

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي-تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En: Electronique

Spécialité: Instrumentation

Par : -Touahria Dounia

-Khemici Abdelouaheb

Sujet

Modélisation et commande d'une batterie destinée au stockage d'énergie électrique dans un système PV

Présenté et soutenu publiquement, le: 12 /06/ 2022, devant le jury composé de :

Mr. SAIGAA Mohammed

MAA

Président

Mr. GUIZA Dhaouadi

MCB

Rapporteur

Melle. GOUDER Soraya

MCB

Examineur

Promotion : 2021/2022

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.

Guixa Dhaouadi et Mr. Ayel Bahim vous nous avez bien guidés 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 qui ils nous ont prodigués et qui nous ont servi pour accomplir ce travail, nous vous remercions et vous témoignons nos sentiments les plus déferents.

Dédicaces

A Nos parents



A Nos frères et sœurs

A Nos Amis (E)

A Tout être cher à nos cœurs

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste d'abréviation

ملخص

Résumé

Abstract

Introduction générale1

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie photovoltaïque et le stockage d'énergie

1.1 Introduction	3
1.2 Energie photovoltaïque	3
1.3 Générateur photovoltaïque.....	4
1.3.1 Cellule photovoltaïque.....	4
1.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	6
1.3.3 Modèle équivalent d'une cellule PV.....	7
1.3.4 Caractéristique statique d'un générateur	8
1.3.5 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du GPV	10
1.3.6 Influence de la température sur les caractéristiques du GPV	11
1.3.7 Autre paramètres qui influe sur les caractéristiques du GPV	12
1.3.7.1 Résistance série	12
1.3.7.2 Résistance shunt	12
1.3.7.3 Facteur de qualité	12
1.3.7.4 Facteur de forme.....	12
1.4 Association des modules PV.....	13
1.4.1 Association en série	13
1.4.2 Association des cellules en parallèle.....	14
1.4.3 Association mixte.....	15
1.5 Constitution d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	15
1.5.1 Panneau PV.....	16
1.5.2 Accumulateur d'énergie.....	16
1.5.3 Régulateur de charge	17
1.5.4 Convertisseurs DC-DC	17
1.5.5 Onduleur DC-AC.....	17
1.5.6 La charge	17
1.6 Conclusion.....	18

Chapitre 2 : Systèmes de stockage de l'énergie

2.1 : Introduction.....	19
2.2 Stockage de l'énergie	19
2.3 Systèmes de stockage	19
2.3.1 Techniques de stockage à court terme.....	20
2.3.1.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs.....	20
2.3.1.2 Stockage par condensateurs à double couche (super condensateurs).....	20
2.3.1.3 Stockages sous forme d'énergie cinétique.....	21
2.3.2 Techniques de stockage à long terme	21
2.3.2.1 Stockage sous forme gravitaire	21
2.3.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression).....	22
2.3.2.3 Stockage sous forme thermique.....	23
2.3.3. Stockage sous forme chimique.....	24
2.3.3.1 Les Batteries.....	24
2.3.3.1 Les piles à combustibles	24
2.4 Comparaison entre les modes de stockage présentés	25
2.5 Technologies et Types des batteries.....	26
2.5.1 Batteries au plomb	26
2.5.2 Batteries au Lithium.....	27
2.5.3 Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :.....	27
2.5.4 Batteries Nickel Hydrogène (Ni-H ₂) :.....	27
2.5.5 Batteries Nickel-Métal-Hybride (Ni-MH) :	27
2.5.6 Batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn).....	27
2.5.7 Batteries Zinc-halogènes	28
2.7 Description d'une Batterie	28
2.7 Caractéristique des batteries	29
2.7.1 Capacité de stockage	29
2.7.2 Rendement	29
a. Rendement faradique	29
b. Rendement énergétique	29
2.7.3 Tension à vide	29
2.7.4 Durée de vie	30
2.7.5 Etat de charge (SoC) et profondeur de décharge (DoD).....	30
2.7.6 Autodécharge des batteries	30

2.8 Modèles des batteries	31
2.8.1 Modèles électrochimiques	31
2.8.2 Modèles de type boîte noire	31
2.8.3 Modèles de type circuit électrique équivalent	32
2.8.3.1 Modèles à CPE	33
2.8.3.2 Modèles de Thévenin	35
2.8.4 Modèles CIEMAT	36
2.9 Conclusion	36
<u>Chapitre 3 : Systèmes de stockage de l'énergie</u>	
3.1 Introduction.....	37
3.2. Etage de stockage.....	37
3.2.1 Modèle CIEMAT.....	37
3.2.1.1 La capacité.....	38
3.2.1.2 L'état de charge	39
3.2.1.3 Tension de décharge	39
3.2.1.4 Tension de charge.....	39
3.2.1.5 Résistance de la batterie.....	39
3.2.1.6 Rendement de charge et de décharge.....	40
3.2.2 Résultats de simulation.....	40
3.2.2.1 Caractéristiques de la batterie.....	41
3.2.2.2 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques de la batterie	42
3.2.2.3 Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie.....	43
3.2.2.3 Influence de la résistance sur les caractéristiques de batterie.....	44
3.3 Convertisseur DC/DC.....	45
3.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck)	45
3.3.1.1 Modélisation du convertisseur buck.....	45
3.3.1.2 Résultat des simulations du convertisseur buck	46
3.3.2 Convertisseur élévateur (boost)	47
3.3.2.1 Modélisation du convertisseur buck.....	48
3.3.2.2 Résultat de simulation du convertisseur boost.....	48
3.4. Conclusion.....	50

Chapitre 04. Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage	
4.1. Introduction.....	51
4.2 Présentation du système étudié	51
4.3 Dimensionnement du système PV.....	52
4.4 La commande MPPT.....	53
4.5 Le module de supervision	54
4.6 Résultats de simulation.....	55
4.6.1 Simulation dans les conditions STC.....	56
4.6.2 Simulation dans les conditions aléatoires.....	60
4.7 Conclusion	62
Conclusion générale	63

Liste des figures

Liste des figures

Titre	Page
Figure 1.1: Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV	4
Figure 1.2: Cellule de silicium monocristallin	5
Figure 1.3: Cellule de silicium poly cristallin	5
Figure 1.4: Cellule de silicium amorphe	6
Figure 1.5: Structure d'une cellule solaire	7
Figure 1.6: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	7
Figure 1.7 : Modèle de simulation de module PV	9
Figure 1.8: Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$	10
Figure 1.9: Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$	10
Figure 1.10 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	11
Figure 1.11: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	11
Figure.1.12: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	12
Figure1.13: Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	12
Figure 1.14: Caractéristique $I_{pv} = f(V_{PV})$ des modules PV en série	14
Figure 1.15: Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV en série	14
Figure 1.16: Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV en parallèle	15
Figure 1.17: Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV en parallèle	15
Figure 1.18: Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV en mixte	16
Figure 1.19: caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ des modules PV en mixte	16
Figure 1.20 : Schéma synoptique du système de conversion d'énergie PV	17
Figure 2.1: Principe de stockage gravitaire hydraulique [22]	22
Figure 2.2 : Stockage à air comprimé en caverne [22]	22
Figure 2.3 : Système de stockage thermique [26]	23
Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [24]	25
Figure 2.5 : Différents types de batteries au plomb	27
Figure 2.6 : Description de l'intérieur d'une batterie	28
Figure 2.7: Modèle générique de circuit électrique équivalent simplifié d'une Cellule	32

Figure 2.8 : Structure de Foster (a) et de Cauer (b) pour approximer l'impédance de Warburg	34
Figure 2.9 : (a) Circuit simplifié pour représenter les effets de transfert de charges et double couche (b) Circuits R//C en série pour représenter l'effet de transfert de matière (c) Circuit de transmission pour représenter l'effet de transfert de matière	35
Figure 2.10: Modèle de Thévenin avec les circuits R//C connectés en série	35
Figure 2.11 : Modèle utilisé dans [24]	36
Figure 2.12 : Modèle utilisé dans [30] [31]	36
Figure 3.1 : Schéma équivalent de nb éléments en série	38
Figure 3.2 : Schéma bloc du modèle batterie avec GPV	40
Figure 3.3 : Tension de batterie dans les conditions standards	41
Figure 3.4 : Courant de batterie dans les conditions standard	41
Figure 3.5 : Etat de charge (EDC) de la batterie dans les conditions standard	41
Figure 3.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique des tensions de Batterie	42
Figure 3.7: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique de l'EDC de batterie	42
Figure 3.8. Influence de la température sur la caractéristique tension de batterie	43
Figure 3.9. Influence de la température sur la caractéristique de l'EDC de batterie	43
Figure 3.10. Influence de la résistance sur la caractéristique tension de batterie	44
Figure 3.11. Influence de la résistance sur la caractéristique l'EDC de batterie	44
Figure 3.12 : Schéma électrique d'un convertisseur buck	45
Figure 3.13 : Modèle Simulink du convertisseur buck commandé par PID	46
Figure 3.14 : caractéristique de sortie Vs et Vd en fonction de temps	47
Figure 3.15 : caractéristique de sortie buck Vs et Vd en fonction de temps	47
Figure 3.16 : Schéma électrique d'un convertisseur boost	48
Figure 3.17 : Modèle Simulink du convertisseur boost	49
Figure 3.18 : caractéristique de sortie boost Vs et Vd en fonction de temps	49

Figure 3.19 : caractéristique de sortie boost V_s et V_d en fonction de temps	50
Figure 4.1 : Schéma synoptique du système étudié	51
Figure 4.2 : caractéristique de l'organigramme de la méthode P&O	53
Figure 4.3: Organigramme de la méthode P&O	54
Figure 4.4: Principe de gestion de l'énergie par le module de supervision	55
Figure 4.5 : Modèle Simulink du système PV	56
Figure 4.6 : Caractéristique courant –tension du générateur PV	57
Figure 4.7 : Caractéristique puissance –tension du générateur PV	57
Figure 4.8 : Puissances du GPV et puissance de sortie	58
Figure 4.9 : Tension du GPV et tension de sortie	58
Figure 4.10 : Puissances du GPV et puissance de sortie	58
Figure 4.11 : Tension de la batterie et tension de référence	59
Figure 4.12 : Etat de charge de la batterie	59
Figure 4.13 : Courant de la batterie	59
Figure 4.14 : Profil d'ensoleillement solaire	60
Figure 4.15 : Puissances du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement	60
Figure 4.16 : Tensions du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement	61
Figure 4.17: Courants du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement	61
Figure 4.1:Etat de charge de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement	62
Figure 4.19 : Courant de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement	62

Liste d'abréviation

Liste d'abréviation

PV : photovoltaïques.

V_{mpp} : Tension au point de Puissance maximale (V).

I_{mpp} : Courant au point de Puissance maximale (A).

P_{mpp} : puissance du point maximale (W).

V_{oc} : Tension de circuit ouvert (V).

I_{sc} : Courant de court-circuit (A).

F_F : facteur de forme.

STC : conditions du fonctionnement normal.

N_s : Nombre de module en série.

N_p : Nombre de module en parallèle.

η_f : rendement faradique de la batterie.

η_e : rendement énergétique de la batterie.

C_n : capacité nominale ou évaluée de la batterie.

I_{bat} : courant de la batterie (A).

EDC : état de charge de la batterie.

EDD : Etat de décharge.

V_{co} : tension en circuit ouvert de la batterie (V).

U_{bat} : tension aux bornes de la batterie (V).

nb : nombre de cellule de la batterie.

E_b : La force électromotrice.

R_i : La résistance interne d'une cellule de la batterie.

C_{10} : c'est la capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

I_{10} : le courant de décharge en 10 heures.

ΔT : l'échauffement de la batterie.

I_{pv} : courant du module.

I_{ph} : photo courant.

I_D : courant de la diode.

I_{Rp} : courant de la résistance shunt.

ΔT_c : variation de la température.

ΔI : variation du courant par rapport à l'insolation et la température.

ΔV : variation de la tension par rapport à l'insolation et la température.

G : niveau d'insolation dans des conditions quelconques.

G_{stc} : niveau d'insolation dans les conditions *STC*.

T_{stc} : température dans les conditions *STC*.

V_{out} : Tension de sortie dans le convertisseur élévateur (*V*).

V_{in} : Tension d'entre dans le convertisseur élévateur (*V*).

α : rapport cyclique du hacheur.

MPPT: Recherche de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker).

P_{ch} : puissance de la charge (*W*).

V_{ch} : tension de la charge (*V*).

$P_{pv,tot}$: puissance totale des panneaux *PV* [*W*].

B_j : les besoins énergétiques journaliers [*Wh*].

E_s : rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : E_s [*kWh/m²/j*].

C_p : coefficient de perte.

N_{pv} : nombre de panneaux *PV*.

$P_{pv,uni}$: puissance d'un panneau *PV*.

C_{batt} : la capacité nominale des batteries [*Ah*].

العنوان: نمذجة والتحكم في بطارية مخصصة لتخزين الطاقة الكهربائية في نظام كهروضوئي.

إن إنتاج الطاقة بواسطة الأنظمة الكهروضوئية متغير للغاية ويعتمد بشكل كبير على الظروف الجوية. هذا هو السبب في حتمية التفكير في تخزين هذه الطاقة لاستعادتها أثناء الليل والأيام "بدون شمس" ولتعديل النظام الكهروضوئي بشكل أفضل عن طريق تثبيت جهد النظام في هذه الرسالة ، سيتم تقديم دراسة نظرية حول الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، وكذلك نظام التخزين الكهروكيميائي باستخدام بطارية CIEMAT.

بالإضافة الى تقديم دراسة نظرية مختصرة حول محولات طاقة بنوعيهما مخفض ومصعد جهد مع نمذجة ومحاكاة خصائصهما.

الجزء الثاني هو نمذجة العناصر المختلفة التي يتكون منها النظام. تم تكييف استراتيجيات تحكم متقدمة للتحكم في نظام . المقترح. من خلال استعمال برمجة تحكم MATLAB SUMULINK.

