

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierie

Département : Electrotechnique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Structure et commande d'une installation photovoltaïque

Présenté par : *LAOUAR Lokmen*

Encadrant : *CHINE Abdelghani, MAA, Université BADJI Mokhtar - Annaba*

Jury de Soutenance :

Dr. SOLTANI Fatma	MCA	Université Annaba	Président
Dr. CHINE Abdelghani	MAA	Université Annaba	Encadrant
Dr. OURICI Amel	MCA	Université Annaba	Examineur

DÉDICACES

TOUT D'ABORD, JE TIENS À DÉDIER CE MODESTE TRAVAIL :

A MES TRÈS CHERS PARENTS, MA TRÈS CHÈRE MAMAN, MA
FIERTÉ ET MON BONHEUR À QUI JE SOUHAITE UNE TRÈS
LONGUE VIE AVEC SANTE ET BONHEUR.

A MON PÈRE L'HOMME QUI M'A DONNÉE LE DÉsir D'APPRENDRE
ET LE SENS DE L'EFFORT EN LUI SOUHAITANT LE BONHEUR ET LA
SANTÉ, ET QU'IL SOIT FIER DE MOI.

A MES TRÈS CHÈRE FRÈRE ET SŒUR, ONCLES ET TANTES, ET
TOUTE LA FAMILLE.

QU'ILS TROUVENT TOUS ICI MA PLEINE GRATITUDE POUR LEUR
PATIENCE ET LEUR SOUTIEN QUI NE M'A JAMAIS MANQUÉ.

A MON ENCADREUR.

A TOUS MES ENSEIGNANTS.

A TOUS MES AMIS ET COLLÈGUES.

A TOUS MES COLLÈGUES DE PROMOTION ET À TOUS CEUX QUI
M'ONT AIDÉ, DE PRÈS OU DE LOIN, À ACCOMPLIR CE TRAVAIL.

REMERCIEMENTS

JE REMERCIE EN PREMIER LIEU LE DIEU (ALLAH), LE TOUT PUISSANT, LE MISÉRICORDIEUX. CE MÉMOIRE N'AURAIT PAS ÉTÉ RÉALISÉ SANS SON BÉNÉDICTION QUI M'A PERMIS DE M'INSTRUIRE ET QUI A RÉCOMPENSÉ MES PRIÈRES, QUI M'A DONNÉ LA FORCE, LA VOLONTÉ ET SURTOUT LE COURAGE POUR ACCOMPLIR CE MODESTE MÉMOIRE

JE TIENS PARTICULIÈREMENT À TÉMOIGNER MA PROFONDE GRATITUDE À MON ENCADREUR **CHINE ABDELGAHNI**, POUR SON ENCADREMENT ET POUR L'ENCOURAGEMENT ET L'INTÉRÊT QU'IL M'A APPORTÉ POUR L'ACCOMPLISSEMENT DE CE TRAVAIL ET SURTOUT POUR SON GRANDE AIDE ET SES QUALITÉS HUMAINES.

J'ADRESSE AUSSI MES SINCÈRES REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DE JURY POUR L'INTÉRÊT ET L'IMMENSE HONNEUR QU'ILS ME FONT EN ACCEPTANT D'ÉVALUER CE TRAVAIL.

MES REMERCIEMENTS LES PLUS SINCÈRES VONT AUSSI À MONSIEUR **B.ADEL** POUR LEURS ENCOURAGEMENTS, LEURS CONSEILLES, AINSI POUR TOUTE L'AIDE QU'ILS M'ONT APPORTÉE TOUT AU LONG DE CES ANNÉES.

AUSSI, JE REMERCIE L'INFORMATICIEN **H.NOUREDDINE**, MON AMIE QUI M'A ACCOMPAGNÉ POUR L'ACCOMPLISSEMENT DE CE TRAVAIL AVEC BEAUCOUP DE PATIENCE.

J'ADRESSE DE TOUT MON CŒUR MES REMERCIEMENTS À MES
CHERS PARENTS, JE LEURS SUIS INFINIMENT RECONNAISSANTE
POUR LEUR SOUTIEN ILLIMITÉ. QU'ILS TROUVENT DANS CE
TRAVAIL LE FRUIT DE LEURS SACRIFICES.

JE TIENS À REMERCIER ÉGALEMENT **MON FRÈRE** ET **MA**
SOEUR, QUI M'ONT TOUJOURS SOUTENUE TOUT AU LONG DE
MON PARCOURS.

UN ÉNORME REMERCIEMENT À MES ENSEIGNANTS POUR LES
CONSEILS QU'ILS ONT PU ME PRODIGUER AU COURS DE CETTE
ANNÉE UNIVERSITAIRE.

ENFIN, UN GRAND MERCI À TOUS CEUX QUI M'ONT
ACCOMPAGNÉ AU COURS DE TOUTES CES ANNÉES, LA FAMILLE
ET SURTOUT MA TANTE **L.MARIAM**, ET QUI M'ENTOURENT TOUS
LES JOURS DE LEUR AFFECTION ATTENTIONNÉE.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

<i>Figure 1 . 1</i> : Le système d'une centrale hydraulique.....	6
Figure 1 . 2 : schéma fonctionnel d'une centrale hydraulique.....	7
<i>Figure 1 . 3</i> : Le système éolienne.....	8
Figure 1 . 4 : les différents composants d'une éolienne	10
Figure 1 . 5 : Les types d'énergie solaire	11
<i>Figure 1 . 6</i> : principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.....	13
<i>Figure 1 . 7</i> : panneau solaire sur un toit d'une maison.....	14

CHAPITRE II

<i>Figure 2 . 1</i> : panneau solaire sur un toit d'une maison.....	17
<i>Figure 2 . 2</i> : Collision entre un photon et un atome	19
Figure 2 . 3 : Cellule photovoltaïque	19
<i>Figure 2 . 4</i> : coupe transversale d'une cellule PV typique	20
<i>Figure 2 . 5</i> : schéma idéale d'une cellule photovoltaïque	21
<i>Figure 2 . 6</i> : schéma équivalent d'une cellule solaire	22
<i>Figure 2 . 7</i> : Caractéristique résultat d'un regroupement de N_s cellules en séries	26
<i>Figure 2 . 8</i> : Caractéristique résultat d'un Regroupement de N_p cellules en parallèle	27
<i>Figure 2 . 9</i> : Cellule, module, panneau et champ.....	28
Figure 2 . 10 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.....	29
<i>Figure 2 . 11</i> : Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.....	31
Figure 2 . 12 : Courbe $I(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	
Figure 2 . 13 : Courbes $P(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	32
Figure 2 . 14 : Courbes $I(V)$ d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	34
Figure 2 . 15 : Courbes $P(V)$ d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	34
<i>Figure 2 . 16</i> : Le schéma d'un système PV en mode autonome	36
<i>Figure 2 . 17</i> : Le principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil	36
Figure 2 . 18 : Le mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (hybride)	37

<i>Figure 2 . 19 : Le mode d'exploitation d'un système PV (connecté au réseau)</i>	<i>38</i>
--	-----------

CHAPITRE III

<i>Figure 3 . 1 : les différents types de convertisseurs statiques</i>	<i>39</i>
<i>Figure 3 . 2 : Système de conversion photovoltaïque</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3 . 3 : Schéma de principe de la conversion Continu - continu (DC – DC)</i>	<i>41</i>
<i>Figure 3 . 4 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck</i>	<i>42</i>
<i>Figure 3 . 5 : Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3 . 6 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert .</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3 . 7 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost</i>	<i>45</i>
<i>Figure 3 . 8 : Schémas équivalents du hacheur survolteur : K fermé, (b) : K ouvert</i>	<i>46</i>
<i>Figure 3 . 9 : Convertisseur dévolteur-survolteur</i>	<i>48</i>
<i>Figure 3 . 10 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur (a) : K ouvert ; (b):K fermé</i>	<i>48</i>
<i>Figure 3 . 11 : montage hacheur à thyristors par PSIM 9.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3 . 12 : courbe de Uch et de Ich d'entrée du hacheur a thyristors.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3 . 13 : la forme des courants Ith1-Ic-Ich</i>	<i>34</i>
<i>Figure 3 . 14 : la formes des courants Ich Itr1 et Id2</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3 . 15: la formes des courants Itr2 et Id1</i>	<i>52</i>
<i>Figure 3 . 16 : la forme de Uc et Ic du hacheur à thyristor</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3 . 17 : Zoom d'Uc et Ic du hacheur à thyristor</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3 . 18 : montage hacheur à IGBT</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3 . 19 : la forme d'Uch et Ich du hacheur à IGBT</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3 . 20 : schéma d'un onduleur monophasé</i>	<i>59</i>
<i>Figure 3 . 21 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.</i>	<i>59</i>
<i>Figure 3 . 22 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H</i>	<i>60</i>
<i>Figure 3 . 23 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont</i>	<i>61</i>
<i>Figure 3 . 24 : Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9</i>	<i>61</i>
<i>Figure 3 . 25 : Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9</i>	<i>62</i>
<i>Figure 3 . 26 : la forme d'Uam</i>	<i>46</i>
<i>Figure 3 . 27 : la forme d'Ubn</i>	<i>63</i>
<i>Figure 3 . 28 : la forme d'Uan-Ubn</i>	<i>47</i>
<i>Figure 3 . 29 : la forme d'Umn</i>	<i>64</i>
<i>Figure 3 . 30 : Spectre d'harmonique ; commande 180°</i>	<i>65</i>

<i>Figure 3 . 31 : la forme d'Uan</i>	49
<i>Figure 3 . 32 : la forme d'Uam</i>	66
<i>Figure 3 . 33 : la forme d'Uan-Ubn</i>	50
<i>Figure 3 . 34 : la forme d'Umn</i>	67

CHAPITRE IV

<i>Figure 4 . 1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire à base d'une commande MPPT</i>	70
<i>Figure 4 . 2 : Application de l'algorithme P&O sur la caractéristique PPV(VPV)</i>	71
<i>Figure 4 . 3 : Méthode IncCond pour poursuivre le MPP</i>	73
<i>Figure 4 . 4 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D de convertisseur statique</i>	73
<i>Figure 4 . 5 : montage PV-MPPT</i>	75
<i>Figure 4 . 6 : L'éclairement</i>	76
<i>Figure 4 . 7 : la forme de la puissance et la puissance MAX</i>	76
<i>Figure 4 . 8 : caractéristique I-V : cas de diminution de l'éclairement</i>	77
<i>Figure 4 . 9 : caractéristique I-V : cas d'augmentation de l'éclairement</i>	77

CHAPITRE V

<i>Figure 5 . 1 : principe de couplage des batteries</i>	84
<i>Figure 5 . 2 : Connexion des batteries</i>	85

Liste des Tableaux

CHAPITRE IV

<i>Tableau 4 . 1 : Tableau comparatif entre les commandes MPPT</i>	74
--	----

SOMMAIRE

Titre	Page
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	
1.1. Introduction :	5
1.2. Energies renouvelables	6
1.2.1. Energie hydraulique	6
1.2.2. Energie Eolienne	8
1.2.3. Energie Solaire	11
1.2.3.1. L'énergie solaire Thermique	12
1.2.3.2. L'énergie solaire Photovoltaïque	14
1.3. Conclusion	16
Chapitre II : L'énergie photovoltaïque	
2.1. Introduction	17
2.2. Effet photovoltaïque	18
2.3. Cellules photovoltaïques	19
2.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	21
2.3.1.1. Modelé d'une cellule solaire idéale	21
2.3.1.2. Modèle d'une Cellule Solaire Réelle	21
2.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	23
2.3.3. Rendement énergétique	25
2.3.4 Facteur de forme	25
2.3.5. Regroupement des cellules	26
2.4. Générateur photovoltaïque	28
2.4.1. Protection d'un générateur photovoltaïque	29
2.4.2. Caractéristique courant-tension	30
2.4.3. Influence de l'ensoleillement et de la température sur un module photovoltaïque	31
2.5. Les différentes architectures des systèmes PV	35
2.5.1. Mode autonome	35
2.5.2. Mode hybride	37
2.5.3. Mode connecté aux réseaux	37
2.6. Conclusion	38
Chapitre III : Convertisseur DC-DC et DC-AC	
3.1. Introduction	39

3.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	40
3.3. Type des convertisseurs DC-DC	41
3.3.1. Hacheur dévolteur (Buck - Converter)	42
3.3.2. Hacheur survolteur (Boost-Converter)	45
3.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	47
3.3.4. Simulation Hacheur	50
3.3.4.1. Simulation Hacheur a thyristors	50
3.3.4.2. Simulation Hacheur a IGBT	54
3.4. Les Convertisseurs DC-AC (Les onduleurs)	56
3.4.1. Classification	56
3.4.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur	57
3.4.3. Les type des onduleurs	59
3.4.3.1. Onduleur Monophasé	59
3.4.3.2. Onduleur triphasé	61
3.4.4. Simulation de l'onduleur triphasé	61
3.4.3.1. La commande 180 degrés de l'onduleur	63
3.4.3.2. La commande MLI d'un onduleur triphasé	66
3.5. Conclusion	68
Chapitre IV : La commande MPPT	
4.1. Introduction	69
4.2. Principe de fonctionnement de la commande MPPT	69
4.3. Classification Des Commandes Mppt	70
4.3.1. Algorithme de perturbation et observation P&O	70
4.3.2. Algorithme de « Incrément de Conductance » (IncCond)	71
4.3.3. Algorithme Escalade de la Colline (Hill Climbing)	73
4.4. Choix de l'Algorithme	74
4.5. Simulation de l'MPPT par MATLAB/SIMULINK	75
4.6. Conclusion	78
Chapitre V : Stockage de l'Energie électrique	
5.1. Introduction	79
5.2. Stockage de l'énergie	79
5.3. Stockage indirect	79
5.3.1. Accumulateurs au plomb-acide	80
5.3.2. Accumulateurs au sodium-soufre	81
5.4. Stockage direct	81
Supercondensateur	81
5.5. Les caractéristiques principales d'un accumulateur	82

5.5.1. Tension nominale	82
5.5.2. Tension à vide	82
5.5.3. Tension en charge	82
5.5.4. Courant	82
5.5.5. Capacité	82
5.5.6. Energie massique ou densité énergétique	82
5.5.7. Le taux d'autodécharge	83
5.5.8. Le rendement	83
5.6. Principe du couplage photo-générateur batterie	83
5.7. Connexion d'une batterie	84
5.8. Conclusion	85
Conclusion générale	86

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

- I_{op} : Courant optimum (A)
V_{op} : Tension optimum (V)
P_m : Puissance maximal (w)
I_D : Courant de diode (A)
I_{Ph} : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)
I_P : Le courant dérivé par la résistance parallèle (A)
I₀ : Courant de saturation de diode, dépendant de la température (A)
I_{CC} : Le courant de court-circuit de référence (A)
V_{CO} : La tension de circuit ouvert. (V)
V_T : La tension thermique. (V)
I_{CCr} : Courant de court-circuit de référence. (A)
R_P : Résistance en parallèle. (Ω)
R_S ; Résistance en série (Ω)
G : L'irradiation solaire (W / m^2)
- q: Charge d'électron $q= 1.602.10^{-9}$ c (C)
K : Constante de Boltzmann $k=1.381.10^{-23}J/K$ (J / K)
N : Facture de non idéalité de la jonction
T : La température effective de la cellule en kelvin (K)
D : Est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1
- PV : Photovoltaïque
GPV : Générateur Photovoltaïque
FF : Facteur de forme
MPPT : Maximum Power Point Tracking
P&O : Perturbation et Observation
DC : Courant Continu
AC : Courant Alternatif

INTRODUCTION GENERALE

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il fallut inventer et construire Des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une Fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur. Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie Électrique entre les points de production et les points de consommation. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité.

Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur.

On distingue que la production de l'énergie électrique possède des usines et un matériel très grand (turbine, four..., etc.) sans oublier la grande influence sur la nature c'est la terre en générale.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des

technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées.

La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les électrotechniciens peuvent bénéficier de cette énergie grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

Dans nos jours la solution photovoltaïque est la meilleure et elle est en cour de développement dans tout le monde entier.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait

au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentent. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter. Le rayonnement solaire, aussi bien direct que diffus, peut être converti directement en électricité, sous forme de courant continu au moyen des photopiles, sans avoir ainsi besoin de recourir à un cycle thermodynamique.

Les systèmes photovoltaïques, sont donc particulièrement simples, puisque, à l'inverse des centrales électriques thermiques conventionnelles ou solaires, ils ne comportent ni fluides à haute température ou sous pression, ni pièces tournantes, ni la nécessité de la présence d'une « source froide » consommant de l'eau.

Dans le cas de photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. Elle se trouve dans le milieu ambiant, il se fait d'exposer les modules ou les panneaux devant la lumière pour obtenir une puissance électrique, cette énergie est gratuite et disponible pendant toute la journée.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments. [1]

Dans notre étude on a présenté :

- Au premier chapitre, les sources et des différents types des énergies renouvelables (état de l'art).
- Dans le second chapitre on fait une description générale, le principe de fonctionnement de Chaque élément constituant le système photovoltaïque. Nous

avons décrit le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules, Et finalement nous décrivons les avantages et les inconvénients.

- Le troisième chapitre est très important, car il présente les convertisseurs de puissance avec le système photovoltaïque et la simulation de ces derniers par PSIM9.
- Le quatrième chapitre représente le MPPT (max power point tracking) dans le système photovoltaïque et ça simulation par MATLAB/SIMULINK.
- Le cinquième chapitre représente le stockage de l'énergie électrique résultante du système PV par des batteries
- Et Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre Étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux.

En ces termes, le pétrole, le gaz naturel et le charbon ne sont pas des énergies renouvelables car il faudra des millions d'années pour reconstituer les stocks d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire actuelle, issue de la fission des atomes d'uranium, ne peut pas être considérée comme une énergie renouvelable, la réserve d'uranium disponible sur Terre étant limitée.

En opposition à cela, le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles renouvelables capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes.

Cependant, il est important de s'intéresser aux diverses technologies de production pour comprendre leur intérêt sur différents plans : écologique, économique, politique et géopolitique.

Utiliser les énergies renouvelables présentes de nombreux avantages. Cela aide à lutter contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cela participe de plus à une gestion intelligente des ressources locales et à la création d'emplois.

Il en existe différents types : les énergies solaires, éoliennes, hydrauliques, et de la biomasse.

[2]

Energies renouvelables

1.1.1. Energie hydraulique : [3]

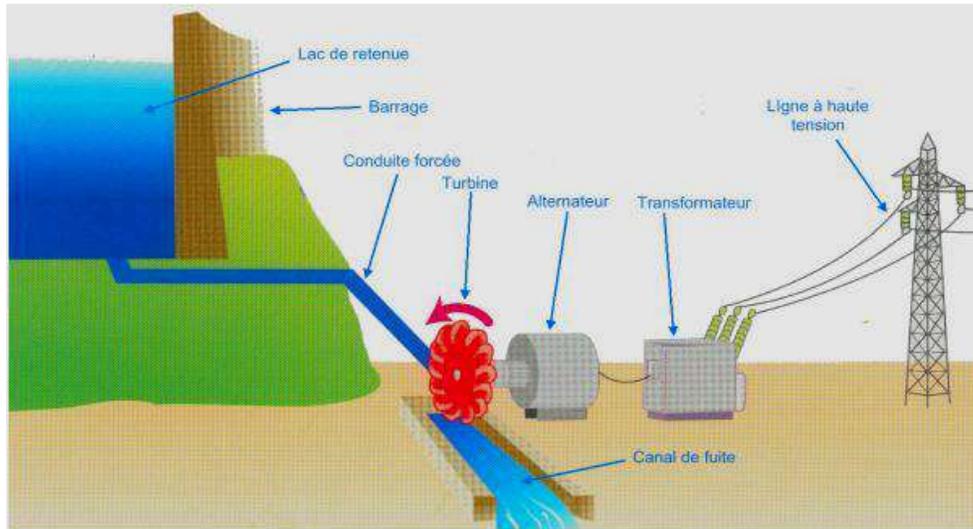


Figure 1.1 : Le système d'une centrale hydraulique

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau, cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (Centrales de haute ou moyenne chute), soit des débits des fleuves et des rivières (Centrales qui fonctionnent au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau, elle est la plus importante source d'énergie renouvelable. Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore, elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- ✓ le barrage qui retient l'eau
- ✓ la centrale qui produit l'électricité

✓ les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

a. Principe de fonctionnement :

Il s'agit de capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité. L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie cinétique puis en énergie mécanique. Cette turbine accouplée Mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- hauteur de la chute
- débit de la chute

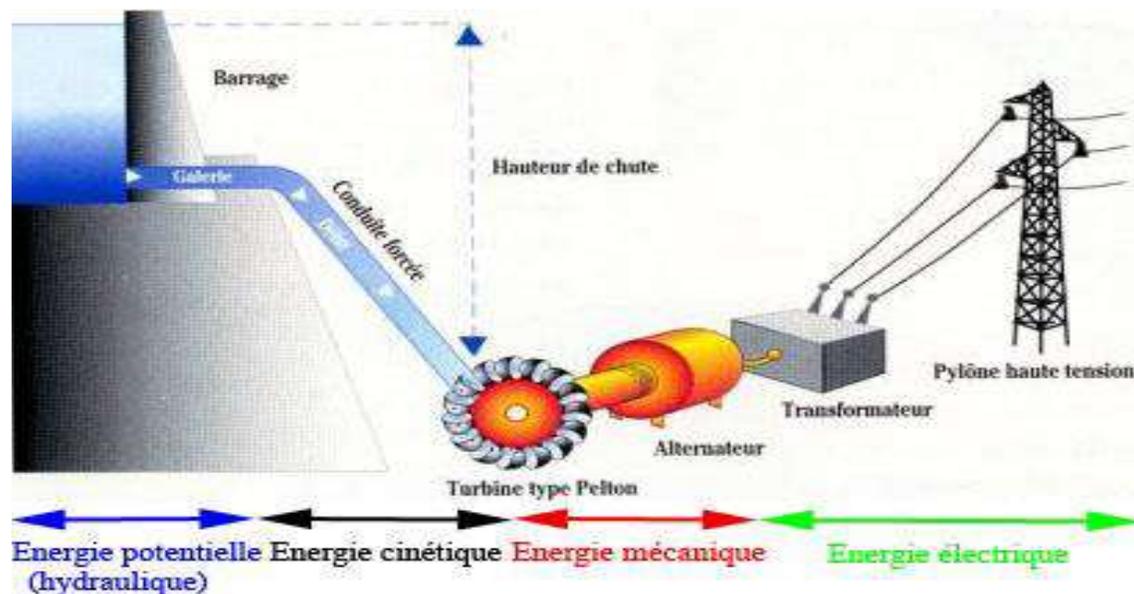


Figure 1 . 2 : schéma fonctionnel d'une centrale hydraulique

b. Les avantages :

- ✓ Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- ✓ Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.

