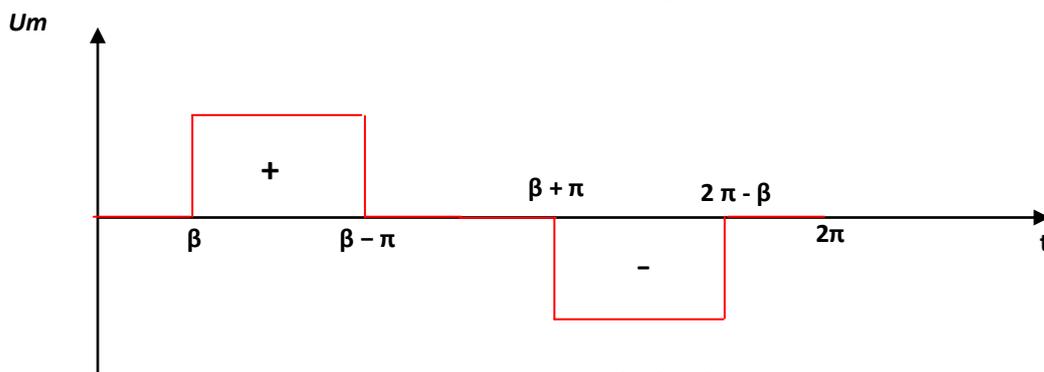


b)- Commande décalée :

Où on impose les commandes suivantes :

- * $f_{11} = 1$ durant $[\beta, \beta - \pi]$ (première demi-période)
- * $f_{21} = \overline{f_{11}}$ commande complémentaire
- * $f_{12} = 1$ durant $[\pi + \beta, 2\pi - \beta]$ (deuxième demi période)
- * $f_{22} = \overline{f_{12}}$ commande complémentaire

Et on récupère une tension alternative représentée par la figure suivante :



c)- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

C'est la commande que nous avons choisie pour commander l'onduleur.

Justification :

On choisie ce type de commande car il nous offre les possibilités suivantes :

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

- Commande en temps réel des cellules de commutations
- Facilité de contrôle de la valeur efficace, la fréquence, ainsi que la phase.
- Le pouvoir du rejet des harmoniques indésirables vers les hautes fréquences, nous facilite l'opération du filtrage.

Le principe de cette commande est de comparer un signal de référence avec un autre signal appelé signal porteur, cette comparaison conduit à l'obtention d'une loi de commande qu'on doit appliquer aux interrupteurs de notre convertisseur.

Notre but est d'obtenir une tension modulée sinusoïdale d'amplitude, de fréquence et de phase parfaitement compatible avec le réseau électrique. Pour cela, le signal de référence choisi, est sinusoïdale appelé aussi la fonction génératrice de période T, ce signal est donné par : $x(t) = X \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$ où $0 \leq X \leq 1/\sqrt{2}$.

Avec X est appelé **taux de modulation**, qui est une grandeur de réglage de la valeur efficace du fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur.

Le signal porteur est de type triangulaire de période T_e , il est donné par :

$$tri(t) = 4 \cdot t / T_e \quad \text{si } (-T_e/4) < t < (T_e/4) \quad \text{modulo } T_e$$

$$tri(t) = (-4 \cdot t / T_e) + 2 \quad \text{si } (T_e/4) < t < (3 \cdot T_e/4) \quad \text{modulo } T_e \quad (4.4)$$

Et $M = \frac{f_e}{f} = \frac{T}{T_e}$ appelé indice de modulation, c'est un nombre entier très élevé.

Ces deux signaux sont représentés par la figure (4.11)

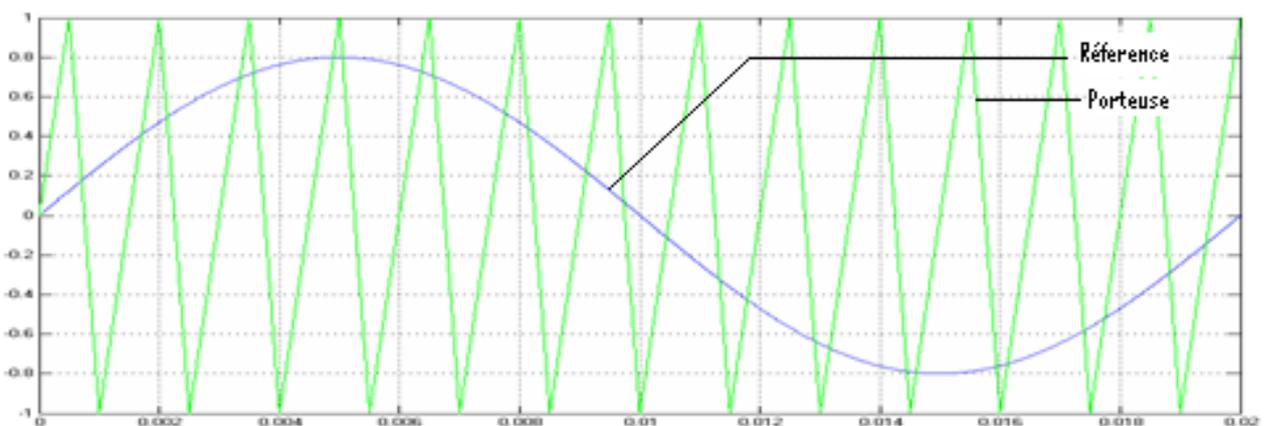


Figure (4.11): Représentation graphique du signal de référence et du signal porteur

La commande imposée à chaque interrupteur peut être écrite sous la forme figure (3.12) [10]:

$$f(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(x(t) - \text{tri}(t)) + 1] \quad (4.5)$$

La figure suivante est le schéma de simulation de la commande MLI réalisée sous **MATLAB - Simulink** :

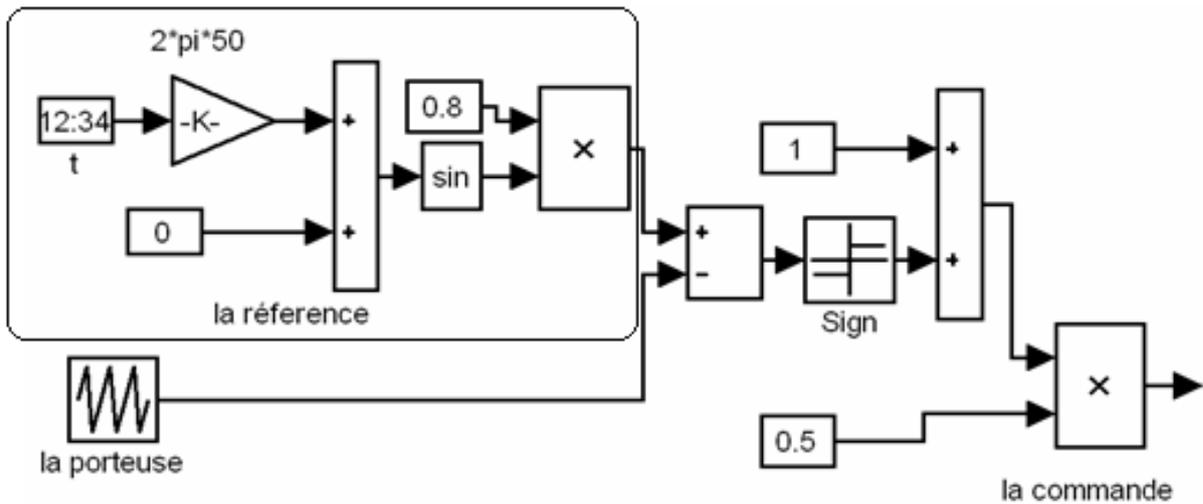


Figure (4.12) : Schéma de simulation de la MLI

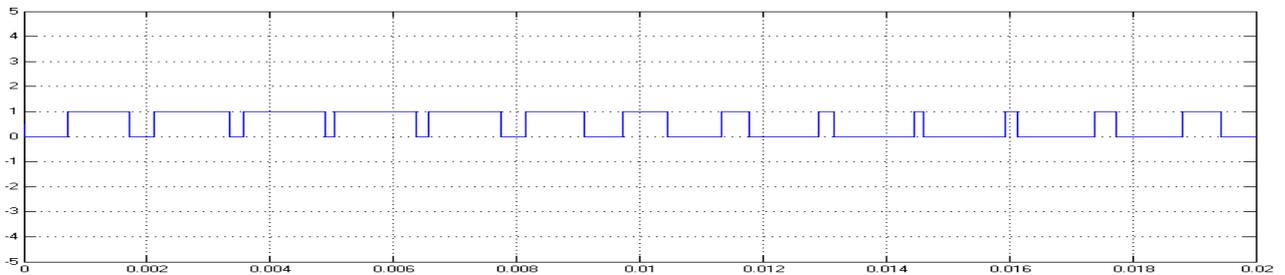


Figure (4.13) : Représentation graphique du signal de commande

Pour un onduleur de tension monophasé les commandes, externes sont confondues avec les fonctions de connexions, donc on peut écrire :

Pour la première cellule de commutation (**C₁**) :

$$\begin{cases} f_{11}(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(x(t) - \text{tri}(t)) + 1] \\ f_{21}(t) = \overline{f_{11}(t)} \end{cases} \quad (4.6)$$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Pour la deuxième cellule de commutation **(C2)** :

$$\begin{cases} f_{12}(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(-x(t) - \text{tri}(t)) + 1] \\ f_{22}(t) = \overline{f_{12}(t)} \end{cases} \quad (4.7)$$

Application :

Pour avoir une tension de sortie de l'onduleur de 220 v efficace en branche en séries 18 panneaux photovoltaïques où leurs caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Caractéristiques électriques du module I-106	
Puissance (WC)	106
Courant de court-circuit (A)	6.54
Courant de puissance maximale (A)	6.10
Tension à circuit ouvert (V)	21.6
Tension de puissance maximale (V)	17.4

L'association de 18 panneaux en séries, donne : $18 \times 17.4 \approx 314$ voltes, cette tension va être considérée comme la tension d'entrée du convertisseur.

Concernant la partie commande du convertisseur nous fixons les grandeurs suivantes :

* le taux de modulation $X = 1/\sqrt{2}$

* La fréquence du signal de référence $f = 50$ Hz.

* La fréquence de la porteuse est fixée initialement $f_e = 500$ Hz.