كلمات مفتاحية:

- ❖ طاقة شمسية
- ❖ تخزين الطاقة
- ❖ محول
- ❖ البطارية

Titre : Modélisation et commande d'une batterie destiné au stockage d'énergie électrique dans un système PV

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours « sans soleil » et pour mieux adapter le système PV en fixant la tension de système. Dans ce mémoire, une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage électrochimique à l'aide de batterie CIEMAT sera présenté, et une partie on aborde les convertisseurs DC-DC (buck et boost). La deuxième partie est une modélisation des différents éléments qui constituent le système. Une stratégie de commande avancée est adaptée pour contrôler le système. Une simulation sous environnement du Logiciel MATLAB de la structure proposée.

Mots clés :

- ❖ Energie photovoltaïque.
 - ❖ Stockage de l'énergie.
 - ❖ Convertisseur DC/DC.
 - ❖ Batterie.
-

Title: Modeling and control of a battery intended for the storage of electrical energy in a PV system.

The production of energy by photovoltaic systems is very fluctuating and depends greatly on weather conditions. This is why it is necessary to think of storing this energy to restore it during the night and the days "without sun" and to better adapt the PV system by fixing the voltage of the system. In this dissertation, a theoretical study on photovoltaic solar energy, as well as the electrochemical storage system using CIEMAT batteries will be presented, and a part we discuss the DC-DC converter.

The second part is a modeling of the different elements that make up the system. An advanced control strategy is adapted to control the system. A simulation under MATLAB software environment of the proposed structure.

Keywords:

- ❖ Solar energy.
 - ❖ Energy storage.
 - ❖ DC/DC converter.
 - ❖ Battery.
-

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production [1], [2].

Les générateurs photovoltaïques, sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue. Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût sont les raisons principales de l'utilisation de ces batteries [1].

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus rapidement que cette capacité installée est faible. Afin de protéger les batteries contre une recharge excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser La totalité de la ressource renouvelable. Finalement, le dimensionnement du champ photovoltaïque est surestimé par rapport aux besoins réels de l'utilisateur final.

Le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

A cet effet nous intéressons sur les modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur [3].

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 PV 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 [4].

Pour cela nous intéressons, dans le cadre de ce travail, à l'étude d'un système photovoltaïque avec des batteries de stockage et des convertisseurs buck et boost.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Dans premier chapitre on présente la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Enfin, on présente l'association des générateurs PV (en série, en parallèle et en mixte).

Dans le deuxième chapitre on décrit les différents systèmes de stockage d'énergie. Ensuite, on aborde les technologies et les types de batteries ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, on présente les différents modèles de la batterie.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties : on présente dans la première partie le modèle mathématique de la batterie CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas). Par la suite, dans la deuxième partie on aborde les convertisseurs DC-DC (buck et boost).

Dans le quatrième chapitre, on représente le système de stockage PV considéré ensuite on étudie le dimensionnement de différents composants pour alimenter une charge résistive, assurer le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries qui maintiennent la continuité du transfert d'énergie à la charge surtout lorsque conditions environnementale varient. Enfin on présente résultats obtenus dans les conditions standards et aléatoires.

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

Chapitre 01 :
Généralités sur l'énergie
photovoltaïque et le stockage d'énergie

1.1 Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre, 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. La lumière du soleil peut directement être transformée en électricité par des panneaux photovoltaïques, sans pièces tournantes et sans bruit. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries, soit convertie par un onduleur pour être distribué aux normes sur le réseau.

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie photovoltaïque est incontestablement une solution technique et économique adaptée pour les sites isolés. Elle représente aussi un enjeu sociologique et elle contribue à limiter aussi le phénomène d'exode rural [5].

Ces systèmes sont très bien adaptés aux «petits» besoins d'électricité lorsque le réseau public est inaccessible, les coûts de raccordements étant élevés. Ils couvrent en outre un large domaine d'applications : télécommunications, signalisation terrestre (routière), maritime (phares et balises) et aérienne, pompage, électrification rurale, et l'utilisation grand public (montres, calculatrices) [6].

Dans ce chapitre on présente la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Enfin, on présente l'association des générateurs PV (en série, en parallèle et en mixte).

1.2 Energie photovoltaïque

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 PV qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

1.3 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est l'assemblage des cellules PV, des connexions, des pièces de protection et des supports etc... Ainsi, n'importe quel dispositif PV (cellules solaires, modules, panneaux,...) peut être désigné par le terme " générateur PV ". Pratiquement, la cellule solaire PV ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.5 à 1.5 V selon les technologies utilisées [7].

Pour obtenir une puissance plus élevée, généralement, on assemble les cellules PV en série encapsulées sous verre pour former un module. Les modules sont connectés en série et/ou en parallèle pour former un panneau. Plusieurs panneaux regroupés sur un même site forment un champ PV (Figure 2.2).

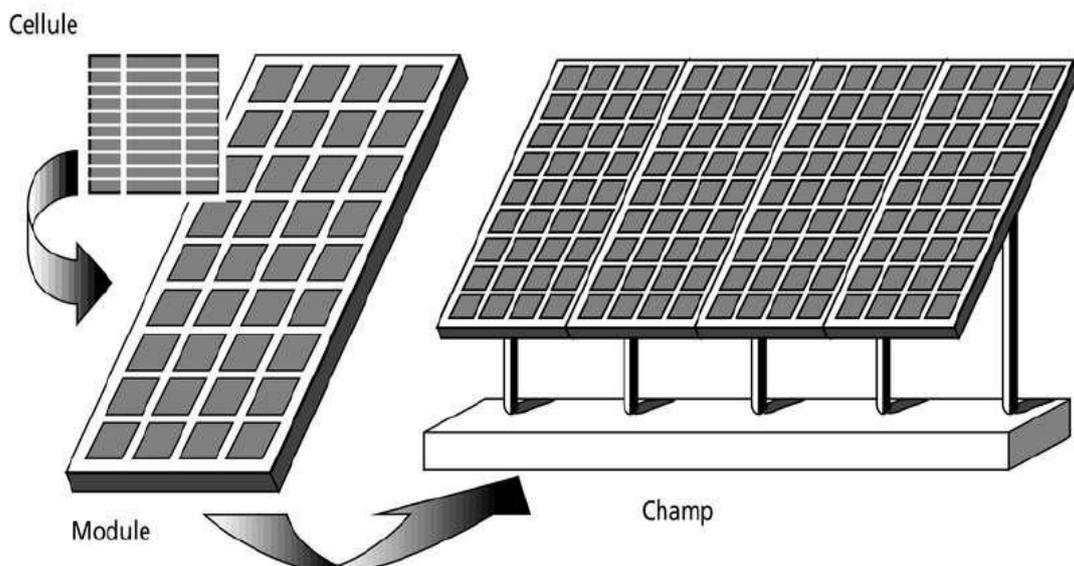


Figure 1.1: Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV

1.3.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque également est un composant électronique qui est, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre un courant continu [8].

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïque. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant quel que soit

le type, le rendement reste assez faible entre : 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Les cellules les plus utilisées sont

a. Silicium monocristallin : Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie.

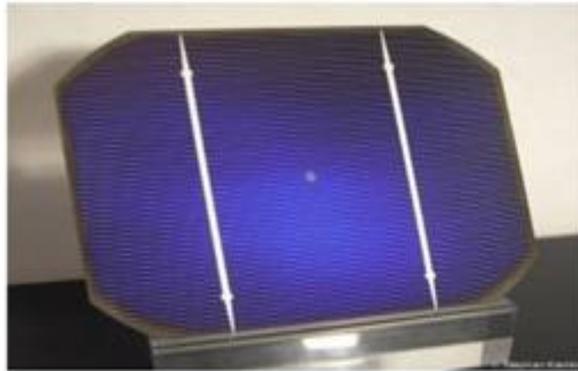


Figure 1.2: Cellule de silicium monocristallin

b. silicium poly cristallin : Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.

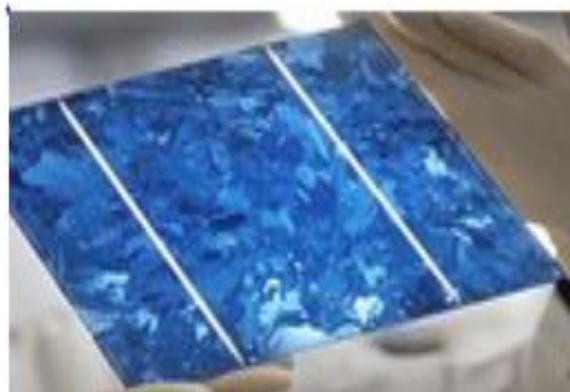


Figure 1.3: Cellule de silicium poly cristallin

c. Silicium amorphe : Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclaircissement faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous

éclairage artificiel de 2 à 3000 lux) [9].



Figure 1.4: Cellule de silicium amorphe

1.3.2 Principe de fonctionnement d'une 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 se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) [10].

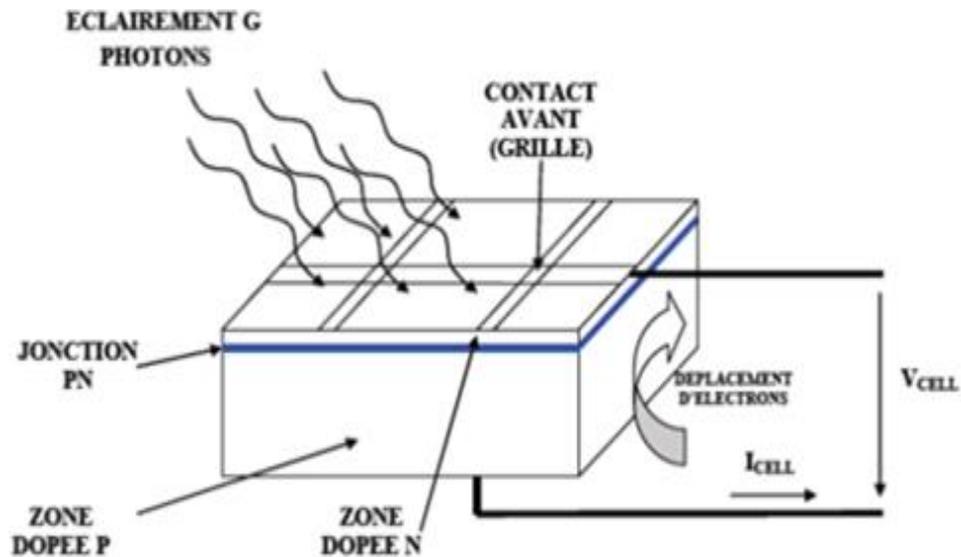


Figure 1.5: Structure d'une cellule solaire

1.3.3 Modèle 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.

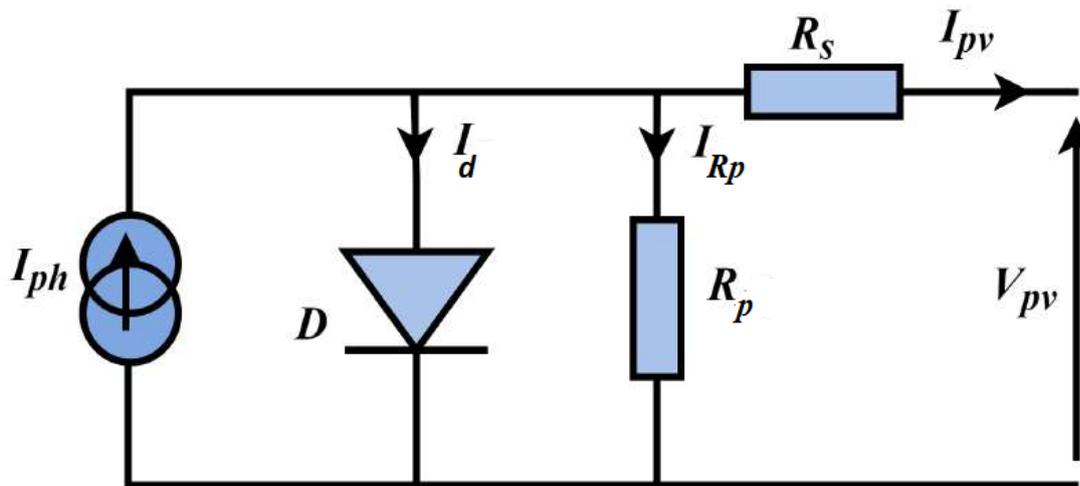


Figure 1.6: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

En appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d - I_{Rp} \quad (1.1)$$

- Le générateur du courant (I_{Ph}): délivre un 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 $P-N$. 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 [11].

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 .

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (1.2)$$

V_{th} : Potentiel thermique en Volt (V)

K : Constante de Boltzmann ($K=1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

T : Température absolue en Kelvin (K)

q : Charge absolue d'un électron en coulomb ($q=1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$)

Sous éclaircissement, 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 sont tenus en compte. L'équation de la caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(V + \frac{IR_s}{nV_{th}} - 1 \right) - V + \frac{IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.3)$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ($h = \frac{1}{R_{sh}}$) pour écrire l'équation (1.4) sous la forme :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{ph} - I_s \cdot N_p \left[\exp \left[\frac{V_{pv} + \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s \cdot I_{ph}}{nV_{th}} \right] - 1 \right] - \left[\frac{V_{th} + \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s \cdot I_{ph}}{\left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s} \right] \quad (1.4)$$

I_s : Courant de saturation en Ampère (A)

n : Facteur de qualité de la diode ; sans dimension

V_{th} : Potentiel thermique en Volt (V)

I_{ph} : Photo-courant généré (proportionnel au rayonnement incident) [7].

1.3.4 Caractéristique statique d'un générateur PV

Le bloc réalisé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink est représenté sur figure (1.7). Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été obtenues pour des conditions standards de fonctionnement (ensoleillement 1000 w/m^2 et température 25°C).