- ✓ Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- ✓ Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.
- ✓ Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).
- ✓ Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modéré.
- ✓ Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.
- ✓ Souplesse d'exploitation, qu'accroissent encore les progrès de l'automatisme et des télécommandes.

c. Les inconvénients :

- ✓ Modification du débit et du niveau de l'eau.
- ✓ Perturbation de la faune et de la flore.
- ✓ Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- ✓ Risque pour les personnes en aval lié au barrage.

1.1.2. Energie Eolienne : [3]

Figure 1.3 : Le système éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe.

La racine étymologique du terme « Eolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression.

De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique,

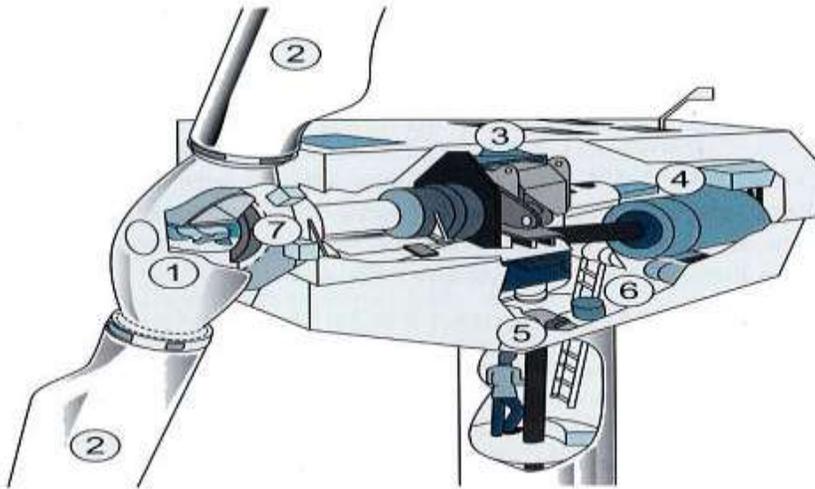
celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- ✓ La transformation en énergie mécanique
- ✓ La production d'énergie électrique.

Donc on peut dire que l'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

a. Principe de fonctionnement :

Une éolienne est composée d'un aérogénérateur qui transforme une énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie fournie par la force du vent fait tourner les pâles par l'intermédiaire d'une génératrice qui est en fait un alternateur de courant continu. Ce courant subit ensuite une transformation dans le convertisseur de courant alternatif puis est directement réinjecté dans le réseau. Les composants d'une éolienne.



1. Rotor • 2. Pâles • 3. Multiplicateur • 4. Génératrice • 5. Mécanisme d'orientation de la nacelle • 6. Système hydraulique • 7. Frein

Figure 1 . 4 : les différents composants d'une éolienne

b. Les avantages :

- ✓ coût de production relativement faible (200.000 euros environ) par rapport à l'énergie produite.
- ✓ La surface occupée au sol est peu importante.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).
- ✓ surface immense disponible en mer où le vent est pratiquement constant.

c. Les inconvénients :

- ✓ Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable.
- ✓ L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas

de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires).

- ✓ La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques
- ✓ (Télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations.
- ✓ Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne.
- ✓ Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important.
- ✓ Bien que les éoliennes offshore soient un important atout, l'installation des éoliennes doit se faire relativement proche des côtes (10 km environ) du fait de la perte d'énergie dans les conduits électriques.

1.2.3. Energie Solaire : [3]

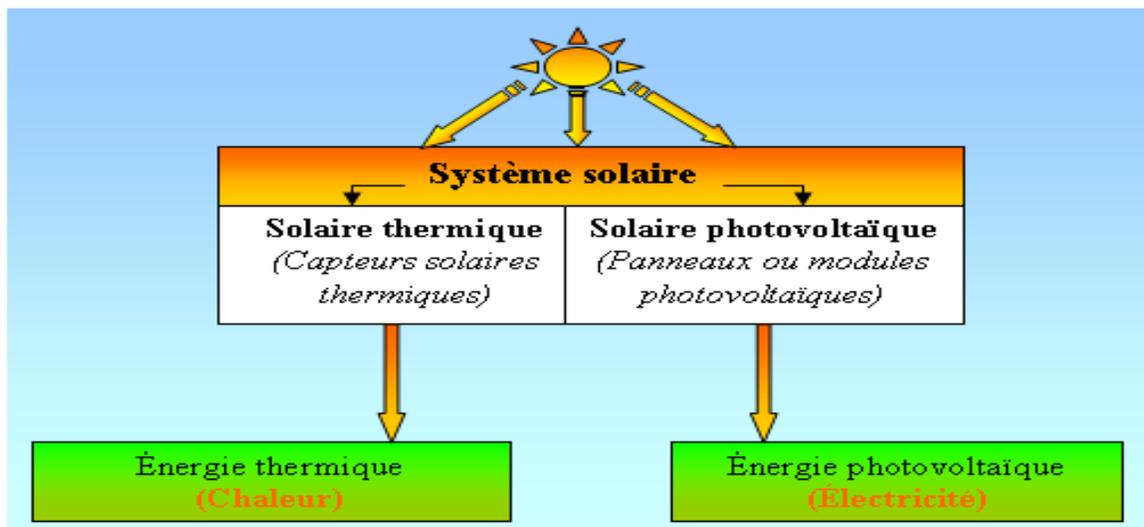


Figure 1 . 5 : Les types d'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente, C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuitement et inépuisable.

Il existe 3 utilisations de l'énergie solaire :

- ✓ La production de chaleur : le "solaire thermique"
- ✓ La production d'électricité : le "solaire photovoltaïque"

1.2.3.1. L'énergie solaire Thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire, elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (Liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (Eau, chauffage, etc.) ou indirectement (Production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement, elle ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité. Le solaire thermique récupère la chaleur du soleil grâce à un fluide qui circule dans les capteurs.

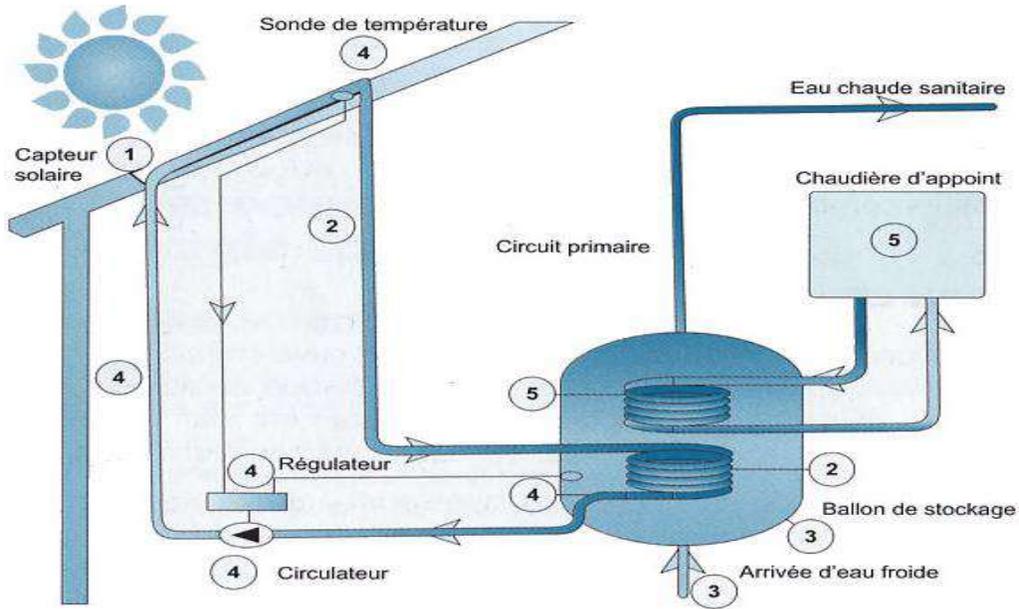


Figure 1.6 : principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

a. Avantage :

- ✓ Rendement élevé (jusqu'à 80%) ;
- ✓ permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement, ce qui peut se révéler intéressant pour des collectivités qui voudraient maîtriser leurs dépenses telles que les piscines très énergivores ;
- ✓ Source d'énergie inépuisable.
- ✓ Gros potentiel de développement.

b. Inconvénients :

- ✓ Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire ;
- ✓ L'énergie solaire thermique reste une énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds.

- ✓ Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans).
- ✓ Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans.
- ✓ Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...).

1.2.3.2. L'énergie solaire Photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire.

L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables , mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer.



Figure 1 . 7 : panneau solaire sur un toit d'une maison

a. Avantage :

- ✓ Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable ;
- ✓ Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine ;
- ✓ Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

b. Inconvénients :

- ✓ Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie ;
- ✓ Coût dépendant de la puissance de crête ;
- ✓ Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance ;
- ✓ Marché très limité mais en développement ;
- ✓ Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit ;
- ✓ Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) ;
- ✓ Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule ;
- ✓ Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ;
- ✓ Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

1.3. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que chaque type d'énergie renouvelable proposé présente des avantages et bien évidemment des inconvénients, ça n'empêche pas que des recherches sont en cours pour améliorer le rendement de ces énergies dans la mesure où les réserves de pétrole et de gaz naturelle sont évaluées à un siècle environ.

Et dans le chapitre suivant on va voir la structure d'un système photovoltaïque. [1]

CHAPITRE II

L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaire photovoltaïque et le solaire a concentration thermodynamique.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autre objet d'utilisation courante.

En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité. [4]



Figure 2 . 1 : panneau solaire sur un toit d'une maison

2.2. Effet photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient du grec photos qui veut dire lumière et de volta du nom du physicien italien qui, en 1800 découvrit la pile électrique.

L'énergie photovoltaïque est une conversion directe du rayonnement solaire en électricité à partir de la cellule photovoltaïque.

Cette conversion appelée Effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par Antoine BECQUEL et, est utilisée dans les cellules photovoltaïques que l'on assemble en modules puis en panneaux photovoltaïques permettant de convertir directement l'énergie solaire en électricité par le biais de la production et du transport des charges électriques sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y'a donc courant électrique sous exposition à la lumière.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière **Figure (2.2)**. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable, alors il passe vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre

électrique au sein de la matière se traduisant par un pair électron-trou, de même énergie électrique. [5]



Figure 2 . 2 : Collision entre un photon et un atome

2.3. Cellules photovoltaïques

La cellule PV est le plus petit élément dans l'installation photovoltaïque, elle est composée de matériaux semi-conducteurs du type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre-elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue. Les cellules PV les plus répandues sont constituées des semi-conducteurs, principalement à base de silicium (SI). [5]

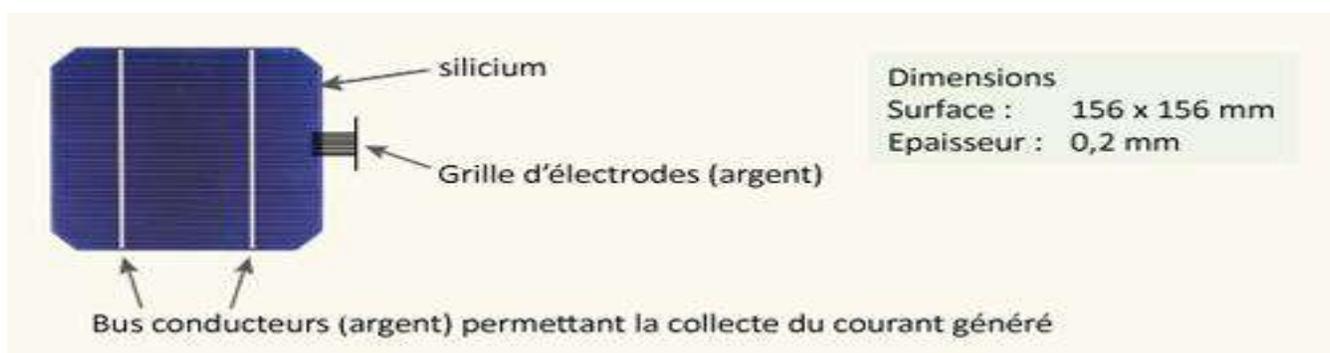


Figure 2 . 3 : Cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de

ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

À travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V 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. [5]

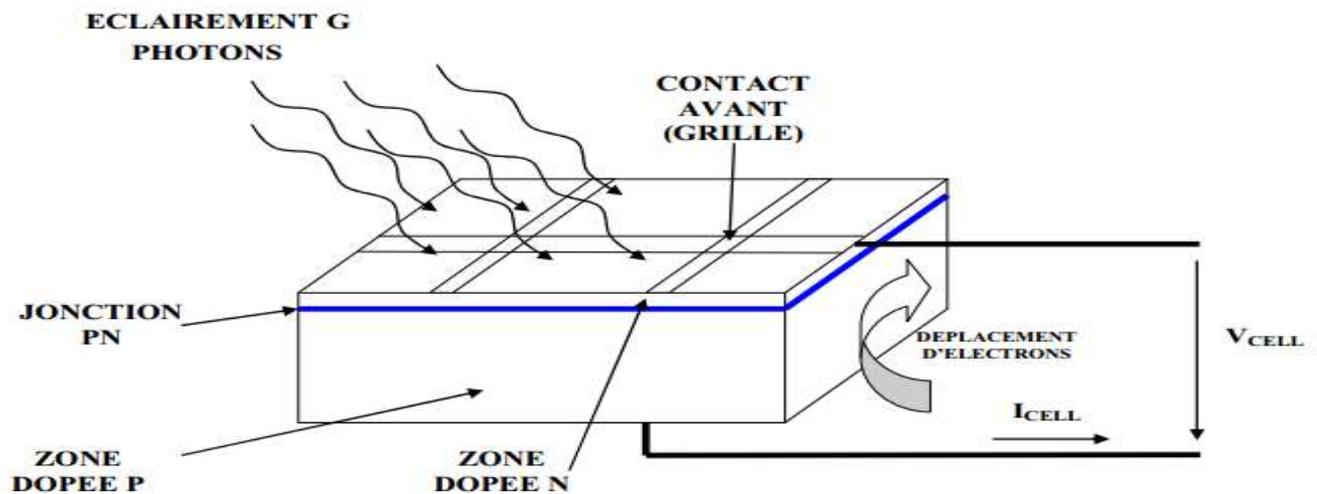


Figure 2.4 : coupe transversale d'une cellule PV typique

2.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque : [6]

2.3.1.1. Modelé d'une cellule solaire idéale :

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n).

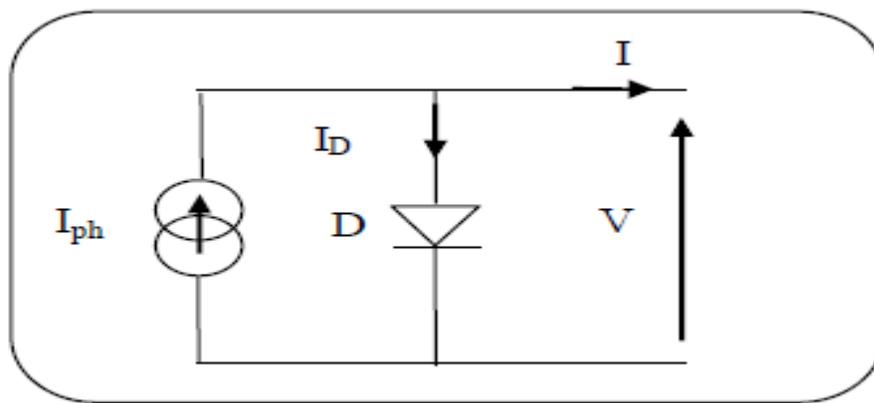


Figure 2 . 5 : schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_D$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right)$$

2.3.1.2. Modèle d'une Cellule Solaire Réelle :

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

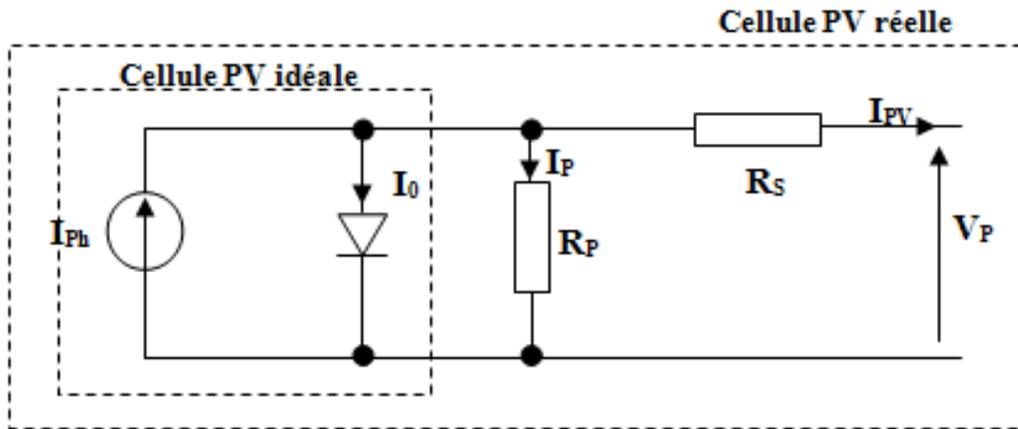


Figure 2 . 6 : schéma équivalent d'une cellule solaire

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I - V de la photopile:

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

A partir du circuit équivalent de la figure, on peut écrire :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp} \tag{1.1}$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{v + I \cdot R_s}{R_p} \tag{1.2}$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_{sat} [e^{\frac{(V + I \cdot R_s)}{nVt}} - 1] \tag{1.3}$$

Avec I_{sat} : courant de saturation de la diode

Et $V_t = KT/e$: Tension thermique à la température T.

Donc l'expression de la caractéristique I(V) est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{e(v+I \cdot R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{v+I \cdot R_s}{R_p} \quad (1.4)$$

Où :

- ✓ e : charge de l'électron (1.609×10^{-19} C)
- ✓ K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)
- ✓ n : facteur de non idéalité de la jonction
- ✓ T : température effective de la cellule en degré Kelvin

- ✓ I_{pv} : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur
- ✓ V_{pv} : est la tension aux bornes de cette même cellule

- ✓ I_{ph} : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit)
- ✓ R_p : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
- ✓ R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

2.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque : [6]

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire en annulant V dans l'équation (1.5), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{e(I_{cc}R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc}R_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[e^{\frac{e(I_{cc}R_s)}{nKT}} - 1 \right]$$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (1.6)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

b. Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement).

C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{e(I_{cc} + R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc} + R_s}{R_p} \quad (1.7)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.8)$$

2.3.3. Rendement énergétique :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule :

$$\eta = \frac{P_m}{S * E} \quad (1.9)$$

2.3.4. Facteur de forme :

C'est un facteur de performance des cellules solaires ; plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures. Il compare la puissance maximale délivrée (P_{opt}) au produit de court-circuit (I_{cc}) et de la tension à circuit-ouvert (V_{co}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.10)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

2.3.5. Regroupement des cellules : [7]

a. Regroupement en série :

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. La tension de toutes les cellules s'ajoute et le courant est le même que celui d'une seule cellule.

L'équation (1.11) résume les caractéristiques électriques d'une association de N_s cellules en séries.

$$V'_{co} = N_s \cdot V_{co} \tag{1.11}$$

Avec :

- V_{co} : La tension du circuit ouvert. Comme montre la **Figure (2.7)**

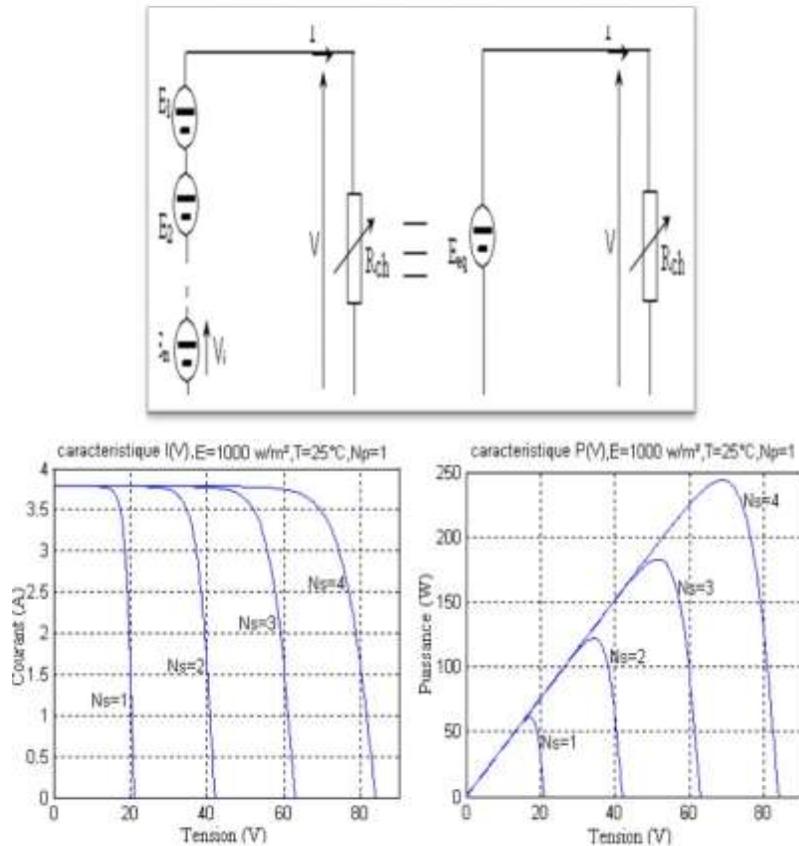


Figure 2.7 : Caractéristique résultat d'un regroupement de N_s cellules en séries

b. Regroupement en parallèle :

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. L'équation (1.12) résume les caractéristiques électriques d'une association de N_p .

$$I'_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \tag{1.12}$$

Avec : I_{cc} : Courant de court-circuit. Comme montre la **Figure (2.8)**.