Le schéma de simulation de l'onduleur ainsi que la commande MLI sont donnés par la figure suivante :

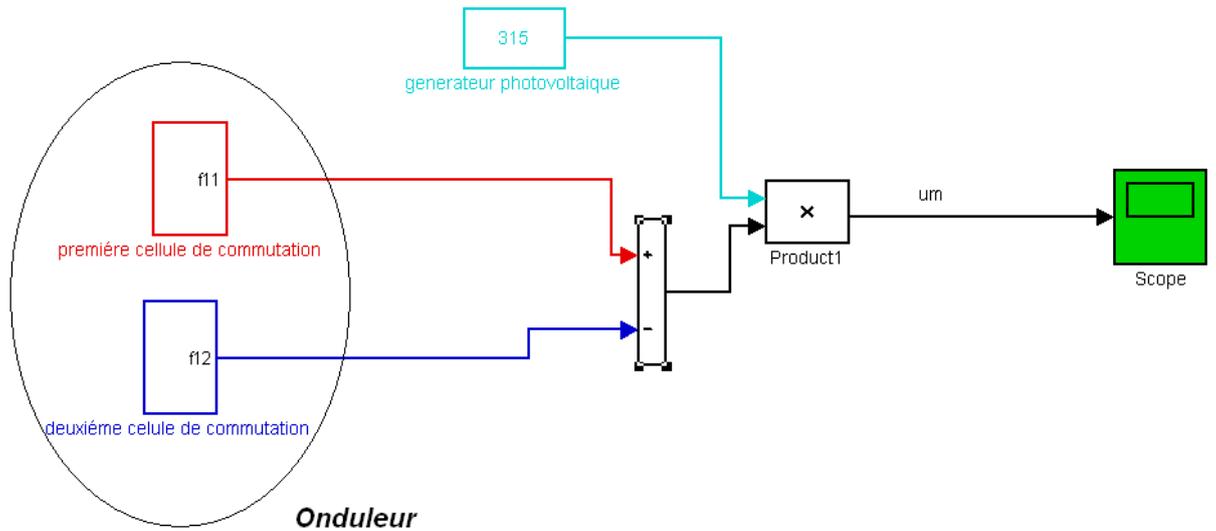


Figure (4.14) : Le schéma de simulation de l'onduleur

Et nous obtenons finalement la tension modulée ou convertie, qui est représentée par la figure suivante :

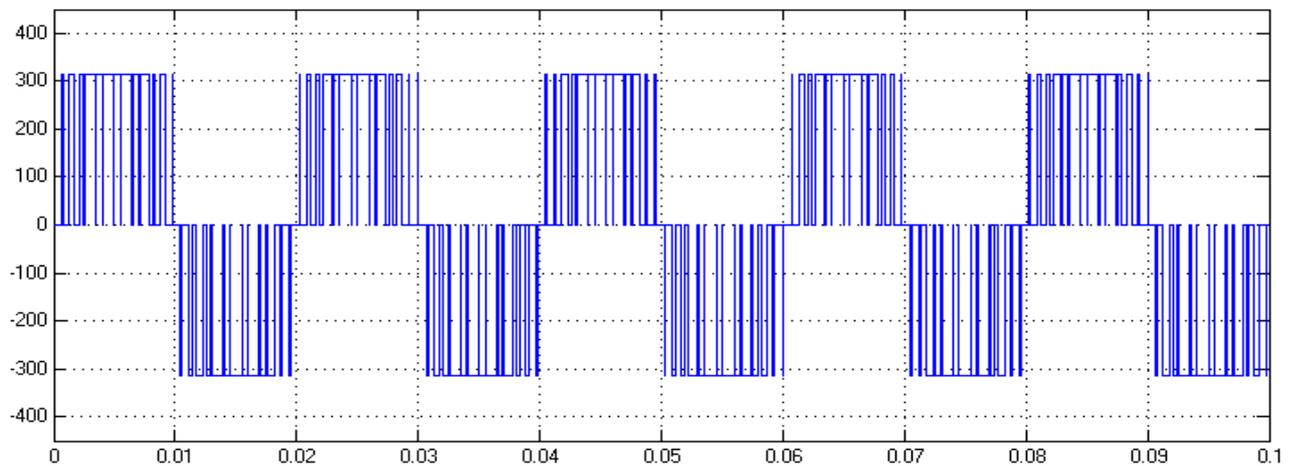


Figure (4.15) : Représentation de la tension modulée $U_m(t)$

Mais le problème qui se pose à présent est le problème de superposition des harmoniques indésirables sur la fondamentale de 50 Hz.

On considère que la décomposition en série de Fourier de $u_m(t)$ est de la forme [22]:

$$u_m(t) = V\sqrt{2}\sin\omega.t + \sum_{k=k_m}^{\infty} V_{bk}\sqrt{2}\sin(k.\omega.t + \varphi_{bk}) \quad (4.8)$$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Où les harmoniques sont toujours de rang supérieur ou égale à $k = k_m = 3$, l'harmonique de rang k_m est le premier terme géant. Si celui-ci est affaibli par le filtrage, les harmoniques de rang supérieur le seront encore plus. Pour une commande MLI sinus triangle, on considère alors $k_m = M$, pour notre cas $k_m = M = 20$.

La figure suivante représente la FFT (fast Fourier transformation), de la tension convertie où elle représente de cette dernière.

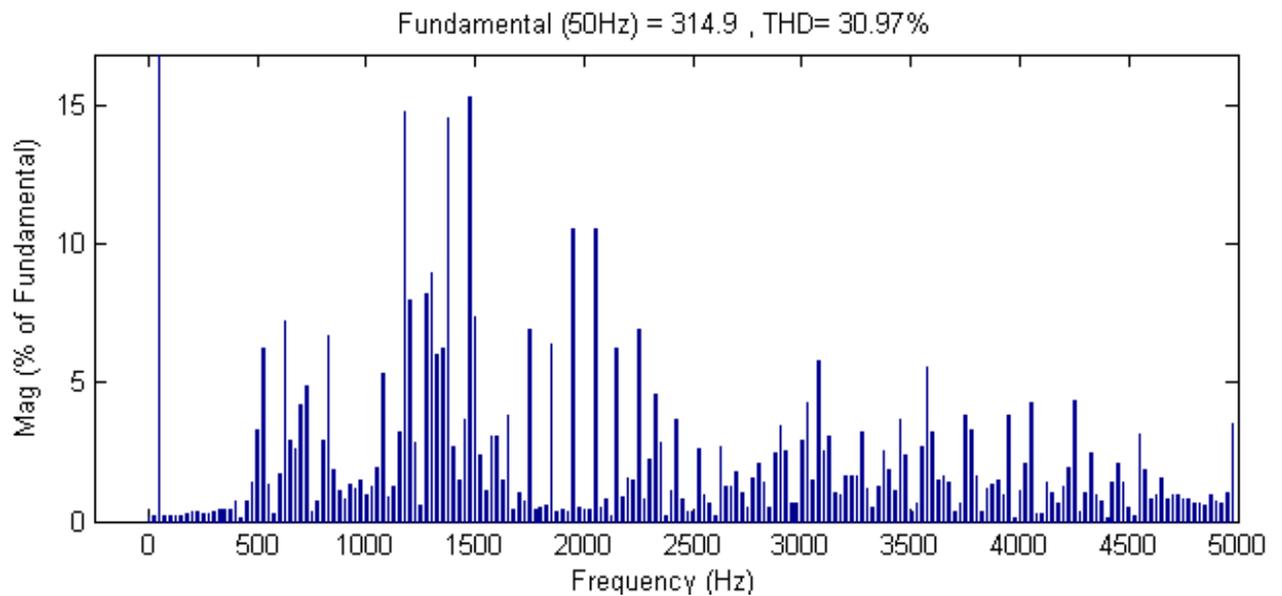


Figure (4.16) : Spectre de la tension modulée

Nous pouvons remarquer que la fondamentale de la tension modulée est d'amplitude 314.9 volts et de fréquence 50 Hz et les harmoniques de termes géants commencent à 500 Hz qui varient en sinus cardinal, avec un taux de distorsion harmonique de 30.97 %.

Le tableau suivant regroupe quelques harmoniques géantes ainsi que leurs amplitudes :

Fréquences (Hz)	500	525	625	825	1075	1175	1300	1375	1475
Amplitudes (%)	3.26	6.25	22.83	7.25	6.73	14.80	8.96	14.55	15.33

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Notons que cette réponse spectrale peut être améliorée en variant la fréquence de la porteuse, pour $f_e = 1\text{KHz}$ on a le spectre suivant :

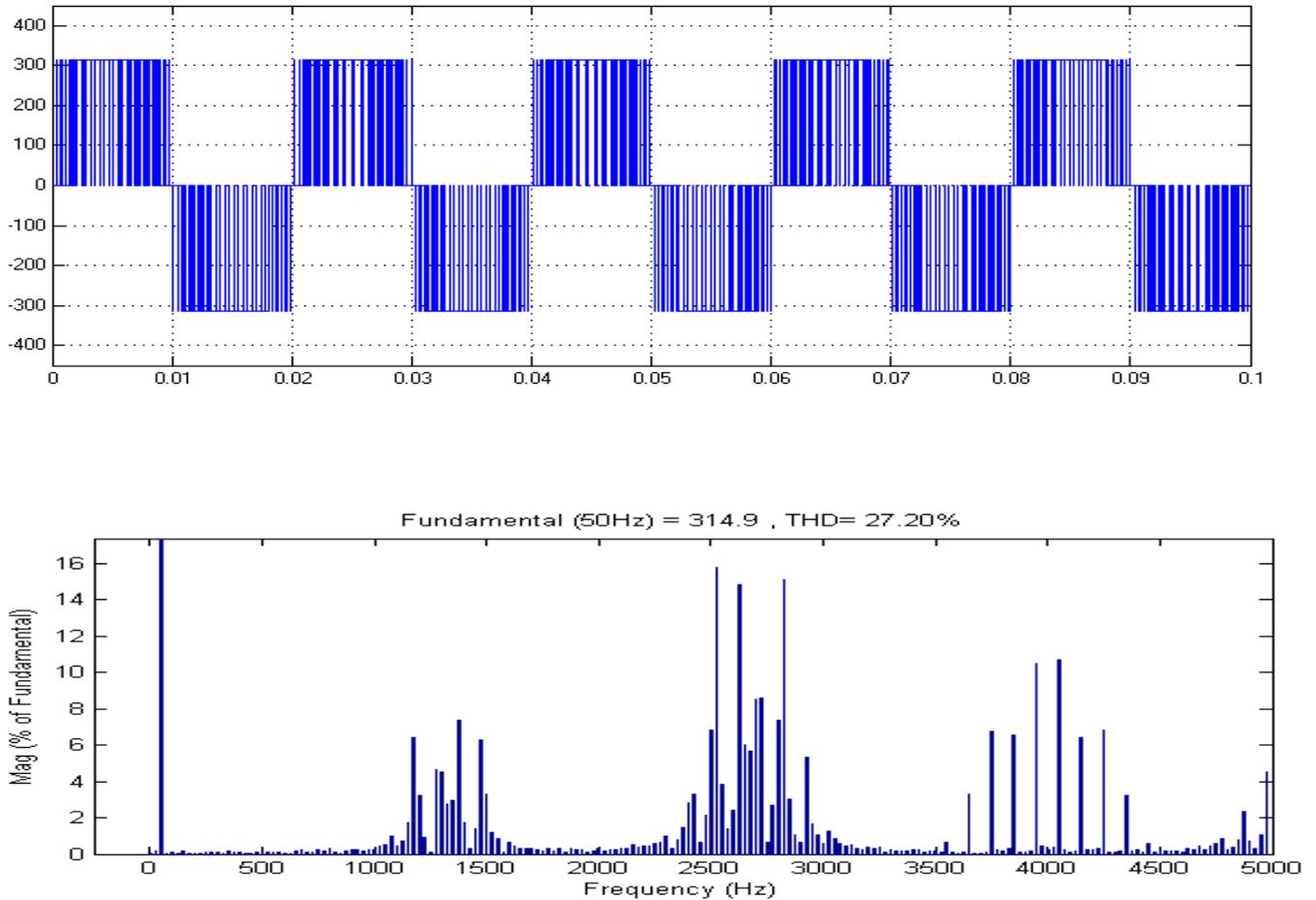


Figure (4.17) : Tension modulée et son spectre pour $f_e = 1\text{KHz}$

Le tableau suivant regroupe quelques harmoniques géantes ainsi que leurs amplitudes :

Fréquences (Hz)	1175	1275	1375	2525	2625	2825	3750	3950	4050
Amplitudes (V)	6.42	4.61	7.31	15.78	14.79	15.11	6.74	10.46	10.69

Et là, nous remarquons bien l'amélioration du spectre, cela par éloignement du premier terme vers les hautes fréquences (environ 1175 Hz), réduction du nombre d'harmonique et la diminution de 3.77 % du THD.