Les paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) sous les conditions standards de fonctionnement

($G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïque, et présente dans ce travail en utilisant le module photovoltaïque (back_cotact UNITECK) dont les caractéristiques sont représentées par tableau 1.1 suivant :

Puissance max	110 W	Coefficient de température (P_m)	-0.3% / °C
Tolérance	0 /+3%	Coefficient de température (V_{oc})	-0.28% / °C
Tension à puissance max (V_{mp})	18.6 V	Coefficient de température (I_{cc})	0.05% / °C
Intensité à puissance max (I_{mp})	5.91A	Dimensions cellule	125*125 mm
Tension à vide (V_{oc})	21.9V	Nombre de cellules	32
Intensité court_circuit (I_{sc})	6.39A	Dimensions	1050*550*35 mm
Rendement cellule	23.8%	Poids	7 KG
Rendement module	19.05%	Longueur des câbles	900 mm
NOTC/TUC	45+/-2°C		
Température de fonctionnement	-40 à +85°C		

Tableau 1.1. Caractéristiques du panneau utilisé back_cotact UNITECK 100W/12V

La figure (1.7) représente le modèle de simulation de GPV dans Matlab/Simulink

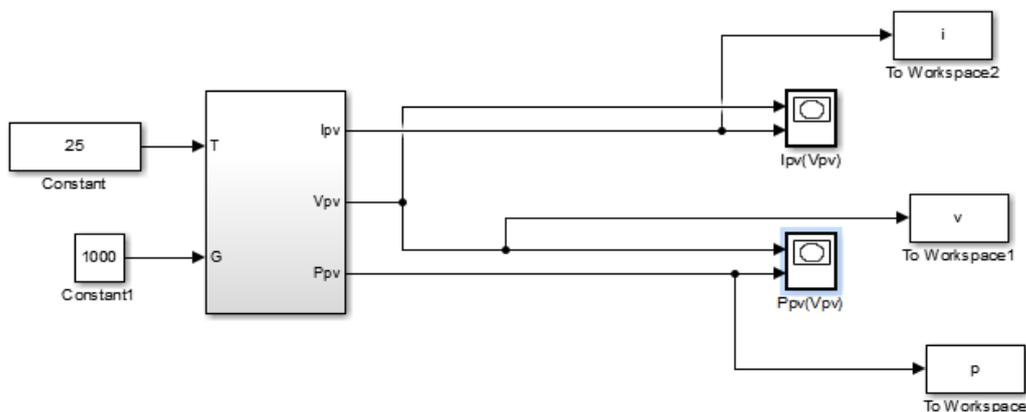


Figure 1.7 : Modèle de simulation de module PV.

Les figures (1.8) et (1.9) montrent les caractéristiques $I_{pv} - V_{pv}$ et $P_{pv} - V_{pv}$ du générateur PV considéré (back_cotact UNITECK 100W/12V) dans les conditions standards de température et d'ensoleillement ($T = 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$).

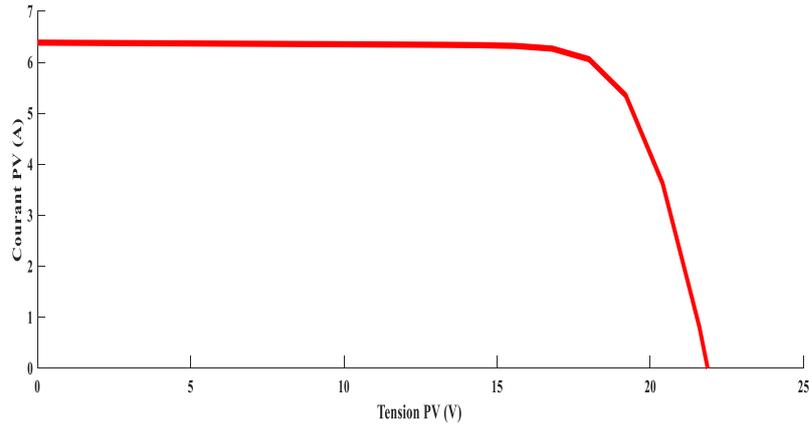


Figure 1.8: Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$.

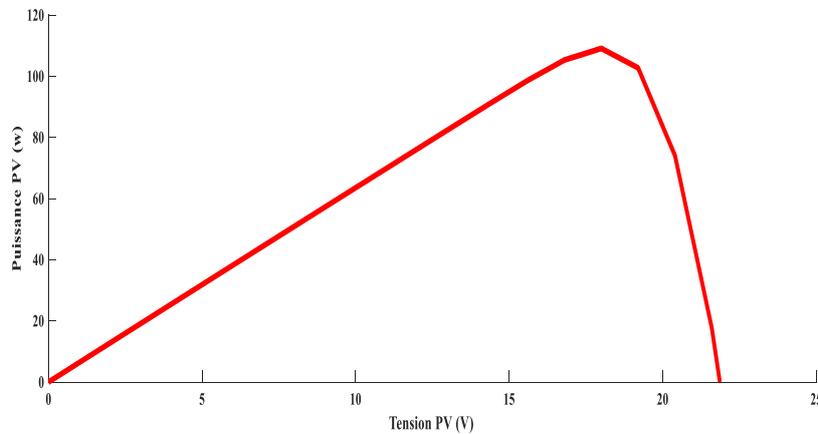


Figure 1.9: Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques puissance-tension et courant-tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Nous allons passer dans ce qui suit à l'étude de l'influence des paramètres d'entrées : Température et Ensoleillement.

1.3.5 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du GPV

Dans ce qui suit, les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ($G=300, 500, 700, 1000\text{w/m}^2$) en maintenant la température constante $T_a=25^\circ\text{C}$. Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension figure (1.10) ainsi que pour la caractéristique puissance/tension figure (1.11).

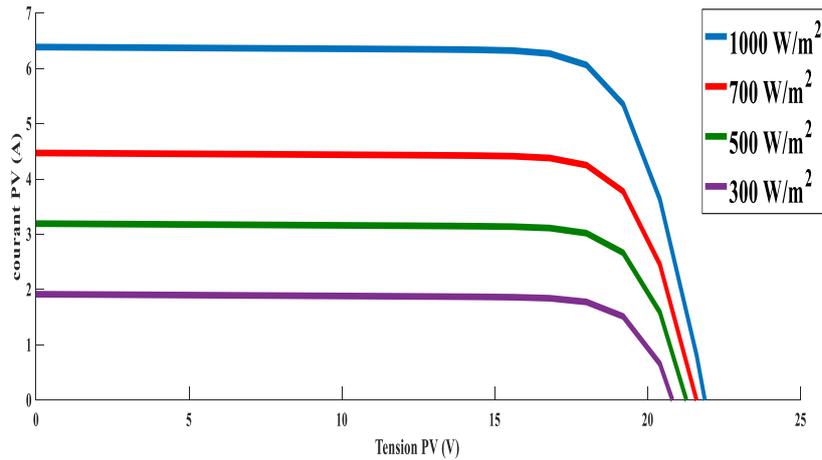


Figure 1.10 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

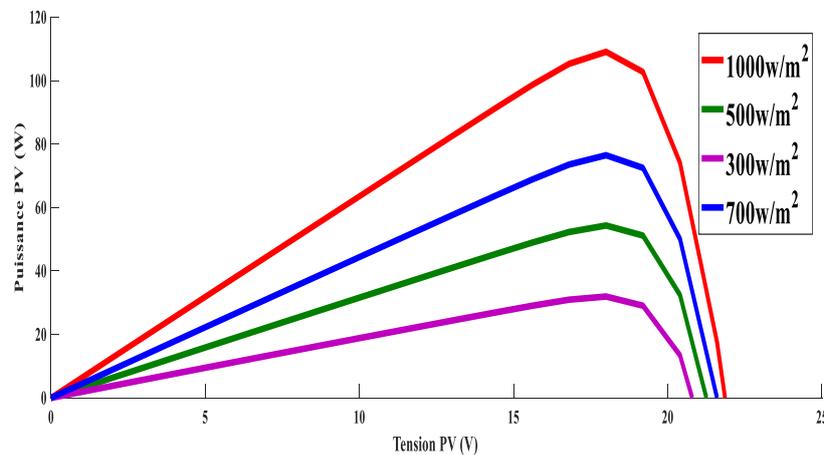


Figure 1.11: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier l'ensoleillement de 300W/m^2 à 1000W/m^2 , nous remarquons que le courant de court-circuit I_{pv} et la puissance P_{pv} est presque dépendant de l'ensoleillement.
- La tension de circuit ouvert V_{pv} augmente lorsque l'ensoleillement augmente.

1.3.6 Influence de la température sur les caractéristiques du GPV

Nous allons effectuer d'autres test, mais cette fois ci en faisant varier la valeur de la température ambiante ($T_a=25, 40, 55, 70$). Nous obtenons les courbes suivantes (1.12et 1.13)

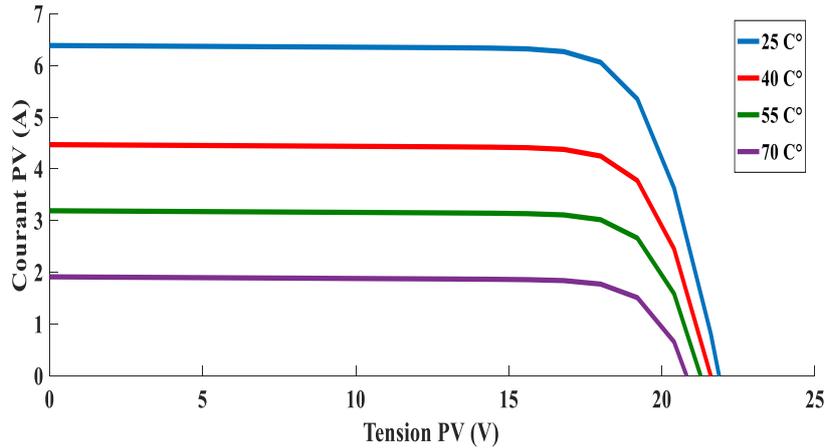


Figure.1.12 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

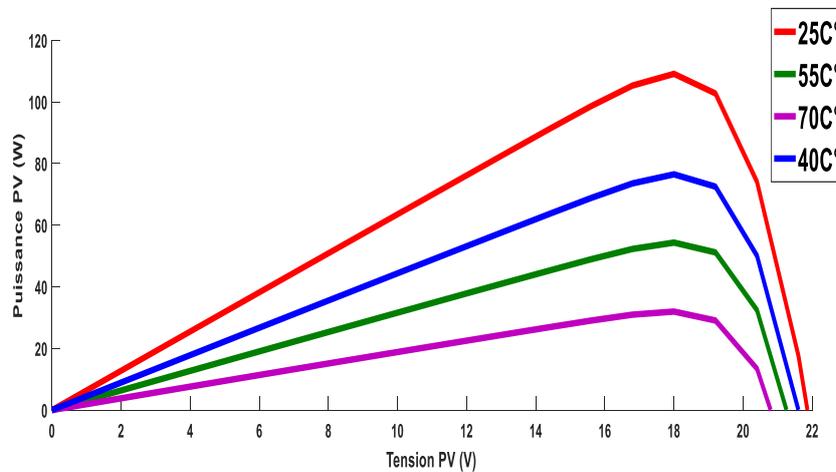


Figure1.13 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier la température de 25°C à 70°C , nous remarquons que le courant de court-circuit I_{pv} et la puissance P_{pv} est presque dépendant de la température.
- En revanche, la tension de circuit ouvert V_{pv} diminue lorsque la température augmente.

1.4.1 Autre paramètres qui influe sur les caractéristiques du GPV

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 $I(V)$ cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit [12].

1.3.7.1 Résistance série

La résistance série (R_s) caractérise les pertes à travers les grilles de collecte et les mauvais contacts ohmiques des cellules. R_s est une résistance série liée à la résistivité

volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série (I/R_s).

1.3.7.2 Résistance shunt

La résistance shunt (R_{sh}) est une résistance parallèle qui représente la résistance de fuite provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier, et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés. La pente de la courbe courant-tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt (I/R_{sh}).

1.3.7.3 Facteur de qualité

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. De nombreux auteurs discutent des méthodes d'estimation de la valeur correcte de cette constante.

Habituellement, ce paramètre varie entre $1 \leq A \leq 2$, mais le choix dépend d'autres paramètres du modèle *PV*. Certaines valeurs de A se trouvent dans [13] basées sur des analyses empiriques. Comme donné dans [14], il existe différentes opinions sur la meilleure méthode qui permet de déterminer la valeur de A qui exprime le degré d'idéalité de la jonction $P-N$. Une valeur initiale de A peut être choisie pour ajuster le modèle *PV*.

Cette valeur de A peut être modifiée par la suite afin d'améliorer le modèle, si nécessaire. Cette constante affecte la courbure de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et peut ramener une légère amélioration de la précision du modèle.

1.3.7.4 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 :

$$ff = \frac{P_m}{I_{cc}} * V_{co} = \frac{I_m * V_m}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.7)$$

1.4 Association des modules PV

Pour pouvoir augmenter la tension, le courant et la puissance d'un générateur PV, on peut associer plusieurs modules PV en série ou en parallèle ou encore en mixte (série/parallèle).

1.4.1 Association en série

L'association de N_s (nombre en série) des modules permet d'augmenter la tension du générateur PV. Cette association délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles des modules et un courant égal à celui d'un seul module.

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (1.9)$$

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (1.10)$$

V_{cos} : la tension du circuit ouvert de N_s module en série.

I_{ccs} : le courant de court-circuit de N_s module en série.

