

Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public

Mémoire pour l'obtention de Master en Ingénierie de
l'Eau et de l'Environnement
Option : Energie et Procédés Industriels

Présenté et soutenu par :
BEMANA NGUEOUELE Yannick

Dirigés Par :
Professeur Brayima DAKYO

M. Ahmed O. BAGRE

Jury

Président : Albert SUNNU
Membre : Ahmed O. BAGRE
Membre : Justin BASSOLE
Membre : Léandre ONADJA

26/07/2012

Dédicace

*A Monsieur et Madame BEMANA, pour leurs sages conseils
A ma fiancée Belvine, pour son amour et sa patience
Je dédie ce travail*

Remerciements

Le présent travail a été effectué au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de l'Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), avec la collaboration du laboratoire GREAH de l'université du Havre. Nous ne pourrions réaliser ce travail sans l'aide de personnes diverses que nous tenons à remercier.

C'est un agréable plaisir pour moi de remercier Monsieur Yao AZOUMAH, Directeur du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE), pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire et pour ses précieux conseils.

Je tiens vivement à remercier Monsieur Brayima DAKYO, Professeur à l'Université du Havre, Directeur du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre (GREAH), pour m'avoir permis de travailler sur un sujet intéressant et d'actualité. Je remercie plus particulièrement Monsieur Ahmed Ousmane BAGRE, Enseignant Chercheur au 2iE, pour la qualité de son encadrement, sa rigueur scientifique, sa grande confiance, et sa sympathie. J'associe à ces remerciements, Monsieur Djamel IKNI, Doctorant à l'Université du Havre, pour m'avoir aidé à distance sur la maîtrise du logiciel Matlab/Simulink, ainsi que pour son appui scientifique et sa disponibilité à contribuer à mes recherches par des analyses et simulations précieuses.

Je remercie toute l'équipe des enseignants et ingénieurs chercheurs du laboratoire pour leur franche collaboration.

A mes chers amis de la même promotion, les deux années passées ensemble ont été un grand succès.

J'adresse une mention particulière à la famille KETAFIO et Madame Agnès KOUE, pour leur soutien spirituel, matériel et financier.

Mes remerciements les plus émus vont à ma famille pour m'avoir soutenu, conseillé et donné les moyens d'arriver à la fin de ce cycle.

Résumé

Le besoin énergétique mondial en constant accroissement et le caractère polluant des énergies fossiles ont augmenté l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie solaire dont les avantages et inconvénients sont aujourd'hui connus mais qui s'avère toujours très prometteuse malgré un coût élevé. Des projets de production d'électricité photovoltaïque depuis l'échelle des particuliers (quelques watts à quelques kilo Watts) jusqu'aux centrales de plusieurs dizaines de mégawatts sont finalisés ou en cours de par le monde. Cette réalité appelle des études spécifiques pour assurer la qualité des réseaux électriques tout en garantissant technologiquement la fiabilité et la rentabilité des nouvelles installations dans un contexte en évolution permanente.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à une bonne modélisation d'un tel système et plus particulièrement des différents composants d'une centrale photovoltaïque connecté à un réseau public de distribution électrique. Les principaux éléments constitutifs d'une centrale PV connectée sont modélisés et simulés sous Matlab/Simulink. Le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC (hacheur survolteur) et le Convertisseur DC/AC (onduleur de tension) sont ainsi représentés par des modèles élaborés en vue d'une simulation de comportement de l'ensemble du réseau.

Mots clés : Modélisation, système photovoltaïque connecté au réseau, Matlab/Simulink.

Abstract

The world energy need in constant increase and the character polluting fossil fuels increased the interest of the development of the renewable energies. Among them, the solar energy among which the advantages and the inconveniences are known today but which always turns out very promising in spite of a high cost. Projects of photovoltaic electricity production since the scales of the private individuals (some watts in some kilo Watts) up to the power plants of several tens of megawatts is finalized or in the course of by the world. This reality calls specific studies to insure the quality of electricity networks while guaranteeing technologically the reliability and the profitability of the new installations in a context in permanent evolution.

The work presented in this report is a contribution to a model of such a system and more particularly various components of a photovoltaic power plant connected to a public network of electric distribution (casting). The main constituent elements of a power plant connected PV are modeled and feigned under Matlab / Simulink. The photovoltaic generator, the converter DC / DC (Booster) and the Converter DC / AC (inverter of tension) are so represented by models elaborated with the aim of a simulation of behavior of the whole network.

Keywords: modeling, photovoltaic system connected to the network, Matlab / Simulink.

Keywords: modeling, photovoltaic system grid-connected, Matlab / Simulink.

Abréviation

HTB : Haute Tension

HTA : Moyenne tension

BT : Basse Bension

GPV : Générateur photovoltaïque

PV : Photovoltaïque

MPP : Maximum Power Point Tracking

PPM : Point de Puissance maximale

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iii
Abréviation.....	iv
Liste des figures	vii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Principes généraux des réseaux électriques incluant des productions photovoltaïques	3
I.1 Introduction	3
I.2 Réseaux électriques publics	3
I.2.1 Introduction	3
I.2.2 Classification du réseau électrique	4
I.2.3 Architectures des réseaux électriques	5
I.2.4 La problématique des réseaux électriques	6
I.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux publics	7
I.3.1 Introduction	7
I.3.2 Les différents composants du système photovoltaïque	9
I.3.2.1 Les modules photovoltaïques.....	10
I.3.2.2 L'onduleur couplé au réseau	10
I.3.2.2.1 Technologies de l'onduleur.....	11
I.3.2.2.2 Modularité des couplages par onduleurs.....	11
I.3.2.3 Protections.....	13
I.3.3 Principes de commande pour un fonctionnement optimal	13
I.3.3.1 Méthode de la Perturbation et l'Observation (P&O)	14

I.3.3.2 Méthode à tension de référence fixe (fonctionnement de type « batterie tampon »).....	15
I.3.4 Qualité et normes des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	15
I.4 Conclusion.....	16
Chapitre II : Modélisation et simulation de la centrale PV connectée au réseau	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque	17
II.2.1 Modèles électriques des panneaux PV	17
II.2.2 Association des générateurs photovoltaïques.....	20
II.2.3 Modèle mathématique des panneaux PV et MPPT sous Matlab/simulink	21
II.2.4 Résultats de simulation PV et commande MPPT.....	22
II.2.4.1 Simulation du générateur PV l'éclairement et puissance en fonction du temps	22
II.3 Modélisation et simulation des convertisseurs statiques	23
I.3.1. Modélisation du convertisseur DC/DC (hacheur survolteur).....	23
II.3.2 Fonction et mode de commande du convertisseur DC/DC.....	24
II.3.3 Simulation du convertisseur survolteur (Boost).....	25
II.3.4 Modélisation et simulation du convertisseur DC/AC (onduleur de tension)	26
II.3.5 Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau	28
II.3.6 Objectif de la commande de l'onduleur	28
II.3.6.1 Commande par hystérésis	28
II.3.6.2 Commande par MLI	29
II.3.7 Modèle de l'onduleur implanté sous Matlab/Simulink.....	31
II.3.8 Résultat de simulation de l'onduleur.....	32
Chapitre III : Modélisation et simulation avec le réseau.....	34
III.1 Introduction	34
III.2 Modèles d'un réseau électrique	34

III.1.1. Ligne de transmission courte	34
III.1.2. Ligne de transmission moyenne.....	35
III.1.3. Ligne de transmission longue	35
III.3. Système PV connecté à un réseau électrique.....	36
III.3.1 Modèle de boucle de régulation de l'ensemble du système PV.....	36
III.3.1.1 Régulation du bus continu.....	37
III.3.1.2 Commande coté réseau.....	37
III.3 : Modèle mathématique de l'ensemble du système PV	39
III.4. Résultats de simulation.....	40
III.5 Conclusions	41
Conclusion générale	42
Bibliographie.....	43
Annexes.....	47

Liste des figures

<i>Figure I-1 : Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production[5]</i>	<i>5</i>
<i>Figure I-2: Configuration de réseau de distribution, a) Bouclée ; b) Radiale</i>	<i>6</i>
<i>Figure I-3 : Schéma d'un système autonome (a) et d'un système connecté au réseau (b) [10]</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-4 : Arbre des systèmes photovoltaïques.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-5 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque relié à un réseau électrique ..</i>	<i>10</i>
<i>Figure I-6 : schéma de principe d'onduleurs connectés à un réseau</i>	<i>12</i>
<i>Figure I-7: Exemple d'algorithme de MPPT</i>	<i>14</i>
<i>Figure I-8 : Méthode avec contre-réaction de tension et modulation</i>	<i>15</i>
<i>Figure II-1 : Schéma équivalent d'une cellule PV.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II-2 : Schéma bloc du module photovoltaïque et son MPPT sous Matlab/Simulink....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II-3 : Caractéristiques de l'ensoleillement(a) et puissance en fonction du temps(b) ..</i>	<i>22</i>
<i>Figure II-4 : Caractéristiques du courant(a) et tension(b) en fonction du temps.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II-6 : Circuit électrique équivalent du convertisseur survolteur.....</i>	<i>23</i>

<i>Figure II-7 : Système de conversion PV avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande PPM [32]</i>	<i>25</i>
<i>Figure II-8 : Convertisseur survolteur sous Matlab/Simulink</i>	<i>25</i>
<i>Figure II-9 : Courbe de tension et courant en sortie du convertisseur survolteur</i>	<i>26</i>
<i>Figure II-10 : Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L</i>	<i>27</i>
<i>Figure II-11 : Tension à la sortie d'un onduleur non filtrée et filtrée</i>	<i>27</i>
<i>Figure II-12 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par hystérésis [33]</i>	<i>29</i>
<i>Figure II-13 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI [35]</i>	<i>30</i>
<i>Figure II-14 : Modèle mathématique de l'onduleur sous Matlab/Simulink</i>	<i>31</i>
<i>Figure II-15 : courbes des tensions et courants à la sortie de l'onduleur</i>	<i>32</i>
<i>Figure III-1 : Modèle en série d'une ligne de transmission courte</i>	<i>35</i>
<i>Figure II-2 : Modèle en T d'une ligne de transmission moyenne</i>	<i>35</i>
<i>Figure III-3 : Modèle en pi d'une longue ligne de transmission</i>	<i>36</i>
<i>Figure III-4 : Schéma synoptique de commande et contrôle de la chaîne de conversion [37].</i>	<i>37</i>
<i>Figure III-5 : Schéma bloc de l'ensemble sous Matlab/Simulink</i>	<i>39</i>
<i>Figure III-6 : Caractéristiques de tensions et courants injectés sur le réseau électrique</i>	<i>40</i>

Introduction générale

La production d'énergie est un défi majeur pour les années futures étant donné que les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour soutenir leur économie. De nos jours, une grande partie de la production et de la consommation mondiale d'énergie engendre des effets polluants ou des dérèglements climatiques. La consommation des ressources naturelles (fossile ou fissile) réduit inéluctablement les réserves et compromet leur disponibilité pour les générations futures.

Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse... A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre. L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet de notre étude. Nous traiterons de la problématique et des solutions technologiques pour le raccordement d'un générateur photovoltaïque à un réseau public de distribution.

La production d'électricité par voie solaire photovoltaïque (PV) a explosé ces dernières années dans le monde. Les nouvelles installations solaires photovoltaïques ont représenté dans le monde, une puissance de 14 000 MW, portant la totalité des installations mondiales à plus de 35 000 MW[1, 2]. Les installations connectées aux réseaux représentent la grosse majorité des nouvelles installations. Ce mode d'exploitation séduit de plus en plus les pays en voie de développement qui disposent d'un gisement exploitable.

En Afrique subsaharienne particulièrement, beaucoup de projets solaire PV de grande capacité avec injection sur les réseaux publics ont été réalisés (exemple de la centrale de 5MW de Praia au Cap-Vert) ou sont en cours d'élaboration et/ou de réalisation (exemple de la centrale de 20MW de Zagtoui au Burkina Faso...). L'enjeu de ces injections sur les réseaux publics réside non seulement dans la gestion optimisée de ceux-ci mais surtout de leur impact en termes de perturbation de ces réseaux.

Comment gérer donc une ressource intermittente injectée dans des réseaux eux- mêmes instables (caractéristiques des réseaux africains) ?

Le but de ce mémoire est de développer des modèles permettant d'avoir une approche globale du comportement de ces systèmes fort complexes.

A cet effet nous nous intéressons aux modèles des composants, de la chaîne énergétique, c'est à dire le champ photovoltaïque, le dispositif de conversion et d'adaptation (hacheurs, onduleur, transformateurs) et le réseau public de distribution.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher des modèles mathématiques les plus représentatifs afin d'obtenir une injection optimale des puissances du système PV / réseau (Grid connected).

Ce présent travail est par conséquent réalisé en trois chapitres :

Le premier chapitre décrit les réseaux électriques de distribution publique et ses problématiques, le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système, la qualité et normes régissant la connexion des systèmes photovoltaïques au réseau.

Le second chapitre présente la modélisation et simulation des GPV, des convertisseurs statiques et la stratégie de leur commande permettant le raccordement au réseau.

Le troisième chapitre consiste à proposer un modèle de réseau électrique afin de simuler l'injection des puissances PV sur ce réseau et décrire son comportement.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et résultats de simulation.

Chapitre I : Principes généraux des réseaux électriques incluant des productions photovoltaïques

I.1 Introduction

L'électricité produite par les d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) et renouvelables (solaire, vent, géothermie...) doivent être acheminées via un réseau électrique de grande ou petite envergure vers les centres de consommation.

Ce chapitre présente quelques principes généraux des réseaux électriques puis les différents modèles électriques équivalents des éléments du système photovoltaïque, les principes de commande pour un fonctionnement optimal, la qualité et normes d'interconnexion au réseau.