3-3 -4 Le filtrage des harmoniques :

L'onduleur de tension avec la commande rapprochée de type MLI ou autres vectorielles et modes glissants, génèrent des harmoniques dits de découpage. La FFT de la tension modulée nous a permis de voir le spectre de cette dernière, et cela va nous aider à concevoir un filtre qui permet d'éliminer toutes les harmoniques et garder seulement la fondamentale.

Afin d'éliminer ces harmoniques de découpage, on insère un filtre entre le convertisseur et le réseau dans la plupart de compensateurs de tension. Un filtre passe bas permet de réaliser cet objectif [6].

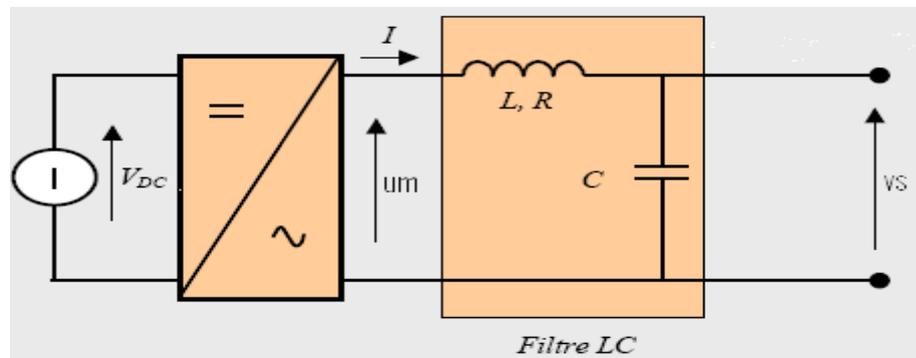


Figure (4.18) : Schéma équivalent d'un onduleur de tension monophasé muni d'un filtre LC

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nulle) et avec de signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

On considère une bobine inductance L ayant une résistance interne r associée à un condensateur C :

On peut écrire les équations suivantes :

$$r.i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t).dt = u_m \tag{4.9}$$

$$v_s(t) = \frac{1}{C} \int i(t).dt \Rightarrow i(t) = C. \frac{dv_s(t)}{dt} \tag{4.10}$$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

En substituant (4.10) en (4.9) on obtient l'équation différentielle suivant :

$$LC \frac{d^2 v_s(t)}{dt^2} + rC \frac{dv_s(t)}{dt} + v_s(t) = u_m \quad (4.11)$$

L'équation (4.11) peut s'écrire sous forme d'une équation d'un système du deuxième ordre avec second membre :

$$\frac{d^2 v_s(t)}{dt^2} + 2.\xi.\omega_0 \frac{dv_s(t)}{dt} + \omega_0^2 .v_s(t) = U_m(t) \quad (4.12)$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (4.11), on obtient la fonction de transfert du filtre LC :

$$F(p) = \frac{V_s(p)}{U_m(p)} = \frac{1}{LCp^2 + rCp + 1} \quad (4.113)$$

On peut écrire cette fonction sous forme d'une fonction de transfert d'un système du deuxième ordre :

$$F(p) = \frac{V_s(p)}{U_m(p)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{2.\xi}{\omega_0} p + 1} \quad (4.14)$$

Avec : ω_0, ξ désignent respectivement la pulsation propre et le coefficient d'amortissement du filtre.

Et par identification on aura :

$$\begin{cases} LC = \frac{1}{\omega_0^2} \\ rC = \frac{2.\xi}{\omega} \end{cases} \quad (4.15)$$

Avec : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, elle représente la pulsation de propre du filtre LC.

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

A présent en va entamer l'étude temporelle et fréquentielle du filtre :

- Etude du filtre :

Dans cette étude, on se contente seulement de la réponse indicielle et de la réponse fréquentielle du filtre, afin d'enduire la stabilité et les performances, cela nous aide a bien choisir l'amortissement du filtre et la pulsation de coupure.

* Pour la réponse indicielle, l'entrée est un échelon unitaire qui s'écrit de la manière suivante :

$$e(t) = 1 \text{ pour } t \geq 0$$

$$e(t) = 0 \text{ ailleurs}$$

la **TP** d'un tel signal est donné par : $E(p) = 1 / p$.

D'où la sortie s'écrit :

$$V_s(p) = \frac{p}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0} p + 1 \right)} \quad (4.16)$$

* Pour la réponse fréquentielle l'entrée est un signal sinusoïdal qui s'écrit de la manière suivante :

$$e(t) = e' \cdot \sin \omega t$$

La **TP** d'un tel signal est donné par :

$$E(p) = e' \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$$

La fréquence de coupure (**fc**) est définie quand le module de la transmittance diminue de **3 db**, le filtre ne doit faire passer que la fondamentale et élimine toutes les autres harmoniques par atténuation de leurs amplitudes, d'après la FFT de tension modulée une **fc = 65 Hz** suffit pour fixer la bande passante, ce qui nous reste, est le choix du coefficient d'amortissement, pour cela on va faire 3 essais :

* fixons initialement $f_0 = 100 \text{ Hz}$ et $\xi = 1$, la réponse indicielle et le diagramme de bode sont illustrés par les figures suivantes :

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

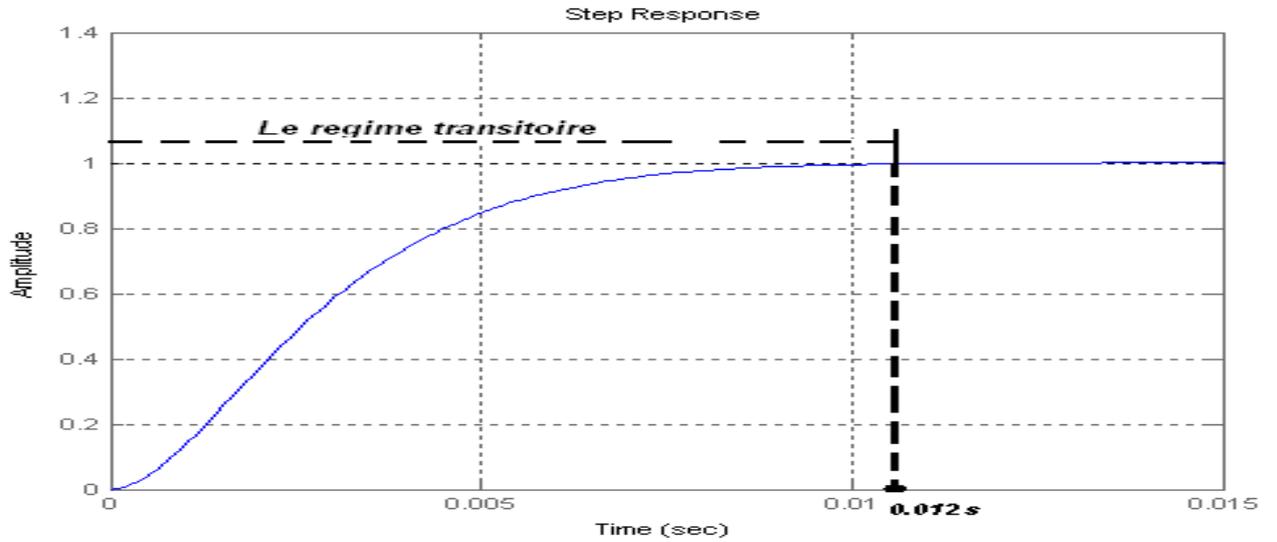


Figure (4.19) : Réponse indicielle du filtre pour $f_0 = 100 \text{ Hz}$ et $\xi = 1$

A partir de cette réponse, on peut distinguer deux régimes, il y'a le régime transitoire et le régime permanent.

* pour $t \in]0, 0.012]$ c'est le régime transitoire.

* pour $t \in]0.012, \infty[$ c'est le régime permanent.

Et la réponse fréquentielle est illustrée par le digramme de BODE, elle est représentée par la figure suivante :

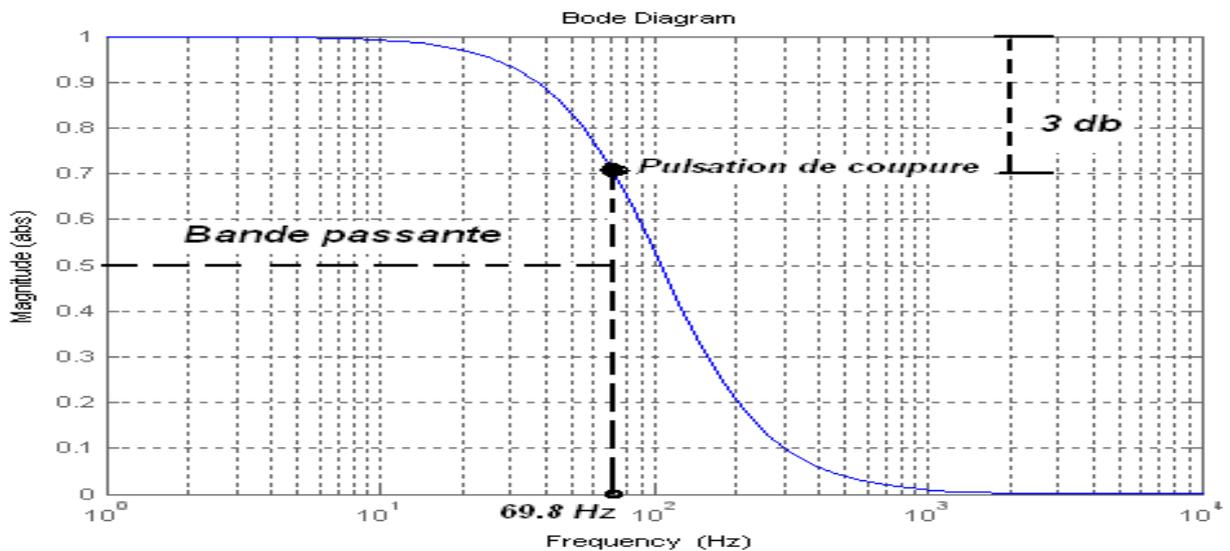


Figure (4.20) : Diagramme de BODE du filtre pour $f_0 = 100 \text{ Hz}$ et $\xi = 1$

La tension filtrée est donnée par la figure (4.21):