Les caractéristiques d'un groupement de N_s modules PV en série sont représentées par les figures suivantes :

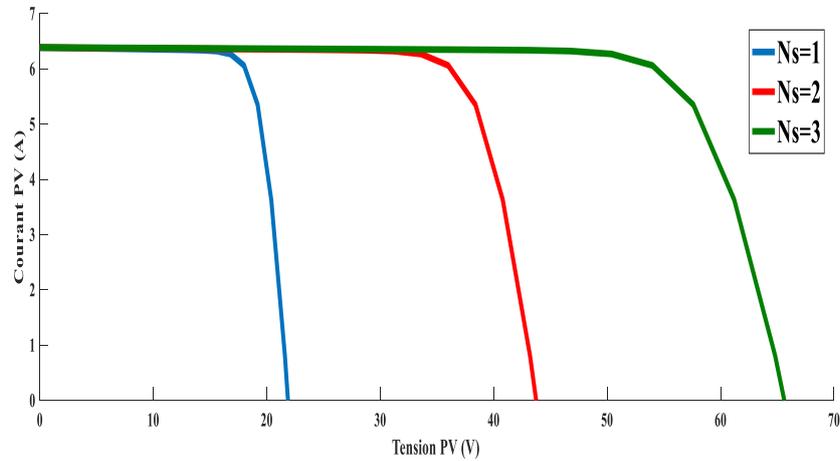


Figure 1.14 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en série.

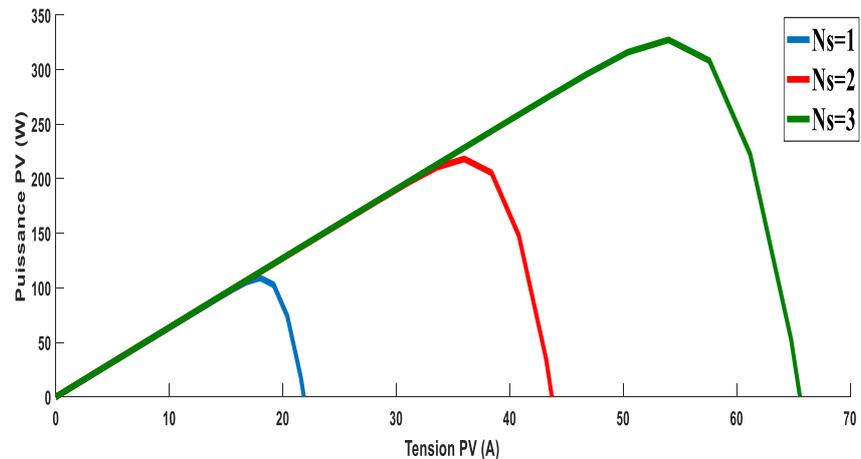


Figure 1.15 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en série.

- Nous remarquons associations des cellules en série augmenté la valeur de tension.

1.4.2 Association des cellules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) modules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de modules identiques connectés en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [15].

$$I_{ccp} = N_p \cdot I_{cc} \quad (1.11)$$

$$V_{cop} = n_s \cdot V_{co} \quad (1.12)$$

I_{ccpc} : le courant de court-circuit de N_p module en parallèle.

V_{cop} : la tension de circuit ouvert de N_p module en parallèle.

Les caractéristiques d'un groupement de N_s modules PV en série sont représentées par les figures suivantes :

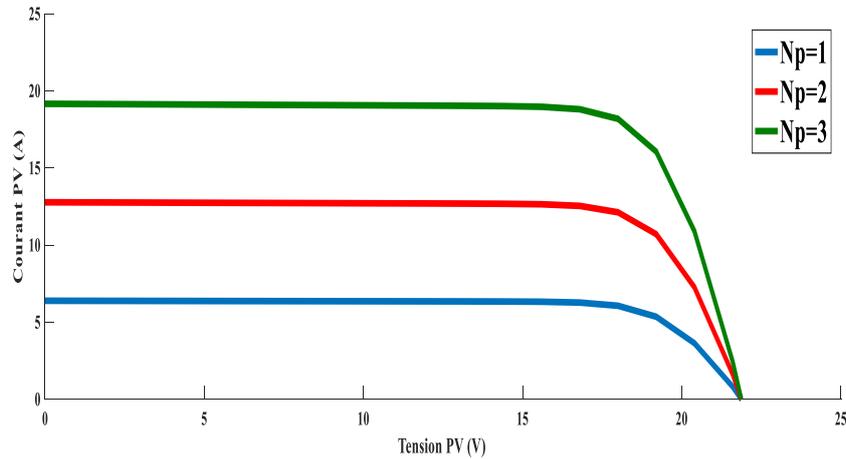


Figure 1.16: Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en parallèle.

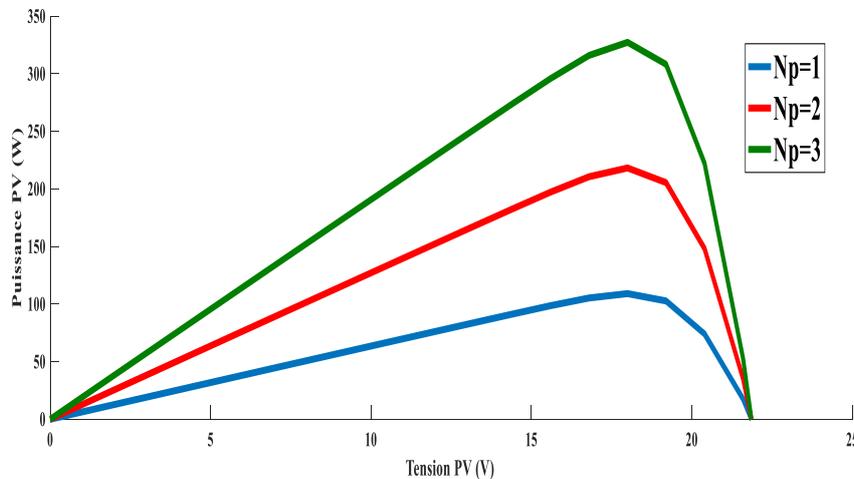


Figure 1.17: Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en parallèle.

- Nous remarquons associations des cellules en parallèle augmenté la valeur de courant PV.

1.4.3 Association mixte

Dans certains cas, la satisfaction des besoins en courant et en tension importants nécessite le recours à l'utilisation d'un groupement mixte (série/parallèle) de modules PV.

Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV sont illustrées par les figures

suivantes :

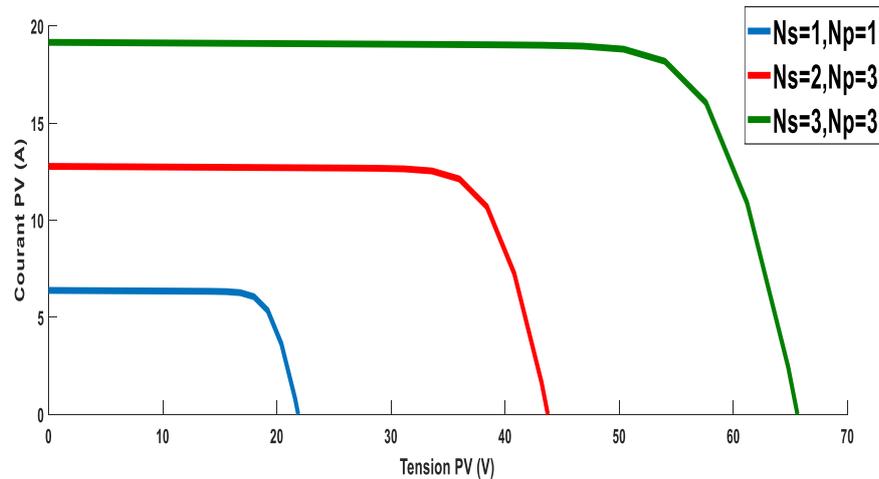


Figure 1.18: Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en mixte.

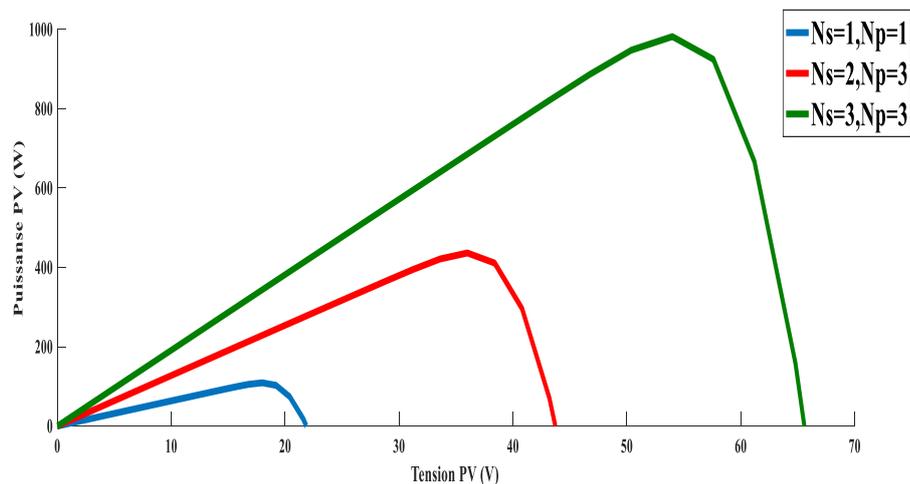


Figure 1.19: caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ des modules PV en mixte

- Nous remarquons associations des cellules en mixte augmenté les deux valeurs de tension et courant en même temps.

1.5 Constitution d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque

Un système photovoltaïque comporte un ensemble d'organes distincts ou de sous-systèmes en relation entre eux. L'élément de base est le sous-système de captation ainsi que l'ensemble de conditionnement de l'énergie électrique produite aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble regroupe tous les équipements entre le système de captation de l'énergie solaire (champ PV) et les récepteurs.

La figure 1.20 représente le schéma synoptique des éléments du système le plus général, mais dans la pratique les systèmes utilisent des éléments appropriés aux types de charges et

aux conditions locales.

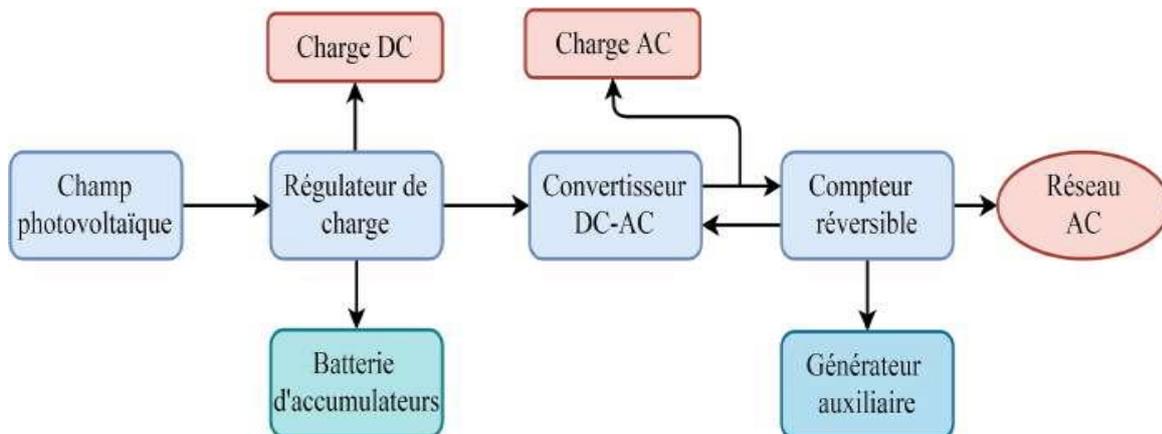


Figure 1.20 : Schéma synoptique du système de conversion d'énergie PV.

Un système de conversion d'énergie photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments principaux : le générateur photovoltaïque (GPV), le convertisseur (DC-DC), l'onduleur (DC-AC) et l'accumulateur d'énergie.

1.5.1 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.

Meilleure position pour installer les panneaux solaires :

- orientation : sud
- inclinaison : 30° du plan horizontal.

1.5.2 Accumulateur d'énergie

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*.

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.

1.5.3 Régulateur 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 [13].

1.5.4 Convertisseurs DC-DC

Généralement le convertisseur DC-DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, mais son rôle, dans le cadre de la chaîne PV, est de faire l'adaptation entre le générateur PV et la charge pour un transfert de puissance maximale. Ceci se fait en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du point de puissance maximale pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

1.5.5 Onduleur DC-AC

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique à tension continue. Il assure la fonction inverse d'un redresseur. Dans une installation photovoltaïque autonome, un onduleur réseau a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence équivalentes à celle du réseau [16].

1.5.6 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.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit et présenté la structure physique et le principe de

fonctionnement d'une cellule PV. Ensuite on a présenté les différents modèles mathématiques d'une cellule PV et retenu le modèle à simple diode avec cinq paramètres pour la modélisation du générateur PV considéré. Puis, ce dernier a été simulé pour déterminer les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ce qui nous a permis de présenter les influences des différents paramètres sur ces caractéristiques.

Le groupement série, parallèle ou mixte des modules PV pour l'augmentation de la tension et/ou le courant du module considéré a été abordé à la fin de ce chapitre.

Chapitre 02 :
Systemes de stockage de l'énergie

2.1 Introduction

Aujourd'hui, les applications des systèmes de stockages d'énergie sont nombreuses. Les batteries sont les plus célèbres. Ils sont utilisés dans plusieurs industries, telles que les véhicules électriques et hybrides, les systèmes à énergie renouvelable et les systèmes d'énergie marine. Les batteries servent de secours dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne ou photovoltaïque. Ils sont mis en œuvre pour stocker l'énergie excédentaire, ainsi que pour libérer l'énergie stockée pendant des périodes stationnaires ou pendant la nuit [17].

Dans le présent chapitre, on décrit les différents systèmes de stockage d'énergie. Ensuite, on aborde les technologies et les types de batteries ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, on présente les différents modèles de la batterie.

2.2 Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage [18].

2.3 Systèmes de stockage

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques [19].

Le stockage de l'énergie électrique passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, de compression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc.....) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de stockage à envisager :

- Stockage à court terme : (temps de stockage inférieur à 10 minutes).
- Stockage à long terme : (temps de stockage supérieur à 10 minutes).

Le choix du système de stockage se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont :

- La puissance massique (en W/kg).
- L'énergie massique (en Wh/kg).
- Le nombre de cycles de fonctionnement.
- Le coût.
- Le rendement énergétique.