I.2 Réseaux électriques publics

I.2.1 Introduction

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, elle est consommée en même temps qu'elle est produite. Il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. De ce fait, l'ensemble production (générateurs), acheminement (transport), utilisation (récepteurs) constitue un système complexe appelé *réseau électrique* qui doit être stable. Un réseau électrique peut être de petite puissance ou très puissant à l'échelle d'un pays.

Il est constitué de *lignes électriques* exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des *postes électriques*. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux *transformateurs*.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité

des grandeurs électriques partagées telles que la tension et la fréquence doivent être maintenues dans des marges acceptables[3] conformément à une norme.

Ces grandeurs de base sont influencées par l'intensité du courant qui circule dans les lignes et les câbles ; laquelle est liée aux puissances actives et réactives générées, transportées et consommées. Pour cette raison, la quantité d'électricité produite et la distance par rapport aux points de consommation ont conduit à une hiérarchisation et une spécification des lignes électriques d'un réseau national ou continental.

I.2.2 Classification du réseau électrique

On peut classer les réseaux électriques en fonction de leur tension de fonctionnement (prise entre deux de leurs trois conducteurs) et leur utilisation. Le tableau ci-dessous présente les plans de tension selon les normes française et européenne[4]:

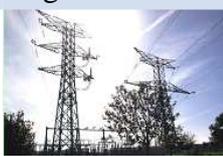
	Usage	Tensions Normalisées 	Standard Européen 	Aspect visuel des lignes
H T B	Grand transport national et interconnexion	225/400KV (THT) 90/63 KV (HT)	HTB (50 à 400 KV) HTB 3 : 400 KV HTB 2 : 225 KV HTB1 : 90 et 63 KV	 Lignes 225 KV
H T A	Lignes inter-régionales, Répartition régionale	33/20/15 KV (MT)	HTA (1KV à 50 KV)	 Poste de répartition 90KV
B T	Répartition locale, distribution et consommation	400/230 V	BT < 1 KV	 Pylône 230/400V 4 fils

Tableau I.1 : Les niveaux de tension dans un réseau électrique

I.2.3 Architectures des réseaux électriques

La conception et l'utilisation de chaque architecture du réseau électrique permettent d'atteindre plus ou moins une grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques.

En fonction de la densité et de la nature des unités de production, un réseau aura une architecture semblable à celle de la figure I-1.

Nous pouvons noter que les unités de production peuvent être raccordées aux différents étages selon la puissance mise en jeu. Les transformateurs jouent un rôle très important pour passer d'un niveau de tension à un autre donc pour passer d'un type de réseau à un autre.

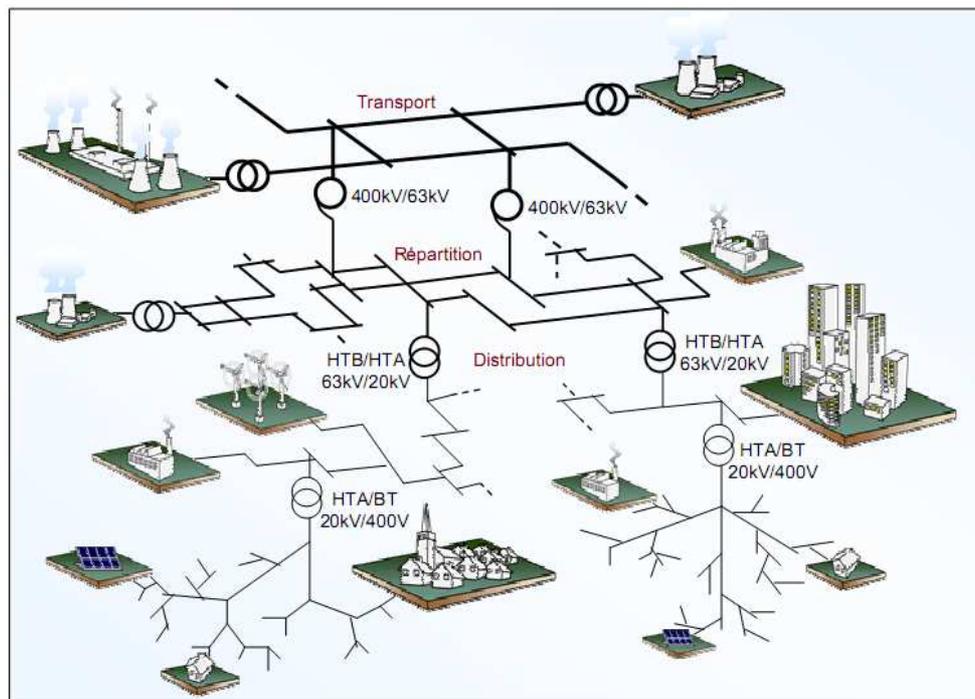


Figure I-1 : Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production[5]

Il existe deux configurations de réseaux de distribution [6]:

Pour des raisons de sécurité d’approvisionnement et minimisation des effets d’avaries sur un réseau, on privilégie la configuration de réseau bouclé (a) pour la distribution en zone urbaine et la configuration b pour les zones de campagne.

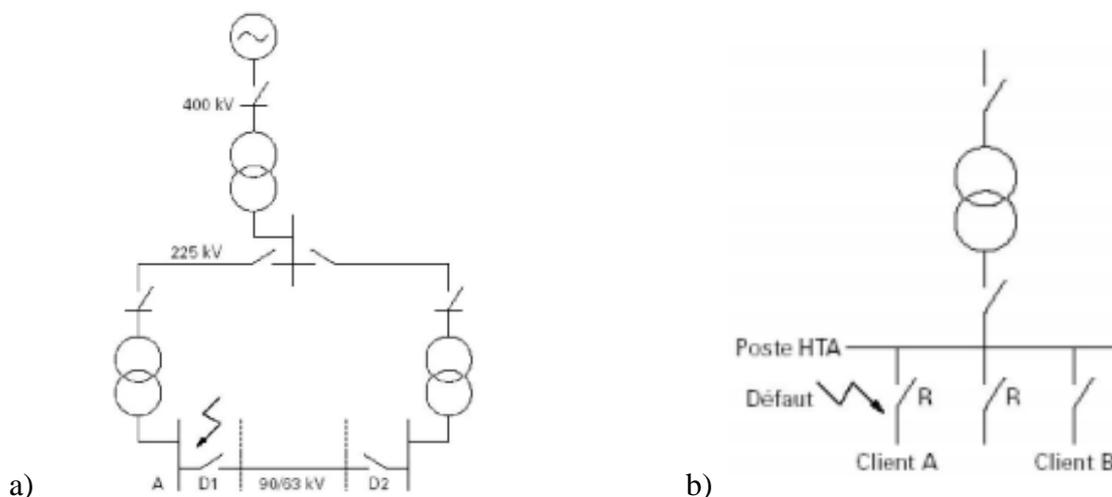


Figure I-2: Configuration de réseau de distribution, a) Bouclée ; b) Radiale

I.2.4 La problématique des réseaux électriques

Les problèmes majeurs du réseau électrique sont les perturbations, facteurs entachant la qualité des grandeurs électriques[7]. L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [8] :

- La fréquence ;
- L'amplitude des trois tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

Ces perturbations sont caractérisées par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées[3].

La variation de fréquence et tension peut résulter :

- D'un court-circuit proche ou loin d'une source, dû à la foudre ou aux manœuvres internes ;
- D'une très grosse variation de puissance de la source due à un appel fort de courant par la charge ;
- Du passage sur une source de remplacement ou de secours.

I.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux publics

I.3.1 Introduction

Dans un contexte évolutif, où l'implication des producteurs indépendants et des énergies renouvelables est annoncée, un développement de la filière photovoltaïque raccordé réseau paraît tout à fait concevable. Pour un producteur et/ou un gestionnaire de réseau de distribution, le photovoltaïque permet en effet de diversifier sa production d'électricité, de mettre en avant un bilan écologique favorable ou encore de lisser les pics de consommation en journée.

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installation des systèmes photovoltaïques [9].

- Autonomes ou « stand-alone », qui ne sont pas connectées au réseau. Ces installations sont utilisées pour électrifier des circuits isolés, distants du réseau électrique, difficiles à alimenter car ils sont situés dans des zones peu accessibles ou caractérisées par de basses consommations d'énergie qui rendent presque inutile un quelconque branchement au réseau public. Dans ces installations il est nécessaire de stocker l'énergie produite par les modules photovoltaïques en utilisant des batteries pour garantir une continuité d'énergie, de nuit ou lorsqu'il n'y a pas assez de soleil (figure I.2a).
- non autonomes ou « grid connected » proposées dans cette étude, c'est-à-dire système relié en parallèle au réseau électrique public, et conçu pour injecter dans le réseau l'énergie électrique produite par les champs PV. Dans Les systèmes reliés au réseau,

les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC). (figure I.2b).

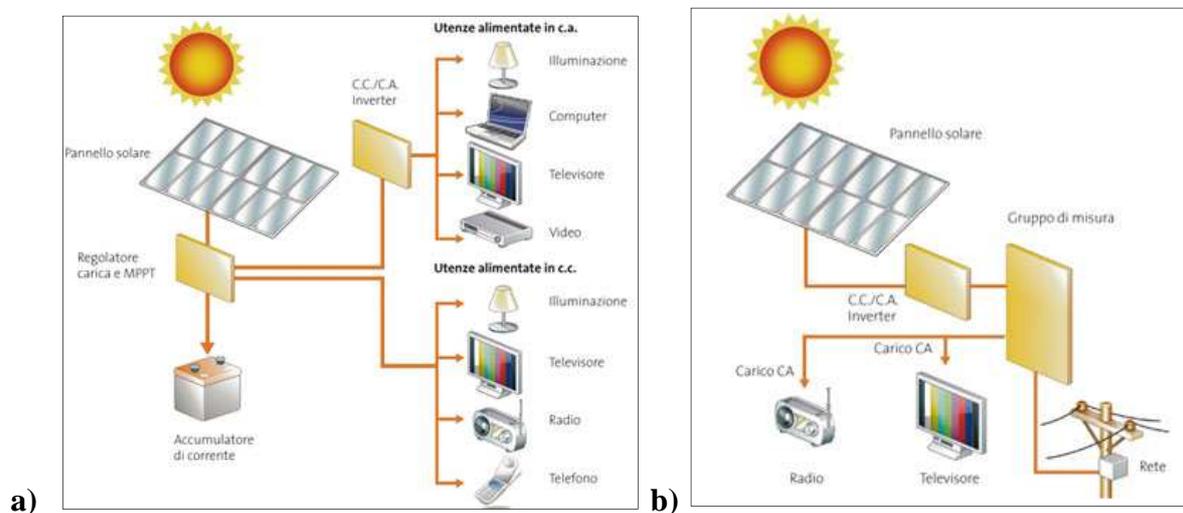


Figure I-3 : Schéma d'un système autonome (a) et d'un système connecté au réseau (b) [10]

Le développement des systèmes PV raccordés aux réseaux de distribution électrique pose un problème d'instabilité du réseau causé par la variation de l'ensoleillement et température. On estime qu'à partir de 30% d'électricité photovoltaïque, un réseau sera fortement perturbé et les fluctuations du courant seront provoquées par la variation de l'ensoleillement (surtensions à midi et rien la nuit)[11].

Un résumé des systèmes photovoltaïque est présenté ci-après.

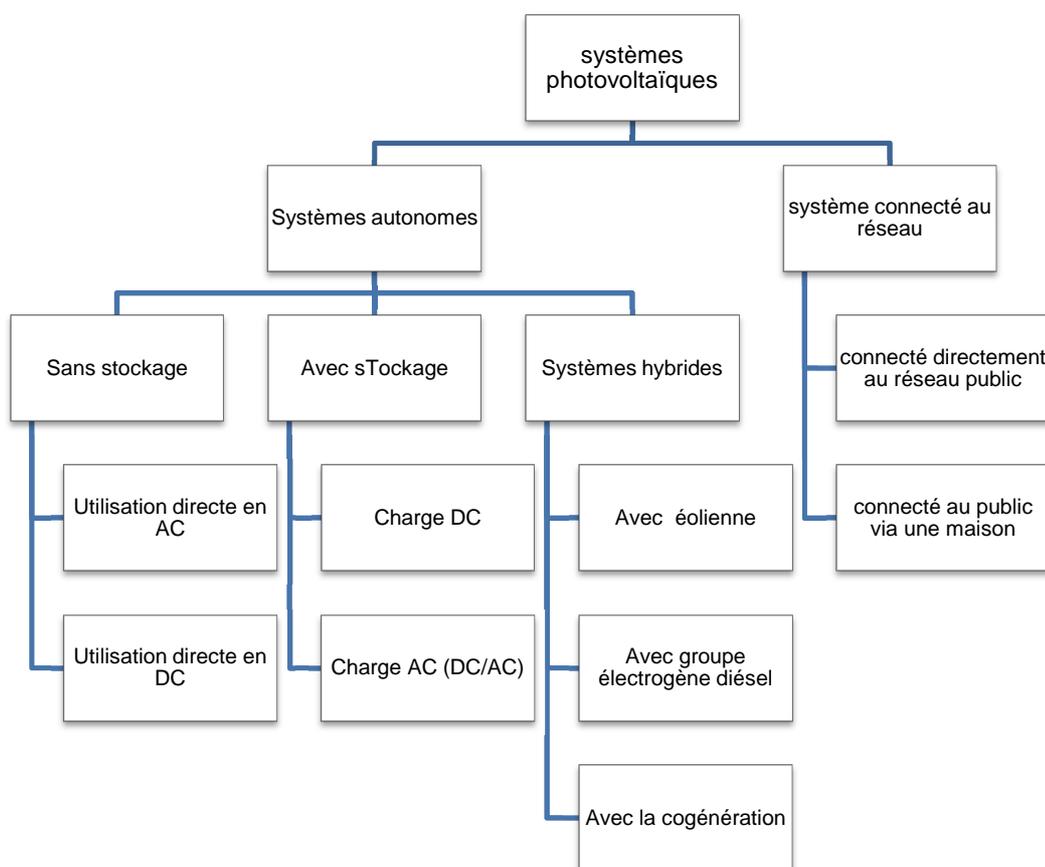


Figure I-4 : Arbre des systèmes photovoltaïques

I.3.2 Les différents composants du système photovoltaïque

Il existe plusieurs types de système PV raccordé, le système que nous avons choisi pour notre étude est représenté ci-dessous et composé de :

- Générateurs PV ;
- Convertisseur DC/DC ;
- Onduleur et filtre.