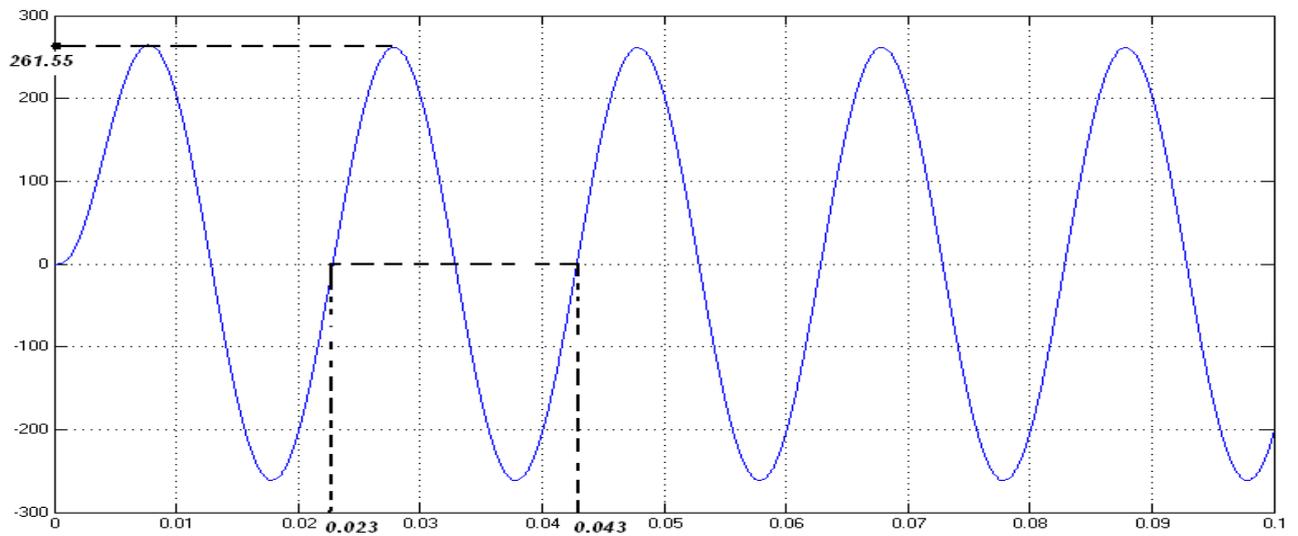


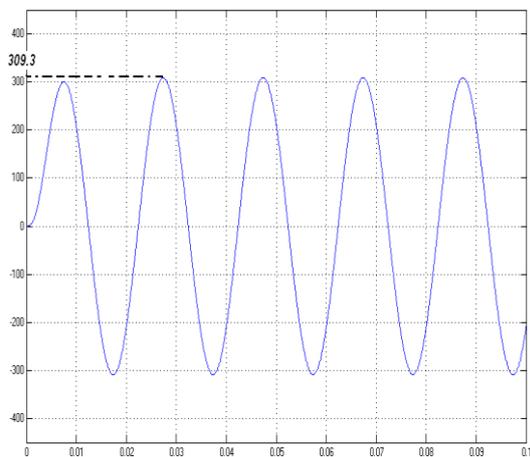
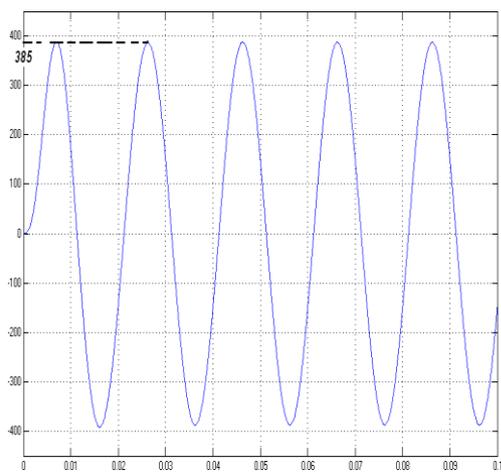
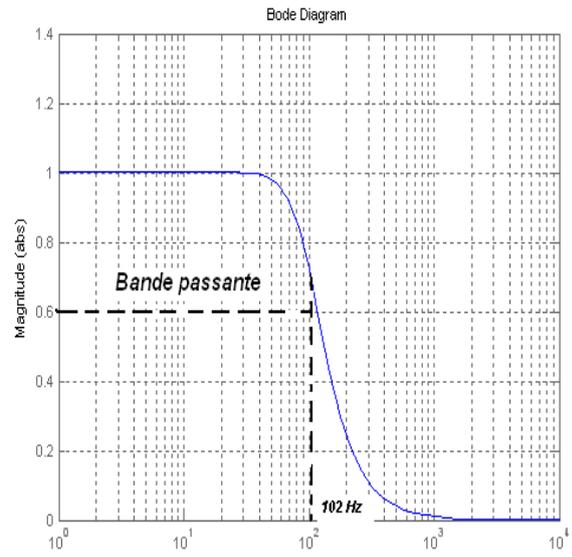
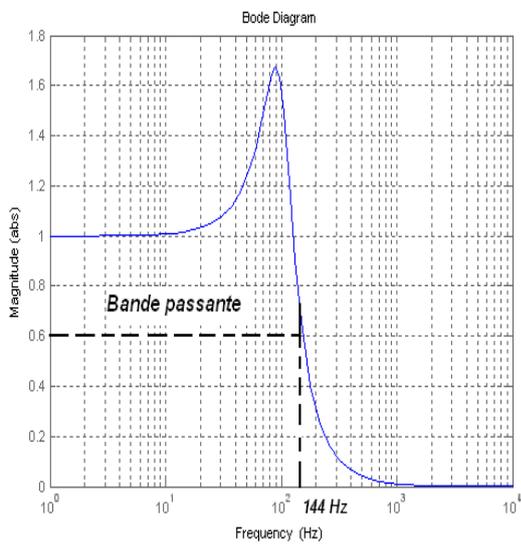
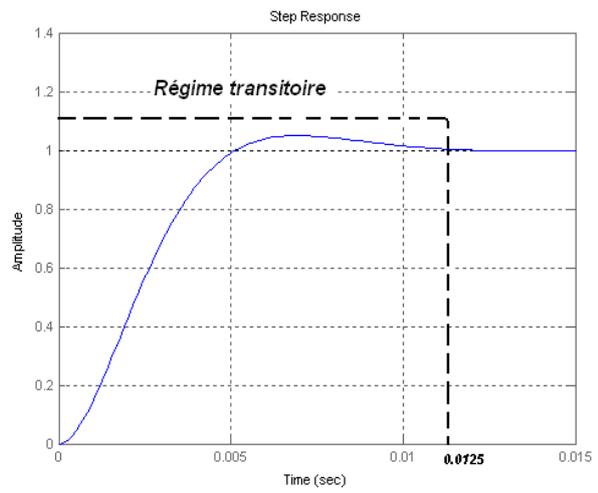
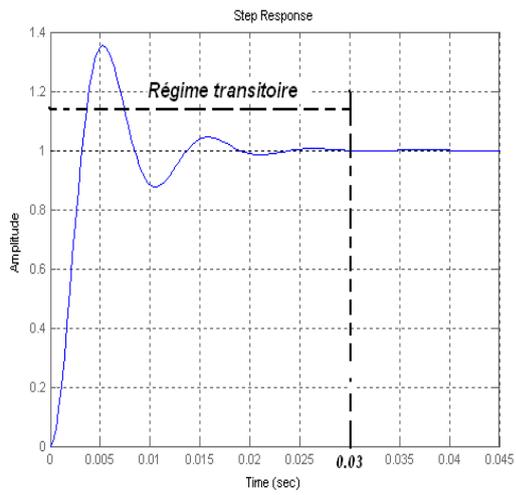
Figure (4.21) : Tension filtrée pour $f_0 = 100 \text{ Hz}$ et $\xi = 1$

La tension obtenue après filtrage est bien sinusoïdale de fréquence 50 Hz (fréquence parfaitement compatible avec le réseau électrique) mais nous remarquons une certaine dégradation dans la valeur crête. Afin de surmonter ce problème, nous allons varier la valeur du ξ jusqu'à obtention d'une tension crête de 310 v .

Les figures suivantes représentent les réponses indicielles, les diagrammes de BODES du filtre et tensions filtrées de l'onduleur pour deux valeurs du coefficient d'amortissement.

Pour $f_0 = 100 \text{ Hz}$ et $\xi = 0.6, \xi = 0.7$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique



(a) Pour $\xi = 0.6$

(b) Pour $\xi = 0.7$

Figure (4.22) : Réponses indicielles, diagrammes de BODE, tensions filtrées

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Le tableau suivant regroupe les valeurs du temps de réponses t_r , les dépassements D , erreur statique ε , les fréquences de coupures du filtre f_c , ainsi la valeur crête de la tension filtrée Um_{c-c} .

	t_r (s)	D (%)	E (%)	f_c (Hz)	Um_{c-c} (V)
$\xi = 0.6$	0.03	35	0	144	385
$\xi = 0.7$	0.0125	4	0	102	309.3
$\xi = 1$	0.0125	0	0	69.8	261.55

- Pour $\xi = 0.6$ la pulsation de coupure se trouve dans une zone critique qui peut engendrer une sur tension car la tension crête est supérieur a la tension de la fondamentale, pour cela cette valeur est rejetée.
- Pour $\xi = 1$ nous remarquons qu'il y a une atténuation importante dans la tension de sortie, donc cette valeur est rejetée.
- Pour $\xi = 0.7$ l'amplitude de la tension de sortie est proche de la fondamentale ainsi, cette valeur est acceptée.

D'où les valeurs retenues du coefficient d'amortissement et la fréquence de coupure du filtre sont :

$$\xi = 0.7 \quad \text{et} \quad f_c = 102 \text{ Hz}$$

On voit très bien que le filtre a pu éliminer tous les harmoniques et garde seulement la fondamentale. De plus la valeur crête de la tension de sortie peut facilement être contrôlée par l'amplitude du signal de référence, voir tableau suivant :

Taux de modulation	Tension crête de sortie (v)
0.7	216.7
0.8	247.5
0.9	278.5
1	309.3

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Ce travail a été fait pour un seul onduleur monophasé de tension, où on a pu obtenir une tension de 309.3v crête avec une fréquence de 50 Hz . Dans le cas où on veut raccorder le champ de production photovoltaïque à un réseau électrique triphasé on doit disposer de 3 onduleurs monophasés formant un système triphasé équilibré. Pour cela on doit générer trois signaux de références donnés par le système (3.17):

$$\begin{cases} x_1(t) = X.\sqrt{2}.\sin(\omega.t) \\ x_2(t) = X.\sqrt{2}.\sin(\omega.t - \frac{2\pi}{3}) \\ x_3(t) = X.\sqrt{2}.\sin(\omega.t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4.17)$$

Le schéma de simulation des trois onduleurs ainsi dotés de leurs commandes MLI, est donné par la figure suivante :

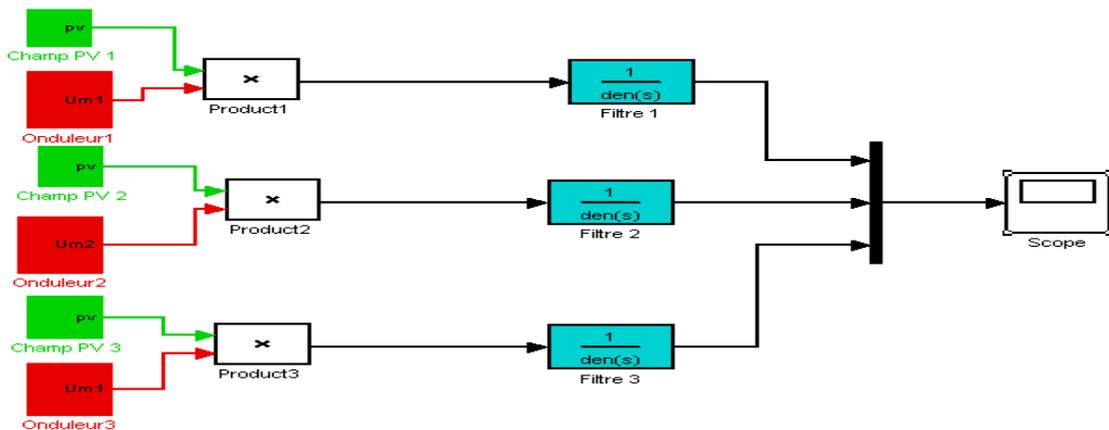


Figure (4.23) : Le schéma de simulation des trois onduleurs ainsi que leurs filtres