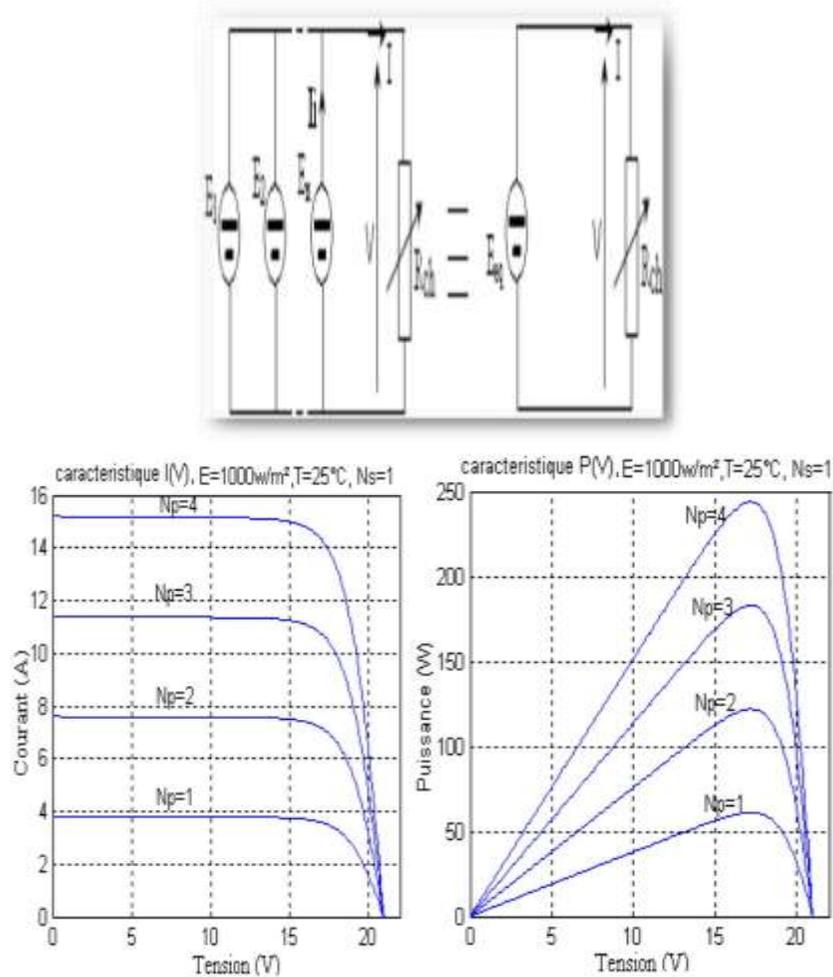
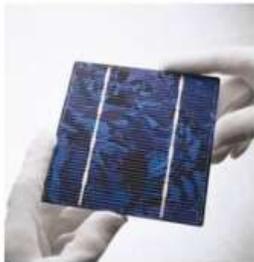


Figure 2 . 8 : Caractéristique résultat d'un Regroupement de N_p cellules en parallèle

2.4. Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. [8]



La cellule photovoltaïque est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.



Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques.



Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ photovoltaïque.

Figure 2 . 9 : Cellule, module, panneau et champ

2.4.1. Protection d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles : [9]

- La protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass)

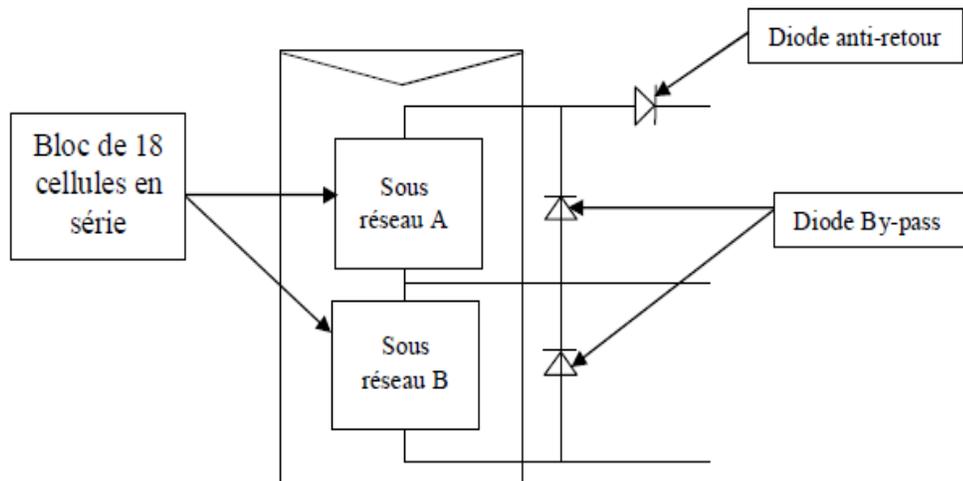


Figure 2 . 10 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour

2.4.2. Caractéristique courant-tension :

La caractéristique courant-tension illustrée dans la figure (II.11) décrit le comportement du générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$).

La courbe $I(V)$ du module photovoltaïque passe par trois points importants définissent ces caractéristiques qui sont :

- ✓ **La tension en circuit ouvert - VCO** (tension à vide) : Cette valeur représente la tension générée par un module éclairée non raccordée, en S.
- ✓ **Le courant de court-circuit - ICC** : Cette valeur représente le courant généré par un module éclairée raccordée à elle-même, en C.
- ✓ **Le Point de Puissance Maximal - PPM** : Obtenu pour une tension et un courant optimal : $VOPT, IOPT$ (parfois appelés aussi $VPPM, IPPM$), en M

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un générateur photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le générateur photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_{max} où la puissance se trouve maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_{max} . [10]

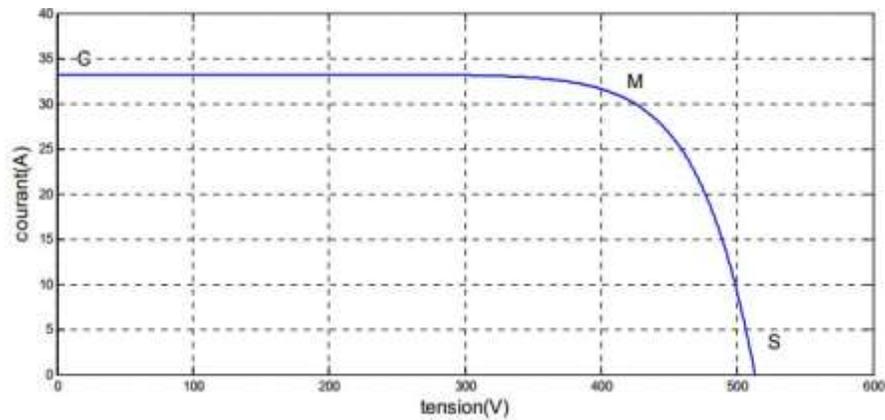


Figure 2 . 11 : Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque

2.4.3. Influence de l'ensoleillement et de la température sur un module photovoltaïque :

L'ensoleillement et la température dans le milieu où est situé le module sont les deux paramètres qui influent sur la caractéristique courant tension et par conséquent sur la puissance délivrée par le module. [10]

a. Influence de l'ensoleillement :

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de pair électron trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{coM} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}C$) et un ensoleillement variable.

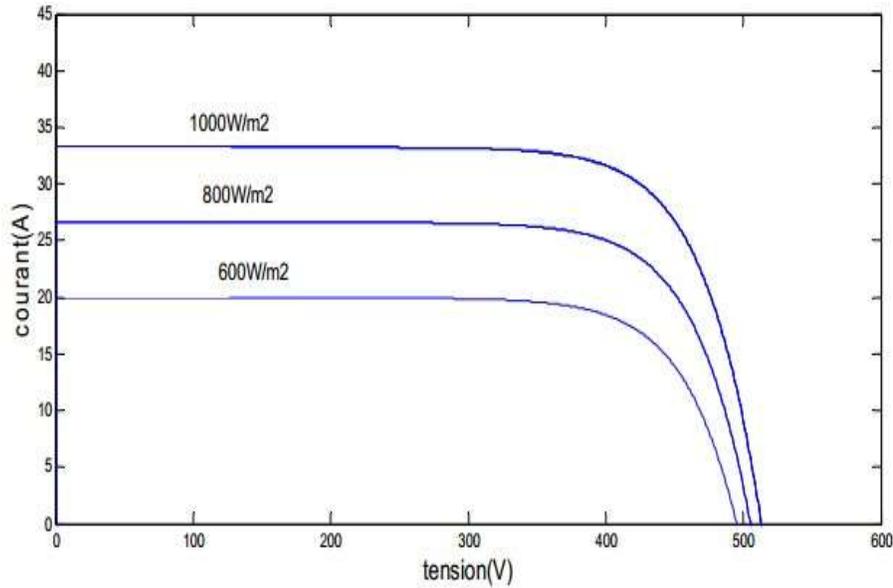


Figure 2 . 12 : Courbe I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C

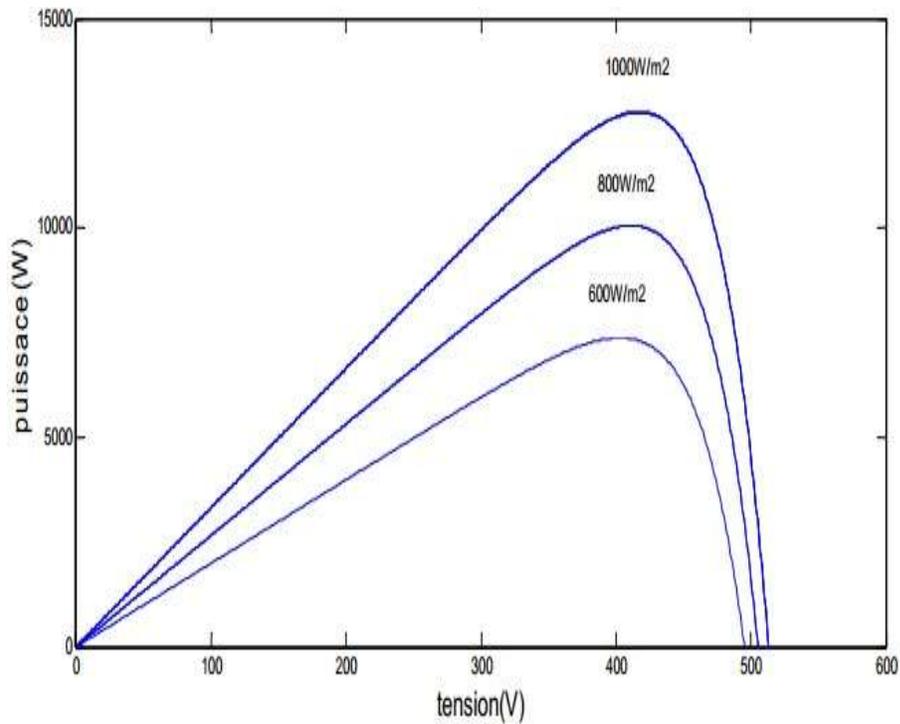


Figure 2 . 13 : Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{\max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

b. Influence de la température :

La figure (2.14) et (2.15) présentent respectivement des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante. Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C. Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 1000 W/m² la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique).

Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin.

Ceci va beaucoup contribuer dans notre choix de cellules.

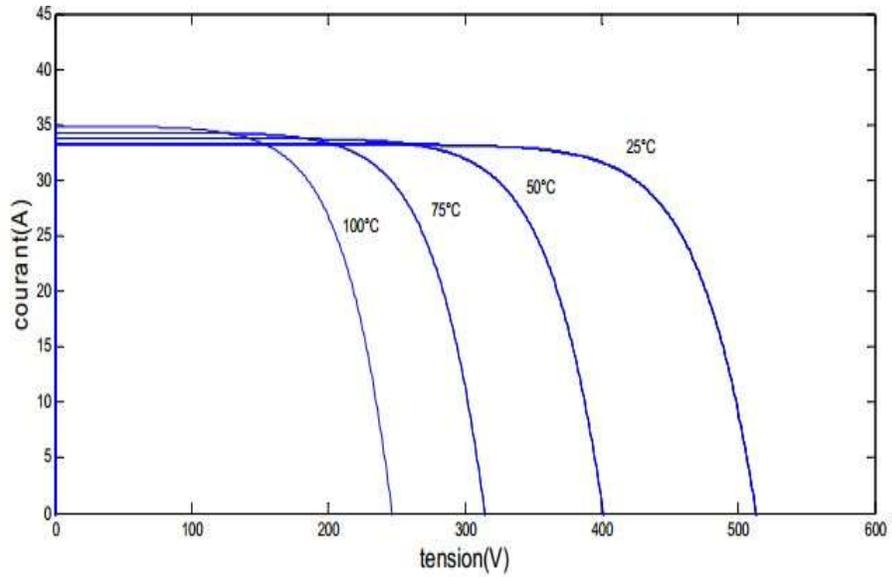


Figure 2 . 14 : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$

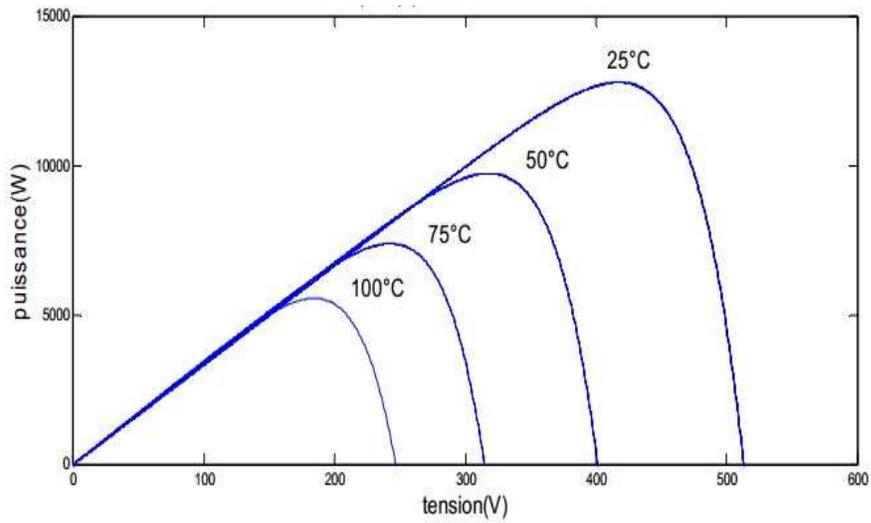


Figure 2 . 15 : Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000W/m^2$

2.5. Les différentes architectures des systèmes PV

En général, il existe trois types d'installation des systèmes photovoltaïques : système connecté au réseau, système autonome et système hybride. Les deux derniers sont indépendants du service public de distribution d'électricité, on les retrouve souvent dans les régions éloignées du réseau électrique. [11]

2.5.1. Mode autonome :

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau. En mode autonome.

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage et sans stockage.

a. Système autonome avec stockage :

Le système autonome exigera des batteries d'accumulations pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile. Ce type de système nécessite un dimensionnement en tenant compte de la localisation, du besoin et de l'autonomie des batteries



Figure 2 . 16 : Le schéma d'un système PV en mode autonome

b. Système autonome sans stockage :

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur. Il n'y a pas de stockages électrochimiques. Généralement les générateurs « au fil du soleil » sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou en alternatif : pompage d'eau et le stocké dans des bassins.

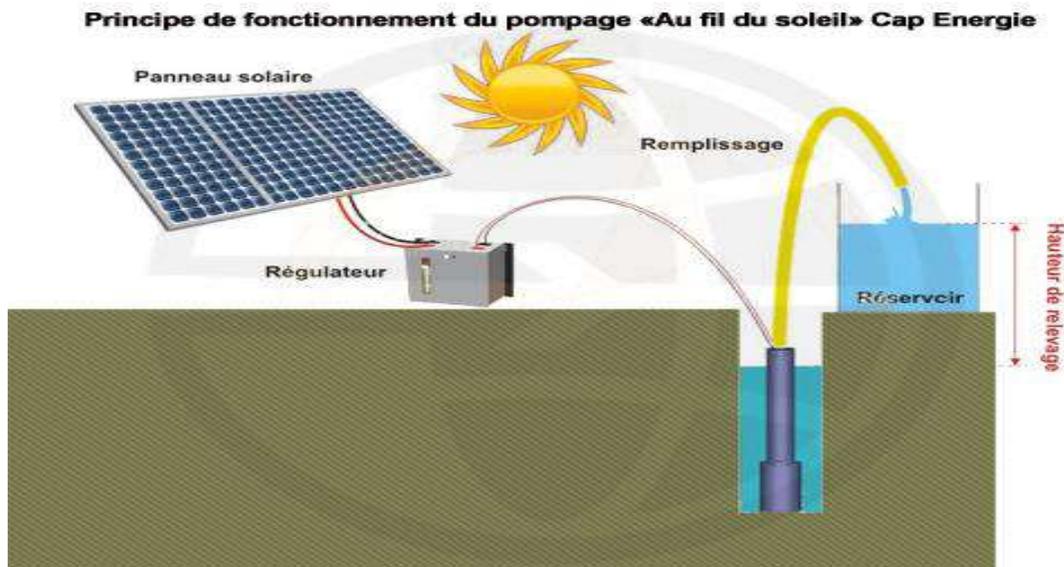


Figure 2 . 17 : Le principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil

2.5.2. Mode hybride :

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation.

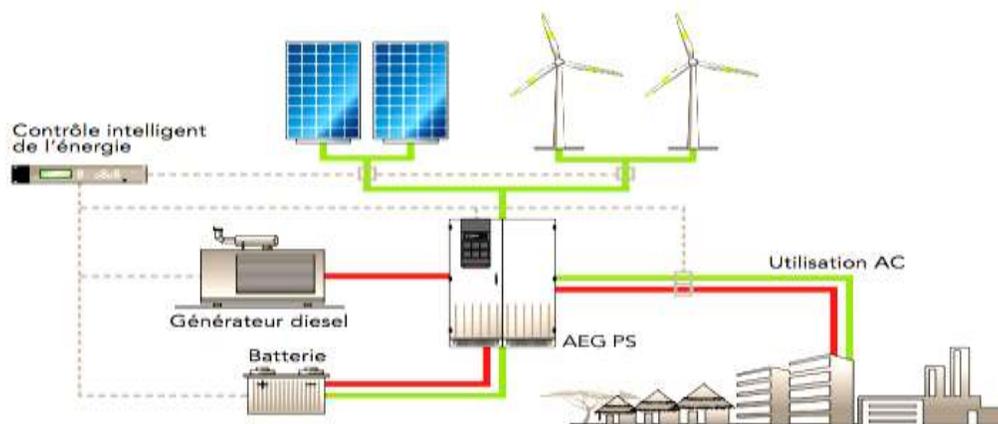


Figure 2 . 18 : Le mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (hybride)

2.5.3. Mode connecté aux réseaux :

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique. Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau (accrochage au réseau).

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. Donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui

tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie.



Figure 2.19 : Le mode d'exploitation d'un système PV (connecté au réseau)

2.6. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances. [1]

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et DC-AC (onduleurs)

CHAPITRE III
CONVERTISSEUR DC-DC
ET DC-AC

3.1. Introduction

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (Éolienne, Photovoltaïque, pile à combustible...). Et dans notre travail on va baser sur les convertisseurs dans le système photovoltaïque. [1]

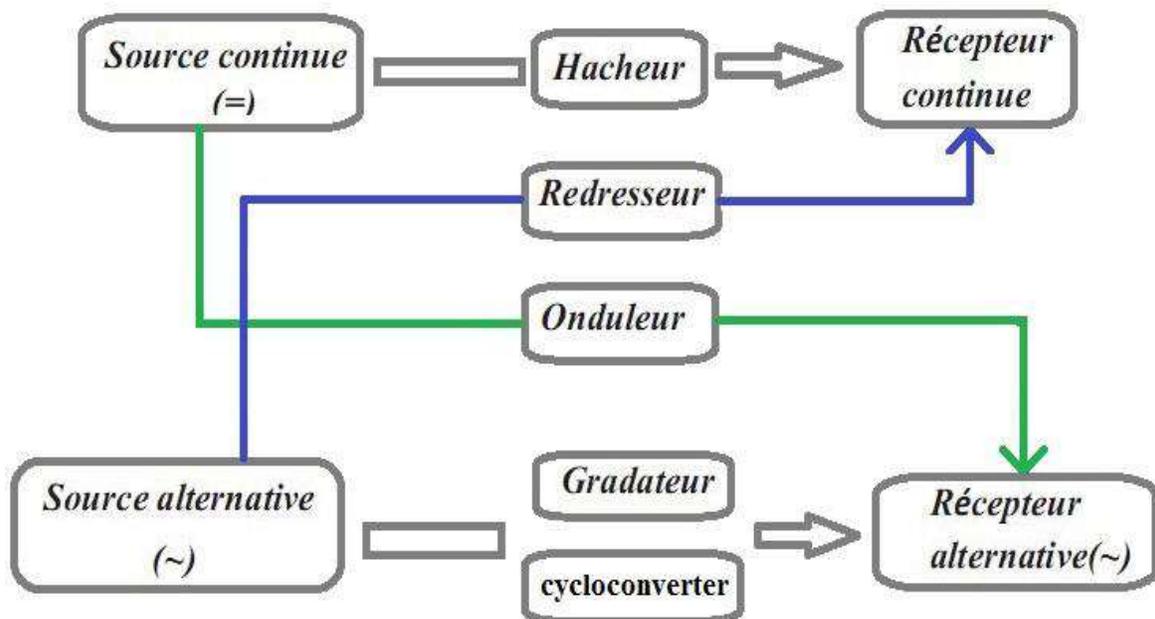


Figure 3 . 1 : les différents types de convertisseurs statiques

Le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la **figure (3.2)** :

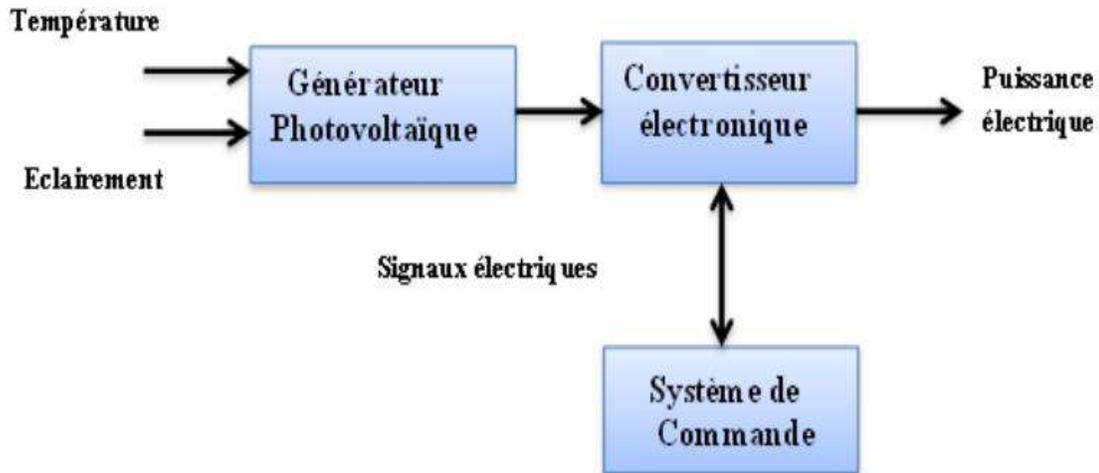


Figure 3.2 : Système de conversion photovoltaïque

Dans ce chapitre nous présenterons quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande des onduleurs. [12]

3.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation.

