

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

*ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE*



*Département d'Électrotechnique*

*Projet de fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme  
D'Ingénieur d'État en Électrotechnique*

*THÈME*

**Commande d'un Système Photovoltaïque  
en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau**

*Présenté par :*

**BISKER Asma  
CHIRI Meriem**

*Proposé et dirigé par :*

**Pr MO.MAHMOUDI  
Pr EM.BERKOUK**

*Juin 2012*

*École Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie*



## Remerciements

Au terme de ce travail,

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Mohand Oualhadj MAHMOUDI et à Monsieur El Madjid BERKOUK, Professeurs à l'École Nationale Polytechnique, pour l'appuie scientifique et pour leur disponibilité durant la préparation de notre projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis durant ces trois années.

Nous tenons également à remercier Monsieur Lazhari NEZLI, enseignant à l'École Nationale Polytechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi Monsieur Seddik Hadji, enseignant à l'École Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Nous tenons également à témoigner notre reconnaissance au Colonel MAÏZA ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'École Militaire Polytechnique pour leur accueil et pour leur aide.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

On en profite pour remercier « ami Salah » ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus et ont contribués de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

*À la mémoire de mon cher papa,*

*À la personne qui m'est la plus chère au monde : ma mère,*

*À mon frère,*

*À Nassim et à Asma*

*À toute ma famille et mes amis*

*À tous ceux que j'aime*

*A s m a*

*À mes parents, dont l'amour est l'essence de ma réussite,  
À la mémoire de mes grands-parents, qui avaient tant voulu  
être présents ce-jour,  
À Barhouma sans qui je n'aurais pas été là aujourd'hui,  
À Mamou que j'adore,  
À Minou Habibi,  
À ma famille,  
À mes amis.*

*Maryam*

# Table des matières

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : État de l'art</b>	
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Généralités sur les panneaux photovoltaïques .....</b>	<b>4</b>
I.2.1. L'effet photovoltaïque .....	4
I.2.2. Les cellules photovoltaïques .....	6
I.2.2.1. Les différentes technologies des cellules .....	6
I.2.2.2. Schéma équivalent d'une cellule solaire .....	7
I.2.2.3. Caractéristique Courant-Tension.....	7
I.2.3. Générateur photovoltaïque.....	9
<b>I.3. Étage d'adaptation.....</b>	<b>13</b>
I.3.1. Convertisseurs.....	13
I.3.1.1. Convertisseur DC-DC (Hacheur) .....	13
I.3.1.2. Convertisseur DC-AC (Onduleur).....	15
I.3.2. Stockage .....	20
<b>I.4. Types d'installations .....</b>	<b>24</b>
I.4.1. Installations autonomes .....	24
I.4.2. Installations raccordées au réseau .....	25
<b>I.5. Conclusion .....</b>	<b>26</b>
<b>Chapitre II : Modélisation et Simulation de la Chaîne Photovoltaïque</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>II.2. Modélisation du panneau PV .....</b>	<b>28</b>
II.2.1. Modélisation .....	29
II.2.2. Résultats de la simulation .....	33
<b>II.3. Modélisation du Hacheur Buck-Boost.....</b>	<b>34</b>
II.3.1. Modèle du hacheur.....	34
II.3.2. Dimensionnement des composants du hacheur .....	38
II.3.3. Commande du hacheur .....	38
II.3.4. Résultats de simulation .....	40
<b>II.4. Modélisation de l'onduleur .....</b>	<b>42</b>
II.4.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	43
II.4.2. Stratégie de commande .....	45

II.4.3.	Modélisation du filtre LC .....	46
II.4.4.	Résultats de simulation .....	46
<b>II.5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>51</b>

### **Chapitre III : Système photovoltaïque en mode isolé**

<b>III.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>53</b>
<b>III.2.</b>	<b>Types de systèmes photovoltaïques isolés .....</b>	<b>53</b>
III.2.1.	Systèmes photovoltaïques autonomes (SAPV) .....	54
III.2.2.	Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides .....	54
<b>III.3.</b>	<b>Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome .....</b>	<b>55</b>
III.3.1.	Les batteries .....	56
III.3.2.	Fonctionnement et Performances de la batterie au plomb .....	57
III.3.3.	Modélisation de la batterie .....	58
III.3.4.	Régulateur de charge/ décharge de la batterie .....	62
III.3.5.	Stabilisation du bus continu .....	64
<b>III.4.</b>	<b>Modélisation de la chaîne photovoltaïque en mode isolé .....</b>	<b>65</b>
III.4.1.	Architecture du système .....	65
III.4.2.	Résultats de simulation .....	66
<b>III.5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>69</b>

### **Chapitre IV : Système photovoltaïque en mode connecté au réseau**

<b>IV.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.2.</b>	<b>Configuration du système.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.3.</b>	<b>Stratégie de commande.....</b>	<b>72</b>
IV.3.1.	Synchronisation avec le réseau .....	72
IV.3.2.	Régulation en courant .....	75
IV.3.3.	Régulation de la tension du bus continu.....	80
<b>IV.4.</b>	<b>Résultats de simulation .....</b>	<b>84</b>
<b>IV.5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>87</b>

<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>88</b>
----------------------------------	-----------

### **Bibliographie**

## LISTE DES FIGURES :

Figure I. 1 : Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque .....	4
Figure I. 2 : Principe de la conversion photovoltaïque .....	5
Figure I. 3 : Les différentes technologies photovoltaïques. ....	6
Figure I. 4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I. 5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle .....	8
Figure I. 6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	9
Figure I. 7 : Influence de la chaleur sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	9
Figure I. 8 : composantes d'un champ de modules photovoltaïques.....	10
Figure I. 9 : Caractéristique résultante du regroupement de ns cellules en série .....	11
Figure I. 10 : Caractéristique résultante du regroupement de $N_p$ cellules en parallèle .....	11
Figure I. 11 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass .....	12
Figure I. 12 : Variation de la puissance maximale en fonction de (a) l'ensoleillement (b) la charge (c) la température.....	14
Figure I. 13 : Commande des interrupteurs par Hystérésis .....	18
Figure I. 14 : Commande par Hystérésis .....	18
Figure I. 15 : Tensions de charge et de décharge aux bornes d'un élément d'un accumulateur Plomb-acide.....	22
Figure I. 16 : Installation photovoltaïque autonome .....	24
Figure I. 17 : Installation photovoltaïque raccordée au réseau.....	25
Figure I. 18 : Installation photovoltaïque avec injection du surplus au réseau .....	25
Figure II. 1: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque .....	28
Figure II. 2 : Modélisation du panneau PV.....	31
Figure II. 3 : Influence de la résistance série sur le PPM .....	32
Figure II. 4 : Influence de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V.....	33
Figure II. 5 : Influence de la température les caractéristiques I-V et P-V .....	34
Figure II. 6: Hacheur Buck-Boost .....	35
Figure II. 7: Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST.....	36
Figure II. 8: Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST.....	36
Figure II. 9: Zones de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST .....	37
Figure II. 10: Algorithme P&O .....	39
Figure II. 11: Variations du rapport cyclique et de la tension aux bornes de la bobine (pour une fréquence de la porteuse égale à $10^4$ Hz).....	40



Figure II. 12: Puissance obtenue avec et sans MPPT pour différentes irradiations .....	41
Figure II. 13: Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation .....	42
Figure II. 14: Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux .....	43
Figure II. 15: Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux simplifiée .....	44
Figure II. 16: Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale .....	45
Figure II. 17: Schéma monophasé équivalent du filtre LC .....	46
Figure II. 18: Allures de courbes de courants à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage .....	47
Figure II. 19: Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	47
Figure II. 20: Analyse spectrale du courant à la sortie du filtre LC .....	48
Figure II. 21: Allure des trois tensions simples avant et après filtrage .....	48
Figure II. 22: Allures de la tension compensée à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre .....	49
Figure II. 23: Allures de la tension simple à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre .....	49
Figure II. 24: Analyse spectrale d'une tension compensée à la sortie de l'onduleur .....	50
Figure II. 25: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre LC .....	50
Figure III. 1 : Système photovoltaïque autonome .....	54
Figure III. 2 : Système photovoltaïque autonome .....	55
Figure III. 3: Structure interne d'un accumulateur électrochimique .....	57
Figure III. 4 : Évolution de la tension de cellule d'une batterie à Plomb .....	58
Figure III. 5 : Modèle simple de la batterie .....	59
Figure III. 6: Modèle complet de la batterie avec charge/décharge .....	59
Figure III. 7: Courbe de décharge d'une batterie Plomb-Acide .....	60
Figure III. 8: Courbe de décharge d'une batterie Plomb-Acide pour un courant de 8A .....	62
Figure III. 9: Courbes de décharge d'une batterie Plomb-Acide pour différentes valeurs du courant ...	62
Figure III. 10: Protection contre les surcharges .....	63
Figure III. 11: Protection contre les décharges .....	63
Figure III. 12: Principe de la régulation du bus continu .....	64
Figure III. 13: Boucle de régulation de la tension du bus continu .....	65
Figure III. 14: Architecture du système SPAV étudié .....	66
Figure III. 15: Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge) .....	67
Figure III. 16: Tension du bus continu .....	67
Figure III. 17: Variation des puissances du panneau, de la batterie et de la charge pour différentes irradiations .....	68
Figure III. 18: Tension du Bus Continu pour différentes irradiations .....	69

Figure IV. 1: Diagramme général d'un système PV connecté au réseau .....	71
Figure IV. 2: Structure générale d'une PLL .....	73
Figure IV. 3: Boucle de Contrôle de la PLL .....	73
Figure IV. 4: Représentation du vecteur V dans le repère dq .....	74
Figure IV. 5: Modèles de la PLL .....	75
Figure IV. 6: Représentation de la connexion Onduleur- Réseau .....	75
Figure IV. 7: Schéma équivalent du réseau électrique dans le repère dq .....	77
Figure IV. 8: Boucle de régulation du courant d'axe direct .....	78
Figure IV. 9: Boucle de régulation réduite du courant .....	79
Figure IV. 10: Boucle de régulation de la tension du bus continu .....	80
Figure IV. 11: Système de contrôle du système connecté au réseau .....	83
Figure IV. 12: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau .....	84
Figure IV. 13: Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau (pour une tension du réseau égale à 45Hz) .....	84
Figure IV. 14: Régulation du courant d'axe direct .....	85
Figure IV. 15: Régulation du courant d'axe en quadrature .....	85
Figure IV. 16: Régulation de la tension du bus continu .....	86
Figure IV. 17: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 1000W. ....	86
Figure IV. 18: Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W. ....	87

## **LISTE DES TABLEAUX :**

Tableau 1: Fiche technique de panneau PV utilisé .....	31
Tableau 2: Récapitulatif du fonctionnement du contrôleur .....	64

Le dernier siècle a connu une consommation irrationnelle en matière d'énergie qui ne cesse de croître dans toutes les régions du monde. Nos besoins énergétiques auront tendance à augmenter encore plus dans les années à venir et donc une reconsidération de nos ressources s'avère incontournable pour envisager un réel développement durable et respectueux de l'environnement.

Les sources d'énergies renouvelables présentent à la fois une solution fiable et infinie. À ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer,... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. L'énergie solaire est vue comme étant la meilleure alternative, et représente l'avenir du monde en matière de ressources énergétiques. En effet, ce que reçoit la terre sous forme d'énergie solaire est l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans.

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie « AIE », une surface de 145.000km<sup>2</sup>, soit 4% de la surface des déserts arides de panneaux photovoltaïques, suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1].

L'Algérie se situe dans l'une des régions les plus ensoleillées du monde, elle bénéficie d'une forte capacité d'exportation de l'énergie électrique solaire. La surface du désert seul est estimée à plus d'un million et demi de km<sup>2</sup> : un potentiel géant en énergie solaire, cette dernière, si elle est bien exploitée, peut facilement couvrir, à elle seule tout le besoin national en terme d'énergie électrique. Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et en parallèle forme un générateur photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant des

étages d'adaptation en entrée assurant la recherche du PPM. En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur.

Ainsi, des hacheurs réalisant la conversion DC-DC ont été utilisés pour maximiser l'énergie pouvant être soutirée des panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT, mais également pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus continu. Un onduleur est nécessaire pour réaliser la conversion DC-AC, commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale.

Dans le début de ce manuscrit, nous ferons une synthèse de l'état de l'art actuel des différents constituants d'une chaîne de production d'énergie photovoltaïque afin de mieux comprendre les bases et avoir une vision globale des avancées technologiques. Nous exposerons alors les divers types des éléments constituant une chaîne PV et les architectures dédiées à cette production.

Dans le second chapitre, les modélisations énergétiques des différents éléments composant le système photovoltaïque seront présentées. La complexité des modèles utilisés doit rester acceptable de façon à ne pas rallonger de manière excessive le temps de résolution du problème et réaliser un bon compromis entre simplicité et performance.

Ces différents modèles énergétiques seront ensuite utilisés afin de modéliser le système complet de production photovoltaïque en mode isolé. Dans cette partie, où l'élément de stockage est un composant vital dans une production répandue pour son aspect intermittent, une modélisation adéquate de la batterie sera présentée. Plus tard les différents résultats de simulations du fonctionnement du système vont être exposés.

Le chapitre VI, quant à lui sera consacré à la connexion au réseau de notre chaîne de production. Une modélisation de la PLL sera présentée afin d'assurer la synchronisation des tensions injectées dans le réseau, ainsi que les différentes régulations de courants et de tension du bus continu assurant le bon fonctionnement du système. Nous exposerons, ensuite, la chaîne entière connectée au réseau ainsi que les divers résultats obtenus.

---

# CHAPITRE I

---

## ETAT DE L'ART

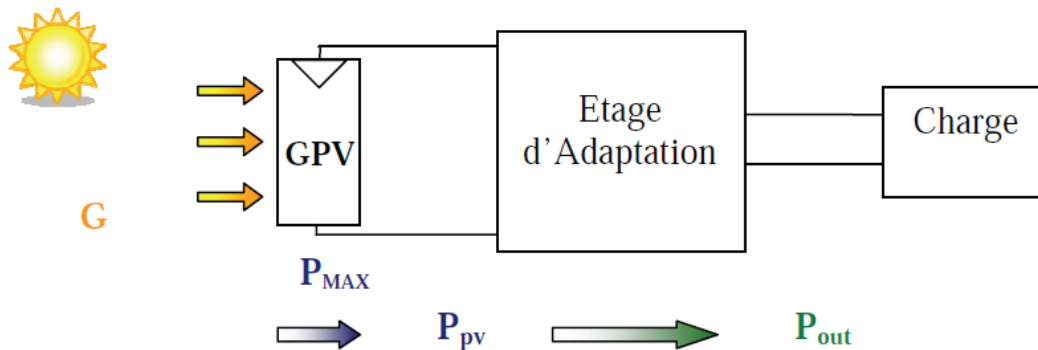
---

*Le monde est à un tournant décisif pour l'avenir de l'énergie. Le changement climatique ainsi que les besoins énergétiques croissants sont des défis qui appellent à une action globale et ambitieuse et le secteur des énergies renouvelables est le seul à pouvoir répondre à ces défis. L'intérêt porté pour l'énergie photovoltaïque est dû à l'importance du gisement solaire qui permettrait de couvrir les besoins énergétiques mondiaux.*

*L'énergie photovoltaïque (PV) est une technologie solaire qui utilise des cellules solaires pour convertir l'énergie du soleil en électricité. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.*

## I.1. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous allons suivre la chaîne représentée sur la figure ci-dessous.



**Figure I. 1 :** Structure générale d'une chaîne de conversion photovoltaïque

Nous aborderons en premier lieu le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que les limites du modèle théorique. Nous décrirons par la suite les différents constituants d'un système d'adaptation trouvés dans la littérature ; afin d'avoir des sorties continues ou alternatives, avec ou sans stockage. Nous finirons par présenter les différents modes de fonctionnement du système : isolé et connecté au réseau.

## I.2. Généralités sur les panneaux photovoltaïques

La transformation de cette énergie en énergie électrique exploitable se fait suivant deux technologies : le solaire thermique et le photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique, et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, la réfrigération, la climatisation, les sources lumineuses, les véhicules électriques, les centrales photovoltaïques, l'utilisation militaire et dans l'espace, etc...

### I.2.1. L'effet photovoltaïque [2]

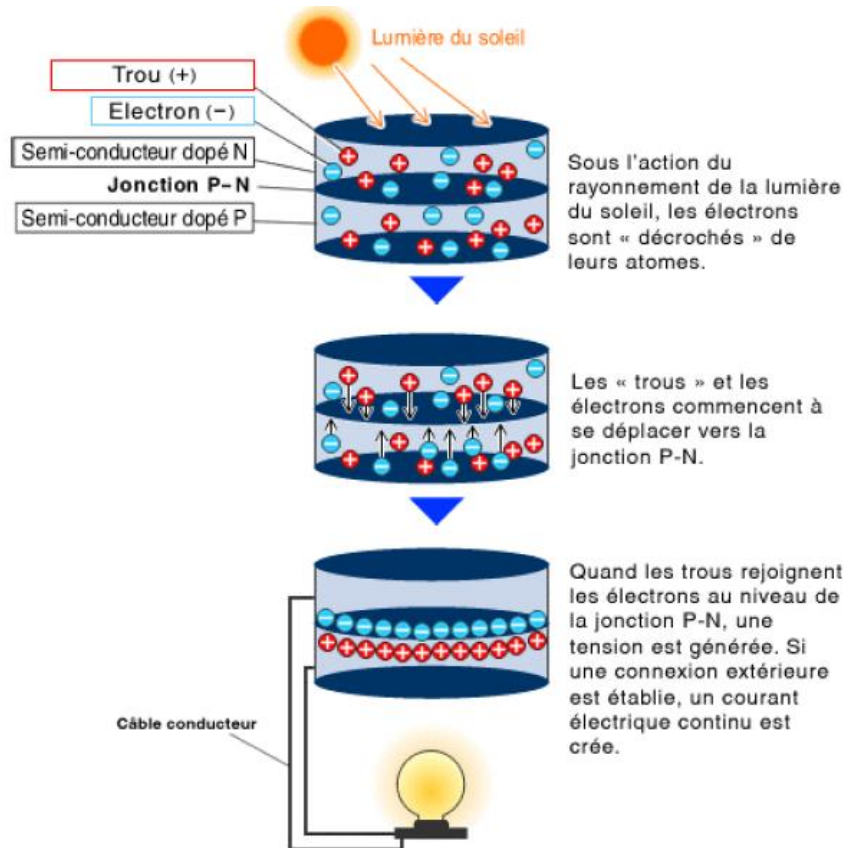
La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est

de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant.

L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique. Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants.

Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule.



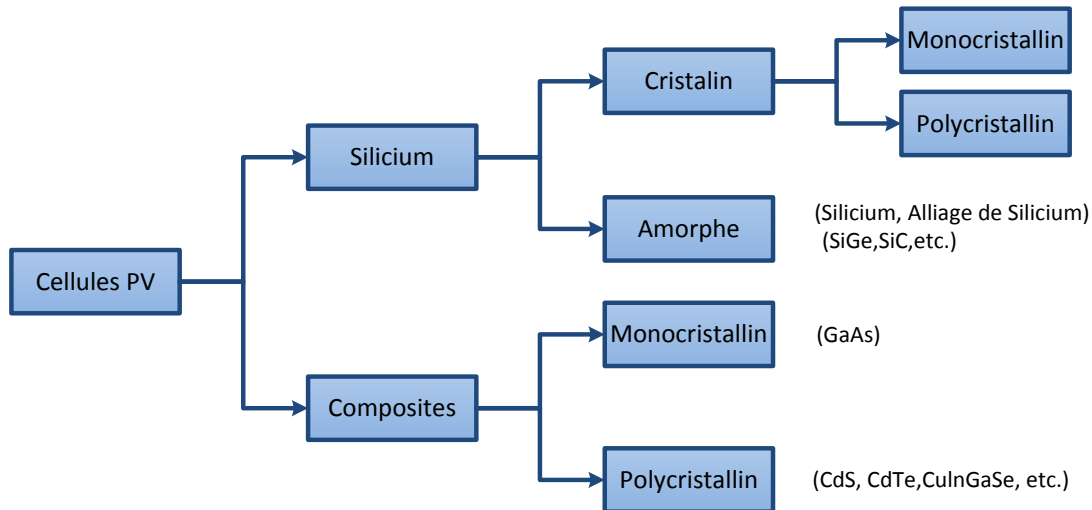
**Figure I. 2 :** Principe de la conversion photovoltaïque.



## I.2.2. Les cellules photovoltaïques

### I.2.2.1. Les différentes technologies des cellules

Les différentes technologies de cellules dépendent des matériaux semi-conducteurs utilisés. Les principaux types sont présentés dans le schéma ci-dessous. Beaucoup sont en phase de recherche et de développement.



**Figure I. 3 :** Les différentes technologies photovoltaïques [48].

#### a. Filière du silicium

Cette filière représente aujourd'hui près de 99% de la production mondiale en termes de matériaux photovoltaïques et comporte [1]:

- Le silicium monocristallin : qui représente environ 29% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typiques (pour les produits commerciaux) autour de 17% pour les cellules et de 14,5% pour les modules.
- Le silicium polycristallin : qui représente environ 62% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 14,5% pour les cellules et de 12,5 pour les modules.
- Le silicium amorphe : Avec une épaisseur plus petite, et un coefficient d'absorption plus grand que les filières présentées ci-dessus, le coût du silicium amorphe est réduit mais avec un rendement (pour les produits commerciaux) de 8% ce qui le limite aux applications de très petites puissances.

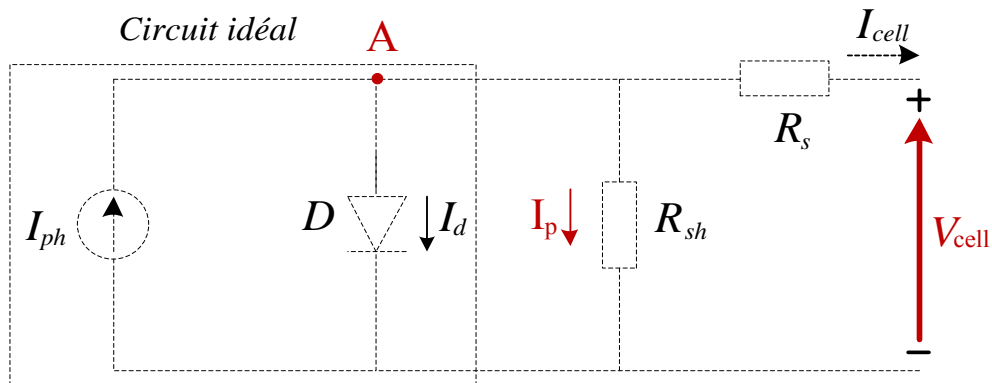
#### b. Filière non silicium (composite)

Cette filière comporte deux catégories distinctes, à savoir les composites monocristallins (GaAs) et polycristallins. Mais deux technologies se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (noté CdTe), et l'autre sur les

alliages  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ , (cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelées filières CIS pour les rendements records qu'elles présentent de 16,5 % pour CdTe et de près de 20 % pour CIS (19,5 %) [1].

### I.2.2.2. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.



**Figure I. 4:** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [3]

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués qui représentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. En effet, ces prototypes tiennent compte de certains phénomènes tels que la recombinaison des électrons et les courants de fuite liés aux diodes. Cependant, le modèle présenté offre un bon compromis entre simplicité et précision.

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$ :

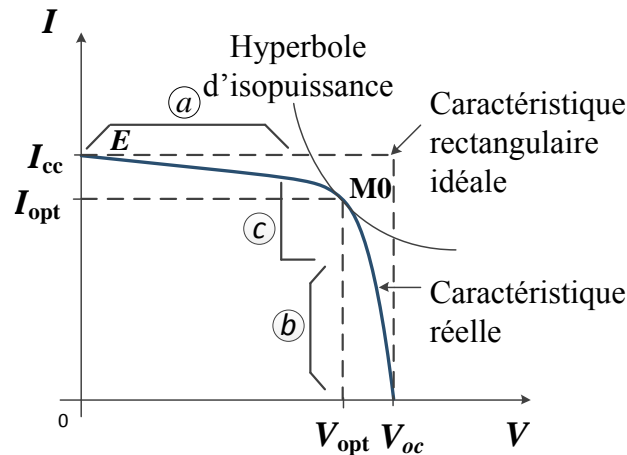
- La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [3].
- La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [3]

### I.2.2.3. Caractéristique Courant-Tension

Technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ . Le courant maximal se produit lorsque les

bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit  $I_{cc}$  et dépend fortement du niveau d'éclairement.



**Figure I. 5 :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle [4]

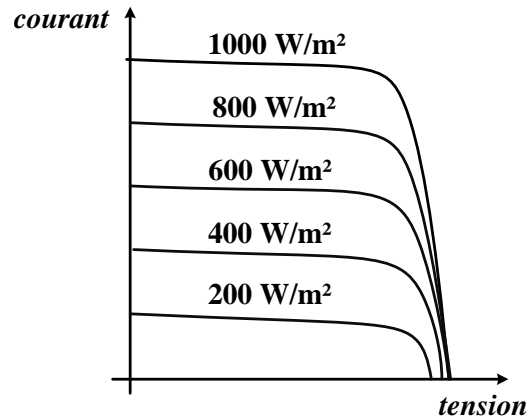
Les générateurs électriques sont généralement classifiés en source de courant et en source de tension. Une cellule PV a un comportement hybride, elle peut fonctionner en source de tension ou en source de courant selon le point de fonctionnement. Ainsi, la caractéristique I-V se divise en trois zones :

- La zone « a » : où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement.
- La zone « b » : où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ .
- La zone « c » : où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

Le point  $M_0$  représente le point de puissance maximale.

#### a. Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I=f(V)$

L'énergie lumineuse permet la séparation des paires électron-trou, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne une augmentation de paires électron-trou séparées. Le courant  $I_{ph}$  produit reste proportionnel à l'ensoleillement avec un courant d'obscurité inchangée et une légère augmentation de la tension en circuit ouvert. Au final, le point de puissance maximum du panneau se décale vers les puissances supérieures [5].

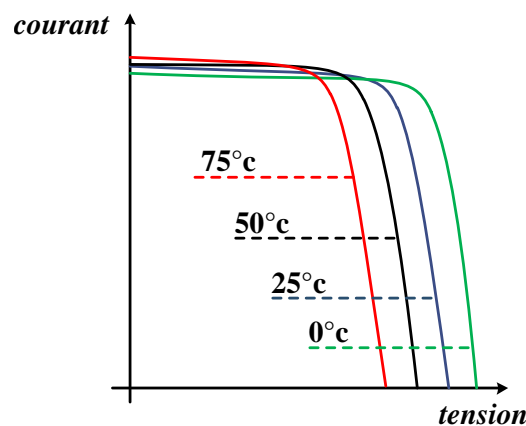


**Figure I. 6 :** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I=f(V)$  [5].

### b. Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

Bien qu'importante dans le comportement des cellules photovoltaïques, la température est souvent négligée, à savoir que sur 100% d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchiée sur la surface du capteur, 10 à 15% en est extraite sous forme d'énergie électrique mais le reste de l'énergie incidente (soit plus de 80%) sera dissipé sous forme de chaleur, d'où l'augmentation de la température de la cellule dégradera ses performances si celle-ci n'est pas correctement ventilée.

Quand la température augmente, la tension en circuit ouvert de la cellule diminue alors que le courant de court-circuit n'augmente que légèrement, ce qui provoquera une baisse de puissance maximale de la cellule [5].

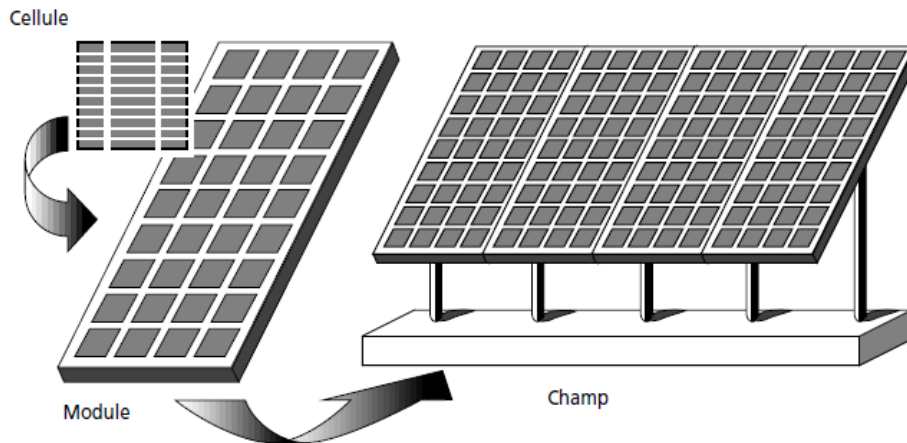


**Figure I. 7 :** Influence de la chaleur sur la caractéristique  $I=f(V)$  [5].

### I.2.3. Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible pour la majorité des applications domestiques ou industrielles. Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes

caractéristiques, puis assemblées en : série, parallèle, et série-parallèle pour constituer le générateur électrique, appelé aussi le module photovoltaïque.



**Figure I. 8 :** composantes d'un champ de modules photovoltaïques [6].

#### a. L'association en série des cellules

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre.