2.3.1 Techniques de stockage à court terme

2.3.1.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, on l'introduit dans un cryostat rempli d'hélium liquide. Pour récupérer l'énergie il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur et l'énergie stockée est transférée en un temps très court. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de *SMES* en fonction. Même si les recherches envisagent des *SMES*s de l'ordre de $10 - 100 MW$, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et $10 MW$ [20].

2.3.1.2 Stockage par condensateurs à double couche (super condensateurs)

Le condensateur électrique à double couche est un condensateur à très forte capacité ; on le dénomme couramment "super condensateur". Les modèles actuels se caractérisent par leur densité de puissance très élevée (bien supérieure à $1000 W/kg$), leur longévité (plus de 100.000 cycles) et par un rendement relativement élevé (en général supérieur à 80%). De par ces caractéristiques, ils sont généralement bien adaptés à la fonction d'égalisation de charge pour une batterie ou une pile à combustible. En effet, ils présentent une densité d'énergie fort inférieure à celle des autres sources: seulement de 3 à $7 Wh/kg$. Compte tenu de poids et d'encombrement, on n'arrive ainsi qu'à une ou deux centaines de wattheures d'énergie [21].

2.3.1.3 Stockages sous forme d'énergie cinétique

Le système de volant d'inertie est composé d'une masse inertielle mouvante, circulaire ou non tournant à une vitesse de rotation Ω , construite en matériau composite ou en acier pour le stockage d'énergie et un moteur/générateur à haute vitesse de rotation pour le transfert de cette énergie.

Ce système, suspendu sur des paliers magnétiques ou à billes, opère dans une enceinte sous vide afin de limiter les pertes par ventilation et par frottement. L'enceinte externe doit être très résistante afin d'éviter une dispersion des débris en cas de rupture du disque d'inertie en cours de fonctionnement. L'énergie cinétique emmagasinée s'exprime par : $W=1/2 J \Omega^2$.

Le fonctionnement du système de stockage inertielle est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier temps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle. Le système d'entraînement désaccouplé, le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation. A la demande cette dernière sera transformée en énergie électrique par le générateur. Il est utilisé en application de véhicules électriques [22], [21].

2.3.2 Techniques de stockage à long terme

2.3.2.1 Stockage sous forme gravitaire

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique. Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ($w=mgh$), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

Cette technique de stockage nous fournis jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportables. En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75%. [22].

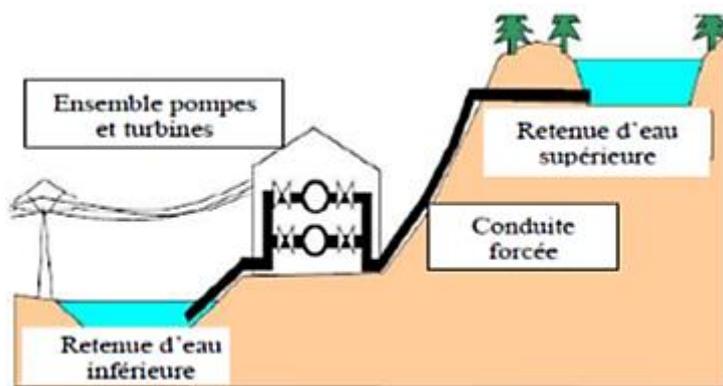


Figure 2.1: Principe de stockage gravitaire hydraulique [22].

2.3.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression)

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au-dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air.

Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel, puis détendu dans la turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée. Dans une installation moderne, pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser $0,75 \text{ kWh}$ d'électricité durant la phase de pompage et brûler $1,22 \text{ kWh}$ de gaz naturel durant le déstockage [20].

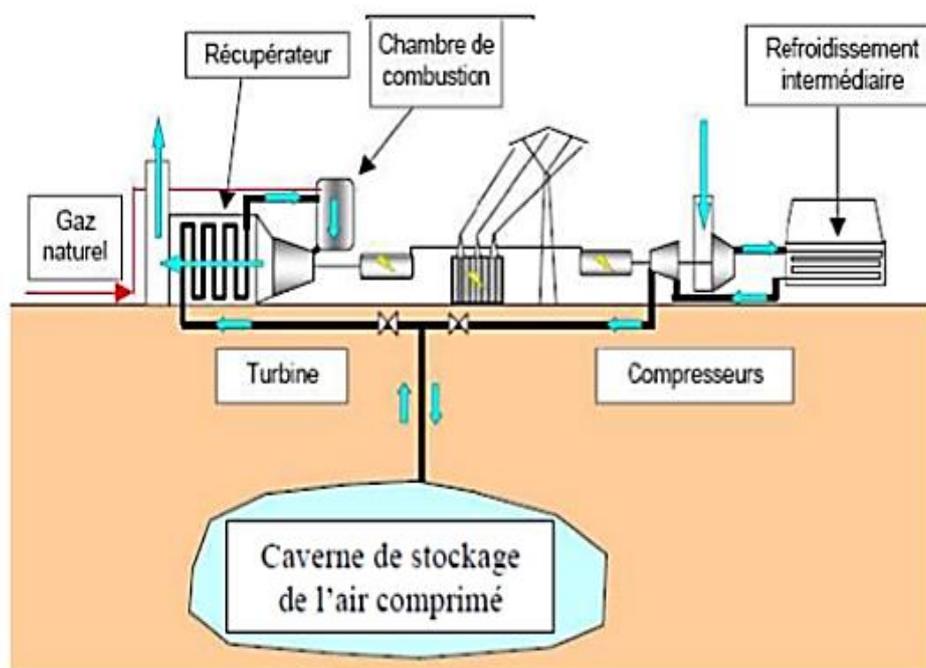


Figure 2.2 : Stockage à air comprimé en caverne [22].

2.3.2.3 Stockage sous forme thermique

Le principe de stockage thermique consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc..) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur.

Pour stocker l'électricité sous forme thermique, il faut :

- transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques.
- stocker la chaleur produite dans des réfractaires.
- transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

Cette idée qui aurait pu paraître incongrue il y a quelques années devient maintenant envisageable grâce au développement des turbines à gaz à haute température (supérieure à 1400°C), qui autorisent un rendement de conversion de la chaleur en électricité de 60 % dans les cycles combinés. De plus, à ce niveau de température, la densité d'énergie qu'il est possible de stocker dans des réfractaires est considérable. (Il faut 500 kWh pour chauffer une tonne de réfractaires à 1400°C). Les réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à 1400°C sont déjà largement employés en sidérurgie. L'isolation thermique à ce niveau de température est également bien maîtrisée par cette industrie. Une première analyse montre d'ailleurs que les pertes thermiques d'un tel système sont relativement d'autant plus réduites que la taille du stockage est grande. En plus tous les ingrédients nécessaires pour développer de tels systèmes de stockage sont disponibles [26], [22].

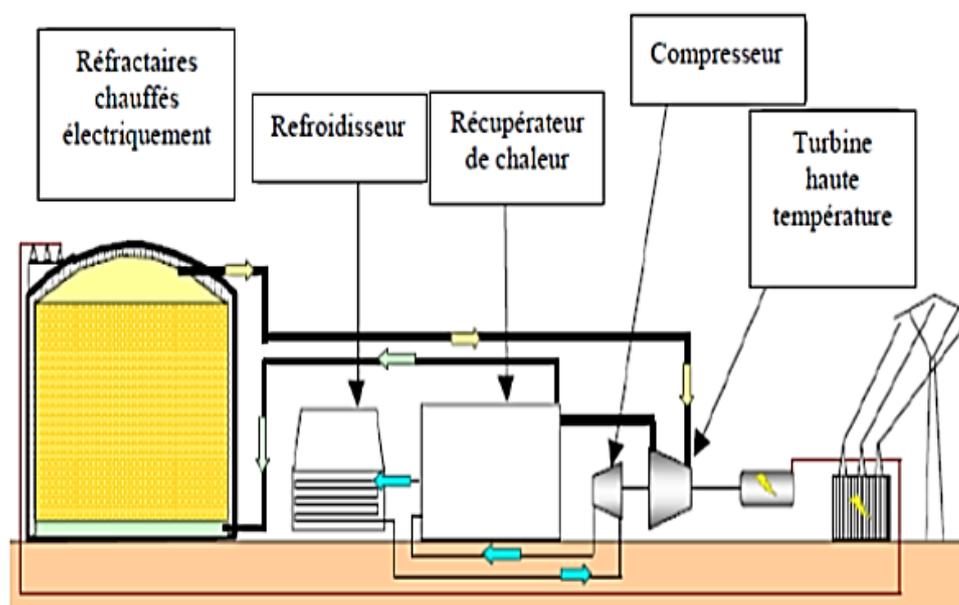


Figure 2.3 : Système de stockage thermique [26].

2.3.2.4 Stockage sous forme chimique

a. Les Batteries

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière [23]. Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité [20].

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :

Une électrode positive (cathode),

- une électrode négative (anode),
- un électrolyte.

Globalement, l'objectif d'une cellule est de créer une différence de potentiel entre les deux électrodes liée à leurs matériaux constituants. L'électrolyte permet la migration des ions entre l'anode et la cathode tout en interdisant le transfert des électrons. Ceux-ci devront transiter au travers d'un circuit électrique qui est la charge.

En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé [24].

b. Les piles à combustibles

La pile à combustible est parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée tel qu'elle suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite et fortement, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs de piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables [25].

La pile à combustible est un dispositif électrochimique réalisant l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau. Là où une électrolyse dissocie la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène grâce au passage d'un courant ; la Pile à combustible permet de les réunir en produisant donc de l'électricité et de l'eau et également de la chaleur.

Une cellule de pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode. A l'anode, se produit une réaction d'oxydation du carburant (par exemple, de l'hydrogène) tandis que, à la cathode, se produit une réaction de réduction de comburant (le plus souvent de l'oxygène). Les électrodes sont recouvertes d'un catalyseur afin de faciliter les réactions d'oxydoréduction et séparées par un électrolyte. Ce dernier laisse transiter les protons de l'anode à la cathode mais bloque les électrons. Ainsi, ils doivent emprunter un circuit extérieur (la charge) afin de migrer.

Il existe plusieurs technologies de PAC, généralement classifiées en fonction du type de leur électrolyte et de leur température de fonctionnement [24].

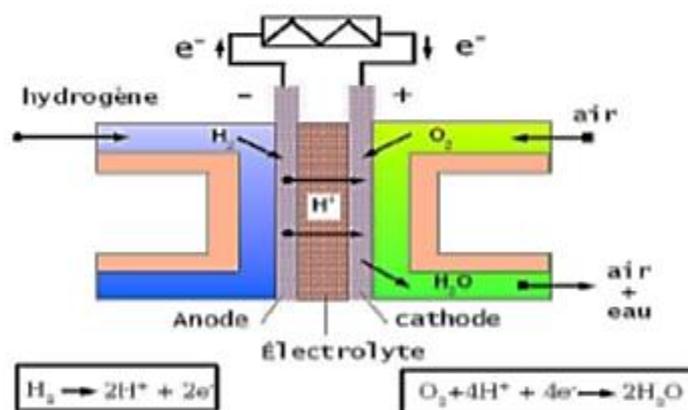


Figure 2.4 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [24].

La réaction globale s'écrit : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur}$

2.4 Comparaison entre les modes de stockage présentés

Technologie	Avantages	Inconvénients
Batterie	Faible coût	Durée de vie
Air comprimé	Capacité de stockage importante.	Site spécifique Coulé avec le gaz naturel
Pompage hydraulique	Stockage important Faible coût	Délais de construction Site favorable
Volant d'inertie	Puissance élevée	Faible densité d'énergie Le coût
Supraconducteur	Puissance élevée	Coût élevé Faible densité d'énergie
Super condensateur	Durée de vie Bon rendement	Faible densité d'énergie

Tableau 2.1 : comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.

Les barrages hydroélectriques et le stockage d'air comprimé : sont des dispositifs gigantesques et nécessitent de disposer d'une géologie favorable.

- les supraconducteurs : leur développement est encore à ce jour limité, ce qui les rend très onéreux.
- pour le volant d'inertie, le coût élevé de cette technologie risque d'être un obstacle à son développement et son utilisation en plus de sa sensibilité aux chocs malgré les différents avantages qu'il possède.
- les piles à combustibles ont un coût d'investissement encore prohibitif, leur rendement global est très faible et leur durée de vie insuffisante
- les accumulateurs électrochimiques, se reconnaissent par une bonne énergie massique leur utilisation paraît intéressante dont la charge très peu fluctuante en plus, ils respectent certaines contraintes notamment un bon rapport cout/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité [23], [22].

Vu tous les avantages présentés par le stockage par batteries, leur association au système photovoltaïque est presque impératif dans les systèmes de production décentralisée. Voilà pourquoi on a opté dans la suite de ce travail à l'étude et à l'application du système de stockage par batteries, dans un système de production photovoltaïque autonome.

2.5 Technologies et Types des batteries

Il existe plusieurs types de stockage dans le système *PV*, les puissances rencontrées sont inférieures au *MW*, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique [26].

2.5.1 Batteries au plomb

Elle se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte. L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO_2) et la négative en plomb (Pb). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. la densité de l'électrolyte décroît lors de la décharge lorsque la batterie débite un courant les matières actives vont se transformer en sulfate et en eau.

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vente Batteries) et les batteries scellées (Valve Régulâtes Lead Acide Batteries).