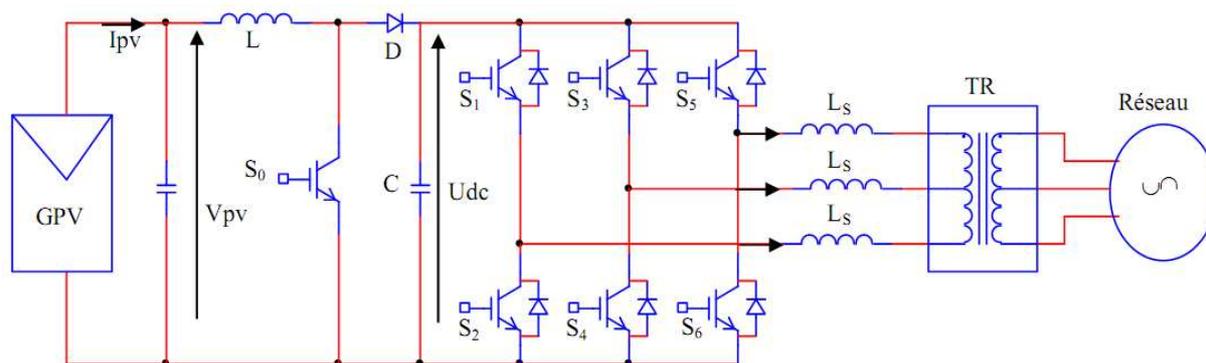


Figure I-5 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque relié à un réseau électrique

I.3.2.1 Les modules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément de base de la conversion d'énergie lumineuse (solaire) en électricité (courant continu) : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. La puissance est exprimée en Watt crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans des conditions d'ensoleillement optimales de 1000W/m^2 à 25°C pour Air-Masse (AM1.5)[12, 13].

Les cellules sont souvent en silicium soit monocristallin (plus pur, meilleur rendement), soit en silicium poly cristallin (moins efficace mais meilleur rapport qualité/prix). Il existe également des cellules en couches minces, et d'autres matériaux photovoltaïques font l'objet de recherches. L'association en parallèle de plusieurs modules forme un panneau.

Le rendement des cellules ne cesse de s'améliorer et de nombreux records sont établis (60% en laboratoire)[14].

I.3.2.2 L'onduleur couplé au réseau

Les applications photovoltaïques les plus valorisantes actuellement sont les installations PV destinées à alimenter les réseaux électriques publics par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer

grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur PV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum[15]. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau[16].

I.3.2.2.1 Technologies de l'onduleur

Dans les applications photovoltaïques raccordées réseau, pour des puissances allant jusqu'au mégawatt une topologie s'est imposée. Il s'agit de l'onduleur de tension. Ça principale qualité est de pouvoir générer des courants dont la forme est contrôlable par modulation de largeur d'impulsions (MLI).

L'onduleur de tension à MLI : Il fait appel aux nouvelles technologies d'électronique de puissance, fiables et performantes [17]:

- La technologie des thyristors à coupure ou GTO (Gate Turn-off Thyristor).
- La technologie des transistors de puissance bipolaires.
- La technologie MOSFET.
- La technologie IGBT (Insular Gate Bipolar Transistor).

I.3.2.2.2 Modularité des couplages par onduleurs

Actuellement, il existe principalement trois modes d'utilisation d'onduleurs en réponse à des compromis technico-économiques : l'onduleur général, les onduleurs par réseau de panneaux et les onduleurs intégrés par panneau. Nous décrivons brièvement leur caractéristique ci-dessous.

- **l'onduleur unique générateur (OUG) :** Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres. Toute la production serait défaillante si l'onduleur centralisé tombait en panne[18], Figure I.5a
- **l'onduleur par groupe de panneaux (OGP) :** Ce schéma est le plus utilisé pour les installations allant jusqu'à 3 KW de puissance. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs strings en parallèle, coté courant alternatif. L'intérêt de ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante[19], Figure I.5b.
- **l'onduleur intégré par panneau (OIP) :** Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure I.5c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut[20].

Les configurations OGP et OIP sont reconnues pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. La configuration OUG est souvent moins chère en termes d'équipement électronique nécessaire. Elle conduit à un meilleur rendement global et une meilleure fiabilité [19].

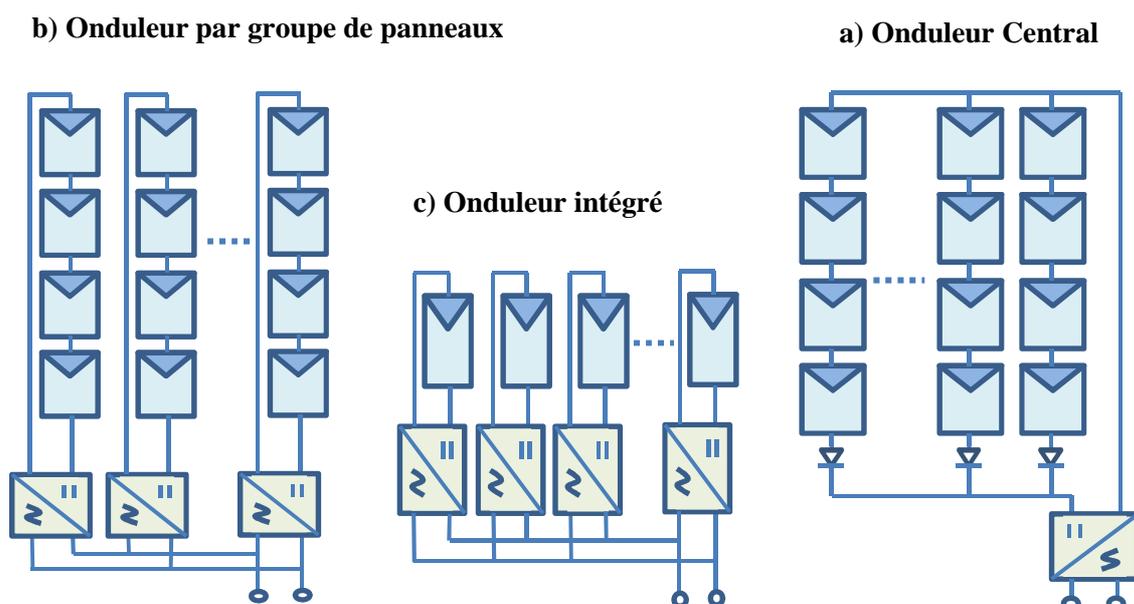


Figure I-6 : schéma de principe d'onduleurs connectés à un réseau

I.3.2.3 Protections

Les derniers éléments indispensables à un système couplé au réseau sont les protections AC et DC contre la foudre, les fusibles, disjoncteurs et un bon câblage pour éviter la formation d'arc électrique, source d'incendie.

I.3.3 Principes de commande pour un fonctionnement optimal

Dans le fonctionnement des GPV, pour un meilleur rendement, la technique de la poursuite de la puissance maximale qui consiste à transférer de manière optimale toute la puissance électrique convertible de cette source pour alimenter la charge. Elle est indispensable dans toutes applications utilisant un générateur photovoltaïque dès lors que le critère du « retour sur investissement » est directement lié à la production d'énergie. C'est le cas pour une production injectée dans un réseau.

Les techniques de contrôle employées est la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) sont [21].

➤ **Méthode incrémentale appliquée à la puissance :**

Celle-ci est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance (P-V) obtenue directement de la caractéristique du GPV. Le PPM est obtenue lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule Parmi cette méthode, on trouve :

Ces techniques s'appuient sur la non linéarité de la courbe de puissance d'un générateur photovoltaïque pour un ensoleillement donné. Un processus itératif ou une boucle d'asservissement à une référence locale.

- ✓ La méthode de la perturbation et l'observation (P&O) qui sera détaillée à la suite ;
- ✓ La méthode par incrémentation de conductance, non détaillée [22].

➤ **Méthode analogique à contre réaction de la tension :**

Cette méthode repose sur le contrôle de fonctionnement des panneaux par comparaison de tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur.

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes [23] :

- ✓ Méthode à tension de référence fixe (fonctionnement de type « batterie tampon ». Celle-ci est choisie et sera détaillée dans le cas de notre travail ;
- ✓ Méthode MPPT avec mesure la tension à vide du panneau ;
- ✓ Méthode MPPT avec cellule pilote.

I.3.3.1 Méthode de la Perturbation et l'Observation (P&O)

Si l'on désire suivre le point de puissance maximale, il faut connaître les paramètres qui modifient sa position. Le recours aux techniques d'asservissement en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation (P&O).

Cet algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système par augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de rapport cyclique.

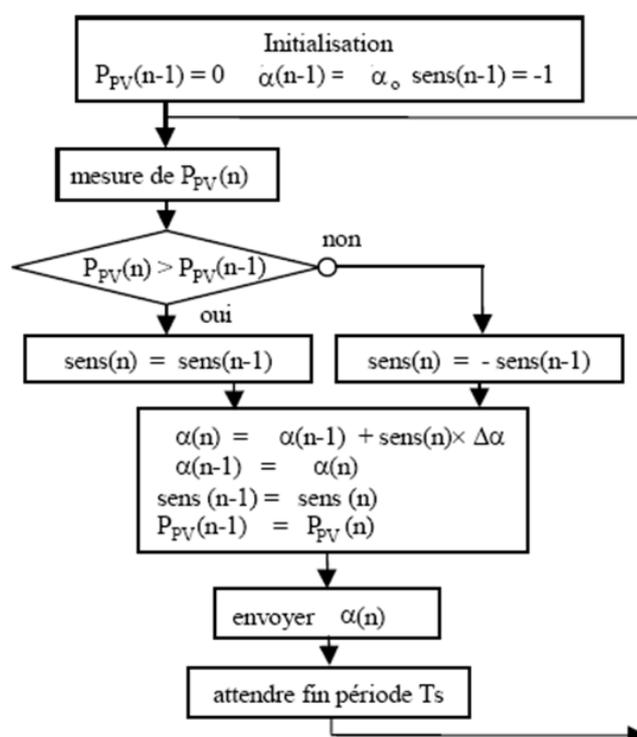


Figure I-7: Exemple d'algorithme de MPPT

I.3.3.2 Méthode à tension de référence fixe (fonctionnement de type « batterie tampon »)

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points de puissance maximales (figure I-8), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillement et température le long des périodes de l'année [23].

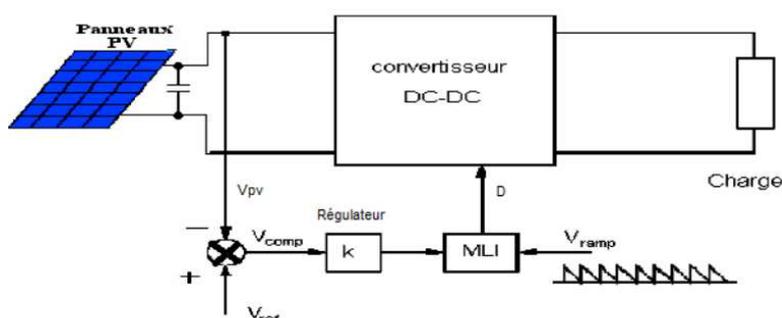


Figure I-8 : Méthode avec contre-réaction de tension et modulation

I.3.4 Qualité et normes des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Une fois l'énergie électrique produite par le GPV, il s'agit ensuite de la transmettre au réseau de distribution basse tension (BT) ou moyenne tension (HTA) via un transformateur élévateur. Cependant, le raccordement doit prendre en compte certaines particularités du solaire. Il s'agit notamment du fonctionnement du GPV, qui, du fait de la nature stochastique de l'ensoleillement et de la température occasionnent des variations de puissance [24].

En fonction de la puissance à injecter, des caractéristique du réseau sur lequel elle doit être injectée et du maintien d'une qualité de tension dans les limites sont fixées par des normes. La qualité de l'énergie électrique fait référence à la stabilité de la tension et de la fréquence. Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité de l'énergie électrique des systèmes connectés au réseau comportant des sources d'énergie renouvelable.

Les systèmes d'injection de puissance photovoltaïque sur le réseau doivent répondre aux normes en vigueur afin de prendre en compte [25, 26] :

- Le découplage des système PV si le réseau présente une défaillance (problème d'islanding ou îlotage) ;
- La qualité de puissance fournie au réseau (pollution harmonique) ;
- La protection contre la foudre ;
- Les effets multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé et triphasé non équilibré ;
- Fluctuation et baisse de fréquence.

I.4 Conclusion

L'optimisation du GPV nécessite une modélisation et simulation des divers composants de la chaîne de production photovoltaïque raccordée au réseau.

Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau public de distribution électrique. Ce chapitre (1) a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux réseaux électriques et aux systèmes photovoltaïques. Des informations sur la technologie de chaque composant du système ont été décrites en donnant leur structure générale, les normes et qualité de puissance photovoltaïque à injecter au réseau.