En termes d'équations on aura :

$$\begin{cases} V_{co\ ns} = N_s V_{co} \\ I_{cc} = I_{cc\ ns} \end{cases} \quad (I. 1)$$

Avec :

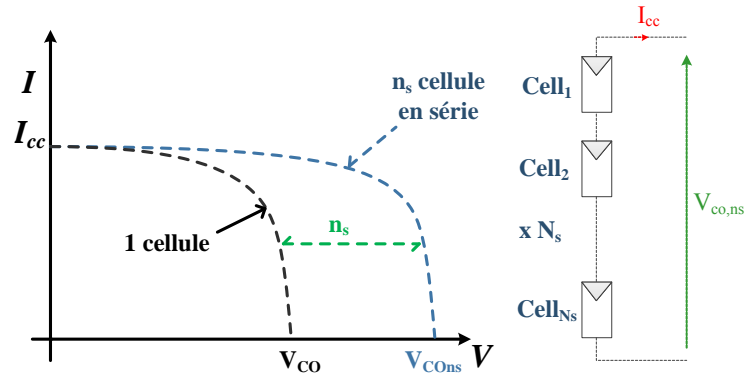
$V_{co\ ns}$ : Tension aux bornes de  $N_s$  cellules en série

$N_s$  : Nombre de cellules en série

$V_{co}$ : Tension aux bornes d'une seule cellule

$I_{cc}$  : Courant traversant une cellule

$I_{cc\ ns}$  : Courant traversant  $N_s$  cellules en série



**Figure I. 9 :** Caractéristique résultante du regroupement de ns cellules en série [7].

La caractéristique I-V représentée par la figure I.9 du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

**b. L'association en parallèle des cellules**

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même.

$$\begin{cases} I_{cc\ np} = N_p I_{cc} \\ V_{oc\ np} = V_{oc} \end{cases} \quad (I.2)$$

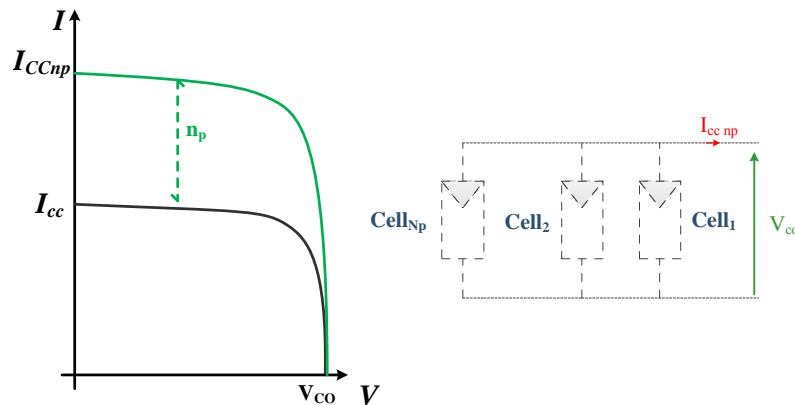
Avec :

$I_{cc\ np}$  Courant traversant  $N_p$  cellules en parallèle

$N_p$  Nombre de cellules en parallèle

$V_{co\ np}$  Tension aux bornes de  $N_p$  cellules en parallèle

La caractéristique suivante représente le groupement parallèle. On voit bien que le courant est proportionnel au nombre de photopiles.

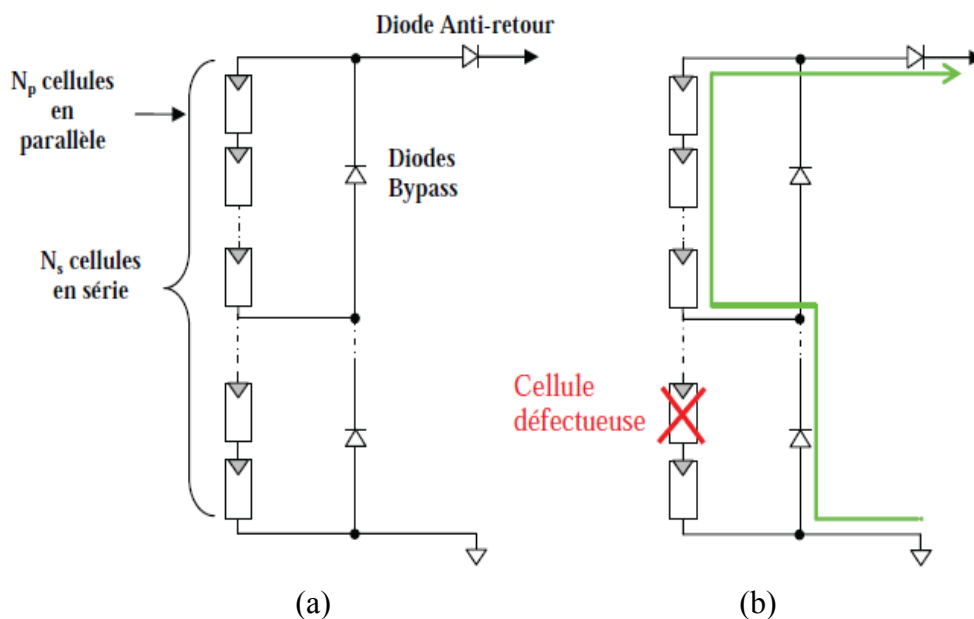


**Figure I. 10 :** Caractéristique résultante du regroupement de  $N_p$  cellules en parallèle [7].

### c. Protection du générateur PV

Une cellule mal éclairée peut être soumise à la tension cumulée par les autres cellules, montées en série, appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte. Ce phénomène est appelé hot spot ou « point chaud ».

Afin d'y remédier, on équipe les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives. Lorsque la diode by-pass est amorcée, elle court-circuite une partie du panneau évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. Cette diode est connectée en parallèle avec plusieurs cellules. Ainsi, la dégradation d'une seule cellule condamne le groupe de cellules associées, ce qui réduit considérablement la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau.



**Figure I. 11 :** (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection  
(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass [7].

Une seconde protection est nécessaire afin de protéger le module photovoltaïque, contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors des différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux, ou bien lorsqu'une charge en connexion directe, peut basculer du mode récepteur au mode générateur : par exemple une batterie durant la nuit. Ainsi une diode anti-retour est mise en série avec chaque branche du générateur photovoltaïque.

### I.3. Étage d'adaptation

L'alimentation de la charge par panneaux photovoltaïques peut se faire par couplage direct, mais cela impliquerait un fonctionnement au fil du soleil, à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Ce couplage implique donc l'acceptation d'une adaptation forcément non parfaite sur toute la plage de fonctionnement.

Il devient nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation afin d'adapter la puissance aux nécessités de l'installation, cet étage peut comprendre des convertisseurs (DC-DC, DC-AC) et/ou un système de stockage.

#### I.3.1. Convertisseurs

##### I.3.1.1. Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Les hacheurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils peuvent être isolés ; et comporter un transformateur assurant l'isolation galvanique, ou non isolés [8].

Les convertisseurs non isolés peuvent être partagés en deux types en fonction de leur comportement et du sens de l'énergie qu'ils transfèrent, on distingue ainsi [8] :

- Les hacheurs non réversibles qui permettent le transfert de l'énergie de la source vers la charge seulement.
- Les hacheurs réversibles où la source peut fonctionner en charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. On distingue trois types de hacheurs réversibles selon le type de conversion :
  - Les hacheurs réversibles en courant
  - Les hacheurs réversibles en tension
  - Les hacheurs réversibles en courant et en tension.

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

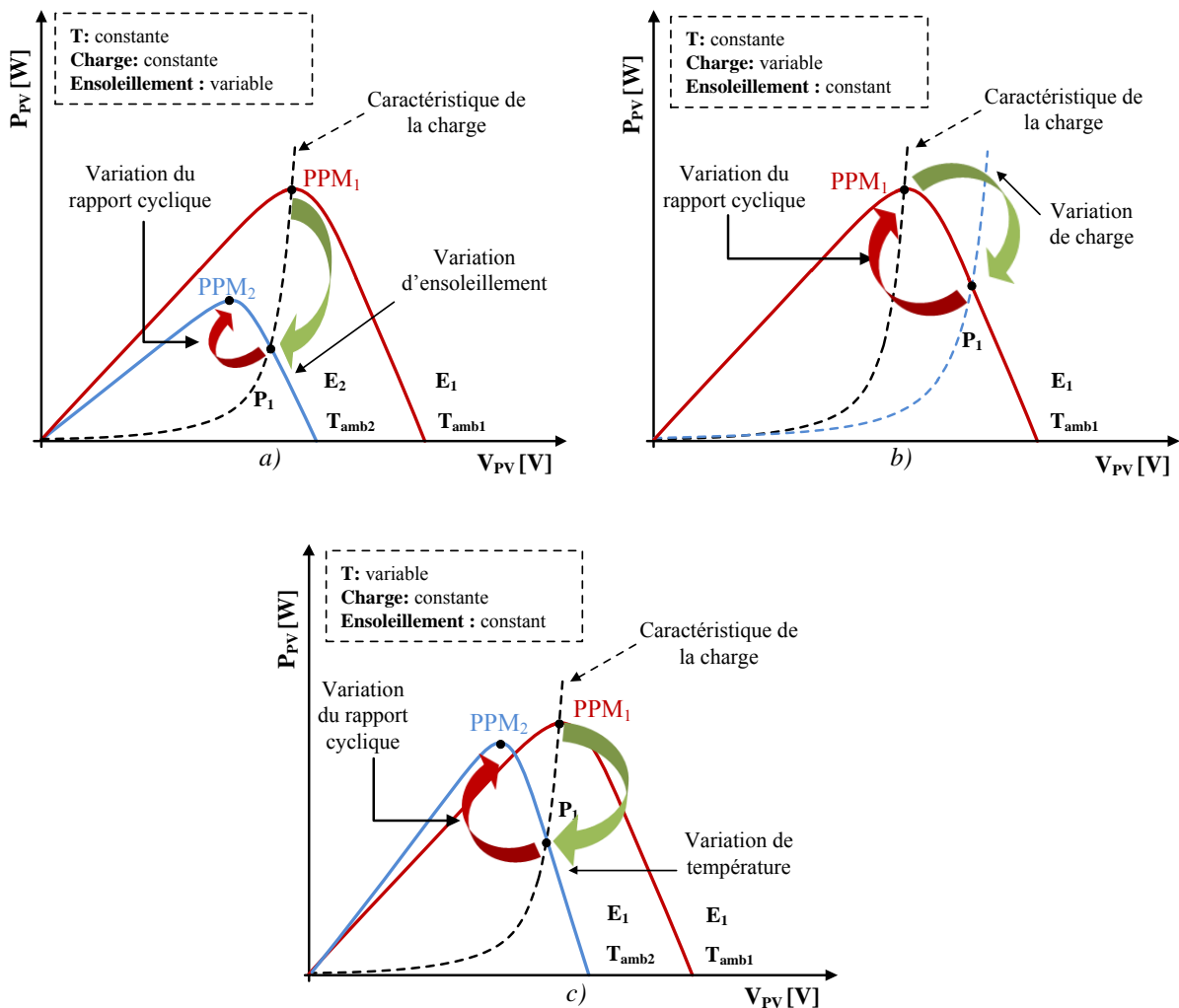
- Les convertisseurs de type BUCK (abaisseurs) dans lesquels  $V_o < V_i$
- Les convertisseurs de type BOOST (élevateurs) dans lesquels  $V_o > V_i$
- Les convertisseurs de type BUCK-BOOST qui peuvent fonctionner en BUCK ou en BOOST en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .



Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un rendement élevé [9].

Le hacheur dans le système PV a pour rôle d'optimiser le transfert d'énergie du générateur PV vers la charge. Ceci se fait via la commande de l'interrupteur en utilisant un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui recherche le point de puissance maximale et fait fonctionner le système en ce point.

Comme le montre la figure I.12, ce point de puissance maximale varie en fonction de la température, de l'irradiation et de la charge.



**Figure I. 12 :** Variation de la puissance maximale en fonction de (a) l'ensoleillement (b) la charge (c) la température [8]

Il existe plusieurs techniques pour la recherche du point de puissance maximale, on peut citer la technique Perturb and Observe (P&O), Incrémental Conductance ou encore la commande par logique floue.

Parmi toutes les méthodes qui existent, Perturb and Observe et Incrémental Conductance sont les plus utilisées, ceci est dû à leur simple implémentation, leur rapidité à trouver le PPM ainsi que certaines autres raisons économiques [10].

Le point de puissance maximale change lorsqu'il y a un changement d'irradiation et/ou de température, l'algorithme P&O considère ce changement comme une perturbation plutôt qu'un changement de conditions de travail et ceci peut conduire à des résultats faux du PPM. Cependant ce problème peut être évité en utilisant la méthode Incrémental Conductance, puisqu'elle consiste à mesurer deux valeurs : le courant et la tension afin de calculer le PPM. Néanmoins, mise à part une grande efficacité de cette méthode, l'algorithme est très complexe en comparaison avec l'algorithme précédent et ceci engendre l'augmentation du coût de l'implémentation. Nous devons donc réaliser un bon compromis entre complexité et performances.

### **I.3.1.2. Convertisseur DC-AC (Onduleur)**

Actuellement l'utilisation des onduleurs, qui prennent de plus en plus du terrain dans les domaines d'applications les plus variés, devient incontournable. Le développement des semi-conducteurs entièrement commandables, rapides, et robustes d'une part, et le perfectionnement des techniques de commande d'autre part ont eu un énorme rôle dans l'évolution de ces convertisseurs. Ces progrès ont permis d'intégrer les onduleurs dans des applications particulièrement intéressantes.

#### **a. Choix du composant de puissance**

Le choix du composant se base sur les caractéristiques d'épaisseur et de résistivité de la région constituant « la base » du composant d'électronique de puissance qui sont intrinsèquement liées à sa tenue en tension, le calibre en courant et les performances dynamiques.

Le choix des composants impose un compromis entre la tension, le courant et la fréquence de commutation, et fait intervenir plusieurs éléments de comparaison [11]:

- L'unité fonctionnelle du convertisseur d'énergie : les performances du couple (interrupteur + cellule de commutation).

- La complexité de commande des composants : Un autre aspect déterminant dans le choix et sensible par rapport à l'utilisation. On reconnaît la facilité d'emploi généralement, au transistor MOS et à l'IGBT. Contrairement au transistor bipolaire et le GTO qui sont connus pour leur difficulté d'usage et très délicate manipulation.

On effectue également le choix en fonction du domaine de puissances, on utilise de préférence :

- Le transistor à effet de champ ou l'IGBT pour les faibles puissances.
- Le transistor bipolaire ou l'IGBT pour les courants moyens.
- Le thyristor GTO pour les forts courants.

Le thyristor classique avec circuit auxiliaire d'extinction n'est plus utilisé dans les équipements récents. [11]

### **b. Les types d'onduleurs**

On distingue deux principaux types d'onduleurs selon la nature de la source d'alimentation [14]

- **Les onduleurs de courant** : Alimentés par une source de courant, peu affectés par les variations de tension.
- **Les onduleurs de tension** : Alimentés par une source de tension continue peu affectée par les variations de courant. Composés de bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Chaque interrupteur comporte un transistor (GTO ou IGBT) et une diode en antiparallèle. Les onduleurs de tension peuvent être à plusieurs niveaux selon les besoins d'utilisation.

Ils peuvent aussi être classés en [12] :

- Onduleurs de tension monophasés : Utilisés généralement pour l'alimentation de charges monophasées de faible puissance, ils peuvent être en pont ou en demi-pont.
- Onduleurs de tension triphasés : Offrant une source de tension triphasée avec une amplitude, phase et fréquence contrôlables et une forme approchant la sinusoïde. Ces onduleurs sont employés dans la moyenne et forte puissance.

Le domaine d'application des onduleurs de tension peut être caractérisé par la variation de la fréquence. On distingue deux grandes familles [13] :

- Le domaine des fréquences fixes : Où l'onduleur de tension est destiné à pallier les défaillances, ou même l'absence d'un réseau alternatif en recréant la tension

correspondante à partir d'une source de tension continue. Cette application requiert généralement la fourniture d'une tension de sortie très pure, donc sans harmonique de découpage, d'où la nécessité d'un filtre de sortie.

- Le domaine des fréquences variables : Dans ce cas, l'onduleur est généralement alimenté par un réseau alternatif à travers un redresseur et un filtre d'entrée. L'application la plus connue est celle de la variation de vitesses des machines à courant alternatif.

### c. Stratégie de commande

L'allure de la tension dépend uniquement de la commande utilisée et non pas de la charge, contrairement à l'allure du courant.

Pour un onduleur, lorsqu'on a une charge résistive pure, les diodes sont inutiles. Elles trouvent leurs fonctions seulement dans le cas d'une charge inductive, car elles permettent d'éviter la discontinuité dans la conduction du courant et prennent donc le relais des transistors quand ils sont commandés à la fermeture.

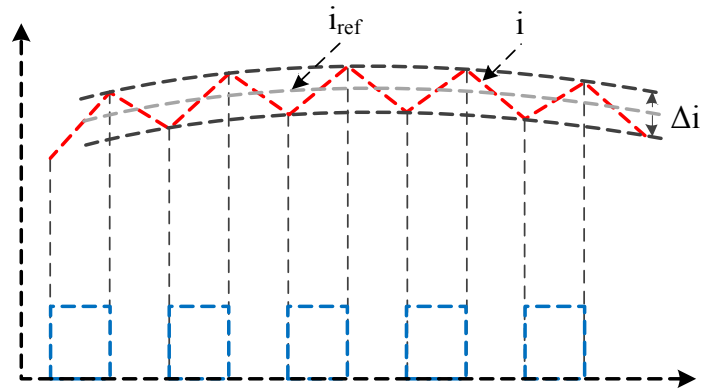
- Commande Pleine Onde [14]:

La commande pleine onde permet à l'onduleur de fournir la tension la plus élevée à la machine. Elle correspond au point de fonctionnement nominal ( $V_{sn}, f_{sn}$ ), seulement le fonctionnement en pleine onde présente plusieurs inconvénients à cause de la présence des harmoniques impairs.

Ces inconvénients sont les suivants :

- Des pointes de courants entraînant un surdimensionnement des semi-conducteurs ce qui impose un apport en matière de refroidissement.
- Présence des oscillations aux BF perturbant le fonctionnement des machines électriques.
- Elle comporte un taux d'harmoniques élevé, surtout les harmoniques de rang supérieur. Le filtrage de ces harmoniques impose des filtres plutôt surdimensionnés et donc des pertes Joule et des pertes Fer ( $P_j, P_{fer}$ ) élevées ce qui rend cette commande très couteuse et peu efficace.
- Commande par Hystérésis [15] :

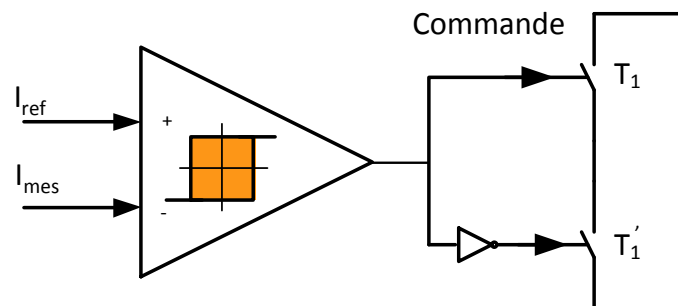
Le principe de contrôle de courant par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence, et chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation comme illustré dans la figure I.13.



**Figure I. 13 :** Commande des interrupteurs par Hystérésis [15]

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

Pratiquement, 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 de chaque bras de l'onduleur comme l'illustre la figure I.14.



**Figure I. 14 :** Commande par Hystérésis [15]

Le seul paramètre de régulation de 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 [15].

- Commande MLI [15][16]:

Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure aux fréquences de grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables.

Les ondes de tensions servent principalement à alimenter à fréquence fixe ou variable, des charges à tension alternative.

La modulation de largeur d'impulsions ou la MLI permet de faciliter le filtrage et cela en repoussant les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences élevées.

On utilise souvent une électronique de commande analogique ou numérique dans le but de déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs pour avoir une tension qui ressemble le plus à une sinusoïde. La commande MLI assure cette fonction.

#### d. Classification des commandes MLI

En se basant sur le mode d'obtention des angles de commutation, on peut distinguer les MLI calculées et engendrées. Pour cette dernière, le choix de la forme de la porteuse et de la modulante se porte souvent sur la Triangulo-sinusoïdale pour des raisons de forme d'onde [13].

##### - La MLI Précalculée :

Elle consiste à calculer les instants de commutation, de telle sorte à éliminer des harmoniques bien définis préalablement, notamment les harmoniques de rang 5 et 7, qui s'avèrent être les plus gênants et créent des couples pulsatoires au niveau des machines électriques.

##### - MLI Engendrée (cas de la Triangulo-sinusoïdale) :

C'est la solution la plus utilisée et la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (basse fréquence), généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse (HF) généralement triangulaire d'où l'appellation.

Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. Pour obtenir un courant quasi sinusoïdal. La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tensions négatives et positives. Cette fragmentation permet, si elle est habilement calculée, d'éliminer les harmoniques gênants, qui sont proches du fondamental en les repoussant vers les hautes fréquences.

Si la modulante est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

- a- L'indice de modulation « m » : Il est égal au rapport de la fréquence de la porteuse et celle de la modulante

$$m = \frac{f'(\text{porteuse})}{f(\text{modulante})}$$

- b- Le coefficient de réglage « r » : Il est égal au rapport de l'amplitude de la modulante et celle de la porteuse.

$$r = \frac{\text{Amp(modulante)}}{\text{Amp(porteuse)}}$$

Remarque : on dit qu'on utilise une modulation synchrone quand la fréquence  $f'$  de la porteuse est un multiple entier de la fréquence  $f$  de la modulante. On a donc une tension  $U$  périodique de période  $T = 1/f$ .

En modulation synchrone, si  $m$  est impair, l'alternance négative de  $U_c$  reproduit au signe près son alternance positive. Et le développement en série de Fourier de  $U_c$  ne comporte que des harmoniques impairs. Au contraire, si  $m$  est pair, la décomposition en série de Fourier de  $U_c$  contient en plus des harmoniques pairs et impairs une composante continue.

- La MLI Vectorielle :

La MLI dite Space Vector (vecteur spatial) est surtout applicable aux variateurs de vitesse triphasés sans neutre. Elle consiste à considérer globalement le système triphasé, et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan  $(V_\alpha, V_\beta)$ . Le système triphasé de tensions à générer pour la durée d'échantillonnage en cours peut alors être représenté comme un unique vecteur dans ce plan (voir aussi commande vectorielle). Ce vecteur n'est pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone), et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en moyenne le vecteur recherché. En modulation sinusoïdale, elle donne des résultats similaires à la MLI à porteuse triangulaire centrée. Néanmoins, elle peut être plus facile à implanter dans un microcontrôleur, et, disjointe d'harmonique 3, elle permet de maximiser la puissance disponible, ce qui justifie son usage [12].

### **I.3.2. Stockage**

Un des plus grands challenges des systèmes photovoltaïques aujourd'hui est d'assurer une alimentation permanente afin de répondre à la demande dynamique en matière d'électricité. Les périodes de production et les périodes de consommation d'énergie sont très fréquemment décalées, et c'est peu probable qu'il existe une parfaite adéquation entre les deux. Dans ce cas un minimum de stockage s'avère indispensable.

### a. Types de stockage

Il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau d'hydrogène, super-condensateur, les accumulateurs à volants d'inertie, les systèmes à air comprimé en bouteilles, batteries électrochimiques (lithium, plomb), etc...

Le stockage électrochimique est le moyen le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques car ces accumulateurs présentent une caractéristique naturellement bien adaptée au couplage direct, en raison de la relative constance de leur tension. De plus ils offrent le meilleur rapport coût/performance, une grande fiabilité et une bonne sécurité. On citera les accumulateurs chimiques les plus utilisés dans l'industrie, à savoir [17] :

- Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd) :

Grâce à leur très bonne efficacité de charge à faible courant, leur tenue aux basses températures, et leur capacité de stockage inférieure à 2Ah, ils sont souvent jugés très intéressants pour le solaire. Mais le caractère toxique du cadmium les freine sur le marché.

- Les accumulateurs Plomb-Acide:

Ces accumulateurs ont une résistance interne très faible et une cyclabilité qui peut atteindre les 800 cycles. Malgré leurs faibles performances à basses températures, l'accumulateur au plomb reste un des moyens de stockage les plus répandus en milieu industriels

- Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH) :

Développés afin de favoriser les charges rapides et d'augmenter la capacité, ces accumulateurs s'avèrent plus compactes que les accumulateurs précédents. .

- Les accumulateurs Lithium Ion :

Avec un métal plus léger comme le lithium, ces batteries offrent une autonomie plus grande pour des boîtiers moins lourds et donc des charges électriques plus importantes que les batteries au Nickel Cadmium.

- Les accumulateurs Lithium Ion Polymère:

Dérivées des accumulateurs Lithium-Ion, et ayant des performances presque similaires ; à la différence de l'électrolyte utilisée, qui est dans ce cas un polymère gélifié qui permet de donner toutes les formes possibles à la batterie.

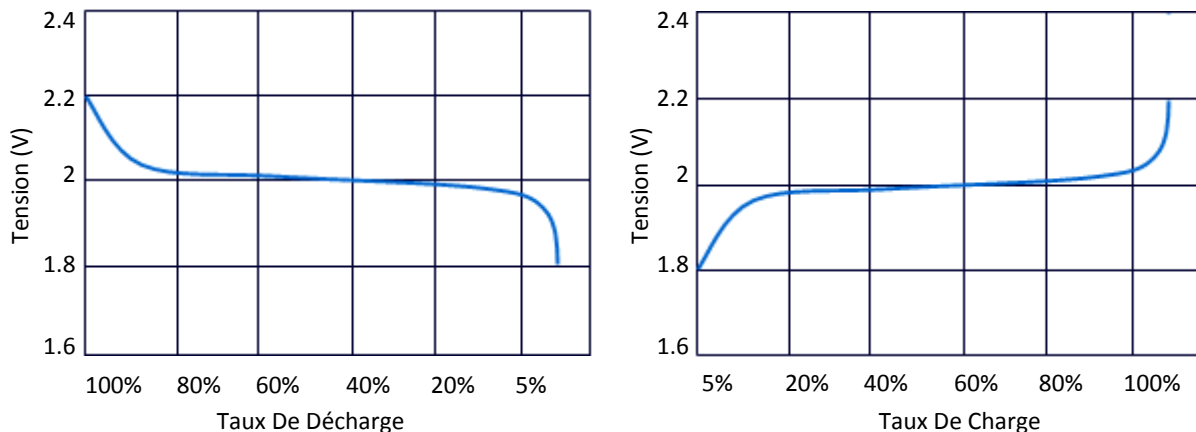


### b. Détermination de la technologie à choisir

En pratique l'énergie de fonctionnement est tirée de la batterie dès l'instant où le courant d'utilisation est supérieur au courant issu du panneau solaire.

Le choix de la technologie à adopter se fait selon les caractéristiques suivantes [18][49]:

- $W_{stoc}$ : la capacité énergétique en Wh : Elle est définie sur la base d'une énergie totale stockée supérieure à l'énergie utile. L'énergie réellement exploitable est donc inférieure à l'énergie stockée est cela est dû au fait que les accumulateurs ne peuvent pas être complètement déchargés.
- $\eta$ : le Rendement : c'est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie utile. Il doit être évalué en prenant en considération les pertes à vide (d'autodécharge), et la résistance interne.
- $N_{cycl}$ : Bonne Aptitude au Cyclage (Cyclabilité) : Elle représente le nombre de cycles de charges et de décharges. Elle est liée à l'amplitude des cycles et à l'état de charge moyen et elle représente la durée de vie de la batterie.
- Tension aux bornes : Elle est fonction de la charge ou de la décharge de l'élément et dépend de la technologie adoptée par le constructeur. Lors d'une décharge, la tension aux bornes de l'élément est fonction du courant et de la profondeur de décharge autorisée.



**Figure I. 15** : Tensions de charge et de décharge aux bornes d'un élément d'un accumulateur Plomb-acide [18]

- Le taux de décharge : Par définition, c'est le rapport de la capacité d'une batterie et du temps de décharge.

$$\text{Taux de décharge} = \frac{\text{capacité estimée}}{\text{temps de décharge}}$$

- Taux de charge: Comme le taux de décharge, il exprime le rapport du courant absorbé par la durée de temps nécessaire de charger pleinement l'élément de la batterie.

$$\text{Taux de charge} = \frac{\text{capacité estimée}}{\text{temps de charge}}$$

- Profondeur de décharge : Elle s'exprime en pourcents de la capacité de la batterie, et par définition : c'est le nombre d'Ah extraits d'un accumulateur pleinement chargé.
- Autodécharge : C'est une grandeur qui prend en considération le phénomène des réactions chimiques et électrochimiques qui au sein de l'accumulateur engendrent une faible consommation énergétique prélevée sur l'énergie disponible.
- Les coûts d'investissements et de fonctionnement : Généralement évalués en DA/kWh et répartis entre l'énergie stockée exploitable  $W_{\text{stoc}}$  et la puissance maximale, ils comprennent le cout de l'investissement, de la maintenance, de l'énergie perdue lors des cycles et du vieillissement.

Dans le domaine du stockage, les batteries plomb-acide sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de performances/coût/entretien. Nous présenterons une étude sur leur fonctionnement ainsi que les précautions à prendre lors de leurs utilisations dans le chapitre III.

#### **c. Montage série et parallèle des batteries**

On peut connecter en série ou en parallèle des batteries solaires exactement identiques et de même « âge ». Pour la mise en parallèle, il faut veiller à l'équilibrage des courants par un câblage symétrique. Pour chaque chaîne de batteries, il faut installer un fusible en série dans le câblage. Il est toujours avantageux de surdimensionner une batterie au départ, la mise en parallèle de batteries d'âges différents étant fortement déconseillée, la batterie la plus âgée faisant vieillir prématurément la nouvelle.