Les tensions fournies par chaque onduleur sont illustrées par la figure suivant :

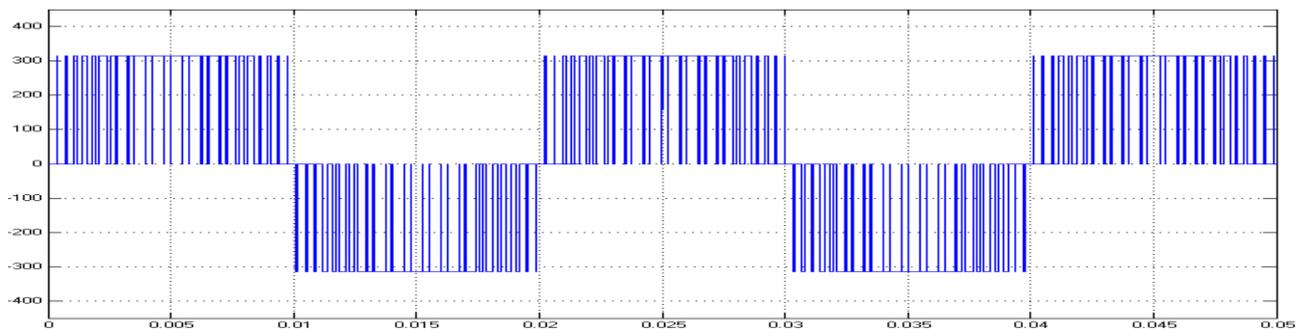


Figure (4.24.a) : Allure de la tension modulée du premier onduleur U_{m1}

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

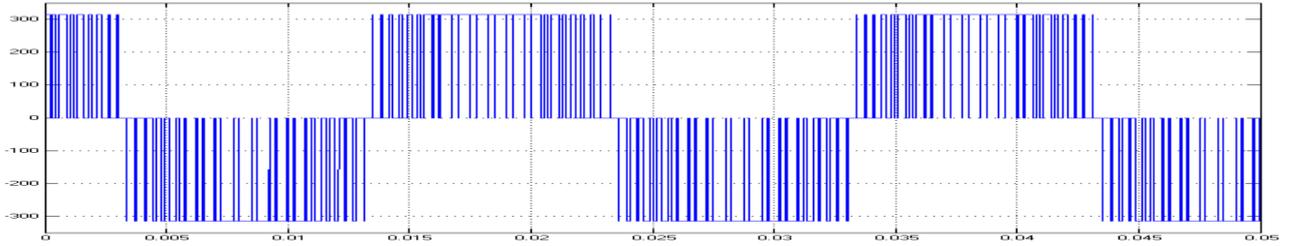


Figure (4.24.b) : Allure de la tension modulée du deuxième onduleur U_{m2}

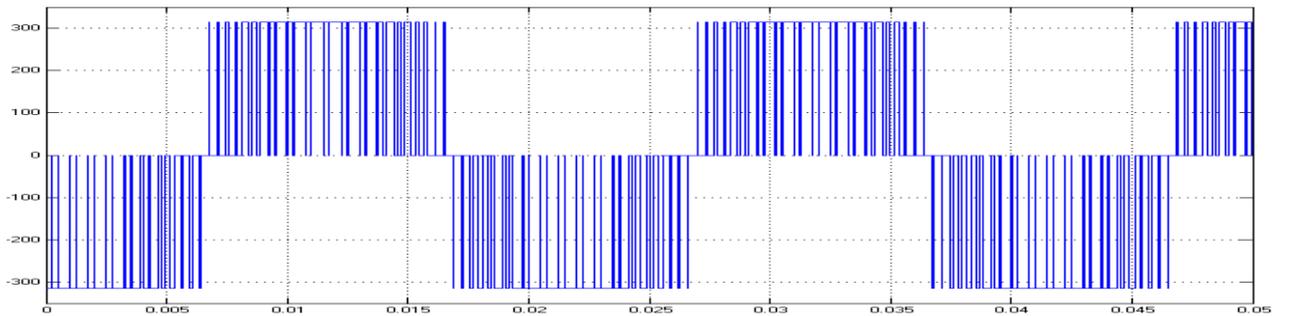


Figure (4.24.c) : Allure de la tension modulée du troisième onduleur U_{m3}

Figure (4.24) : Représentation des trois tensions modulées

En insérant un filtre LC ayant les mêmes paramètres utilisés précédemment, nous obtenons trois tensions sinusoïdales qui forment ainsi le système représenté par la figure suivante :

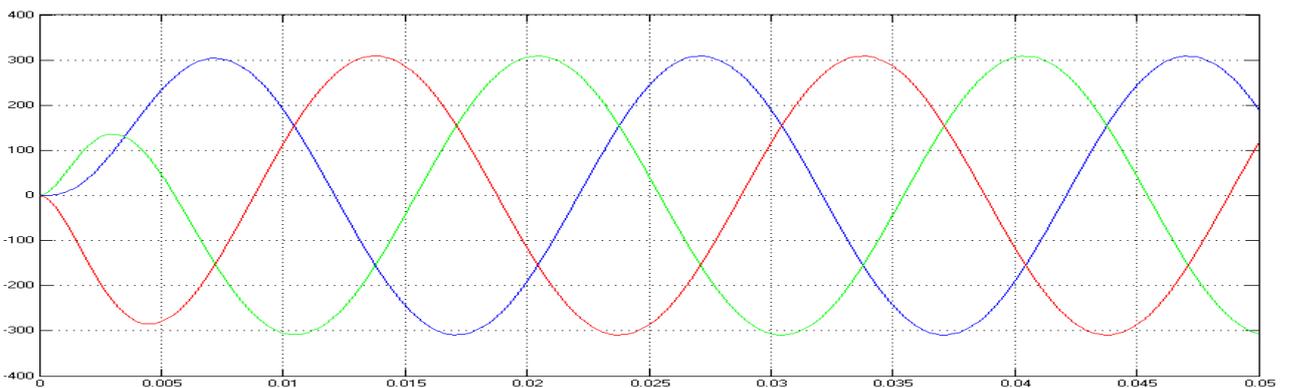


Figure (4.25) : Les tensions filtrées

Pour que ces trois tensions forment un système triphasé, équilibré, il faut que la somme des trois tensions soit nulle :

$$U_{m1}(t) + U_{m2}(t) + U_{m3}(t) = 0 \quad (4.18)$$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

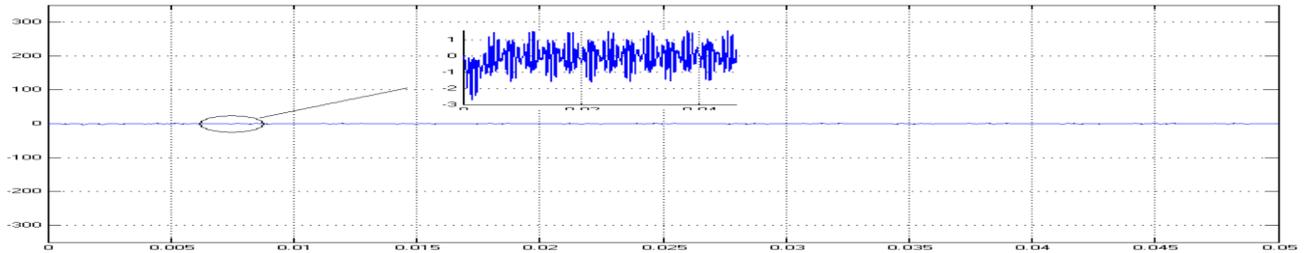


Figure (4.26) : La somme des trois tensions

D'après cette figure, on peut remarquer que la somme des trois tensions varie entre -1.5 v et 1.5 v ce qui veut dire que les tensions modulées filtrées forment un système quasi-équilibré.

3-4 Structure de connexion avec un Onduleur triphasé :

A présent, nous allons maintenant nous intéresser à un système de raccordement utilisant un onduleur de tension triphasé au lieu d'utiliser trois onduleurs monophasés.

L'onduleur de tension triphasé est composé de trois cellules de commutations **C1**, **C2** et **C3**, le total donne six interrupteurs. Chaque cellule comporte deux interrupteurs **K11** et **K21** pour la cellule **C1**, **K12** et **K22** pour la cellule **C2**, **K13** et **K23** pour la cellule **C3**. Le schéma de l'onduleur de tension triphasé raccordé au réseau électrique est le suivant [12]:

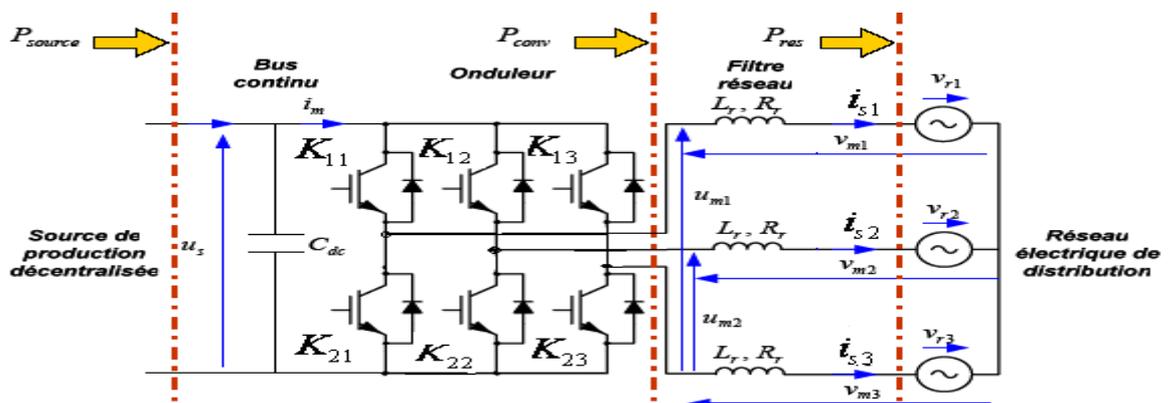


Figure (4.27) : Structure du convertisseur raccordé au réseau

Les sources de tension continue et de courant alternatif sont supposées parfaites :

- La tension U_s reste constante pour toute valeur positive ou négative, et toute évolution du courant $i_m(t)$.

- La valeur efficace I des courants $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ reste constante pour toute valeur et toute évolution de la tension $v_m(t)$.

En fonctionnement normal, la source U_s est génératrice et les sources $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ sont réceptrices.

Le principe de modélisation de l'onduleur de tension triphasé reste le même, sauf qu'ici la matrice d'interrupteurs est une matrice de dimension (2×3) .

