

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :/2019



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari

Thème

Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 02 /07 /2019, devant le jury composé de :

M. MENDACI Sofiane	Professeur/MCA	Univ. Guelma	Président
M. BOUZIT Ali	Professeur/MAA	Univ. Guelma	Encadreur
M. BENLALOUI Idriss	Professeur/MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le souffle de vie, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et c'est grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nos vifs et sincères remerciements à notre encadreur Mr. BOUZIT ALI, vous nous avez bien guidé dans ce travail de recherche, nous donnant inlassablement beaucoup de votre temps, votre enthousiasme à partager vos connaissances tout comme votre sens chaleureux du contact nous aura beaucoup marqué. Soyez assuré de notre plus sincère gratitude et de notre profond respect.

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre profonde et respectueuse gratitude.

A tous les professeurs qui ont participé dans notre cursus et surtout à l'ensemble des enseignants de notre spécialité pour la qualité des cours qu'ils nous ont prodigués, et qui nous ont servi pour accomplir ce travail, nous vous remercions et vous témoignons nos sentiments les plus déferents.

Dédicace

Je dédie ce travail à ces êtres qui me sont chers :

A ma mère, **LO Aminata**, source et symbole de tendresse, à qui je dois ma réussite, pour ses prières, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée, avec tous les moyens et aux prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance, pour son immense amour, je te souhaite une vie pleine de bonne santé, je t'aime maman,

A mon père, **NDIAYE Oumar**, que la miséricorde d'ALLAH soit sur lui, pour son amour et son immense sacrifice de toujours, lui qui m'a transmis les valeurs les plus justes et les plus nobles qui m'ont permis d'être un homme responsable et studieux,

A mes frères et sœurs : Maty, Abdou, Madiaw, Aïda, Ahmed,

A mes grands-parents, à mes oncles et tantes, qui m'ont beaucoup accompagné dans ma vie et qui ne cesseront jamais de prier pour ma réussite,

A mes cousins et cousines, à toute ma famille, je vous témoigne mes sentiments de respect, d'amour et de gratitude,

A mes amis,

A mon binôme **KAWTHER Achari** ainsi qu'à sa famille,

A la communauté sénégalaise d'Algérie, vous m'avez encouragé et soutenu, à mes collègues de la promotion 2014, à la communauté des étudiants internationaux de Guelma,

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, je ne saurais vous remercier autant.

Papa Amadou

Dédicace

Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire :

Mes très chers parents :

Père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but...,

Ma très chère maman, je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui m'ont guidé durant mon parcours,

A ma sœur Jiji,

A mes frères Haroun, Zaki ainsi que sa femme Radja,

A mon fiancé et mon cœur Fateh ainsi qu'à sa famille,

A tous mes oncles et tantes ainsi que leurs familles,

A tous mes cousins et cousines,

A mes intimes et à toute personne qui me connaît,

A tous mes amis et mes collègues d'étude, en particulier mon binôme Amadou et à sa famille.

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons développé la production d'énergie électrique à partir du solaire photovoltaïque, en partant d'une étude sur les énergies fossiles, fissiles et renouvelables, présentant leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que les méthodes permettant d'en produire de l'énergie électrique. L'énergie photovoltaïque y est développée en profondeur avec une modélisation de la cellule photovoltaïque, des différents types de cette dernière, de ses caractéristiques, de l'influence de l'éclairement et de la température sur la cellule PV ainsi que l'impact des différents regroupements que nous pouvons réaliser avec la cellule solaire. Le convertisseur DC-DC joue un rôle important dans ce processus de conversion et ses différentes utilisations ont un impact majeur sur le rendement d'un système photovoltaïque. La méthode Perturbation et Observation (P&O) de la commande MPPT *Maximum Power Point Tracking* en Anglais permet d'extraire le maximum de puissance d'une manière permanente et ainsi faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximum (PPM) malgré la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Mots clés : Production d'énergie électrique, Energies fossiles, fissiles et renouvelables, Solaire photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, Commande MPPT

Abstract

In this thesis, we have developed the production of electrical energy from solar photovoltaic, starting from a study on fossil, fissile and renewable energies, presenting their advantages and their disadvantages as well as the methods of producing electrical energy from them. Photovoltaic energy is developed in depth with a modeling of the photovoltaic cell, the different types of the latter, its characteristics, the influence of the illumination and the temperature on the PV cell as well as the impact of different groupings that we can achieve with the solar cell.

The DC-DC converter plays an important role in this conversion process and its various uses have a major impact on the efficiency of a photovoltaic system.

The Perturbation and Observation (P & O) method of the MPPT command *Maximum Power Point Tracking* makes it possible to extract the maximum power permanently and thus make the photovoltaic generator work at its maximum power point (MPP) despite the variation of the load and atmospheric conditions (brightness and temperature).

Résumé

Keywords: Production of electrical energy, Fossil, fissile and renewable energies, Solar photovoltaic, DC-DC converter, MPPT command

ملخص

في هذه المذكرة ، قمنا بدراسة إنتاج الطاقة الكهربائية ابتداء من الطاقة الشمسية الضوئية ، انطلاقاً من دراسة حول الطاقات المتبددة و الإنشطارية والمتجددة ، مع تقديم مزاياها وعيوبها و كذلك الطرق التي تسمح الطاقة الكهربائية. يتم تطوير الطاقة الضوئية بطريقة معمقة مع نمذجة للخلايا الضوئية و أنواع مختلفة منها ، وخصائصها ، وتأثير الإضاءة ودرجة الحرارة على الخلية .

يلعب DC-DC دوراً مهماً في عملية التحويل هذه واستخداماتها المتعددة لها تأثير كبير على كفاءة النظام الكهروضوئي طريقة الاضطراب ومراقبة النظام تسمح باستخراج الطاقة القصوى بشكل دائم وبالتالي تشغيل مولد الطاقة الضوئية في . اقصى نقطة قوة له على الرغم من اختلاف الحمولة والظروف الجوية (السطوع ودرجة الحرارة) .

الكلمات المفتاحية إنتاج الطاقة الكهربائية – الطاقة الشمسية الضوئية – المحول- الطاقات المتبددة والمتجددة

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Résumé.....	IV
Sommaire.....	VI
Table des figures et tableaux.....	IX
Liste des abréviations et symboles.....	XI

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I – GENERALITES SUR LES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

I.1. Introduction.....	3
I.2. Production d'énergie électrique.....	3
I.3. Les sources d'énergie non renouvelables.....	4
I.3.1. Les sources d'énergie fossiles.....	4
I.3.1.1 Les caractéristiques d'une source d'énergie fossile.....	4
I.3.1.2. Fonctionnement d'une centrale à combustion fossile.....	5
I.3.2. L'énergie fissile.....	6
I.3.2.1. Fonctionnement d'une centrale nucléaire.....	6
I.4. Les sources d'énergie renouvelables.....	8
I.4.1. La biomasse.....	8
I.4.1.1. Fonctionnement d'une centrale biomasse.....	9
I.4.2. L'énergie hydraulique.....	10
I.4.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.....	10
I.4.3. L'énergie géothermique.....	11
I.4.3.1. Fonctionnement d'une centrale géothermique.....	12
I.4.4. L'énergie éolienne.....	13
I.4.4.1. Fonctionnement d'une centrale éolienne.....	16
I.4.5. L'énergie solaire.....	17
I.4.5.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	19
I.4.5.3. Fonctionnement d'une installation PV.....	19
Conclusion.....	21

CHAPITRE II – L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

Sommaire

II.1. Introduction.....	22
II.2. La cellule photovoltaïque.....	22
II.2.1. Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	22
II.2.2. Différentes structures des cellules PV.....	23
II.2.2.1. Les cellules solaires au silicium	23
II.2.3. Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV.....	24
II.2.4. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque.....	26
II.2.4.1. Caractéristique courant - tension (I-V).....	26
II.2.4.2. Caractéristique puissance - tension (P-V).....	27
II.2.4.3. Paramètres externes.....	27
II.2.5. Influence de l'éclairement et de la température.....	28
II.2.5.1. Influence de l'éclairement.....	28
II.2.5.2. Influence de la température.....	30
II.2.6. Association des cellules PV (le module PV).....	31
II.2.6.1. Association des cellules en série.....	32
II.2.6.2. Association des cellules en parallèle.....	33
II.2.6.3. Association mixte des cellules.....	35
II.3. Le système photovoltaïque.....	35
II.3.1. Le panneau PV.....	36
II.3.2. La batterie solaire.....	36
II.3.3. Le régulateur (contrôleur de charge).....	37
II.3.4. Le convertisseur d'énergie (onduleur).....	37
II.3.5. La charge.....	37
II.3.6. Différents systèmes photovoltaïques.....	37
II.3.6.1. Systèmes autonomes.....	38
II.3.6.2. Systèmes hybrides.....	38
II.3.6.3. Systèmes connectés au réseau.....	39
II.3.7. Avantages et inconvénients des systèmes PV.....	40
II.3.7.1. Avantages.....	40
II.3.7.2. Inconvénients.....	40
Conclusion.....	41

CHAPITRE III – LE CONVERTISSEUR DC-DC

Sommaire

III.1. Introduction.....	42
III.2. Définition.....	42
III.3. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	43
III.3.1. Composition du convertisseur.....	43
II.3.1.1. Le transistor MOSFET.....	43
II.3.1.2. Le condensateur.....	44
II.3.1.3. L'inductance.....	45
II.3.1.4. La diode Schottky.....	46
III.3.2. Types des convertisseurs DC-DC.....	46
III.3.2.1. Convertisseur Boost.....	47
II.3.2.2. Convertisseur Buck.....	53
II.3.2.3. Convertisseur Buck-Boost.....	57
III.3.3. Puissances des convertisseurs.....	61
II.3.3.1. Définition.....	61
III.3.2.2. Puissance instantanée.....	61
III.3.2.3. Puissance active.....	61
III.3.2.3. Puissance apparente.....	61
Conclusion.....	62
 CHAPITRE IV – LA COMMANDE MPPT	
IV.1. Introduction.....	63
IV.2. Connexion directe entre le GPV et la charge.....	63
IV.3. Fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque.....	64
IV.4. Définition et principe de la recherche.....	65
IV.4.1. Gestion de la MPPT.....	66
IV.5. Classification des commandes MPPT.....	68
IV.5.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée.....	68
IV.5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS.....	68
IV.5.1.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du CS.....	68
IV.5.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherches.....	68
IV.5.2.1. MPPT indirect.....	68
IV.5.2.1. MPPT direct.....	69
IV.6. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	69
Conclusion.....	72

Sommaire

Conclusion générale.....	73
Bibliographie.....	74

Table des figures et tableaux

Table des figures

Figures.N°	Intitulés des figures	Pages
Figure I.1	Centrale thermique à combustible fossile	6
Figure I.2	Centrale nucléaire	7
Figure I.3	Centrale biomasse	9
Figure I.4	Centrale hydroélectrique	11
Figure I.5	Centrale géothermique	13
Figure I.6	Différents composants d'une éolienne	14
Figure I.7	Centrale éolienne	16
Figure I.8	Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	17
Figure I.9	Installation photovoltaïque	20
Figure II.1	Structure schématique d'une cellule solaire	23
Figure II.2	Types de cellules solaires	24
Figure II.3	Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire	24
Figure II.4	Caractéristique courant - tension (I-V)	26
Figure II.5	Caractéristique puissance - tension (P-V)	27
Figure II.6	Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C	29
Figure II.7	Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C	29
Figure II.8	Courbes P(V) d'un GPV pour différentes températures à G=1000W/m	30
Figure II.9	Courbes I(V) d'un GPV pour différentes températures à G=1000W/m	31
Figure II.10	Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque	31
Figure II.11	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série	32
Figure II.12	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série	33
Figure II.13	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série	33
Figure II.14	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	34
Figure II.15	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle	34
Figure II.16	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle	35
Figure II.17	Les constituants d'un système PV	36
Figure II.18	Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie	38
Figure II.19	Système photovoltaïque directement relié au réseau.	39
Figure II.20	Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie	40
Figure III.1	Schéma de convertisseur DC/DC	42
Figure III.2	Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC	43
Figure III.3	Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N	44

Table des figures et tableaux

Figure III.4	Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance	44
Figure III.5	Schéma équivalent d'une inductance réelle L	45
Figure III.6	Schéma de convertisseur Boost	48
Figure III.7	Circuit équivalent pour TOn	49
Figure III.8	Circuit équivalent pour TOff	50
Figure III.9	Forme du courant i_1 et i_2	50
Figure III.10	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost	53
Figure III.11	Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck	54
Figure III.12	Convertisseur Buck Durant l'état On	54
Figure III.13	Convertisseur Buck Durant l'état Off	55
Figure III.14	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck	57
Figure III.15	Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost	58
Figure III.16	Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On	58
Figure III.17	Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off	59
Figure III.18	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost	60
Figure III.19	Couplage de convertisseur avec un récepteur	61
Figure IV.1	Connexion directe entre un GPV et une charge	63
Figure IV.2	Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge	64
Figure IV.3	Etage d'adaptation d'un GPV-charge	65
Figure IV.4	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	66
Figure IV.5	La caractéristique P-V, I-V et la trajectoire de PPM	66
Figure IV.6	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	67
Figure IV.7	Evaluation de la puissance en fonction de la tension pour la commande P&O	70
Figure IV.8	Figure IV.8: Algorithme de la méthode P&O	71

Table des tableaux

Tableau III.1	Rendement des quelques convertisseurs DC-DC	47
Tableau III.2	Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC	47

Liste des abréviations et symboles

PV : photovoltaïque

CO₂ : dioxyde de carbone

Voc : tension de circuit ouvert

I_{ph} : coutant du GPV

I_d : courant de la diode

R_s : résistance série

R_p : résistance parallèle

V_{th} : le potentiel thermique

V : Volt

A : Ampère

K : constante de Boltzmann

T : la température absolue

K : Kelvin

I_s : courant de saturation

n : facteur de qualité de la diode

I_{cc} : courant de court-circuit

Voc : tension de circuit ouvert

FF : facteur de forme

S : surface de la cellule en m².

E : l'ensoleillement en W/m².

V_e : tension d'entrée

V_s : tension de sortie

DC : continue

MOSFET : Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor

S : puissance apparente

α : rapport cyclique

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PPM : Point de Puissance Maximale

Introduction générale

L'énergie est un besoin primordial pour l'humanité, et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz et charbon), la science s'est tournée vers l'énergie dite renouvelable et la source la plus importante de ces énergies renouvelables reste le soleil, grâce notamment à l'énergie photovoltaïque. Cette dernière consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité, sous forme de courant continu et ainsi directement utilisable. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie. Ces affirmations sont en passe d'être aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques mais également sur le traitement de l'énergie.

Dans ce sens, les convertisseurs DC-DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement pour élever les tensions et courants des panneaux photovoltaïques mais aussi dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les éoliennes, les systèmes hybrides.... Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée.

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est de maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, cette technique est appelée communément MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Pour se faire, la méthode Perturbation Et Observation (P&O) est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation.

Dans ce travail, nous allons étudier la production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque.

- La première partie de ce travail concerne une présentation générale des différentes sources d'énergie, à savoir les énergies fossiles, fissiles et renouvelables, ainsi qu'une explication des différentes techniques permettant de produire de l'électricité de ces dernières, en parlant bien-sûr de leurs avantages et inconvénients.

Introduction générale

- Dans la deuxième partie sera effectuée une étude sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous y présenterons la description et la modélisation de la cellule photovoltaïque, les courbes des caractéristiques courant et puissance en fonction de la tension sous l'effet de l'éclairement et de la température, leurs équations caractéristiques, les différents modes de groupement des cellules photovoltaïques et enfin les différents éléments constitutifs du système photovoltaïque.
- La troisième partie concerne une étude de modélisation des différents types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques ainsi qu'une étude sur les puissances.
- La quatrième partie sera consacrée à la commande MPPT en développant la méthode Perturbation Et Observation.
- Ce travail s'achèvera par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les différentes sources d'énergie

I.1. Introduction

Depuis toujours, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se réchauffer, se mouvoir... L'énergie est multiple. Celle-ci, composante essentielle de l'univers, se présente sous de nombreuses formes (calorifique, électrique...) et provient de diverses sources. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, soleil, eau, vent...). Elle reste un enjeu majeur tant au niveau politique, scientifique, économique qu'environnemental...

La production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustibles d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles reste rentable mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. L'énergie d'origine nucléaire, qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus [33].

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Et ceci n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires [01].

I.2. Production d'énergie électrique

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes.

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- Une turbine en mouvement.

- Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique [33].

I.3. Les sources d'énergie non renouvelables

Une énergie qui ne se renouvelle pas ou pas assez rapidement, pouvant ainsi être considérée comme épuisable à l'échelle humaine, est dite non renouvelable.

I.3.1. Les sources d'énergie fossiles

I.3.1.1 Les caractéristiques d'une source d'énergie fossile

Les caractéristiques d'une source d'énergie fossile sont de plusieurs ordres :

- Générales : qui concernent l'ensemble des sources d'énergie fossiles ;
- Induites : les conséquences directes ou indirectes des caractéristiques générales ;
- Spécifiques : les caractéristiques propres à une source d'énergie fossile en particulier.

La caractéristique générale : des énergies de stock

Les sources d'énergie fossiles sont des formes d'énergie de stock, que la nature a mis un long moment à façonner (à l'échelle humaine, c'est-à-dire au moins plusieurs centaines d'années). Ainsi, les gisements d'hydrocarbures résultent de la lente décomposition de végétaux durant plusieurs millions d'années, et des caractéristiques géologiques du lieu. De même, la présence d'uranium dans le sol, à des concentrations significatives, dépend des caractéristiques géologiques du lieu.

Les caractéristiques induites ou indirectes

- Des gisements localisés : les gisements d'énergie fossiles sont très localisés, par ailleurs ils sont souvent éloignés des sites de consommation. Cette caractéristique induit plusieurs aspects :
- Une extraction généralement difficile : les gisements les plus faciles d'accès ont déjà été exploités, la hausse des prix et l'évolution des technologies permettent cependant d'exploiter des gisements non rentables par le passé. Les coûts d'extraction augmentent en réponse à la raréfaction des ressources combinée à une hausse de la demande ;
- L'inadéquation entre les zones de production et les zones de consommation : le caractère localisé des gisements implique plusieurs problèmes : des transports coûteux et polluants, qui ne sont pas sans risque pour l'environnement ; la dépendance des pays consommateurs envers les pays producteurs ; l'existence récurrente de tensions géopolitiques pour la raison précédente ; un important risque de spéculation.

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

- Une densité énergétique élevée : les sources d'énergie fossiles sont intéressantes à partir du moment où leur densité d'énergie (la quantité d'énergie disponible par unité de masse) est élevée. Les sources d'énergie fossiles actuellement utilisées partagent effectivement cette caractéristique.
- Une utilisation polluante : bien que l'utilisation d'une source d'énergie fossile dépende également des technologies employées et de la finalité recherchée, l'usage des sources d'énergie fossiles est polluant [03].

On distingue trois grandes sources d'énergie fossiles :

Le gaz naturel : principalement généré, comme le pétrole, par la sédimentation de matières organiques en milieu marin et la transformation en kérogène, mais à des températures et des pressions plus élevées. Du gaz naturel, dit « biogénique » peut aussi se créer à faible profondeur à partir de la fermentation de bactéries présentes dans les sédiments organiques.

Le charbon : issu d'un kérogène formé à partir de biomasse uniquement végétale (arbres, fougères, etc.), plus fréquent dans les couches sédimentaires terrestres. La pyrolyse de ce kérogène produit du charbon, essentiellement constitué de carbone et pauvre en hydrogène.

Le pétrole : le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui vient du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts.

Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie [02].

I.3.1.2. Fonctionnement d'une centrale à combustion fossile

Une centrale thermique à combustible fossile utilise l'énergie fournie par la combustion d'un combustible. Cette combustion a lieu dans une chaudière. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. À la sortie de la turbine, la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière.

Le refroidissement de la vapeur issue de la turbine est confié à une réserve d'eau (cours d'eau) ou plus rarement à une tour de refroidissement analogue à celle d'une centrale nucléaire.

Avantages

- Energie rentable à la production
- Souplesse d'utilisation et disponibilité élevée

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

- Facilité d'exploitation
- Possibilité de développer la cogénération
- Compétitivité

Inconvénients

- Prix fluctuants
- Géostratégie des ressources
- Impacts sur l'environnement (Gaz à effet de serre, marée noire, etc.)
- Besoin d'un plan d'eau à proximité
- Problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières [01],[33].

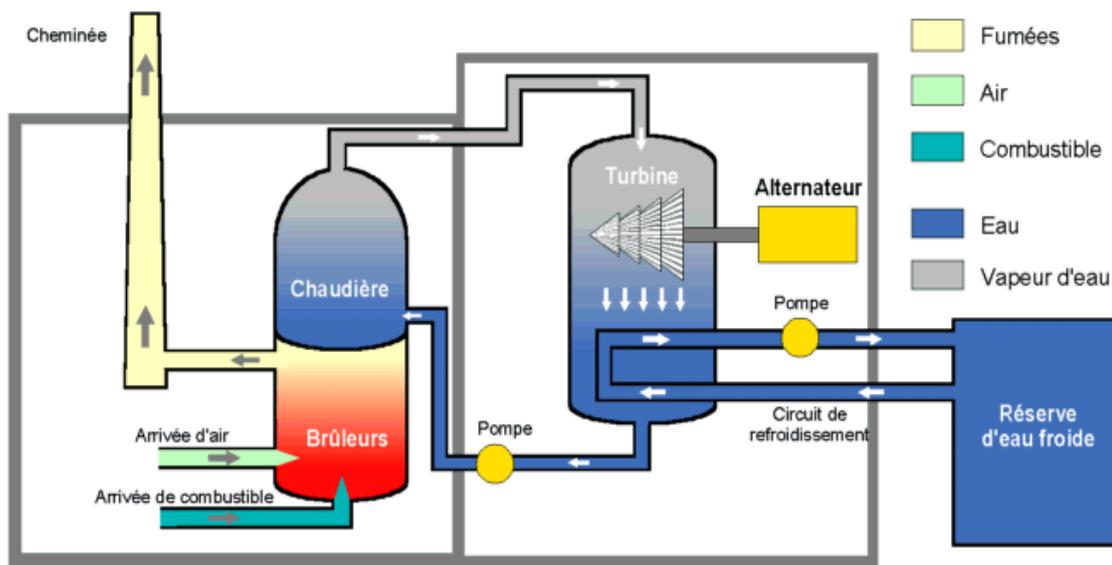


Figure I.1: Centrale thermique à combustible fossile

I.3.2. L'énergie fissile

L'énergie fissile désigne l'énergie produite par des ressources primaires épuisables (uranium, plutonium). L'énergie nucléaire est stockée au cœur des atomes, dans l'infiniment petit. Le noyau des atomes est composé de liaisons entre les particules (protons et neutrons).