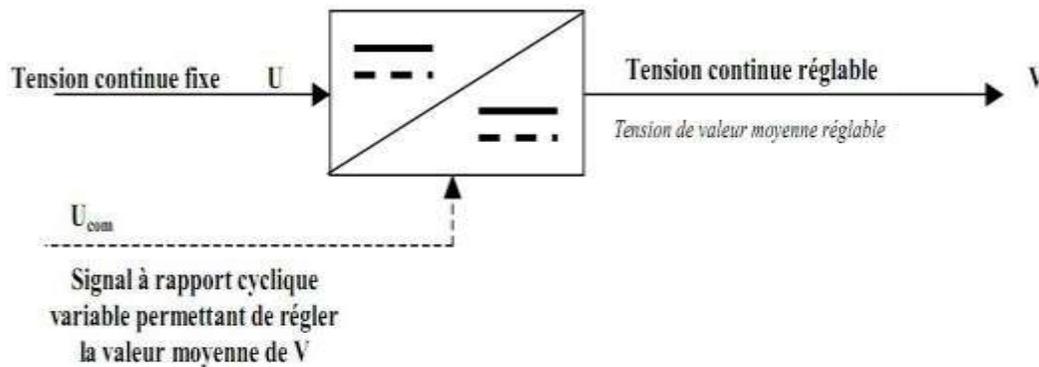


Figure 3.3 : Schéma de principe de la conversion Continu - continu (DC – DC)

3.3. Type des convertisseurs DC-DC :

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- ✓ Abaisseurs (Buck) ;
- ✓ Élévateurs (Boost) ;
- ✓ Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

3.3.1. Hacheur dévolteur (Buck - Converter) :

Un convertisseur Buck ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. [13]

La **Figure (3.4)** présente son circuit idéal.

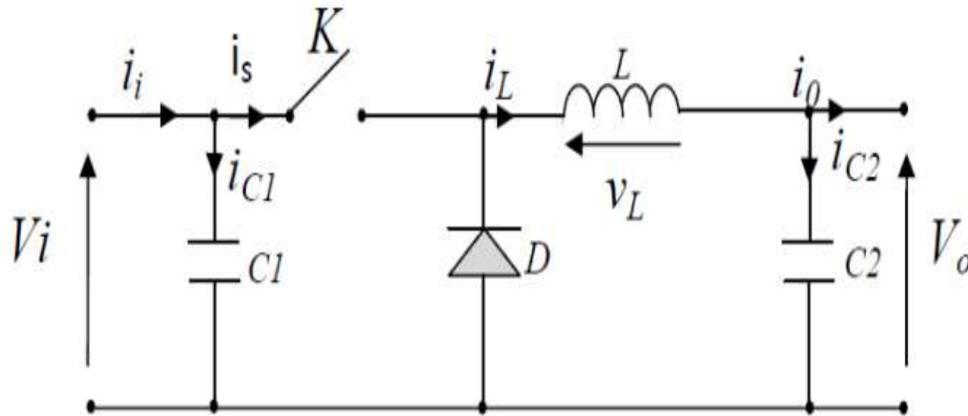


Figure 3 . 4 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.2) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant dT_s et ouvert pendant $(1-d) T_s$.

Où :

- T_s est la période de commutation.
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

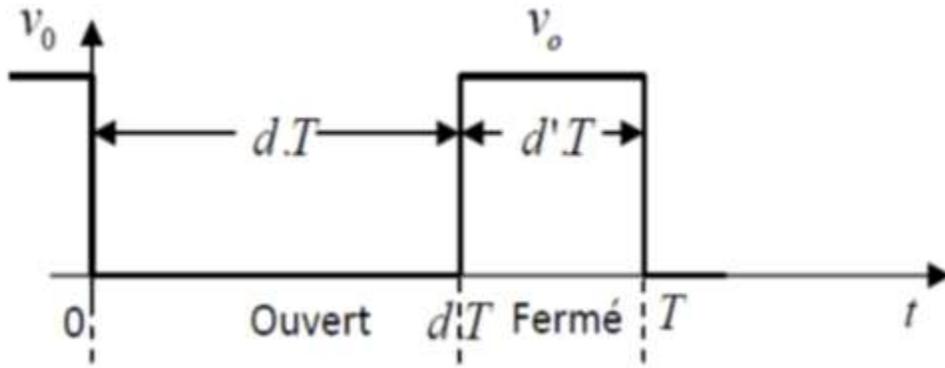


Figure 3 . 5 : Périodes fermeture et ouverture d’un interrupteur

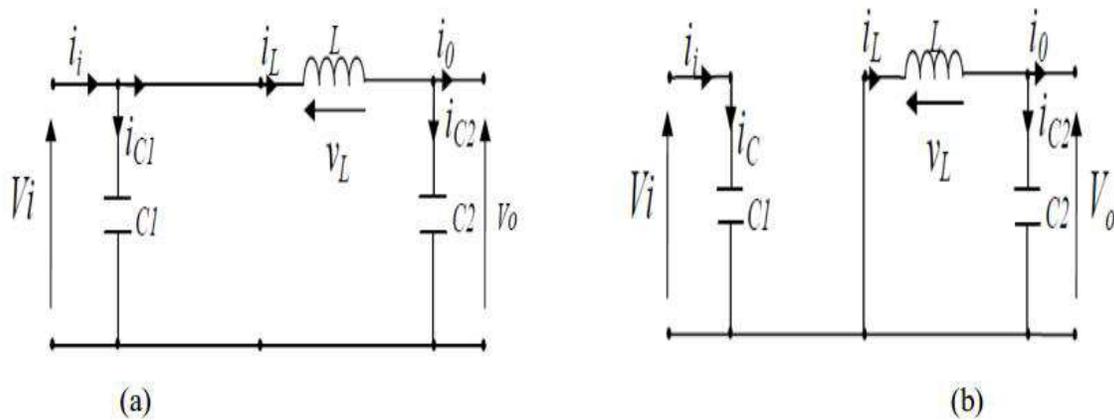


Figure 3 . 6 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Le rapport de conversion d’un hacheur est le rapport entre la tension d’entrée V_i et la tension de sortie V_o . Pour un hacheur dévolteur, il est donné sous la forme suivante :

$$V(D) = v_o/v_i = D$$

Donc le convertisseur Buck est un abaisseur de tension.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période dT_s :

$$\begin{aligned}
 i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\
 i_{c2} &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l - i_o(t) \\
 v_1 &= l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{aligned}
 i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\
 i_{c2} &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\
 v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = -v_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{dT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-d)T_s}} (1-d) T_s
 \tag{3.3}$$

En appliquant la relation (3.3) sur les systèmes d'équations (3.1) et (3.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{aligned}
 c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\
 c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_L - i_o) + (1-d)T_s(i_L - i_o) \\
 l \frac{di_L}{dt} &= dT_s(v_i - v_o) + (1-d)T_s(-v_o)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{aligned}
 i_o(t) &= i_L(t) - c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_i(t) \\
 i_L(t) &= \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\
 v_i(t) &= \frac{1}{d} \left(l \frac{di_L}{dt} + v_o(t) \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

3.3.2. Hacheur survolteur (Boost-Converter) :

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur, connu par le nom

(Élévateur de tension) peut être représenté par le circuit de la **Figure (3.7)**. [13]

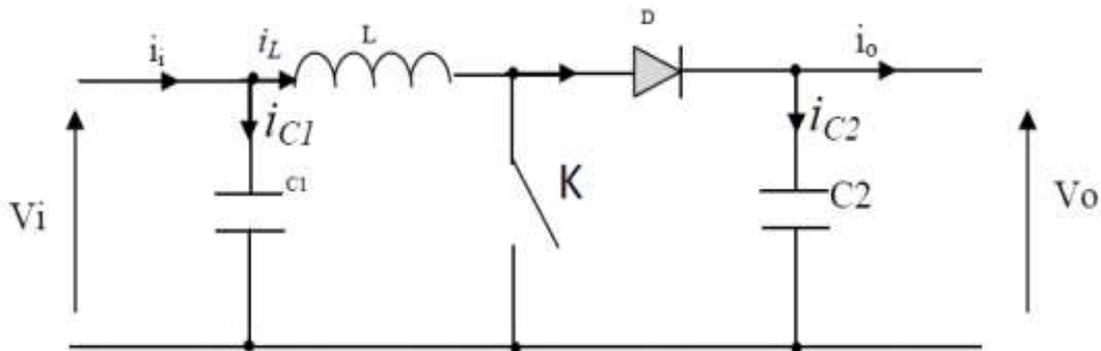


Figure 3 . 7 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

La **Figure (3.8)** explique le fonctionnement du convertisseur Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D.T_s]$).

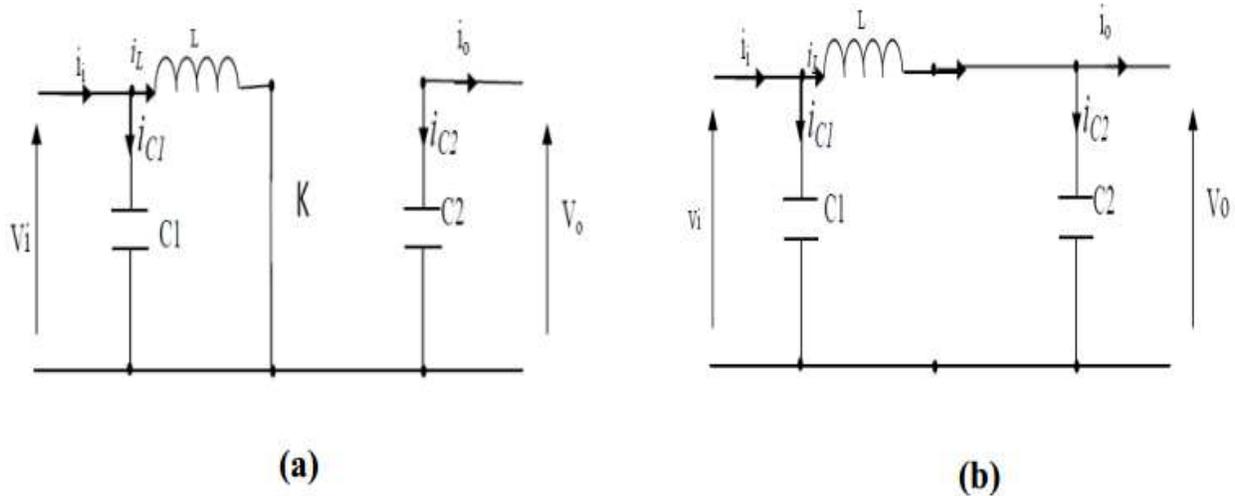


Figure 3. 8 : Schémas équivalents du hacheur survolteur : (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Le rapport de conversion d'un hacheur Boost est donné sous la forme suivante :

$$(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

Donc le convertisseur Boost est un élévateur de tension.

Pour la première période dT_s :

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t)$$

$$v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t)$$

(3.6)

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$\begin{aligned}
 i_{c1}(t) &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\
 i_{c2}(t) &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\
 v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

En appliquant la relation (3.3) sur les systèmes d'équations (3.6) et (3.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

$$\begin{aligned}
 i_l &= i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\
 i_o &= (1-d)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\
 v_i(t) &= l \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_o
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

3.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la **Figure (3.8)**. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. [13]

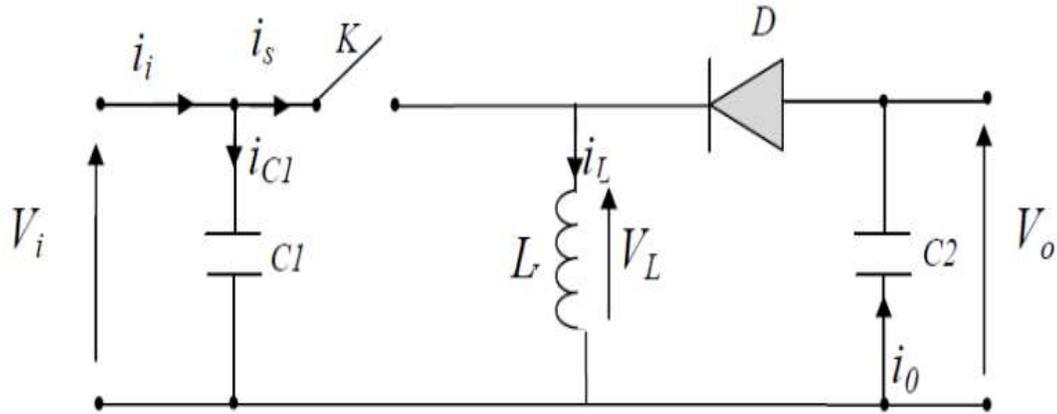


Figure 3.9 : Convertisseur dévolteur-survolteur

La Figure (3.10) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements.

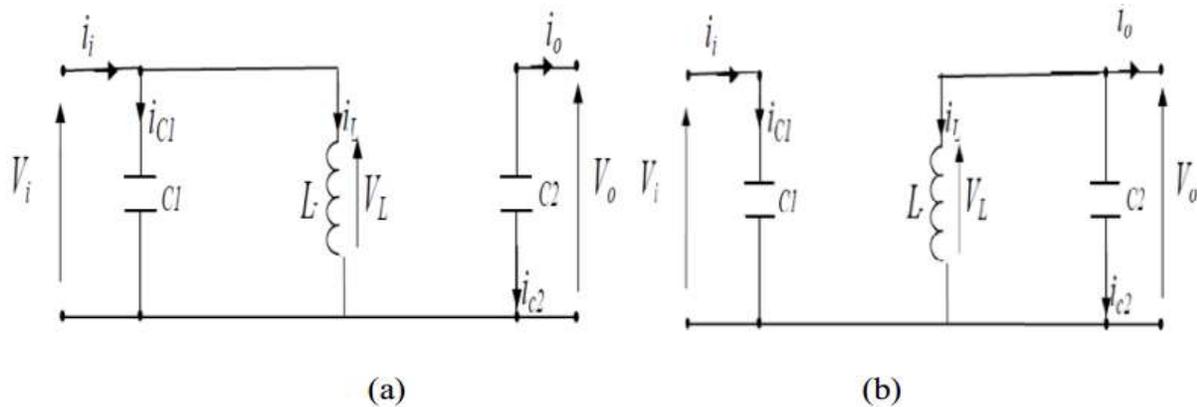


Figure 3.10 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur (a) : K ouvert ; (b):K fermé

Le rapport de conversion d’un hacheur Buck-Boost est une relation non linéaire, il est donné par l’expression suivante :

$$V(D) = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période dT_s :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} &= c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Pour la deuxième période $(1-d)$:

$$\begin{aligned} i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2} &= c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = v_0(t) \end{aligned} \tag{3.10}$$

En appliquant la relation (3.3) sur les systèmes d'équations (3.9) et (3.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur –survolteur

$$\begin{aligned} i_l(t) &= \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_0(t) &= - (1-d) i_l - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ v_i(t) &= \frac{1}{d} (-1(1-d)v_0 + l \frac{di_l}{dt}) \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.3.4. Simulation Hacheur :

On va voir la simulation du hacheur à l'aide du PSIM 9

3.3.4.1. Simulation Hacheur a thyristors :

Cette simulation est représentée par la figure suivante :

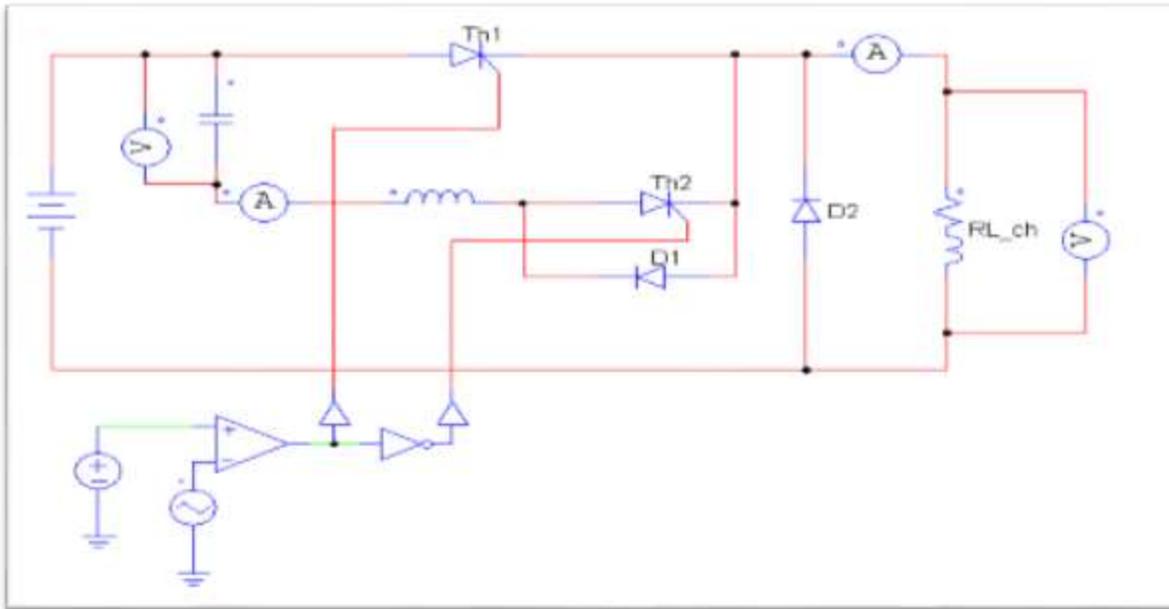


Figure 3 . 11 : montage hacheur à thyristors par PSIM 9

Et les résultats de cette simulation sont donnés par les figures suivantes :

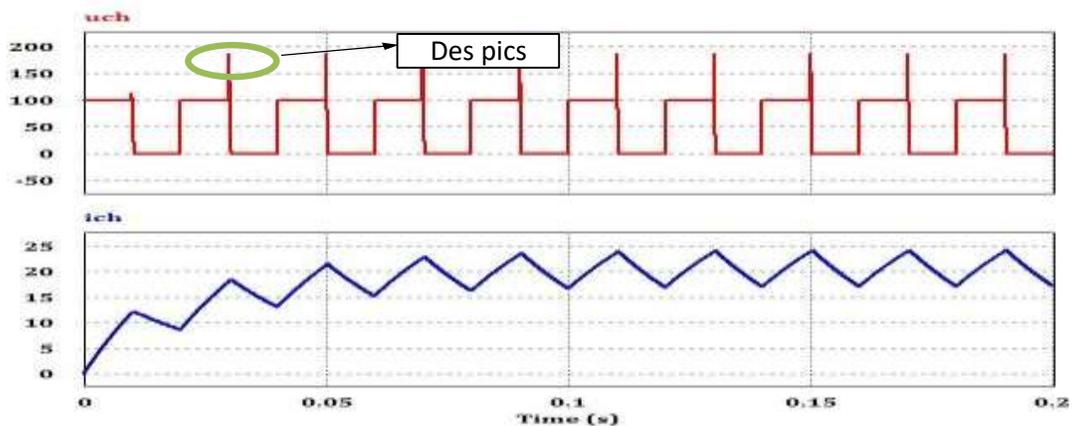


Figure 3 . 12 : courbe de tension Uch et de courant Ich d'entrée du hacheur a thyristors

Interprétation :

- Pour la tension U_{ch} elle commence de 100 v et c'est la tension d'entrée et elle augmente jusqu'au 180 v mais on voit qu'il y a des pics entourés avec le vert dans la courbe sont causés de condensateur C qui est dans le montage car il est chargé dans le début + la tension d'entrée on remarque ces pic
- Pour le courant I_{ch} il augmente de 0 à 25 avec le temps et ça forme est déformé.