Comme on a déjà vu dans le chapitre deux, ce convertisseur peut être représenté sous la forme matricielle suivant :

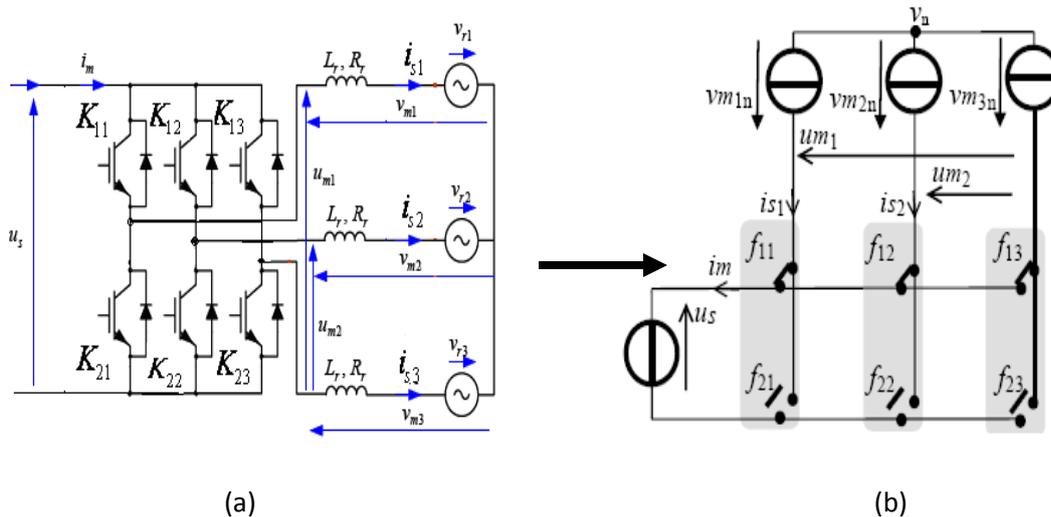


Figure (4.28) : Structure matricielle d'un onduleur de tension triphasé

A partir de l'équation (2.3) la matrice de connexion s'écrit :

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Avec : $u_s = u_{dc}$

On remarque que la matrice de connexion est de dimension 2×3 , donc la matrice de conversion de dimension $(2 + 1)$ d'où il suffit de deux tensions composées pour caractériser le conversion:

On a :

$$m_{lc} = f_{lc} - f_{IC}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m_1 = f_{11} - f_{13} \\ m_2 = f_{12} - f_{13} \end{cases} \quad (4.20)$$

Donc les tensions modulées composées u_m s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \cdot [u_s] \quad (4.21)$$

Si le récepteur est câblé en étoile (figure 3.21), les tensions simples (définies par rapport au potentiel commun v_n) vont dépendre des tensions composées modulées qui sont appliquées par la matrice d'interrupteurs. Ces tensions sont liées par les expressions [1], [5]:

$$u_{m1} = v_{m1n} - v_{m3n} \quad \text{Et} \quad u_{m2} = v_{m2n} - v_{m3n} \quad (4.22)$$

Le schéma de simulation de l'onduleur triphasé doté de sa commande est donné par la figure suivante :

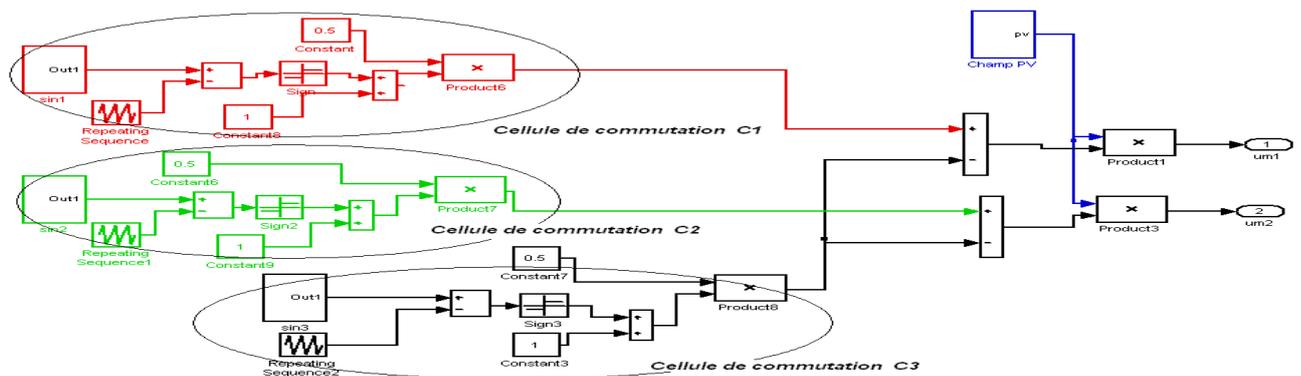


Figure (4.29) : Le schéma de simulation de l'onduleur

Le convertisseur étant supposé totalement commandable, les commandes externes appliquées aux interrupteurs sont confondues avec les états ouverts ou fermés des interrupteurs idéalisés. Le principe de commande de l'onduleur de tension triphasé est identique à un onduleur de tension monophasé, les figures suivantes représente respectivement l'allure des deux tensions modulées u_{m1} , u_{m2} ainsi que leurs spectre.

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Pour avoir des tensions simples de sortie de l'onduleur de 220 v efficace en branche en série 36 panneaux photovoltaïques de type **I-106** :

Les figures suivantes représentent respectivement les tensions modulées composées et les tensions simples modulées, cela en fixe la tension du bus continu à 630 voltes et $f = 50\text{hz}$, $f_e = 1\text{khz}$.

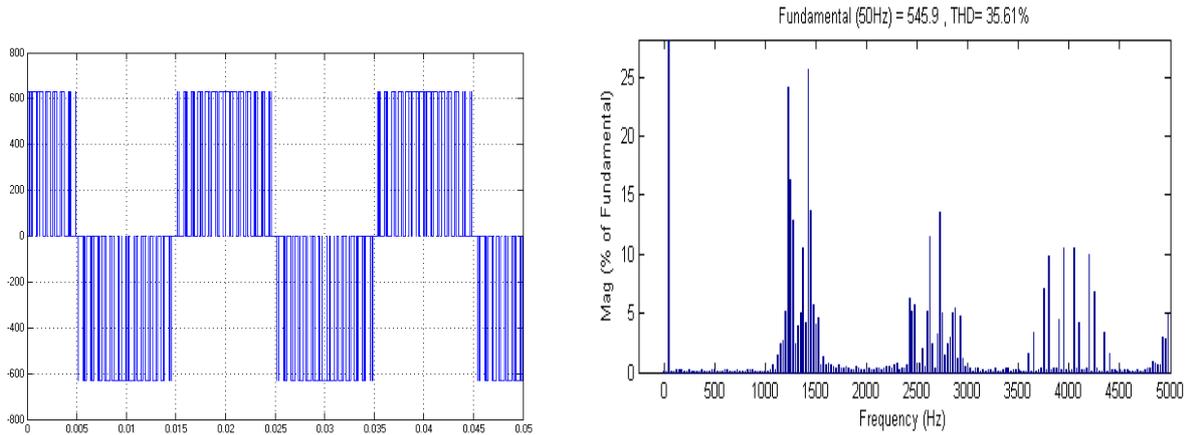


Figure (4.30.a) : Allure de la tension composée u_{m1} et sont spectre

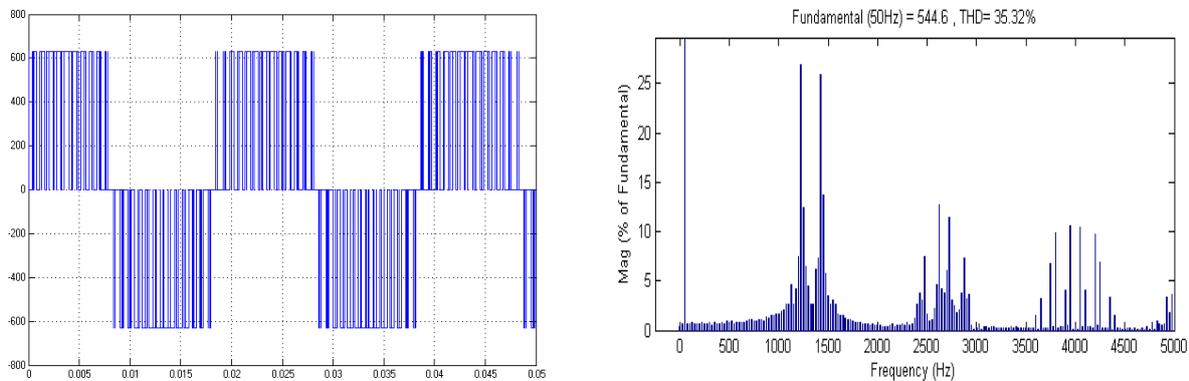


Figure (4.30.b) : Allure de la tension composée u_{m2} sont spectre

Si le récepteur est composé de trois impédances de même valeur, alors on obtient le système des tensions simples modulées suivant [1], [5], [7]:

$$\begin{cases} v_{m1n} = \frac{2}{3} u_{m1} - \frac{1}{3} u_{m2} \\ v_{m2n} = -\frac{1}{3} u_{m1} + \frac{2}{3} u_{m2} \\ v_{m3n} = -\frac{1}{3} u_{m1} - \frac{1}{3} u_{m2} \end{cases} \quad (4.23)$$

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

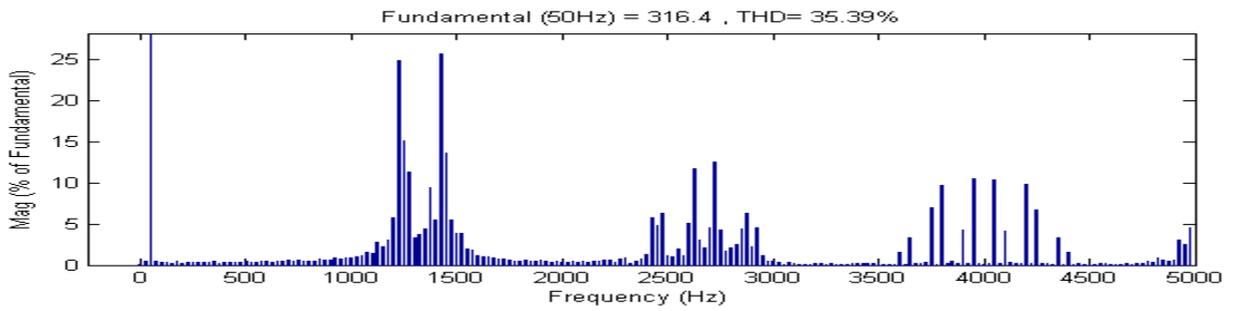
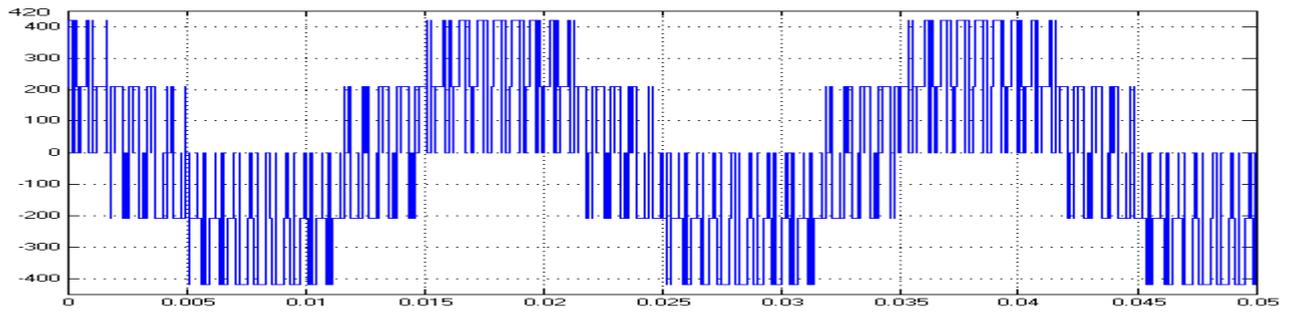