Les réactions nucléaires transforment (désintègrent) ces noyaux, ce qui s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. Les centrales nucléaires utilisent cette énergie thermique pour produire de l'électricité.

I.3.2.1. Fonctionnement d'une centrale nucléaire

Ces centrales utilisent des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission [02].

Avantages

- Adapté à la production de masse
- Disponibilité élevée
- Stabilité des coûts
- Réserves d'uranium importantes
- Faibles émissions de CO_2 en exploitation
- Utilisable dans le domaine spatial
- Ne nécessite pas d'oxygène, ce qui est un atout pour l'homme

Inconvénients

- Lourds investissements
- Risque industriel
- Nécessite un niveau de technologie élevé
- Acceptation du public
- Chaque année les tranches nucléaires produisent des tonnes de déchets radioactifs
- Le stockage des déchets qui augmente le niveau de pollution
- Le risque d'accident (26 avril 1986 à l'usine de Tchernobyl) [01],[33].

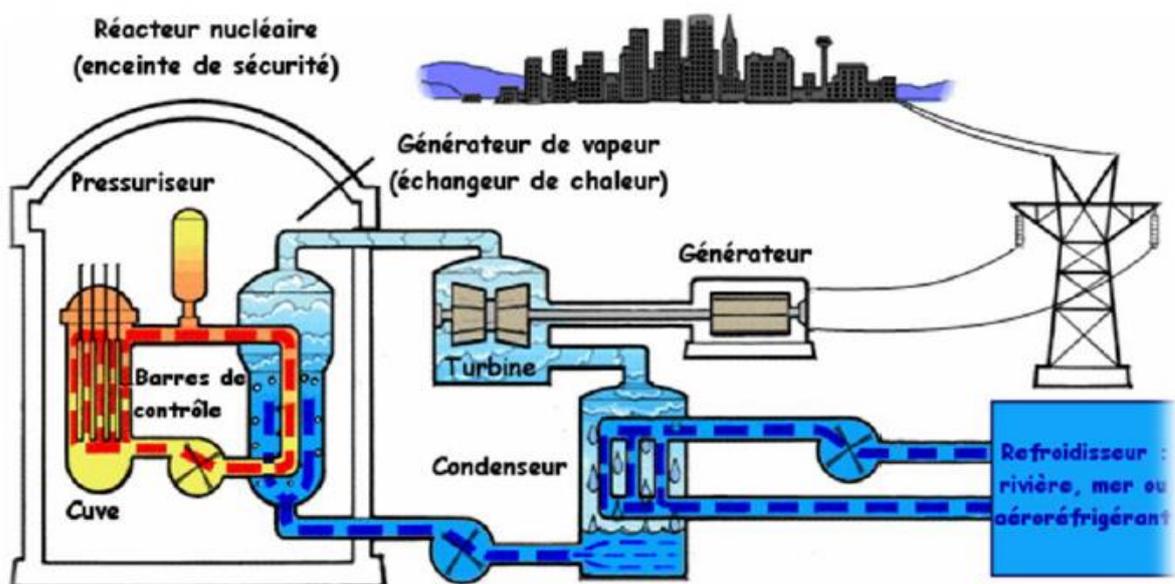


Figure I.2: Centrale nucléaire

I.4. Les sources d'énergie renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui soit ne s'épuise jamais, soit peut se renouveler rapidement à l'échelle humaine. Le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Les énergies renouvelables n'engendrent pas de déchets ni d'émissions polluantes de manière directe. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [04].

Il y a cinq sources essentielles d'énergies dites renouvelables : le vent (éoliennes), l'eau (barrages hydroélectriques, marée-motrice), le soleil (panneaux solaires), les végétaux (biocarburants) et la chaleur du sol (géothermie) [02].

I.4.1. La biomasse

L'énergie de la biomasse, ou bioénergie, est l'énergie qui est extraite des matières organiques non fossiles comme le bois, la paille, les huiles et les déchets végétaux des secteurs forestier, agricole et industriel. Tout comme l'énergie des combustibles fossiles, la bioénergie provient de l'énergie solaire emmagasinée dans les plantes par la photosynthèse. À l'heure actuelle, l'énergie de la biomasse provient en très grande partie des solides (copeaux, granulats, charbon, ordures ménagères) et des liquides (lessives de cuisson) provenant de la cuisson du bois dans l'industrie papetière.

Il existe trois principales catégories d'énergie relatives à la biomasse :

- **Bois** : il a été toujours utilisé comme source d'énergie. Le bois-énergie est une solution pour chauffer les bâtiments collectifs et les habitations, en appoint à des énergies fossiles (fioul, gaz...), et pour produire de l'électricité.
- **Biogaz** : le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Cette fermentation appelée aussi méthanisation se produit naturellement (dans les marais) ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais on peut aussi la provoquer artificiellement dans des digesteurs (pour traiter des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles, etc.). Le biogaz peut être employé à l'état brut sur des chaudières, groupes électrogènes, générateurs d'air chaud.
- **Biocarburant** : L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesel.

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation. Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja, etc.). Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole. Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient, ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières [05].

I.4.1.1. Fonctionnement d'une centrale biomasse

L'énergie de la biomasse est transformée en énergie thermique par combustion. Cette énergie transforme de l'eau en vapeur, qui actionne ensuite une turbine à vapeur accouplée à un alternateur, qui transforme enfin l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou énergie thermique restante peut être utilisée, par exemple, pour alimenter un circuit de chauffage. Il s'agit alors de cogénération [06].

Avantages

- Valorisation de déchets organiques
- Diminution du volume de matière organique et désodorisation des déchets
- Valorisation des ressources locales (élevages agricoles...)

Inconvénients

- Epuisement des stocks
- Génératrice de CO_2
- Rendement parfois faible

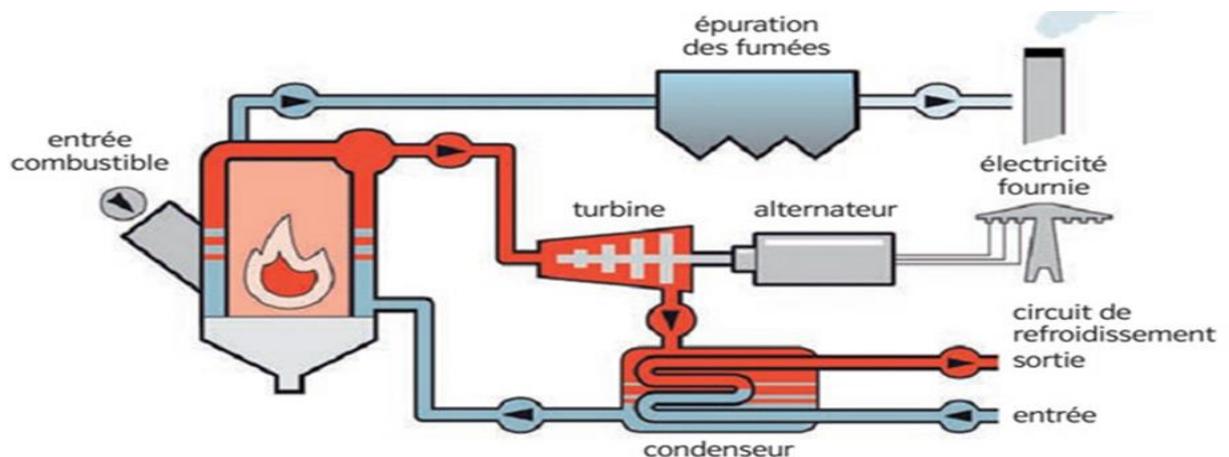


Figure I.3: Centrale biomasse

I.4.2. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes (chutes d'eau, cours d'eau, courant marin, marée, vagues). Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique [35].

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 [34].

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute :

- **Les centrales de haute chute** : elles ont des hauteurs de chutes supérieures à 300m, elles utilisent des turbines Pelton. Ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses. La capacité du réservoir est relativement faible.
- **Les centrales de moyenne chute** : elles ont des hauteurs comprises entre 30m et 300m ; elles utilisent des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité.
- **Les centrales de basse chute** : elles ont des hauteurs de chute inférieures à 30m, elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit [05].

I.4.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique [01].

Avantages

- Souplesse d'utilisation
- Absence d'émissions de CO_2
- 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

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

- Démarrage et arrêt des centrales très rapides
- 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 modérée
- Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique [35].

Inconvénients

- Contrainte géographique
- Impacts sur l'environnement à la construction
- L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages
- 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 [01],[35].

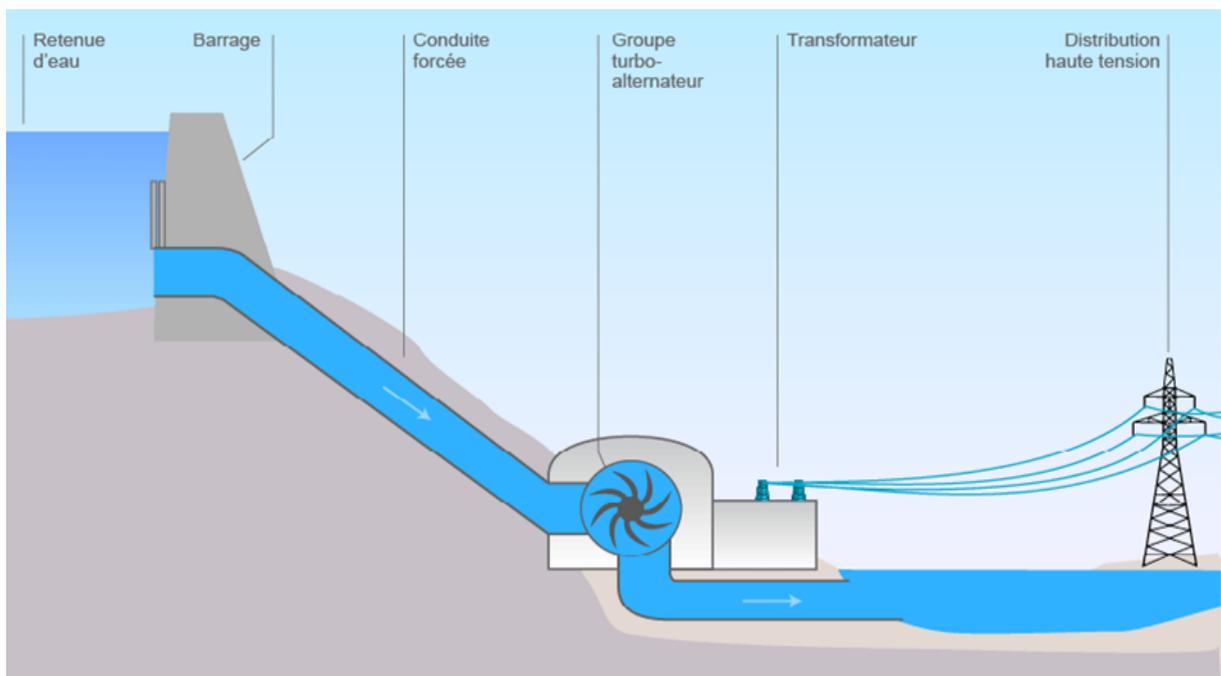


Figure I.4: Centrale hydroélectrique

I.4.3. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères.

On distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie [05].

- **Géothermie à haute énergie (>150°C)** : ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisée généralement à plus de 1500m de profondeur et dont la température est supérieure à 150°C. Grâce aux températures élevées, il est possible de produire de l'électricité et de faire de la cogénération.
- **Géothermie à moyenne énergie (100-150°C)** : elle correspond à l'exploitation de la chaleur des nappes profondes dans des régions géologiques. Après forage, on injecte dans le sol un fluide calorifique, tel que le fréon ou l'ammoniac, qui est chauffé et ramené à la surface où on l'utilise pour produire de l'électricité et pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire.
- **Géothermie à basse énergie (30-100°C)** : on parle de géothermie basse énergie lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30°C et 100°C, cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles.
- **Géothermie à très basse énergie (<30° C)** : elle exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C, cette technologie est appliquée à la climatisation passive, le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique « prélevant la chaleur contenue dans le sol ».

I.4.3.1. Fonctionnement d'une centrale géothermique

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur.

Avantages

- Absence de déchets après utilisation

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

- Non dépendance des conditions atmosphériques
- Pas besoin de stockage
- Utilisation continue

Inconvénients

- Coût élevé
- Affaissements de terrain
- Rentabilité obtenue qu'après 5ans de son utilisation

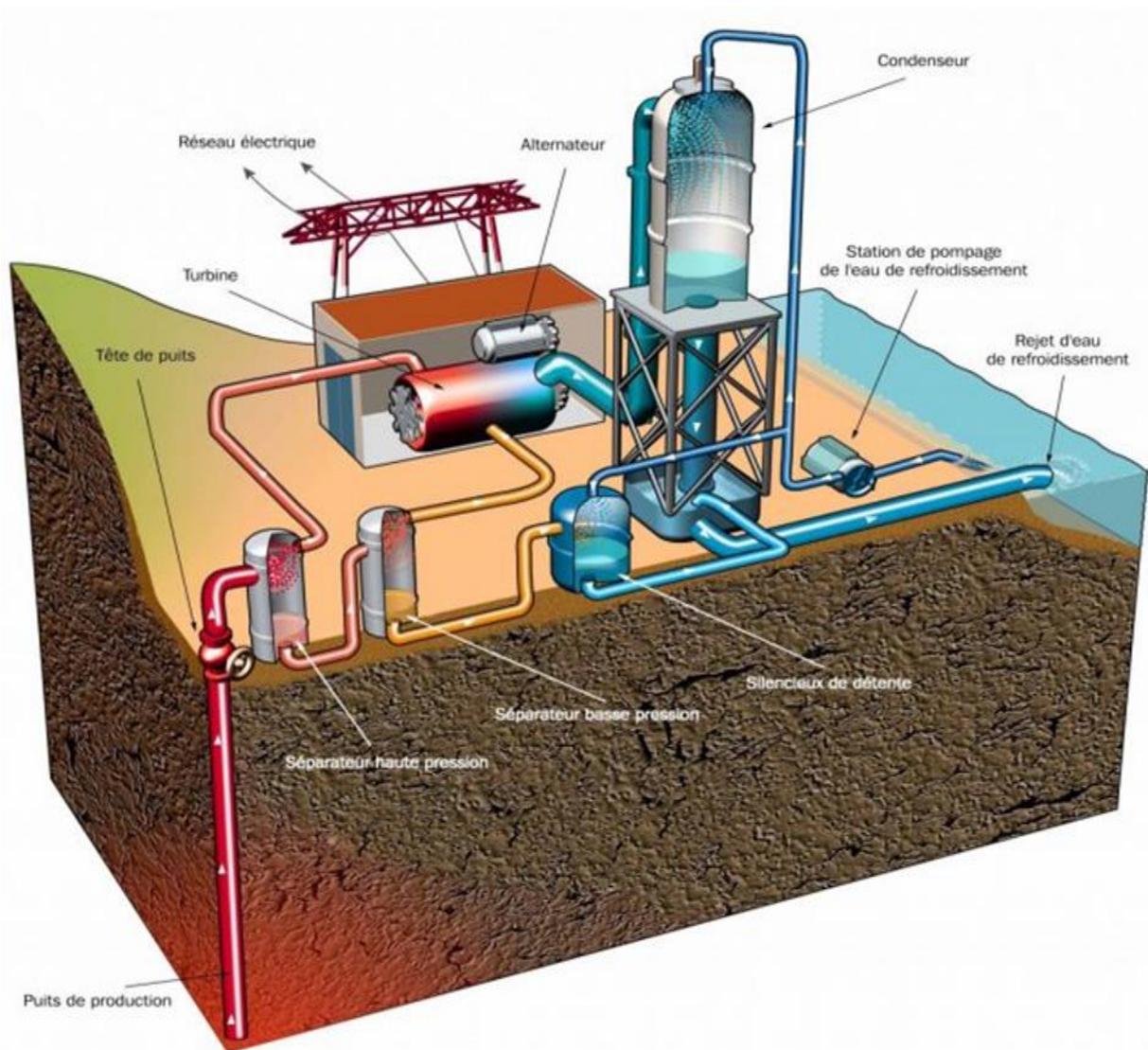


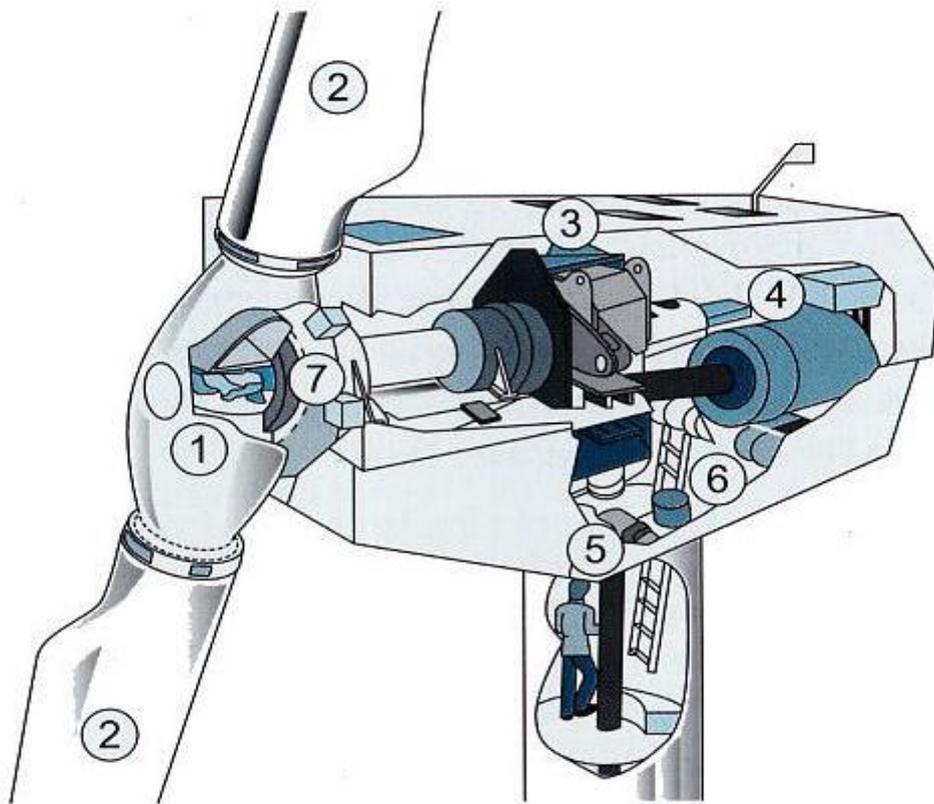
Figure I.5: Centrale géothermique

I.4.4. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite par la force que le vent exerce sur les pales d'une éolienne. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer (respectivement dites onshore et offshore)

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante. Pour produire de l'électricité, le vent doit souffler à une certaine vitesse pour que le démarrage du rotor puisse se faire. Ce seuil est habituellement de 4 m/s (14,4 km/h). Le rotor entraînera le mouvement de l'arbre qui est relié à l'alternateur, qui pourra ainsi changer l'énergie mécanique en énergie électrique. Plus la vitesse du vent augmente, plus la génératrice pourra produire d'énergie. L'augmentation s'arrête cependant quand la vitesse nominale est atteinte. Au-delà de cette limite bien souvent située à 12 m/s ou 43 km/h, on restreint la production pour ne pas abîmer la génératrice. Habituellement, on arrête les éoliennes quand les vents dépassent les 25 m/s ou 90 km/h pour préserver l'intégrité structurelle de l'éolienne [35].



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

Figure I.6: Différents composants d'une éolienne

➤ Le rotor

Le rotor d'une éolienne moderne de 1 MW et plus (les pales et le moyeu) tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

➤ Les pâles

Les pâles du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

➤ Le multiplicateur

Il relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation.

➤ La génératrice

La génératrice est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique.

➤ Le mécanisme d'orientation de la nacelle

C'est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre sa vitesse et sa force.

➤ Le frein

Il permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien [35].

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

Eoliennes à axe vertical : elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles

Eolienne à axe horizontal : les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à plusieurs pâles. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pâles. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pâles sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [36].

I.4.4.1. Fonctionnement d'une centrale éolienne

- 1) La rotation des pales : sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche.
- 2) La production d'électricité : l'hélice entraîne un axe dans la nacelle, relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.
- 3) L'adaptation de la tension : un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur [04].