Il est également meilleur d'utiliser une grande batterie plutôt que deux petites totalisant la même capacité. Il faut toujours prévoir une bonne ventilation des batteries pour éviter l'accumulation de gaz explosifs.

#### **d. Régulateur de charge [17][19]**

Il protège les batteries des surcharges et décharges excessives et prolonge leur durée de vie. Il évite qu'en fin de charge d'une batterie ne se produise un phénomène de surcharge qui amènerait à une ébullition provoquant une perte d'électrolyte et que la charge ne dépasse un seuil limite (Généralement 80% de la capacité de la batterie), ce qui l'endommagerait.

Les régulateurs sont réglés à des tensions de coupures qui correspondent aux limites à ne pas dépasser. On distingue alors deux parties :

- Une partie régulation de charge : Dès que la batterie est complètement chargée, le régulateur la déconnecte du panneau PV pour éviter la consommation d'électrolyte et le dégagement d'hydrogène et l'oxydation des tablettes.
- Une partie régulation de la décharge : Dans le cas où les accumulateurs sont totalement déchargés par absence d'énergie solaire, le régulateur coupe l'utilisation car il y a risque que les tablettes négatives se recouvrent de sulfate de plomb.

#### I.4. Types d'installations

Il existe deux types de mise en œuvre d'une installation photovoltaïque selon qu'elle fonctionne de manière autonome ou qu'elle soit raccordée à un réseau public de distribution d'électricité.

##### I.4.1. Installations autonomes

Produisent de l'électricité pour un bâtiment ou un autre consommateur qui n'est pas relié au réseau. La plupart de ces installations alimentent des sites éloignés de tout réseau public. Elles comprennent des étages d'adaptation afin d'adapter la puissance aux besoins du consommateur. Ces étages d'adaptations sont constitués d'éléments vus précédemment :

- Hacheur : permet d'optimiser la production
- Onduleur : permet de passer du continu vers l'alternatif
- Batteries : pour subvenir aux besoins du consommateur à cause des problèmes d'intermittence de l'énergie PV.

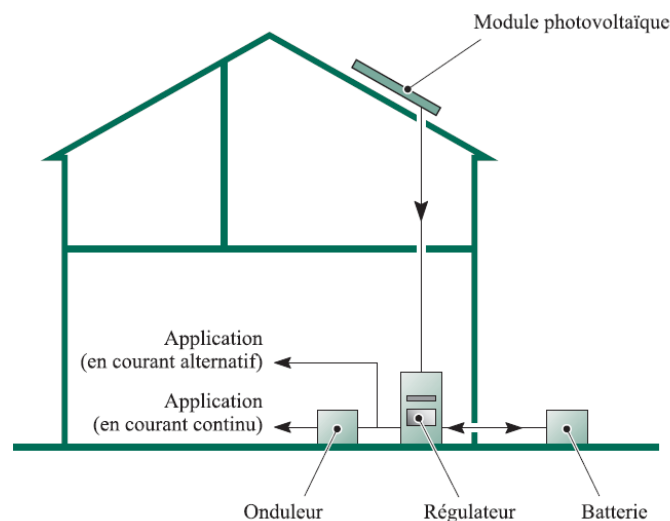
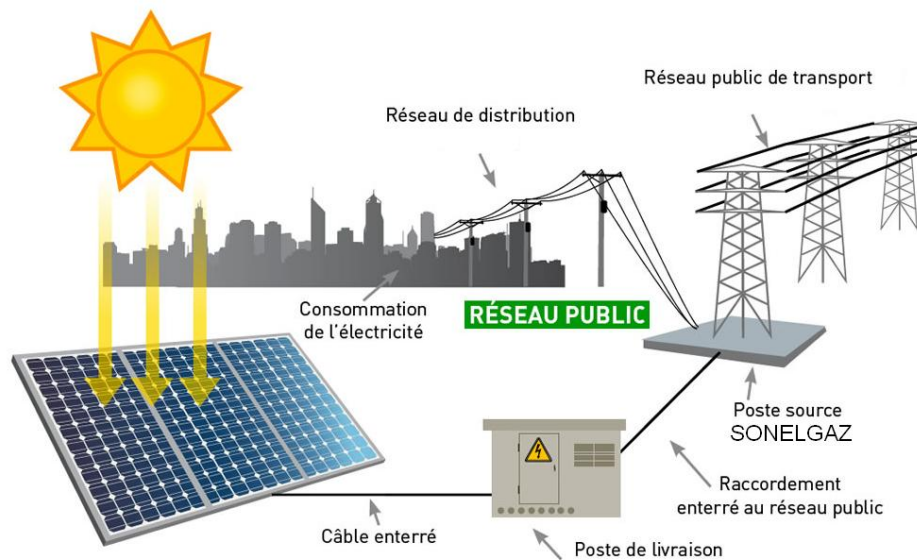


Figure I. 16 : Installation photovoltaïque autonome [8]

### I.4.2. Installations raccordées au réseau

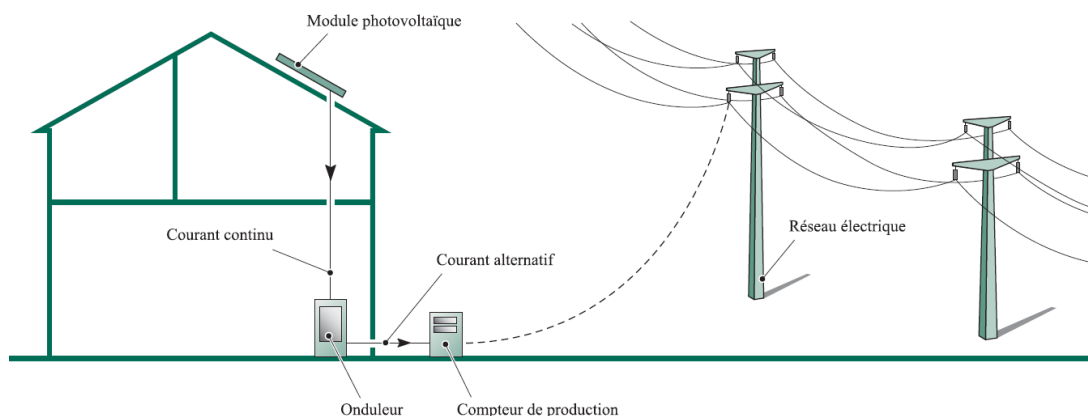
Ce raccordement ne peut se faire qu'après transformation du courant pour qu'il soit adapté aux caractéristiques du réseau. Ces installations produisent de l'électricité qui peut être vendue en totalité ou en partie. Ainsi, on distingue deux modes :

- Injection de la totalité de la production au réseau : l'énergie produite par les panneaux est directement injectée dans le réseau électrique. Les périodes d'injection correspondent aux périodes de production photovoltaïque.



**Figure I. 17 :** Installation photovoltaïque raccordée au réseau [50]

- Injection du surplus de production au réseau : l'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté dans le réseau.



**Figure I. 18 :** Installation photovoltaïque avec injection du surplus au réseau [50]

## **I.5. Conclusion**

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des technologies photovoltaïques. Le contexte nous a permis de présenter le principe de la conversion photovoltaïque, la modélisation d'une cellule photovoltaïque, les propriétés du générateur photovoltaïque, le rendement de conversion des cellules photovoltaïque, les limitations et les comportements en température et en fonction de divers éclairagements.

Nous avons, également décrit les différentes associations possibles de cellules photovoltaïques permettant de créer des modules de puissance exploitables pour des applications domestiques. Par la suite nous avons montré l'utilité d'insérer un étage d'adaptation avec une fonction MPPT entre le GPV et la charge afin d'optimiser en permanence la puissance produite. Nous avons rappelé les divers constituants d'un étage d'adaptation, à savoir les convertisseurs DC/DC, les convertisseurs DC/AC et le système de stockage ainsi que les technologies associées existantes dans la littérature.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons abordé les différentes architectures d'installations photovoltaïques qui existent, à savoir ; autonomes et connectées au réseau de distribution.

---

## CHAPITRE II

---

# Modélisation de la Chaîne Photovoltaïque

---

*Une chaîne photovoltaïque est constituée d'un ensemble d'éléments assurant son bon fonctionnement ainsi qu'une extraction de l'énergie électrique sous forme exploitable par la charge et répondant aux normes.*

*La modélisation de cette chaîne, sous-entend la modélisation de chacun de ses constituants et donc une modélisation adéquate doit leur être attribuée afin de pouvoir simuler le fonctionnement du système entier. Le choix du modèle s'avère souvent difficile à effectuer car il doit répondre à certaines exigences techniques sans pour autant ralentir le travail. Un choix optimal est un choix qui assure à la fois la performance et la simplicité du modèle. C'est ce qu'on essayera de faire dans ce qui suit.*

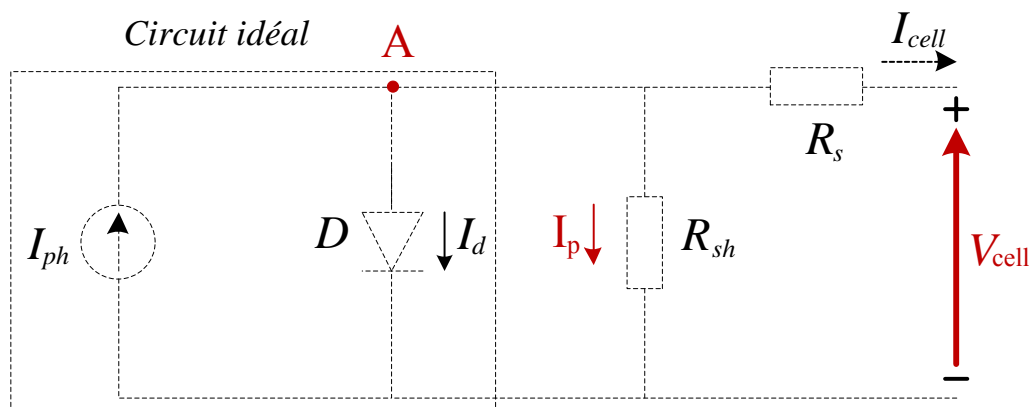
## II.1. Introduction

Pour étudier le comportement dynamique d'un système complet, une modélisation de chaque élément est indispensable. Dans ce chapitre nous allons modéliser chaque constituant de la chaîne de production photovoltaïque générale, et qui feront partie des deux architectures que nous développerons dans les chapitres suivants. Nous présenterons d'abord, un modèle mathématique du panneau photovoltaïque et de l'algorithme MPPT, ensuite nous ferons appel à la Toolbox : SimPowerSystems, utilisée pour la simulation des systèmes de l'électronique de puissance. Cette boîte à outils, qui est exploitée afin de pouvoir respecter le plus de phénomènes possibles lors du fonctionnement du système. Nous parlerons, après de la commande MLI associée à l'onduleur de tension et son principe de fonctionnement. Nous terminerons par exposer les différents résultats de simulation que nous tâcherons d'interpréter.

## II.2. Modélisation du panneau PV

Les paramètres du circuit équivalent d'un module PV sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique I-V.

Dans notre étude, on utilisera le modèle illustré par la figure II.1. Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [20].



**Figure II. 1:** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [3]

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le courant de saturation ( $I_0$ ), le facteur d'idéalité de la jonction ( $A$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance shunt ( $R_{sh}$ ).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt  $R_{sh}$ , en la considérant infinie, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres.

Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision.

### II.2.1. Modélisation

Pour pouvoir élaborer le modèle du panneau PV, on utilise des équations de base tirées de la théorie des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [21]:

#### a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (II. 1)$$

Avec :

$I_{cc}$ [A]	Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur)
$K_i$ [A/K]	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau
$T$ [K]	Température ambiante
$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	Irradiation sur la surface de la cellule
$T_{ref}$ [K]	Température de référence (298 K)
$G_{ref}$ [W/m <sup>2</sup> ]	Irradiation de référence (1000 W/m <sup>2</sup> )

#### b. Le courant de saturation $I_0$

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{AK} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (II. 2)$$

Avec :

$E_g$ [eV]	Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium polycristallin à 25°C)
------------	---



### c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation:

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s AKT}\right) - 1} \quad (II.3)$$

Où :

$V_{oc}$ [V]	Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)
$q$ [C]	Charge de l'électron ( $1.602 \cdot 10^{-19}$ C)
$N_s$	Nombre de cellules connectées en série
$A$	Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ )
$K$ [J/K]	Constante de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K)

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

### d. Le courant du panneau

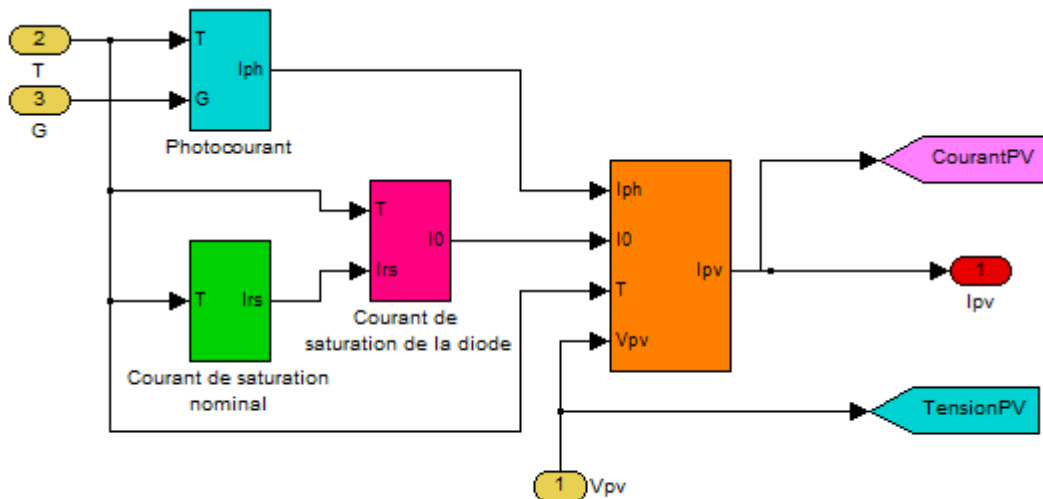
Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT}\right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Où :

$N_s$	Nombre de cellules connectées en série dans un module.
$N_p$	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

On peut faire la simulation du panneau PV en utilisant l'équation II.4 (figure), pour une température et une irradiation données à l'entrée on retrouve la tension et le courant à la sortie du panneau



**Figure II. 2 :** Modélisation du panneau PV

Le panneau utilisé pour la modélisation est le KC2000GT, ses paramètres dans les conditions standards (25°C, 1000 W/m<sup>2</sup>) sont donnés par le constructeur :

**Tableau 1:** Fiche technique de panneau PV utilisé [22]

$I_{mp}$	7.61 A
$V_{mp}$	26.3 V
$P_{max}$	200.143W
$I_{sc}$	8.21 A
$V_{oc}$	32.9 V
$K_V$	- 0.1230 V/K
$K_I$	0.0032 A/K
$N_s$	54
$N_p$	1

Certaines informations nécessaires à la modélisation ne figurent pas sur cette fiche technique, il faut donc les tirer par les méthodes suivantes :

- Les résistances série ( $R_s$ ) et shunt ( $R_{sh}$ ) [22]

Plusieurs formules mathématiques ont été proposées afin de déterminer ces deux paramètres, néanmoins, toute expression de  $R_s$  et  $R_{sh}$  sera toujours basée sur des données expérimentales. L'une des méthodes consiste à incrémenter la valeur de  $R_s$  dans un processus itératif en démarrant de la valeur  $R_s = 0$  jusqu'à ce que la courbe I-V théorique corresponde aux données expérimentales fournies par le constructeur et ensuite faire de même pour  $R_{sh}$ . Seulement, cette méthode est loin d'être précise, puisque les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  doivent être ajustées en même temps pour avoir un bon modèle I-V.

La référence [22] propose une méthode pour ajuster  $R_s$  et  $R_{sh}$  basée sur le fait qu'il n'existe qu'une seule paire  $\{R_s, R_{sh}\}$  pouvant garantir  $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} I_{mp}$ ,

Avec :

- $P_{\max,m}$  représente le point de puissance maximale de la caractéristique I-V du modèle II.4 et est représenté par  $(V_{mp}, I_{mp})$  ;
- $P_{\max,e}$  représente le point de puissance maximale donné par le constructeur

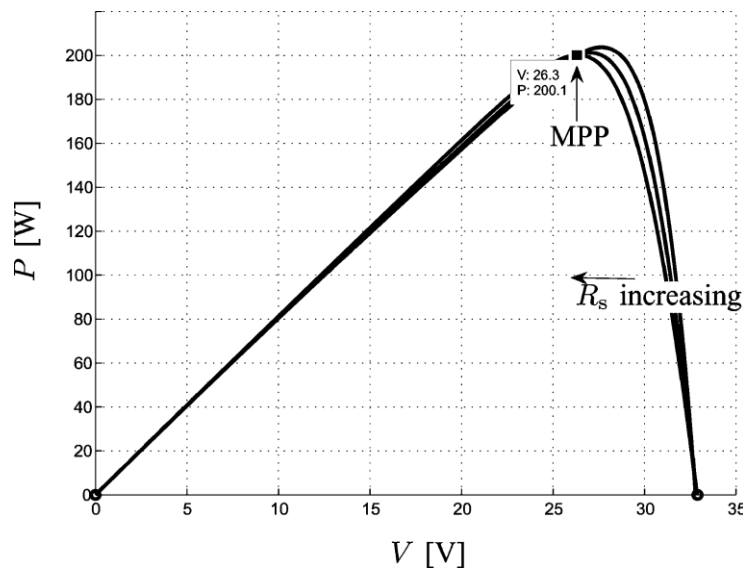
Certaines méthodes rencontrées dans la littérature, ne tiennent compte que de la caractéristique I-V alors que la courbe P-V doit également correspondre aux données du constructeur. D'autres méthodes tiennent compte de la courbe P-V mais avec des modèles différents ou simplifiés en négligeant l'une des résistances par exemple.

La relation entre  $R_s$  et  $R_{sh}$ , les seules inconnues de l'équation II.4, peut être obtenue en posant l'égalité  $P_{\max,m} = P_{\max,e}$  et résoudre par la suite l'équation pour tirer  $R_{sh}$  :

$$P_{\max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{AN_s} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} \right\} = P_{\max,e} \quad (II.6)$$

$$R_{sh} = V_{mp} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{\left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{AN_s} \right) \right] + V_{mp} I_0 - P_{\max,e} \right\}} \quad (II.7)$$

Cette dernière équation montre que pour n'importe quelle valeur de  $R_s$  on aura une valeur de  $R_{sh}$  de manière à ce que la courbe I-V tirée du modèle mathématique coupe le point de puissance maximale donné par le constructeur. Il faut donc faire coïncider le PPM mathématique avec le PPM expérimental et ceci nécessite plusieurs itérations.



**Figure II. 3 :** Influence de la résistance série sur le PPM [22]

Dans ce processus d'itération,  $R_s$  doit être incrémentée légèrement en démarrant de  $R_s=0$ . On doit ainsi tirer la courbe P-V pour différentes valeurs de  $R_s$  et  $R_{sh}$  afin de l'ajuster

pour coïncider avec le PPM expérimental. Lorsque  $R_s$  augmente, la courbe P-V se translate vers la gauche et le PPM théorique se rapproche du PPM expérimental.

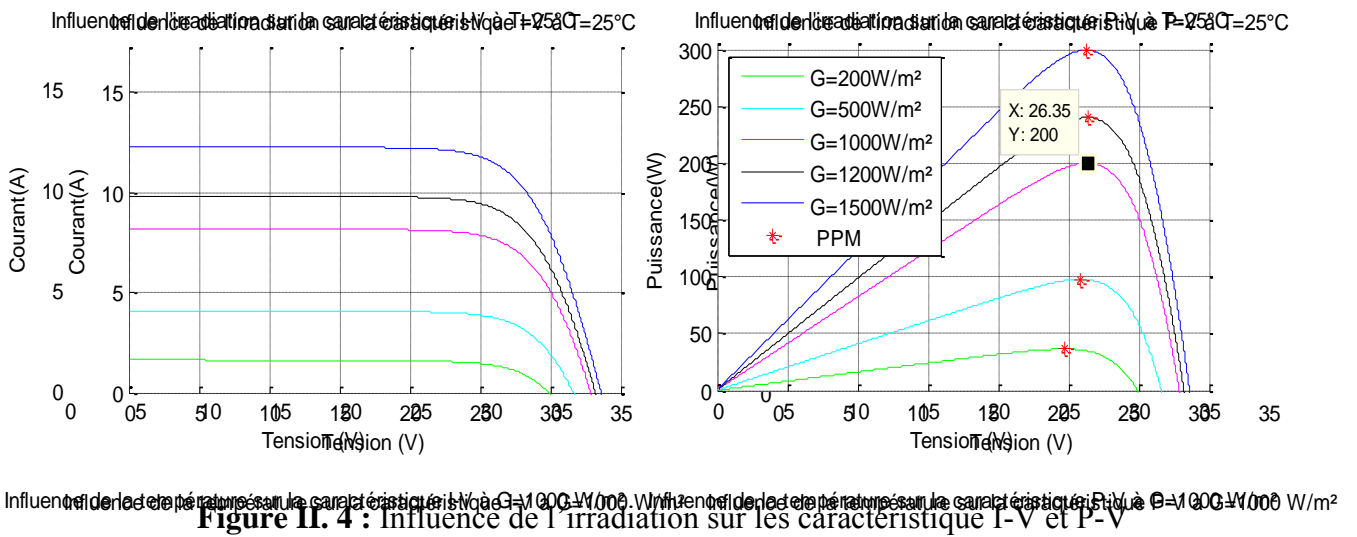
- La constante d'idéalité de la diode (A)

La valeur de la constante d'idéalité de la diode peut être choisie de façon arbitraire. Les auteurs gardent différentes opinions quant à la façon la plus correcte d'estimer la valeur de cette constante car elle décrit le degré d'idéalité de la diode et est totalement empirique. De ce fait, n'importe quelle valeur de A peut être choisie initialement pour être modifiée par la suite si nécessaire car faire varier A peut légèrement améliorer la précision du modèle [22].

**II.2.2. Résultats de la simulation**

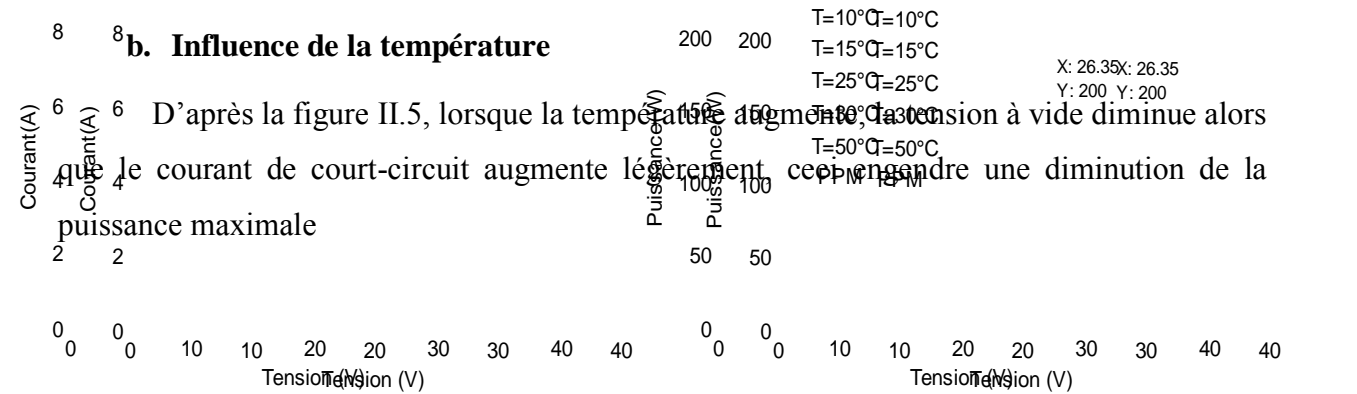
**a. Influence de l'irradiation**

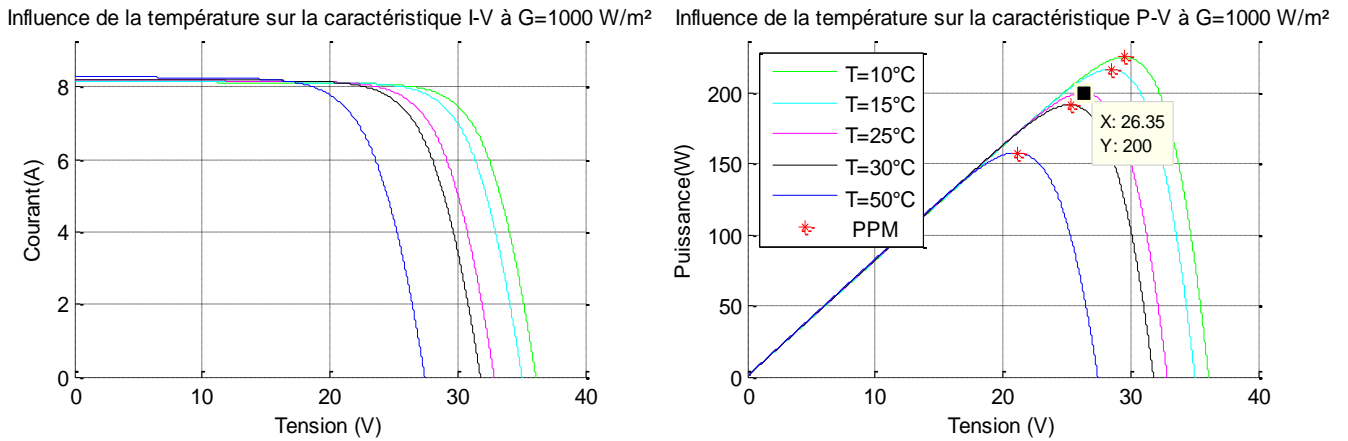
D'après la figure II.4, la caractéristique Courant-Tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'irradiation pour une température donnée : lorsque l'irradiation augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite. De ce fait, le courant de court-circuit varie proportionnellement à l'irradiation tandis que la tension de circuit ouvert ne varie que très peu [20]. De plus, la puissance maximale augmente avec l'irradiation.



**b. Influence de la température**

D'après la figure II.5, lorsque la température augmente, la tension à vide diminue alors que le courant de court-circuit augmente légèrement. Ceci engendre une diminution de la puissance maximale





**Figure II. 5 :** Influence de la température les caractéristiques I-V et P-V

On remarque à partir du tableau 1 et des courbes des figures II.4 et II.5 que le modèle développé concorde parfaitement avec les données expérimentales du constructeur dans les conditions standards (1000W/m<sup>2</sup>, 25°C), ainsi, la puissance maximale théorique correspond à la puissance maximale expérimentale.

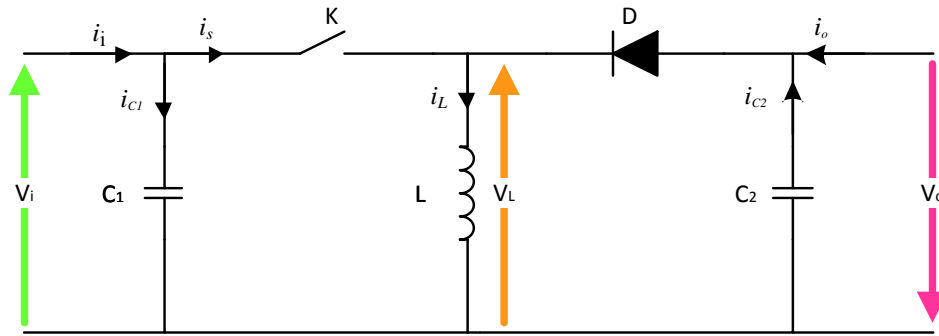
Pour résumer, le point de fonctionnement d'un module PV se déplace en faisant varier la température, l'ensoleillement ou la charge. L'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant du générateur que sa tension, alors que la température affecte beaucoup plus la tension que le courant.

À partir des courbes de puissance on remarque que l'ensoleillement augmente la puissance alors que la température l'abaisse. Ainsi, on peut déduire qu'un générateur PV fonctionne mieux à basse température et à flux lumineux important [20].

### II.3. Modélisation du Hacheur Buck-Boost

#### II.3.1. Modèle du hacheur

Également appelé hacheur abaisseur-élevateur ou dévolteur-survolteur, il a la capacité de fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée et permet ainsi d'adapter la tension du générateur PV aux besoins de la charge. Cette adaptation est réalisée par variation du rapport cyclique  $\alpha$ . Il est représenté par la figure II.6.



**Figure II. 6:** Hacheur Buck-Boost [8]

L'entrée et la sortie du hacheur représentent des sources de tension. Un convertisseur direct ne peut mettre en relation deux sources de même nature, une telle représentation est justifiée dans le sens où le convertisseur comporte une source de courant qui relie les deux sources de tension, et c'est les capacités à l'entrée et à la sortie du convertisseur qui confèrent le caractère source de tension alors que l'inductance confère le caractère source de courant [23].

L'élément de commande (transistor, thyristor, MOS, IGB, etc...) est représenté par l'interrupteur K.

On distingue deux modes de fonctionnement, le premier est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge. Durant le second mode de fonctionnement, lorsque l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, l'énergie stockée par la bobine va alimenter la charge et recharger la capacité [24].

Durant le fonctionnement du hacheur, l'interrupteur K est fermé pendant un temps  $t_{on}$  égal à  $\alpha T_s$  et est ouvert pendant un temps  $t_{off}$  égal à  $(1-\alpha)T_s$ .