Chapitre II : Modélisation et simulation de la centrale PV connectée au réseau

II.1 Introduction

Ce chapitre présente un modèle mathématique de simulation s'appliquant à chaque composant de la centrale PV connectée au réseau. Le système détaillé (présenté à la figure I.5) est composé de générateur photovoltaïque, de convertisseur DC/DC, de l'onduleur DC/AC commandé par la MLI, de filtre et le réseau électrique.

Une commande des convertisseur sera développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du GPV. L'onduleur, chargé de transférer l'énergie produite des modules PV dans le réseau doit garder la tension alternative constante. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et simulation seront effectués sous le logiciel Matlab/Simulink. Les grandeurs contrôlées sont la tension efficace, la fréquence et la phase. Ce système de contrôle permettra d'injecter la puissance active désirée et de régler la tension au point de raccordement du réseau connecté.

II.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

II.2.1 Modèles électriques des panneaux PV

La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s'agit d'obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs types de modèles pour la modélisation cellulaire solaire. Chaque modèle donnera les différents types d'équations mathématiques en raison du nombre différent de composants dans le circuit. La figure II-1 montre quatre types de modèles cellulaires PV différents parmi lesquels nous avons choisis celui de la figure II.1a [27, 28]

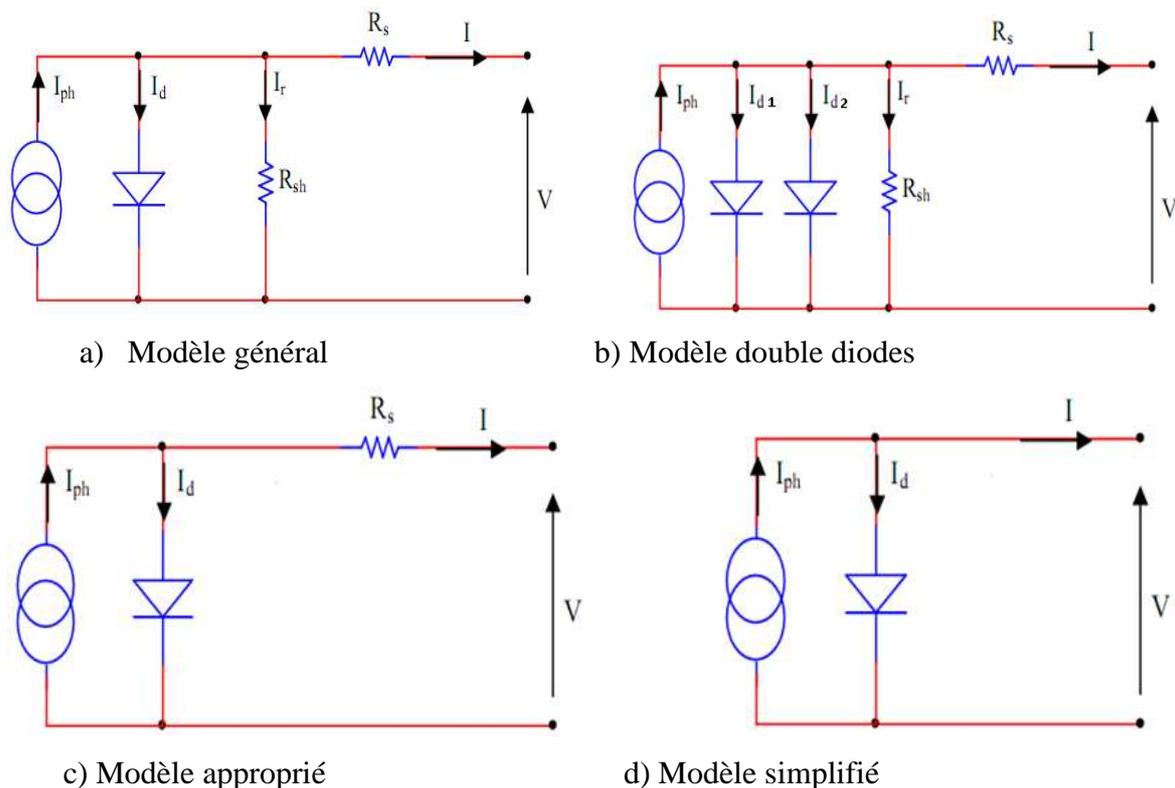


Figure II-1 : Schéma équivalent d'une cellule PV

Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision. Ce modèle a une source de courant, I_{ph} , qui dépend de la radiation solaire et de la température, une diode en parallèle dont l'intensité de saturation inverse dépend de la température et une résistance en série R_s , laquelle représente l'effet de la résistance interne et des contacts de la cellule. On peut introduire davantage de complexité dans le modèle en introduisant en outre une résistance en parallèle avec la diode R_{sh} [28]. Le modèle approprié a été aussi utilisé dans une modélisation pour accomplir une vérification avec la fiche technique du fabricant[29].

$$I = I_{ph} - I_d - I_{RH} \quad (1)$$

Selon le modèle général, nous avons cette équation :

$$I = I_{PH} - I_S \left[\text{EXP} \left(\frac{q(V + R_s I)}{K T_C A} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{SH}} \right) \quad (2)$$

Le modèle approprié

$$I = I_{PH} - I_S \left[\text{EXP} \left(\frac{q(V + R_S I)}{K T_C A} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

I_{PH} est courant produit par les cellules

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ C charge électron ;

$K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K constant Boltzmann ;

T_C est la température de travail de la cellule ;

A est un facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2 ;

R_S et R_{SH} sont des résistances série et parallèle.

Le photo courant produit par les modules dépend linéairement de l'irradiation solaire et est aussi sous l'influence de la température.

$$I_{PH} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

$$I_{ph,n} = I_{SC,n} \quad (5)$$

Avec G : Eclairement (W/m²) ; T : Température (K)

$I_{ph,n}$: Courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards. $G_n = 1000$ W/m²

et $T = 25^\circ\text{C} = 298$ K

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \text{EXP} \left[\frac{q E_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{k A} \right] \quad (6)$$

Où I_{RS} est le courant de saturation inverse, E est l'énergie de bang-gap[30].

$$I_S = \frac{I_{SC,n}}{\text{EXP} \left(\frac{q V_{OC,n}}{N_S k A T_C} \right) - 1} \quad (7)$$

De l'équation (6) et (7), on obtient :

$$I_S = \frac{I_{SC,n} + K_I \Delta T}{\text{EXP} \left(\frac{V_{OC,n} + K_V \Delta T}{V_t * A} \right) - 1} \quad (8)$$

$$V_t = N_s K T_c / q \quad (9)$$

II.2.2 Association des générateurs photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelque watt crête et quelque dizaines de watt crête, 1 m² de cellule produit environ 100W, En fait l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série : leurs tensions s'ajoutent, En parallèle : leurs courants s'ajoutent.

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série N_s cellules et N_p parallèle est la suivante :

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{K T_c A} \right) - 1 \right] - \left(\frac{N_p V + N_s R_s I}{N_s R_{SH}} \right) \quad (10)$$

La courbe de puissance d'un groupement série parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire tous les paramètres de celle -ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certain conditions doivent être respectée[31]. Il faut :

- S'assuré que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit.
- Connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert V_{co}.

II.2.3 Modèle mathématique des panneaux PV et MPPT sous Matlab/simulink

Le but de cette commande PV + MPPPT est de garder la tension constante (vérifier par la courbe temps, tension), avoir un courant max ou une puissance max (courbes temps, courant et temps, puissance).

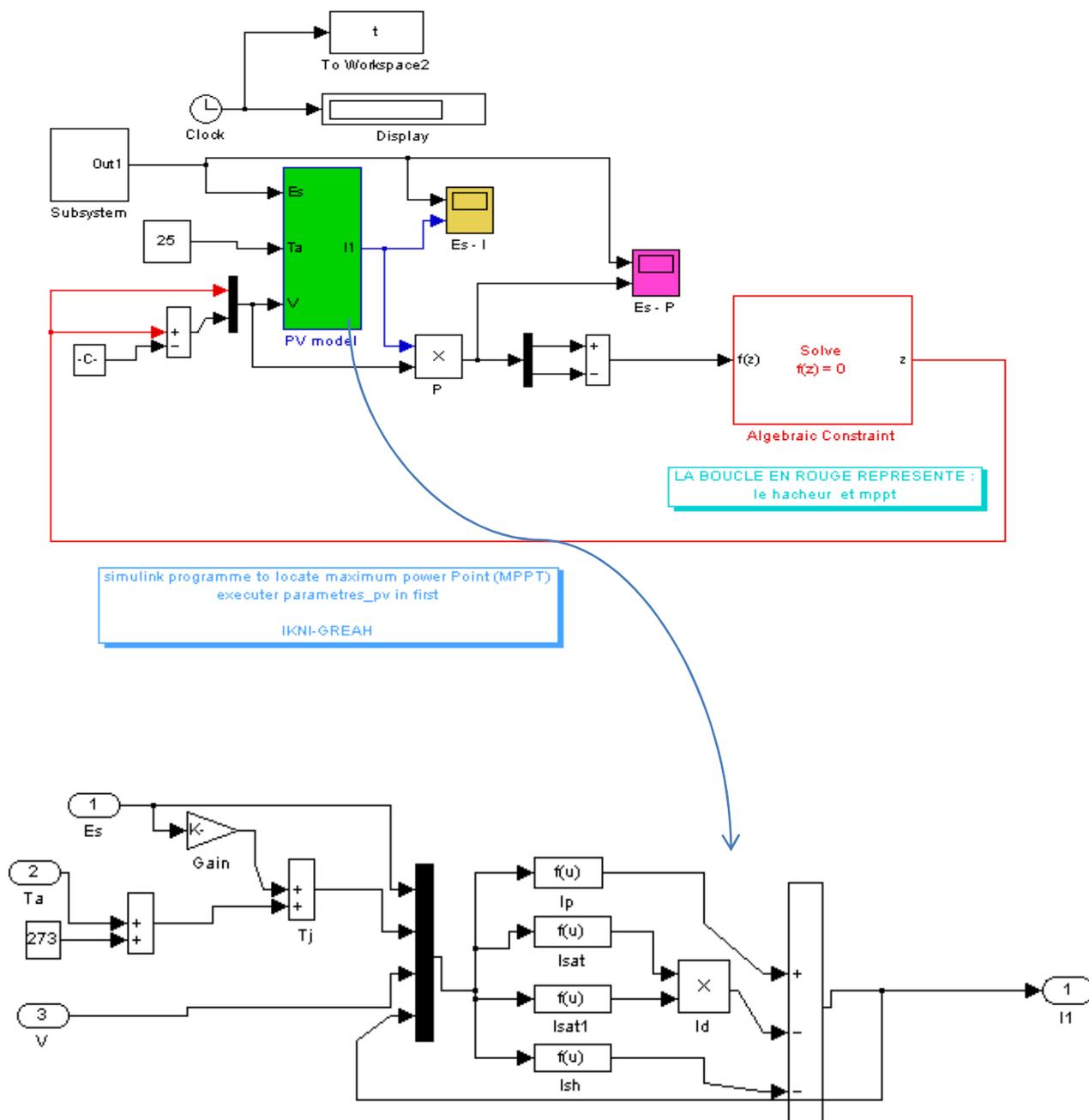


Figure II-2 : Schéma bloc du module photovoltaïque et son MPPT sous Matlab/Simulink

II.2.4 Résultats de simulation PV et commande MPPT

II.2.4.1 Simulation du générateur PV l'éclairement et puissance en fonction du temps

Les courbes de la figure II-3 montrent l'ensoleillement en fonction du temps (a) et la puissance en fonction du temps également (b). L'ensoleillement est faible (presque zéro) en début de journée, croit jusqu'à un maximum (vers 12h dans notre exemple) et décroît par la suite. La puissance suit l'évolution de l'ensoleillement, elle est presque proportionnelle à ce dernier.

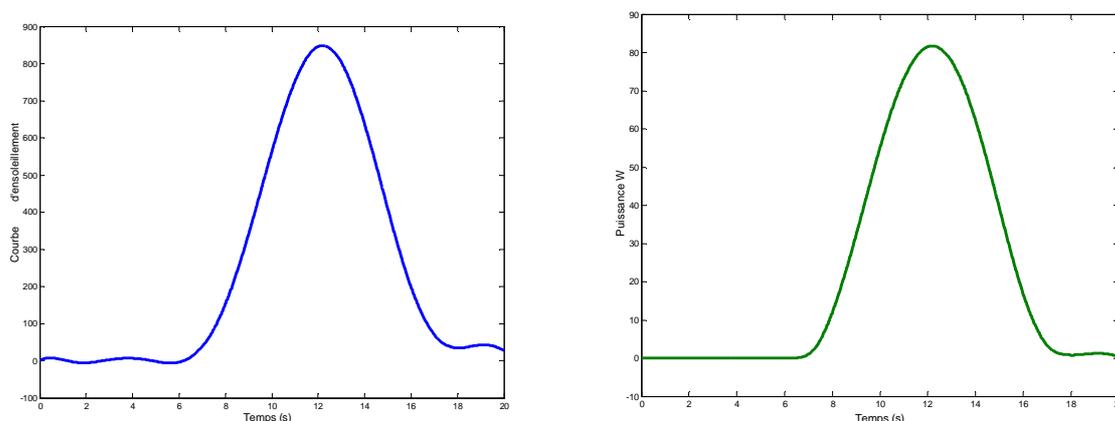


Figure II-3 : Caractéristiques de l'ensoleillement(a) et puissance en fonction du temps(b)

Le courant suit l'évolution de l'ensoleillement comme d'ailleurs la puissance, il est proportionnel à l'ensoleillement. Sur la figure II-4(b) nous constatons une montée rapide de la tension qui se stabilise par la suite à une plage donnée.