Avantages

- Coût limité
- Peu de contraintes mécaniques
- Grande efficacité
- Energie propre
- Associable à des panneaux PV afin d'optimiser la fourniture d'électricité [36]

Inconvénients

- Pollution acoustique
- Dégradation du paysage
- Faible disponibilité (20 à 30%)
- Acceptation du public [01]

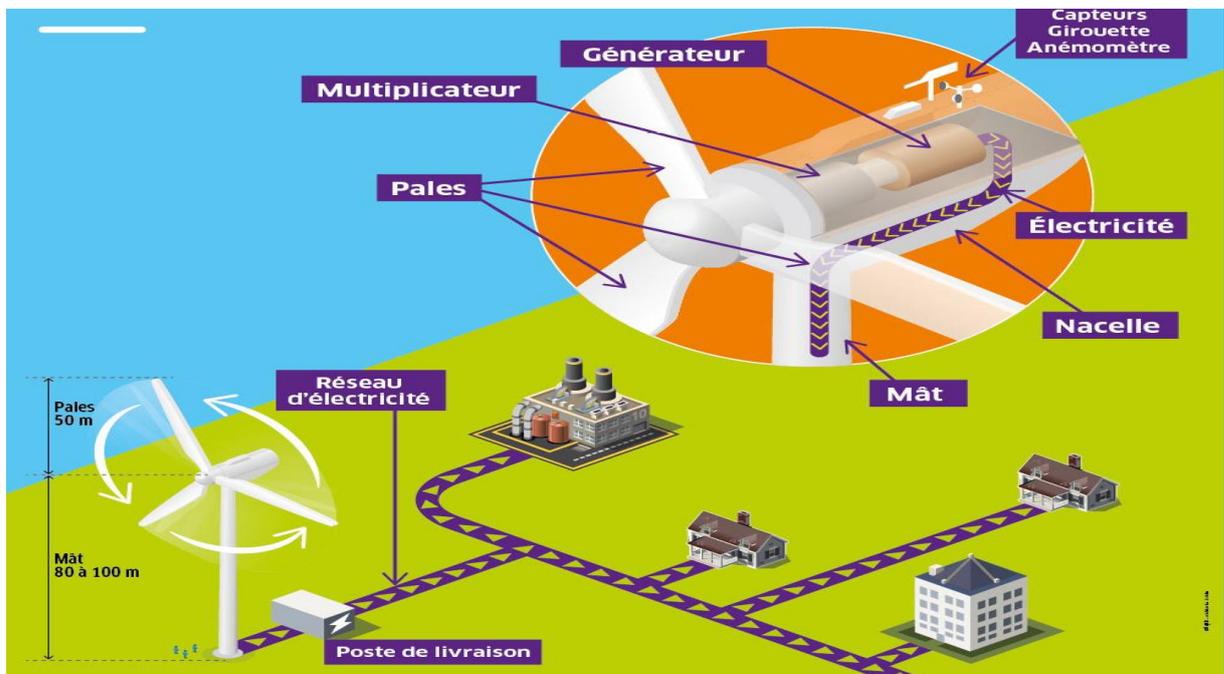


Figure I.7: Centrale éolienne

I.4.5. L'énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser [07].

L'énergie solaire est utilisée essentiellement pour deux usages : la production de chaleur et la production d'électricité.

I.4.5.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux. La chaleur concentrée par les panneaux est transférée à un fluide caloporteur.

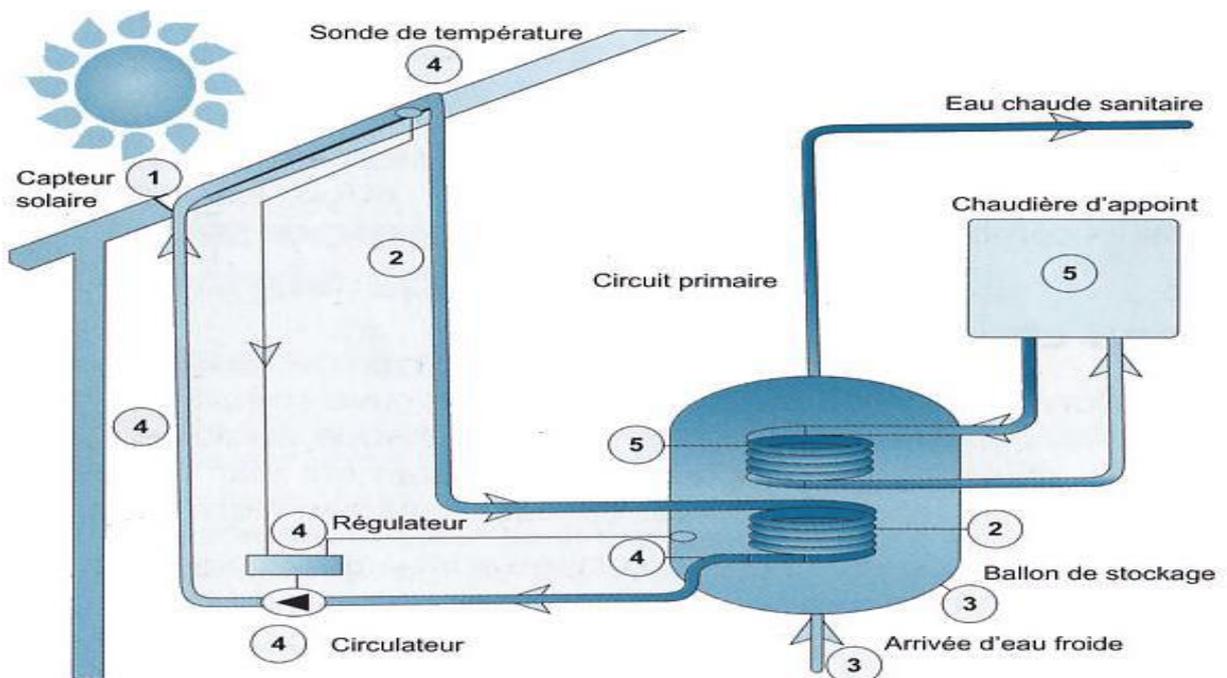


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

Fonctionnement

- Système de captage de l'énergie solaire : le capteur solaire est constitué d'une plaque et de tubes métalliques noirs qui absorbent le rayonnement solaire et permettent l'échauffement du liquide circulant dans les tubes. Cet échauffement peut atteindre 70°C en fonction de la température ambiante. Le liquide circulant dans les tubes est de l'eau froide additionnée d'antigel. Le circuit est fermé ; on le fait passer par un capteur solaire placé sur le toit pour récupérer le maximum de chaleur. Il constitue l'absorbeur. Le tout est enfermé dans un réceptacle rigide thermiquement isolé. Sa partie supérieure est équipée d'une vitre résistant aux intempéries (glace, grêlons...), laissant pénétrer les rayons du soleil et retenant la chaleur comme une sorte de serre.
- Transport de la chaleur : un circuit primaire étanche et calorifugé (fluide caloporteur) contenant de l'eau additionnée d'antigel s'échauffe en passant dans les tubes du capteur et se dirige vers le ballon de stockage où il restitue ses calories solaires à un échangeur thermique placé dans le ballon d'eau. Et ainsi de suite, le liquide primaire repart vers le capteur où il est à nouveau chauffé tant que l'ensoleillement est efficace.
- Ballon de stockage : c'est une cuve métallique très bien isolée qui constitue la réserve d'eau chaude sanitaire. L'eau chaude soutirée est aussitôt remplacée par une quantité d'eau froide identique, provenant du réseau, et sera immédiatement réchauffée par le liquide du circuit primaire.
- Circulation du liquide primaire : cette circulation peut être de deux ordres : naturelle ou forcée. Lorsque la circulation est naturelle, le fluide caloporteur circule grâce à la différence de densité existant entre le liquide du circuit primaire et l'eau du ballon. En effet, puisqu'il est plus chaud donc moins dense que l'eau du ballon, il s'élève naturellement par thermo-circulation. Il est à noter que le ballon doit être placé plus haut que les capteurs. Ce système constitue ce que l'on appelle les chauffe-eaux solaires en " thermosiphon ". Dans le cas d'une circulation forcée, une petite pompe électrique met en mouvement le fluide caloporteur quand sa température est supérieure à celle du ballon grâce à un dispositif de régulation. Celui-ci joue sur les différences de température. En effet, si la sonde du ballon est plus chaude que celle du capteur, la régulation stoppe la circulation de fluide. Dans le cas où la sonde du ballon à une température inférieure à celle du capteur, le circulateur se remet en fonctionnement, et le liquide primaire réchauffe l'eau du ballon.

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

- Chaudière d'appoint : lorsque l'ensoleillement est insuffisant, ce qui est le cas en hiver, en période de mauvais temps, un dispositif d'appoint pallie le manque d'ensoleillement pour assurer la production d'eau souvent à mi-hauteur du ballon solaire et d'un serpentin raccordé à une chaudière (bois, fioul ou gaz) situé en aval du ballon. Vous pouvez aussi faire mettre un second ballon doté d'un réchauffeur électrique [35].

Avantages

- Rendement élevé (jusqu'à 80%) ;
- Source d'énergie inépuisable
- Gros potentiel de développement.

Inconvénients

- Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire
- Energie 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)
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...) [35]

I.4.5.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent de courant continu à partir de rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. Quand l'énergie nécessaire dépasse la quantité fournie par une seule cellule, les cellules sont regroupées pour former un module photovoltaïque, parfois désigné de manière ambiguë sous le terme de panneau solaire. De tels modules ont été dans un premier temps utilisés pour alimenter des satellites en orbite, puis des équipements électriques dans des sites isolés. Enfin, la baisse des coûts de production élargit le champ d'application de l'énergie photovoltaïque à la production de l'électricité sur les réseaux électriques [05].

I.4.5.3. Fonctionnement d'une installation PV

Trois éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le

CHAPITRE I :Généralités sur les différentes sources d'énergie

soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau.

- Intégrés au toit, les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.
- Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau [06].

Avantages

- Acceptation du public
- Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
- Frais de maintenance relativement faibles
- Energie électrique non polluante à l'utilisation

Inconvénients

- Coût encore élevé
- Rendement assez faible
- Disponibilité
- Marché très limité mais en développement
- Durée de vie des panneaux généralement limitée à 20 ans [01],[35]

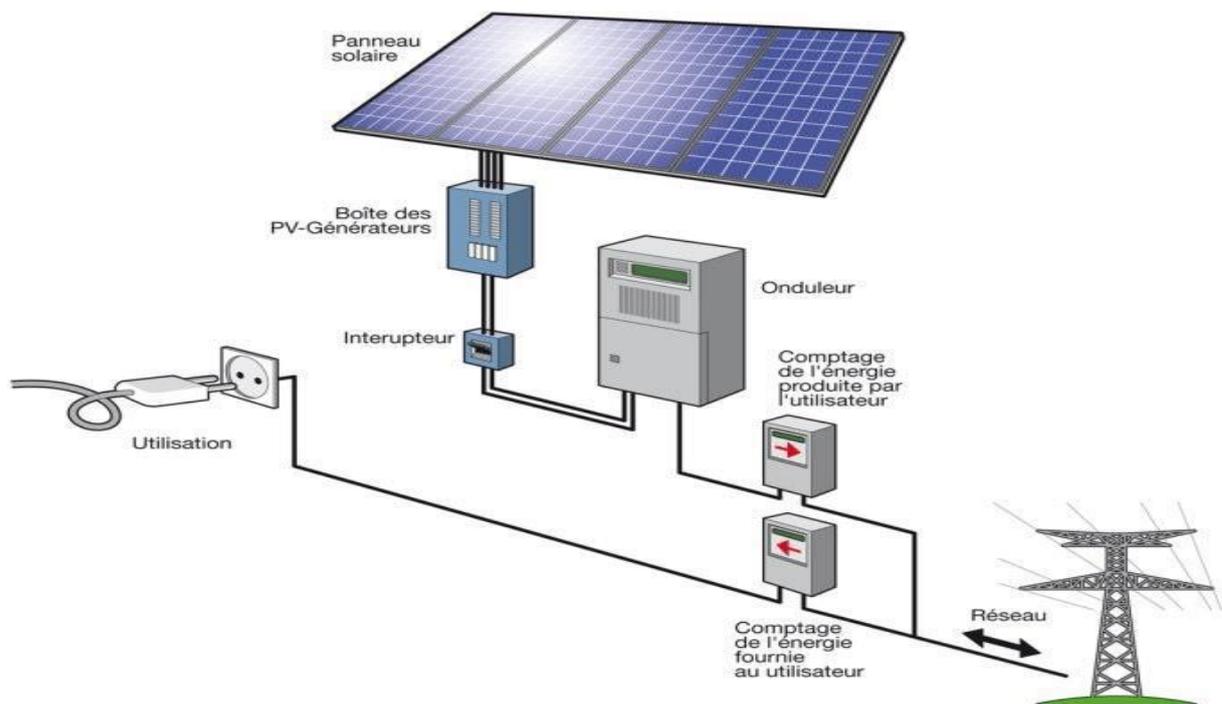


Figure I.9: Installation photovoltaïque

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les énergies non renouvelables et renouvelables ainsi que les principes conduisant à produire de l'électricité avec l'utilisation de ces dernières.

Les énergies non renouvelables présentent l'avantage de produire une grande quantité d'énergie, mais ils sont épuisables et leur utilisation a un effet néfaste sur l'environnement et la santé humaine.

Les énergies renouvelables, quant à elles, sont des énergies inépuisables, propres qui peuvent répondre aux besoins énergétiques. En effet, la plus grande utilisation des énergies renouvelables permettra de mieux assurer la pérennité des ressources de la terre et des énergies fossiles pour les générations de demain.

Dans le second chapitre, on s'intéressera à l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

L'énergie solaire photovoltaïque

II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [08].

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [09].

II.2. La cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

II.2.1. Principe de fonctionnement de la cellule PV

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. A 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

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) [33].

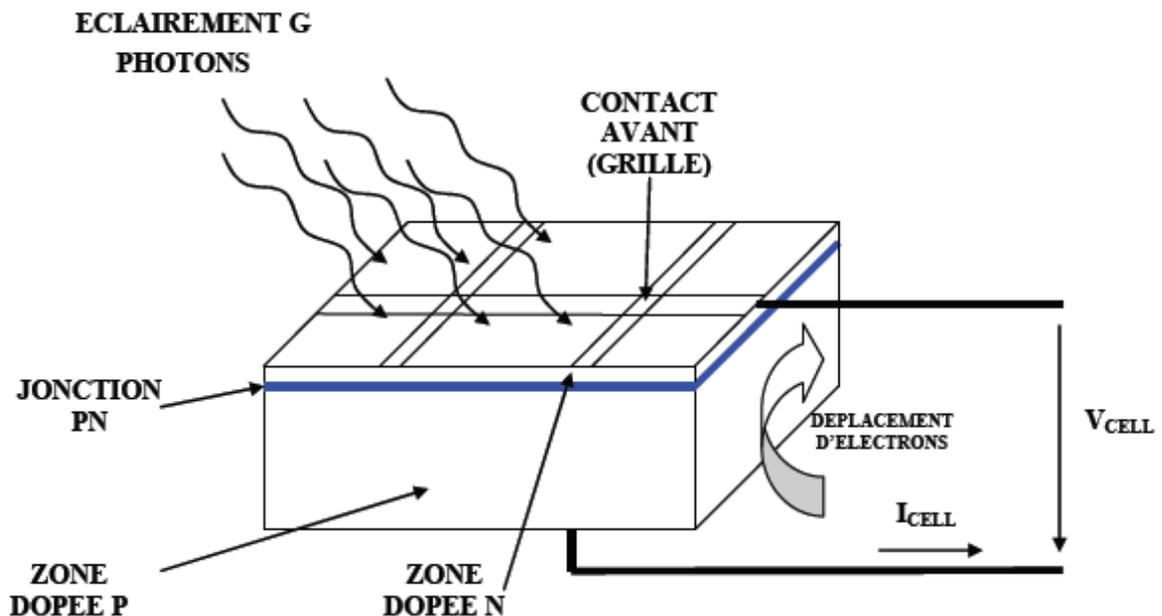


Figure II.1: Structure schématique d'une cellule solaire

II.2.2. Différentes structures des cellules PV

On utilise différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules PV et augmenter le rendement. On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures : les cellules solaires à couche mince, les cellules solaires organiques et les cellules solaires au silicium. Nous présenterons uniquement ces dernières citées, car étant les plus répandues.

II.2.2.1. Les cellules solaires au silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en termes d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopile au silicium :

- **Le silicium monocristallin** : il est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère. Il présente un taux de rendement excellent (12 – 16% allant jusqu'à 24 % en laboratoire). Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [02] ; [12] ;

- **Le silicium polycristallin** : il est composé de petits grains de silicium cristallin. Il a un coût de production moins élevé. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [12] ;
- **Le silicium amorphe** : les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [02] ; [12].



Figure II.2: Types de cellules solaires

II.2.3. Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV

Une cellule PV peut être modélisée par un schéma électrique équivalent qui reproduit son comportement quand elle est éclairée par un faisceau lumineux.

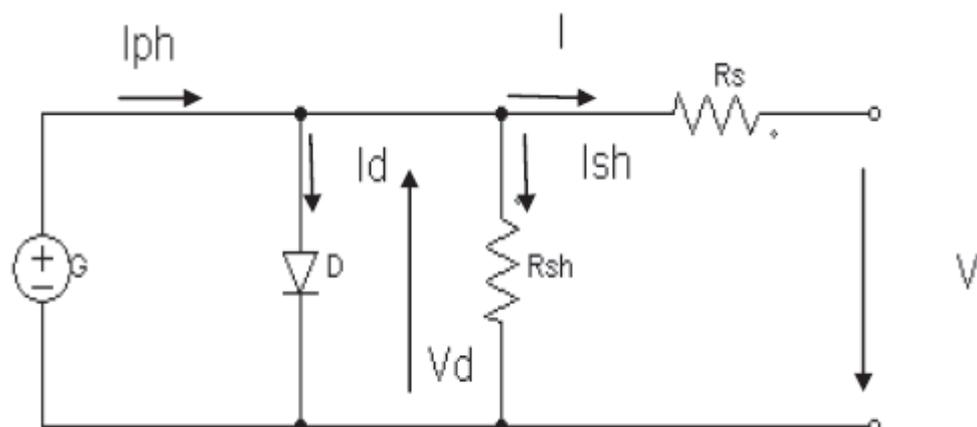


Figure II.3: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

En appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds :

$$I_{\text{cel}} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.1})$$

- Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant (I_{ph}) correspondant au courant photo-généré.
- La diode : modélise la jonction $P-N$, avec I_d : courant électrique à travers la diode.
- La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile. Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction pn . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant (I_{ph}) sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible [13].

L'expérience montre qu'avec l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s .

$$V_{\text{th}} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.2})$$

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K)

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C)

Sous éclairage, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, les effets résistifs et les fuites vers les bords d'autres sont tenus en compte. L'équation de la caractéristique $I-V$ devient :

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp \left(\frac{V+IR_s}{nV_{\text{th}}} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ($G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$) pour écrire l'équation (II.1)

sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp \left(\frac{V+IR_s}{nV_{\text{th}}} \right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (\text{II.4})$$

I_s : le courant de saturation en Ampère (A)

n : le facteur de qualité de la diode ; sans dimension

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

I_{ph} : photo-courant généré (proportionnel au rayonnement incident) [13].

II.2.4. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque

II.2.4.1. Caractéristique courant - tension (I-V)

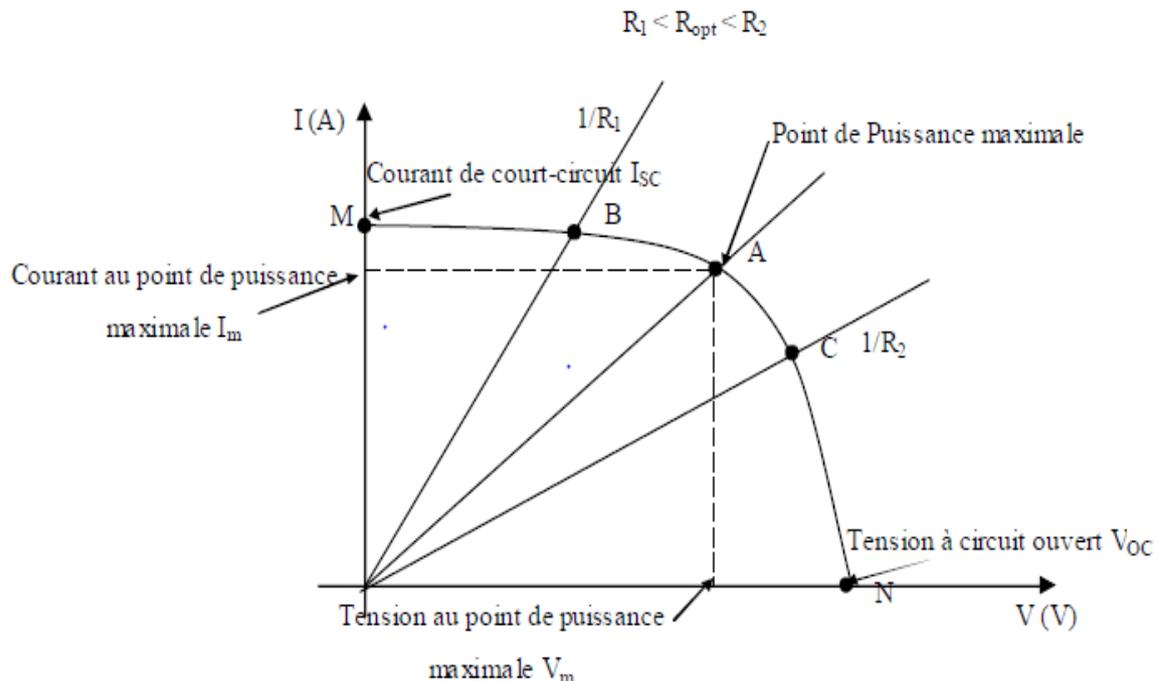


Figure II.4: Caractéristique courant - tension (I-V)

La Figure (II.4) montre la caractéristique courant - tension pour une cellule photovoltaïque.

Ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec la courbe de la charge.

Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région MB de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CN . Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que

se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température [23].

II.2.4.2. Caractéristique puissance - tension (P-V)

La caractéristique puissance-tension (P-V) d'une cellule PV est obtenue à partir de sa caractéristique courant-tension (I-V).