Avec :

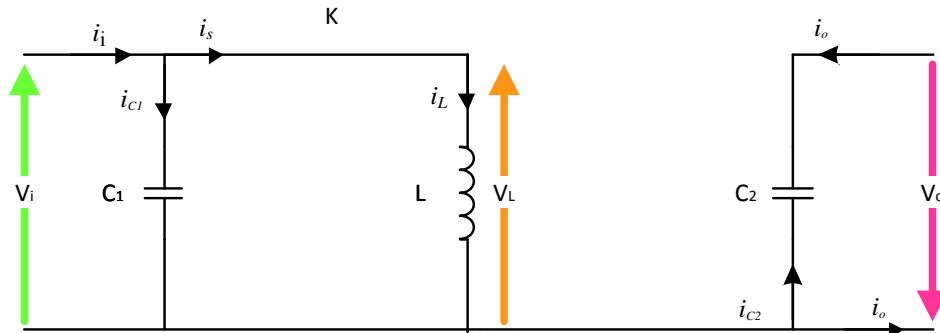
$T_s$  période de commutation égale  $1/f_s$

$f_s$  fréquence de hachage

$\alpha$  rapport cyclique de commande ( $\alpha \in [0,1]$ )

Le principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost est basé essentiellement sur la position du commutateur K :

- Intervalle  $[0, \alpha T_s]$  : Cet intervalle est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement avec une pente égale à  $V_i/L$  ce qui lui permet de stocker de l'énergie durant toute la durée de la fermeture, et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge [8][24]. Le circuit est le suivant :

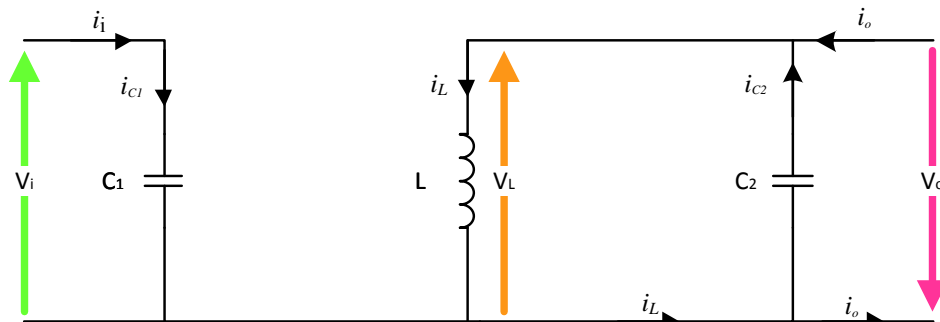


**Figure II. 7:** Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST [8]

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (II. 8)$$

- Intervalle  $[\alpha T_s, T_s]$  : l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, le courant de la bobine décroît linéairement avec une pente de  $-V_o/L$  ce qui permet d'alimenter la charge et de recharger la capacité. Le circuit est représenté par la figure ci-dessous.



**Figure II. 8:** Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

En combinant les deux systèmes d'équations II.8 et II.9, on trouve le modèle approximé du hacheur Buck-Boost [8]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = \alpha T_s (i_i(t) - i_L(t)) + (1 - \alpha) T_s i_i(t) \\ C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s = -\alpha T_s i_o(t) + (1 - \alpha) T_s (i_L(t) - i_o(t)) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = \alpha T_s V_i(t) - (1 - \alpha) T_s V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II. 10})$$

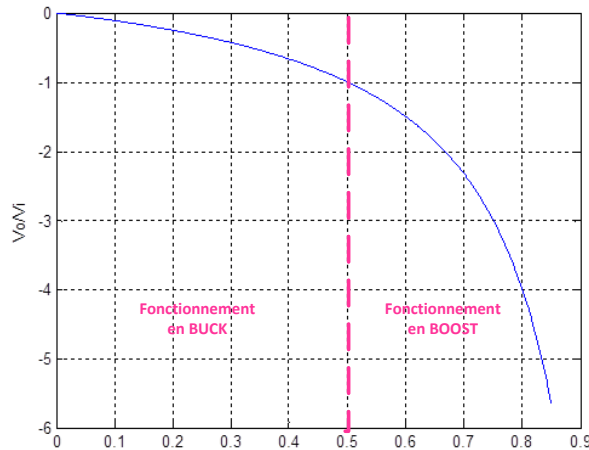
Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système devient :

$$\begin{cases} I_i - \alpha I_L = 0 \\ (1 - \alpha) I_L - I_o = 0 \\ \alpha V_i - (1 - \alpha) V_o = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

On peut ainsi tirer le rapport de conversion, qui représente le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{II. 12})$$

Grâce à cette dernière expression, on peut déterminer les modes de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST



**Figure II. 9:** Zones de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST



### II.3.2. Dimensionnement des composants du hacheur

Pour pouvoir dimensionner les éléments du hacheur nous devons trouver les expressions qui permettent de diminuer l'ondulation.

La pente du courant traversant la bobine et la tension aux bornes des capacités pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\begin{cases} \frac{dv_{C_1}}{dt} = \frac{I_{C_1}}{C_1} \approx \frac{I_i - I_L}{C_1} \\ \frac{dv_{C_2}}{dt} = \frac{I_{C_2}}{C_2} \approx -\frac{I_O}{C_2} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{v_i}{L} \approx \frac{V_i}{L} \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

Les valeurs crête à crête des courants et des tensions sont :

$$\begin{cases} V_{i_{cc}} = 2\Delta v_i = \frac{I_i - I_L}{C_1} \alpha T_d \\ V_{O_{cc}} = 2\Delta v_o = -\frac{I_O}{C_2} \alpha T_d \\ I_{L_{cc}} = 2\Delta i_L = \frac{V_i}{L} \alpha T_d \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

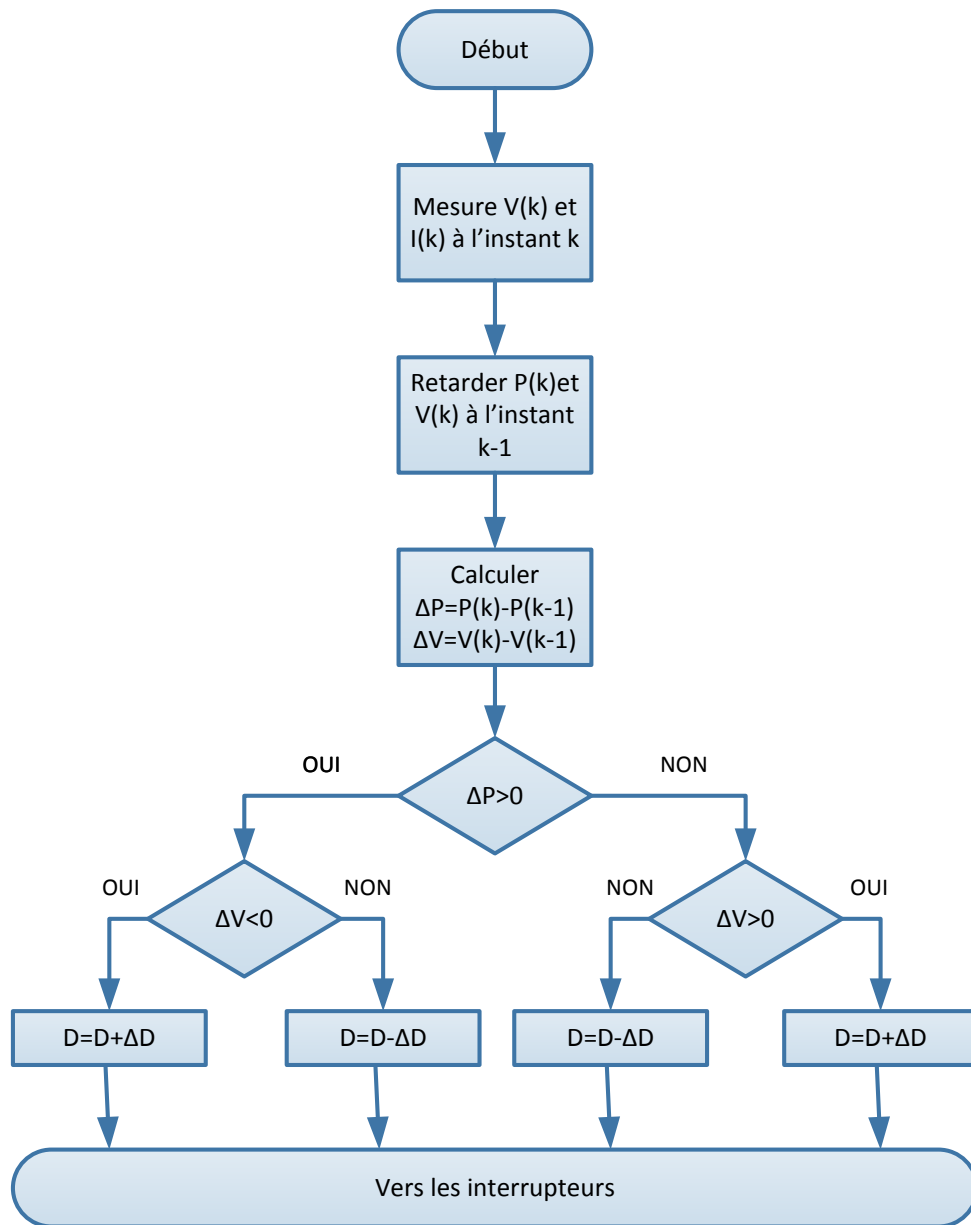
On peut déduire les valeurs des composants à choisir pour des ondulations données:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{I_i - I_L}{2\Delta v_i} \alpha T_d \\ C_2 = \frac{I_O}{2\Delta v_o} \alpha T_d \\ L = \frac{V_i}{2\Delta i_L} \alpha T_d \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

### II.3.3. Commande du hacheur

Un générateur PV possède une caractéristique I-V fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de piloter le hacheur, reliant le panneau PV à la charge de manière à fournir en temps réel le maximum de puissance.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à l'algorithme P&O pour sa simplicité et sa rapidité. Son principe est représenté dans la figure ci-dessous.



**Figure II. 10:** Algorithme P&O [21]

Cet algorithme consiste à perturber le fonctionnement du système en modifiant la tension aux bornes du champ de modules PV et à analyser la variation de puissance qui en résulte. Ainsi on peut déduire qu'une incrémentation positive de la tension peut engendrer :

- Un accroissement de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.
- Une décroissance de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

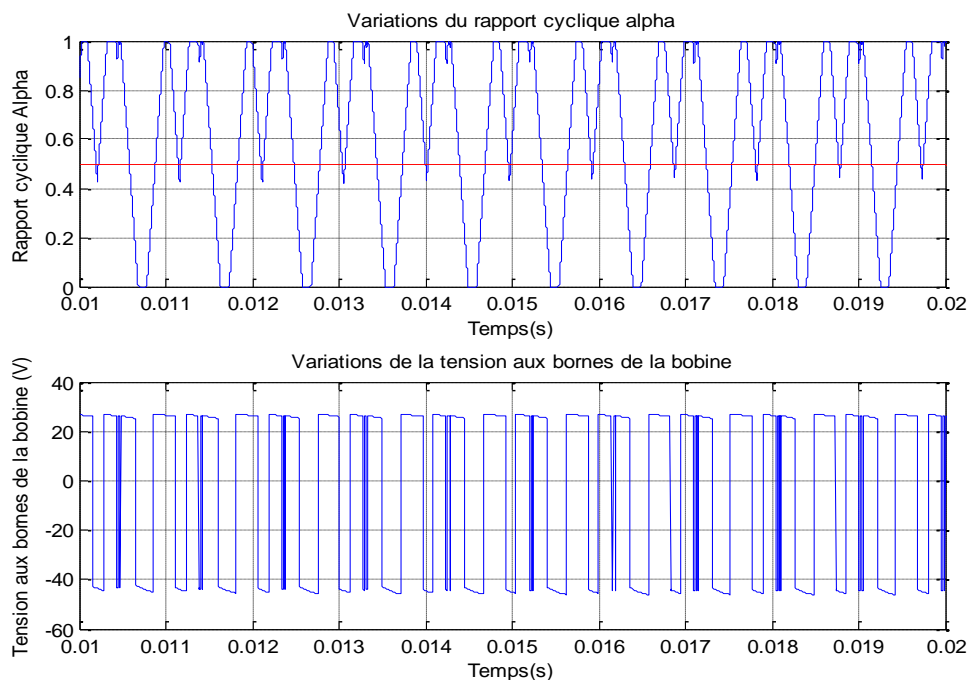
À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique  $P=f(V)$ , il devient facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

Cette méthode est utilisée pour sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques inconvénients liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

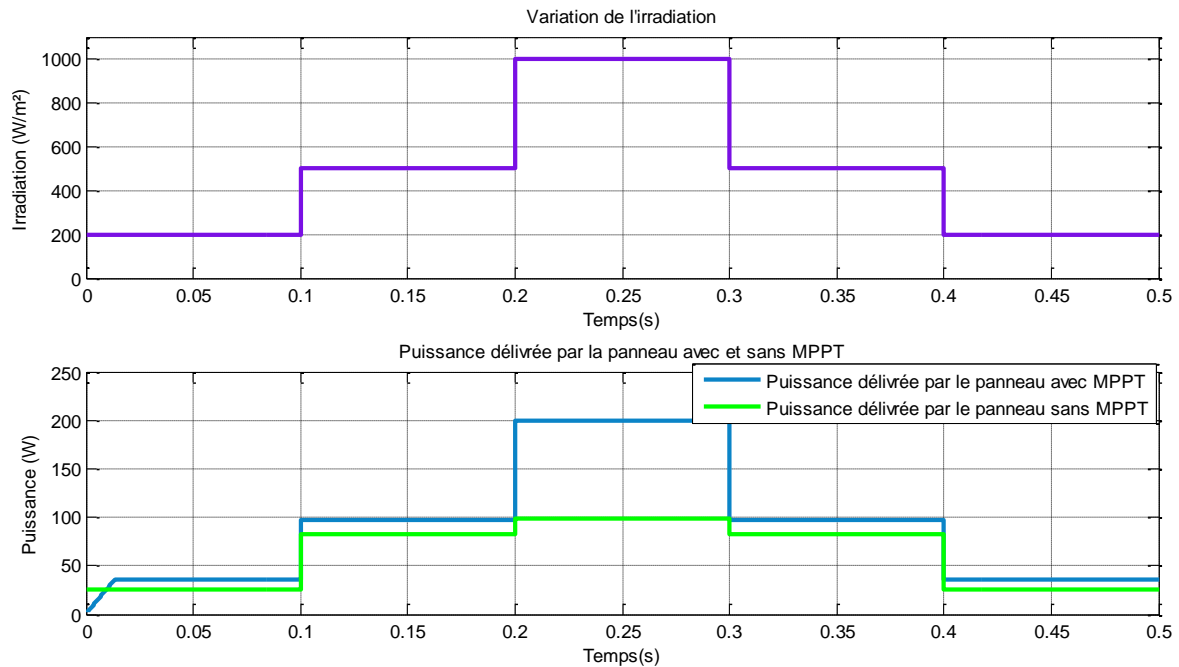
#### II.3.4. Résultats de simulation

Pour valider l'algorithme MPPT choisi, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et sous une température constante égale à  $25^{\circ}\text{C}$ . On a pris une charge résistive de  $10\Omega$



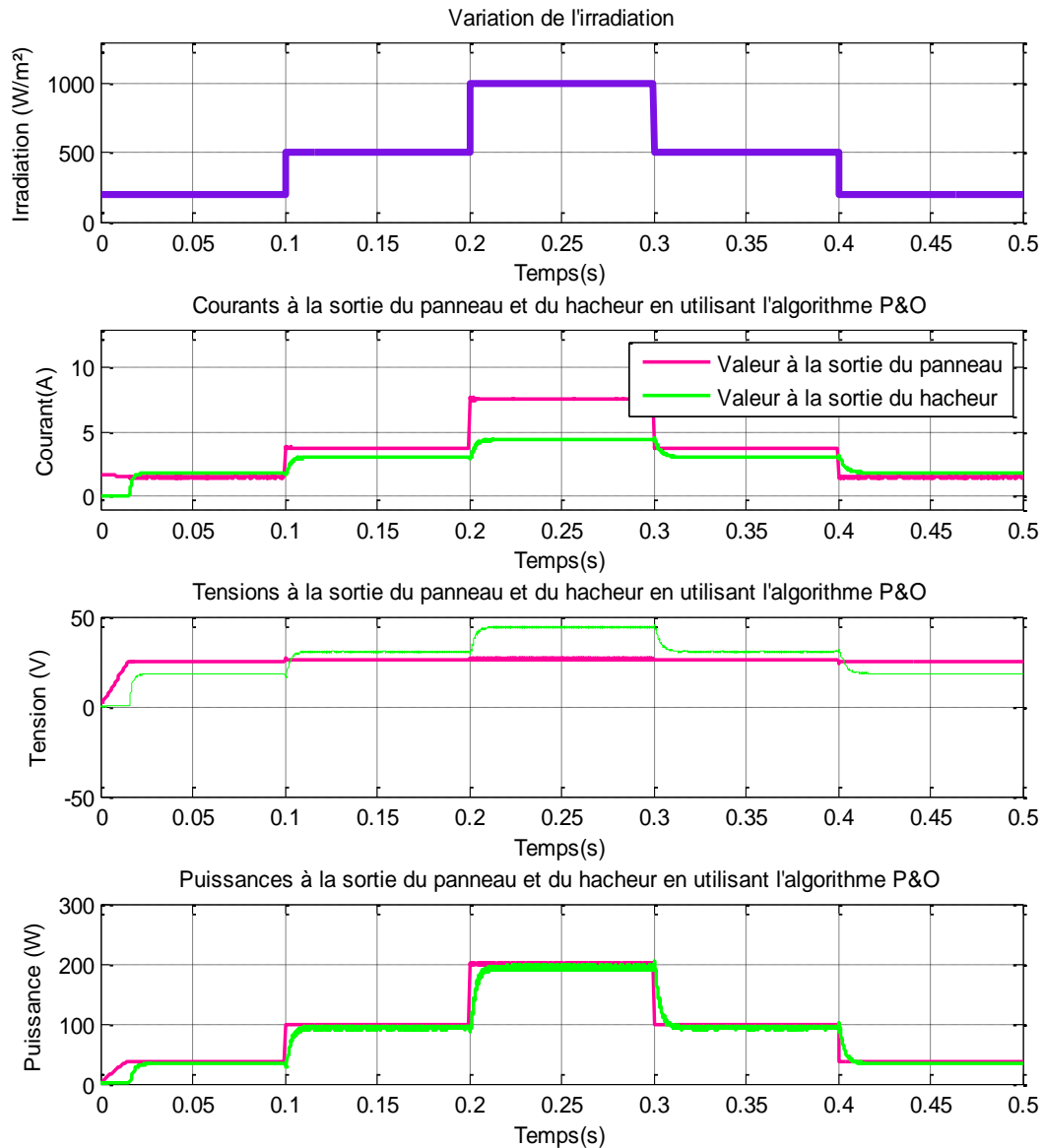
**Figure II. 11:** Variations du rapport cyclique et de la tension aux bornes de la bobine  
(pour une fréquence de la porteuse égale à  $10^4$  Hz)

La valeur de  $\alpha$  oscille beaucoup est c'est l'un des inconvénients de l'algorithme P&O. quant à la tension aux bornes de la bobine, elle varie entre deux valeurs. Pour l'alternance positive (intervalle de 0 à  $\alpha T$ ) la tension est égale à la tension d'entrée du hacheur, soit 26 V et ceci confirme ce qui a été démontré dans l'équation II.8. Pour ce qui est de l'alternance négative (intervalle  $\alpha T$  à T), l'amplitude de la tension est égale à l'amplitude de la tension de sortie du hacheur, soit 44 V et ça confirme ce qui a été démontré dans l'équation II.9



**Figure II. 12:** Puissance obtenue avec et sans MPPT pour différentes irradiations

Les résultats ci-dessus montrent la différence de puissance entre un système avec MPPT et un système sans MPPT. Ainsi, l'intérêt de l'utilisation d'un algorithme MPPT est mis en évidence. On voit bien que l'écart entre les puissances est important, ce qui prouve la nécessité de l'utilisation d'un algorithme MPPT pour optimiser le fonctionnement du système et diminuer les pertes.



**Figure II. 13:** Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale. On remarque que son utilisation entraîne des oscillations, néanmoins, on voit que son temps de réponse est très rapide ce qui est l'une des qualités les plus importantes de cet algorithme.

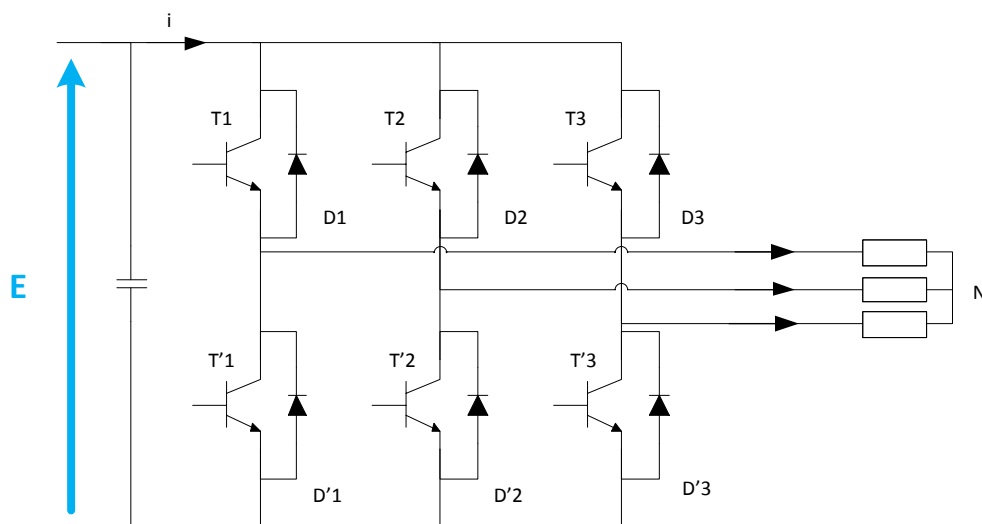
#### II.4. Modélisation de l'onduleur

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés. La forte évolution de ces convertisseurs s'est appuyée d'une part, sur le développement des composants à semi-

conducteurs (entièrement commandables, puissants, robustes et rapides) et d'autre part sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques de largeur d'impulsion [25].

#### II.4.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux [12][16][25][49]

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est composé de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur, les interrupteurs T1 et T1', T2 et T2', T3 et T'3 doivent être contrôlés de manière complémentaire. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération montée en tête-bêche avec le semi-conducteur.



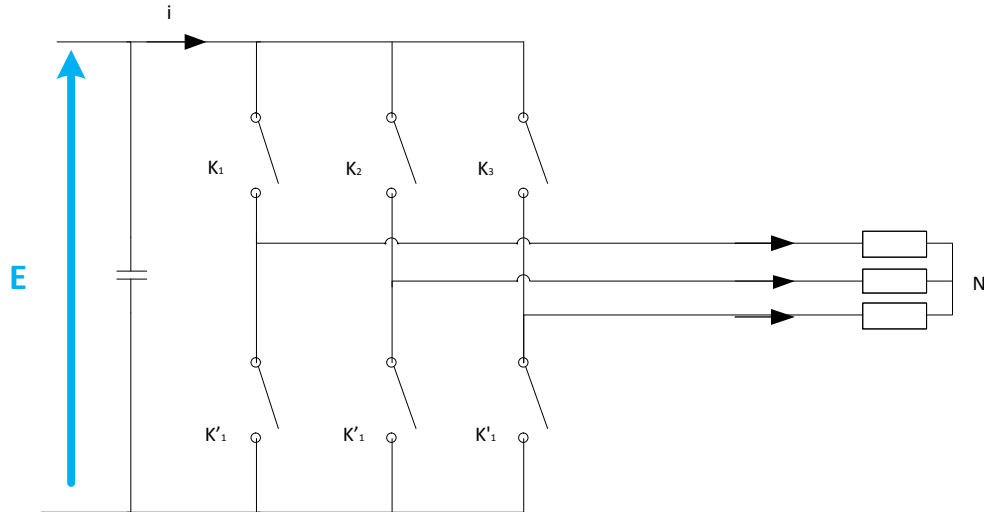
**Figure II. 14:** Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable;
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Les diodes  $D=1,2, \dots, 6$ , sont des diodes de protection des transistors assurant la roue libre ou la récupération.

En considérant que chaque paire (transistor, diode) constitue un seul interrupteur on a le schéma simplifié suivant:



**Figure II. 15:** Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux simplifiée

Les états des interrupteurs, supposés parfaits, sont représentés en théorie par trois fonctions logiques  $K_k$  ( $k= A, B, C$ ) telles que :

- $K_k = 1$  : l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.
- $K_k = 0$  : l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

La relation entre le vecteur  $[K_A K_B K_C]^t$  et le vecteur des tensions lignes  $[U_{AB} U_{BC} U_{CA}]^t$  est donné par :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \quad (\text{II. 16})$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_C = \frac{U_{AC} - U_{BA}}{3} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

À partir des relations (II.16) et (II.17) on obtient l'expression des tensions simples en fonction de l'état des interrupteurs comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 \cdot E \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_C \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

## II.4.2. Stratégie de commande

### a. La MLI triangulo-sinusoïdale

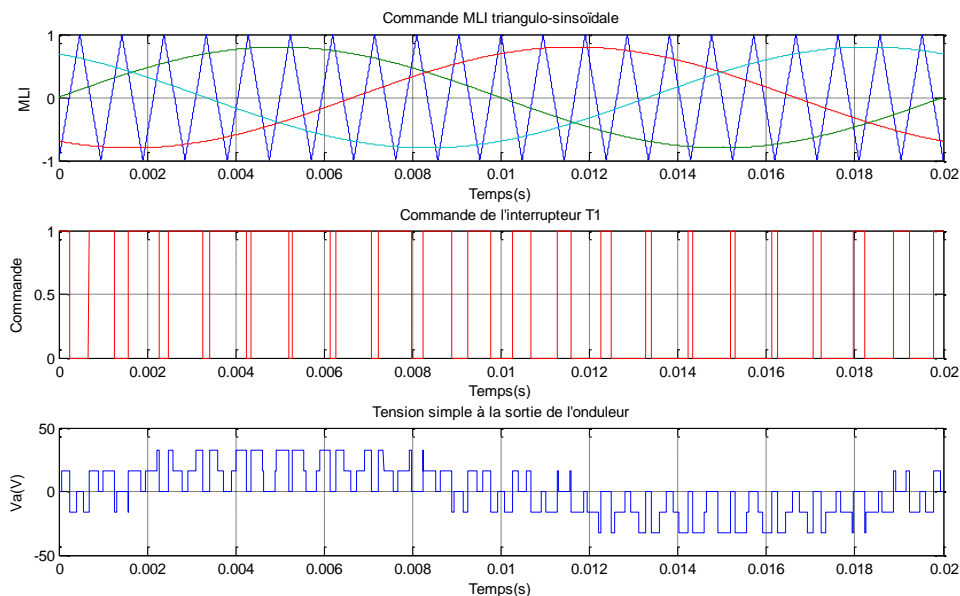
Les onduleurs délivrent en général une tension alternative formée de créneaux rectangulaires. C'est ce problème qui explique l'évolution importante que viennent de connaître les onduleurs. L'une d'elles consiste à utiliser la commande MLI. Si on souhaite, ce qui est souvent le cas, obtenir une tension à peu près sinusoïdale il faut filtrer les créneaux [13].

Dans ce projet, on utilisera la modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoïdale pour la commande de l'onduleur à deux niveaux.

### b. Principe de de fonctionnement

La modulation de largeur d'impulsions est une méthode qui permet à la fois la variation de l'amplitude du fondamental de la tension et le contrôle de son contenu harmonique. Cette méthode consiste à comparer l'amplitude de la modulante (tension de référence de l'onduleur) et des commutations supplémentaires à fréquence élevée introduites sous forme d'un signal en dent de scie appelé porteuse [13][16].

La tension de sortie est une suite de créneaux d'amplitude fixe et de largeur variable.



**Figure II. 16:** Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoïdale

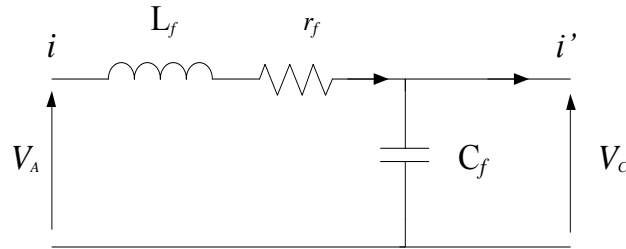
La MLI présente deux avantages importants :

- Repousser vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage
- Faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.



### II.4.3. Modélisation du filtre LC

Afin de déterminer plus facilement la transmittance du filtre, on utilise le schéma monophasé suivant



**Figure II. 17:** Schéma monophasé équivalent du filtre LC

Où  $r_f$  est la résistance de fuite de l'inductance  $L_f$

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f r_f \cdot p + L_f C_f \cdot p^2} \quad (\text{II. 19})$$

Elle est de la forme :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\xi\omega_n} \cdot p + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot p^2} \quad (\text{II. 20})$$

Par identification on trouve :

$$\begin{cases} \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \cdot r_f \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

En choisissant une bonne fréquence de coupure qui va nous permettre d'éliminer les fréquences non désirées et en considérant le coefficient d'amortissement  $\xi$  adéquat on attribue un dimensionnement correct à l'inductance et à la capacité du filtre utilisé.