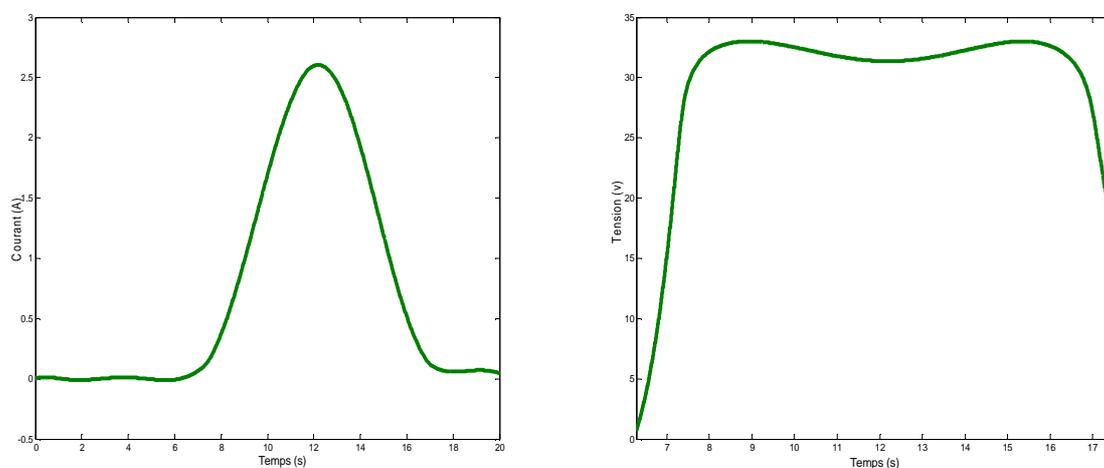


Figure II-4 : Caractéristiques du courant(a) et tension(b) en fonction du temps

II.3 Modélisation et simulation des convertisseurs statiques

Un convertisseur est un équipement permettant de transformer un courant électrique d'un certain type en courant électrique d'un autre type

I.3.1. Modélisation du convertisseur DC/DC (hacheur survolteur)

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur (Boost) peut être divisé en deux phases distinctes (Figure II.5) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque le Mosfet est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque le Mosfet est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité. Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

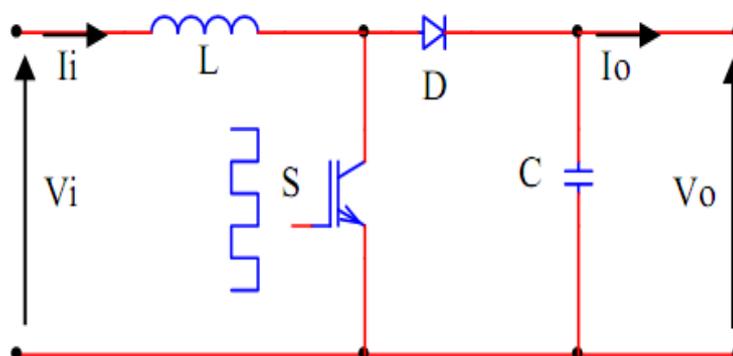


Figure II-5 : Circuit électrique équivalent du convertisseur survolteur

La tension et le courant de la charge du convertisseur survolteur en conduction continue sont données par les équation suivantes :

$$V_0 = \frac{1}{1 - \alpha} V_i$$

$$I_0 = (1 - \alpha) i_l$$

α : est le rapport cyclique

II.3.2 Fonction et mode de commande du convertisseur DC/DC

On utilise un convertisseur DC/DC lorsqu'on désire augmenter (dans notre cas) ou diminuer la tension disponible d'une source continue. Cette configuration permet une simple connexion directe pour effectuer le transfert d'énergie du GPV à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques.

Cette structure (figure ci-dessous) est celle d'un système autonome et peut être utilisée aussi pour un système connecté au réseau. Ce système permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (Ballast,...). L'utilisation d'une commande MPPT qui permet de rechercher le point de puissance maximale que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque s'avère nécessaire et important. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

Il existe dans la littérature de nombreuses recherches sur les commandes MPPT afin de trouver un système optimal permettant une recherche du point de puissance maximale. Les commandes MPPT choisies pour notre étude, sont toutes basées sur une commande extrémale de type Perturbe & Observe (P&O) [32].

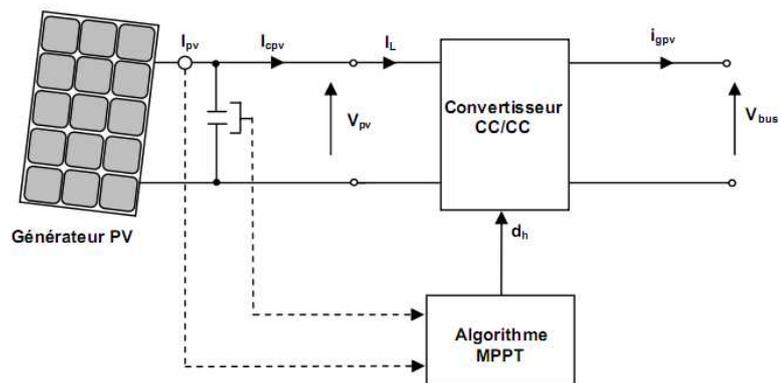


Figure II-6 : Système de conversion PV avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande PPM [32]

II.3.3 Simulation du convertisseur survolteur (Boost)

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la figure II.7 est obtenu à l'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink, figure II. 6.

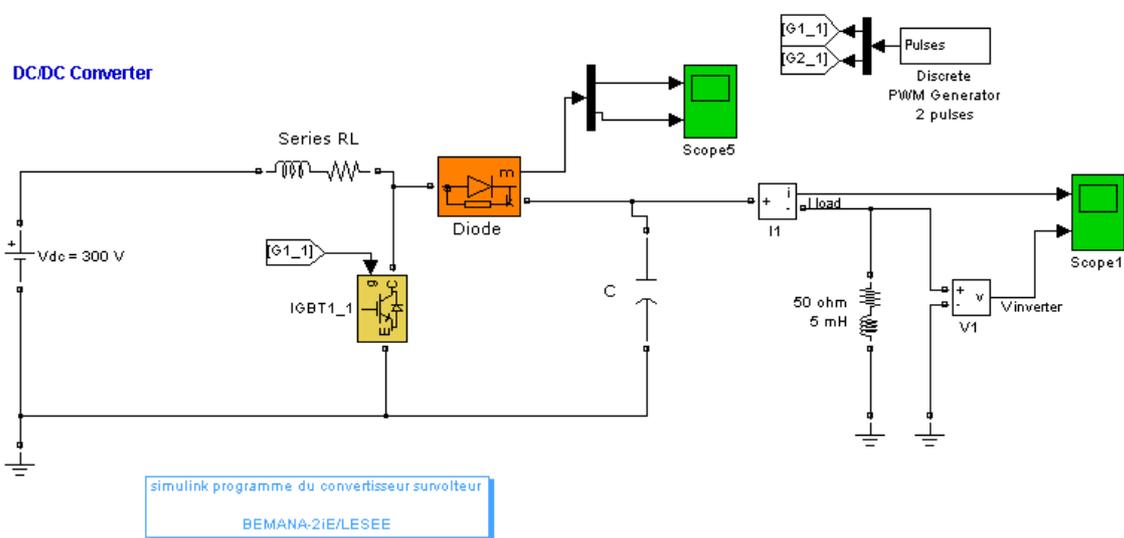


Figure II-7 : Convertisseur survolteur sous Matlab/Simulink

Les données qui ont conduit à ce résultat de simulation sont les suivantes :

Tension d'entrée	Paramètre du convertisseur	Charge à la sortie
300 V	$L=30^{\circ}-6$, $C=1^{\circ}-3$	$R=50$, $L=5^{\circ}-3$

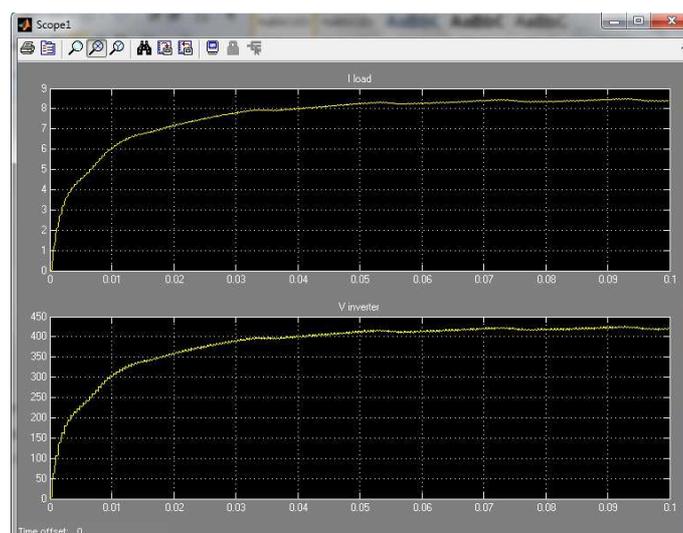


Figure II-8 : Courbe de tension et courant en sortie du convertisseur survolteur

Il est donc important de jouer sur le rapport cyclique d'une part, et d'autre part, bien dimensionner l'inductance L pour avoir un courant lisse et le condensateur C pour avoir une tension de sortie désirée.

II.3.4 Modélisation et simulation du convertisseur DC/AC (onduleur de tension)

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication,..) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...) [1].

Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants:

- Source de tension continue (par exemple: batterie) ;
- Convertisseur DC/AC ;
- Filtre LC ou L.

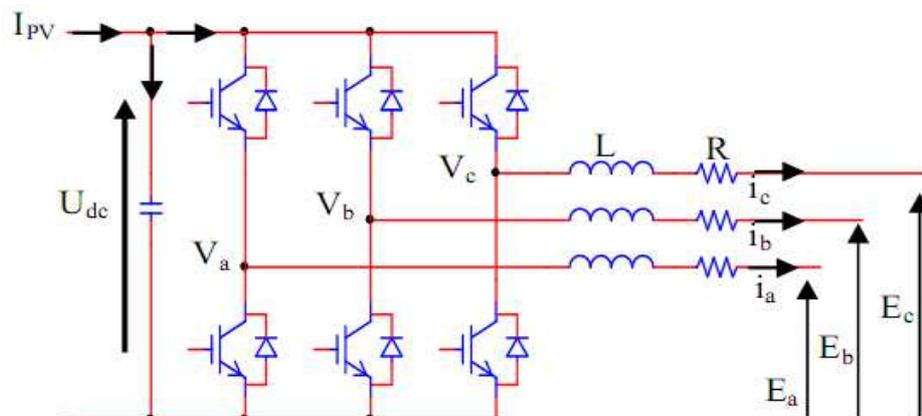


Figure II-9 : Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI* ou PWM* en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux

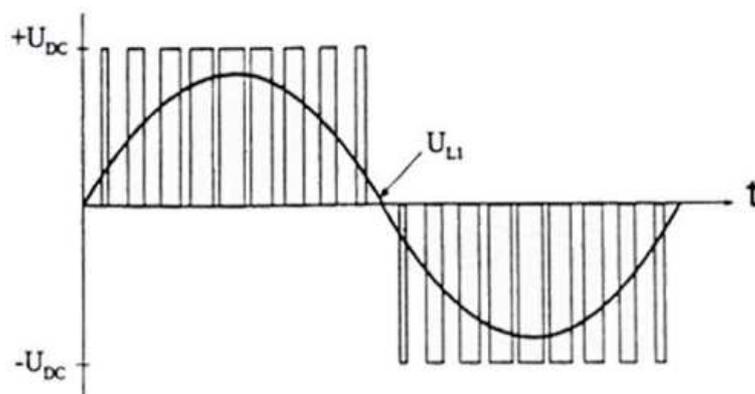


Figure II-10 : Tension à la sortie d'un onduleur non filtrée et filtrée

II.3.5 Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes : le système rapide lié aux courants et le système lent qui est associé à la tension continue. De ce fait, une synthétisation de deux régulateurs pour la boucle des courants, et pour la boucle externe de la tension continue peut se faire. La performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables [33].

II.3.6 Objectif de la commande de l'onduleur

Le but de la commande est de gérer l'ordre d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthode de commande existent dans la littérature peuvent être utilisées [34].

- Commande par hystérésis ;
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

II.3.6.1 Commande par hystérésis

Le principe de contrôle par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation. La figure ci-dessous montre le schéma technique de cette commande. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [33].

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie et son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe.

Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que cette dernière reste inconnue. Le principe de la commande des interrupteurs est illustré ci-dessous[35].

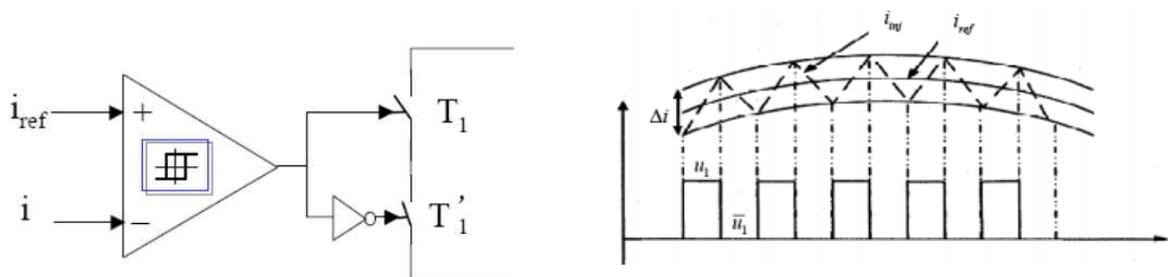


Figure II-11 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par hystérésis [33]

II.3.6.2 Commande par MLI

Ce type de modulation est souvent utilisé pour générer une tension triphasée à fréquence et amplitude variables. Il existe 3 manières de gérer la commutation des thyristors ou des transistors de puissance [36] :

- MLI à commande par sinusoïde ;
- MLI synchrone pour limiter les harmoniques ;
- MLI asynchrone pour améliorer la réaction du moteur à toute modification rapide de la commande du variateur de fréquence.

Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire (porteuse). La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas.

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La

sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure suivante [33] :

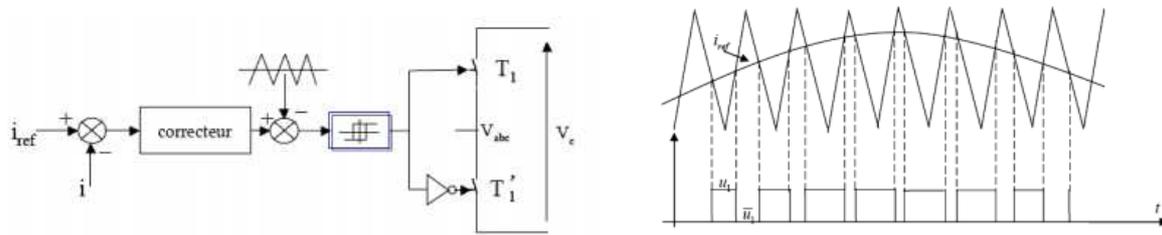


Figure II-12 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI [35].

II.3.7 Modèle de l'onduleur implanté sous Matlab/Simulink

Dans ce modèle, une boucle de régulation en tension a été réalisée à partir de la tension du réseau et comparée avec la tension de référence pour permettre la commande MLI des interrupteurs IGBT.

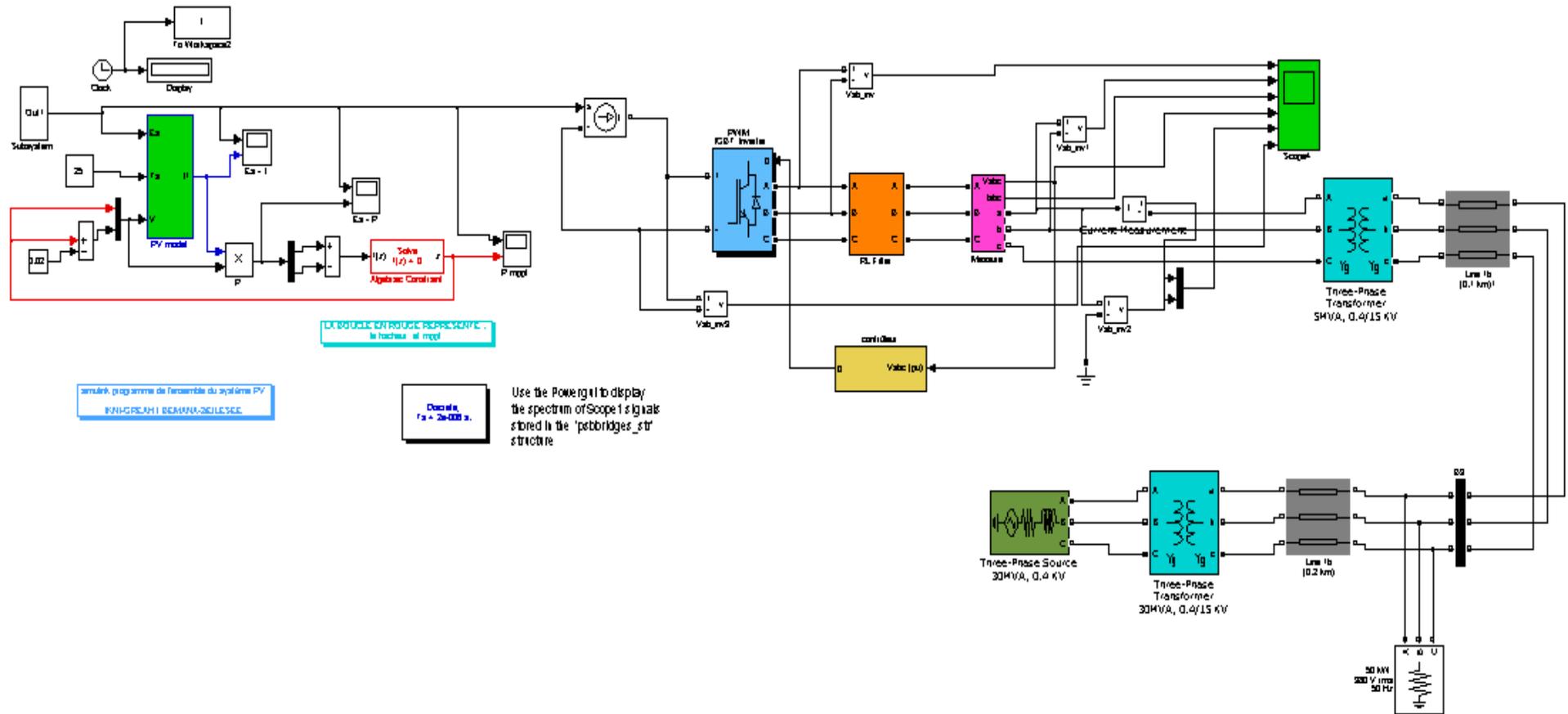


Figure II-13 : Modèle mathématique de l'onduleur sous Matlab/Simulink

II.3.8 Résultat de simulation de l'onduleur

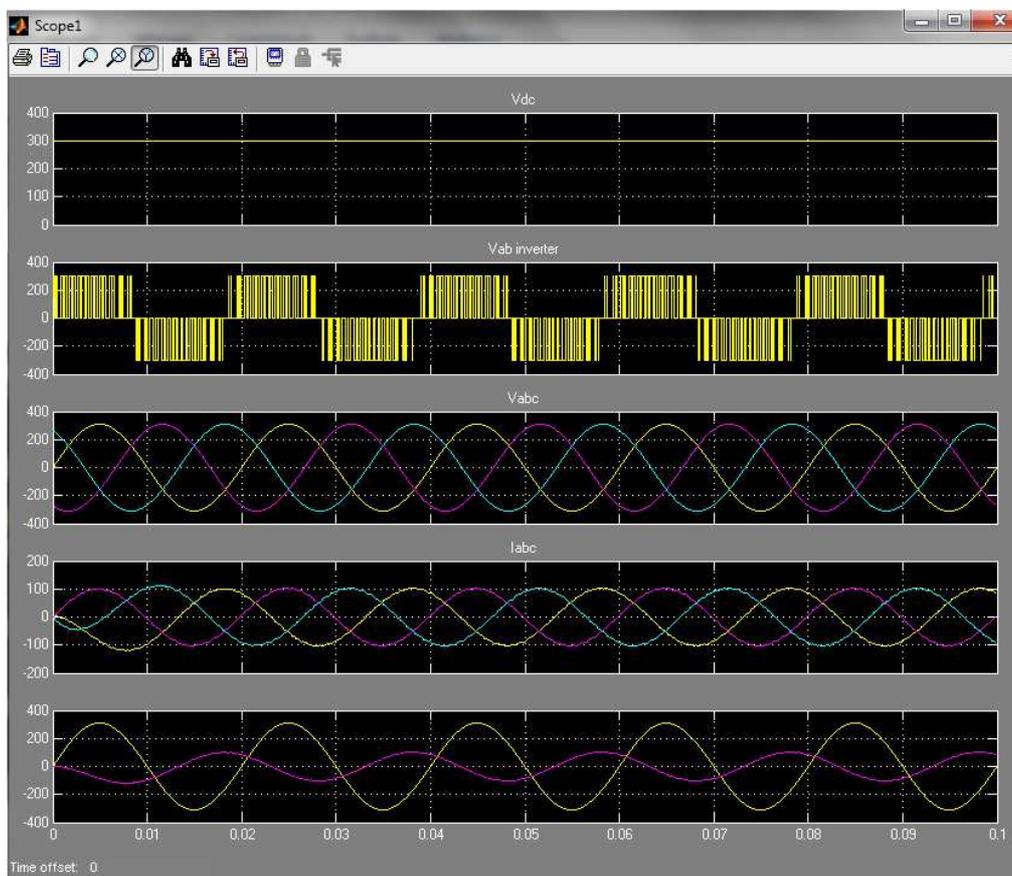


Figure II-14 : courbes des tensions et courants à la sortie de l'onduleur

Pour une tension continue (V_{dc}) à l'entrée de l'onduleur, nous obtenons un signal rectangulaire ($V_{ab_inverter}$) incompatible à l'utilisation. Un filtre (RL) est branché à la sortie de chaque phase de l'onduleur, ainsi obtenu un signal sinusoïdal compatible au réseau (V_{abc} et I_{abc}).

Nous remarquons sur la dernière graphique, la tension et le courant ne sont pas en phase ce qui explique l'injection de puissance réactive sur le réseau. Cela est dû à la boucle de régulation pour le contrôle des puissances active et réactive, que nous n'avons pas réalisé ici.

II.4 Conclusions

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et simulation de tous les composants représentant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, tels que, le GPV, le convertisseur survolteur et l'onduleur. Vue les résultats obtenus qui se rapprochent de ceux dans la revue littéraire, nous amène à les combiner au réseau électrique ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Modélisation et simulation avec le réseau

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, destiné à la modélisation et simulation des différents corps du système photovoltaïque, celui-ci a pour but de regrouper les éléments entre eux puis les couplés à une source triphasée.

Dans ce chapitre, les différents types de lignes de transmission avec leur modèle seront présentés ainsi que le schéma d'ensemble de la chaîne de production photovoltaïque. Enfin, on analysera les résultats de simulation de l'ensemble du système.

III.2 Modèles d'un réseau électrique

Une ligne de transmission à trois constants R, L et C distribué uniformément le long de la longueur entière de la ligne. La résistance et l'inductance forment l'impédance de série. La capacité existant entre les conducteurs. Il existe trois types de ligne de transmission à savoir :

- Ligne de transmission courte ;
- Ligne de transmission moyenne ;
- Ligne de transmission longue.

III.1.1. Ligne de transmission courte

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est 50 km et pour une tension de ligne (< 20kV), on la considère comme une ligne de transmission courte. En raison de la plus petite longueur et la plus basse tension, les effets de la capacité sont petits et peuvent être négligés. Donc seulement la résistance et l'inductance de la ligne sont prises en considération selon la figure suivante.

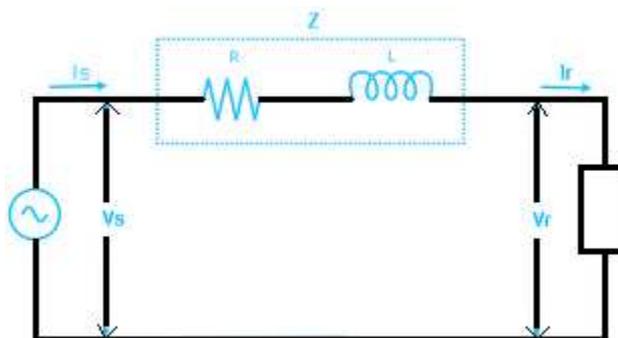


Figure III-1 : Modèle en série d'une ligne de transmission courte

III.1.2. Ligne de transmission moyenne

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est comprise entre 50 à 150 km et la tension de ligne est ($> 20\text{kV}$ et $< 100\text{kV}$), on la considère comme une ligne de transmission moyenne. Vu la longueur suffisante et la tension de la ligne, les effets de capacité sont pris en considération.

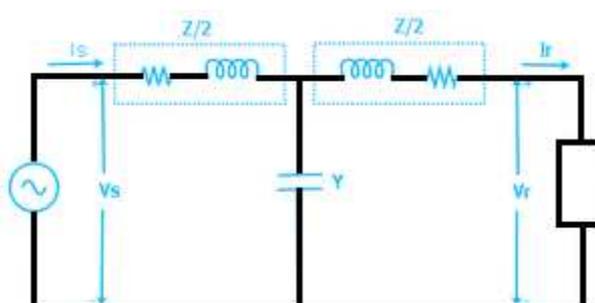


Figure II-2 : Modèle en T d'une ligne de transmission moyenne

III.1.3. Ligne de transmission longue

Quand la longueur d'une ligne de transmission aérienne est plus de 150 km et la tension de ligne est très élevée ($> 100\text{kV}$), on le considère comme une longue ligne de transmission. Pour le traitement d'une telle ligne, on considère la ligne constante uniformément distribué à la longueur entière de la ligne et des méthodes rigoureuses sont employées pour la solution.

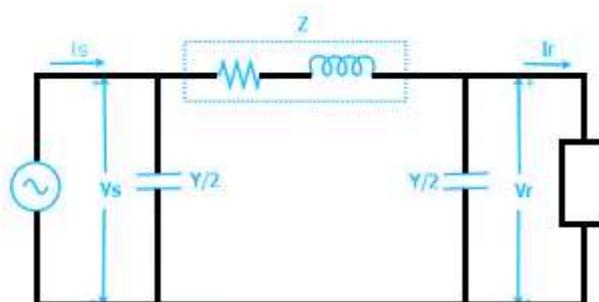


Figure III-3 : Modèle en pi d'une longue ligne de transmission

III.3. Système PV connecté à un réseau électrique

III.3.1 Modèle de boucle de régulation de l'ensemble du système PV

Après avoir modélisé et simulé les différents composants du système photovoltaïque, nous allons les regrouper en un bloc afin de voir les paramètres tension et courant à injecter.

Le système de commande de l'ensemble est présenté à la figure III.4.

Sur ce schéma, les composantes du courant sont comparées avec ses références. Les écarts entre elles, passent par les régulateurs. Les sorties des régulateurs donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère d-q. Passant par la transformation inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande MLI des interrupteurs de l'onduleur.