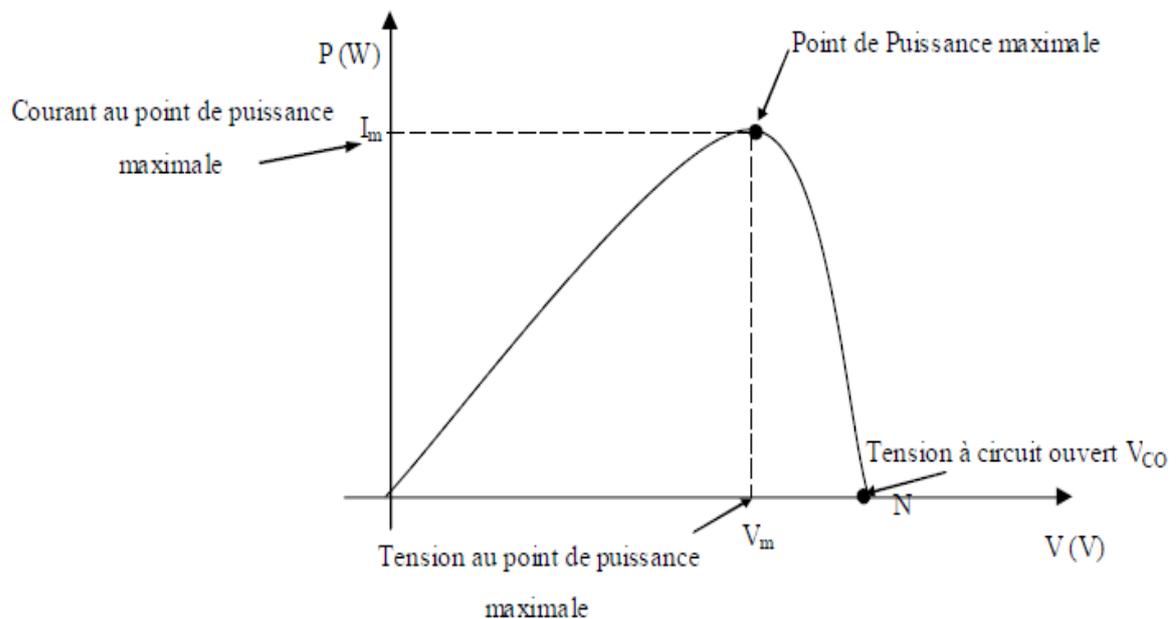


Figure II.5: Caractéristique puissance - tension (P-V)

La puissance générée par une cellule PV est donnée par :

$$P = V \cdot I \quad (\text{II.5})$$

La puissance maximale P_m est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (\text{II.6})$$

On désigne par I_m , V_m respectivement le courant et la tension avec lesquels la puissance produite est maximale.

II.2.4.3. Paramètres externes

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres dont le rendement de conversion, la tension de court-circuit et de circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courant-tension qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit [09] :

- **Courant de court-circuit I_{cc} :**

Le courant de court-circuit est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il augmente généralement avec l'intensité d'illumination. I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension $V=0$. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} ($I_{cc} = I_{ph}$).

- **Tension à circuit-ouvert V_{co} :**

La tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif PV. Elle dépend du type de cellule solaire et de l'éclairement et du type des matériaux de la couche active.

- **Facteur de forme :**

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit.

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.7})$$

- **Le rendement de la cellule :**

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_m à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (\text{II.8})$$

S : surface de la cellule en m^2 .

E : l'ensoleillement en W/m^2 .

II.2.5. Influence de l'éclairement et de la température

II.2.5.1. Influence de l'éclairement

Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires 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'éclairement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_m et donc un décalage du point P_m du panneau solaire vers les puissances inférieures.

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

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

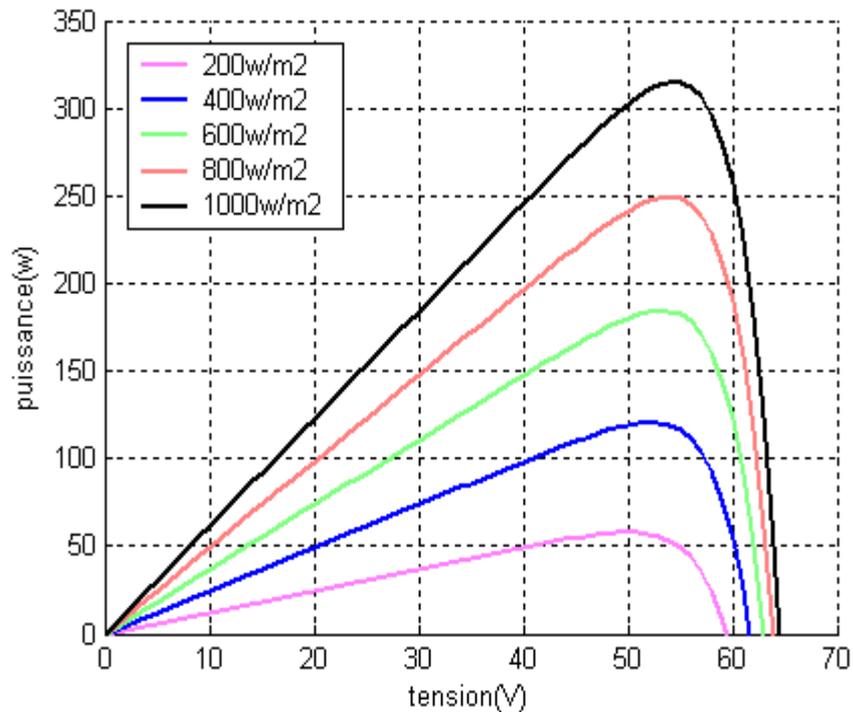


Figure II.6: Courbes $P(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

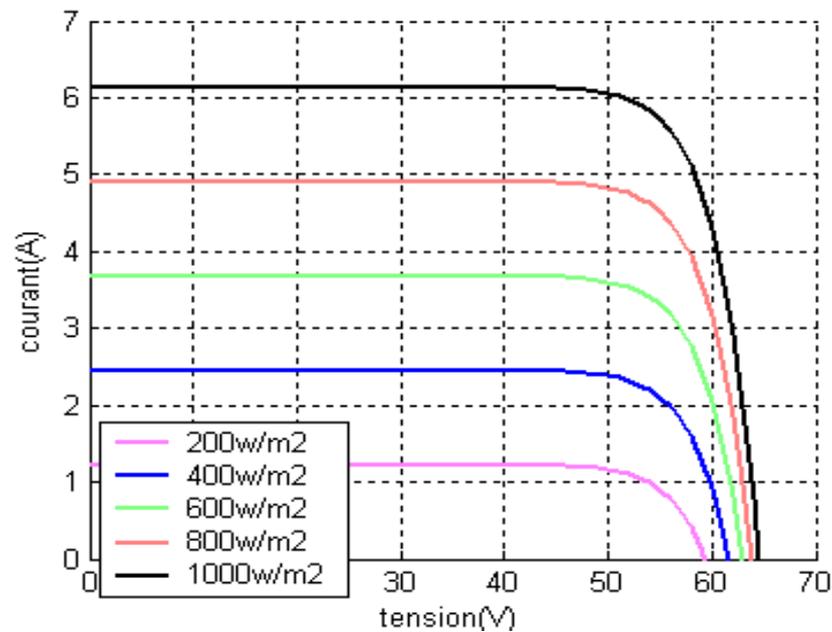


Figure II.7: Courbes $I(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

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_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [35].

II.2.5.2. Influence de la température

La figure (II.8) et (II.9) présentent respectivement des courbes P(V) et I(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.

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 100 W/m² la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement [35].

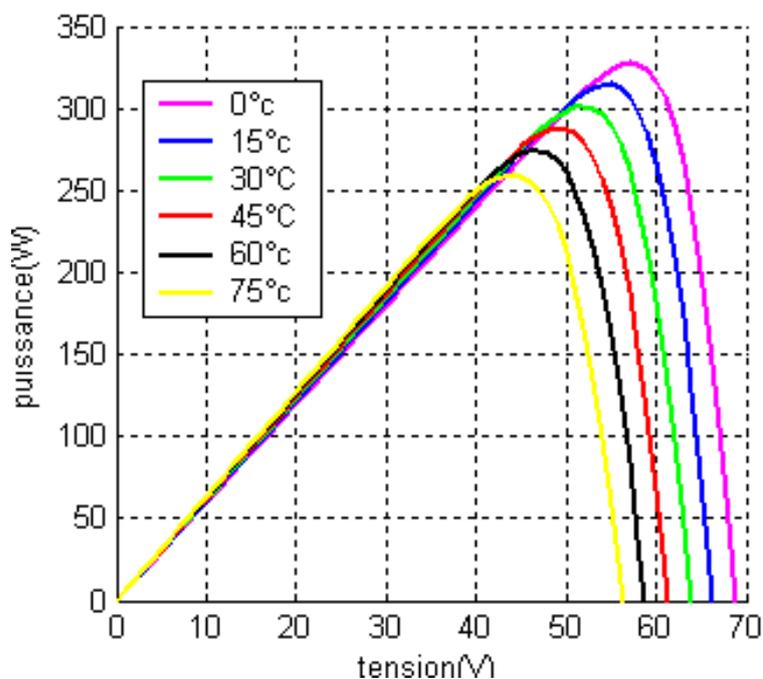


Figure II.8: Courbes P(V) d'un GPV pour différentes températures à G=1000W/m

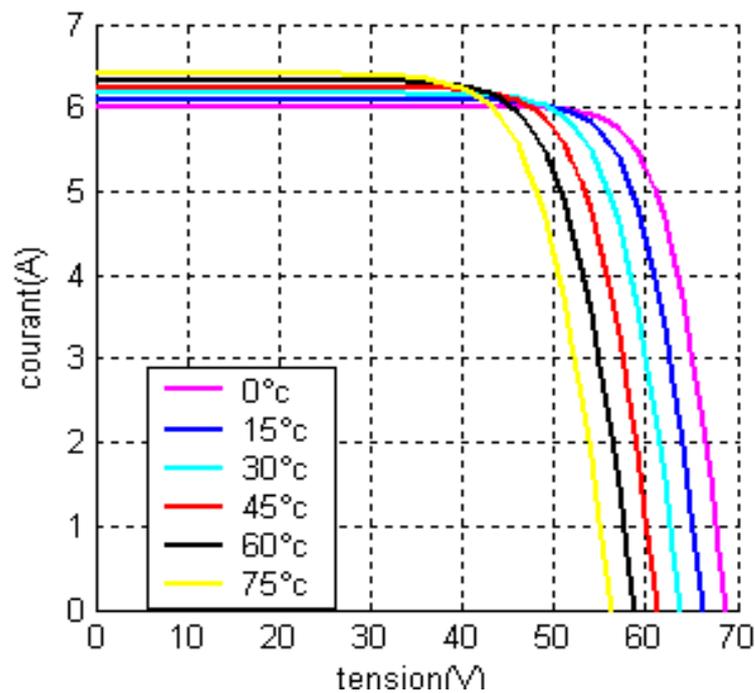


Figure II.9: Courbes I(V) d'un GPV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$

II.2.6. Association des cellules PV (le module PV)

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure [00].

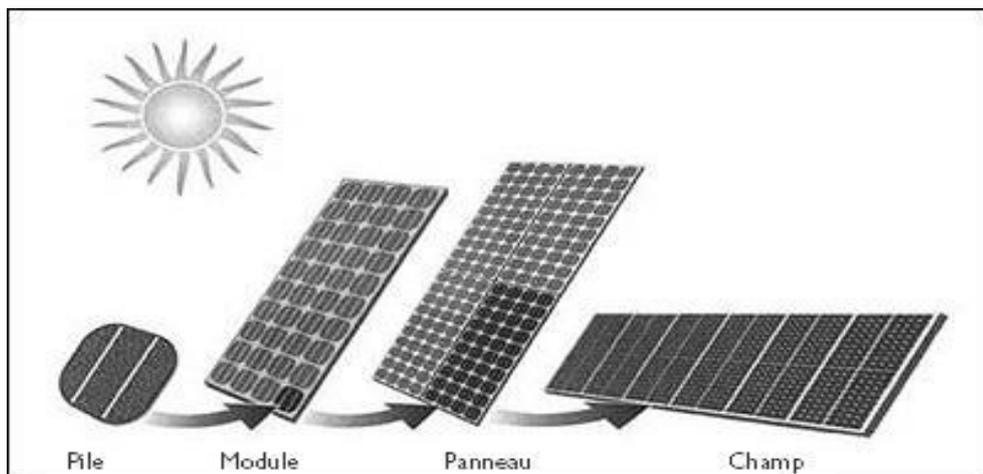


Figure II.10: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier.

La forme générale de la caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule solaire élémentaire.

II.2.6.1. Association des cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

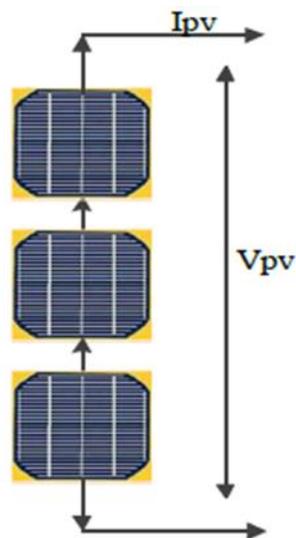


Figure II.11: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [14].

La figure (II.7) qui suivra montre la caractéristique résultante (I_s, V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de ns cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{II.9})$$

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (\text{II.10})$$

V_{co} : la tension du circuit ouvert

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit

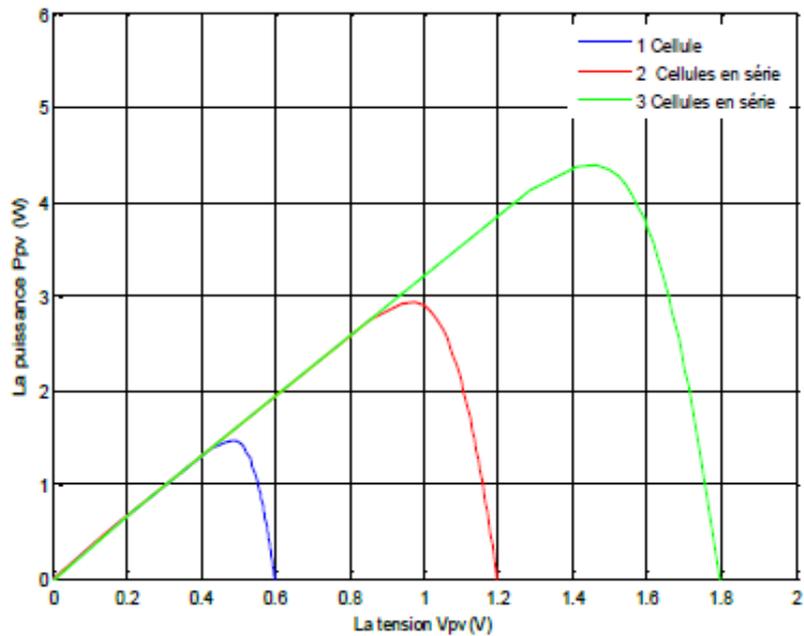


Figure II.12: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série

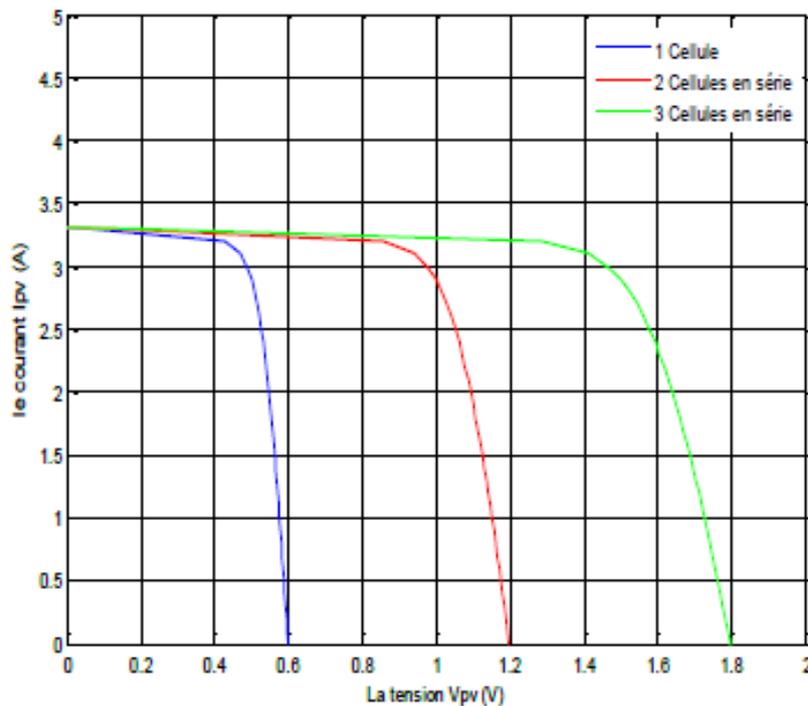


Figure II.13: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série

II.2.6.2. Association des cellules en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [14].

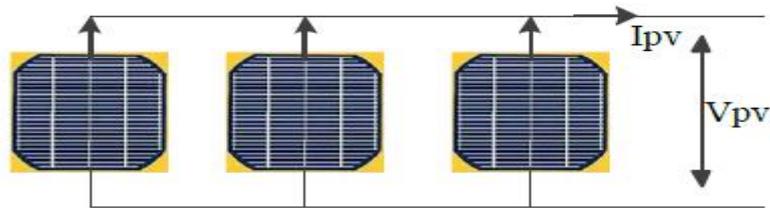


Figure II.14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

La figure (II.8) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{pco} = n_s \cdot V_{co} \quad (\text{II.12})$$

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

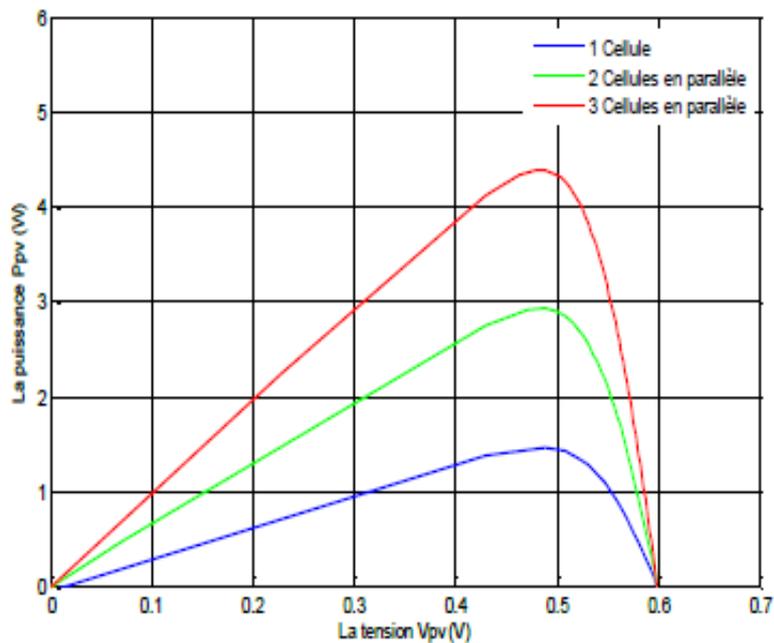


Figure II.15: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle

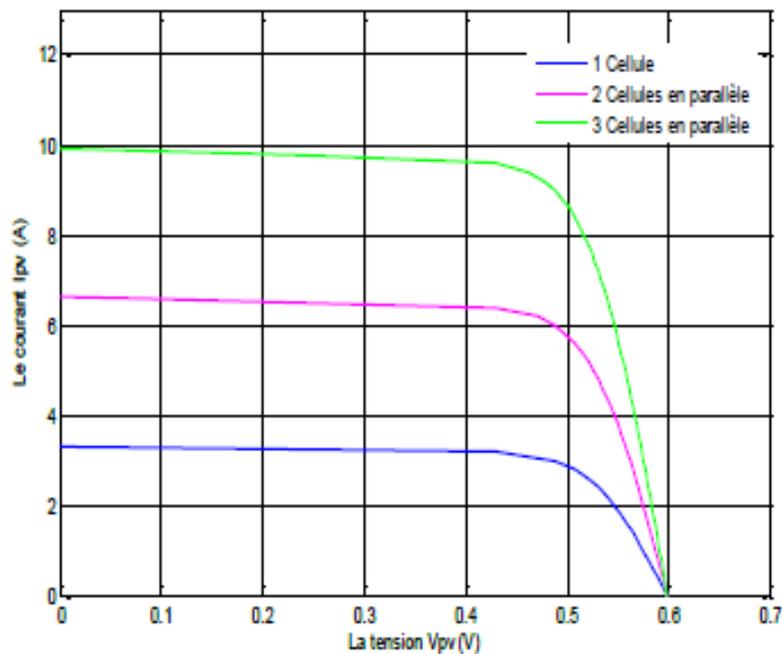


Figure II.16: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle

II.2.6.3. Association mixte des cellules

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un GPV [15].

II.3. Le système photovoltaïque

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge.