### II.4.4. Résultats de simulation

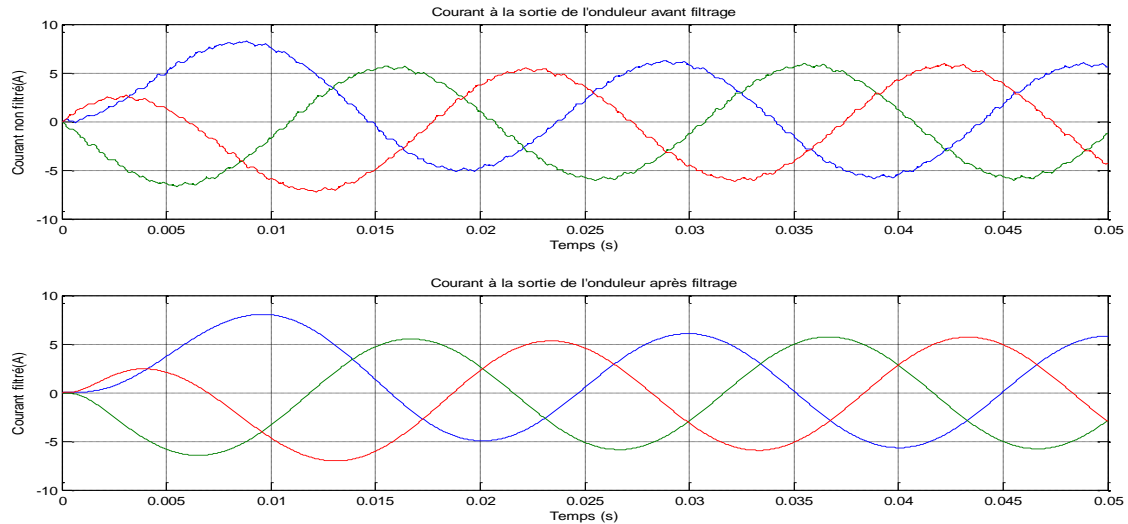
En considérant un éclairage de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$  pour un panneau délivrant une puissance de  $200\text{Watt}$  crêtes.

L'onduleur utilisé est un onduleur à deux niveaux commandé par une MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse avec un coefficient de réglage  $r=0.8$  et un indice de modulation  $m=21$  (Cette valeur de  $m$  permet d'annuler les harmoniques pairs et les harmoniques de rangs

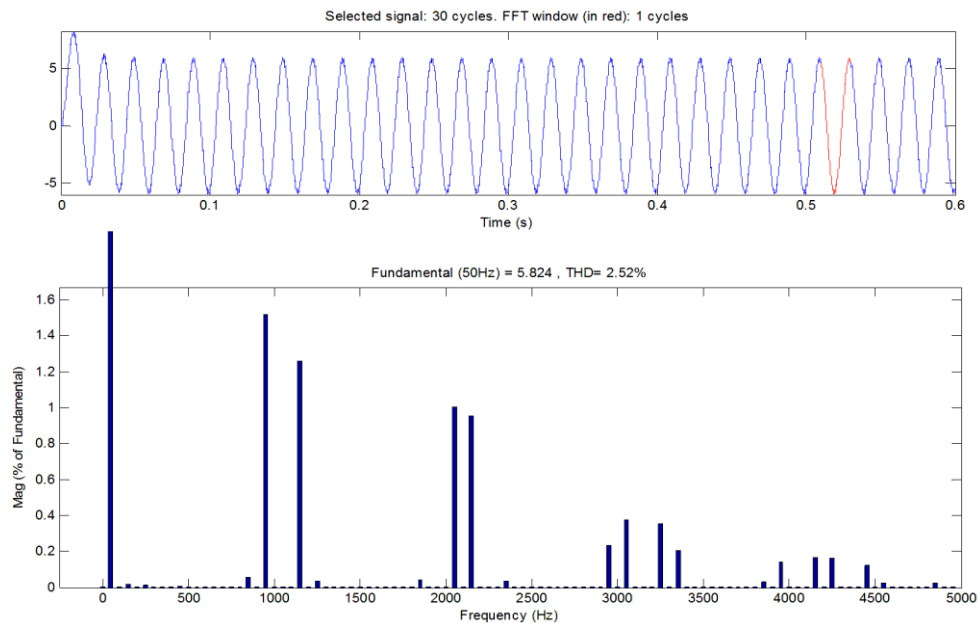
multiples de 3, elle permet aussi d'éloigner suffisamment les harmoniques vers les HF pour simplifier le filtrage).

La valeur de référence de la tension du bus continu est fixée à 48V. Le montage bus continu-onduleur est dédié à l'alimentation un charge RL ( $R=1\Omega$ ,  $L=10\text{mH}$ )

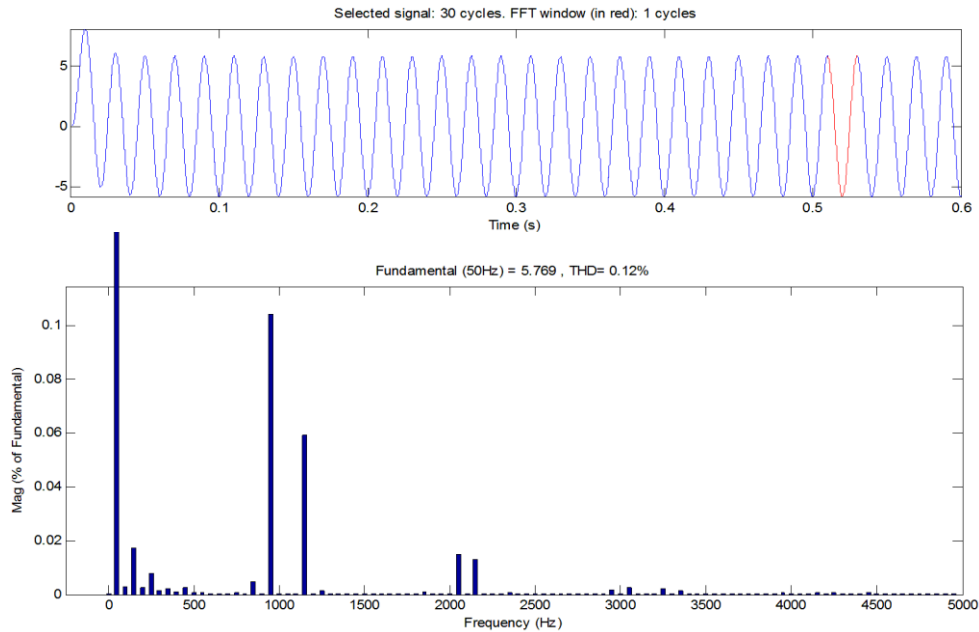
Les courants à la sortie de l'onduleur, avant et après filtrage, sont représentés par la figure ci-dessous



**Figure II. 18:** Allures de courbes de courants à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage



**Figure II. 19:** Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.

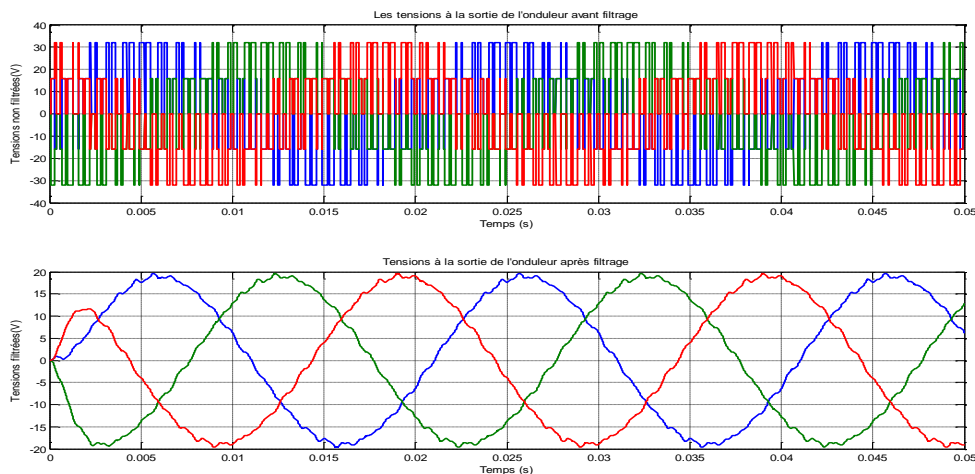


**Figure II. 20:** Analyse spectrale du courant à la sortie du filtre LC.

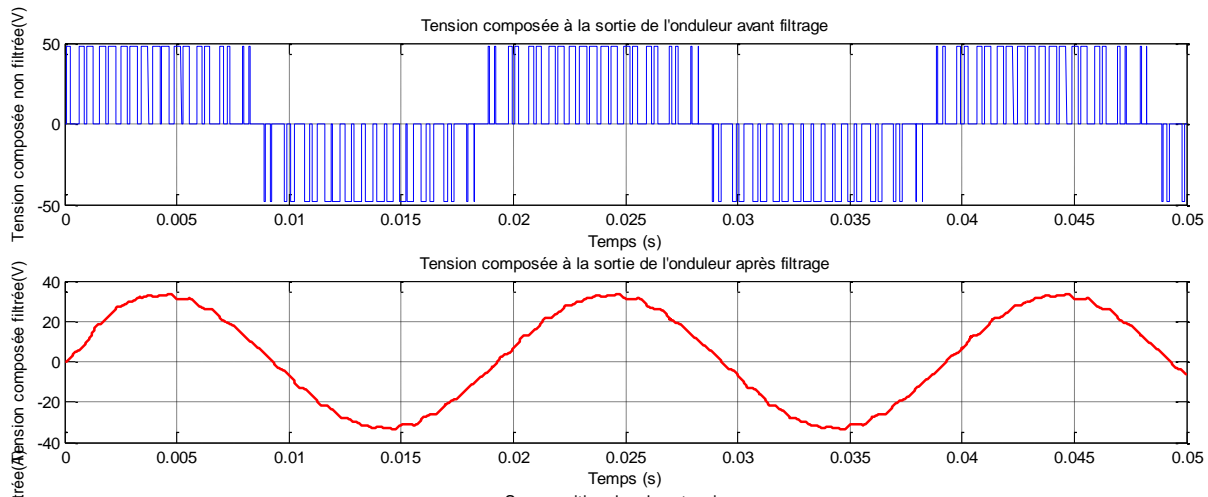
La Figure.II.18 représente l'allure des courants à la sortie de l'onduleur avant, et après filtrage. On aperçoit tout d'abord des courants pas très déformés, ceci est dû à la charge inductive qui joue le rôle de filtre pour le courant. Après utilisation du filtre LC l'allure de ces courants est moins déformée et on retrouve des courbes proches d'une sinusoïde parfaite.

L'analyse spectrale avant et après filtrage des courants démontre l'intérêt de l'utilisation du filtre. La Figure.II.19 présente l'analyse spectrale faite avant filtrage. On voit bien un taux d'harmoniques de courants de l'ordre de (2.52%) notamment pour les harmoniques de rang supérieur. Puis après filtrage ce taux est nettement plus bas (0.12%).

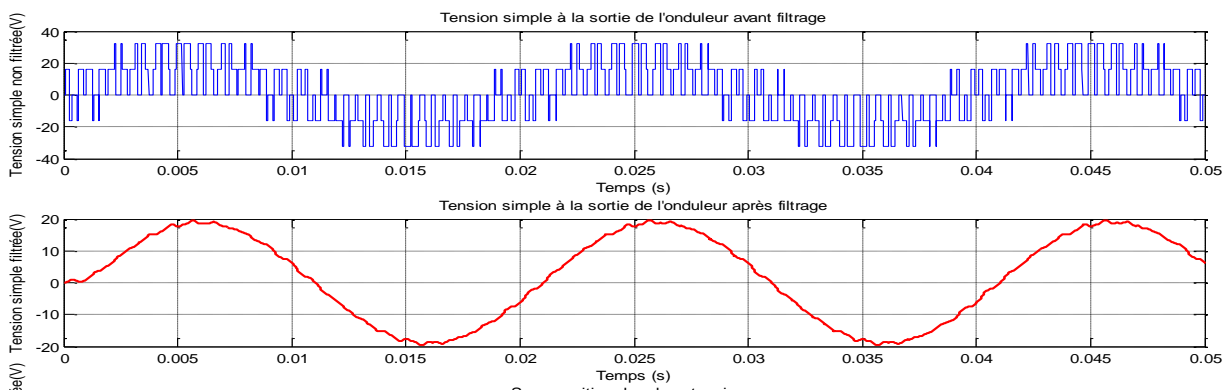
Pour ce qui est des tensions avant et après filtrage, les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :



**Figure II. 21:** Allure des trois tensions simples avant et après filtrage



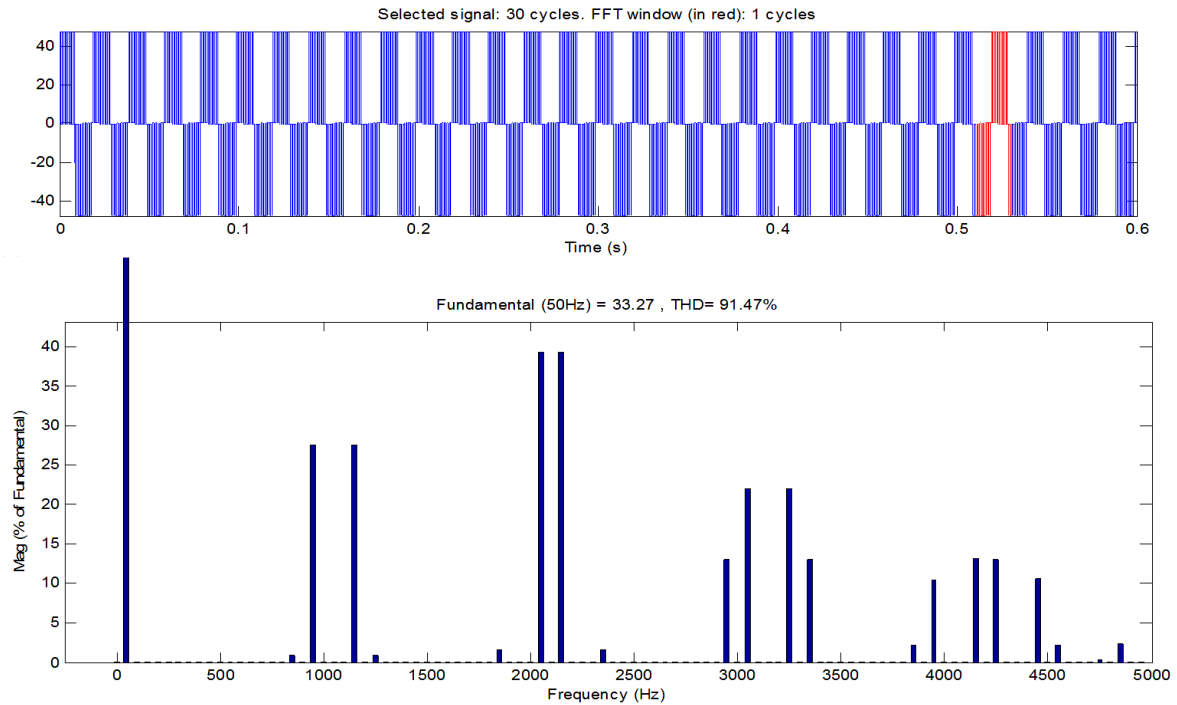
**Figure II. 22:** Allures de la tension composée à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre



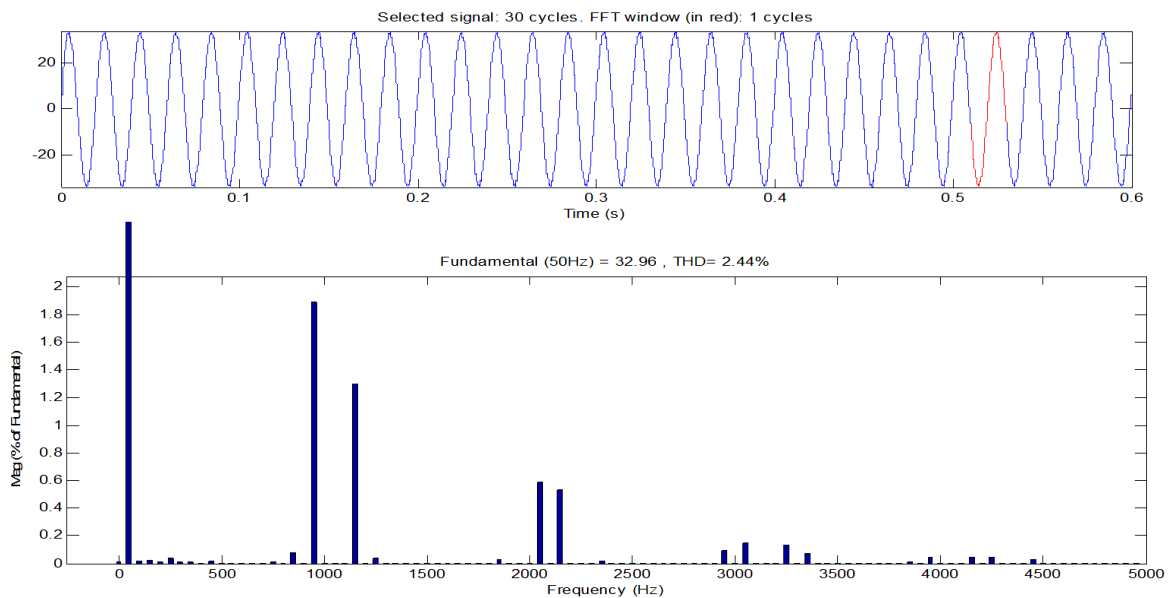
**Figure II. 23:** Allures de la tension simple à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre

La Figure II.21 représente l'allure des trois tensions simples juste à la sortie de l'onduleur. Il est clair que ces allures sont complètement déformées. Dans les Figures II.22 et II.23 on voit plus clairement ces tensions (simple et composée, en prenant une seule tension chacune). Les résultats obtenus après filtrage sont nettement meilleurs, et les courbes se rapprochent vraiment de la forme d'une sinusoïde. Cependant on remarque une diminution non négligeable de l'amplitude de la tension avant et après filtrage. Avant filtrage, l'amplitude de la tension est plus importante et cela est dû à la présence des harmoniques, dont les valeurs s'ajoutent à celle du fondamental. Après filtrage, cette valeur baisse considérablement et devient égale à celle du fondamental.

Le filtrage des tensions s'avère très intéressant, les résultats obtenus après avoir mis un filtre à la sortie de notre onduleur sont évidemment meilleurs. Les résultats des analyses spectrales ci-dessous valideront ces conclusions en montrant les différents rangs d'harmonique avant et après filtrages et les THD obtenus respectivement.



**Figure II. 24:** Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie de l'onduleur .



**Figure II. 25:** Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre *LC*.

La Figure II.24 présente l'analyse spectrale de la tension obtenue à la sortie de l'onduleur (avant qu'elle soit filtrée). On voit clairement une grande présence des harmoniques de tensions et des piques non négligeables à certaines fréquences. Le taux de distorsion en tension est très important, il est de l'ordre de 91.47%, ce qui explique l'importante diminution d'amplitude de la tension après filtrage, qui représente l'amplitude du fondamental, obtenue dans les résultats précédents. L'analyse spectrale

faite après filtrage présente une nette amélioration par rapport à la présence des tensions harmoniques, confirmée par un THD de 2.44%, soit alors une diminution de plus de 89% du THD avant filtrage.

On peut déduire à partir de ces résultats que le filtrage n'est pas nécessaire pour un mode isolé puisque le courant est filtré par les charges inductive. Cependant, pour un mode connecté au réseau, le filtrage est primordial afin de ne pas polluer le réseau et pour respecter les normes imposées par ce dernier.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des différents constituants de la chaîne de production photovoltaïque, qui ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux.

On a opté pour un modèle mathématique des panneaux PV, qui tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que de celle de la température, et dont les résultats de simulation prouvent la précision

Nous avons ensuite modélisé les convertisseurs en développant des modèles régissant leurs fonctionnements et cela sous certaines hypothèses simplificatrices justifiées.

En outre, en considérant la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé qu'ils fonctionnaient dans des conditions idéales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT pour Maximum Power Point Tracking) appliqué au fonctionnement d'un hacheur Buck-Boost qui permet d'avoir différents niveaux de tension à la sortie de l'étage d'adaptation.

Une étude sur l'onduleur de tension à deux niveaux commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale à une porteuse en considérant une tension fixe à son entrée, donne des résultats de simulations qui montrent que grâce à une commande robuste, le convertisseur permet de faire face aux forts appels de courant, garantissant une tension proche de la sinusoïde à la sortie.

# Système photovoltaïque en mode isolé

---

*L'électricité d'origine photovoltaïque sera compétitive par rapport aux autres sources de production vers 2020. Ces performances sont très attractives, mais avant de les atteindre, il faudra affranchir certaines contraintes en optimisant le fonctionnement global d'un système photovoltaïque. Ainsi, en revenant à une plus petite échelle et en considérant un site de production autonome, il faudra notamment surmonter le caractère intermittent de la fourniture d'énergie tout en permettant aux panneaux photovoltaïques de fonctionner dans des conditions optimales.*

*C'est dans cette problématique que se situe ce chapitre : concevoir et optimiser un système photovoltaïque énergétiquement autonome. Associés à des moyens de stockage efficaces, les systèmes de production photovoltaïques peuvent apporter une solution pertinente au défi énergétique actuel. C'est ce qu'on explicitera dans ce qui suit.*

### III.1. Introduction

L'exploitation des potentiels énergétiques photovoltaïques pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse [7].

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque dans un site isolé avec stockage, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink.

Dans le chapitre précédent, nous avons énuméré les différents composants d'un tel système, les modèles dédiés à ces composants ainsi que les résultats de simulations. Nous présentons donc ici, grâce à des choix adaptés, le modèle de la chaîne photovoltaïque avec un élément de stockage énergétique en choisissant une architecture bien définie. Nous détaillerons le modèle de la batterie adopté ainsi que son fonctionnement. Nous présenterons par la suite les résultats de simulation obtenus pour la chaîne entière dans différentes conditions [26][27].

### III.2. Types de systèmes photovoltaïques isolés

On distingue deux types de systèmes photovoltaïques non connectés au réseau. Si l'énergie photovoltaïque est l'unique source d'énergie du système, on parlera de système stand-alone (SAPV system: Stand-Alone Photovoltaic system). Si un autre dispositif de production est utilisé en appui de la production photovoltaïque, on parlera de système photovoltaïque hybride. Dans la majeure partie des cas, le mode de production d'appui est constitué d'un ou plusieurs groupes électrogènes diesels [28][29].

Les systèmes photovoltaïques non connectés au réseau sont principalement utilisés dans les zones où le réseau électrique est très peu dense en raison du coût de raccordement prohibitif. L'énergie produite est destinée à être consommée sur place. L'électrification des sites isolés par systèmes photovoltaïques concerne l'habitat (Solar Home System : SHS) mais aussi les relais de télécommunication se trouvant éloignés des réseaux de distribution électrique [29].

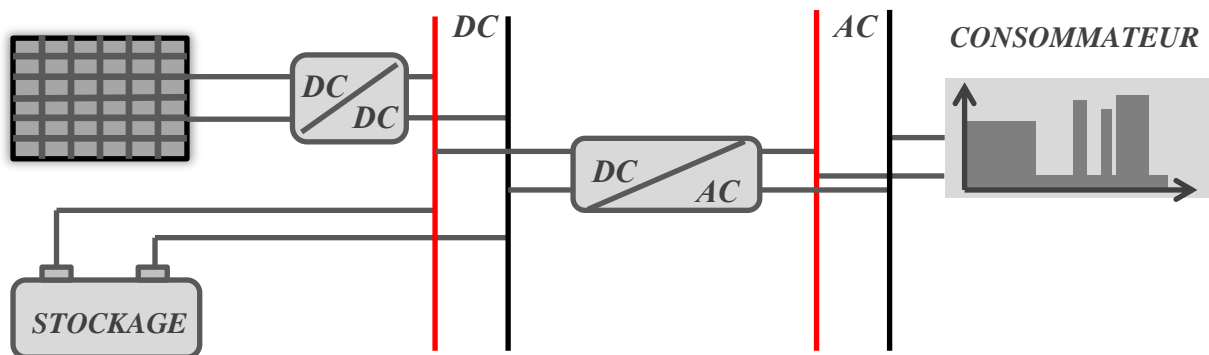
Bien que la part du marché photovoltaïque Off-grid soit actuellement faible, le scénario Solar Generation V estime qu'à l'horizon 2030, plus de 3 milliards d'êtres humains pourraient être électrifiés par ce type de systèmes.



### III.2.1. Systèmes photovoltaïques autonomes (SAPV)

La seule production électrique de ce type de systèmes est d'origine photovoltaïque. Un schéma d'un système photovoltaïque autonome est représenté dans la Figure.III.1 Du fait de la dé-corrélation entre production photovoltaïque et l'alimentation des charges du consommateur, un système de stockage est utilisé en tampon, celui-ci étant rechargé en cas de surplus de production et déchargé en cas de surconsommation.

En raison de sa maturité technologique et de son faible coût d'investissement, le moyen de stockage universellement répandu pour de telles applications est du type électrochimique Plomb-Acide. Cependant, de nouvelles technologies sont actuellement envisagées comme celles au Lithium.

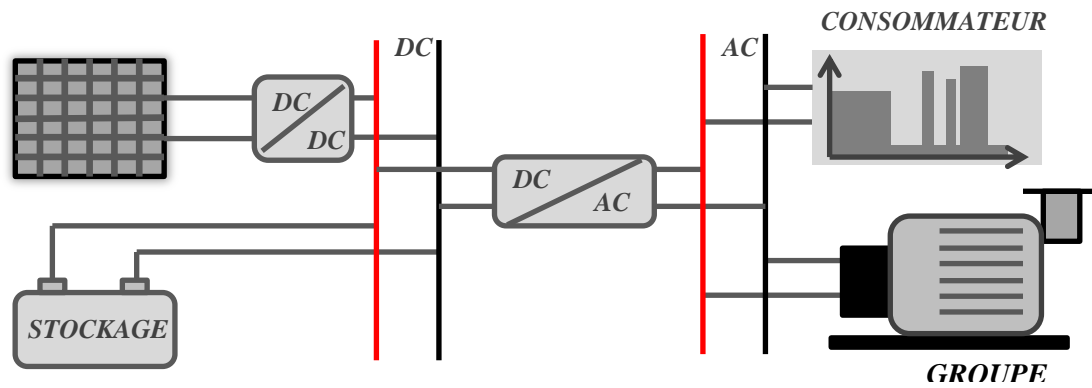


**Figure III. 1 :** Système photovoltaïque autonome [19]

Les performances de ce type de système sont directement liées à son dimensionnement. Un sous-dimensionnement a notamment pour conséquences un vieillissement prématuré du système de stockage ainsi qu'un accroissement des délestages de consommation et de production alors qu'un surdimensionnement peut conduire à un surcoût économique.

### III.2.2. Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides

Dans ce type de système, un second producteur d'énergie (le plus souvent un Groupe Électrogène) est utilisé pour pallier les insuffisances de la production photovoltaïque. L'idée étant de faire appel à l'énergie de ce producteur lorsque le système n'est plus en mesure de subvenir aux besoins du consommateur et/ou que l'état de charge de l'accumulateur est trop faible. La Figure.III.2 représente une architecture d'un système photovoltaïque autonome hybride [29][30].



**Figure III. 2 :** Système photovoltaïque autonome [19]

L'avantage de ce type de système est que, théoriquement, le consommateur ne se trouve jamais en situation d'être délesté, le groupe électrogène assurant la fourniture d'énergie lorsque la production PV est insuffisante (sauf dans le cas où le réservoir du groupe électrogène est vide). Les coûts d'investissement des panneaux photovoltaïques et du système de stockage peuvent être minimisés ; par contre, les coûts de fonctionnement principalement liés au prix du combustible du groupe électrogène sont plus importants que pour un système autonome non hybride [19].

Notons que d'autres types d'hybridations ont déjà été envisagés, parmi lesquels [30]:

- **Hybridation Photovoltaïque / Éolien:** Systèmes dans lesquels la complémentarité de production d'énergie d'origine photovoltaïque ou éolienne est recherchée et permet notamment de réduire le coût global, en particulier les besoins en stockage.
- **Hybridation Photovoltaïque / Pile à Combustible:** Systèmes dans lesquels une pile à combustible associée à un réservoir d'hydrogène et à un électrolyseur permet de stocker le surplus d'énergie photovoltaïque produite en évitant le surdimensionnement de l'accumulateur électrochimique. Ce type d'hybridation se heurte au coût d'investissement prohibitif de la pile à combustible ainsi qu'à sa faible durée de vie (actuellement quelques milliers d'heures).

### III.3. Le stockage dans un système de production d'énergie photovoltaïque autonome

Le recours à la production d'énergie photovoltaïque, que ce soit au sein de systèmes autonomes ou insérée dans une architecture distribuée et décentralisée type mini-réseau, semble pouvoir constituer l'une des réponses pertinentes au défi électrique actuel. Cependant, l'association du stockage à la production par systèmes photovoltaïques se heurte encore à un problème majeur : son coût [18][31].

Bien entendu, l'ensemble des considérations effectuées sur des systèmes photovoltaïques isolés peuvent être élargies aux architectures mini-réseaux, où les problématiques de stockage de l'énergie comme de gestion de la demande seront aussi abordées.

### III.3.1. Les batteries

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet, la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les Appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande. [32]

L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, Été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système tampon, le plus couramment utilisé, pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques [33][34].

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions Importantes [17] :

- **Autonomie**

Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

- **Courant de surcharge**

Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.