Figure (4.31.a) : Allure de la tension simple v_{m1n}

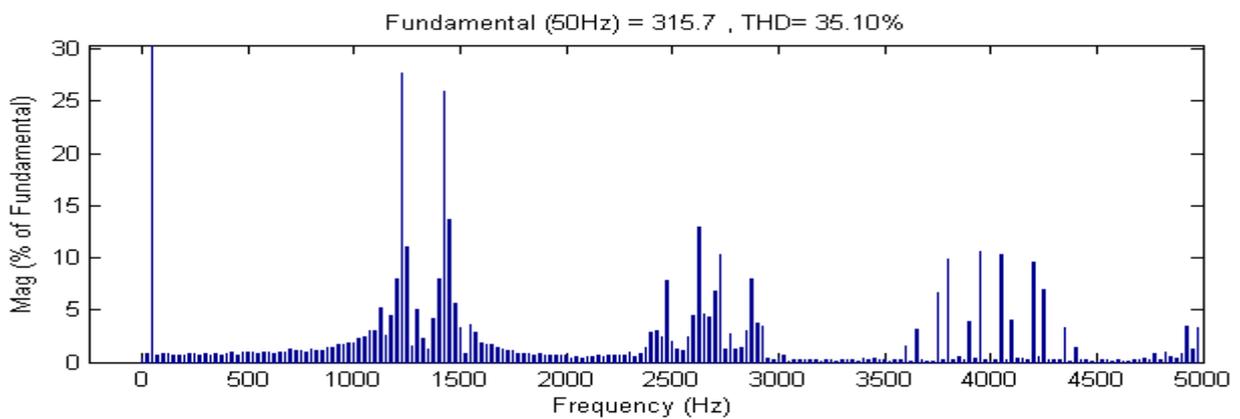
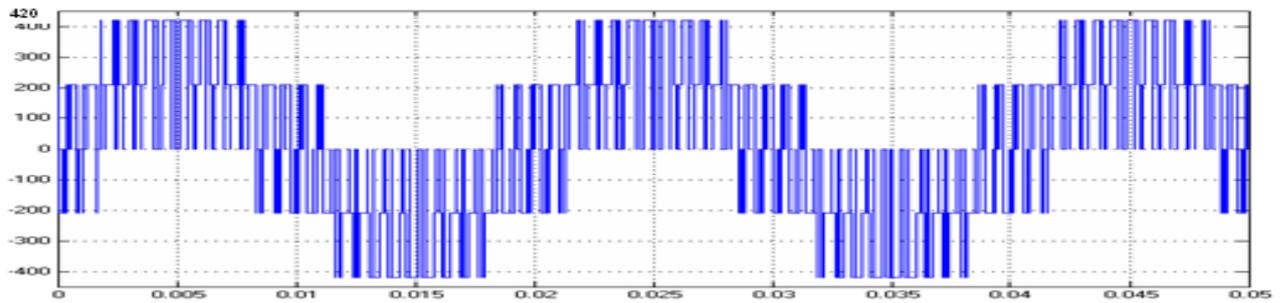


Figure (4.31.b) : Allure de la tension simple v_{m2n}

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

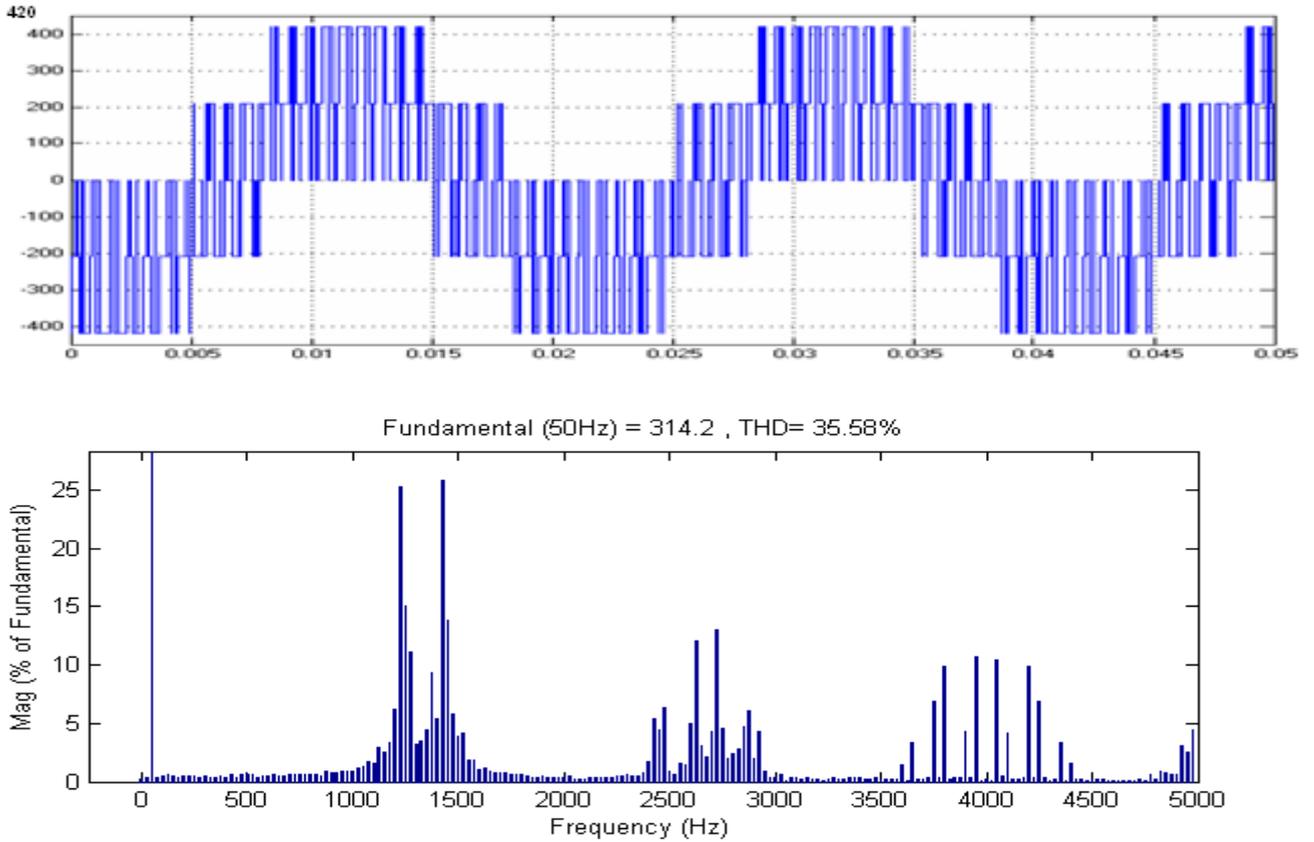


Figure (4.31.c) : Allure de la tension simple v_{m3n}

Le tableau suivant regroupe les valeurs crêtes des tensions V_{m1n} , V_{m2n} , V_{m3n} ainsi que l'amplitude de chaque fondamentale :

	Amplitude (V)	Amplitude de la fondamentale (V)	La première harmonique (%)	THD (%)
V_{m1n}	420	316.4	24.87 pour $f = 1225 \text{ Hz}$	35.39
V_{m2n}	420	315.7	27.62 pour $f = 1225 \text{ Hz}$	35.10
V_{m3n}	420	314.2	25.25 pour $f = 1225 \text{ Hz}$	35.58

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

A partir de ce tableau nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- Les amplitudes des fondamentales pour chaque tension simple sont très proche, la moyenne des trois tensions $V_{m n moy} = (V_{m1n} + V_{m2n} + V_{m3n}) / 3 = 315.4v$.
- Les premières harmoniques se situent a $f = 1225 Hz$.
- Leurs taux de distorsion harmonique sont très proches

De ce qui précède, on peut dire que les filtres qu'on doit utiliser pour filtrer chaque tension peuvent avoir les mêmes pulsations propres et coefficient d'amortissement que le filtre utilisé pour l'onduleur monophasé.

De plus ce choix nous permettra de comparer les résultats obtenus pour trois onduleurs monophasés et l'onduleur triphasé.

Donc en employant un filtre ayant : $f_0 = 100 Hz$ et $\xi = 0.7$ on obtient le système triphasé représenté par la figure suivante :

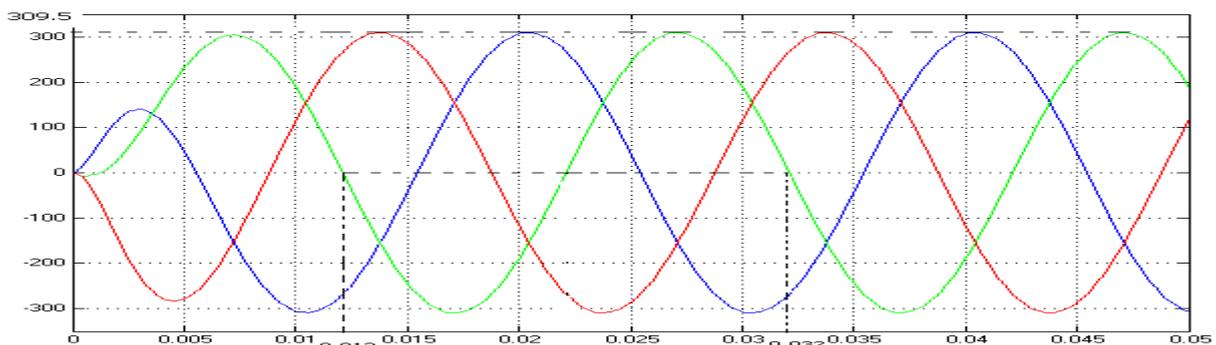


Figure (4.32, a) : Tensions filtrées

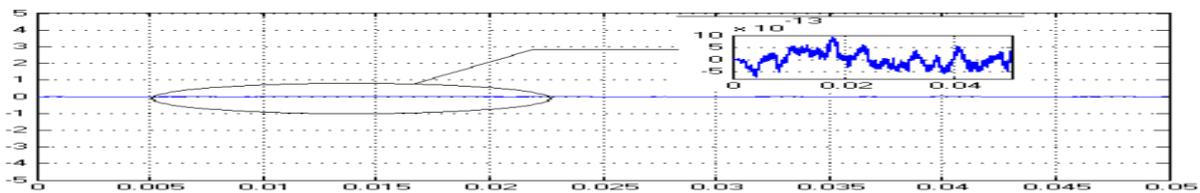


Figure (4.32.b) : La somme des tensions filtrées

D'après cette figure, on peut remarquer que la somme des tensions varie entre -5.10^{-13} volt et $+5.10^{-13}$ volt, donc, on peut dire que leurs sommes tendent vers zéro ce qui implique que les trois tensions modulées et filtrées forment un système équilibré.

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Tableau récapitulatif :

	Nombre de modules en série		Nombre d'interrupteurs	La commande
Raccordement utilisant 3 onduleurs monophasés	18 pour chaque champ		4 pour chaque onduleur	MLI type (sinus triangle) $f = 50\text{Hz}$ $f_e = 1\text{KHz}$
Raccordement utilisant 1 seul onduleur triphasé	Total 36		Total 6	MLI type (sinus triangle) $f = 50\text{Hz}$ $f_e = 1\text{KHz}$
	<i>Le filtre</i>	<i>Amplitude crête des tensions filtrées (V)</i>	<i>Fréquence des tensions filtrées (Hz)</i>	<i>Somme des tensions</i>
	LC $f_0 = 100\text{Hz}$ $\xi = 0.7$	309.3	50	Varie entre -1.5v et 1.5v
	LC $f_0 = 100\text{Hz}$ $\xi = 0.7$	309.5	50	Varie entre -5.10^{-13} volte et $+5.10^{-13}$

4- choix des interrupteurs :

En électronique de puissance, les convertisseurs sont composés d'interrupteurs ayant un fonctionnement " tout ou rien " où la fonction de connexion est réalisée en employant les semi-conducteurs de puissance.