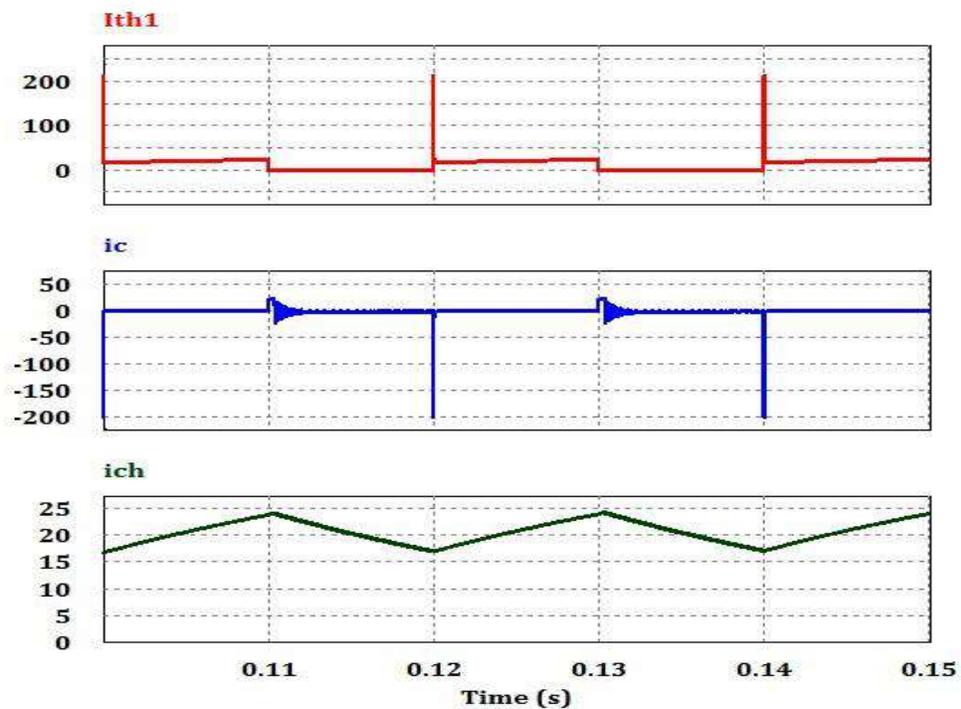


Figure 3. 13 : la forme des courants I_{th1} - I_c - I_{ch}

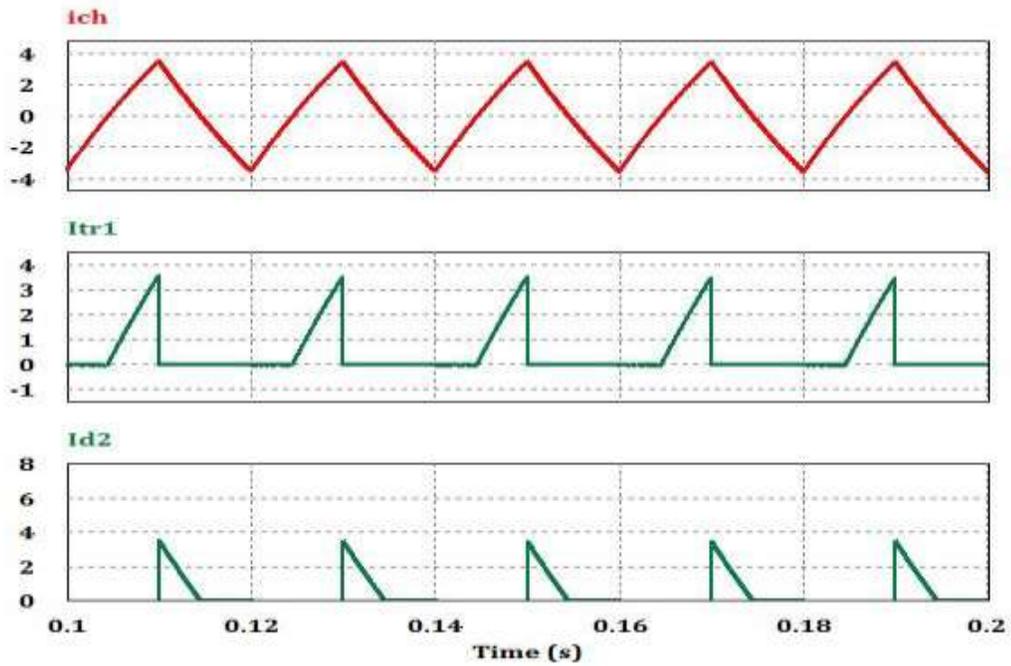


Figure 3 . 14 : la formes des courants Ich Itr1 et Id2

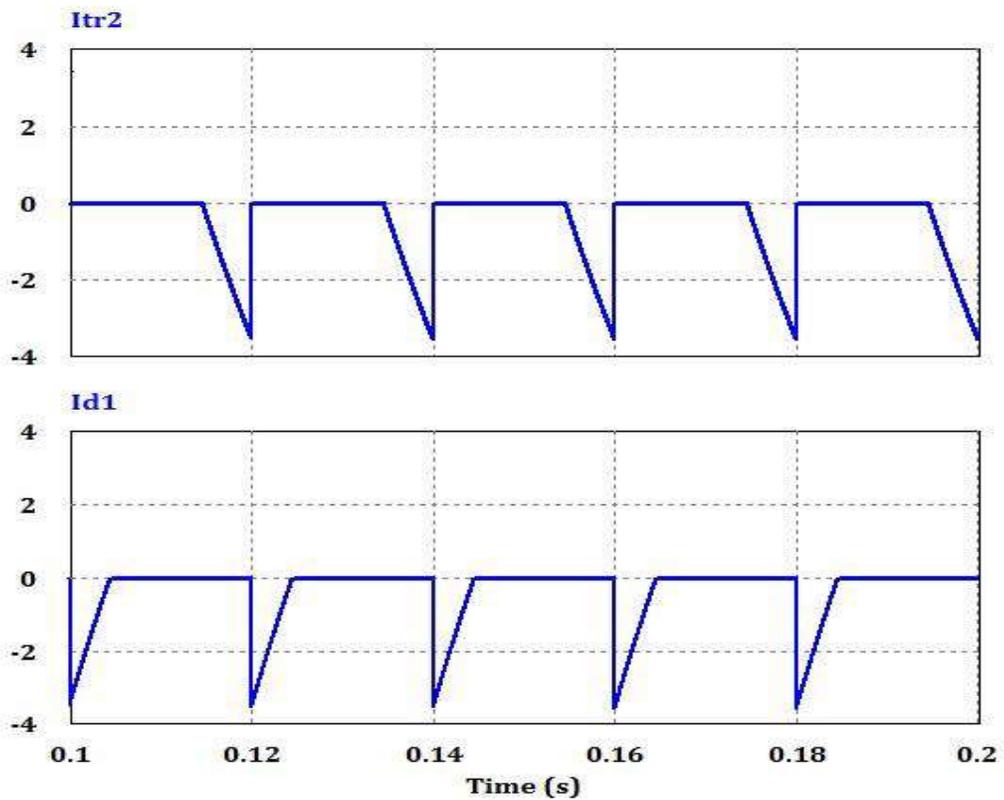


Figure 3 . 15: la formes des courants Itr2 et Id1

Interprétation :

On voit que les thyristors s'ouvrent quand les diodes sont fermées et la réciproque est vraie.

Et l'amplitude des courants des diodes est plus petite que celle des courants qui traversent les thyristors.

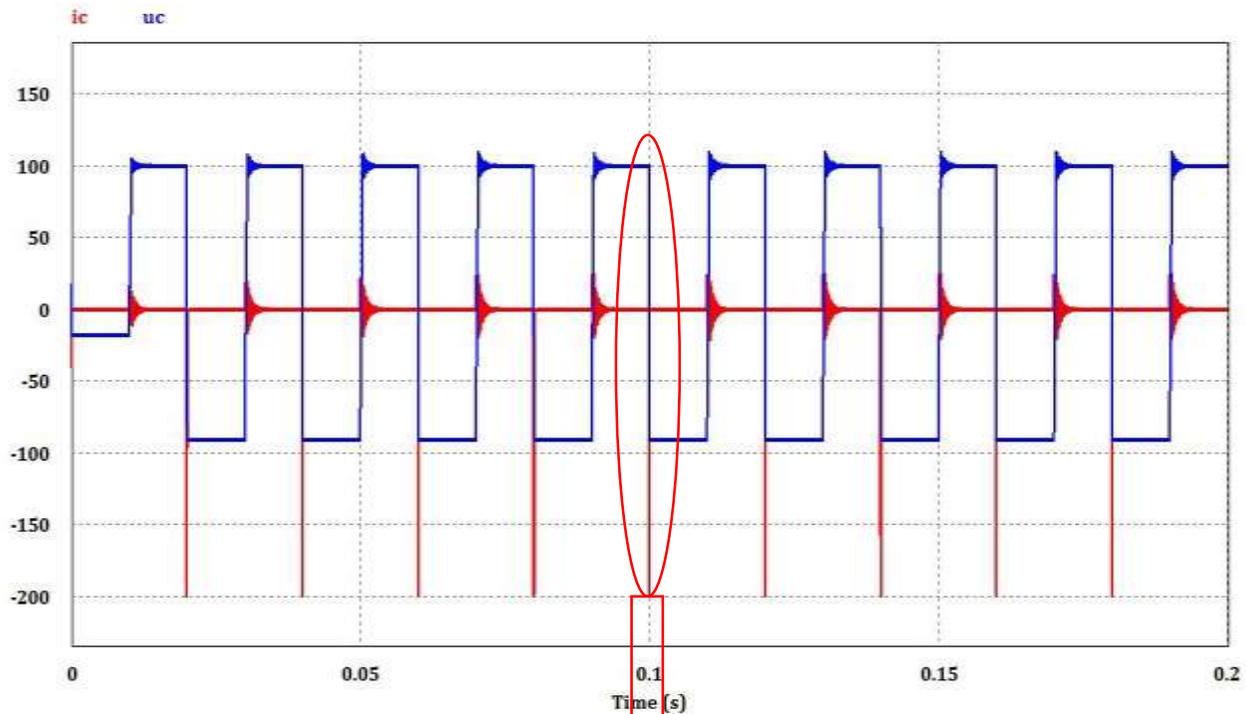


Figure 3.16 : la forme de U_c et I_c du hacheur à thyristor

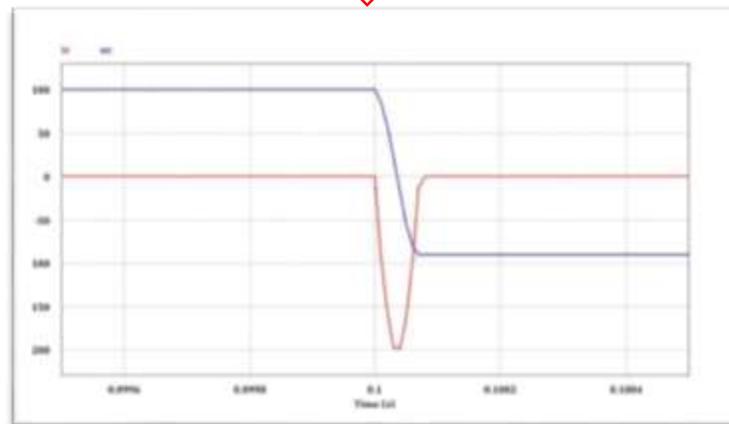


Figure 3.17 : Zoom d' U_c et I_c du hacheur à thyristor

3.3.4.2. Simulation Hacheur réversible a IGBT :

Dans ce cas en a remplacé les thyristors et les diodes par un IGBT :

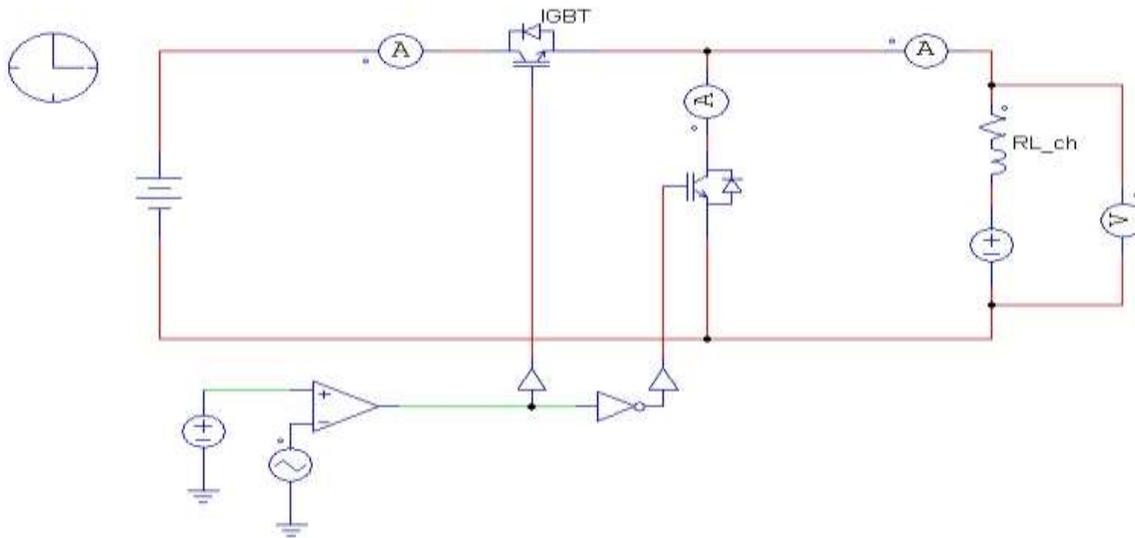


Figure 3 . 18 : montage hacheur à IGBT

Les résultats de cette simulation sont représentés par la figure suivante :

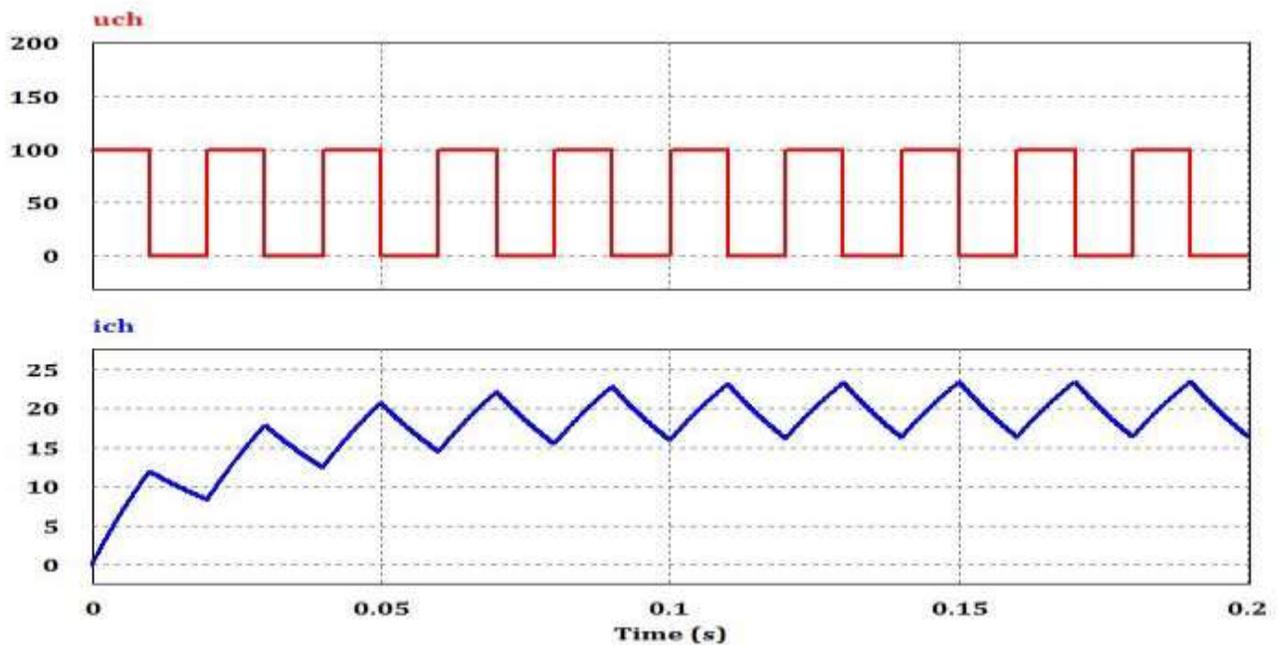


Figure 3 . 19 : la forme d'Uch et Ich du hacheur à IGBT

Interprétation :

On voit dans la figure précédente que la tension d'entrée ne contient plus les pics car on a travaillé avec IGBT qui ne contient pas de condensateurs

La forme de courant I_{ch} reste la même que celle du hacheur à thyristors.

3.4. Les Convertisseurs DC-AC (Les onduleurs)

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires.

La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit. [15]

3.4.1. Classification :

Les montages onduleurs sont très nombreux en fonction de leurs applications, de leurs structures et de leurs commandes. [16]

Nous pouvons classer les onduleurs suivants :

- **le nombre de phases de la charge** : nous distinguerons
 - ❖ les onduleurs monophasés.
 - ❖ les onduleurs triphasés.

- **la nature de la source** :
 - ❖ **l'onduleur de tension** : alimenté par un générateur de tension continu, il impose par sa commande la tension $u(t)$; la charge impose alors l'intensité $i(t)$.
 - ❖ **l'onduleur de courant** : alimenté par un générateur de courant continu, il impose par sa commande le courant $i(t)$; la charge impose la tension $u(t)$.

- **la structure du convertisseur** : on trouve des structures en demi-pont, en pont, avec transformateur

- **la nature des interrupteurs** : interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (transistor bipolaire, MOS ou IGBT, GTO), interrupteurs commandés à la fermeture (thyristors) avec blocage naturel ou forcé, interrupteurs commandés à l'ouverture (thyristor dual).
- **le mode de commande** : la forme de la grandeur imposée $y(t) = u(t)$ ou $i(t)$ peut être à deux niveaux $+U_0$, à trois niveaux $+U_0, 0, -U_0$, en marche d'escalier (plusieurs niveaux par alternance), à modulation de largeur d'impulsion (en abrégé MLI ou PWM pour Pulse Width Modulation)

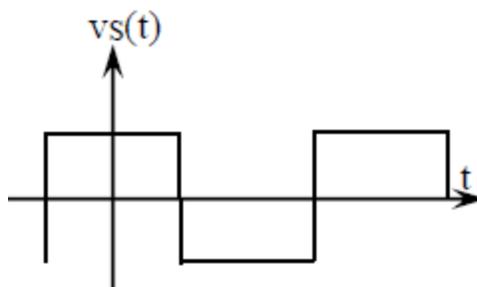
3.4.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur :

En pratique, l'onduleur est composé d'un ensemble de composants actifs (interrupteurs électroniques) et de composants passifs (transformateur).

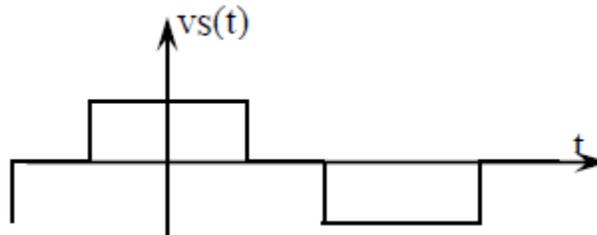
Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. [17]

La forme d'onde alternative de la tension de sortie est déterminée par le système (par différence avec les onduleurs autonomes). Selon la forme de cette tension de sortie, on classe les onduleurs en plusieurs catégories :

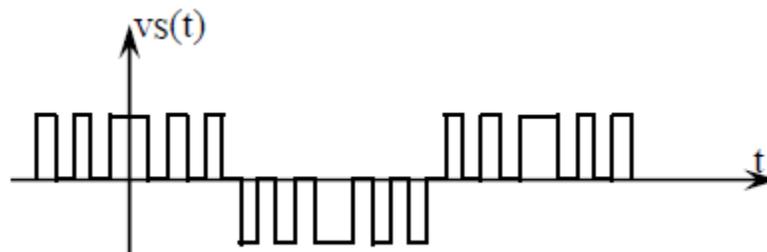
- Onduleur 2 états (tension en créneaux $+U, -U$) : la valeur efficace de la tension de sortie n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.



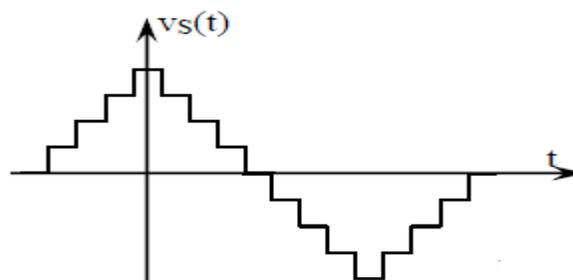
- Onduleurs 3 états (+U, 0, -U) : la valeur efficace de la tension de sortie est réglable en agissant sur la durée du créneau.



- Onduleurs à modulation de largeur d'impulsions : MLI (Pulse Width Modulation PWM) : L'onde de sortie est avec train d'impulsions de largeur et d'espacement variables. Ceci permet de réduire le taux des harmoniques. On peut même obtenir une onde de sortie voisine de l'onde sinusoïdale.



- Onduleurs à tension de sortie en marche d'escalier : l'onde de sortie est constituée par la somme ou la différence de créneaux de largeur variable et sa forme générale se rapproche au mieux de la sinusoïde. L'un des problèmes de ce système est le nombre important d'éléments.



3.4.3. Les type des onduleurs :

On va présenter les deux types d'onduleur et on va voir leur schéma électrique.

[18]

3.4.3.1. Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

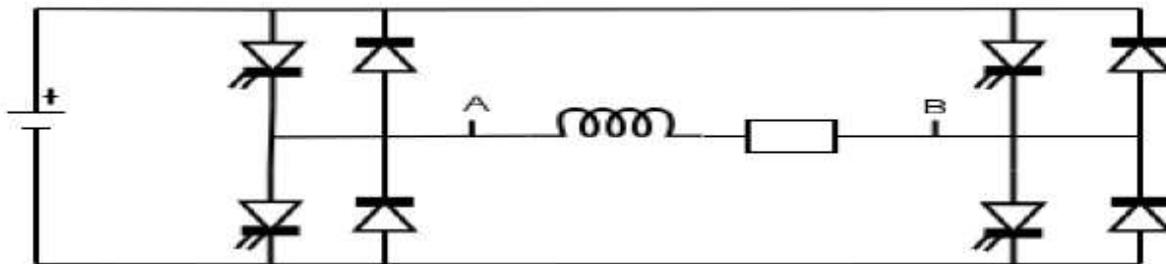


Figure 3 . 20 : schéma d'un onduleur monophasé

a. Onduleur monophasé en demi-pont :

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure suivante :

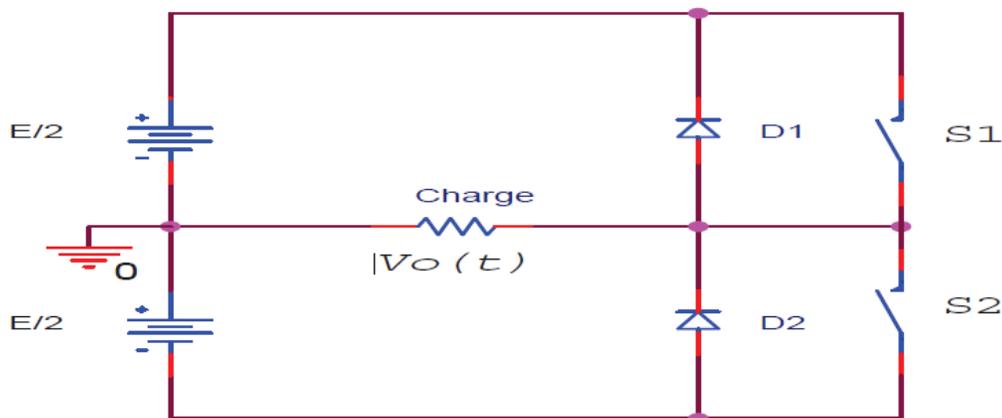


Figure 3 . 21 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire.