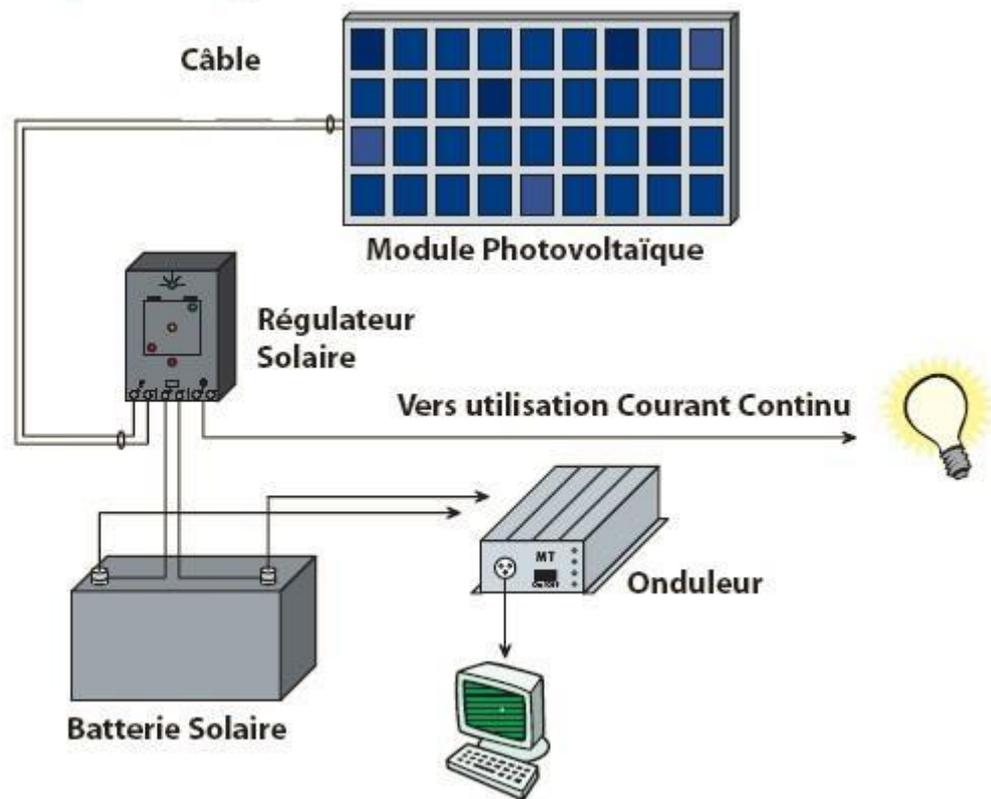


Figure II.17: Les constituants d'un système PV

Par le mécanisme photovoltaïque, les panneaux PV transforment l'énergie solaire en courant continu (CC). Ce dernier peut être utilisé directement, soit sera converti en courant alternatif (CA) par l'onduleur. Le surplus d'énergie produit par le système est emmagasiné dans les accumulateurs (batteries). La charge et la décharge des batteries sont contrôlées par le régulateur qui assure la régulation entre la production, la consommation et le stockage [16].

II.3.1. Le panneau PV

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles constitue le module ou le panneau PV, ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité.

II.3.2. La batterie solaire

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

- Ampérage en Ampère heure (Ah)
- Voltage en Volt.

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

On peut trouver les types des batteries solaires suivants :

- **Batterie étanche** : c'est une batterie fermée, étanche, sèche, sans maintenance ni entretien, à installer à l'abri de la chaleur et l'humidité, à ne pas stocker plus de 4 à 5 mois, très chère, durée de vie de 17 à 10 ans.
- **Batterie stationnaire solaire** : c'est une batterie ouverte (humide), avec entretien (l'ajout de l'acide chlorhydrique ou l'eau distillée chaque 6 mois), prix moins chère, durée de vie 10 à 15 ans.
- **Batterie à gel** : c'est une batterie ouverte destiné à zones froides (neige, verglas ...), avec entretien (l'ajout de l'antigel mono-propylène glycol chaque 6 mois), prix moyen, durée de vie 15 ans.

II.3.3. Le régulateur (contrôleur de charge)

Les régulateurs sont mis en place dans le souci d'assurer une longévité de système de stockage, donc de minimiser le coût d'installation. En effet, un régulateur est chargé de :

- Contrôler la surcharge et la décharge de la batterie.
- Assurer l'optimisation du système du point de vue énergétique où il constitue un nœud de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation.

Pour fonctionner, un régulateur a besoin d'un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil haut et un autre bas. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est défini par : Ampérage en Ampère et Voltage en Volt [39].

II.3.4. Le convertisseur d'énergie (onduleur)

Il est chargé de convertir le courant continue développé par le solaire, vers un courant alternatif, et de voltage de branchement (12 V, 24 V...48V) vers 220 V, il est défini par :

le voltage de branchement en volt et la puissance nominale à développer en watt.

II.3.5. La charge

Elle représente l'ensemble des fonctions assurées par divers appareils reliés au système photovoltaïque. Vu les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïque, il est importé de définir les critères sur lesquels s'appuiera un choix des charges à utiliser : charge continue ou alternative.

II.3.6. Différents systèmes photovoltaïques

Les trois genres de systèmes PV que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau.

II.3.6.1. Systèmes autonomes

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique. Ils sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

➤ Systèmes avec accumulateurs

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système.

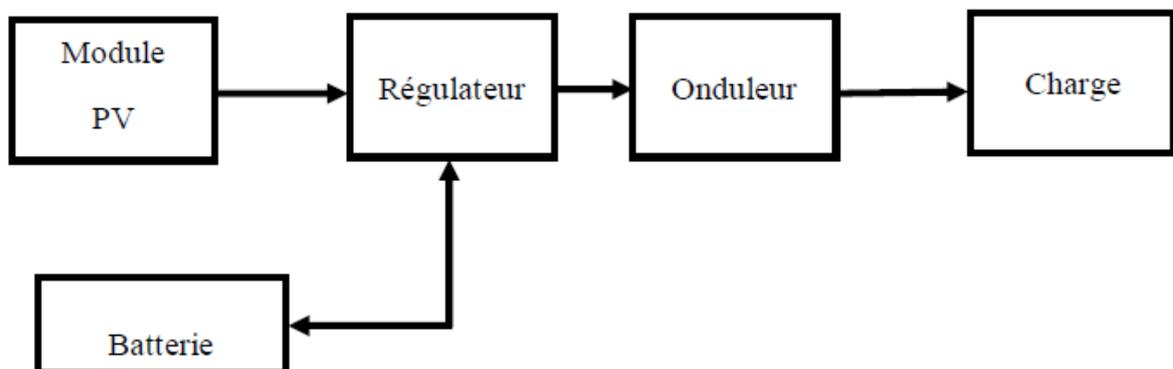


Figure II.18: Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie

➤ Système sans accumulateurs

Dans ces systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique. Par exemples :

Pompage : stockage par réservoir d'eau,

Réfrigération : stockage de froid (stockage de glace ou eutectique),

Électrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène [16] ; [17].

II.3.6.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur PV combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible (module d'appoint), ou deux à la fois comme il est illustré sur la figure (II.4). S'il a une combinaison entre deux énergies renouvelables ou plus, on dit jumelage.

CHAPITRE II : L'énergie solaire photovoltaïque

Le module d'appoint peut être utilisé selon deux stratégies :

- **Chargeur des batteries**
- **Alimentation directe de la charge et de charger les batteries.**

Un tel système s'avère d'un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année [16].

II.3.6.3. Systèmes connectés au réseau

Ces systèmes photovoltaïques convertissent l'électricité en courant alternatif (CA) et transfèrent leur surplus d'électricité au réseau auprès duquel ils s'approvisionnent pendant la nuit ou lorsque le rayonnement solaire est insuffisant. Dans ces systèmes on compte :

- **Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau**

Le système ne peut fournir ou prélever de l'énergie qu'au réseau. La batterie n'est plus présente. Le schéma du système PV directement relié au réseau est donné par la figure suivante.

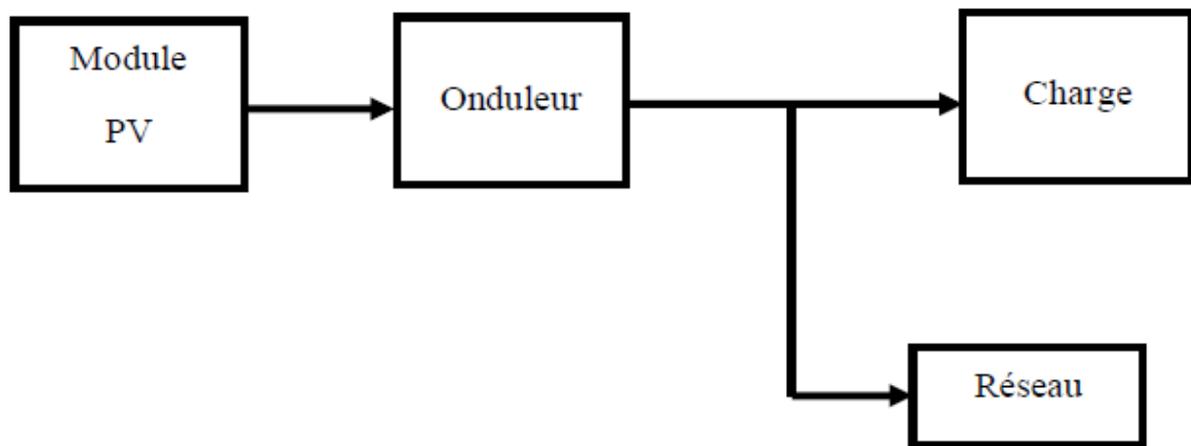


Figure II.19: Système photovoltaïque directement relié au réseau

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

- **Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie**

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.

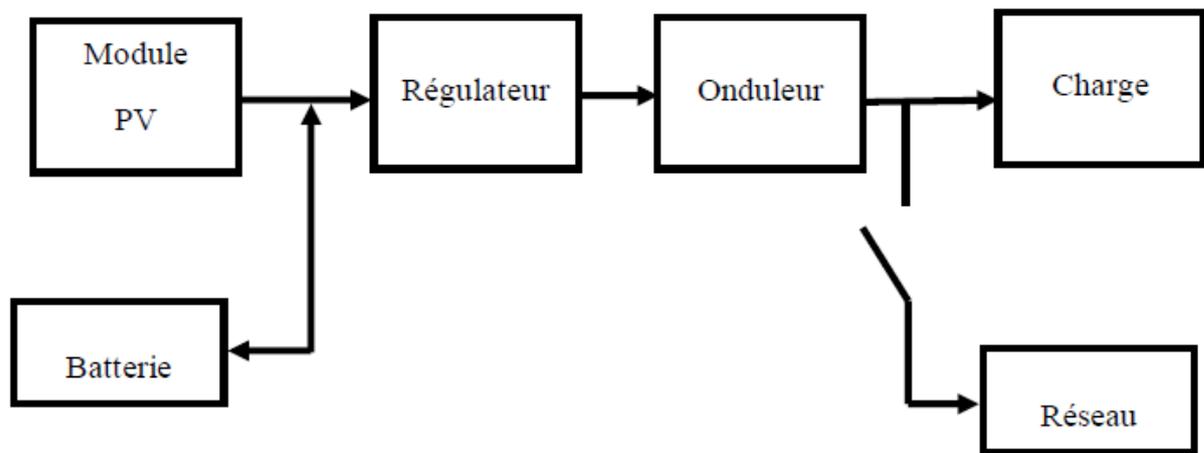


Figure II.20: Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie [16].

II.3.7. Avantages et inconvénients des systèmes PV

On peut citer les avantages et les inconvénients suivants :

II.3.7.1. Avantages

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel [19].

II.3.7.2. Inconvénients

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication [20].

Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité, rendue possible par un système PV.

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés au principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que l'étude de son schéma équivalent. Puis, nous avons considéré les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par les conditions météorologiques (température, éclairage).

Les modules PV peuvent être associés en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant.

Dans le troisième chapitre, on s'intéressera aux convertisseurs continu-continu DC/DC.

Chapitre III

Le convertisseur DC-DC

III.1. Introduction

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits électriques servant à transformer une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de transformation bien défini.

$$K = V_e / V_s \quad (\text{III.1})$$

Avec V_s la tension de sortie, V_e la tension d'entrée, K le rapport de transformation.

Il peut être supérieur à l'unité, dans ce cas on dit que le convertisseur est dit élévateur (survolteur). Comme il peut être inférieur à l'unité, et dans ce cas il est dit abaisseur (dévolteur).

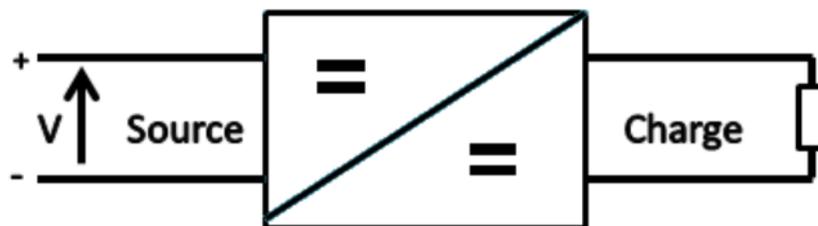


Figure III.1: Schéma de convertisseur DC/DC

En réalité la tension V_e est la tension fournie par les panneaux solaires, et la tension V_s est celle qui doit alimenter la charge.

Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle surtout dans l'électronique embarquée et dans d'autres applications industrielles. Grâce à leurs faibles poids et leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que et leurs coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance [26].

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

III.2. Définition

On peut définir les hacheurs comme étant les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. Autrement dit, un hacheur permet d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue.

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

Le cas où l'entrée et la sortie sont de natures dynamiques différentes, on parle d'hacheur à liaison directe, on peut alors les relier directement. Lorsqu'elles sont de même nature dynamique, dans ce cas on parle d'hacheur à accumulation, et il faut faire appel alors à un élément de stockage momentané.

Enfin dans le cas où l'isolation galvanique de la sortie avec l'entrée est une nécessité, on réalise des hacheurs dits isolés.

Suivant le degré de réversibilité que l'on désire, la structure du montage diffère, et suivant la puissance nominale du système, la technologie des composants ne sera pas la même [28].

III.3. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé (un transistor de puissance qui fonctionne en commutation ; 0 1) à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe de l'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique.

Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante [29].

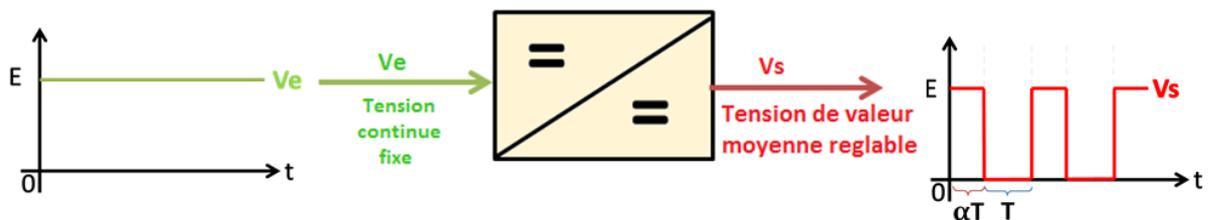


Figure III.2: Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC

III.3.1. Composition du convertisseur

III.3.1.1. Le transistor MOSFET

Le MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor) est un transistor utilisé en commutation rapide. Il est représenté par le symbole ci-dessous (figure (III.3a) qui donne la représentation symbolique usuelle. La connexion partant de la borne reliée au substrat (bulk) B se termine par une flèche indiquant le sens passant des deux jonctions substrat - source et substrat - drain.

D'ordinaire le substrat et la source sont reliés. La figure (III.3b) indique les notations utilisées.

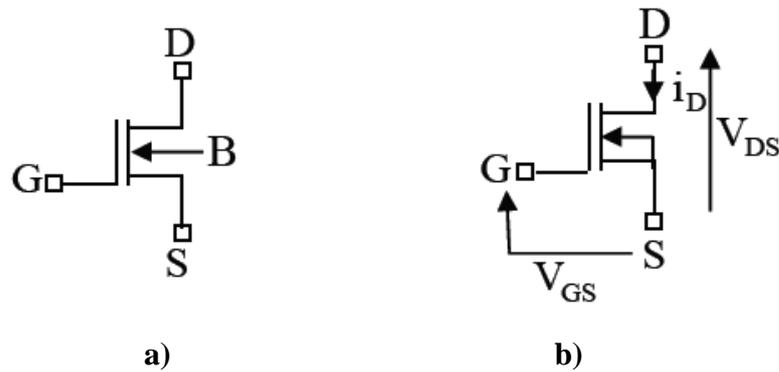


Figure III.3: Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N

Dans un semi-conducteur dopé de type P (figure III.4), on a diffusé deux zones de type N sur lesquelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Une couche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain ; sur cette couche est soudé le contact de grille (gate) G. C'est la succession Metal-Oxyde-Semi-conductors qui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor [38].

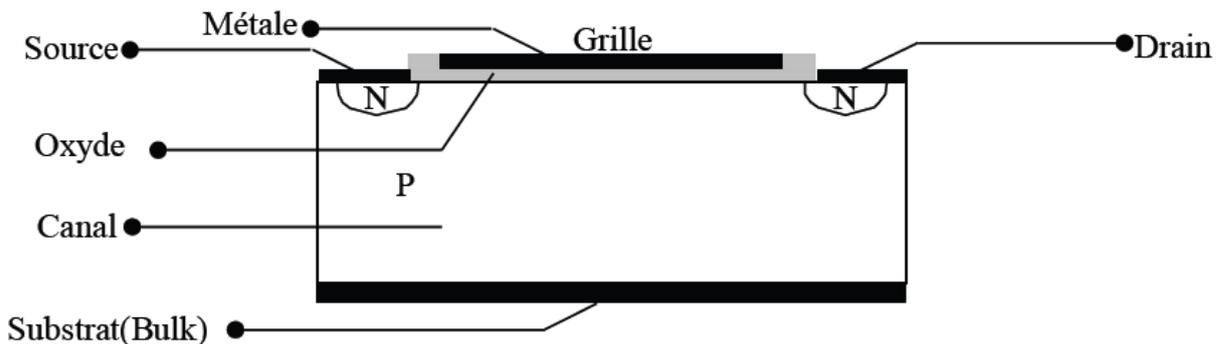


Figure III.4: Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance

L'utilisation du transistor MOSFET offre plusieurs avantages :

- Le bruit intrinsèque est toujours très faible.
- Ce type de transistor est simple à fabriquer et par la suite peu onéreux.
- La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante : on dépasse aujourd'hui le nombre de 10^7 transistors sur une seule puce.

II.3.1.2. Le condensateur

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent d'énergie lors des variations de commande ou de charge, mais aussi ils servent également de condensateur de découpage ou filtrage vis-à-vis du fonctionnement en haute fréquence de l'alimentation. Ce sont les condensateurs chimiques dits à faible

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

résistance série qui présentent des valeurs de capacité importantes, tout en présentant une excellente tenue en fréquence. Le condensateur se caractérise par des grandeurs physiques qui définissent ses domaines d'application. La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique Q emmagasinée à la tension V appliquée entre ses armatures.

$$C(F) = \frac{Q(C)}{V(V)} \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface S des armatures en regard est plane, l'expression de la capacité est :

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{e} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

ϵ_0 : permittivité du vide

ϵ_r : permittivité relative (2 à 20000) du diélectrique

e : épaisseur du diélectrique [38]

II.3.1.3. L'inductance

Le rôle d'une inductance est de stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air.

Mais, l'utilisation de circuits magnétiques tels que présentés après permet :

- De diminuer l'encombrement, avec la même valeur de l'inductance.
- De confiner le flux magnétique dans un espace restreint et ainsi de limiter les rayonnements parasites.

Les inductances sont utilisées essentiellement dans des applications de filtrage, de conversion d'énergie (alimentations à découpage...), et d'interrupteurs magnétiques (inductances saturables). Le schéma électrique équivalent d'une inductance réelle L est le suivant :

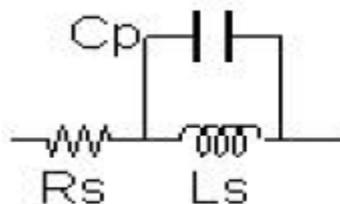


Figure III.5: Schéma équivalent d'une inductance réelle L

Où R_s représente la résistance série du fil bobiné et C_p les capacités parasites inter spires.

La valeur de l'inductance est obtenue par :

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{S_e}{l_e} N^2 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

μ_0 : $4 \pi \cdot 10^{-7}$ (SI)

μ_e : perméabilité relative (y compris entre fer éventuel)

S_e : section effective magnétique du noyau (section moyenne)

l_e : longueur magnétique effective (longueur moyenne du circuit magnétique)

N : nombre de spires [38]

II.3.1.4. La diode Schottky

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V.
- Tension de seuil plus faible ($V_s = 0,3\text{V}$).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (tr de 0,15 à 0,35 μs)

Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage [38].

III.3.2. Types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont de plusieurs topologies. Ils sont classés par catégorie selon la topologie isolée ou non isolée.

➤ Les topologies isolées de la source :

Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage, et qui emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques, 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 de la source :

Ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu.

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

On peut classer les convertisseurs de type non isolé selon le niveau de tension de sortie sous trois catégories principales :

- Convertisseur élévateur _ Boost.
- Convertisseur abaisseur _ Buck.
- Convertisseur abaisseur-élévateur _ Buck-Boost.

On peut classer ces convertisseurs par rapport à leurs rendements dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Rendement des quelques convertisseurs DC-DC [27]

Convertisseurs	Rendement du convertisseur (%)	Batterie
Buck	93	12 V
Boost	92	24 V
Buck-Boost	92	12-24 V

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé dans des systèmes de pompage de l'eau mais aussi comme chargeur de batteries.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost... Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [26].

Le tableau III.3 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques, où α désigne le rapport cyclique du convertisseur [30].

Tableau III.2: Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC [30]

Convertisseurs	Rapport de transformation en fonction de α
Buck	α
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$
Buck-Boost	$\frac{-\alpha}{(1-\alpha)}$

III.3.2.1. Convertisseur Boost

➤ Définition

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Donc les systèmes de production de l'énergie emploient

un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [28].