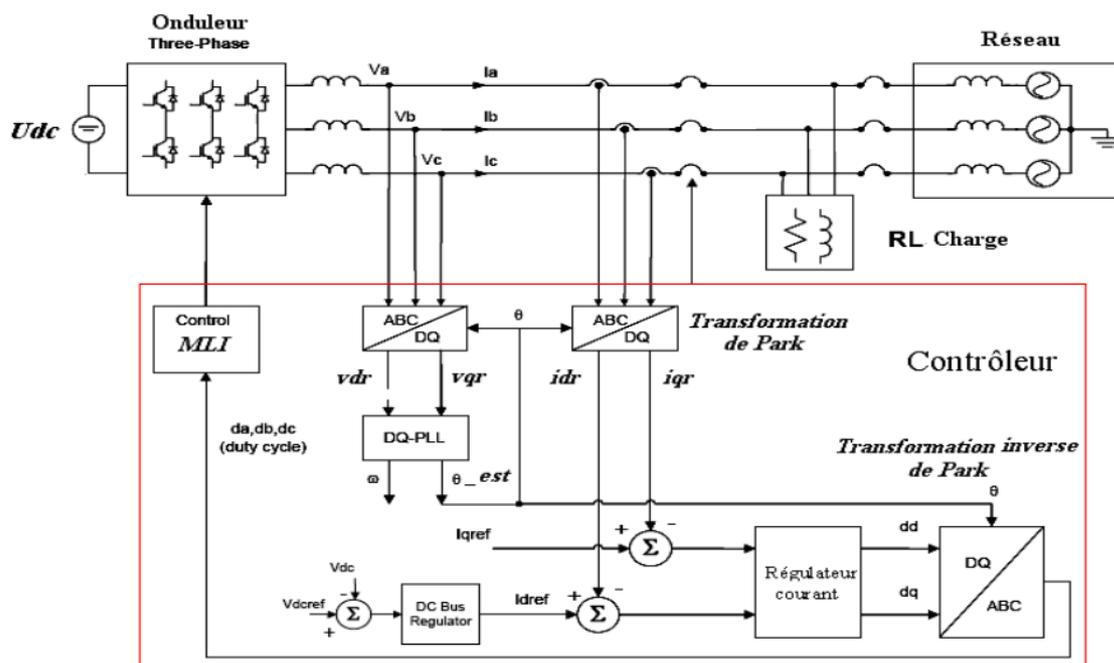


Figure III-4 : Schéma synoptique de commande et contrôle de la chaîne de conversion [37].

III.3.1.1 Régulation du bus continu

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. La régulation du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur PI générant la référence du courant à injecter dans le condensateur C.

III.3.1.2 Commande coté réseau

L'objectif du convertisseur connecté au réseau est de maintenir la tension du bus continu constant et de garantir le fonctionnement avec un facteur de puissance requis. L'expression (7) donne la puissance réactive et active circulant entre le réseau et le convertisseur.

$$Q_{elc} = V_d \cdot I_q - V_q \cdot I_d \quad (1)$$

$$p_{elc} = V_d \cdot I_d - V_q \cdot I_q$$

Un contrôle vectoriel est utilisé dans un second repère tournant de Park orienté selon tension du réseau de manière à ce que sa composante quadrature soit nulle $V_q = 0$;

$V_d = \sqrt{3} V_{eff}$. L'expression(7) devient :

$$Q_{elc} = V_d \cdot I_q \quad (2)$$

$$p_{elc} = V_d \cdot I_d$$

Ce contrôle vectoriel permet un contrôle découplé indépendant de la puissance active et réactive.

III.3 : Modèle mathématique de l'ensemble du système PV

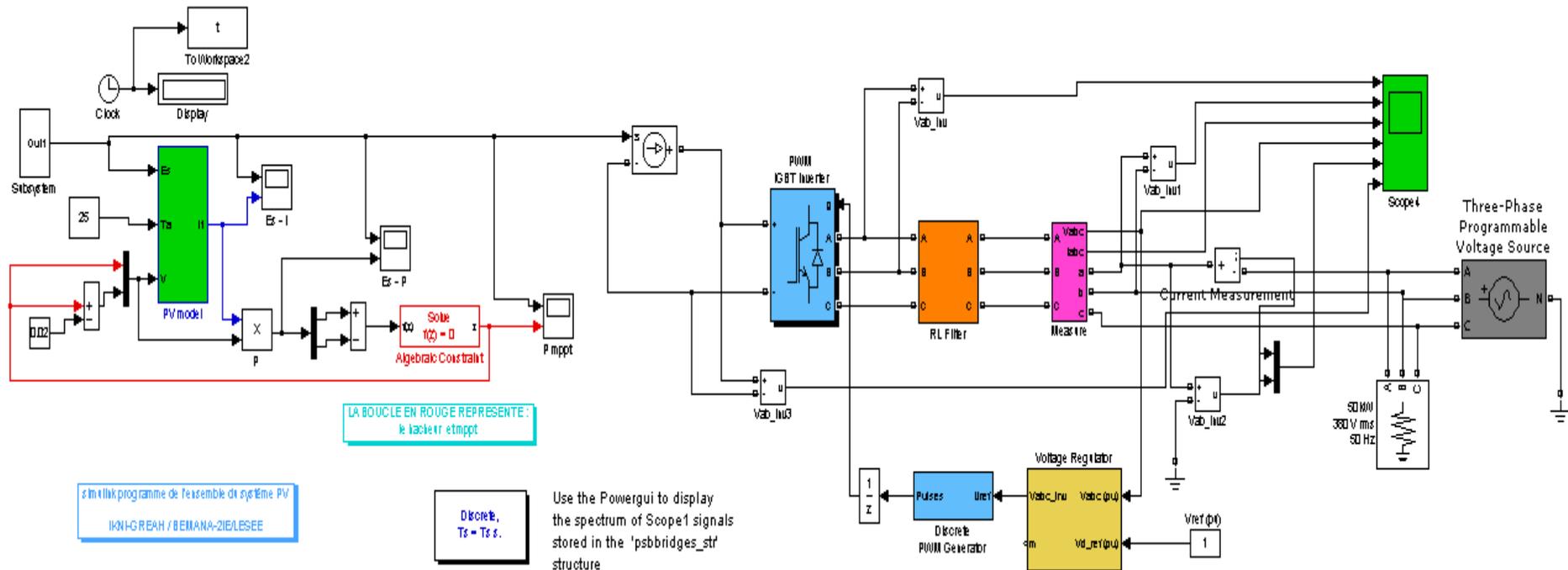


Figure III-5 : Schéma bloc de l'ensemble sous Matlab/Simulink

III.4. Résultats de simulation

Avec la boucle de régulation, nous avons simulé et obtenu la tension $V_{ab_inverter}$ (tension à la sortie de l'onduleur), les tensions composées filtrées et les courants filtrés. Nous constatons que la tension simple (V_a) et le courant (I_a) sont en phase, ce qui corrobore l'injection de puissance active.

Le modèle mathématique pour cette simulation se trouve en annexe 4

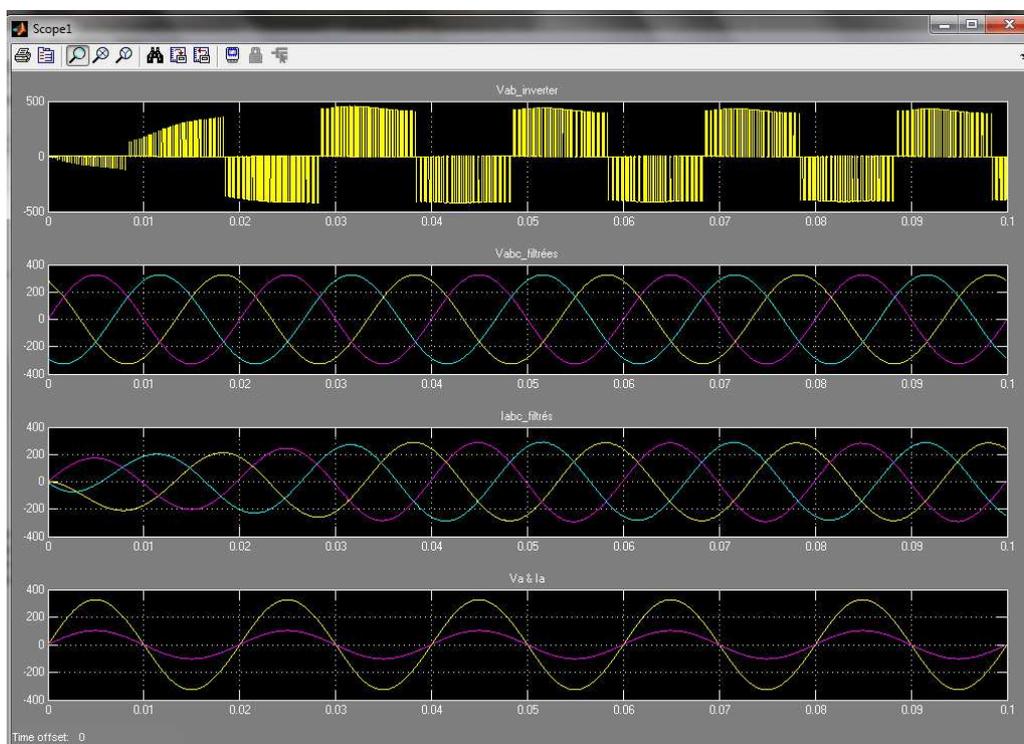


Figure III-6 : Caractéristiques de tensions et courants injectés sur le réseau électrique

Le but de notre étude consiste à une modélisation et simulation d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique.

Les puissances active et réactive (P_{ref} , Q_{ref}) sont des références des courants, nous avons choisi une loi de commande afin de fournir et d'extraire le maximum de puissance active. Cette loi est basée sur le choix des références des puissances.

On constate d'après la quatrième graphique de la figure ci-dessus que l'allure du courant transité au réseau et de la tension efficace du réseau sont en phase, ce qui explique l'injection unique de la puissance active. De plus, les courants sont sinusoïdaux à la sortie de l'onduleur-filtre et dépendent de la fréquence de la porteuse. Les obtenus par simulations sont cohérentes avec ceux trouver dans la littérature.

III.5 Conclusions

Après avoir modélisé et simulé les différents éléments d'un système photovoltaïque, il est nécessaire de faire une simulation avec le réseau pour voir puissance délivrée par le GPV.

La commande et la connexion au réseau électrique sont assurés par :

- La synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau, qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.
- Les courants sont comparés avec la référence puis régulés d'injecter le maximum de la puissance active.
- Nous avons choisi la commande MLI, qui nécessite un contrôle de fréquence fixe des commutations tandis que les tensions sont variables.

Les résultats obtenus des tensions et courants par simulations se rapprochent de ceux obtenus dans la littérature ce qui nous permet de valider notre travail.

Conclusion générale

L'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, et dans un souci du respect de l'environnement, pousse le monde de plus en plus à s'intéresser aux énergies renouvelables. L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et de la température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et simulation de chaque élément constituant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Nous avons débuté par un bref aperçu sur la constitution et différentes parties du réseau électrique et la chaîne photovoltaïque pouvant être relié au réseau.

Ensuite, nous avons établi les équations régissant le GPV en choisissant le modèle électrique équivalent à une diode qui est un compromis entre la précision et la simplicité. A partir de l'analyse des résultats de simulation obtenus, nous avons pu observer l'influence des conditions extérieures sur le fonctionnement électrique de ces GPV.

Le système de commande MPPT qui permet de faire fonctionner un GPV dans les conditions optimales en fonction des variations des paramètres extérieurs a été réalisé par action sur le rapport cycle du signal de commande de l'interrupteur du convertisseur DC/DC, qui, permet d'élever la tension issue des modules PV à un niveau de tension adaptable à l'entrée du convertisseur DC/AC. Le convertisseur DC/AC (onduleur de tension) commandé par la MLI à transistors IGBT a sa sortie une tension filtrée par le filtre L, compatible à la tension du réseau a été modélisé et simulé à partir de blocs mathématiques basiques présentés dans le catalogue Matlab/Simulink.

Cette étude nous a permis de connaître les problèmes et difficultés des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et d'avoir la prise en main du logiciel Matlab/Simulink tant important pour la modélisation.

Bibliographie

1. (AIE)., I.a.i.d.l.é., *La production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque*. 2010.
2. Wikipédia, *Énergie solaire photovoltaïque*. 2010.
3. B. De Metz-Noblat, G.J., *Cahier technique n° 185 : Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels*.
4. LASNE, L., *Les réseaux électriques*. Département EEA, Université de Bordeaux 1 2008.
5. RAMI, G., *Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution*. Thèse de doctorat de l'INP Grenoble, Novembre 2006.
6. Electric, S., *Guide de conception des réseaux électriques industriels: Architectures de réseaux*.
7. MORIN, E., *Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système* Thèse de Doctorat en Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication, Signal de l'Université Joseph Fourier Janvier 2005.
8. Alali, M.A.E., *Contribution à l'Etude des Comparateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension, Automatisation des systèmes de puissances électriques*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
9. PANKOW, Y., *Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basste Tension. Application au générateur photovoltaïque*. Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, décembre 2004: p. 98.
10. <http://www.aros-solar.com/fr/classification-des-installations-photovoltaïques>, *schéma des systèmes photovoltaïques*.
11. BETTENHAUSEN, R., *Onduleurs pour systèmes photovoltaïques autonomes et couplés au réseau de distribution* p. 9.
12. SINGO, A.T., *Thèse: Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I* février 2010: p. 9.
13. Weidong Xiao, W.G.D., Patrick R. Palmer, Antoine Capel , , *Regulation of Photovoltaic Voltage*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, June 2007 **54**, n°3: p. 1365-1374.