La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi-cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis. Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, S2 est fermé. La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance (temps de montée t_r , temps de descente t_f et temps de stockage t_s). Les diodes D1, D2, dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge. [19]

b. Onduleur monophasé en pont (Pont H) :

L'onduleur en pont est représenté en figure il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 quand les interrupteurs S1 et S2, sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S3 et S4.

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue. [20]

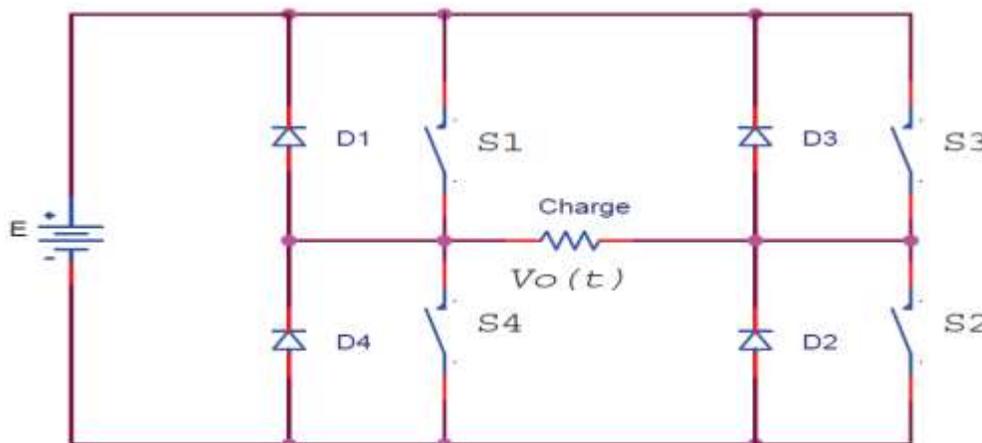


Figure 3 . 22 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H

3.4.3.2. Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance.

La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre. [21]

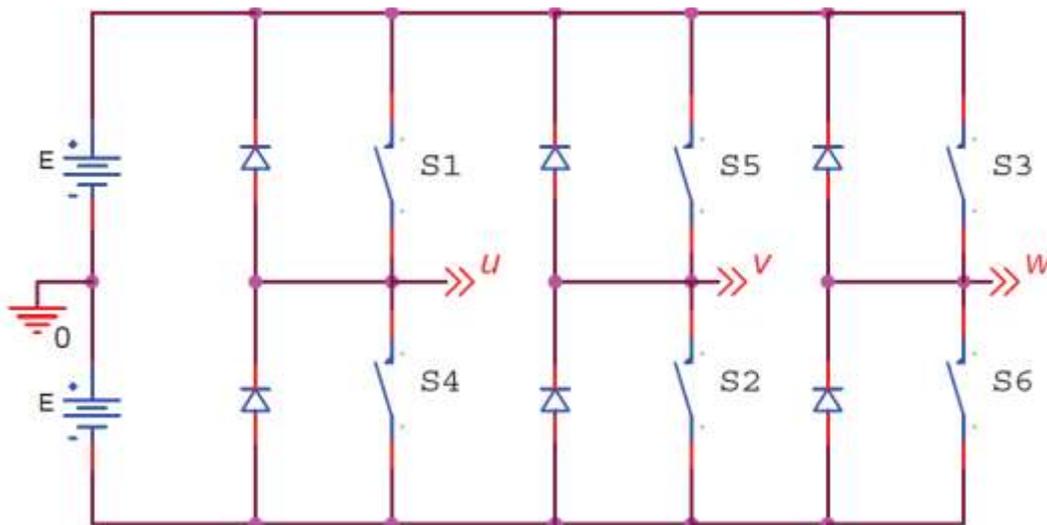


Figure 3 . 23 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

3.4.4. Simulation de l'onduleur triphasé :

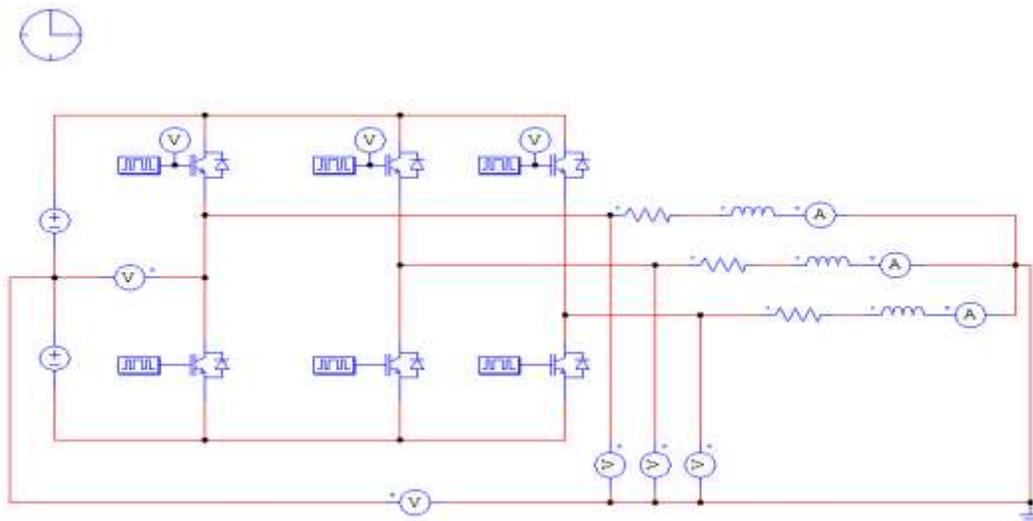


Figure 3 . 24 : Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9

Après avoir simulé l'onduleur triphasé on va voir la forme des impulsions de ce dernier et ils sont capturés dans les figures suivantes :

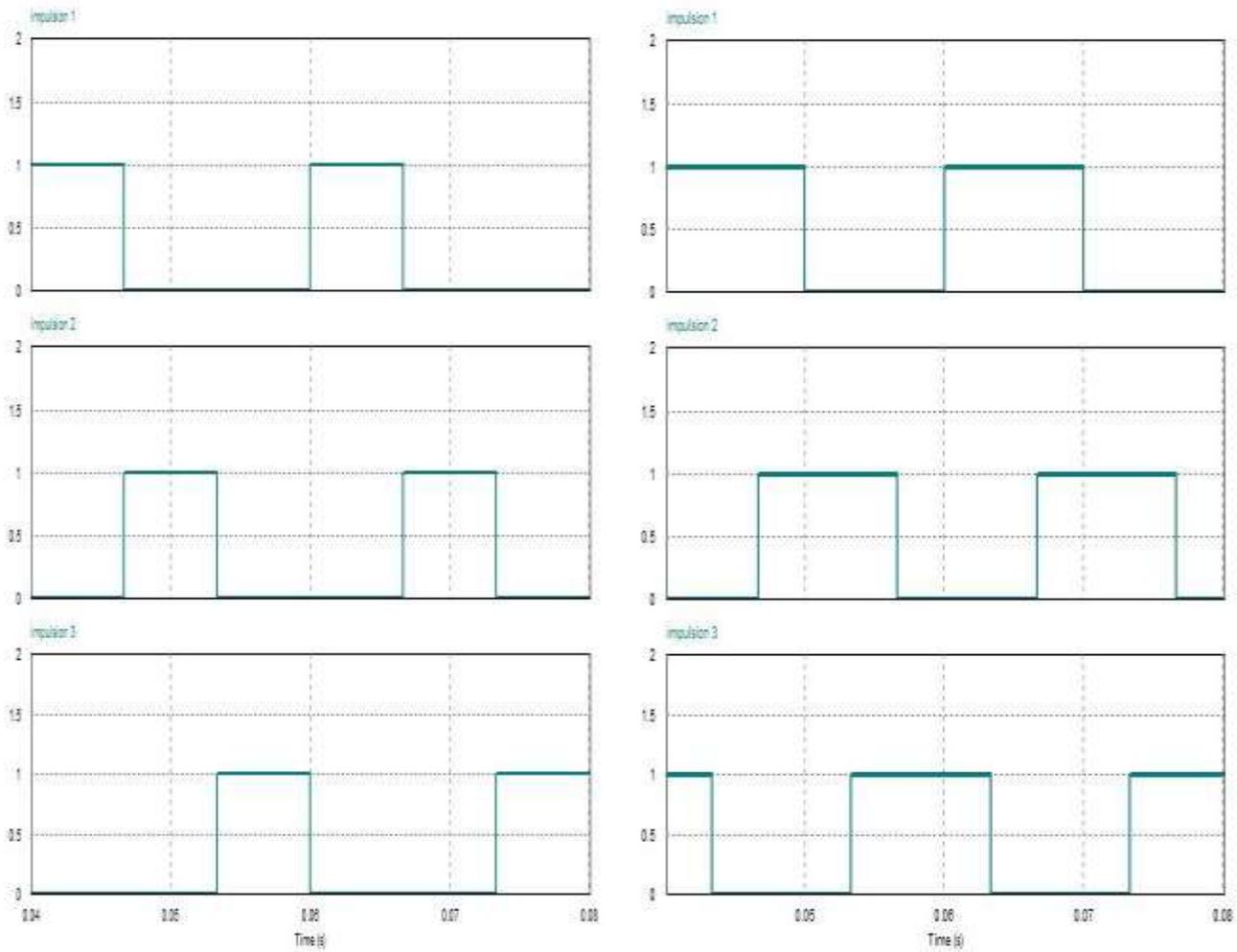


Figure 3 . 25 : Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9

3.4.3.1. La commande 180 degrés de l'onduleur :

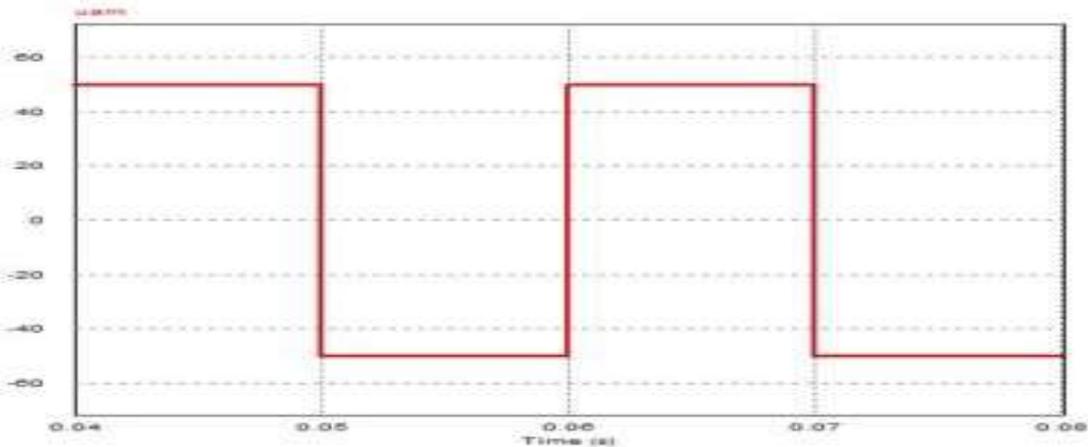


Figure 3 . 26 : la forme d'Uam

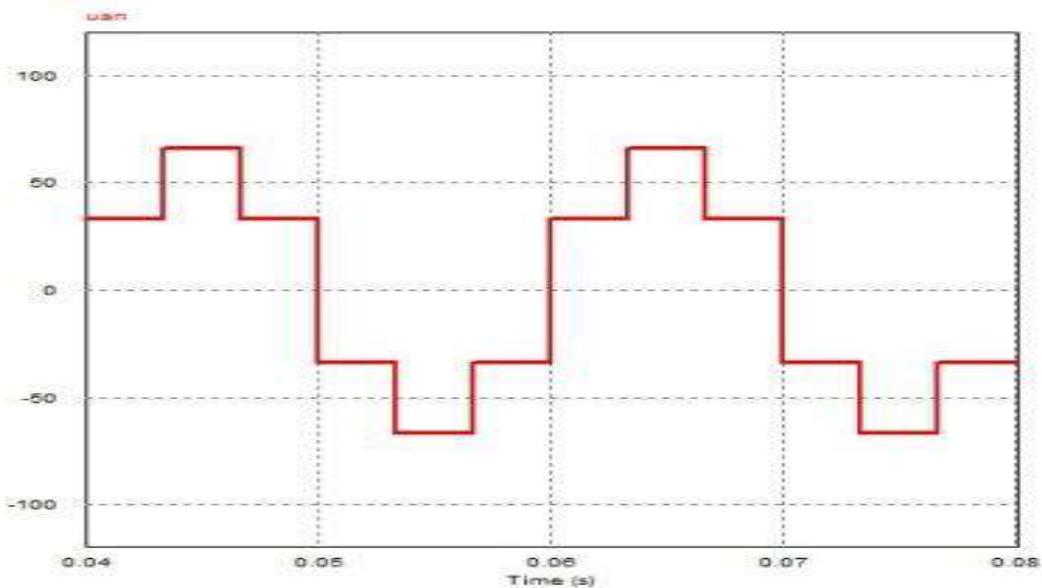


Figure 3 . 27 : la forme d'Ubn

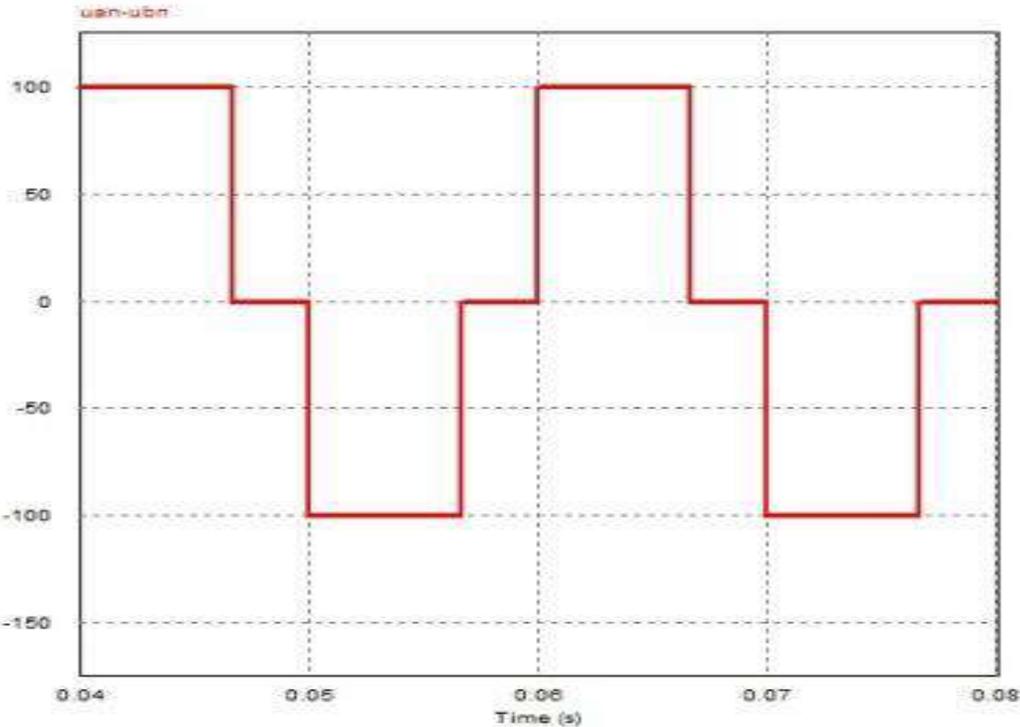


Figure 3.28 : la forme d'Uan-Ubn

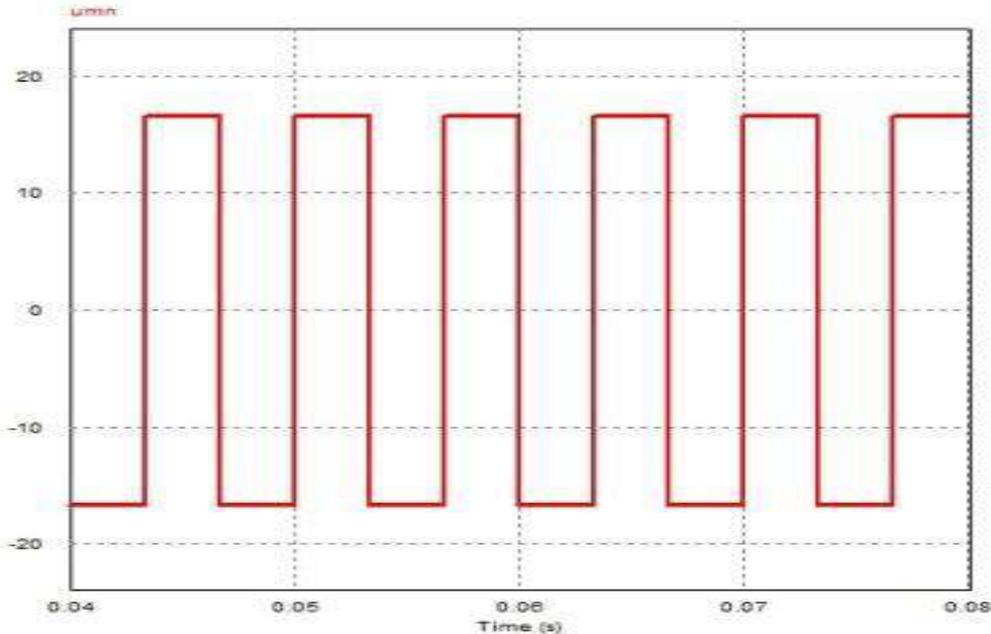


Figure 3.29 : la forme d'Umn

Interprétation :

Cette commande est conçue de façon à ce que les interrupteurs soient commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais leurs conceptions déphasages, d'où :

À tout instant trois interrupteurs sont en état de conduire et les trois autres sont bloqués ; deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.

La **figure 3.25** montre les six séquences de conduction obtenues par période, ce qui permet de construire, les allures des tensions composées, et tensions simples. Les **figures 3.(26.27.28.29)** montrent le détail de cette construction. Sur ces chronogrammes on voit que les trois tensions simples ont une forme en marches d'escalier, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées, d'amplitude $2/3.E$, de période T égale à celles des tensions composées.