➤ Schéma du convertisseur Boost

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, il est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

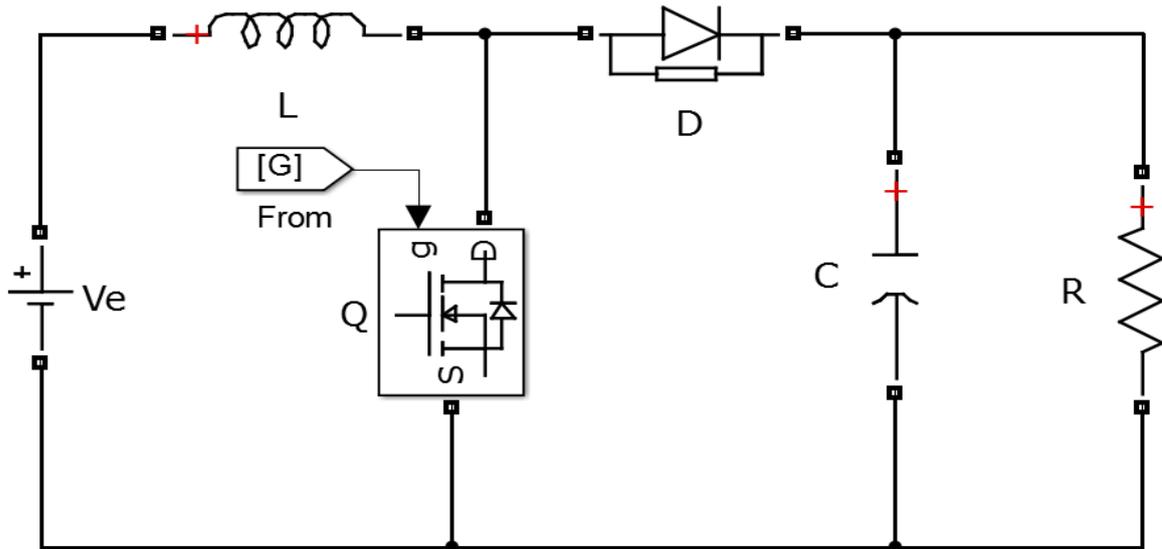


Figure III.6: Schéma de convertisseur Boost

➤ Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur Q

Mode continu : (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Lors de l'état passant (l'interrupteur Q est fermé ($Q=1$)), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Mode discontinu : Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [28].

Alors, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation (T_{On} , T_{Off}).

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

- **Pour TOn (Q fermé)** : À $t = 0$, quand le transistor Q est fermé, l'intervalle TOn commence. Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance L et le transistor.

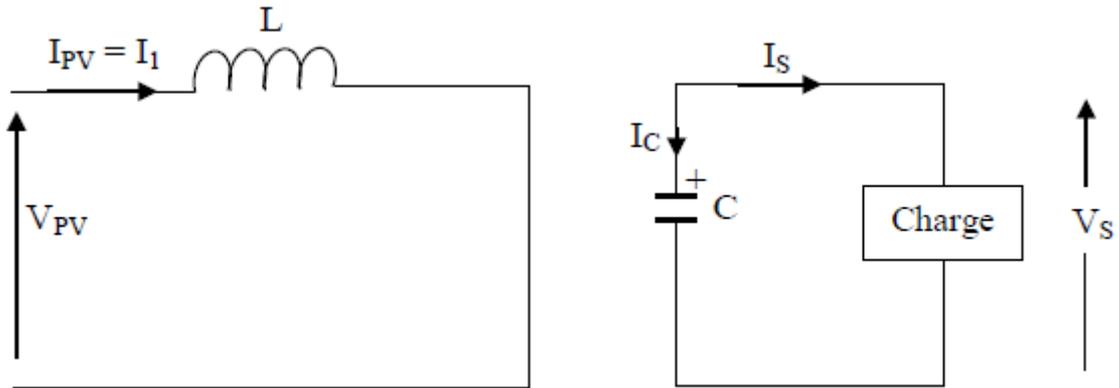


Figure III.7: Circuit équivalent pour TOn

L'équation de la tension : Durant l'état passant, l'interrupteur Q est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.5})$$

Avec : $V_e = V_{pv}$

L'équation du courant : à la fin de l'état passant, le courant i_L a augmenté selon l'équation :

$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{III.6})$$

$$i_{1L} = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (\text{III.7})$$

Où i_{1L} est le courant à l'instant initial. Pendant cet intervalle le courant traversant l'inductance augmente.

α étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur Q conduit. α est compris entre 0 (Q ne conduit jamais) et 1 (Q conduit tout le temps).

- **Pour TOff (Q ouvert)** : l'intervalle TOff commence quand on ouvre le transistor Q à $t = t_1$. Le courant de l'inductance diminue car l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée à la charge.

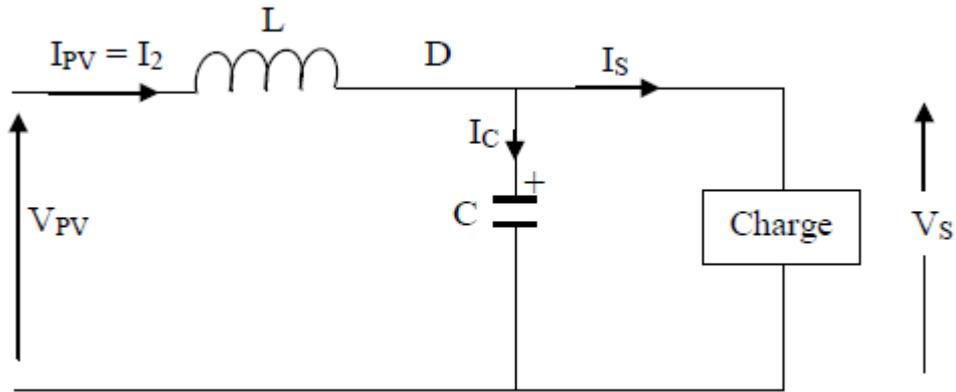


Figure III.8: Circuit équivalent pour Toff

L'équation de la tension : Pendant l'état bloqué, l'interrupteur Q est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. On considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante.

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad \text{(III.8)}$$

L'équations du courant :

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad \text{(III.9)}$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t \quad \text{(III.10)}$$

Les deux équations des courants i_{1L} et i_{2L} sont interprétées ci-dessous :

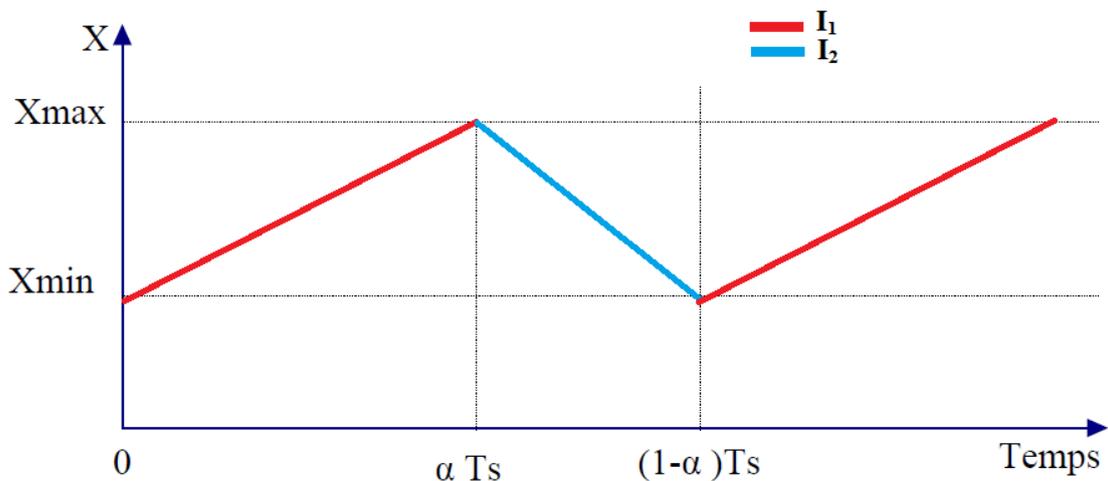


Figure III.9: Forme du courant i1 et i2

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

Si on considère que le convertisseur a atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (\text{III.11})$$

En conséquence, la variation du courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_{\text{On}} + i_{\text{Off}} = 0 \quad (\text{III.12})$$

En remplaçant i_{On} et i_{Off} par leurs expressions, on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(1-\alpha)(V_e - V_s)}{L} t = 0 \quad (\text{III.13})$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{(1-\alpha)} \quad (\text{III.14})$$

En mode de conduction continue, la période de commutation est $T = T_{\text{On}} + T_{\text{Off}}$ et le rapport cyclique est :

$$\alpha = \frac{T_{\text{On}}}{T} \quad (\text{III.15})$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique α . La tension de sortie est minimale quand $\alpha=0$. On ne peut pas avoir $\alpha=1$ qui correspondrait à un Q toujours fermé ; pour α proche de 1, la tension de sortie devient très grande et très sensible au changement du rapport cyclique α . De plus l'influence des pertes dans le circuit limite la tension maximale de sortie du convertisseur [26].

Le gain en tension tend théoriquement vers l'infini pour un rapport cyclique unitaire si nous considérons le circuit sans pertes. Ainsi, en résumé nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad (\text{III.16})$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_e \quad (\text{III.17})$$

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

Grâce à l'expression 3.14, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [32].

Pour la fréquence de découpage f , on en déduit l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \times V_s}{L \times f} \quad \text{(III.18)}$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \times I_s}{C \times f} = \frac{\alpha \times V_e}{(1-\alpha) \times R \times C \times f} \quad \text{(III.19)}$$

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_s}{(1-\alpha)} \quad \text{(III.20)}$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension, on a :

$$V_{s.max} = |V_{d.max}| = \frac{V_e}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad \text{(III.21)}$$

et en courant :

$$I_{s.max} = |I_{d.max}| = \frac{I_e}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta I_s}{2} \quad \text{(III.22)}$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost sont décrites par la figure suivante :

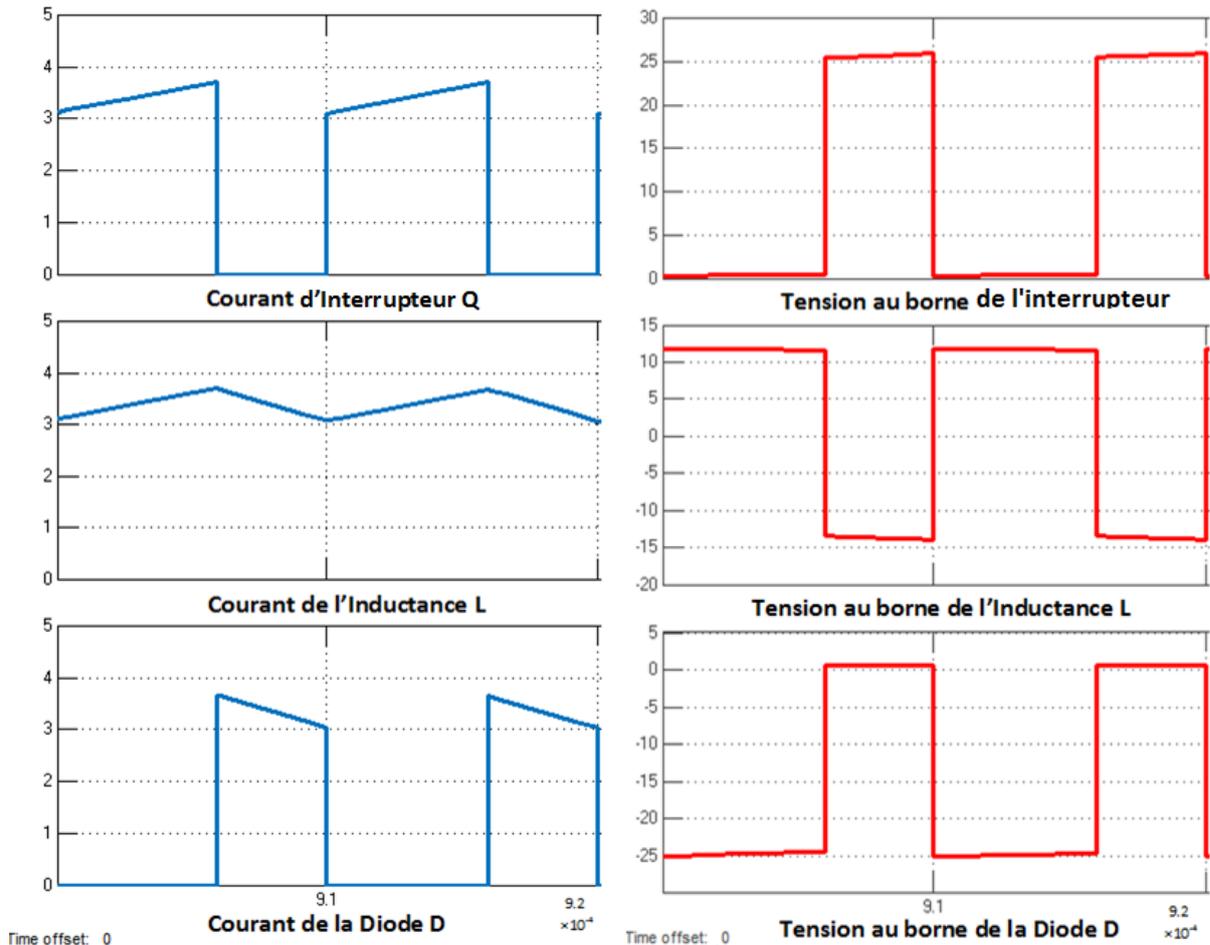


Figure III.10: Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost

II.3.2.2. Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

➤ Schéma du convertisseur Buck

L'hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure III.11. Il présente les mêmes composants clés que pour le convertisseur Boost.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source, par définition, doit être alors plus grande que la tension aux bornes de la charge.

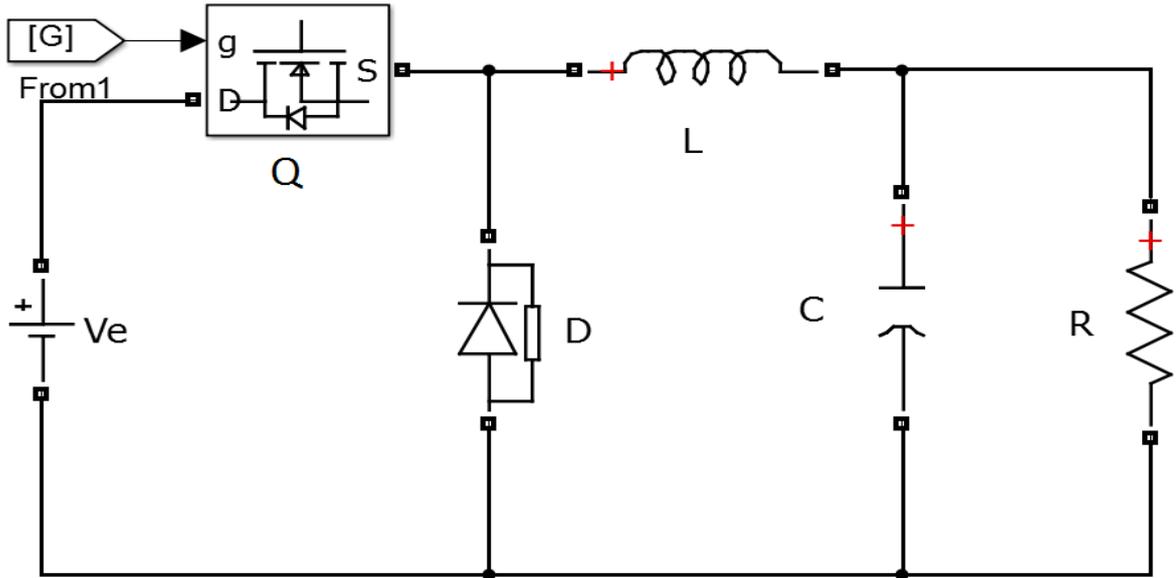


Figure III.11: Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck

➤ Principe de fonctionnement

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du PPM. Alors, pour les deux modes de fonctionnement on a :

- **Pour TOn (Q fermé) :** Si le commutateur Q est activé à t_0 , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L .

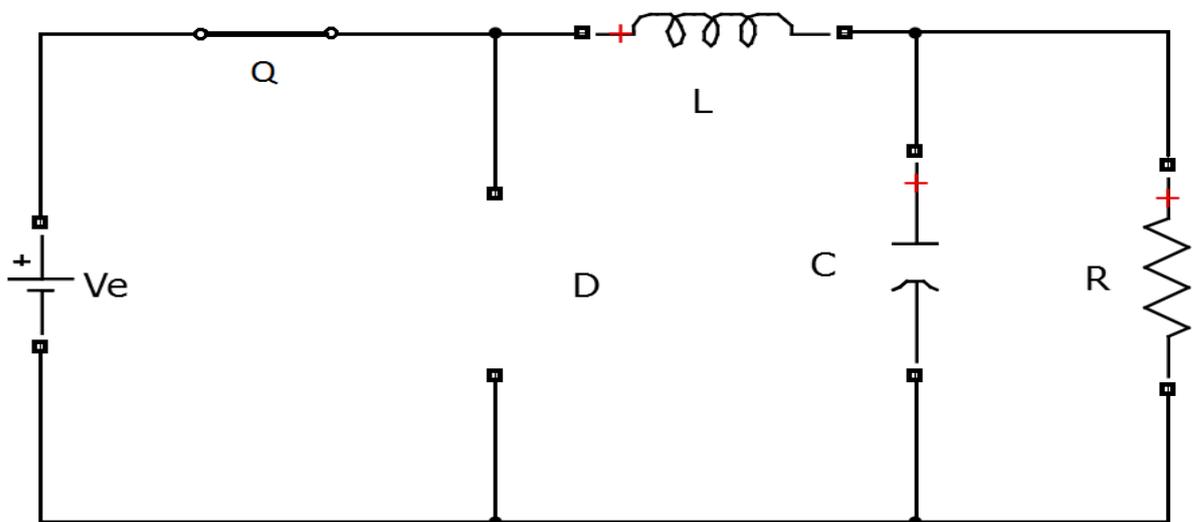


Figure III.12: Convertisseur Buck Durant l'état On

L'équation de la Tension : Pour Q fermé, on a les équations des tensions $V_T = 0$ et $V_D = -V_e$,

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (3.23)$$

L'équation du courant : A partir de l'intégration de l'équation 3.23, on peut faire sortir l'équation du courant I_L qui sera :

$$I_L = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{min} \quad (3.24)$$

L'inductance alors emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

- **Pour TOff (Q ouvert)** : Si Q est désactivé après $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

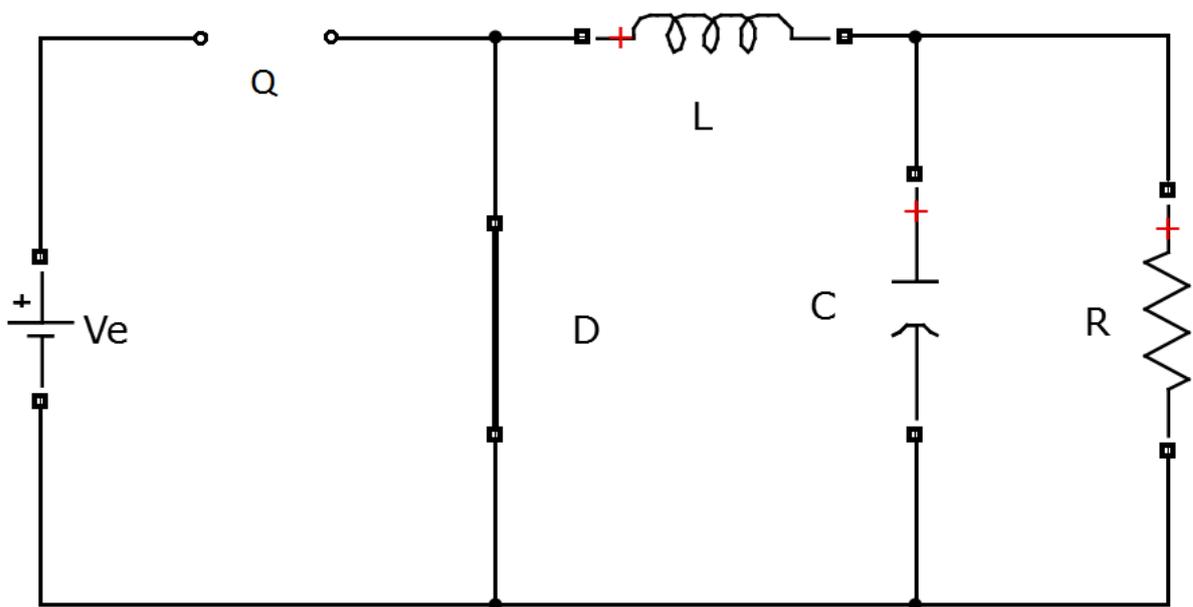


Figure III.13: Convertisseur Buck Durant l'état Off

L'équation de la Tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont $V_D = 0$ et $V_T = V_e$,

Alors la tension V_L sera :

$$V_L = -V_S = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (\text{III.25})$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{-V_S}{L} t + I_{max} \quad (\text{III.26})$$

Remarque : les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement [27].

Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_s est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{On}}{T} V_e = \alpha V_e \quad (\text{III.27})$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique α . On considère ici uniquement le comportement du circuit en mode de conduction continue (MCC). Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor MOSFET est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance [26].

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure III.14.