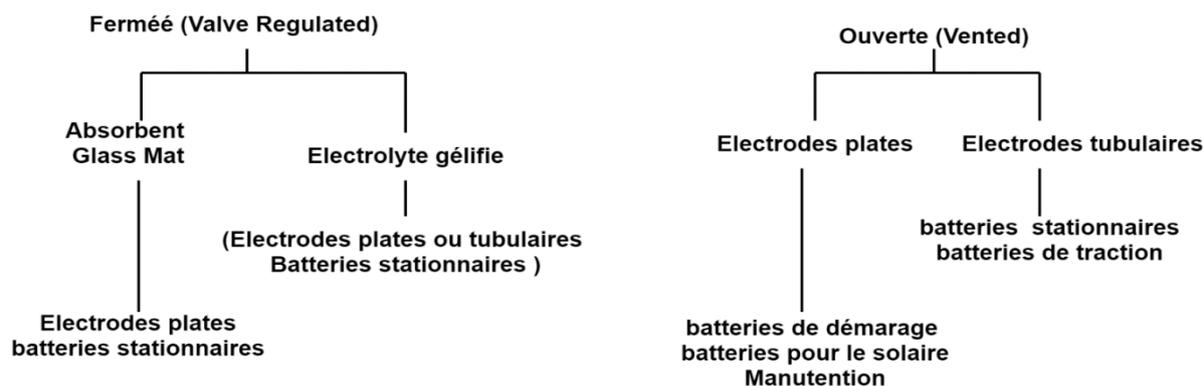


Figure 2.5 : Différents types de batteries au plomb

2.5.2 Batteries au Lithium

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage. Les efforts menés en matière de recherche et de développement ont permis de voir apparaître de nouvelles technologies de stockage électrochimique comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène ou les batteries au lithium.

Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [27].

2.5.3 Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

Ils offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et durée de vie. Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leur prix est nettement plus élevé que les batteries plomb (environ 1,5 fois) [28].

2.5.4 Batteries Nickel Hydrogène (Ni-H₂)

Depuis 1964, les piles H₂/O₂ sont couramment utilisées dans les applications spatiales (satellite et navette). Sur les satellites, ils servent d'accumulateur pour stocker le surplus d'électricité fournit par des panneaux solaires pour le restituer lors des éclipses (grand nombre de cycles).

2.5.5 Batteries Nickel-Métal-Hybride (Ni-MH)

Ils sont une forme dérivée des batteries Nickel-Hydrogène. La batterie *Ni-MH* recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au *Ni-Cd* (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore dissuasif pour les applications industrielles habituelles [29].

2.5.6 Batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn)

Ce couple à l'avantage d'être moins coûteux que le *Ni-Cd* et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage¹ (environ 600 à 1000 cycles).

2.5.7 Batteries Zinc-halogènes

Les avantages des électrodes en nickel sont un coût relativement faible, sa légèreté et produit potentiel élevé. Pour améliorer le cycle de vie de ce type d'accumulateur, des études ont conduit au remplacement de l'électrolyte alcalin par une solution acide. Les couples les plus prometteurs sont Zinc- Chlore ($Zn-Cl_2$) et Zinc-Brome ($Zn-Br_2$). Ce dernier donne une *FEM* de 1,9V. Ce type de pile est adapté au régime de décharge soutenu sur un faible intervalle de temps [30].

2.7 Description d'une Batterie

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement. Destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :

- une électrode positive (cathode),
- une électrode négative (anode),
- un électrolyte [32].

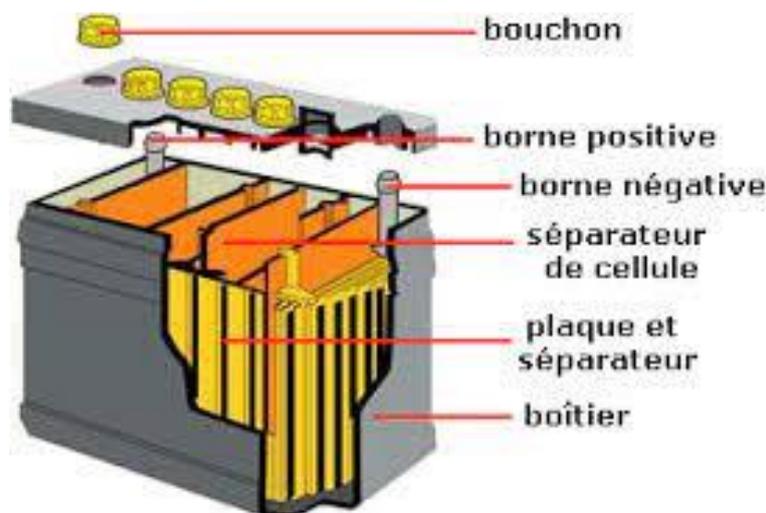


Figure 2.6 : Description de l'intérieur d'une batterie.

2.7 Caractéristique des batteries

2.7.1 Capacité de stockage

La capacité de stockage exprimée en ampères-heures est la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de la batterie, initialement chargée, avec un courant constant. La nomenclature utilisée pour désigner la capacité de stockage obtenue pour une décharge de n heures est C_n . De manière générale, lorsque l'on parle d'une capacité C_5 , cela revient à évoquer la quantité de charge obtenue lors d'une décharge de 5 heures. De même, lorsque l'on parle d'une capacité $C_{0.5}$, cela revient à désigner la quantité de charge mesurée pendant une décharge de demi-heure [33].

Le courant de décharge, appelé aussi régime de décharge, utilise la même nomenclature que la capacité C_n et est défini de la manière suivante :

$$I_n = \frac{C_n}{n} \quad (2.1)$$

2.7.2 Rendement

a. Rendement faradique : Le rendement en ampère-heure (ou faradique) est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge C_d et la quantité d'électricité fournie lors de la charge C_c .

Pour la batterie au plomb il est supérieur à 90% [1].

$$n_f = \frac{C_d}{C_c} \quad (2.2)$$

b. Rendement énergétique : Est analogue à celle du rendement faradique à la différence que les grandeurs mises en jeu sont des énergies et non des quantités de charge [6].

$$n_e = \frac{E_d}{E_c} \quad (2.3)$$

2.7.3 Tension à vide

La tension à vide (open circuit voltage) désigne la tension d'équilibre de la batterie au repos. Elle est définie comme la différence des potentiels d'équilibre entre les deux électrodes.

2.7.4 Durée de vie

Les batteries vont voir leurs performances décroître durant toute leur vie. Celle-ci est considérée en fin de vie lorsque leurs performances ne répondent plus à celles nécessaires pour l'application visée [33].

Les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25°C. Elle varie de 2 à 7 ans pour les *Ni-Cd*. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10°C de la température d'utilisation [1].

2.7.5 Etat de charge (SoC) et profondeur de décharge (DoD)

L'état de charge (ou *SoC* pour « State of Charge » en anglais) est le rapport de la charge disponible en Ah sur la capacité de la batterie. Par exemple, quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (*SoC*) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le *SoC* vaut 0%. La définition du *SoC* n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du *SoC*.

$$SoC = \frac{\text{Charge disponible en Ah}}{\text{Capacité de la batterie}} \quad (2.4)$$

La profondeur de décharge (ou *DoD* pour « Dépit of Dis charge » en anglais) est aussi un indicateur de niveau de charge de la batterie. Son expression est donnée par :

$$DoD = 1 - SoC \quad (2.5)$$

2.7.6 Autodécharge des batteries

L'autodécharge se produit toujours, même si la batterie n'est connectée à rien. Le taux d'auto- décharge dépend de la température ambiante et du type de batterie. À des températures supérieures à 55°C, l'autodécharge est encore plus rapide. Ces températures peuvent être atteintes si la batterie est stockée dans un garage ou une remise lorsqu'il fait chaud. Une des idées reçues concernant le stockage des batteries est que, si on laisse une batterie sur un sol en béton, elle se déchargera rapidement. Cela était vrai il y a plus de trente-cinq ans, lorsque les boîtiers de batterie étaient en caoutchouc dur. En raison de l'humidité du béton, ce type de batterie se déchargeait directement dans le sol en béton. Toutefois, les boîtiers des batteries modernes sont en plastique de polypropylène et peuvent être stockés sur du béton sans crainte d'autodécharge excessive.

2.8 Modèles des batteries

2.8.1 Modèles électrochimiques

En général, les modèles électrochimiques [35] [36] [37] sont utilisés pour décrire les phénomènes électrochimiques de chaque composant de la cellule en utilisant les lois électrochimiques correspondantes. Les modèles électrochimiques sont plutôt complexes à cause de la représentation détaillée des mécanismes chimiques liés à la génération de l'énergie. Ils aboutissent souvent à la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles couplées. Bien que les modèles électrochimiques soient capables de donner une estimation précise du comportement de la batterie [38] [39], leurs complexités les rendent difficilement applicables à la simulation. Ils ne sont donc pas bien adaptés pour élaborer les lois de contrôle et pour les applications en temps réel [22][39]. Par ailleurs, ces modèles nécessitent la connaissance d'un certain nombre de paramètres comme la géométrie des électrodes, la concentration de l'électrolyte, le coefficient de transfert de charges, le coefficient de diffusion difficiles à déterminer. Quand il est possible d'obtenir une estimation raisonnable de certains paramètres dans la littérature, d'autres, en revanche, demandent une investigation expérimentale bien plus approfondie et pas toujours réalisable [20].

2.8.2 Modèles de type boîte noire

Les modèles de type boîte noire [21], [40] sont issus de l'utilisation de modèles par apprentissage (par exemple grâce à l'emploi de réseaux de neurones ou de la logique floue) pour estimer le comportement de la batterie. Contrairement aux modèles électrochimiques, la connaissance des phénomènes électrochimiques n'est pas nécessaire. Par contre, une phase d'apprentissage avec des données réelles de la batterie (courant, tension, *SoC*, température) est nécessaire pour les entraîner. Ces modèles sont capables de donner une estimation sur les comportements de la batterie selon leurs « expériences » obtenues durant la phase d'apprentissage. La précision de ces modèles est influencée de manière significative par les données d'entraînement et la méthode d'entraînement [26]. Les modèles de type boîte noire sont principalement utilisés pour l'estimation des paramètres *SoC* et *SoH*. Il y a peu d'articles dans la littérature concernant l'estimation du comportement dynamique de la batterie. Ces modèles ne sont pas retenus pour la suite de ce travail car ils ne sont pas les plus adaptés pour estimer le comportement dynamique de la batterie [21].

2.8.3 Modèles de type circuit électrique équivalent

Grâce à l'analogie entre les domaines de l'électrochimie et celui de l'électricité, les différents phénomènes électrochimiques peuvent être représentés en utilisant des combinaisons de composants électriques. Par exemple, le comportement électrique des électrodes poreuses d'une cellule peut être représenté par les combinaisons des résistances et condensateurs.

Basés sur l'analogie entre l'électrochimie et l'électricité et afin de séparer différents phénomènes électrochimiques, de nombreux modèles ont été proposés dans lesquels chaque élément électrique est corrélé à un phénomène électrochimique.

Dans ce modèle, une source de tension (OCV) représente la tension d'équilibre de la cellule. Une inductance (L) traduit le comportement en haute fréquence de la cellule. Une résistance (R_s) regroupe les phénomènes purement ohmiques des connectiques et de l'électrolyte. Une impédance (Z_{tc_dc}) modélise les effets de transfert de charges et de double couche. Enfin, une impédance (Z_{tm}) représente l'effet de transport de matière. Tous les composants du circuit (OCV , L , R_s , Z_{tc_dc} , Z_{tm}) peuvent varier en fonction de l'état de charge, du courant, de la température et de l'état de fonctionnement de la cellule considérée. Comme différents effets électrochimiques sont pris en compte dans le modèle générique, le domaine de validité du modèle couvre une large plage temporelle. Dans la pratique, il est possible de ne s'intéresser qu'aux comportements dynamiques d'une plage limitée temporellement. Dans ce cas, on peut encore simplifier le modèle en négligeant les composants qui sont en dehors de la plage étudiée [24].

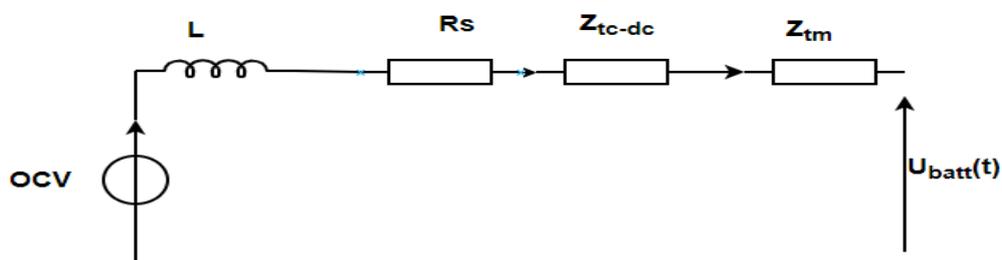


Figure 2.7: Modèle générique de circuit électrique équivalent simplifié d'une cellule

En fonction de la représentation de Z_{tc_dc} et Z_{tm} , on peut classer les modèles de type circuit électrique dans la littérature en deux familles :

- les modèles adaptés à une approche fréquentielle qui comportent non seulement les éléments conventionnels comme des sources de tension, des inductances, des résistances et des condensateurs, mais aussi des éléments non conventionnels comme des impédances *CPE*, et que nous désignerons par "modèles à *CPE*".
- les modèles adaptés à une approche temporelle qui ne comportent que des éléments conventionnels et que nous désignerons par "modèles de Thévenin".

2.8.3.1 Modèles à *CPE*

Les modèles à *CPE* peuvent être utilisés pour représenter au mieux le tracé de Naquis de la batterie. Le résumé les éléments possibles dans les modèles à *CPE* ainsi que leurs comportements dans le diagramme de Naquis :

-Une impédance *CPE*, ou « Constant Phase Element » en anglais, est une impédance d'ordre non entier avec un ordre compris entre 0 et 1. L'impédance *CPE* est une pente passant par l'origine avec un angle θ par rapport à l'axe des réels $R_e(Z)$. Quand l'exposant α varie entre 0 et 1, l'angle θ de la pente varie entre 0° et 90° . Il faut noter que, lorsque l'exposant α vaut 0, l'impédance *CPE* est similaire à une résistance. Lorsque l'exposant α vaut 1, l'impédance *CPE* est équivalente à une capacité dont le tracé devient une demi-droite verticale passant par l'origine dans le diagramme de Nyquist (partie imaginaire négative). Lorsque l'exposant α vaut 0.5, l'angle θ est égal à 45° . Dans ce cas, l'impédance *CPE* est appelée l'impédance complexe de Warburg dont l'expression est exprimée par :

$$Z_W = \frac{1}{Q\sqrt{j\omega}} = \sigma_W \frac{1-j}{\sqrt{\omega}} \quad (2.9)$$

Avec :

Q et W : coefficients de Warburg (valeur réelle).