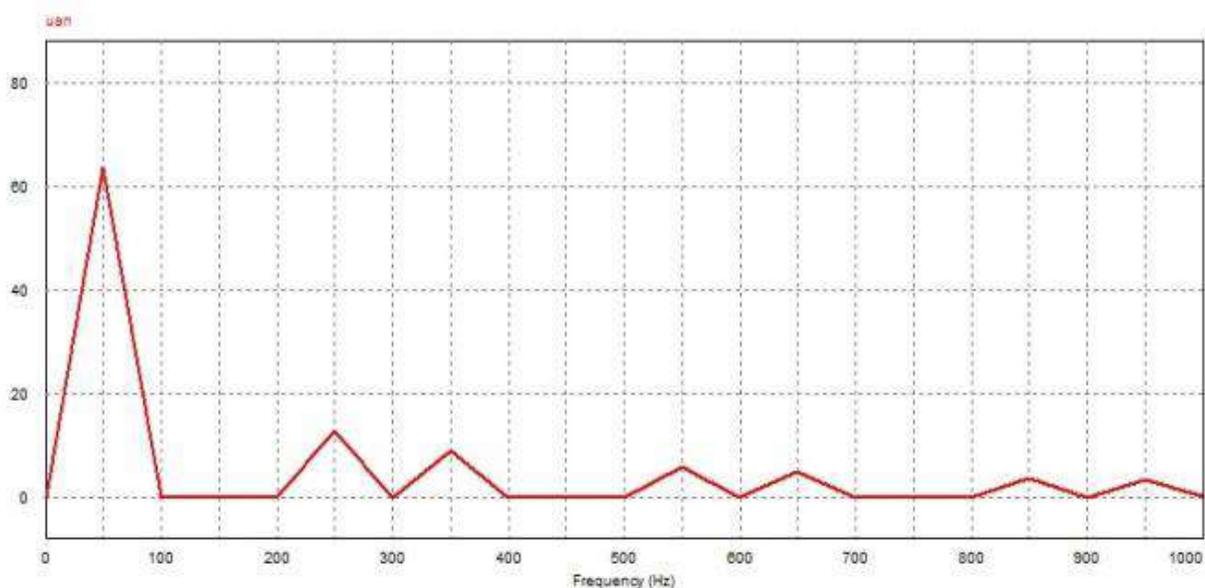


Figure 3 . 30 : Spectre d'harmonique ; commande 180°

3.4.3.2. La commande MLI d'un onduleur triphasé :

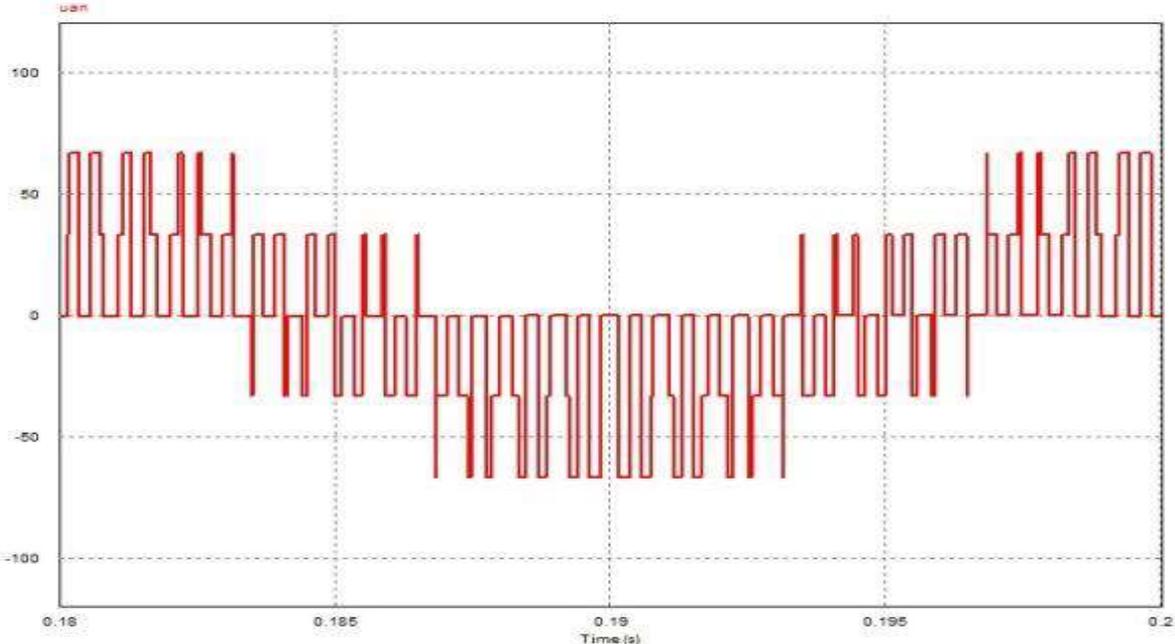


Figure 3 . 31 : la forme d'Uan

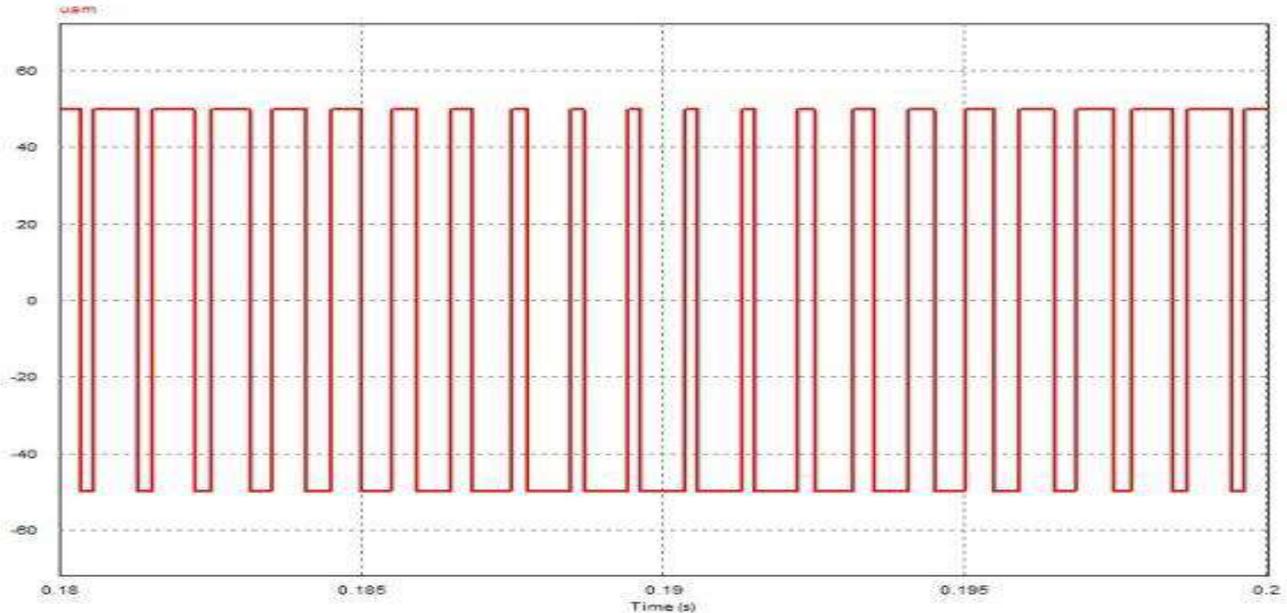


Figure 3 . 32 : la forme d'Uam

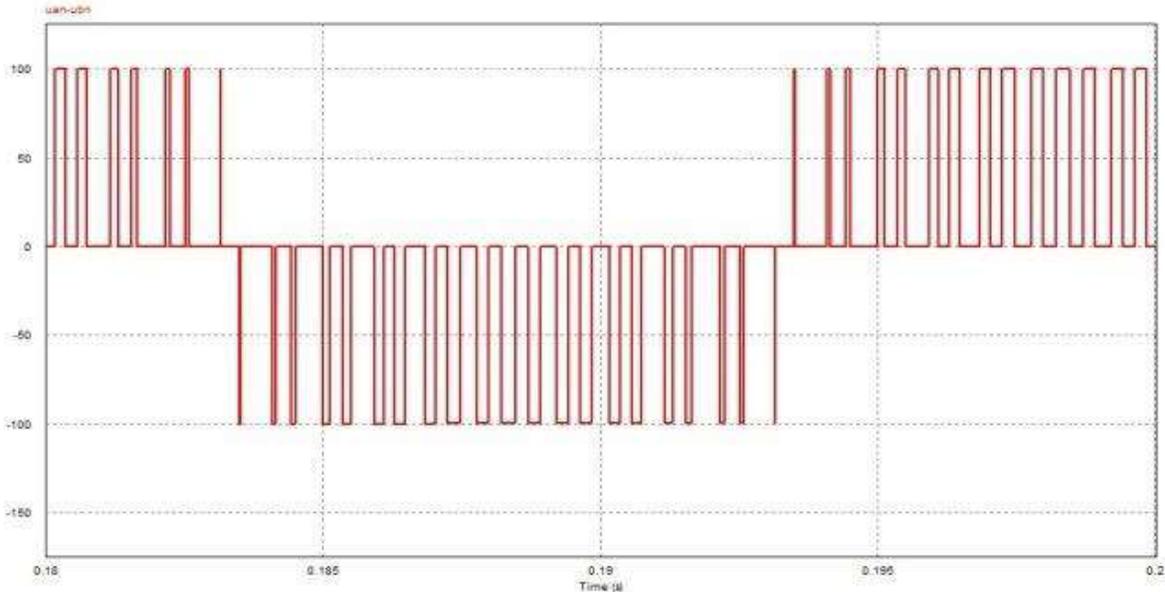


Figure 3.33 : la forme d'Uan-Ubn

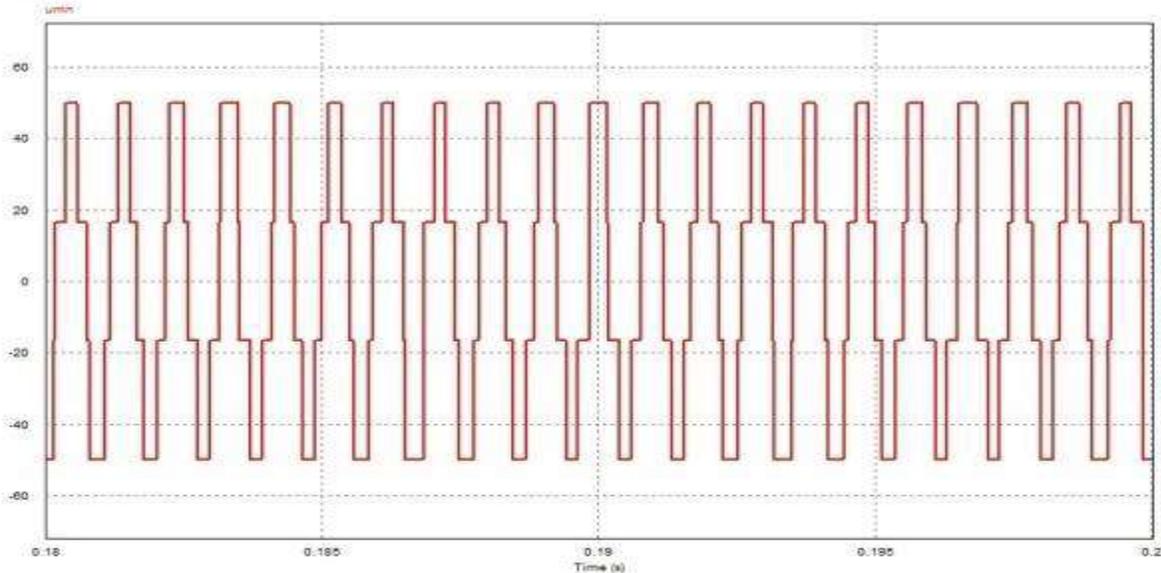


Figure 3.34 : la forme d'Umn

Interprétation :

Un onduleur triphasé peut être considéré comme étant trois onduleurs monophasés déphasés de 120° .

Ainsi, les techniques que ces derniers utilisent, sont applicables aux onduleurs triphasés.

Par exemple, la génération des signaux de commande avec une MLI sinusoïdale est montrée sur les **figures 3. (31.32.33.34)** On remarque que les trois ondes de référence sinusoïdales sont déphasées de 120° entre elles.

Une onde porteuse est comparée avec le signal de référence de la phase correspondante pour générer le signal de commande de cette phase.

La tension de sortie est générée en éliminant la condition que deux dispositifs de commutation de la même branche ne peuvent conduire en même temps.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les convertisseurs utilisés dans notre système photovoltaïque qui sont le hacheur (Buck et Boost) et l'onduleur (monophasé et le triphasé) et leur simulation qui est représentée avec PSIM 9.

CHAPITRE IV
LA COMMANDE MPPT

4.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Cependant, la caractéristique I-V et P-V du générateur dépend de variations climatiques comme l'éclairement solaire et la température.

Ces variations entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de le hacheur.

La technique de suivi du point à puissance maximal (Maximum Power Point Tracking : MPPT) a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D ou CS en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. [22]

4.2. Principe de fonctionnement de la commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique CS en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le module PV, La chaine de puissance ou un générateur photovoltaïque alimente une charge continue en une adaptation avec un convertisseur statique de type hacheur élévateur commandé par une MPPT peut être représentée comme l'indique la **Figure (4.1)**. [23]

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (IPV et VPV).

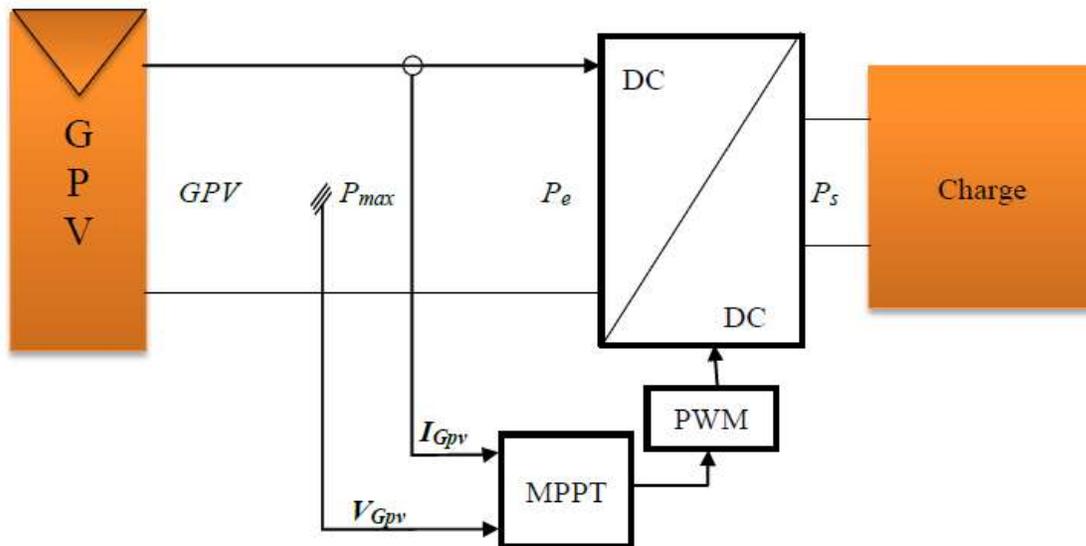


Figure 4.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire à base d'une commande MPPT

4.3. Classification Des Commandes Mppt

Nous avons fait une classification des différentes techniques MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. [24]

4.3.1. Algorithme de perturbation et observation P&O :

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du module VPV, avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale (ΔV), et on observe la variation de la puissance PPV qui résulte. Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV c'est-à-dire $\Delta P > 0$, comme illustré dans la **Figure (4.2)**, la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP, et on continue à perturber la tension dans la même direction. [25]

Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier 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 MPP

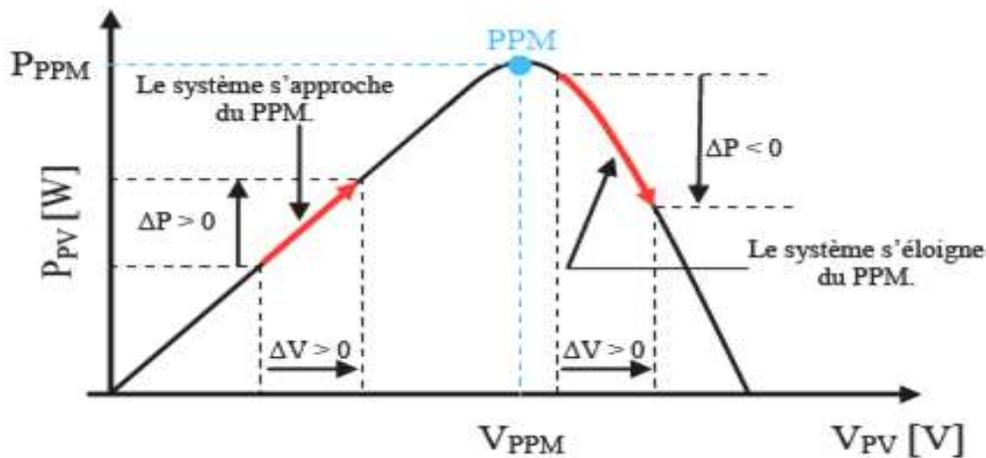


Figure 4.2 : Application de l'algorithme P&O sur la caractéristique PPV (VPV)

4.3.2. Algorithme de « Incrément de Conductance » (IncCond) :

C'est une méthode basée sur la dérivée de la puissance de sortie du GPV par rapport à la tension VPV du GPV qui doit être égale à 0 au point de puissance maximale (MPP) [26]

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4.1)$$

Au PPM ces deux membres doivent être égaux. Si le point de fonctionnement n'est pas sur le PPM, alors une inégalité apparaît dans l'équation (IV-1). Ceci indique que la tension de fonctionnement est au-dessus ou au-dessous de la tension optimale comme montré dans la **Figure (4.3)**. Cette situation nous conduit aux équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ \AA gauche du PPM} \quad (4.2)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ \AA droite du PPM}$$

- Si, « $dI/dV > -I/V$ » le point de fonctionnement est à gauche de MPP, donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.
- Si, « $dI/dV < -I/V$ » le point de fonctionnement est à droite de MPP, donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.
- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I = 0$ on a les conditions atmosphériques qui n'ont pas changées et le MPPT fonctionne toujours au MPP.
- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$, alors c'est l'ensoleillement qui a augmenté, ceci exige au INC-MPPT d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.
- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I < 0$ c'est l'ensoleillement qui a diminué, ceci exige au INC-MPPT de diminuer la tension de fonctionnement pour retrouver le PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance ($\Delta IPV/\Delta VPV$). [26]

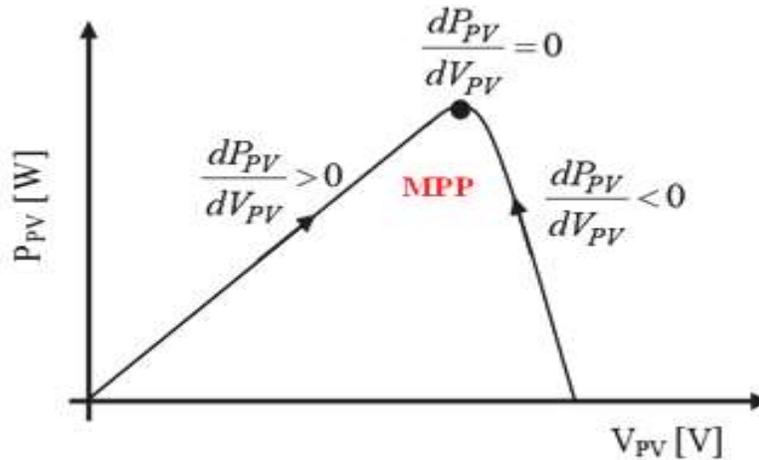


Figure 4.3 : Méthode IncCond pour poursuivre le MPP

4.3.3. Algorithme Escalade de la Colline (Hill Climbing) :

La technique de contrôle nommée Escalade de la Colline ou *Hill Climbing* consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximale est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du module et la valeur du rapport cyclique D appliqué au convertisseur statique.

Mathématiquement, le MPP est atteint lorsque dP_{PV}/dD est forcée à zéro par la commande, comme le montre la **Figure (4.4)**. [27]

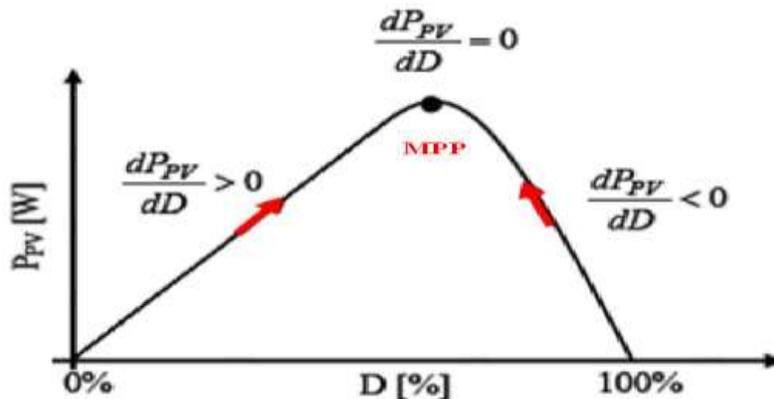


Figure 4.4 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D de convertisseur statique

4.4. Choix de l'Algorithme

Le **Tableau (4.1)** montre la comparaison entre les différentes techniques MPPT dont nous avons rappelé les principes ci-dessus. [28]

L'analyse de ces différentes méthodes de recherche montre que les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à un seul paramètre η_{MPPT} qui est défini comme le rendement du MPPT.

MPPT	Rendement η_{MPPT}	Avantages	Inconvénients
P&O	81.5%-96.5%	-Une structure simple. -Implémentation facile. -Peu de paramètres de mesure.	- Présente des oscillations autour du MPP. -Perte occasionnelle de la recherche du MPP lors du changement rapide des conditions climatiques.
IncCond	89.9%-98.2%	- Il n'y a pas de pertes par rapport au MPP. -Ne présente pas de risques de divergence par rapport au MPP.	-Le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car il est plus complexe.
Hill Climbing	95.5%-99.1%	-Simple à mettre en œuvre.	- Des oscillations autour du MPP en régime établi. -Perte occasionnelle de la recherche du MPP lors du changement rapide des conditions climatiques.

Tableau 4. 1 : Tableau comparatif entre les commandes MPPT

D'autres critères tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance, sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande. Les divers essais extraits de la littérature selon montrent que ce type de

commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche est plus performant qu'un autre, en revanche, ils donnent une estimation d'un rendement qui peut être élevé.