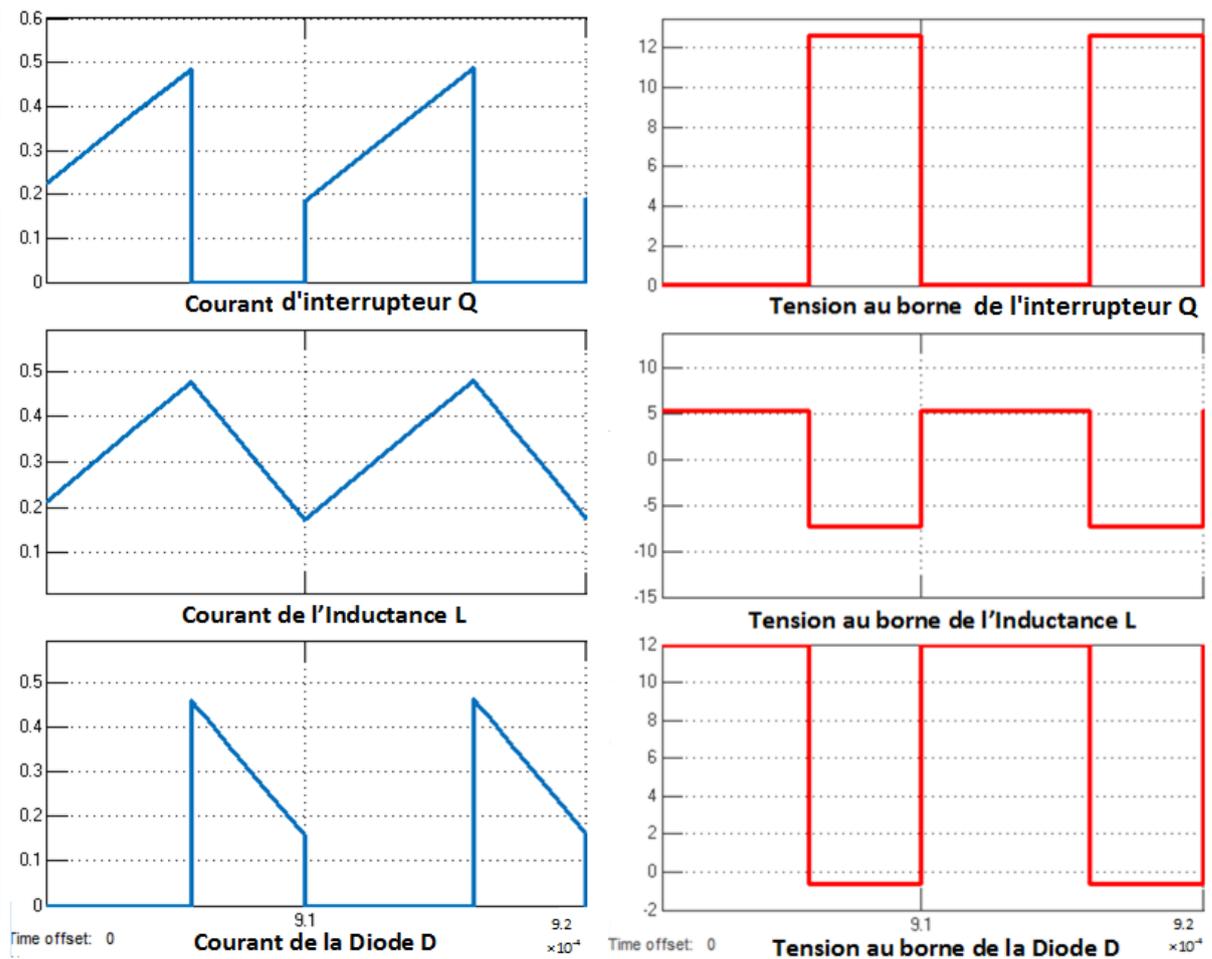


Figure III.14: Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck

II.3.2.3. Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

➤ **Schéma du convertisseur Buck-Boost**

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation.

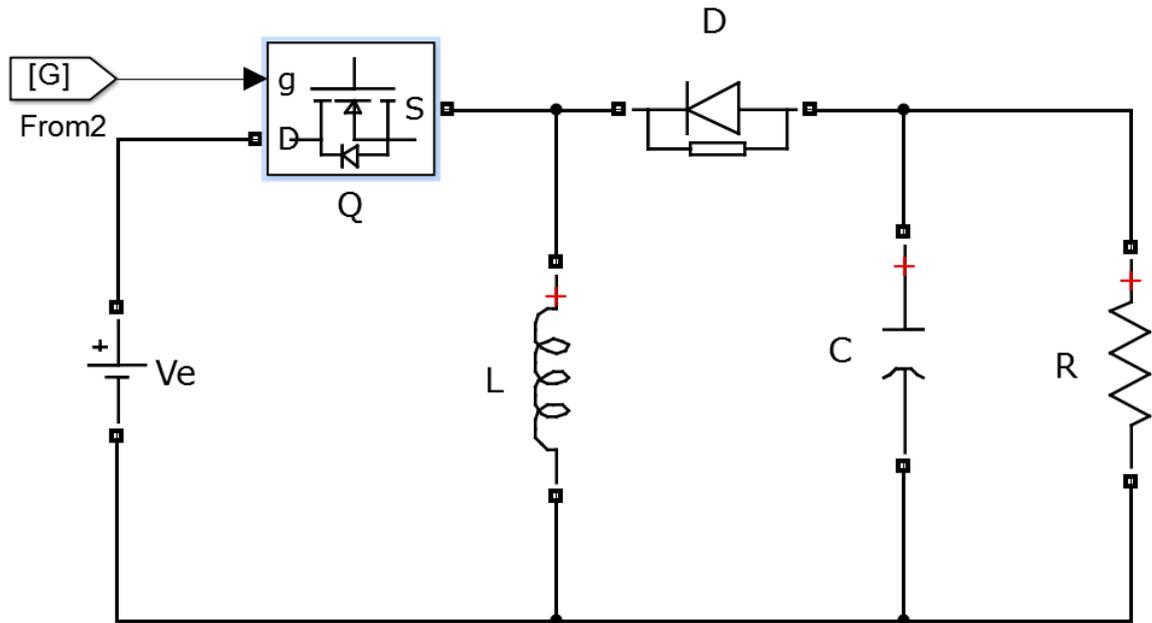


Figure III.15: Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost

➤ **Principe de fonctionnement**

Durant l'état On, l'énergie apportée par la source (GPV) est stockée dans l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état Off.

- **Pour TOn (Q fermé) :** l'interrupteur Q est conducteur pendant le temps αT , l'énergie est stockée dans L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée.

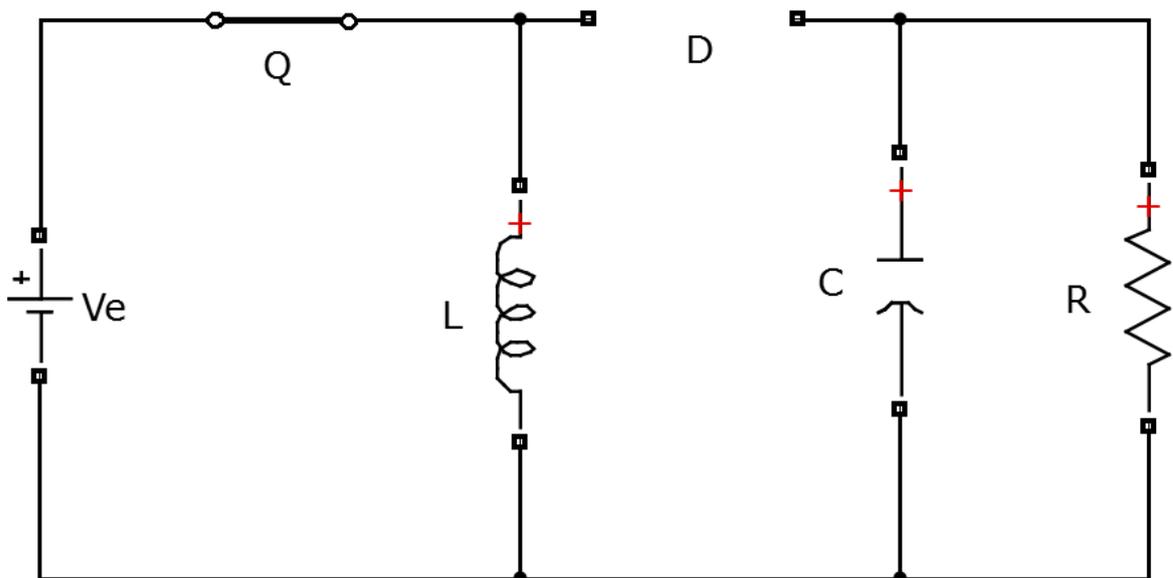


Figure III.16: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

L'équation de la Tension : Pour Q fermé on a les équations des tensions $V_T = 0$ et

$V_D = -V_e - V_e$. Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (\text{III.28})$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{V_e}{L} t + I_{min} \quad (\text{III.29})$$

- **Pour TOff (Q ouvert) :** le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle.

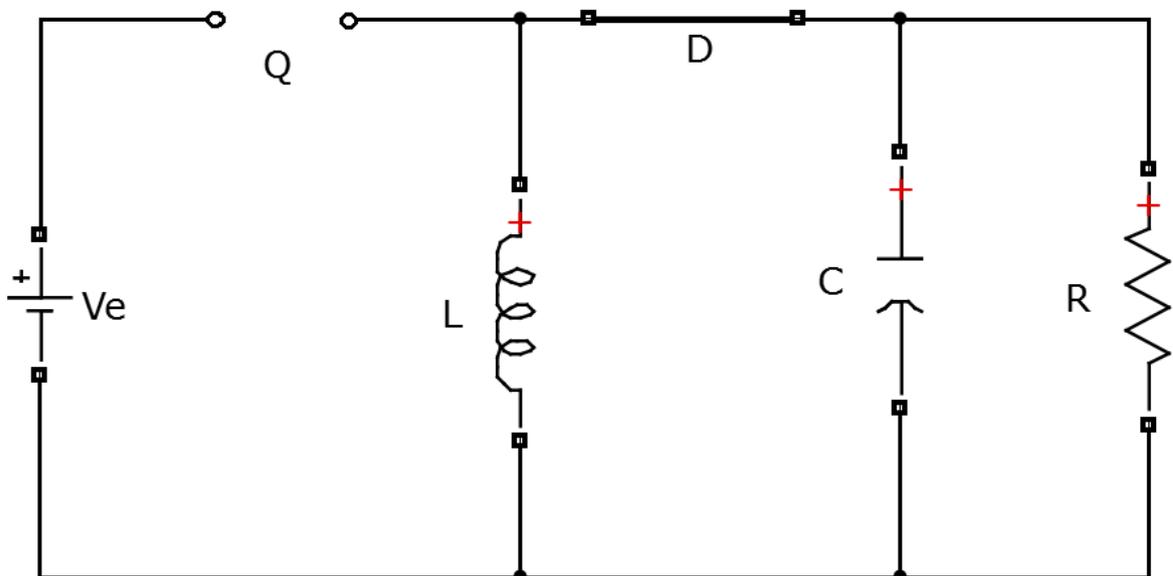


Figure III.17: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off

L'équation de la Tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont $V_D = 0$ et

$V_T = V_e + V_s$. Alors la tension V_L sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (\text{III.30})$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{max} \quad (\text{III.31})$$

CHAPITRE III : Le convertisseur DC-DC

En raison de la présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_S a une polarité opposée à V_e . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'auparavant.

En conclusion, l'amplitude de V_S peut être inférieure ou supérieure à V_e suivant la valeur de T_{On} et T_{off} :

$$V_S = \frac{T_{on}}{T_{off}} V_e = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_e \quad \text{(III.32)}$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites comme suit :

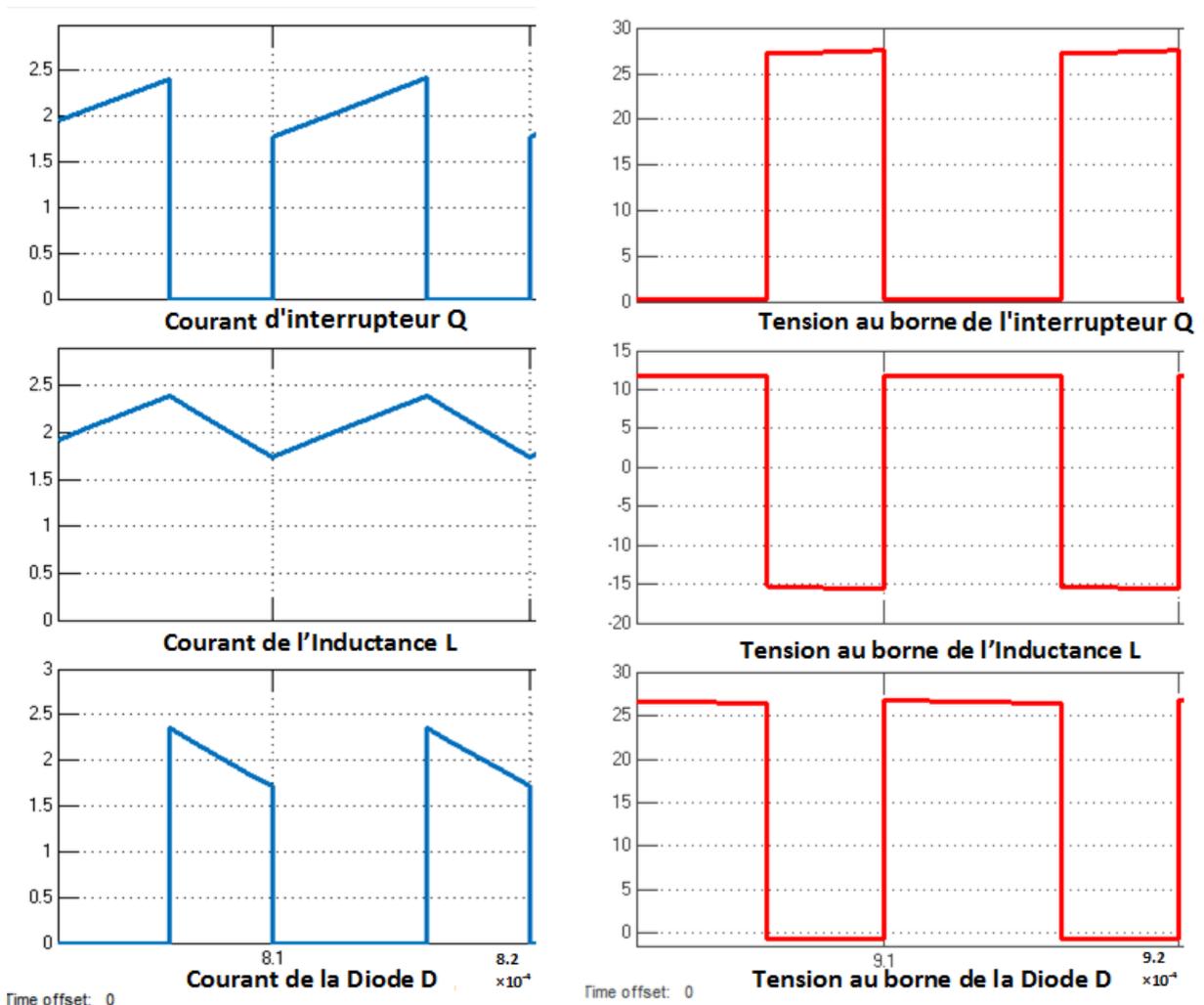


Figure III.18: Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost

III.3.3. Puissances des convertisseurs

III.3.3.1. Définition

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adopterons la convention "générateur" pour le convertisseur et donc la convention "récepteur" pour le récepteur [26].

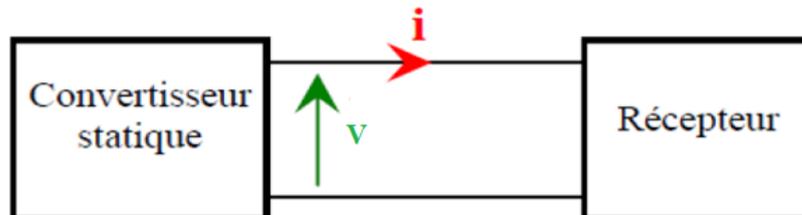


Figure III.19: Couplage de convertisseur avec un récepteur

III.3.2.2. Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit "courant \times tension". En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$P(t) = V(t) \cdot i(t) \quad (\text{III.33})$$

III.3.2.3. Puissance active

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$:

$$P(t) = P_{moyenne} = \langle V(t) \cdot i(t) \rangle \quad (\text{III.34})$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a :

$$P(t) = V \cdot I \cos \varphi \quad (\text{III.35})$$

III.3.2.3. Puissance apparente

La puissance apparente S est définie par le produit " $V_{eff} \times I_{eff}$ ". C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = V \cdot I \quad (\text{III.36})$$

➤ Facteur de puissance

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k < 1$) :

$$k = \frac{V(t) \cdot i(t)}{V_{eff} \cdot I_{eff}} \quad (\text{III.37})$$

Soit $k = \frac{P}{S}$

$$k = \cos \varphi \quad (\text{III.38})$$

Conclusion

L'analyse des GPV nous a permis de conclure la nécessité d'adapter le GPV pour qu'il fonctionne dans les conditions optimales. Pour les applications en régime continu, nous avons montré que l'adaptation des GPV est réalisée en intercalant entre les générateurs et les charges (résistives) des quadripôles d'adaptation qui sont des convertisseurs d'énergie 'Hacheur' de types survolteur ou dévolteurs.

Ainsi, le générateur PV est adapté à une charge lorsque le panneau PV est à sa puissance maximale pour un éclairement et température donnés. Cette puissance maximale est alors quasiment transférée à la charge en ajustant le rapport cyclique α du signal commandant l'interrupteur des convertisseurs d'énergie. De ce fait, il est nécessaire de concevoir et de réaliser un circuit qui permet de régler cette puissance maximale d'une manière automatique en temps réel et en fonction des conditions météorologiques (température, éclairement, ...) et des variations de la charge. Ce circuit permettant la poursuite du point de puissance maximale (PPM) est appelé commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), que nous allons développer dans notre chapitre suivant.

Chapitre IV

La commande MPPT

IV.1. Introduction

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance d'une manière permanente et ainsi faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM) sans perte dans l'énergie transférée à l'aide d'un contrôleur MPPT, par conséquent, obtenir une puissance maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants utilisant des algorithmes pour calculer le PPM du GPV, parmi les techniques les plus utilisées nous avons la méthode Perturbation et Observation (P&O) [35].

IV.2. Connexion directe entre le GPV et la charge

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût.

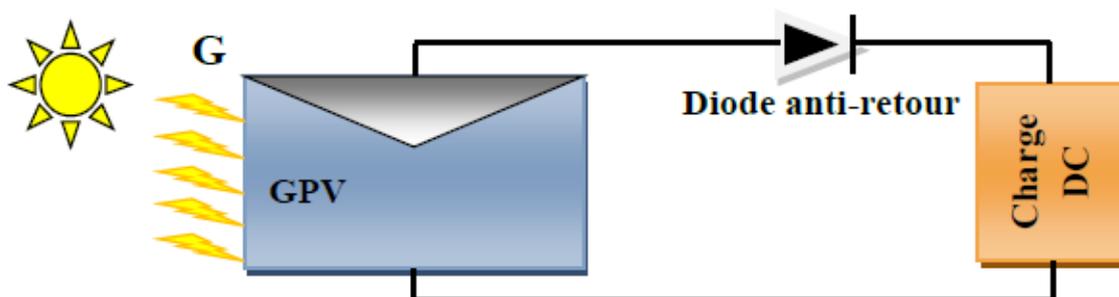


Figure IV.1: Connexion directe entre un GPV et une charge

L'inconvénient pour ce type d'utilisation, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV.

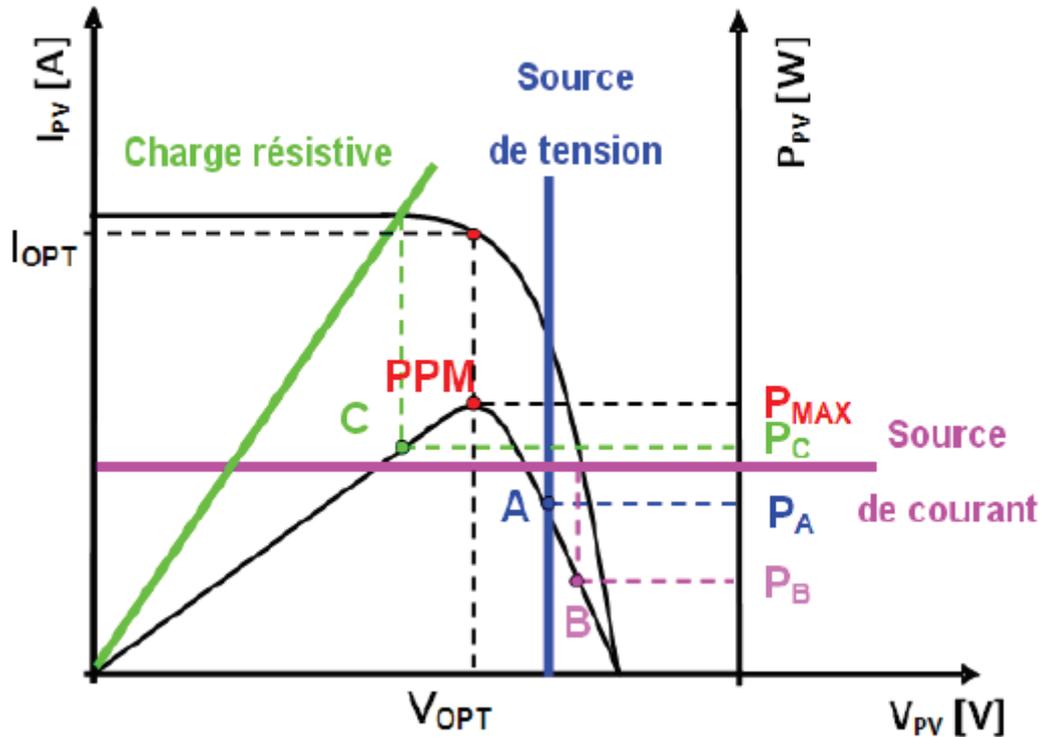


Figure IV.2: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge

Comme il est montré dans la figure IV.2, un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- Une charge de type source de tension continue,
- Une charge de type source de courant continu,
- Une charge purement résistive.

Il y a trois points de fonctionnement A, B, C respectifs qui peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale [14].

IV.3. Fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

La conception d'un système PV optimisé est par nature difficile. En effet, du côté source pour le générateur PV, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement de la température mais aussi du vieillissement global du système. Pour le côté charge, que ce soit de nature continue (DC) ou bien alternative (AC), comme pour le réseau électrique, chacun a son comportement propre qui peut être aléatoire. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent

possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source – charge [14].