Selon le composant utilisé, la fréquence de découpage $f_e = 1/T_e$ (voir le paragraphe 3-3-3-c) à laquelle est soumis le composant change. Cependant, plus la puissance nominale P_n d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible. La figure suivante représente un diagramme à l'échelle logarithmique des domaines d'utilisation de chaque composant.

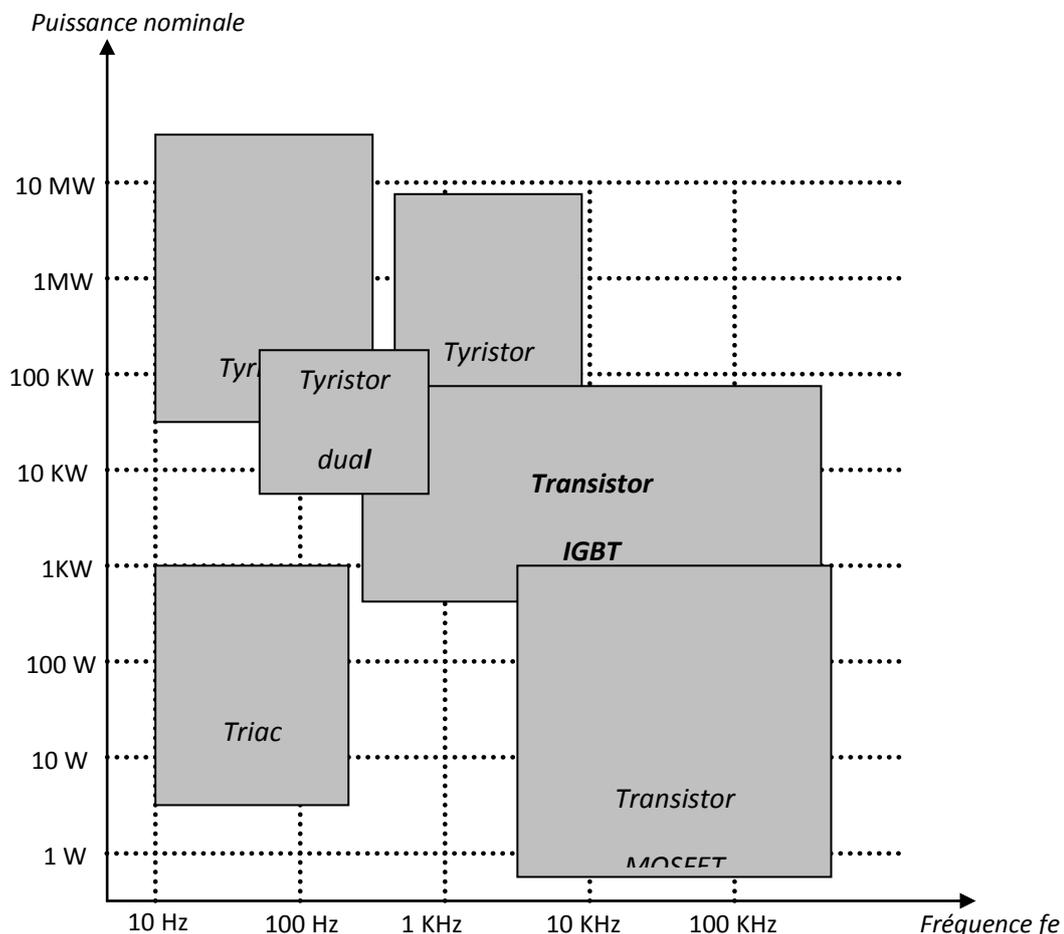


Figure (4.33) : Diagramme puissance – fréquence des composants

Le transistor MOS est rapide et facile à commander, mais les transistors bipolaires ont une meilleure tenue en tension et présentent une chute de tension à l'état passant plus faible pour les courants élevés. L'association de ces deux avantages donne naissance à des composants hybrides nommés **IGBT** [10].

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Dans notre application notre choix se porte sur un seul composant, c'est l'**IGBT** car il nous offre la possibilité de transmettre une puissance supérieure à 100 KW avec une fréquence de découpage qui peut varier entre 500 Hz et 50 KHz.

Conclusion :

Nous pouvons conclure que les deux types de raccordement offrent pratiquement les mêmes performances, car les tensions de sortie obtenues sont d'amplitude très proche de **310 v** avec une fréquence qui vaut **50 Hz**. Cette sortie est obtenue par ouverture et fermeture des interrupteurs de chaque onduleur en employant une commande MLI de type sinus- triangle et d'autre part l'utilisation d'un filtre LC nous a permis d'éliminer toutes les harmonique indésirables et de garder seulement la fondamentale. De plus les tensions obtenues forment un système quasi-équilibré dans le cas d'un raccordement utilisant trois onduleurs monophasé et un système équilibré pour un raccordement utilisant un seul onduleur triphasé ce qui nous amène à dire que la tension produite est compatible avec le réseau.

Références bibliographiques

- [1] Formalisme de modélisation et de synthèse des commandes appliqué aux convertisseurs statiques à structure matricielle, B.Francois, thèse de doctorat, université de Lille, 1996

- [2] Residential photovoltaic energy storage system. IEEE Trans. on Industrial Electronics,S.J. Chiang, K.T. Chang, and C.Y. Yen. 1998.

- [3] Rural south africa and photovoltaic weak grid interface systems.M.N. Mather, M. Malengret, and J.H Enslin. EPE Lausanne, 1999.

- [4] Topology for decentralised solar energy inverters with a low voltage ac bus. B. Lindgren. EPE Lausanne, 1999

- [5] Modèle de Simulation d'une Commande en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Triphasé, A. Chouder , A. Malek et F. Krim , Rev. Energ. Ren., 1999

- [6] Sur les systèmes de l'électronique de puissances dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie, I. Etxeberria-otadui, thèse de doctorat, institut polytechniques de Grenoble, 2003

- [7] Conception des dispositifs de commande des convertisseurs de puissance par modulation directe des conversions Perspectives pour l'insertion de production d'énergie dispersée dans les réseaux électriques ,B.Francois, habilitation a diriger des recherches, université de Lille, 2003

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

- [8] Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, Y .PANKOW, Thèse doctorat, LEEPL, 2004

- [9] Modélisation et simulation des composants de la mini-centrale photovoltaïque connectée au réseau du CDER, F. Cherfa, A. Chouder, A. Hadj Arab, R. Oussaïd, F. Chenlo et S. Sylverter, Revue des Energies Renouvelables, 2007

- [10] Convertisseur et électronique de puissance : commande, description et mise en œuvre, M.Picard, DUNOD, Paris, 2007

- [11] Les onduleurs pour système photovoltaïques, V.didier, hespul, 2007

- [12] Production décentralisée dans les réseaux de distributions. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources. Emanuel Florin MOGOŞ. Thèse de doctorat l'école nationale supérieur d'arts et métiers. 2007

Conclusion générale

Nous avons déjà vu que l'épuisement des ressources fossiles, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre nous poussent vers la recherche d'autres types d'énergies inépuisables, économiques et non polluantes. Pour cela on a recours aux énergies renouvelables qui sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Les énergies renouvelables nous offrent aussi l'opportunité de produire de l'électricité par plusieurs façons. Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. Pour cela une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur ou de l'électricité.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dû à la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairement varient. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale, quelque soit la valeur de l'éclairement ou de la température.

On a vu aussi dans le chapitre deux que l'électricité produite par le photovoltaïque est de nature continue. Avec le développement de l'électronique de puissance, cette énergie peut être transformée par le biais d'un convertisseur appelé onduleur en un courant alternatif à fréquence, tension et synchronisme de phase, adapté aux caractéristiques du réseau électrique.

Dans le chapitre 3, on a présenté des notions très importantes concernant les convertisseurs statiques. La représentation matricielle de ces derniers ainsi l'introduction des notions de fonction de connexion et fonction de conversion, nous a permis de bien comprendre le fonctionnement des onduleurs de tensions.

La commande PWM est introduite pour atteindre des objectifs suivants :

- Le contrôle de l'amplitude, la fréquence et la phase de la tension de sortie de l'onduleur seulement par le biais d'un signal de référence modulé en largeur d'impulsion

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

- Le pouvoir de rejeter le maximum des harmoniques indésirables vers les hautes fréquences

Grace à l'étude spectrale des tensions modulées obtenues par cette technique de commande, on a pu voir que les harmoniques indésirables peuvent être rejetées vers les hautes fréquences seulement par variation de la fréquence de découpage.

L'utilisation d'un filtre LC permet d'éliminer toutes les harmoniques indésirables par atténuation de leurs amplitudes et de garder seulement la tension fondamentale qu'on désire avoir, cela se fait par un choix judicieux de fréquence de coupure qui détermine la bande passante et du coefficient d'amortissement, donc le choix de ces deux paramètres est d'une importance primordiale.

Les deux types de raccordement offrent pratiquement les mêmes performances, car les tensions de sortie obtenues sont d'amplitude très proche de **310 v** avec une fréquence qui vaut **50 Hz**. De plus les tensions obtenues forment un système quasi-équilibré dans le cas d'un raccordement utilisant trois onduleurs monophasé et un système équilibré pour un raccordement utilisant un seul onduleur triphasé ce qui nous amène à dire que la tension produite est compatible avec le réseau.

Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique

Résumé :

L'énergie photovoltaïque nous offre la possibilité de produire de l'électricité par conversion de l'énergie en provenance du soleil en un courant électrique. L'électricité produite est de nature continue. Au cas où on veut injecter ce courant dans le réseau de distribution on doit le transformer en un courant sinusoïdal de 50 Hz, cette transformation s'effectuera par le biais d'un convertisseur appelé Onduleur. Ce dernier doit être doté d'une commande adéquate et judicieusement choisie afin d'avoir une tension compatible avec le réseau et avec le minimum d'harmonique.

Mots clés: *Photovoltaïque*, fonctions de connexions et conversions, onduleur, hacheur, PWM, filtrage, réseau.

Abstract:

The photovoltaic energy offers us the opportunity to produce electricity by converting energy from the sun into an electric current. The electricity produced is a continuous process. Where we want to inject this current into the distribution network, it must be transformed into a sinusoidal current of 50 Hz. This transformation will take place through a converter called UPS (inverter). The latter must have an adequate command and judiciously chosen to have a voltage compatible with the network with minimum harmonic distortion.

Keywords: Photovoltaic. Function of connection and conversion. Inverter. Chopper. PWM. Filtering. Network.

المخلص: إن تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية يعتبر خطوة جد هامة في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية، هذا التحويل يتم عبر خلايا خاصة يدعى بالخلايا الكهروضوئية. لكن التيار الناتج عبر هذه الخلايا هو ذو طبيعة مستمرة، إذا في حالة ما إذا أردنا وصل حقول الإنتاج الكهروضوئية مع شبكة التوزيع الكهربائية يجب علينا استعمال محولات تمكنا من تحوي التيار المستمر إلى تيار كهربائي متناوب بتردد 50 هرتز.

كلمات مفتاحية :

الكهروضوئية ، وظائف وصلات و التحويلات ، محول ، PWM ، ترشيح ، الشبكة