4.5. Simulation de l'MPPT par MATLAB/SIMULINK :

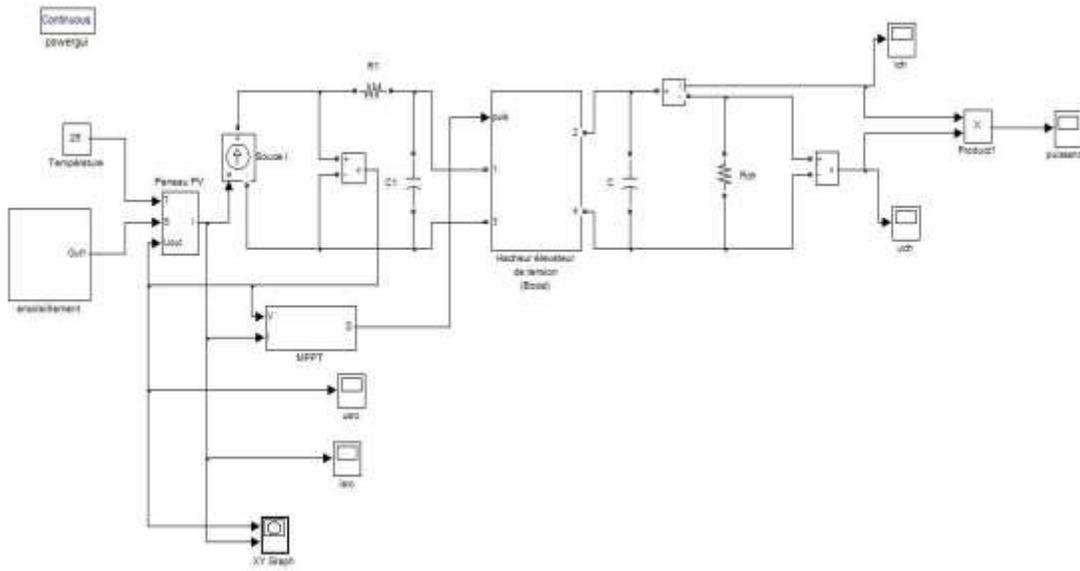


Figure 4.5 : montage PV-MPPT

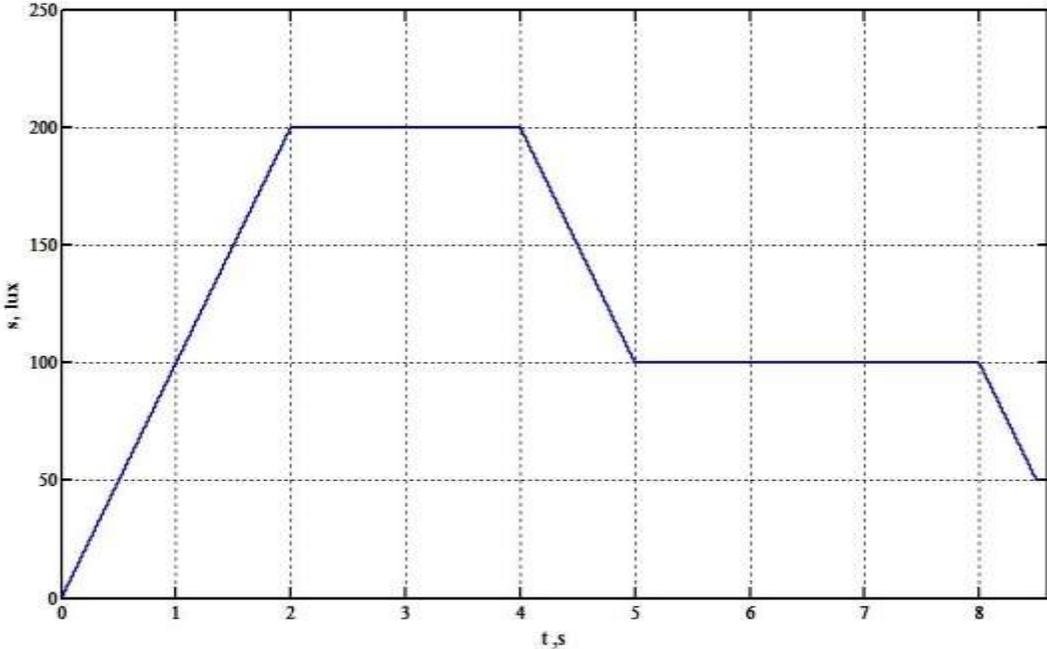


Figure 4.6 : L'éclairément

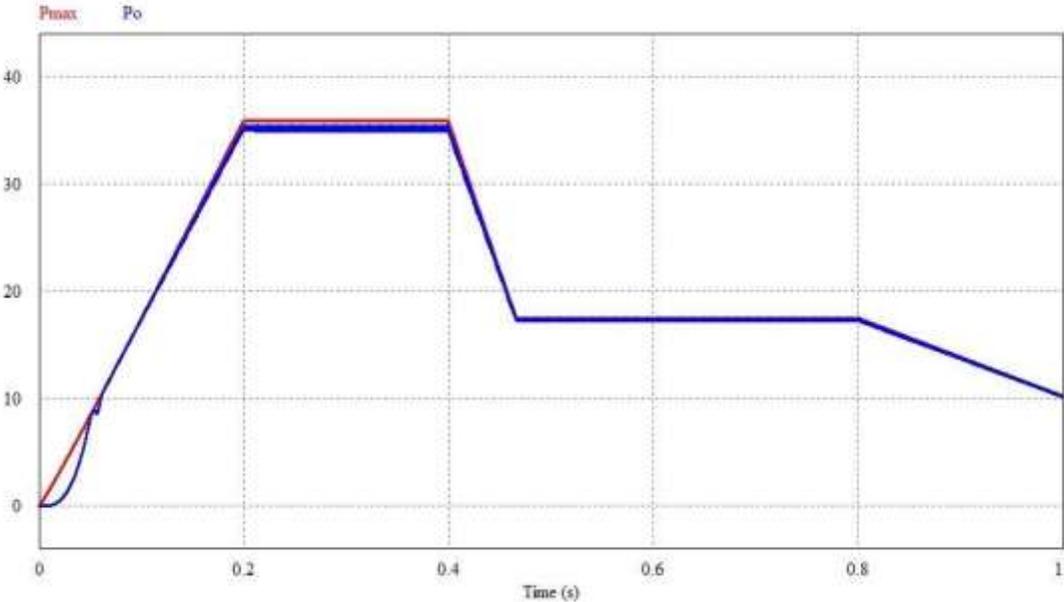


Figure 4.7 : la forme de la puissance et la puissance MAX

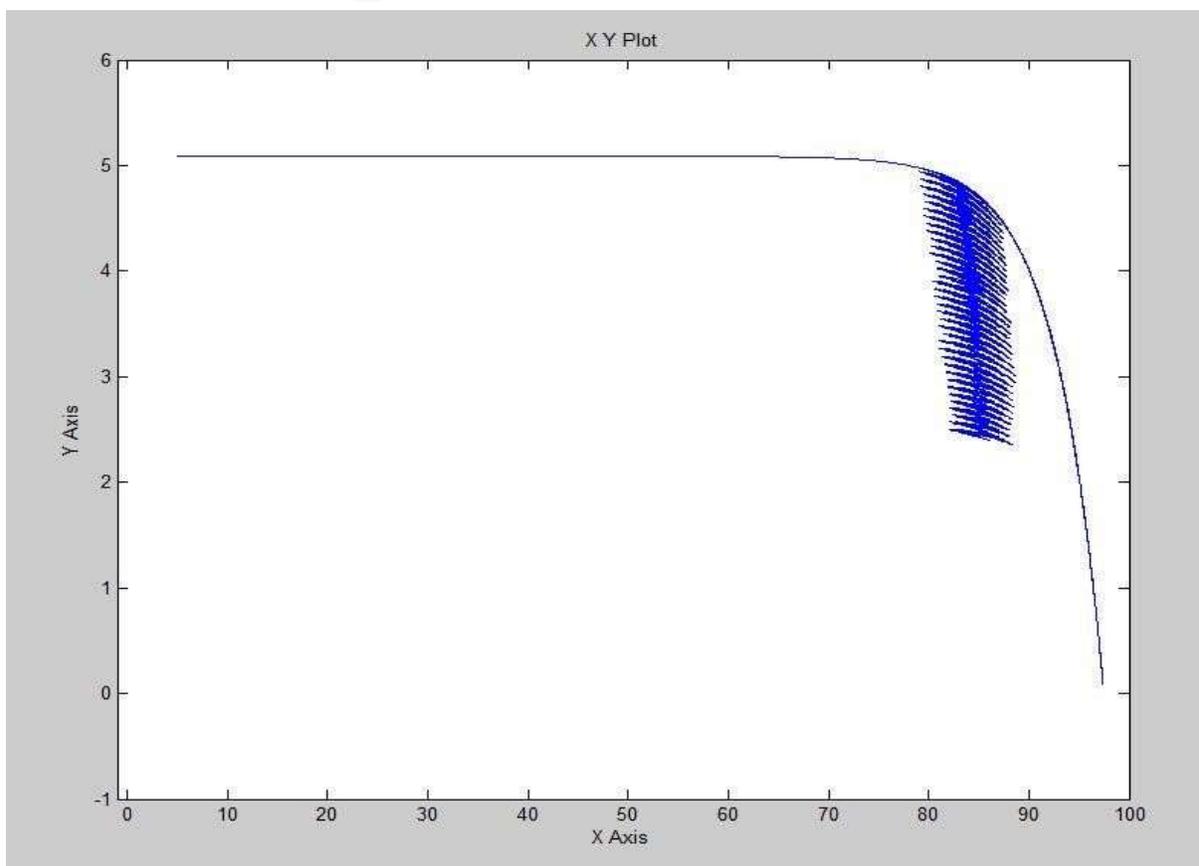


Figure 4.8 : caractéristique I-V : cas de diminution de l'éclairement

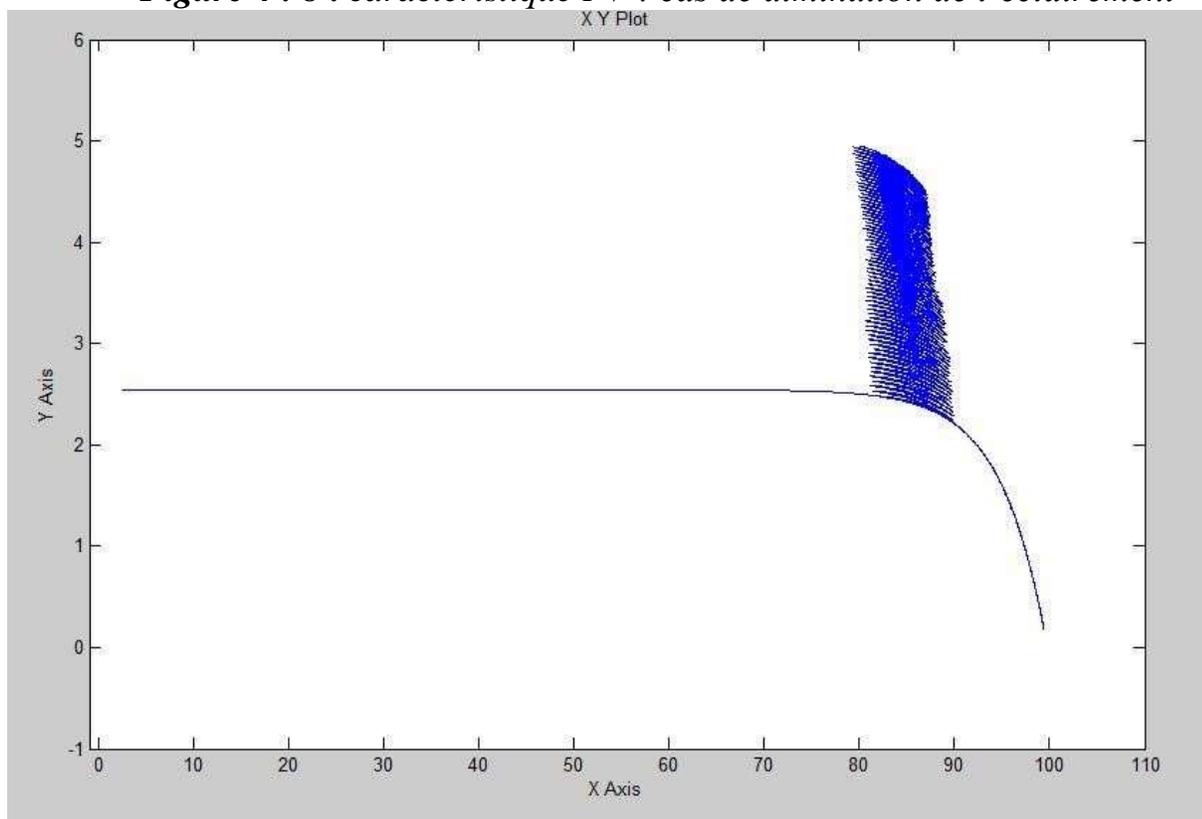


Figure 4.9 : caractéristique I-V : cas d'augmentation de l'éclairement

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques commandes MPPT des convertisseurs DC_DC basée sur une contre réaction de puissance.

Pour forcer le système photovoltaïque à fonctionner au MPP (point de puissance maximale).

On a présenté la simulation de l'MPPT avec MATLAB/SIMULINK.

CHAPITRE V
STOCKAGE DE L'ENERGIE
ÉLECTRIQUE

5.1. Introduction

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. 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 ;
- L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques). [29]

Le système de stockage le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques.

5.2. Stockage de l'énergie

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïque est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi, il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours sans soleil et pour mieux adapter le générateur PV en fixant la tension du système. Les techniques utilisées pour le stockage de l'énergie sont très nombreuses. Selon la nature du stockage, on peut distinguer le stockage direct et le stockage indirect.

5.3. Stockage indirect

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique).

Une batterie est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'accumulateurs électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte. L'accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement.

Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV, elle est nécessaire pour faire face aux heures de non production.

Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté impose l'utilisation de batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie. [30]

Dans les systèmes solaires autonomes on utilise principalement :

5.3.1. Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac) :

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives, bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative, ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

La tension varie entre 1.7 Volts et 2.4 Volts par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Ces accumulateurs ont un rendement énergétique de l'ordre 70 à 85 %. En raison de leur maintenance nécessaire, ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques de puissance.

5.3.2. Accumulateurs au sodium-soufre (Na-S) :

sont à base de sodium (Na) et de soufre (S) présentant en général une bonne densité énergétique (100-110Wh/kg) et des rendements de 89 % à 92 %. En batterie, ils peuvent être utilisés pour de très grandes capacités (plusieurs MW), ce qui permet de les utiliser pour des systèmes de stockage en soutien à un réseau électrique.

5.4. Stockage direct

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit : des condensateurs, des supercondensateurs et des inductances supraconductrices. Ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité.

Supercondensateur :

- Principe : le fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Ainsi, dans le supercondensateur, l'énergie est stockée sous forme électrostatique.
- Propriétés et applications : les supercondensateurs ont une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, un rendement de l'ordre de 95%, une autodécharge de l'ordre de 5% par jour et une capacité pouvant atteindre 5000 F.

Ils sont très souvent utilisés dans le domaine du transport où sa technologie satisfait généralement aux fonctions de démarrage. Aussi, ils sont utilisés comme alimentation de secours de mémoires en informatique et de récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros...).

5.5. Les caractéristiques principales d'un accumulateur

Les caractéristiques principales d'un accumulateur sont comme suit : [32]

5.5.1. Tension nominale :

U (unité : le volt, V) : tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge.

5.5.2. Tension à vide :

Tension mesurée aux bornes d'une batterie non connectée à une charge.

5.5.3. Tension en charge :

Tension mesurée aux bornes d'une batterie connectée à sa charge (Récepteur, déchargeur, résistance...). C'est-à-dire délivrant un courant.

5.5.4. Courant :

I (Unité l'ampère, A ou le mA) : Courant circulant dans les câbles et résultant de la connexion d'une charge à une batterie.

5.5.5. Capacité :

C (Unité l'ampère-heure, Ah ou le mAh) Capacité énergétique d'une batterie à délivrer un certain courant pendant un certain temps, (Des ampères fois des heures $A \times h$).

5.5.6. Energie massique ou densité énergétique :

D (Unité le wattheure par kilogramme, Wh/kg) : C'est le rapport entre la capacité d'une batterie à délivrer une certaine puissance pendant un certain temps et son poids.

Notion importante en vol indoor, en propulsion électrique et pour les maniaques du poids.

5.5.7. Le taux d'autodécharge :

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

5.5.8. Le rendement :

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur

5.6. Principe du couplage photo-générateur batterie

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photo-générateur quand la lumière est présente, et « basculer » sur le stockage dans l'obscurité : c'est inutile.

Le plus rationnel est de monter le photo-générateur, la batterie, et le récepteur en parallèle avec des composants de régulation. Ainsi, la batterie sera le «réservoir d'énergie», que l'on remplira d'un côté par le photo-générateur et videra d'un autre par le récepteur. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée.

Autre avantage de ce montage photo-générateur/batterie/récepteur en parallèle.

La batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur ; car le photo-générateur, n'est en fait qu'un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de **0 V** à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en **12 V** continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (<**10V**). [33]

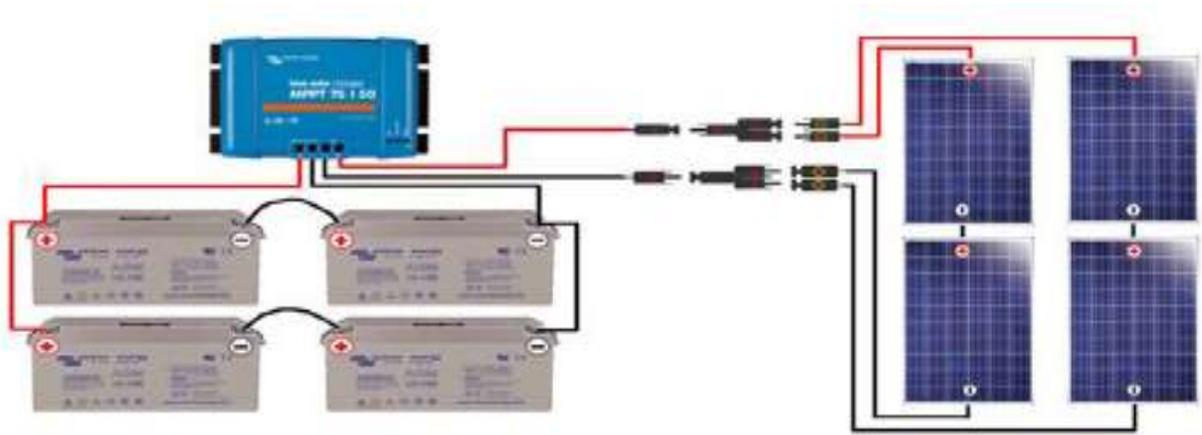


Figure 5 . 1 : principe de couplage des batteries

5.7. Connexion d'une batterie

La batterie est l'élément le plus fragile d'une installation photovoltaïque ou éolienne, c'est également l'un des organes essentiels à son bon fonctionnement. Il est donc très important de bien choisir sa batterie et d'en prendre soin, notamment lors du montage.

Avant d'être raccordées, les batteries doit être installées à leur emplacement définitif.

Pour les branchements, il faut se munir de câbles électriques adaptés à leur puissance : la section du câble doit être plus ou moins grande en fonction de l'intensité pour limiter les pertes par « effet de Joule ». Il est recommandé d'intégrer un fusible externe entre la batterie et le régulateur, et/ou entre la batterie et les consommateurs pour empêcher tout risque de court-circuit. Ce fusible devra être au plus près des pôles de la batterie.

Si les batteries sont plusieurs et qu'elles nécessitent un branchement en série ou en parallèle, il faut les connecter entre elles avant tout. Elles pourront ensuite être raccordées au régulateur (on connecte toujours les batteries en premier, avant les modules photovoltaïques/éoliennes ou les consommateurs) [34]

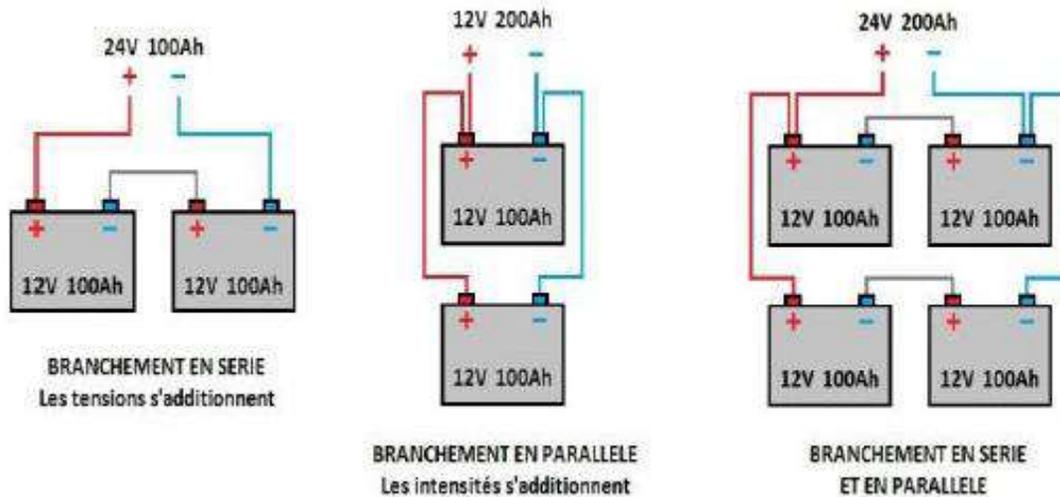


Figure 5.2 : Connexion des batteries

5.8. Conclusion

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite.

C'est la raison pour laquelle nous avons essayé de dégager, de façon critique, un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de coût qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avéré une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Dans la première partie, nous avons exposé les fondements nécessaires à la Compréhension du sujet. Nous avons exposé les différents types d'énergies renouvelables leur avantages et leur inconvénients.

En ce qui concerne la deuxième partie, nous avons expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques, leurs particularités essentielles ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. En plus d'une synthèse d'assemblage des Panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Nous n'avons pas omis aussi de signaler les modules photovoltaïques et leurs associations.

Puis et dans la troisième partie on a découvert les convertisseurs de tension qui sont un des composants essentiels dans la modélisation d'un système PV et on parle donc des onduleurs (DC-AC converter) et hacheurs (DC-DC converter) y on a deux buck et boost) et leurs simulation par PSIM 9.

Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les Pertes

en énergie produite, à cet effet on découvre dans la quatrième partie de ce travail La commande MPPT et sa simulation par MATLAB/SIMULINK.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque.

C'est pour cela on a parlé du stockage de l'énergie dans la dernière partie de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- BOUCHAKER Amir Abderaouf et BENBRINIS Mouad « Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé » MEMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
- [2]-<https://www.google.dz/search?q=th%C3%A9se+master+energies+renouvelables+pdf&oq=th%C3%A9se+master+energies+renouvelables+pdf&aqs=chrome.69i57.14563j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [3]-https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [4]- BOUDEN ABDELMALEK « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, Université Mentouri _ Constantine 2008.
- [5]- Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Thème de ABOU-BAKR BELKAID _ TLEMCEN 2012.
- [6]- MECHALIKH M.Nadjib,HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.
- [7]- Mr.MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012.
- [8]-Chadlia Hanene Et Baghana Chems Edine « INSTALATION D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE DANS LE RESEAU ISOLE D'ADRAR (P.I.A.T) » MEMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
- [9]-BENLOMBAREK Brahim & BENAZIEZ Sohieb « OPTIMISATION DE L'ENERGIE ISSUE D'UN RESEAU DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES » MEMOIRE de Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018
- [10]- Rabhi Lamine et Tabane Younes « Commande d'un système photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique » Mémoire de fin d'étude Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
- [11]-BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.
- [12]-Melle NAKOUL Zakia « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2010.
- [13]-M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Thème de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.
- [14]-ABBASSEN LYESS « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE de MOULOUD MAMMERI _ TIZI OUZOU, 2011.
- [15]- BP Solar BP SX150 - 150W Multi-crystalline Photovoltaic Module Datasheet, 2001.
- [16]- Violaine Didier « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » rapport de HESPUL, 2007.
- [17]- M.Seddik Bacha, Les systemes de lelectronique de puissance dédit à la distribution électrique – application à la qualité de lénergie». These de doctorat laboratoire déléctronique de Gernoble Ikerlan (Mondragon,Espagne) ;septembre 2003.
- [18]- F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [19]- S.Fateh «modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique» mémoire de magister Farhat Abbas Sétif.
- [20]- S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [21]- S.Djeriou «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone

- » mémoire de magister université de Ferhat Abbas Sétif Algérie ,2011.
- [22]- M. Makhlof, « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, Algérie, 2006.
- [23]-S.Aoufi « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » université Ferhat Abbas Sétif 2014.
- [24]- M. Angel Cid Pastor : « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.2006.
- [25]- C. Alonso : « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire En vue de l'obtention de L'habilitation à diriger les recherches 2003.
- [26]- R. Andoulssi: « étude d'une classe de système photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande ». Thèse de doctorat université de Lille 2001.
- [27]-L. Abbasen « étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de magister université Mouloud Maameri Tizi Ouzou 2011.
- [28]- N Debili « Etude et optimisation en environnement Matlab / Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque » mémoire de magister Université Constantine Université Constantine I 2014.
- [29]- D. BOUKHERS « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE » Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine.
- [30]- P. Lefrank, « Etude conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Novembre 2005.
- [31]- M. Angel et al « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électronique, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS).
- [32]-JONES Bringing Nickel-Hydrogen Down to earth Batteries International Avril 1993
- [33]-WROBLOWA H.S.Modern aspects of electrochemistry New York, Plenum Press, Vol. 16 , 1985 Power sources 8, 1981
- [34]- LINDEN D. HANDBOOK OF BATTERIES AND FUEL CELLS McGraw-Hill, New York