- **Stabilisation de la tension**

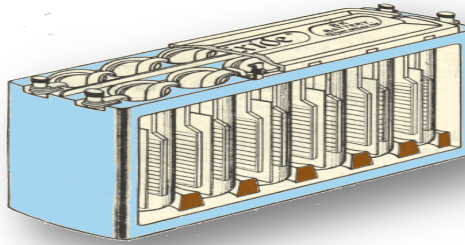
Une batterie permet de fournir une Tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. Les deux types de batteries, le plus couramment utilisées, dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd).

- **Tension**

La tension réelle de l'accumulateur dépend de son type et de la concentration ou densité relative de l'électrolyte. Elle varie selon le degré de charge, le régime de charge/décharge et la température. Elle est légèrement plus élevée pendant la charge que pendant la décharge.

### III.3.2. Fonctionnement et Performances de la batterie au plomb

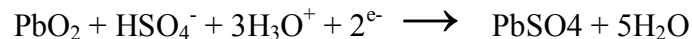
Un accumulateur électrochimique plomb-acide est un système qui restitue l'énergie électrique stockée sous forme d'énergie chimique. Il se compose de deux électrodes ayant une différence de potentiel de 2V : l'une positive en dioxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ), et l'autre négative en plomb. L'électrolyte quant à lui est une solution d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), et sert à la conduction du courant électrique. Les deux électrodes sont séparées à l'aide d'une paroi construite avec un matériau poreux permettant le passage des ions [35].



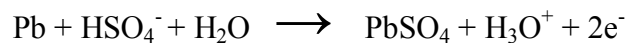
**Figure III. 3:** Structure interne d'un accumulateur électrochimique [35]

Les équations suivantes décrivent la réaction d'oxydoréduction qui a lieu dans l'ensemble électrodes-électrolyte

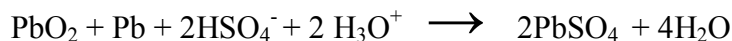
- Anode (électrode positive) :



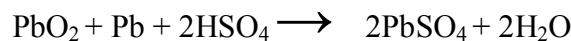
- Cathode (électrode négative) :



Le résultat final:



En le condensant, on a :

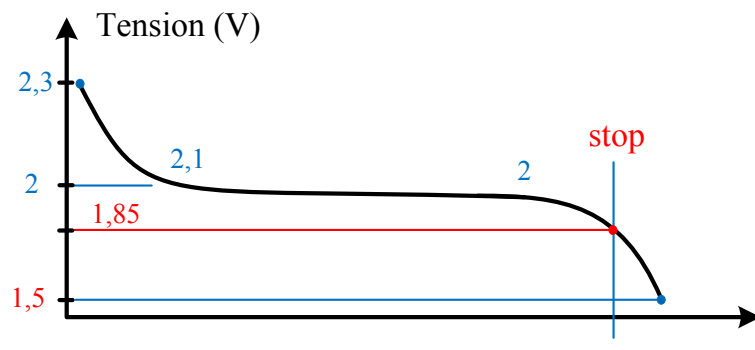


Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

- Transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive ( $\text{PbO}_2$ ) en cristaux de sulfate de plomb.
- Gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive

- Passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.

Typiquement, la tension de cellule évolue de la manière suivante :



**Figure III. 4 :** Évolution de la tension de cellule d'une batterie à Plomb [17]

Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4V, valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse).

On distingue deux types d'accumulateurs plomb-acide [17]:

- **Accumulateurs classiques « ouverts »**

Les cellules de ces batteries ne sont pas ouvertes. La batterie nécessite une maintenance afin de réajuster le niveau de l'électrolyte, et la ventilation car le dégagement gazeux qu'elle peut produire devient explosif à un certain seuil.

- **Accumulateurs VRLA « Valve Regulated Lead-Acid » (étanches)**

C'est des batteries qui ne requièrent pas d'entretien et leur consommation d'eau ainsi que l'émission de gaz qu'elles provoquent sont faibles.

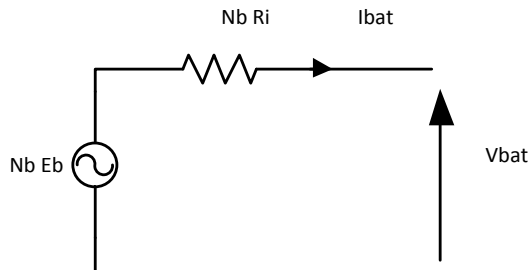
### III.3.3. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batteries au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

A la base on a trois types de modèles de batteries rapportés dans la littérature, à savoir : le modèle expérimental, électrochimique et le modèle électrique. Les deux premiers ne représentent pas bien les propriétés dynamiques nécessaires pour l'estimation de l'état de charge des éléments de la batterie contrairement au modèle électrique qui représente très bien ces caractéristiques électriques [30][36].

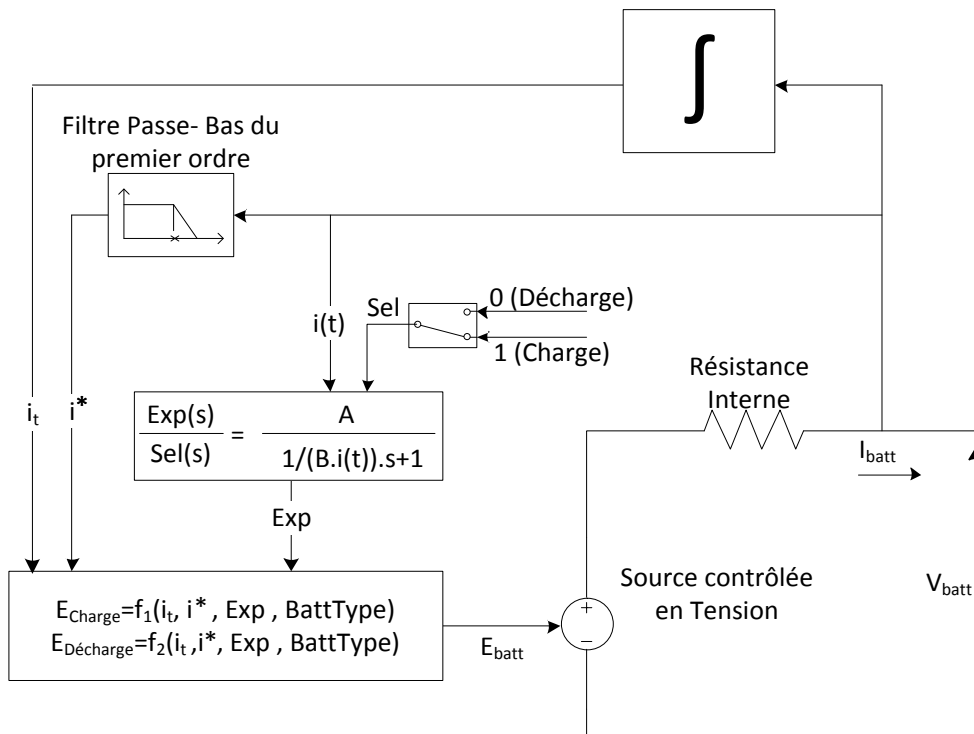
**a. Modèle de la batterie de Shepherd**

Le modèle électrique le plus simple comporte une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Néanmoins il ne prend pas en compte l'état de charge de la batterie [37].



**Figure III. 5 :** Modèle simple de la batterie [38]

Shepherd a développé une équation qui décrit le comportement électrochimique de la batterie en termes de tension maximale, tension de circuit ouvert, résistance interne, courant de décharge et état de charge de la batterie. Ce modèle représente très bien la décharge autant que la charge et utilise seulement l'état de charge de la batterie comme variable d'état afin de représenter la variation de la tension. C'est ce modèle amélioré qu'on va considérer dans notre modélisation [39].



**Figure III. 6:** Modèle complet de la batterie avec charge/décharge [39]

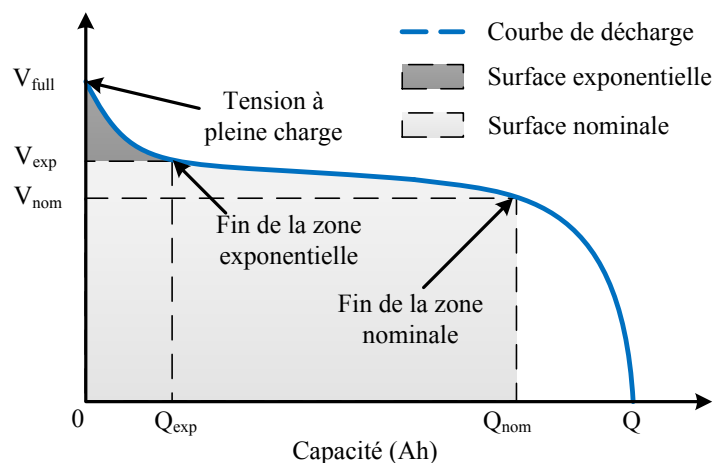
### b. Modèle de décharge

Le modèle de décharge proposé est similaire à celui de Shepherd, mais il peut représenter avec exactitude les dynamiques de la tension lorsque le courant varie, il prend aussi en compte la tension de circuit ouvert en tant que fonction de l'état de charge de la batterie. Un terme représentant la polarisation de la tension est ajouté afin de mieux représenter le comportement de la tension de circuit ouvert et le terme représentant la résistance de polarisation est légèrement modifié. La tension de la batterie obtenue est la suivante :

$$V_{\text{batt}} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i t} (i t + i^*) - R \cdot i + \text{Exp}(t) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$V_{\text{batt}}$ (V)	Tension de la batterie
$E_0$ (V)	Tension constante de la batterie
$K$ (V/Ah)	Constante de polarisation
$Q$ (Ah)	Capacité de la batterie
$i_t$ (Ah)	Charge actuelle de la batterie
$R(\Omega)$	Résistance interne
$i$ (A)	Courant de batterie
$i^*$ (A)	Courant filtré



**Figure III. 7:** Courbe de décharge d'une batterie Plomb-Acide [39]

Pour une batterie Plomb- Acide :

$$\text{Exp}(t) = B|i(t)| (-\text{Exp}(t) + A \cdot u(t)) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

Exp(t)	Zone exponentielle de la tension
i(t) (A)	Courant de la batterie
u(t)	Mode de charge ou décharge
A (V)	Amplitude de la zone exponentielle
B (Ah <sup>-1</sup> )	Constante inverse de la zone exponentielle

### c. Modèle de charge

Pour la batterie plomb-acide, la tension augmente rapidement quand la batterie atteint la pleine charge. Ce phénomène est modélisé par le terme de la résistance polarisée. En mode de charge, cette résistance augmente jusqu'à ce que la batterie soit complètement chargée ( $i_t=0$ ).

Théoriquement, quand  $i(t)=0$  (complètement chargée), la résistance de polarisation est infinie. Cela n'est pas exactement correct en pratique. En effet, les résultats expérimentaux ont montrés que la contribution de la résistance de polarisation est décalée de 10% de la capacité de la batterie. La résistance de polarisation est donnée par l'expression suivante :

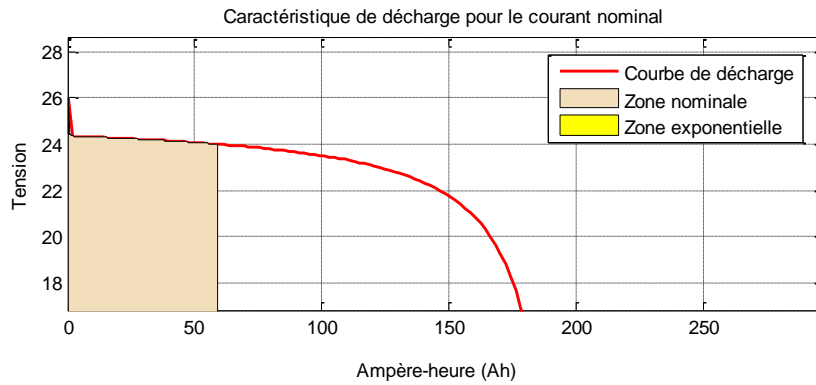
$$\text{Resistance. pol} = K \frac{Q}{i_t - 0.1 \cdot Q} \quad (\text{III. 3})$$

### d. Validation du modèle

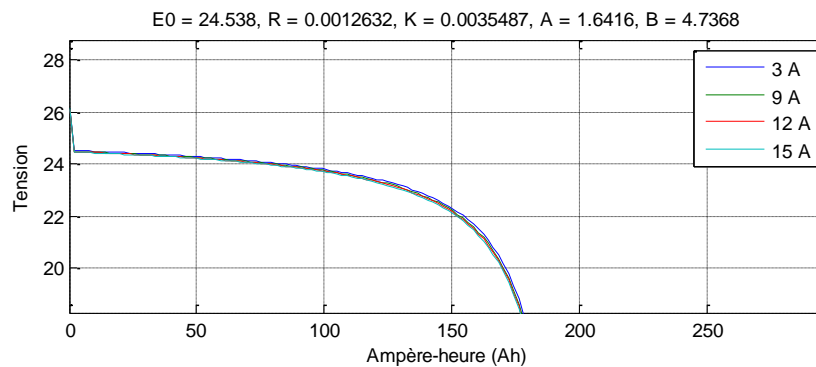
Les courbes ci-dessous montrent la variation de la courbe de décharge d'une batterie plomb-acide pour une valeur fixe du courant (courbe III.8) puis pour différentes valeurs de ce dernier (courbe III.9). L'allure de la courbe III.8 obtenue est très proche de la courbe théorique présentée précédemment. Le modèle reprend avec une assez bonne précision la courbe théorique.

La courbe III.9 quant à elle, présente les différentes allures des courbes de décharge en fonction du courant. On voit bien que le modèle prend en considération la variation du courant et présente très bien la dynamique de la tension contrairement au modèle simple.





**Figure III. 8:** Courbe de décharge d'une batterie Plomb-Acide pour un courant de 8A



**Figure III. 9:** Courbes de décharge d'une batterie Plomb-Acide pour différentes valeurs du courant

La figure III.9 représente la variation de la tension de décharge de la batterie pour différentes valeurs du courant de décharge. On voit bien que l'allure des courbes suit l'allure générale de la tension de décharge d'une batterie plomb acide obtenue théoriquement. Les résultats illustrent très bien le comportement dynamique du modèle.

Ce modèle donne une représentation adéquate du comportement réel et dynamique de la batterie.

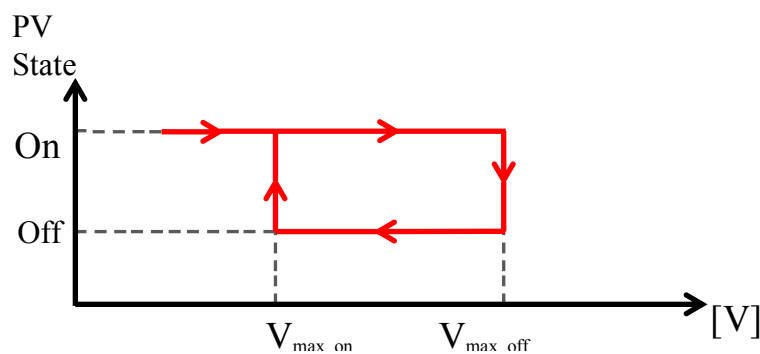
### III.3.4. Régulateur de charge/ décharge de la batterie

Tous les systèmes de puissance doivent avoir une stratégie de commande afin de décrire les interactions entre ses composants. L'utilisation de batteries pour le stockage implique la présence d'un régulateur de charge [42].

Le régulateur permet de contrôler l'écoulement de puissance du système PV, des batteries et des charges en collectant des informations sur la tension de la batterie et en connaissant les valeurs maximale et minimale acceptables de la batterie. Il existe deux modes d'opération du régulateur [40]:

- Condition de fonctionnement normal : lorsque la tension de la batterie varie entre la valeur maximale et la valeur minimale.
- Condition de surcharge ou de décharge : ceci se produit lorsque la tension de la batterie atteint une certaine valeur limite.

Afin de protéger la batterie contre une charge excessive, le générateur PV (module ou champ) est déconnecté du système lorsque la tension dépasse une certaine valeur seuil et quand le courant nécessaire à la charge est inférieur au courant fourni par le générateur PV.

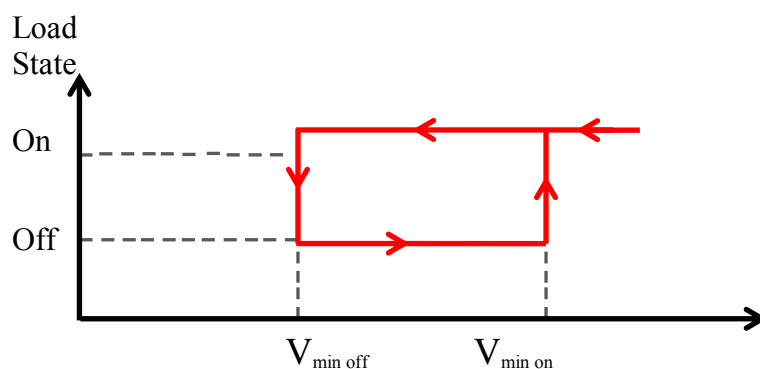


**Figure III. 10:** Protection contre les surcharges [40]

Le générateur PV est reconnecté lorsque la tension aux bornes de la batterie devient inférieure à la valeur maximale de la tension admissible. Ceci peut se faire en utilisant un switch à cycle d'hystérésis.

Afin de protéger la batterie contre des décharges excessives, la charge est déconnectée lorsque la tension devient inférieure à la tension minimale admissible et lorsque le courant nécessaire pour la charge est supérieur au courant délivré par le panneau.

La charge est reconnectée au système lorsque la tension devient supérieure à la valeur minimale admissible en utilisant un switch à cycle d'hystérésis



**Figure III. 11:** Protection contre les décharges [40]

Les différents cas peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2:** Récapitulatif du fonctionnement du contrôleur

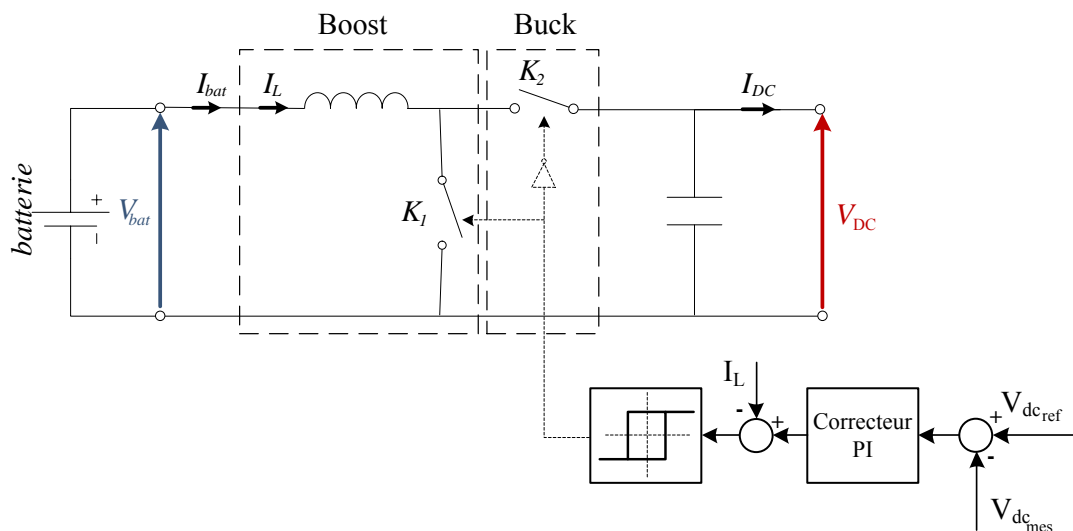
Cas	Commande
1 $V > V_{\max}$ et $I_{\text{charge}} < I_{\text{pv}}$	Déconnexion du générateur PV du système
2 Si la commande 1 est effectuée et $V < V_{\max}$	Reconnexion du générateur PV au système
3 Si $V < V_{\min}$ et $I_{\text{charge}} > I_{\text{pv}}$	Déconnexion de la charge du système
4 Si la commande 3 est effectuée et $V > V_{\min}$	Reconnexion de la charge au système

### III.3.5. Stabilisation du bus continu

Le système de stockage est composé d'un banc de batteries relié à un convertisseur réversible en courant ainsi que du système de control. Le système doit pouvoir permettre aux batteries soit de se charger lorsqu'il y a un excès d'énergie, ou bien de se décharger lorsque l'énergie produite est insuffisante pour alimenter la charge.

La batterie est connectée au bus continu via un hacheur Buck/Boost, comme indiqué à la figure III.12, Le banc de batteries sert à alimenter en puissance les besoins de la charge pendant une courte durée lors des fluctuations des irradiances ou encore les périodes de transitions.

L'objectif principal du convertisseur de la batterie est de maintenir la tension  $V_{dc}$  aux bornes du bus continu égale à une valeur de référence  $V_{dc\text{ref}}$ .

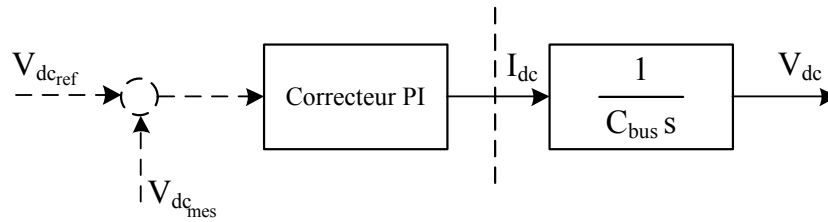


**Figure III. 12:** Principe de la régulation du bus continu

On peut assurer la régulation du bus continu et de la batterie, en utilisant un régulateur PI. Le signal à la sortie de ce correcteur est un courant de référence qu'on va comparer avec le

courant de la batterie, et grâce à un régulateur par hystérésis, on va contrôler le rapport cyclique du hacheur réversible en courant.

Pour la synthèse du régulateur PI, nous utiliserons la boucle de régulation suivante :



**Figure III. 13:** Boucle de régulation de la tension du bus continu

Le régulateur étant de la forme suivante :

$$C(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i}$$

Le système fonctionne comme suit :

Lorsque la tension aux bornes du bus continu est inférieure à la tension de référence, alors le courant de référence généré par le régulateur PI est positif, ce qui impose une décharge de la batterie en actionnant l'interrupteur  $K_1$ .

Si maintenant la tension  $V_{dc}$  est plus grande que  $V_{dc\_ref}$ , on a un courant de référence négatif, on va alors actionner l'interrupteur  $K_2$  ce qui va permettre à la batterie de se charger.

#### III.4. Modélisation de la chaîne photovoltaïque en mode isolé

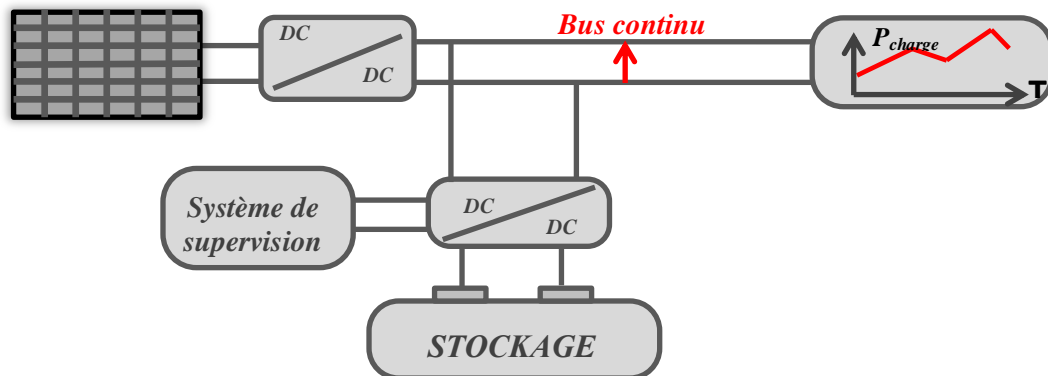
Les modélisations énergétiques des différents constituants d'un système photovoltaïque autonome, envisagés dans le chapitre précédent, ont été présentés séparément. Un niveau de modélisation adéquat a été utilisé dans l'optique de l'approche d'optimisation du fonctionnement de ce système.

Ce chapitre est consacré à la production en mode isolé et aux critères d'évaluation du système de stockage indispensable pour le fonctionnement de ce mode. Le choix de la technologie à utiliser ainsi que le modèle explicite de la batterie présenté sera utilisé pour la modélisation de la chaîne de production.

##### III.4.1. Architecture du système

La puissance envisagée dans ce système est de 200W, car le but de notre étude est le fonctionnement et le système de gestion dans le cas d'une production isolée, mais son principe est transposable à des puissances supérieures. L'architecture générale du système est présentée à la figure.III.14.

Ce réseau est paramétré par une puissance maximale souscrite ( $P_{PV_{max}}$ ) au-dessus de laquelle le stockage intervient pour fournir le surplus demandé.



**Figure III. 14:** Architecture du système SPAV étudié

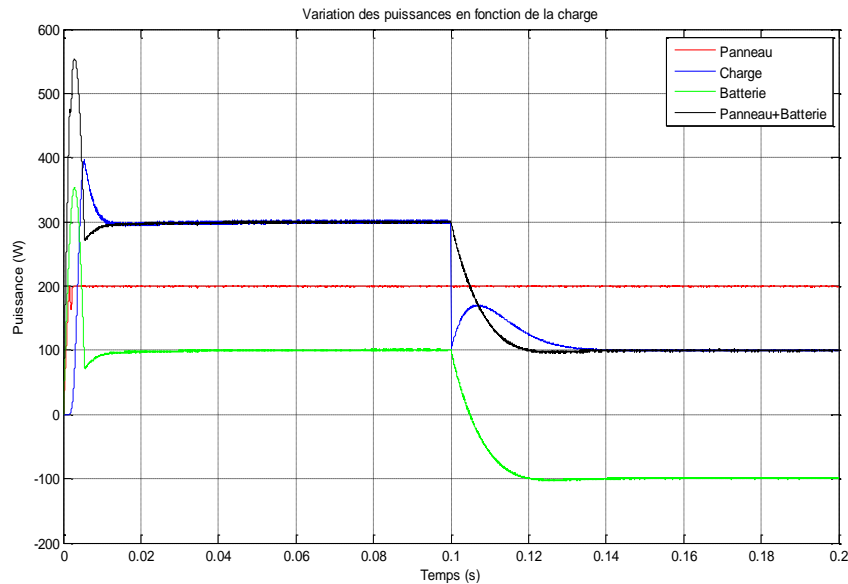
Il est possible d'y distinguer :

- Générateurs PV : La production PV est destinée à être consommée sur place ou stockée.
- Accumulateurs : Les accumulateurs électrochimiques Plomb-Acide sont utilisés en source d'appui pour fournir les consommateurs en situation de sous-production PV
- Convertisseurs :
  - Convertisseur DC/DC : Pour l'adaptation et la commande MPPT
  - Convertisseur batterie : Ce convertisseur a pour rôle de réguler les transferts d'énergie entre l'accumulateur et le reste du système. Il doit faire en sorte de protéger l'accumulateur en maintenant la tension à ses bornes dans une plage de variation prédéfinie et de réguler le bus continu.

### III.4.2. Résultats de simulation

- Variation des puissances du panneau, de la charge et de la batterie pour les deux modes de fonctionnement : Charge/Décharge :

On présente les résultats de simulation d'une installation PV autonome constituée d'un générateur PV et d'un étage d'adaptation (Hacheur DC/DC+MPPT, Batterie plomb-acide, un régulateur de charge/décharge, et le bus continu) dans des conditions de 25°C et 1000 W/m<sup>2</sup> pour une charge variable.

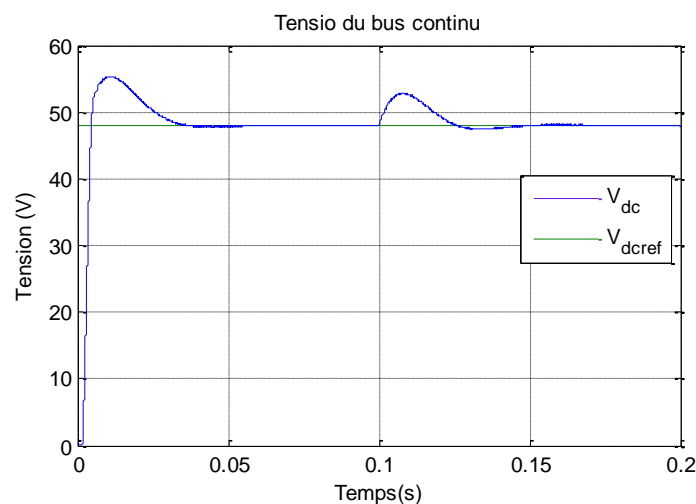


**Figure III. 15:** Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge)

Entre  $[0,0.1]$ s la production PV à la sortie du générateur est de l'ordre de 200 W, pour une charge consommant 300W. L'intervention de la batterie (mode: décharge) est immédiate afin d'assurer la puissance demandée par la charge et donc le système de supervision a assuré son rôle de contrôle d'écoulement de puissance entre les différents constituants de la chaîne avec rapidité (soit en moins de de 0.01s).

Dans l'intervalle de temps  $[0.1, 0.2]$  s, la demande de la charge baisse à 100W, imposant ainsi un régime de charge à la batterie car le générateur à lui seul assure son alimentation. Le surplus quant à lui est évacué dans l'accumulateur.