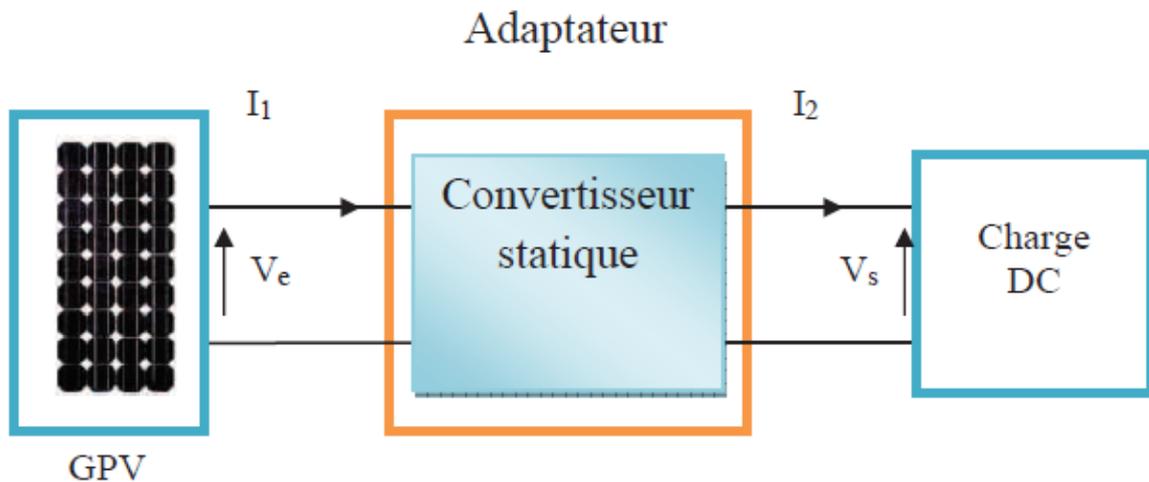


Figure IV.3: Etage d'adaptation d'un GPV-charge

IV.4. Définition et principe de la recherche

Pour que le système PV fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure IV.4 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Cette dernière est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

La figure IV.5 représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

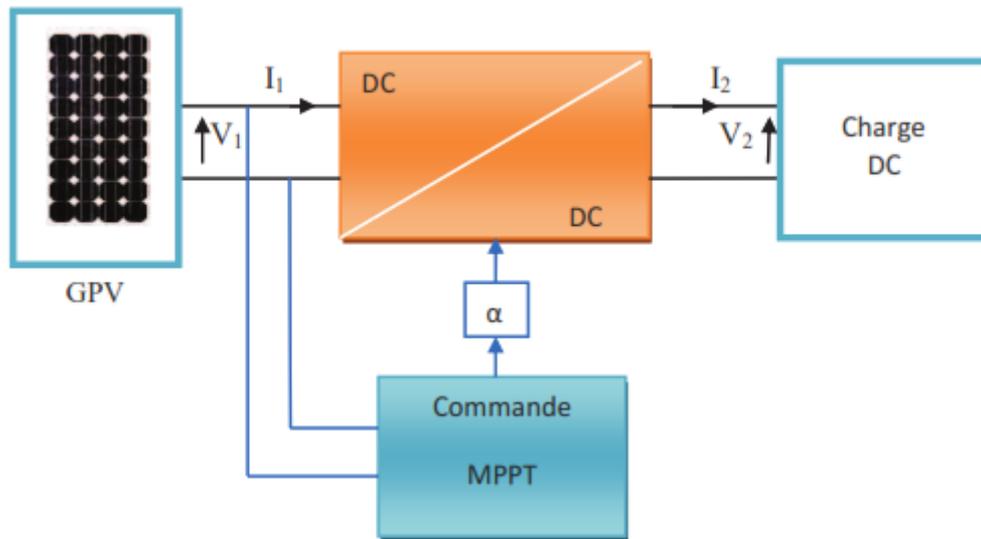


Figure IV.4: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

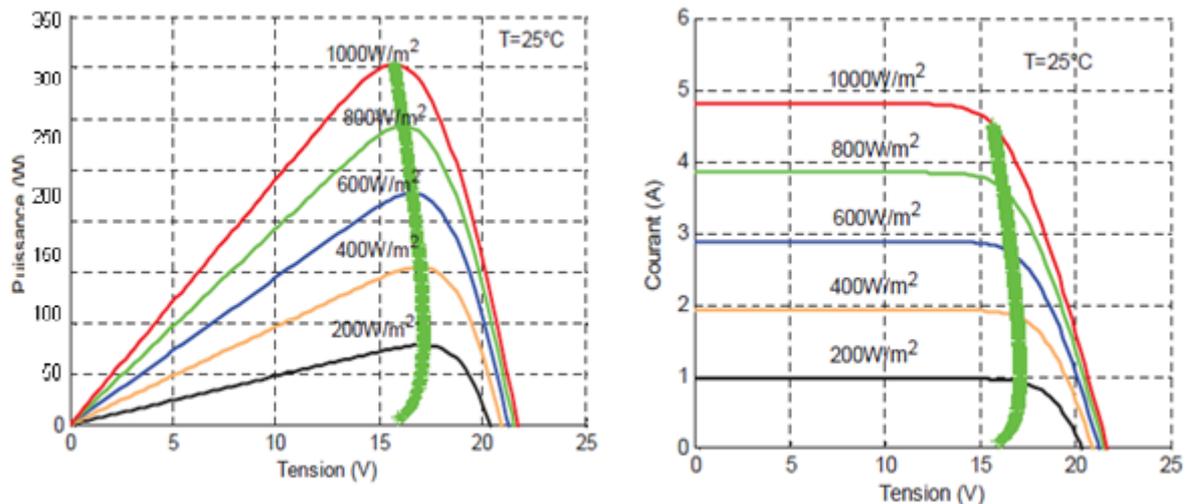


Figure IV.5: La caractéristique P-V, I-V et la trajectoire de PPM

IV.4.1. Gestion de la MPPT

La figure IV.6 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

Dans le second cas, pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

CHAPITRE IV : La commande MPPT

Enfin dans le dernier cas, une variation du point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [14].

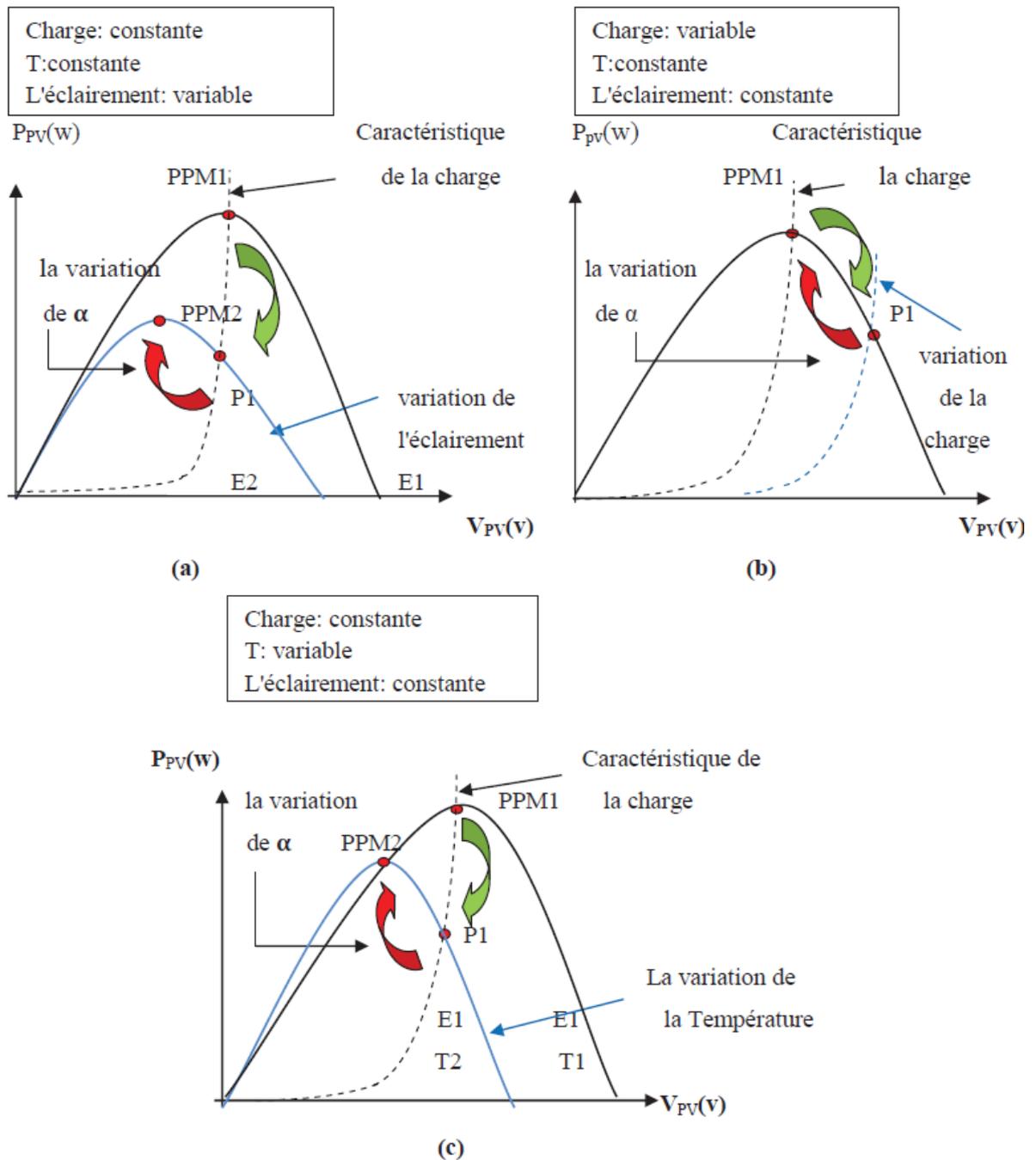


Figure IV.6: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

IV.5. Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

IV.5.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

IV.5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien les commandes qui sont basés sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{cc}) [35].

IV.5.1.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques. Par exemple les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [18], [35].

IV.5.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherches

IV.5.2.1. MPPT indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du PPM. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui

CHAPITRE IV : La commande MPPT

établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [18].

IV.5.2.1. MPPT direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (PPM) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du PPM. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du PPM, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [18].

IV.6. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$).

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance.

CHAPITRE IV : La commande MPPT

La figure IV.7 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, 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.

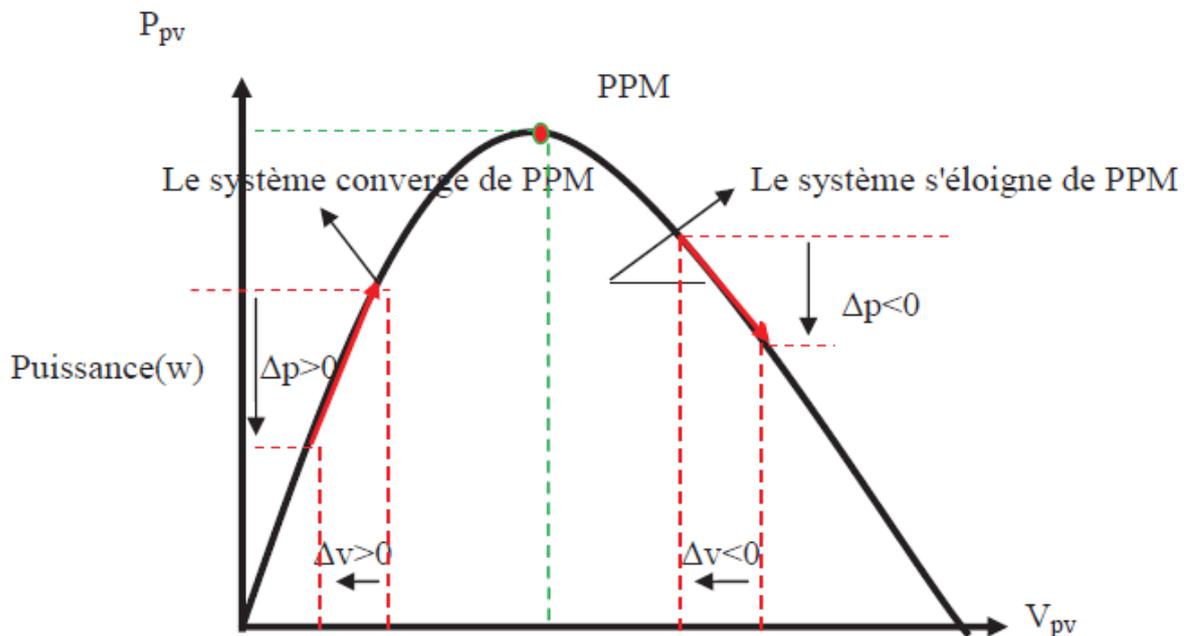


Figure IV.7: Evaluation de la puissance en fonction de la tension pour la commande P&O

La figure IV.8 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

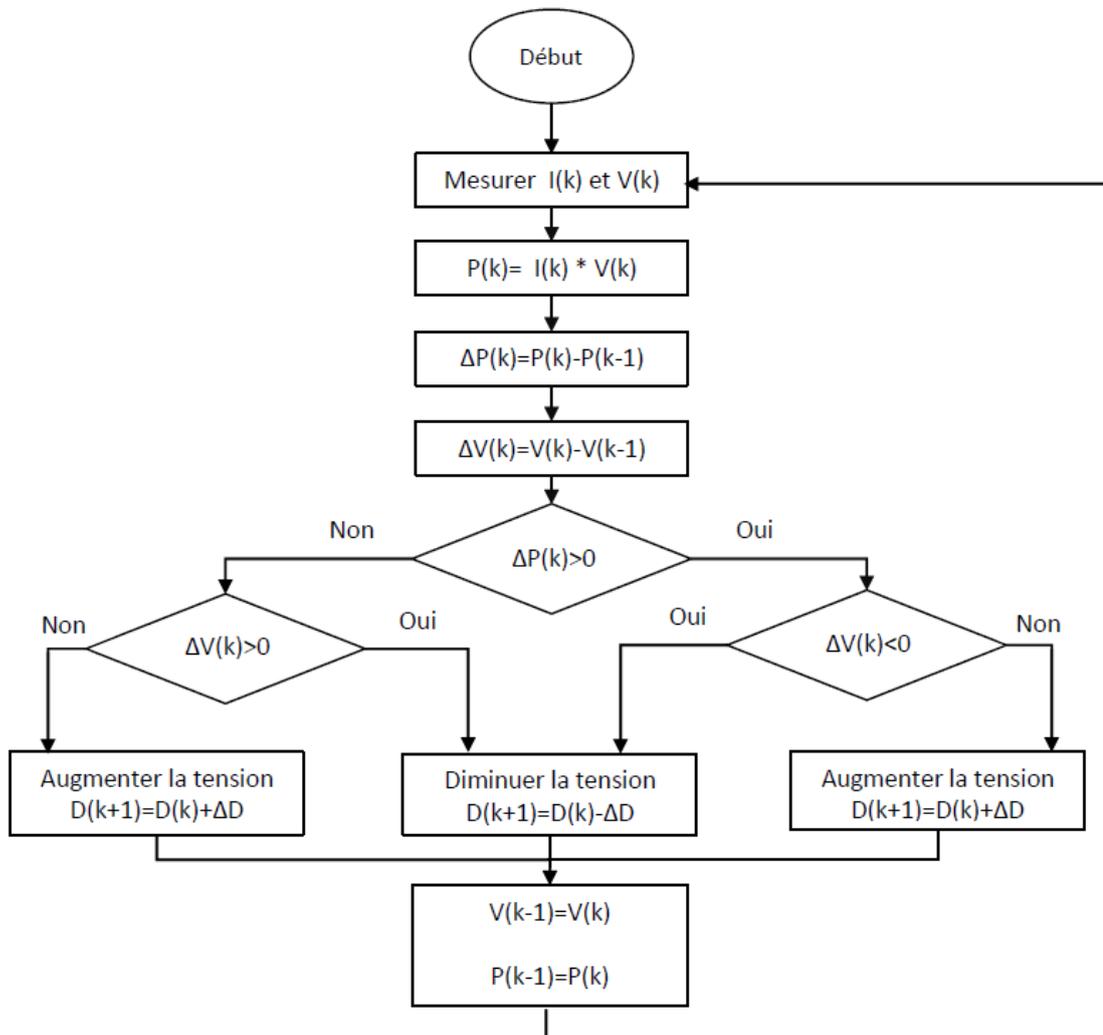


Figure IV.8: Algorithme de la méthode P&O

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de par sa facilité d’implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d’incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [19].

Conclusion

La connexion directe entre le GPV et la charge donnait une puissance souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV. De ce fait, pour que le générateur fonctionne dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur entre le GPV et la charge.

La ‘ ‘ Recherche du Point de Puissance Maximum ‘ ‘ est bénéfique et presque indispensable au bon fonctionnement du GPV. Elle est facilitée par la méthode Perturbation Et Observation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la production d'énergie électrique dans un système photovoltaïque.

Cette étude a touché les paramètres essentiels composant le système photovoltaïque, allant de l'optimisation de ce dernier. Elle se résume par ses différents points:

- L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau.
- La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV nécessite une étude bien approfondie pour analyser le fonctionnement de système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température. C'est dans ce cadre qu'a été effectuée une étude : de modélisation du panneau solaire, de modélisation du convertisseur DC-DC et des méthodes MPPT avec le Perturbe and Observe.

Après quoi on peut remarquer que :

Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge.

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Tout ceci montre que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT permettent d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Toute cette étude théorique devrait être mise à la pratique, mais pour des contraintes de matériels et de temps, et indépendamment de notre volonté bien sûr, nous n'avons pas pu corroborer tout ça avec la pratique.

Bibliographie

- [1] Traoré M. “ Gestion du système photovoltaïque d’une alimentation privée connecté au réseau ‘’, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2017.
- [2] Kawther A., “ Production d’énergie électrique à partir de l’énergie photovoltaïque‘’, Mémoire de License, Université de Guelma, 2017.
- [3] “énergies fossiles”, <http://samuel.benoit.online.fr/sources-energie-fossiles-petrole-gaz-naturel-charbon-introduction>
- [4] Alayat M., Boucetta I., “ Maximisation de la production d’un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents ‘’, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2017.
- [5] Soltane B., ‘’ Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ‘’, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [6] ‘’ biomasse’’, http://www.voltalia.com/fr/biomasse/presentation_88.html
- [7] Tetsuya T., Susumu T., Kohjiro H., Kiyoshi Y. « Control of measurment environment for high-efficiency organic photovoltaic cells » Japanese Journal of applied physics vol. 45 n° 8-2006.
- [8] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria, ‘’ Modélisation et Contrôle d’un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau ‘’, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [9] SALAMA F., ‘’ Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ‘’, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [10] LAHOUEL Asma, ‘’ Influence de la température sur les caractéristiques d’une cellule solaire à base d’InGaN ‘’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2016.
- [11] BENSALÉM S., ‘’ Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ‘’, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2009.
- [12] A. Labouret, M. Viloz, ‘’ Energie solaire photovoltaïque ‘’, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [13] B. Equer, ‘’ Energie solaire photovoltaïque (volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque) ‘’, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [14] BENSEDDIK O., DJALOUF F., ‘’ Etude et optimisation d’un système photovoltaïque ‘’, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

Bibliographie

- [15] BELGHITRI H., ‘‘ Modélisation, simulation et optimisation d’un système hybride éolien-photovoltaïque’’, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
- [16] GUEDAOURIA H., ‘‘ Dimensionnement d’un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l’université de Béchar ‘’, Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [17] Ricaud A., ‘‘ Systèmes photovoltaïques ’’, Mémoire de Master, Ecole d’ingénieurs ‘Polytech’ Savoie’, octobre 2011.
- [18] BENADEL Faiza, ‘‘ Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV ‘’, Université Mohamed Boudiaf M’sila, 2016.
- [19] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, ‘‘Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques’’, université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [20] <http://wzeu.ask.com/r?t=p&d=eu&s=uk&c=a&app=a16&dqi=&askid=&l=dis&o=38302770&oo=38302770&sv=0a65290d&ip=29621b59&id=B4011E3025F896AF23B4A41C3E046CB0&q=Une+cellule+photovolta%C3%AFque+%28ou+photo+pile%29+est+un+dispositif+qui+transforme+l%27%C3%A9nergie+lum.>
- [21] Cours des semi-conducteurs ; le semi-conducteur ; chapitre 1 : les semi-conducteurs, technique de l’ingénieur.
- [22] « Production d’énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ». B. Flèche - D. Delagnes / juin 07 Approche générale.
- [23] Mehdi M., ‘‘ Injection de l’électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique ‘’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2010.
- [24] LOUZAZNA Brahim, MADI Salim, ‘‘ Etude et caractérisation d’un panneau photovoltaïque type Condor ‘’, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [25] BENHADDOUCHE F., ‘‘ La commande d’un système photovoltaïque d’un satellite ‘’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2013.
- [26] ABID Ayyoub, BECHLAGHEM Yassine, ‘‘ Etude et dimensionnement d’un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque ‘’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017.
- [27] 27 Nettare Y., ‘‘ Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC ‘’, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [28] Meddah M., Bourahla M., Bouchetata N., ‘‘ Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. Revue des Energies Renouvelables, 2011.
- [29] Abada S., ‘‘ Etude et optimisation d’un générateur photovoltaïque pour la recharge d’une batterie avec un convertisseur Sepic ‘’. Mémoire de grade de Maître des Sciences (M. Se.), Université Laval Québec, 2011.

Bibliographie

- [30] Djeriou S., ‘‘ Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone ’’, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [31] Touaref M., ‘‘ Etude et simulation d'un convertisseur AC/DC type BUCK (Abaisseur de tension) ’’, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [32] Belkacem M., ‘‘ Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) ’’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [33] Zerguine B., ‘‘ MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ’’, Mémoire de Master, Université BADJI MOKHTAR Annaba, 2010.
- [34] MADANI Maroua, ‘‘ Implémentation d'un algorithme MPPT dans une
- [35] FPGA en utilisant la carte ML605 ’’, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018.
- [36] BOUCHAKER Amir Abderaouf, BENBRINIS Mouad, ‘‘ Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé ’’, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2018.
- [37] Naïm C., ‘‘ Conversion d'Energie Produite par des Générateurs Eoliens ’’, Mémoire de Master, Université de Constantine, 2010.
- [38] ZERDOUDI A., CHENNI R., ‘‘ ETUDE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE ’’, Sciences & Technologie A – N°41, Juin 2015, 49-54.
- [39] GOAR Noureddine, MAHMOUDI Abdelkader, ‘‘ Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ’’, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017.
- [40] Bilal T., ‘‘ Etude des systèmes photovoltaïques à double et triple jonction ’’, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.