Les modèles à *CPE* ne peuvent pas être simulés facilement en temporel à cause du fait qu'ils contiennent un composant non conventionnel, à savoir un *CPE*. Afin de s'affranchir de cet inconvénient, différentes méthodes d'approximation de l'élément *CPE* par des circuits avec résistances et condensateurs sont proposées dans la littérature :

-Dans le composant *CPE* est approximé par une impédance de Warburg en tangente hyperbolique dont l'expression est :

$$Z_W(j\omega) = \frac{a_2}{\sqrt{j\omega}} \tanh\left(\frac{a_1}{a_2} \sqrt{j\omega}\right) \quad (2.10)$$

Avec a_1 et a_2 deux valeurs constantes. Ensuite, deux structures de circuits R et C (nommées respectivement Foster et Cauer) sont utilisées pour approximer l'impédance comme illustrées sur la *Figure 2.8* L'expression de la structure de Foster est donnée par :

$$Z_F(j\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_k}{1+j\omega R_k C_k} \quad (2.11)$$

Avec :

$$R_k = \frac{8a_1}{(2K-1)^2 \pi^2}$$

$$C_k = \frac{a_1}{2a_2^2}$$

$$\tau_k = \frac{8a_1^2}{2a_2^2 (2K-1)^2 \pi^2}$$

L'expression de la structure de Cauer est donnée par :

$$Z_c(j\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1+j\omega R_n C_n} \quad (2.12)$$

Avec :

$$R_n = \frac{a_1}{4n-3}$$

$$C_n = \frac{a_1}{a_2^2 (4n-1)}$$

$$\tau_n = \frac{a_1^2}{a_2^2 (4n-1)(4n-3)}$$

Si l'on calcule le rapport (γ) entre deux constantes de temps pour chacune des structures, les rapports ne sont pas constants pour les deux structures [19].

$$\gamma_k = \frac{\tau_k}{\tau_{k+1}} = \frac{(2K+1)^2}{(2K-1)^2} \quad (2.13)$$

$$\gamma_k = \frac{\tau_{n+1}}{\tau_n} = \frac{(4n+1)(4n+3)}{(4n-1)(4n-3)} \quad (2.14)$$

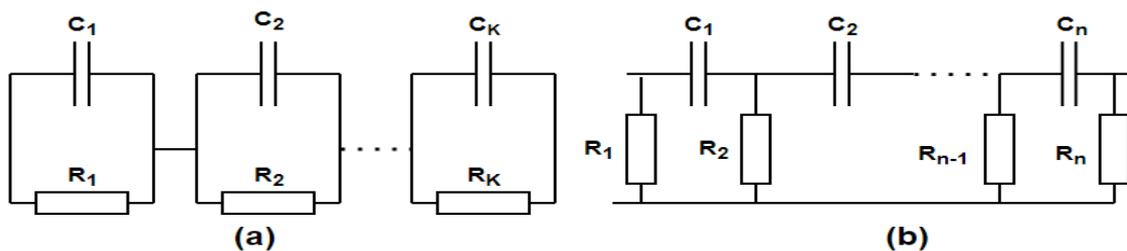


Figure 2.8 : Structure de Foster (a) et de Cauer (b) pour approximer l'impédance de Warburg

En résumé, les modèles à *CPE* permettent facilement de connaître la réponse en fréquence de l'impédance de la batterie. Ils sont très utilisés pour suivre une évolution en cours de vieillissement. Cependant, la réponse temporelle à une sollicitation réelle n'est pas toujours facile à déterminer numériquement avec ces modèles. Les modèles de Thévenin, qui seront présentés par la suite, sont mieux adaptés au calcul d'une réponse temporelle [41].

2.8.3.2 Modèles de Thévenin

Les impédances Z_{tc_dc} et Z_{tm} sur la *figure 2.9* peuvent être approximées par les circuits avec des éléments conventionnels comme des résistances et des condensateurs. Par exemple, les effets de transfert de charges et double couche peuvent être représentés par un simple circuit *R//C* [42] comme sur la *Figure 2.9 (a)*. L'effet de transfert de matière peut être représenté par une mise en série de circuit *R//C* [27] comme sur la *Figure 2.9(b)* ou par un circuit de transmission comme sur la *Figure 2.9 (c)*. La précision d'approximation de l'effet de transfert de matière dépend du nombre de cellules élémentaires utilisées (k et m) [28][29].

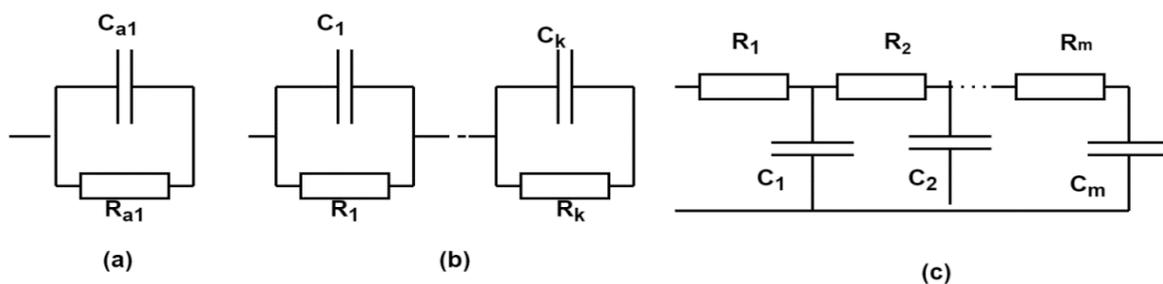


Figure 2.9 : (a) Circuit simplifié pour représenter les effets de transfert de charges et double couche (b) Circuits R//C en série pour représenter l'effet de transfert de matière (c) Circuit de transmission pour représenter l'effet de transfert de matière

La structure la plus répandue est présentée sur la *figure 2.10*.

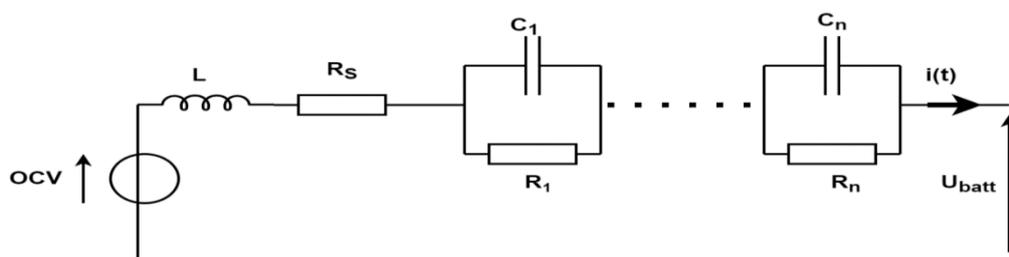


Figure 2.10: Modèle de Thévenin avec les circuits R//C connectés en série

Dans le cadre des modèles de Thévenin, on trouve aussi d'autres modèles atypiques. La *Figure 2.11* présente un tel modèle proposé pour une batterie Li-ion dans [29]. Ce modèle est constitué :

- d'une résistance série r_{HF} pour les chutes de tension de nature ohmique dans les électrodes et l'électrolyte,
- d'un condensateur de double couche *CDL*

- d'une impédance Z_t pour modéliser la diffusion des ions dans l'électrolyte,
- d'une impédance Z_p pour décrire la diffusion des ions à l'intérieur de l'électrode,
- d'un condensateur C_s non-linéaire en fonction de l'état de charge pour symboliser la tension d'équilibre,
- d'une branche supplémentaire qui apparait seulement pendant la relaxation et composée d'une résistance r_r et un condensateur C_r pour améliorer la performance du modèle pendant la relaxation.

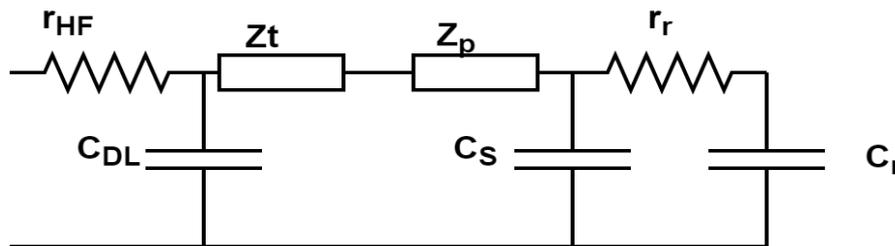


Figure 2.11 : Modèle utilisé dans [24]

On présente un autre modèle atypique qui est utilisé pour des batteries au plomb dans [30] [31].

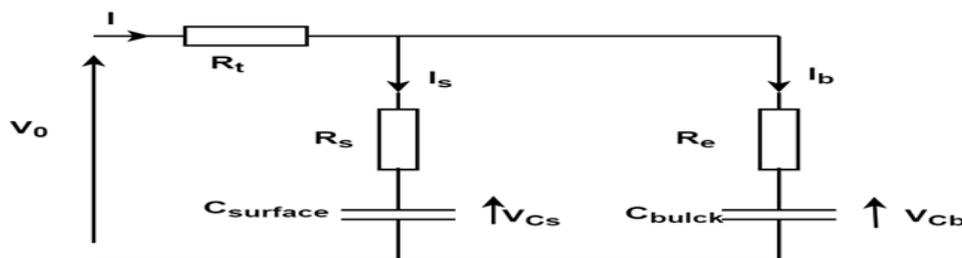


Figure 2.11 : Modèle utilisé dans [30] [31].

2.8.4 Modèles CIEMAT

Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie. Celle-ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne R_i dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température et état de charge) [43].

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i \cdot I_{bat} \quad (2.15)$$

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents systèmes de stockage d'énergie. Ensuite, nous avons décrit les technologies et les types de batteries ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, les différents modèles de la batterie. Dans ce travail nous nous intéressons du modèle CIEMAT de la batterie, que nous étudierons plus en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 03:

Système de stockage de l'énergie

3.1. Introduction

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

Le système de stockage photovoltaïque étudié est composé de générateur PV, de convertisseur buck, d'élément de stockage (batterie) et de convertisseur boost. La modélisation du générateur PV ainsi que l'influence des de ensoleillement solaire et la température ont été étudié dans le premier chapitre

Le présent chapitre est divisé en deux parties: on présente dans la première partie le modèle mathématique de la batterie CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas). Par la suite, dans la deuxième partie on aborde les convertisseurs DC-DC (buck et boost).

3.2. Etage de stockage

Afin d'établir un modèle fiable et capable de prédire le fonctionnement, dans des applications de l'énergie solaire photovoltaïque on a utilisé dans ce travail le modèle CIEMAT

3.2.1 Modèle CIEMAT

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur de la batterie [43].

Ce modèle est basé sur le schéma suivant *Figure (3.1)* où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

Le modèle mathématique donné par l'équation (3.1), décrivant au mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge est donné ci-après :

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{bat} \quad (3.1)$$

Avec :

U_{bat} : Tension de la batterie.

n_b : Nombre de cellule constituant la batterie.

E_b : La force électromotrice, elle est fonction de l'état de charge de la batterie noté (EDC).

I_{bat} : Courant de la batterie.

R_i : La résistance interne d'une cellule de la batterie, elle est variable en fonction de l'état de charge.

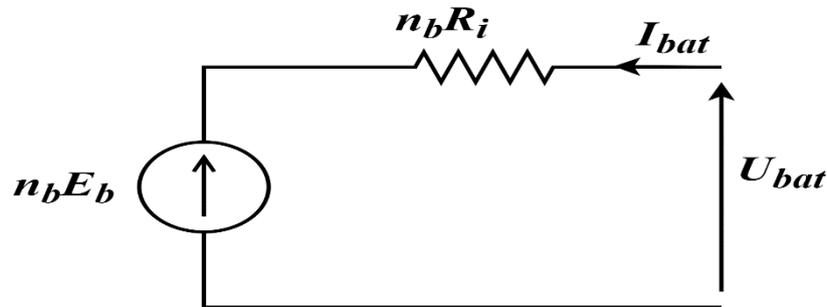


Figure 3.1 : Schéma équivalent de nb éléments en série.

3.2.1.1 La capacité

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, selon les modèles proposés dans la littérature, il faudrait tenir compte de la température. Le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge I_{moy} , est donné par l'équation suivante [43].

$$C_{bat} = C_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left[\frac{I_{moy}}{I_{10}} \right]^{0.9}} (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \quad (3.2)$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} correspondant au régime de fonctionnement C_{10} dans lequel ΔT est l'échauffement (supposé identique pour tous les éléments de la batterie) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25°C [44].

Avec :

C_{10} : c'est la capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

I_{10} : le courant de décharge en 10 heures.

ΔT : l'échauffement de la batterie.

3.2.1.2 L'état de charge

La capacité C_{bat} sert de référence pour son évaluation, il est formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie ' Q_d '.

$$EDC = 1 - \left(\frac{Q_d}{C_{bat}}\right) \quad (3.3)$$

L'évolution temporelle de Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

$$Q_d = I_{bat} \cdot t \quad (3.4)$$

Avec t la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . On définit aussi l'état de décharge de la batterie (profondeur de décharge), il est complémentaire à l'état de charge.

$$EDD = 1 - EDC \quad (3.5)$$

3.2.1.3 Tension de décharge

L'expression de la tension de décharge de la batterie est établie à partir des équations (3.1) et (3.2). Elle est clairement liée aux éléments internes de la batterie qui sont la force électromotrice, la résistance interne et de l'influence des paramètres.