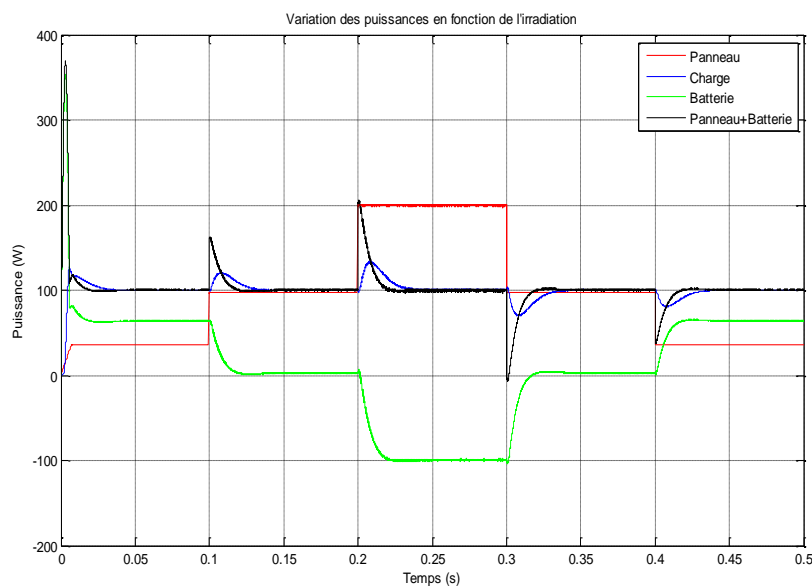
– Tension du bus continu :



**Figure III. 16:** Tension du bus continu

La Figure III.16 représente la tension du bus continu de la chaîne de production photovoltaïque précédente dans les mêmes conditions de température et d'irradiation ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{ W/m}^2$ ). On voit bien que le temps de régulation de la tension est assez rapide au début de la production et que la tension du bus suit la tension de référence imposée. Une légère fluctuation survient lors du changement de mode de la décharge de la batterie vers la charge mais elle est rapidement régulée. La régulation du bus continu est donc assurée par le système et les résultats obtenus sont validés.

- Variation des puissances du panneau, de la charge et de la batterie pour différentes irradiances à température constante de  $25^{\circ}\text{C}$  :

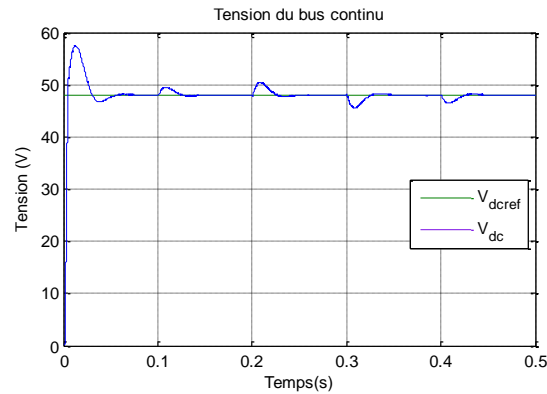


**Figure III. 17:** Variation des puissances du panneau, de la batterie et de la charge pour différentes irradiances

La figure ci-dessus présente les résultats de simulation de la même installation PV autonome dans une température ambiante de  $25^{\circ}\text{C}$ , et pour différentes irradiances dans le but d'alimenter une charge constante de  $100\text{W}$

La puissance délivrée par le panneau photovoltaïque varie en fonction de l'irradiation et lui est proportionnelle. La puissance donnée par la batterie change en fonction de la puissance produite par le panneau de façon à subvenir à la demande de la charge et la puissance totale délivrée est constante et égale  $100\text{W}$ .

Le temps de réponse du régulateur de charge/décharge est assez court. On remarque qu'à chaque changement d'irradiation l'apparition d'une légère fluctuation de la puissance totale délivrée à la charge mais elle est rapidement régulée.



**Figure III. 18:** Tension du Bus Continu pour différentes irradiances

La figure ci-dessus représente la tension du bus continu correspondante au fonctionnement de la chaîne PV pour les différentes irradiances présentée auparavant. On remarque une petite fluctuation de la tension du bus continu à chaque changement d'irradiation mais elle est rapidement prise en charge et stabilisée afin de revenir à la tension de référence imposée.

Le changement d'irradiation n'affecte pas la régulation du bus continu ce qui veut dire que le système est robuste face aux variations de l'ensoleillement.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre un système photovoltaïque autonome avec stockage plomb-acide. En considérant la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé qu'ils fonctionnaient dans des conditions optimales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT ; Maximum Power Point Tracking).

Les modèles des différents composants ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux :

- Le modèle des panneaux PV est précis et tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que de celle de la température,
- Les convertisseurs, grâce à leur commande robuste permettent de faire face aux forts appels de courant, de travailler dans les conditions optimales (Convertisseur PV) et d'assurer la charge et décharge (Convertisseur batterie), garantissant ainsi la sûreté de fonctionnement du système,
- La gestion du flux d'énergie est correctement assurée par le module de supervision.

Il est apparu que même avec les technologies actuelles qui disposent encore d'un potentiel de progrès, un système photovoltaïque autonome couplé à un système de stockage électrochimique consomme moins d'énergie primaire sur cycle de vie que lorsque l'utilisateur est connecté au réseau de distribution actuel.



---

## Chapitre IV

---

# Systeme Photovoltaïque en Mode Connecté au Réseau

---

*Les systèmes PV connectés au réseau gagnent de plus en plus de terrain puisque la demande de puissance dans le monde augmente. La disponibilité de ces sources d'énergie ainsi que leur respect pour l'environnement représentent des avantages majeurs par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, par contre leur efficacité et leur contrôlabilité restent leur principal désavantage. De plus, les opérateurs du système de transfert d'énergie doivent respecter certaines normes lorsque le système est connecté au réseau. Plusieurs critères doivent être satisfaits comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie. Par conséquent, plusieurs travaux de recherche concernent la commande de ces systèmes afin d'optimiser et d'améliorer leur fonctionnement. Tous les systèmes PV sont connectés au réseau à travers un onduleur de tension et un hacheur. L'onduleur étant l'interface de connexion au réseau, sa commande nécessite une régulation en courant, une régulation du bus continu et une synchronisation.*

## IV.1. Introduction

Les systèmes électriques connaissent une importante révolution depuis l'introduction de la production décentralisée et les sources d'énergie renouvelables au réseau électrique. L'intégration de différentes technologies conduit à une diversité croissante du réseau et engendre ainsi des normes plus restrictives [41].

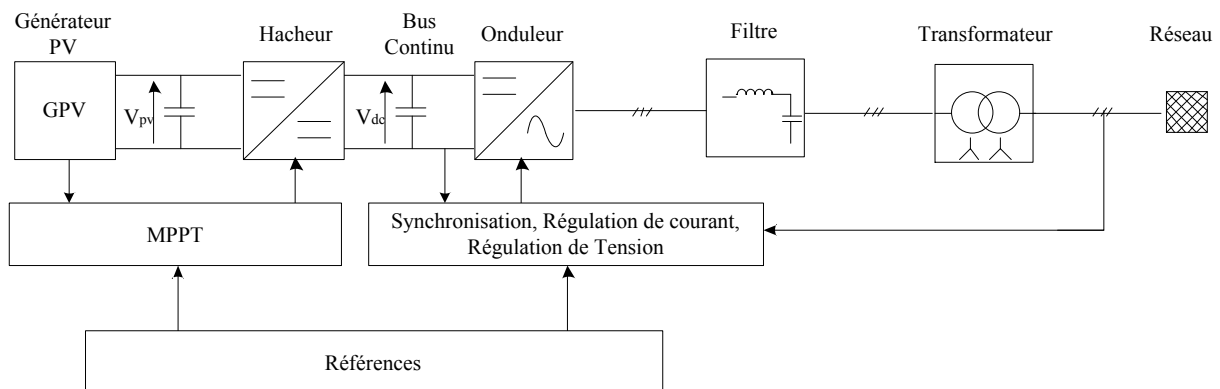
Plusieurs critères doivent être remplis pour satisfaire les exigences du réseau comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie [42].

La plupart de ces besoins peuvent être satisfaits avec une commande adéquate du convertisseur raccordé au réseau. Par conséquent, les sources d'énergie renouvelables utilisent des convertisseurs d'électronique de puissance pour adapter les paramètres de la puissance générée à ceux exigés par le réseau [41].

L'une des stratégies de commande les plus utilisées pour la production décentralisée de l'énergie est basée sur la commande par orientation de la tension en utilisant un régulateur pour le bus continu ainsi qu'un régulateur pour l'injection des courants dans le réseau. [42].

## IV.2. Configuration du système

La structure de l'étage d'adaptation pour la connexion du générateur PV au réseau est représentée par IV.1.



**Figure IV. 1:** Diagramme général d'un système PV connecté au réseau [42].

Toute la puissance produite par le panneau est transférée au réseau électrique. Le hacheur est relié directement au générateur PV, il permet d'élever la tension pour arriver à la valeur imposée au bus continu. Ce dernier est relié à un onduleur commandé en courant afin d'injecter celui-ci avec un facteur de puissance unitaire dans le réseau. Un filtre est utilisé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les distorsions de courant et de tension [42].

L'objectif de cette commande est de pouvoir contrôler les puissances active et réactive fournies au réseau par une régulation du courant [44]. La commande nécessite également la régulation de la tension du bus continu et une synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau.

### **IV.3. Stratégie de commande**

La commande utilise des contrôleurs PI standards pour réguler les courants à la sortie de l'onduleur dans une boucle interne et le bus continu dans une boucle externe. Une synchronisation doit être effectuée entre les tensions de sortie de l'onduleur et celles du réseau [42].

#### **IV.3.1. Synchronisation avec le réseau**

Pour pouvoir connecter un système au réseau, la tension de sortie de l'onduleur doit avoir la même fréquence que celle du réseau pour chacune des trois phases. Ceci peut se faire en déterminant l'angle de phase de la tension à partir d'une mesure directe du réseau [43].

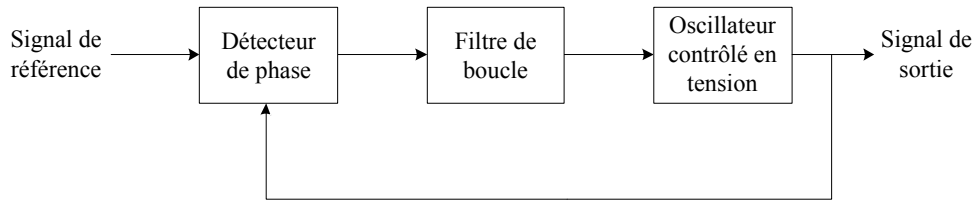
Cependant, les tensions réseau au point de raccordement peuvent comporter divers défauts et ils risquent de subsister dans le courant de sortie de l'onduleur. Il est donc important que le système de synchronisation puisse gérer ces distorsions. [43].

Parmi les méthodes envisageables, il en existe deux fréquemment utilisées. La première consiste à filtrer la tension mesurée. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle génère un déphasage non négligeable, qui est d'autant plus important que la fréquence de coupure du filtre passe bas est faible. La seconde est basée sur la détection du passage par zéro de la tension, ce qui permet d'en déduire la période et de reconstruire un signal sinusoïdal unitaire. Ce procédé est plus performant que le précédent, cependant il n'est pas optimum lors d'un saut de phase par exemple [46].

La méthode choisie est à base de PLL (Phase Locked Loop), elle produit un signal de sortie qui synchronise en phase et en fréquence le signal d'entrée en utilisant une boucle de régulation [45]. Le processus de synchronisation se fait en temps réel ce qui amène la boucle à fonctionner constamment [43].

##### **a. Structure générale de la PLL**

Un circuit PLL de base est généralement constitué de trois éléments : un détecteur de phase, un filtre de boucle et un oscillateur contrôlé en tension. On peut le représenter comme suit :

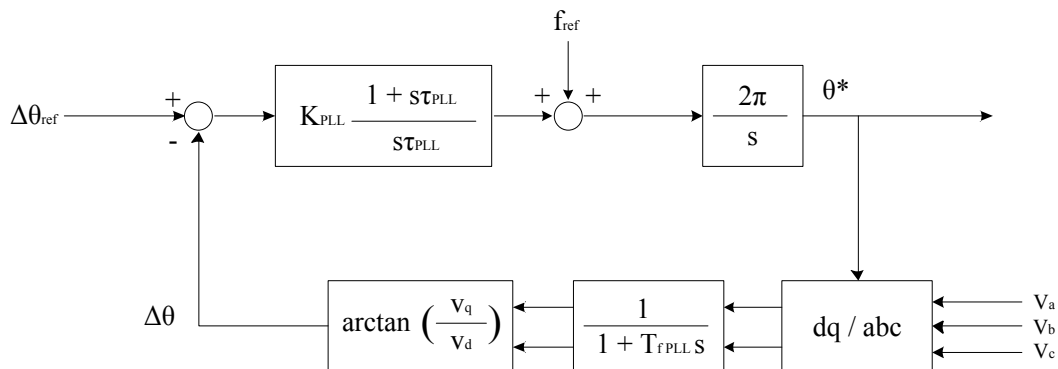


**Figure IV. 2:** Structure générale d'une PLL

- Le détecteur de phase est mis en œuvre en transformant les tensions dans le système dq. La différence de phase entre le signal de référence et le signal de sortie peut être extraite en appliquant une fonction arctangente. Ceci donne la différence de phase exacte. Mais cette différence de phase peut être trouvée indirectement en supposant qu'elle est nulle lorsque  $V_q=0$ .
- Le filtre de boucle est un régulateur qui annule l'erreur de phase. C'est généralement un régulateur PI, mais on peut utiliser des régulateurs avec un ordre supérieur. Un ordre élevé augmente la dynamique du système ainsi que ses capacités de filtrage mais ça augmente également la complexité du système. Ainsi, l'utilisation d'un régulateur PI nous donne un système du second ordre ce qui permet de régler la bande passante de la PLL et le facteur d'amortissement en utilisant la théorie des systèmes linéaires.
- L'oscillateur contrôlé en tension se trouve après le filtre de boucle (dont la sortie est une fréquence), c'est généralement un simple intégrateur qui nous donne la phase à la sortie.

**b. Principe de base de la PLL**

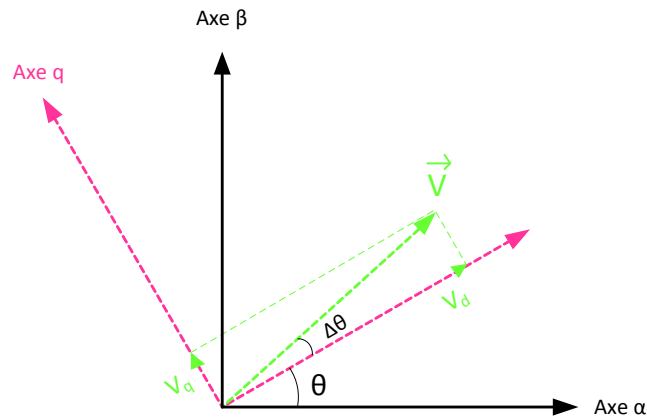
Le principe de la PLL est basé sur l'orientation de la tension du réseau suivant l'axe d, ceci revient à annuler l'angle entre la composante de la tension d'axe direct et la tension mesurée ce qui entraîne l'annulation de la composante en quadrature. Ce principe est représenté dans la figure ci-dessous :



**Figure IV. 3:** Boucle de Contrôle de la PLL [44].

Puisque la valeur de  $V_q$  est faible, le terme  $\arctan\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \approx \frac{V_q}{V_d}$  se comporte linéairement et  $\frac{V_q}{V_d} \approx \Delta\theta$ . Ainsi, la PLL peut être considérée comme une commande linéaire pour des fins de modélisation.

Pour avoir le vecteur de la tension aligné sur l'axe direct on pose  $\Delta\theta_{ref}=0$ . Si l'angle de la tension est supérieur à l'angle de l'axe d, la vitesse angulaire du repère d-q doit être augmentée. La figure IV.4 représente les différentes variables.



**Figure IV. 4:** Représentation du vecteur V dans le repère dq

Une fréquence d'anticipation  $f_{ref}$  (feed forward frequency) de 50Hz est utilisée pour réduire le temps de réponse de la PLL [44].

### c. Dimensionnement du régulateur

Un régulateur PI peut être appliqué dans chacun des repères stationnaire  $\alpha\beta$  et synchrone dq.

Dans un système dq nous avons des grandeurs fixes, ainsi, l'application du contrôleur PI permet de réduire l'erreur du fondamental à zéro. Ceci n'est pas le cas avec les régulateurs PI dans le repère  $\alpha\beta$  où il y a une erreur de suivi de phase et d'amplitude. C'est pour ça que la commande dans le repère synchrone, en utilisant des contrôleurs PI, est la solution idéale pour les onduleurs triphasés connectés au réseau.

Dans la forme générale, le régulateur PI est défini comme suit :

$$H_{PI}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \quad (IV. 1)$$

La boucle de régulation est alors donnée par la figure IV.5

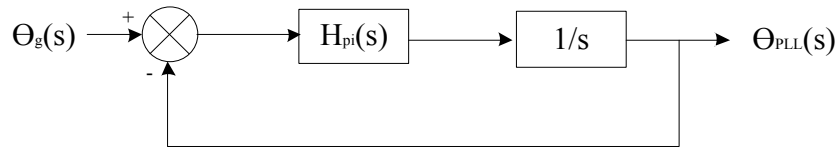


Figure IV. 5: Modèles de la PLL

La fonction de transfert en boucle fermée avec l'angle du réseau en entrée et l'angle de la PLL en sortie est donnée par :

$$M(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (IV.2)$$

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \\ \xi = \frac{K_p}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{K_p T_i}}{2} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Les paramètres de la boucle du second ordre doivent satisfaire :

$$\begin{cases} \omega_0 \geq 2\pi f_0 \\ \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (IV.4)$$

Le choix d'une basse fréquence assure un bon filtrage mais une valeur élevée permet de trouver rapidement la phase et d'assurer le suivi.

### IV.3.2. Régulation en courant

Le but de cette commande est d'imposer les valeurs des puissances active et réactive injectées au réseau.

Soit la figure de la connexion au réseau

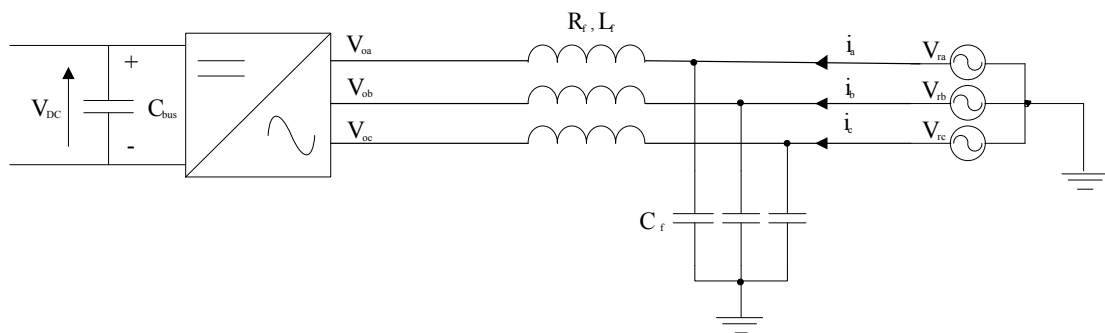


Figure IV. 6: Représentation de la connexion Onduleur- Réseau

En négligeant les courants qui passent dans les capacités du filtre

$$V_{r,k} = R_f i_k + L_f \frac{di_k}{dt} + V_{o,k}, \quad k = a, b, c \quad (IV.5)$$

Avec

$V_{o,k}$  : Tension à la sortie de l'onduleur

$V_{r,k}$  : Tension du réseau

$i_k$  : Courant de la ligne

$R_f, L_f$  : Valeur de l'impédance de la partie inductive du filtre

On peut représenter cette équation sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f + L_f s & 0 & 0 \\ 0 & R_f + L_f s & 0 \\ 0 & 0 & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix} \quad (IV.6)$$

On utilise la transformation de Park pour passer au repère synchrone dq :

$$P(\theta) \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{pmatrix} P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \left( P(\theta) \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \right) + P(\theta) \begin{pmatrix} V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o3} \end{pmatrix} \quad (IV.7)$$

Où  $P(\theta)$  représente la matrice de Park

L'utilisation des propriétés matricielles classiques permet d'obtenir le système d'équations suivant :

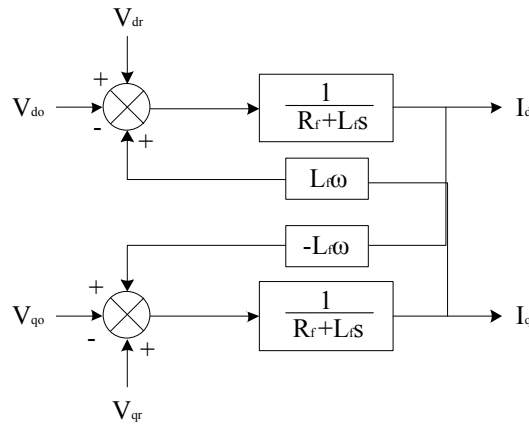
$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{do} \\ V_{qo} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f & -L_f \omega \\ L_f \omega & R_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (IV.8)$$

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{do} \\ V_{qo} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f + L_f s & -L_f \omega \\ L_f \omega & R_f + L_f s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (IV.9)$$

On a donc le système suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \omega i_q + V_{do} \\ V_{qr} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \omega i_d + V_{qo} \end{cases} \quad (IV.10)$$

En utilisant ces équations électriques, on obtient le schéma équivalent du réseau :



**Figure IV. 7:** Schéma équivalent du réseau électrique dans le repère dq

Où les termes  $L_r \omega i_{dq}$  représentent les termes de couplage entre les axes d et q, ceci rend la régulation très complexe. Ainsi, on procède à une méthode de découplage par compensation qui consiste à ajouter une précommande à la boucle de régulation interne [47].

Le contrôle des courants suivant les axes d et q permet de contrôler les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{dref} + V_{rq} i_{qref}) \\ Q_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{dref} - V_{rd} i_{qref}) \end{cases} \quad (IV. 11)$$

Puisqu'on utilise une PLL, la composante en quadrature de la tension du réseau sera nulle ( $V_{rq} = 0$ ), le système devient :

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{dref}) \\ Q_{ref} = -\frac{3}{2} (V_{rd} i_{qref}) \end{cases} \quad (IV. 12)$$

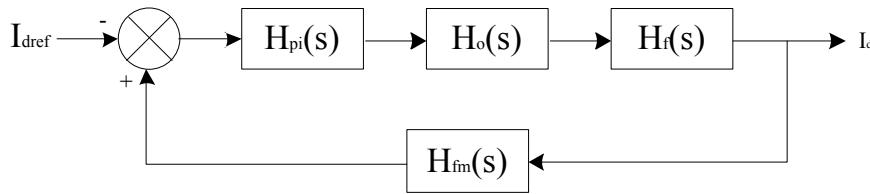
Où  $Q_{ref}$  représente la puissance réactive de référence qui permet d'avoir  $i_{qref}$ . Elle est égale à la puissance réactive requise par la charge. Tandis que  $i_{dref}$  est donnée par la boucle de régulation de la tension du bus continu.

On peut déduire du système (IV.12) que le courant  $i_{dr}$  est une image directe de la puissance active alors que le courant  $i_{qr}$  est une image de la puissance réactive [15].

Pour ce qui est de la boucle de régulation des courants, il y a deux régulateurs : un pour le courant suivant l'axe d et l'autre pour le courant suivant l'axe q. Ces deux régulateurs fonctionnent pour le même modèle et sont identiques, il n'est donc nécessaire d'estimer les paramètres que d'un seul régulateur.



La boucle de commande du courant, suivant l'axe d, peut être modélisée comme suit :



**Figure IV. 8:** Boucle de régulation du courant d'axe direct

La boucle suivant l'axe q est similaire.

Dans ce modèle, toutes les non linéarités ainsi que le bruit de la tension de sortie sont ignorés pour des fins de simplification. Les blocs de la figure IV.8 sont décrits comme suit :

$H_o$  : Cette fonction de transfert représente le temps de retard provoqué par l'onduleur ( $T_o$ ), ce retard est égale à 1.5 fois le temps d'échantillonnage

$$H_o(s) = \frac{1}{1 + sT_o} \quad (\text{IV. 13})$$

$H_{fm}$  : Représente la fonction de transfert du filtre de mesure qui engendre un temps de retard  $T_{fm}$ . Il est utilisé dans un système pratique pour réduire les bruits indésirables dus à la mesure. C'est un filtre digital du premier ordre.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (\text{IV. 14})$$

$H_f$  : Représente la fonction de transfert du filtre de sortie (partie inductive), elle décrit les changements du courant de sortie à une variation de la tension d'entrée de l'onduleur.

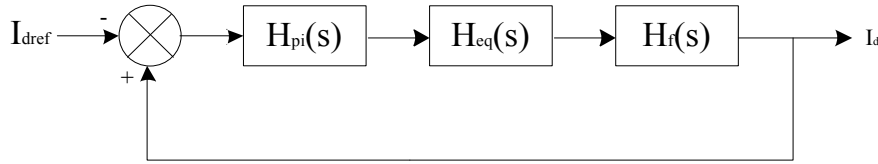
$$H_f(s) = \frac{1/R_f}{1 + sT_f} \quad (\text{IV. 15})$$

Avec

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (\text{IV. 16})$$

La constante de temps  $T_f$  caractéristique de la partie inductive du filtre de sortie de l'onduleur, est dominante par rapport aux autres constantes de temps (du filtre de mesure et de l'onduleur). Ainsi, on peut réduire le modèle en additionnant les constantes de temps petites.

On obtient le modèle suivant :



**Figure IV. 9:** Boucle de régulation réduite du courant

Avec :

$$H_{eq}(s) = \frac{1}{1 + T_{eq}s} \quad (IV. 17)$$

Et le temps de retard équivalent :

$$T_{eq} = T_o + T_{fm} \quad (IV. 18)$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \frac{1}{1 + T_{eq} s} \frac{1/R_f}{1 + T_f s} \quad (IV. 19)$$

Afin de compenser le pôle de temporisation élevée, le régulateur PI est utilisé. Ceci conduit à un temps d'intégration qui est égal à la grande constante de temps. Ce qui donne la fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{\frac{K_p}{R_f}}{T_i s(1 + sT_{eq}) + \frac{K_p}{R_f}} \quad (IV. 20)$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_{eq}} s + \frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \quad (IV. 21)$$

C'est une fonction du second ordre de la forme :

$$M(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (IV. 22)$$

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{K_p}{T_i T_{eq} R_f}} \\ \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i R_f}{K_p T_{eq}}} \end{cases} \quad (IV. 23)$$

Le facteur d'amortissement  $\xi$  est pris égal à  $1/\sqrt{2}$  pour avoir le meilleur temps de réponse avec un dépassement minimal.

Ainsi, on obtient :

$$\begin{cases} T_i = T_f \\ K_p = \frac{T_i R_f}{2T_{eq}} \end{cases} \quad (IV. 24)$$

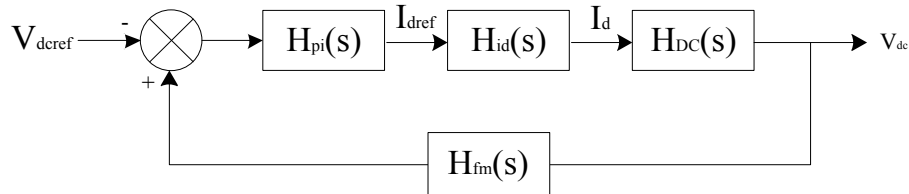
### IV.3.3. Régulation de la tension du bus continu

La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active au le réseau.

Suite à un écart entre  $V_{dc\_ref}^2$  et  $V_{dc}^2$ , la puissance  $P_{ref}$  s'ajoute à la puissance active fluctuante et donne lieu à un courant fondamental actif ( $i_{dref}$ ) corrigeant ainsi la tension  $V_{dc}$ .

Le contrôleur de la tension se trouve dans la boucle externe. La sortie de ce régulateur donne une référence pour le contrôleur du courant suivant l'axe d dans la boucle interne.

La boucle de commande de la tension peut être modélisée comme suit :



**Figure IV. 10:** Boucle de régulation de la tension du bus continu

Les blocs de la figure sont décrits comme suit :

$H_{fm}$  : Représente la fonction de transfert du filtre de mesure

Afin de réduire les bruits indésirables dus à la mesure on utilise un filtre digital du premier ordre ce qui engendre un retard  $T_{fm}$ .

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1 + sT_{fm}} \quad (IV. 25)$$

$H_{id}$  : Représente la fonction de transfert du contrôleur du courant suivant l'axe d.

Afin de pouvoir utiliser le critère du symétrique optimum, le système doit être approximé par un système du premier ordre. Ceci peut être justifié en sachant que la boucle de contrôle externe doit être plus lente que la boucle de contrôle interne.

On rappelle la forme de la fonction de transfert de la boucle interne :

$$M(s) = K \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} \quad (\text{IV. 26})$$

Pour des fréquences inférieures à  $\omega_0$  :

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 \ll 1 \quad (\text{IV. 27})$$

Et le système peut être approximé par un système du premier ordre :

$$H_{id}(s) = \frac{1}{\frac{2\zeta}{\omega_0} s + 1} = \frac{1}{4\xi^2 T_{eq} s + 1} \quad (\text{IV. 28})$$

$$H_{id}(s) = \frac{1}{1 + 2T_{eq} s} \quad (\text{IV. 29})$$

$H_{DC}$  : Représente la fonction de transfert entre le courant d'axe d et la tension du bus continu. Elle est donnée par :

$$H_{DC}(s) = K_{DC} \frac{1}{C_{DC} s} \quad (\text{IV. 30})$$

La constante  $K_{DC}$  relie le courant d'axe d au courant continu. Cette relation peut être retrouvée en considérant la conservation de la puissance et la relation entre la tension du bus continu et la tension suivant l'axe d.