14. Céline BERNARD, C.S.O., Bernard LAVAL, Clément VAUDOUEUR *Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue* Université Technologique Compiègne, Automne 2009: p. 5-6.
15. Mme DIDIER, s.l.d.d.M.G., *Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques : Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances*. Hespul, Villeurbanne,, août 2007
16. Oi, A., *design and simulation of photovoltaic water pumping system*. partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.
17. Kane Mamadou, R.A., *Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques*. Cythelia, Juillet 2001: p. 49.
18. Salameh, Z., *Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays*. Proc. of the 1998 annual meeting of the American Solar Energy Society, Cambridge, USA, june 1998: p. 409-414.
19. P.A.B. James, A.S.B., R.M. Braid, *PV array <5 kWp + single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic?* Solar Energy, September2006. **80**(9): p. 1179-1188.
20. Detlef schluz, m.j.a.t.p., , .), *grid integration of photovoltaics and fuel cells*. Department of electrical Engineering, Electrical Power Engineering, Helmut Schmidt University, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany.
21. cherfa, F.B., *Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT* Mémoire de magister, Ecole nationale Polytechnique Elharach, 2004.
22. G. Adamidis, P.B., A. Balouktsis, *Photovoltaic system MPPTTracker Implementation using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface*. Institute for Energy Technology; Aalborg University Pontoppidanstraede 101 DK-9220, Aalborg, Denmark.
23. Mabrouk, A., *Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*. Mémoire de magister en électricité solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique El Harrach, Alger, 2008.

24. Salma EL AIMANI, *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, décembre 2004.
25. Synergrid, *Prescription techniques spécifiques de raccordement d'installation de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution*. Fédération des Gestionnaires de Réseaux électriques et Gaz en Belgique.
26. Abdeslam, D.O., *Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension*. Thèse de doctorat, Université Haute Alsace, Décembre 2005.
27. Marcelo Gradella Villalva, J.R.G., and Ernesto Ruppert Filho, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, mai 2009. **24**.
28. Huan-Liang Tsai, C.-S.T., and Yi-Jie Su, *Member IANG, Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK* Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, octobre 2008.
29. Sharaf, I.H.A.a.A.M., *A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment* University of New Brunswick, Canada.
30. Manning, J.A.G.a.C.D., *Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies*. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999. **146**: p. 193-199.
31. Patel, M.R., *Wind and Solar Power Systems*. Ph.D, édition CRC PRESS.
32. Petibon, S., *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
33. XU, J., *Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité* Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.
34. Shahraki, E.G., *Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques*. Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
35. Boudjdaimi, M., *Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels*. Mémoire de magister, UMMTO, Octobre 2009.

36. Boudjemâa, M., *Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque*. Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, Algérie 2007: p. 43-45.
37. Z. Ye, R.W., L. Garces, R. Zhou, L. Li and T. Wang, *Study and Development of Anti-Islanding Control for Grid-Connected*. General Electri GlobalResearch Center Niskayuna, New York, National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard.
38. Cheikh, S.A., *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* Thèse de doctorat, Ecole National Polytechnique El-Harrach, Décembre 2007.

Annexes

Annexe I.1 : Caractéristiques électriques et physiques des panneaux Solarex MSX 60 (1KW/m², 25°C) choisi pour la modélisation et simulation

Caractéristiques	Paramètres	valeurs
Electriques des modules PV	Puissance max	60W
	Tension à puissance max(V _{pp})	17.1V
	Courant à puissance max (I _{pp})	3.5A
	Courant de court-circuit (I _{sc})	3.8A
	Tension à circuit ouvert (V _{oc})	21.1V
	Coefficient de température de tension à circuit ouvert (K _v)	-73mV/°C
	Coefficient de température de courant de court-circuit(K _i)	3mA/°C
	Température de cellule (NOCT)	49°C
physiques	Nombre de modules en parallèle (N _p)	1
	Nombre de modules en série (N _s)	72
Autres	Constante de Boltzmann	1.38 ^e -23J/K
	Constante de Coulomb	1.6 ^e -19C

Annexe I.2 : Principe de fonctionnement de l'onduleur assisté et autonome

Principe de fonctionnement de l'onduleur assisté :

L'onduleur à thyristor est piloté par le réseau électrique. Les commutateurs qui le composent, s'enclenchent et se déclenchent seulement lorsque la sinusoïde du réseau passe par 0, ce qui permet d'obtenir un signal rectangulaire (ou trapézoïdal) déphasé contenant beaucoup d'harmoniques. La connexion au réseau est effectuée à travers un transformateur 50 Hz qui génère des pertes relativement importantes, et d'un filtre atténuant les harmoniques.

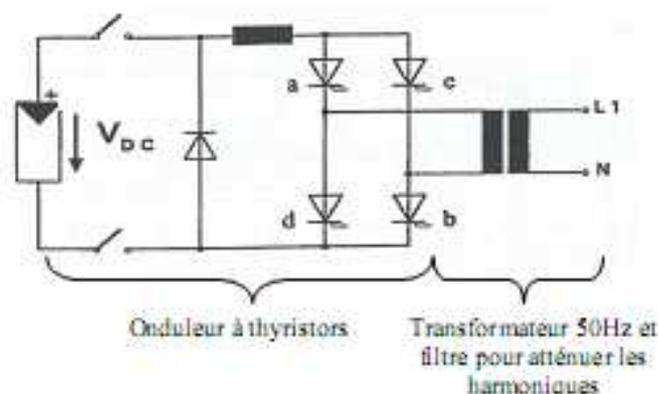


Schéma électrique de l'onduleur assisté [15]

Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome Basse Fréquence

L'onduleur autonome Basse Fréquence n'est pas piloté par le réseau : Contrairement à l'onduleur assisté, il permet de commuter la puissance plusieurs fois par période, reconstituant, par l'intermédiaire de la Modulation par Largeur d'Impulsion, un signal sinusoïdal de qualité supérieur au signal de l'onduleur assisté (harmoniques et déphasage). La connexion au réseau est effectuée à travers un transformateur 50 Hz qui génère des pertes relativement importantes, et d'un filtre atténuant les harmoniques :

Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome haute fréquence

L'onduleur autonome Haute Fréquence se distingue du précédent car il utilise un transformateur Haute Fréquence peu encombrant et diminuant considérablement les pertes de puissances. Le principe est similaire à celui de l'onduleur Basse Fréquence : Il consiste à construire un onduleur de l'ordre de 10 à 100 kHz et d'introduire un transformateur HF, qui possède intrinsèquement de bien meilleures performances qu'un transformateur BF.

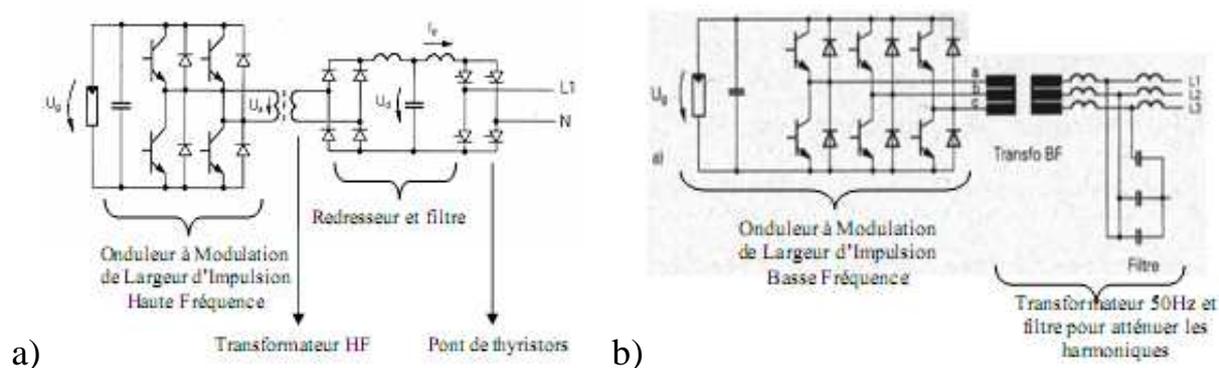


Schéma électrique d'onduleurs autonomes Haute Fréquence (a) et Basse Fréquence (b) [17].

Annexe I.3 : Equation du convertisseur survolteur (hacheur)

En appliquant les lois de Kirchoff sur les circuits équivalents ci-dessous des deux phases de fonctionnement donne[38] :

Pour la période αT :

$$I_{C1} = C1. \frac{dVp}{dt} = (I_p - I_L)$$

$$I_{C2} = C2. \frac{dVp}{dt} = -I_0$$

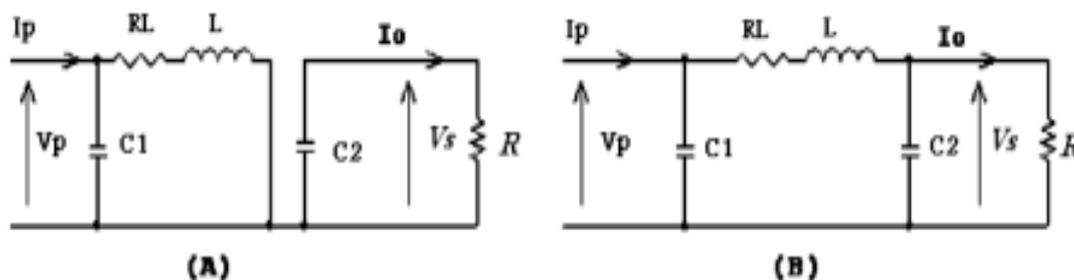
$$V_L = L. \frac{di_L}{dt} = V_P - R_L i_L$$

Pour la période $(1 - \alpha).T$:

$$I_{C1} = C1. \frac{dVp}{dt} = (I_p - I_L)$$

$$I_{C2} = C2. \frac{dV0}{dt} = i_L - I_0$$

$$V_L = L. \frac{di_L}{dt} = V_P - V_S - R_L i_L$$



Circuits équivalents des deux phases de fonctionnement (A) H : fermé, (B) : ouvert[38]

Annexe I.4 : Représentation du schéma bloc du contrôle de la liaison réseau

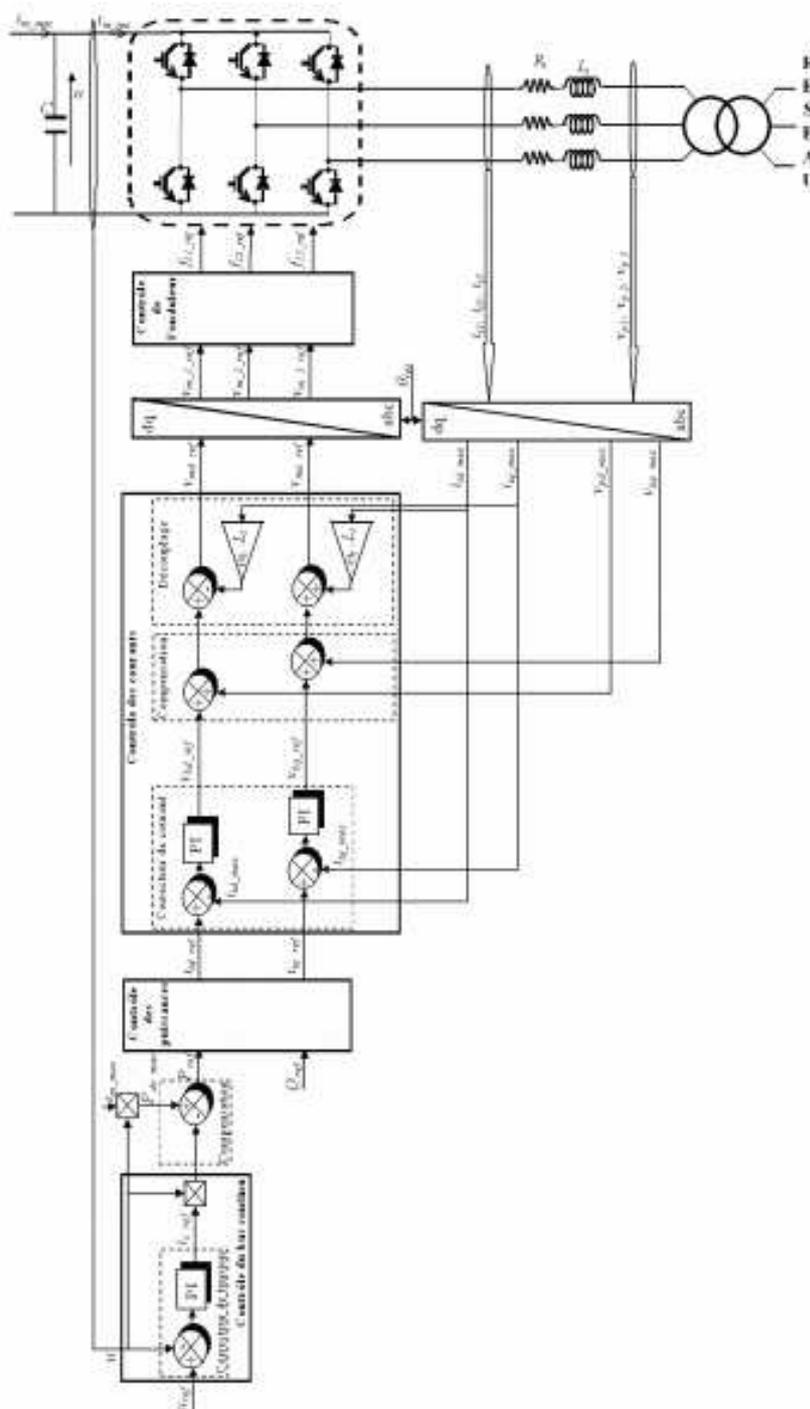


Schéma de contrôle d'interconnexion au réseau[24]