Conservation de la puissance :

$$V_{DC} I_{DC} = \frac{2}{3} V_d I_d \quad (\text{IV. 31})$$

Et la tension à la sortie de l'onduleur :

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{DC} r \quad (\text{IV. 32})$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{ab} = \frac{1}{2} V_{DC} r \quad (\text{IV. 33})$$

En combinant les relations (IV.31) et (IV.33) on trouve  $K_{DC}$

$$K_{DC} = \frac{I_{DC}}{I_d} = \frac{3V_d}{2V_{DC}} = \frac{3}{4} r \quad (\text{IV. 34})$$

Où  $r$  représente le rapport de modulation.

Le système de contrôle de la tension contient deux retards qui sont du même ordre de grandeur, on peut donc les additionner pour avoir une seule constante de temps. Ainsi, le système va satisfaire le critère de l'optimum symétrique où il y a un intégrateur, plusieurs constantes de temps de retard et un régulateur PI. La fonction de transfert en boucle ouverte du système de commande de la tension est donnée par :

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + (2T_{eq} + T_{fm})s} \quad (IV. 35)$$

$$H_{BO}(s) = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i s^2} \frac{1}{1 + Ts} \quad (IV. 36)$$

Avec

$$T = 2T_{eq} + T_{fm} \quad (IV. 37)$$

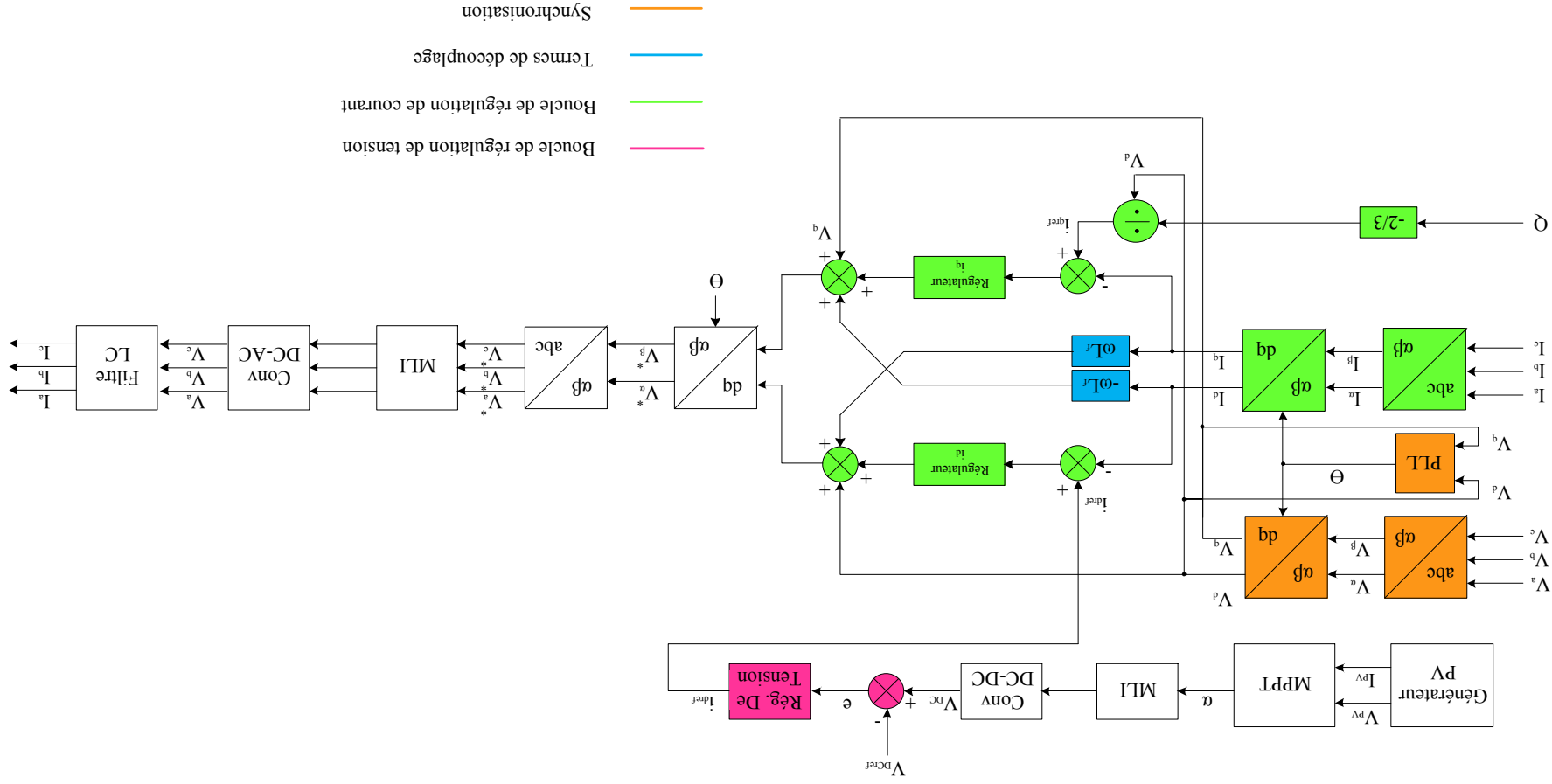
La fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = K_p K_{DC} \frac{1 + T_i s}{C_{DC} T_i T s^3 + C_{DC} T_i s^2 + K_p K_{DC} T_i s + K_p K_{DC}} \quad (IV. 38)$$

Cette fonction de transfert satisfait le critère de l'optimum symétrique, ainsi selon ce critère on a :

$$\begin{cases} T_i = 4T \\ K_p = \frac{1}{2} \frac{C_{DC}}{K_{DC} T} \end{cases} \quad (IV. 39)$$

La structure de la commande totale de la connexion au réseau est représentée dans la figure (IV.11) ci-dessous.

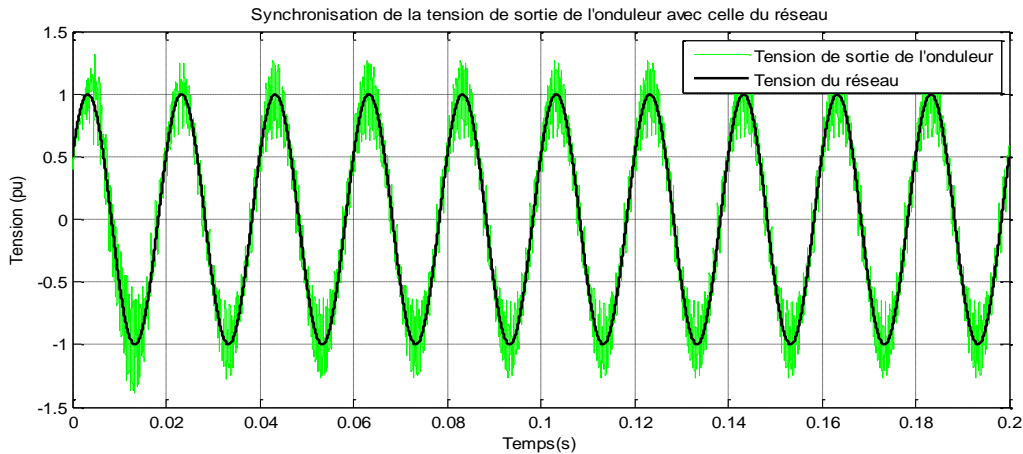


**Figure IV. 11:** Système de contrôle du système connecté au réseau

#### IV.4. Résultats de simulation

##### a- Synchronisation avec le réseau

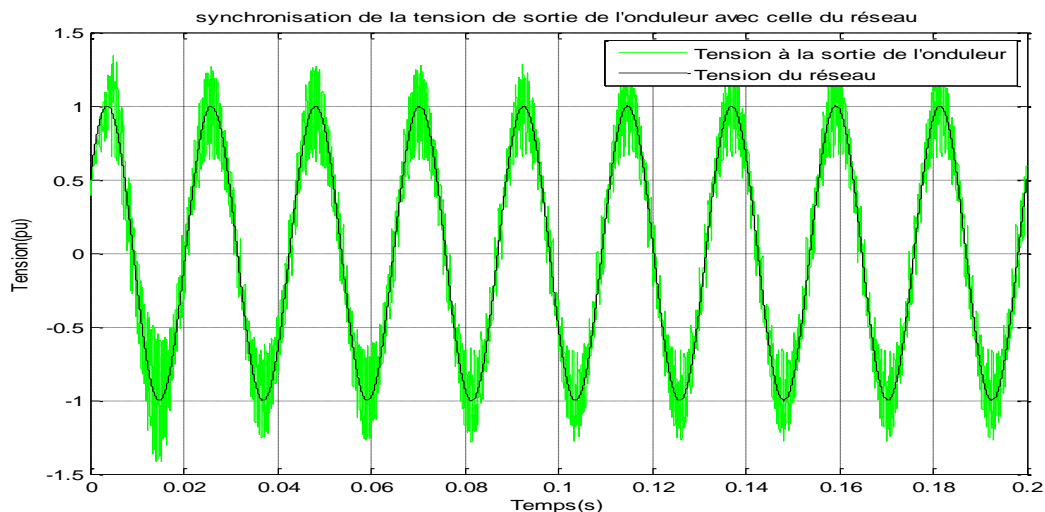
Afin d'effectuer la synchronisation, on utilise la boucle illustrée par la figure IV.3 en prenant  $\Delta\theta_{ref} = 0$  et  $f_{ref} = 50\text{Hz}$  (fréquence du réseau). Les résultats obtenus sont illustrés par la figure ci-dessous



**Figure IV. 12:** Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau

On voit bien que la tension délivrée par l'onduleur est synchronisée avec celle du réseau, ce qui montre l'efficacité de notre boucle PLL.

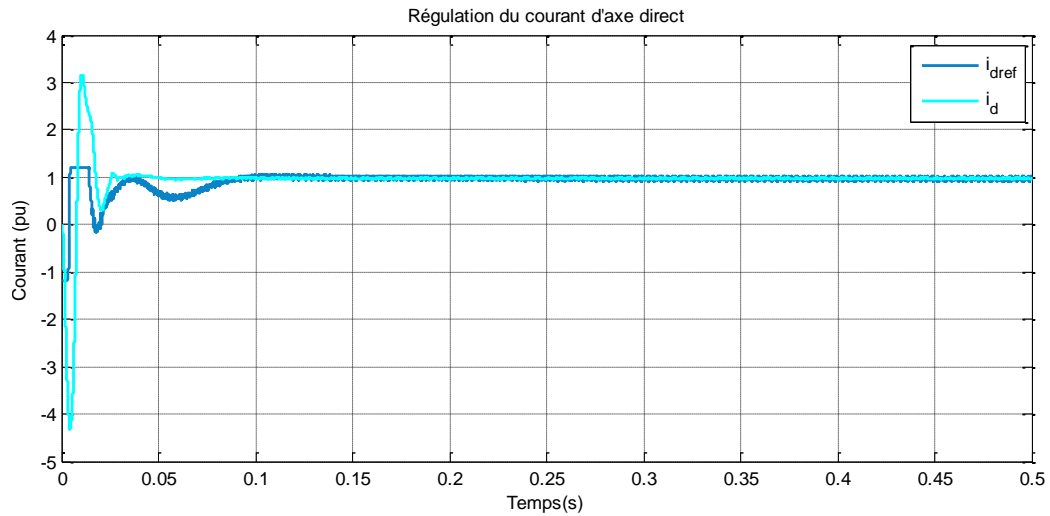
Dans la pratique, la fréquence du réseau n'est pas exactement égale à 50Hz, on admet une marge de variation de  $\pm 2\text{Hz}$  (entre 48 et 52 Hz). On va tester notre PLL en prenant une fréquence du réseau égale à 45 Hz et en gardant la valeur  $f_{ref} = 50\text{Hz}$ . on obtient les résultats suivants :



**Figure IV. 13:** Synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau (pour une tension du réseau égale à 45Hz)

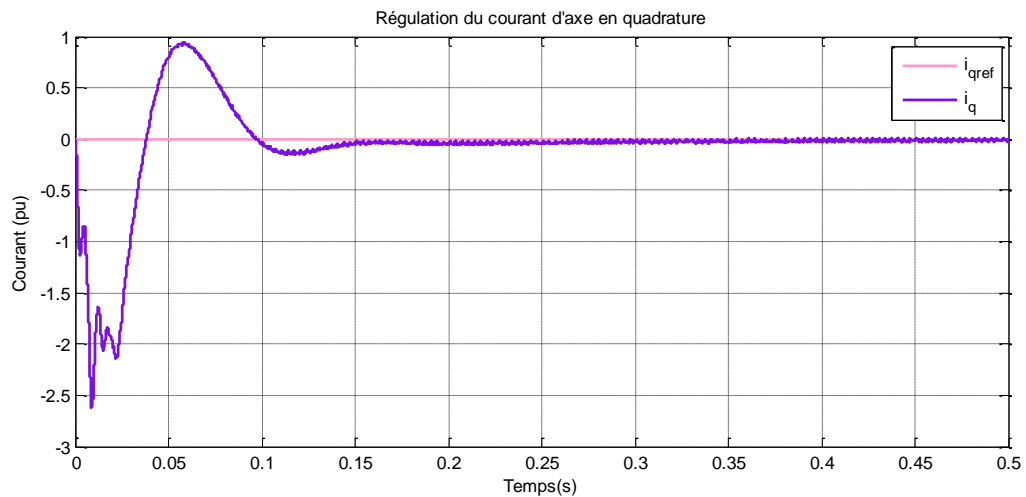
Ces résultats montrent la robustesse de notre PLL dans la poursuite de l'angle de phase puisque malgré le changement de la fréquence, les tensions sont synchronisées.

### b- Régulation des courants



**Figure IV. 14:** Régulation du courant d'axe direct

Le courant de référence d'axe direct est donné par le régulateur de la boucle externe, on voit bien que le courant  $i_d$  suit la valeur de référence ce qui prouve l'efficacité et la robustesse du régulateur PI utilisé.

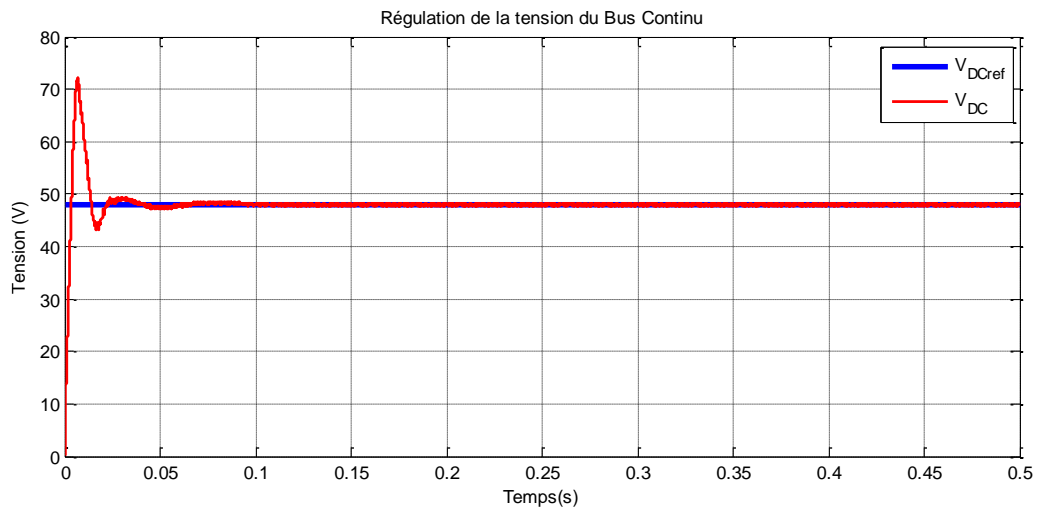


**Figure IV. 15:** Régulation du courant d'axe en quadrature.

Nous avons imposé un courant de référence pour l'axe en quadrature égal à zéro afin d'avoir un facteur de puissance unitaire au réseau. On voit que ce courant suit la valeur de référence ce qui prouve, encore une fois, l'efficacité du régulateur PI utilisé.



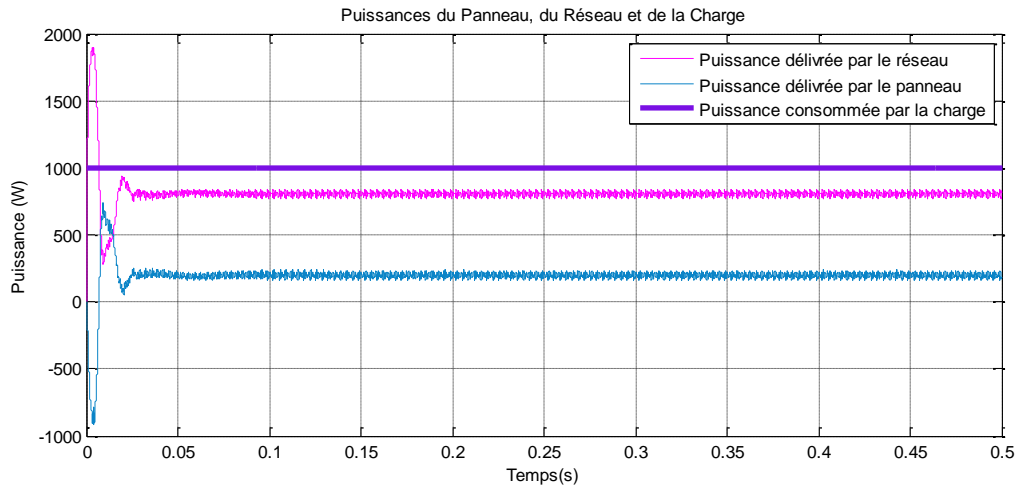
### c- Régulation de la tension du bus continu



**Figure IV. 16:** Régulation de la tension du bus continu

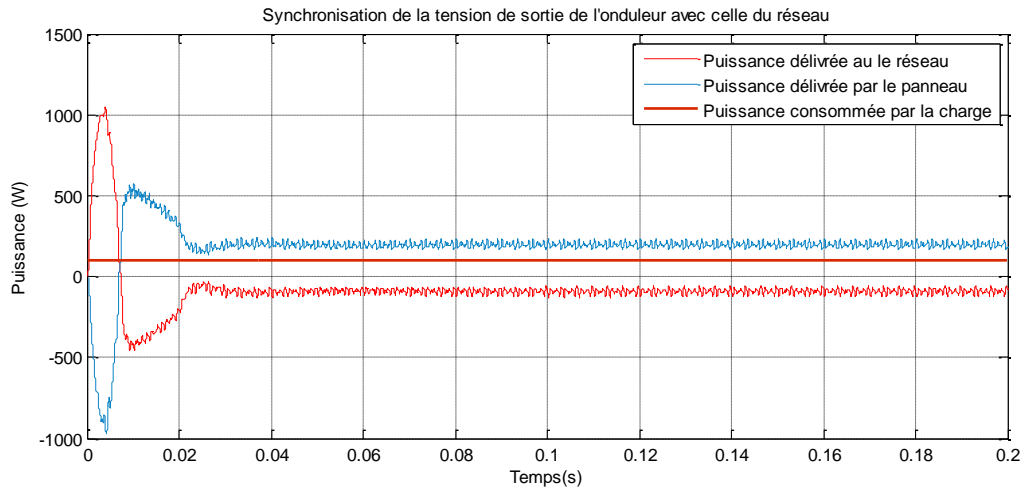
La tension de référence du bus continu a été fixée à 48 V, on voit bien l'efficacité du régulateur PI, utilisé dans la boucle externe, dans l'annulation de l'erreur puisque la tension de sortie est égale à la tension de référence.

### d- Écoulement de puissance



**Figure IV. 17:** Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 1000W.

Nous avons connecté au réseau une charge qui consomme 1000 W, on voit bien que le générateur PV fournit la totalité de sa puissance, soit 200W, à cette charge et c'est le réseau qui va compléter la suite de la puissance nécessaire, soit 800 W



**Figure IV. 18:** Écoulement de puissance pour une charge qui consomme 100W.

Pour ce cas, nous avons connecté au réseau une charge qui consomme du 100 W, on voit que le générateur PV fournit toujours les 200 W. Comme la charge ne consomme pas la totalité de la puissance, c'est le réseau qui reçoit le reste, soit 100 W.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé la chaîne photovoltaïque et nous avons étudié la stratégie de commande nécessaire à la connexion au réseau. Cette commande est assurée par :

- La synchronisation 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.
- La régulation des courants de référence afin de pouvoir contrôler l'injection des puissances active et réactive en fonction des besoins de la charge.
- La régulation de la tension du bus continu

La validation des résultats est obtenue par les réponses des tensions, courants et puissances obtenus par simulation.

## Conclusions Générales et Perspectives

---

Le monde de l'énergie photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour cette source d'énergie. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières et les technologies de convertisseurs existantes, et d'en consolider de nouvelles.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome puis connecté au réseau. On a donc, commencé par une présentation de l'état de l'art des multiples technologies associées aux constituants d'une chaîne photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement de ces systèmes.

Pour le faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents modèles des composants constituant le système. Les modélisations considérées ont été choisies de manière à régir le fonctionnement de chaque équipement, en optant pour des modèles à la fois simples et performants.

Dans le chapitre III, nous avons présenté, en appréhendant de façon complète les problèmes de fonctionnement à un point optimal, l'association d'une source de stockage efficace pour le fonctionnement en mode isolé. Les modèles des différents composants déjà présentés en détail dans le chapitre II, ont été repris pour l'élaboration du modèle entier de la chaîne. Nous avons garanti l'autonomie du système grâce à une batterie d'appoint, et un régulateur qui lui est associé, afin d'assurer l'alimentation de la charge, en manque ou en absence de production PV. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du système de gestion d'énergie utilisé, qui a assuré l'harmonisation de l'écoulement de puissance entre générateur photovoltaïque, charge, et système de stockage dans différentes conditions d'éclairement. La mise en place d'une boucle de régulation de tension moyennant

un convertisseur DC/DC entre la batterie et le bus continu nous a permis de stabiliser ce dernier et éviter les fluctuations.

Quant au chapitre IV, Il a été consacré à la connexion au réseau de notre chaîne de production PV. On a pu constater que la commande de la connexion au réseau est complètement différente de la commande en mode isolé. En effet, pour ce mode on s'est intéressé principalement à la puissance injectée dans le réseau, la synchronisation nous a permis de ne pas déformer les tensions du réseau, la régulation des courants a servi au contrôle des puissances actives et réactives et enfin la régulation de la tension du bus continu a maintenu la tension constante à l'entrée de notre onduleur.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- Le rendement maximal théorique des cellules de troisième génération obtenu en laboratoire tourne autour de 45%, ce qui fait rêver les industriels autant que les chercheurs. Les filières : multi-jonctions, organiques, et à concentration... représentent une importante piste à explorer afin de rentabiliser le photovoltaïque.
- Un travail approfondi pourra être consacré à l'étage de conversion entre les panneaux PV et le bus continu afin d'explorer de nouvelles structures de convertisseurs présentant des pertes moins importantes et donc des rendements plus élevés.
- Au niveau du stockage, la technologie lithium-ion est à l'heure actuelle prometteuse en raison d'une meilleure tenue en cyclage ainsi que de meilleurs rendements annoncés en charge comme en décharge. Cette piste est intéressante à explorer notamment, pour les systèmes autonomes.
- Pour la production photovoltaïque connectée au réseau, les études actuelles prouvent que la rentabilité de cette dernière sera atteinte lors de l'association d'un système de stockage approprié et une bonne gestion de puissance qui assurera la constance de la puissance fournie.

- [1] Daniel LINCOT, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345, Janvier-Février 2007, France.
- [2] Cédric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [3] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [4] Ludovic PROTIN, Stéphan ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [5] Anne LABOURET, « Cellules Solaires, Les bases de l'énergie photovoltaïque », Éditions techniques et scientifiques françaises, Paris, 2010.
- [6] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy, « le pompage photovoltaïque », Editions MultiMondes, Québec, 2000.
- [7] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [8] Talbi Said, Riah Rachid, « Comparaison et synthèse d'un nouvelle algorithme MPPT robuste pour une chaîne de production d'énergie photovoltaïque », Projet de fin d'études, ENP, Juin 2011.
- [9] Salah Mohamed AIT-CHEIKH, « Étude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », doctorat d'état en Automatique, ENP, 2007.
- [10] Arjav Harjai, Abhishek Bhardwaj, Mrutyunjaya Sandhibigraha, « Study of maximum power point tracking (MPPT) techniques in a solar photovoltaic array », Bachelor of Technology, National Institute of Technology, India, 2009
- [11] L.Zarour, « Étude et réalisation d'une alimentation d'un centre de transmission à travers une source d'énergie photovoltaïque », Projet de fin d'études, EMP, Juin 2004
- [12] ABD ALMULA G.M. GEBREEL, « Simulation and implementation of two level and three level inverters by MATLAB and RT-LAB », Master of Science in Electrical and Computer Science, Ohio State University, 2011
- [13] REHAHLA Salah, CHAHMI Nacer, « Etude et réalisation d'un onduleur MLI triphasé pour banc d'essai avion », Projet de fin d'études, EMP, 2004.

- [14] G.Pinson, « Onduleurs », Cours de physique appliquée, Académie d'Aix-Marseille, 2008
- [15] Lyes ABBASSEN, « Étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Thèse de magister, UMMTO, 2011
- [16] Rafika DRARENI, Zahra OUAHRANI, « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC », Projet de fin d'études, ENP, 2009.
- [17] Akassewa Tchapo SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2010.
- [18] M. Claude LISHOU, « Étude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes photovoltaïques à stockage d'énergie. Application à la sûreté de fonctionnement de centrales solaires hybrides », Thèse de doctorat, Université CHEIKH ANTA DIOP, Dakar, 1998.
- [19] Yaël Thiaux, « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides. Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion », Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de CACHAN, Juillet 2010.
- [20] Dariga MEEKHUN, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [21] N. Pandiarajan, R. Ramaprabha, Ranganath Muthu, « Application of circuit model for photovoltaic energy conversion system », International Journal of Photoenergy, India, 2011.
- [22] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, NO. 5, Mai 2009
- [23] A.Rufer, P.Barrade, « Cours d'électronique de puissance, Conversion DC/DC », EPFL, Lausanne, 2008.
- [24] SAURABH KASAT, « Analysis, Design and Modeling of DC-DC Converter Using SIMULINK », Bachelor of Engineering, Institute of Engineering and Technology, India, 2004.
- [25] Snehasish Pal, Suvarun Dalapati, « Digital simulation of two level inverter based on space vector pulse width modulation », Indian Journal Of Science and Technology, Vol. 5 No.4, India, April 2012

- [26] A.TSAMDA, K.MAHMOUD., « Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques », Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Juin 2007
- [27] Ahmed-Mahmoud Ashraf, «Power conditioning unit for small scale hybrid PV-Wind generation system », thesis of doctor of philosophy, School of Engineering and Computing Sciences Durham University, 2010.
- [28] James P. Dunlop, P.E, « Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems», Florida Solar Energy Center & Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Applications Dept. Publication, Cocoa, January 1997.
- [29] Caisheng Wang et al « Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System», IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 23, NO. 3, September 2008.
- [30] Di LU, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain», Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, Décembre 2010
- [31] Belhadj Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », thèse de magister, Centre universitaire de Bechar, 2007.
- [32] S. J. Chiang et al, « Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter», IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 11, NOVEMBER 2009.
- [33] Jean-Claude MULLER, « Électricité photovoltaïque », technique de l'ingénieur, Institut d'électronique du solide et des systèmes InESS, 2001
- [34] N. Achaïbou, « Introduction à l'Étude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », publication, Revue des Énergies Renouvelables. : Valorisation (1999)
- [35] Rémi SAISET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. », thèse de doctorat en sciences en Génie Électrique, Institut national polytechnique de TOULOUSE, 2004.
- [36] ZAROUR LAID, « Étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau», thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, université MENTOURI Constantine juillet 2010.

- [37] M. Drif et al, « Expérimentation d'un Contrôleur de l'État de Charge de la Batterie dans un Système Photovoltaïque Autonome », Publication, Revue des Énergies Renouvelables : Valorisation (1999)
- [38] A. Ould Mohamed Yahya et al, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) », Revue des Énergies Renouvelables Vol. 10 N°2, 2007.
- [39] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, « Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications », Publication, World Electric Vehicle Journal Vol 3, Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009
- [40] IONEL LAURENTIU ALBOREANU et al, « Modeling and Simulation of Stand-Alone Photovoltaic System », WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS, Spain, 2008.
- [41] M. BOBROWSKA-RAFAL, K.RAFAL, M. JASINSKI, M.P. KAZMIERKOWSKI, « Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters », Bulletin of the polish academy of sciences Vol, 59, No 4, Warsaw, 2011.
- [42] N. Hamrouni, A.Chérif, « Modelling and control of a grid connected photovoltaic system », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°3, Tunis, 2007
- [43] Jim Ögren, « PLL design for inverter grid connection », UPPSALA Universitet, 2011.
- [44] Tarjei Midtsund, « Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems », Master Of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [45] Svein Erik Evju, « Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design », Master Of Science In Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2007
- [46] Yann PANKOW, « Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2004
- [47] Farid BOUCHAFAA, « Étude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC, Application à la conduite d'une MSAP », Thèse de Doctorat, ENP, 2006



- [48] B. Flèche, D. Delagues, « Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE », cours Electrotechnique, Juin 2007
- [49] M.O.MAHMOUDI, « Cours d'électronique de puissance », 4ème année Électrotechnique, ENP, 2011.
- [50] <http://www.inova-energies.com/nos-produits/solaire-photovoltaïque.html>