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}}\right) \cdot 0.02 (-0.007\Delta T) \quad (3.6)$$

3.2.1.4 Tension de charge

L'équation de la tension en charge avant l'apparition du phénomène de *gassing* est similaire à celle obtenue en décharge. En effet, elle présente la même structure faisant apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne.

Lorsque la tension aux bornes de la batterie atteint V_g dite tension de *gassing*, alors l'évolution de la tension présente une brusque augmentation, caractéristique du dégagement d'hydrogène et d'oxygène, c'est le phénomène de *gassing*, mais on ne prend pas en considération la tension du *gassing*.

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] \cdot n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036\right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (3.7)$$

3.2.1.5 Résistance de la batterie

La résistance interne de la batterie n'est pas une valeur constante, elle varie selon l'état de charge, la température et l'état de vieillissement. De façon générale, la résistance interne d'une batterie augmente quand l'état de charge croît. De même, pour un état de charge donné, la résistance interne d'une batterie augmente quand la batterie vieillit [43].

a) **Résistance en décharge** : L'équation de la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{(1 - EDC)^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (3.8)$$

b) **Résistance en charge** : Pendant la charge la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_c = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (3.9)$$

3.2.1.6 Rendement de charge et de décharge

Le rendement coulombien en décharge est supposé être 100% ($n_{cb-d}=1$). Le rendement coulombien en charge il dépend fortement de taux de charge. Il a une valeur voisine de 100% pour de faibles courants de charge et un faible état de charge, puis il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge [44].

$$n_{cb-c} = 1 - \exp\left(\frac{20.73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0.55}\right) (EDC - 1) \quad (3.10)$$

3.2.2 Résultats de simulation

Les simulations sont effectuées pour étudier l'influence des paramètres et de leur variation sur le comportement du système de stockage qui est la batterie.

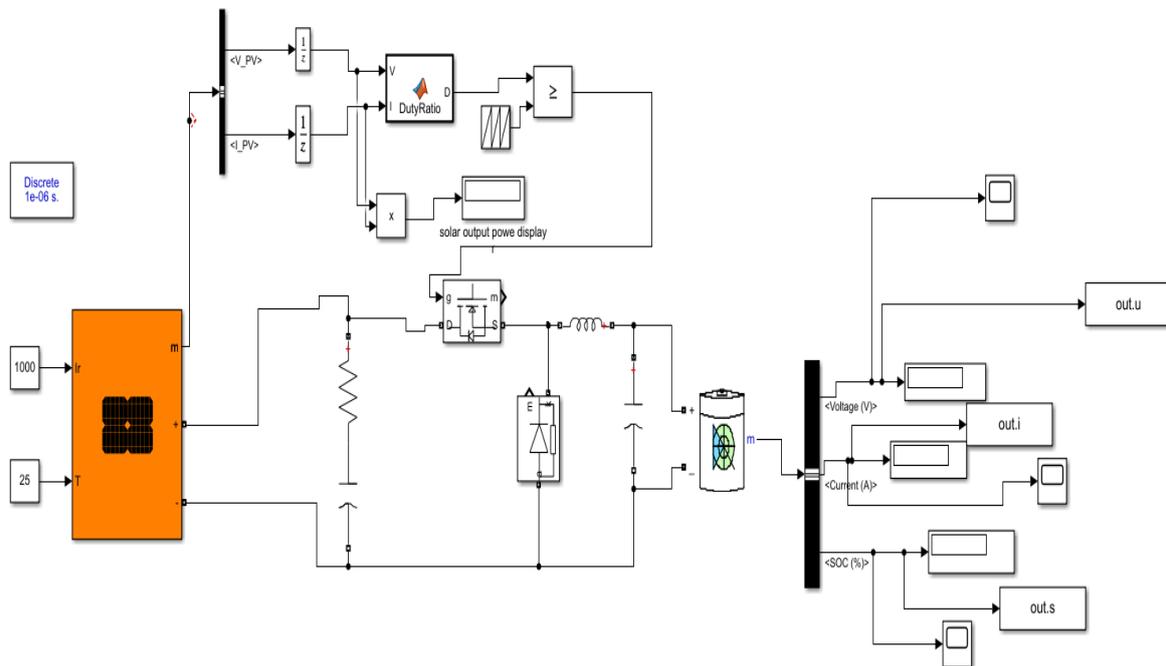


Figure 3.2 : Schéma bloc du modèle batterie avec GPV

3.2.2.1 Caractéristiques de la batterie

Les figures (3.3), (3.4) et (3.5) représentent respectivement la tension de sortie de la batterie (V_{bat}), le courant de la batterie (I_{bat}) et l'état de charge (EDC) dans les conditions

standard ($G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$).

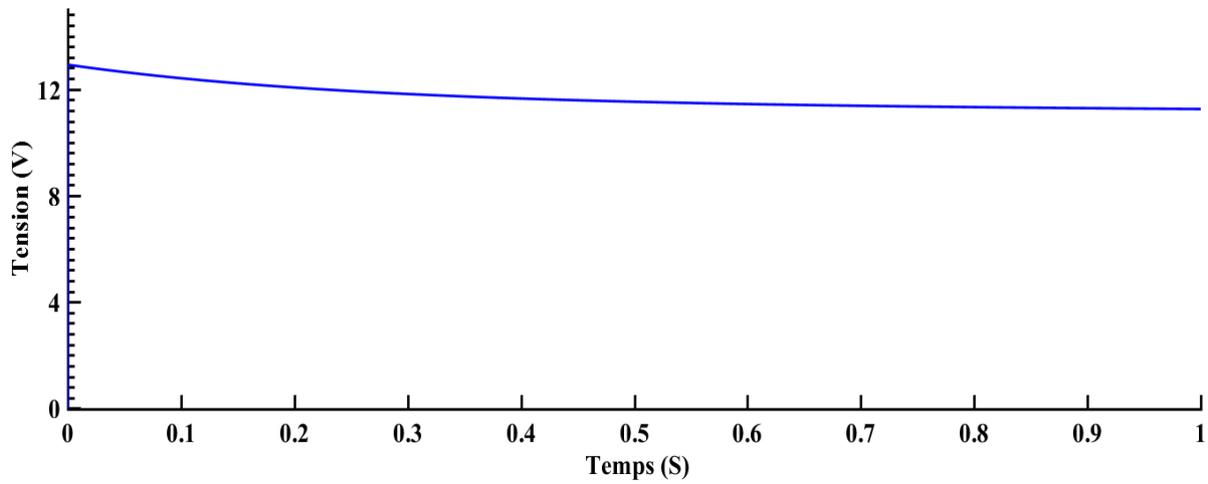


Figure 3.3 : Tension de batterie dans les conditions standards

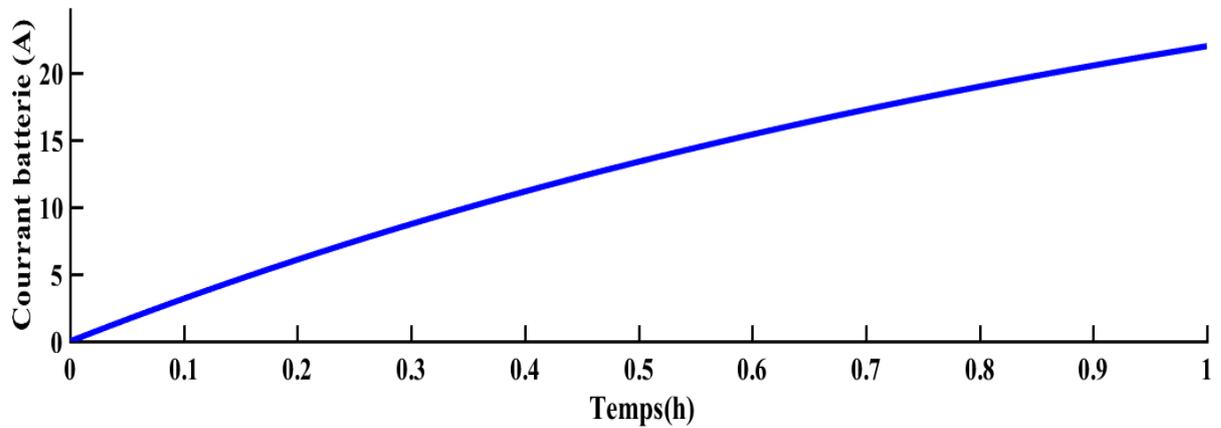


Figure 3.4 : Courant de batterie dans les conditions standard

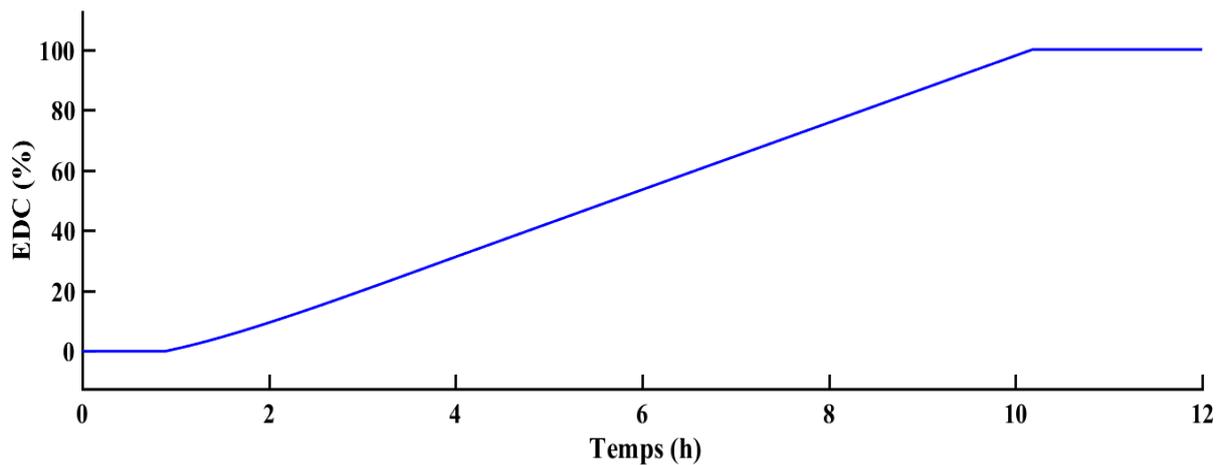


Figure 3.5 : Etat de charge (EDC) de la batterie dans les conditions standard

3.2.2.2 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques de la batterie

Les figures (3.6) et (3.7) représentent les variations de la tension et l'état de charge de la batterie pour différentes valeurs d'ensoleillement ($G=300,650, 1000\text{w/m}^2$) dans ce test on garde la température constante $Ta=25^\circ\text{C}$.

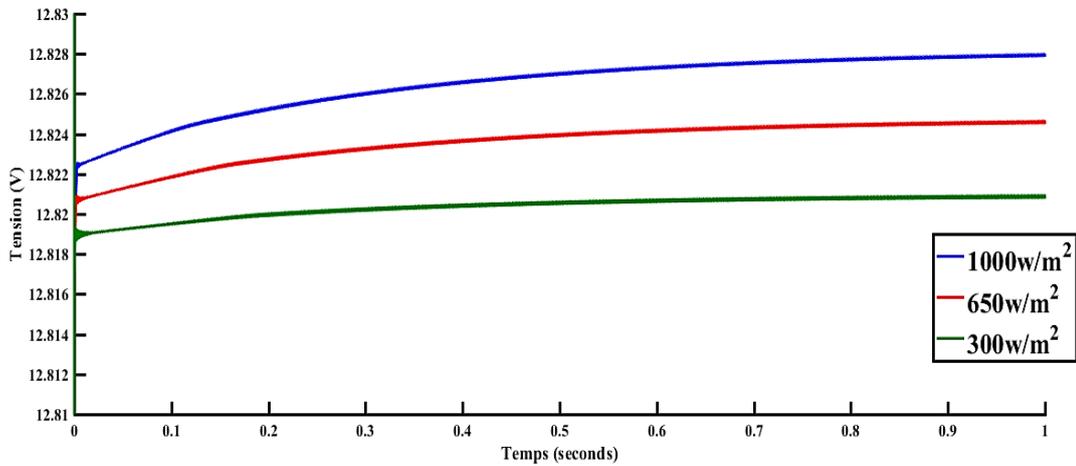


Figure 3.6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique des tensions de batterie

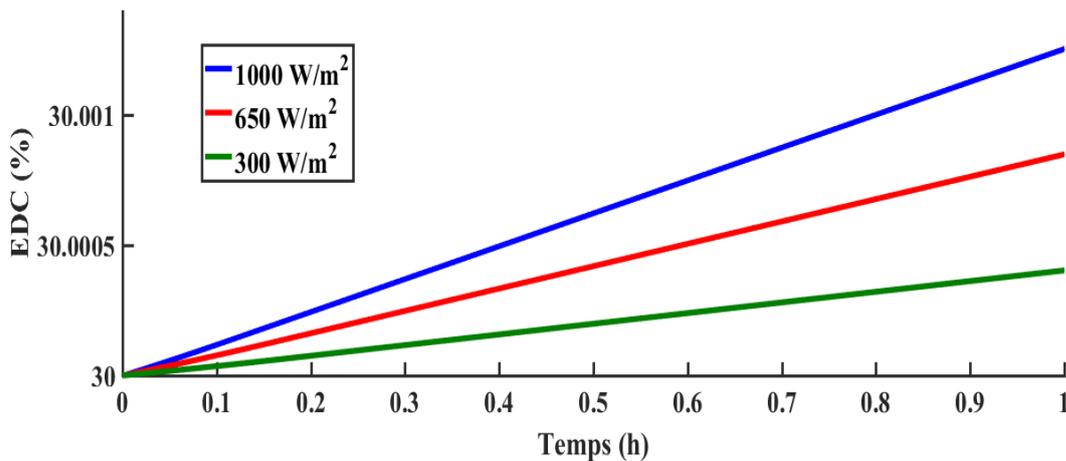


Figure 3.7 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique de l'EDC de batterie

D'après ces résultats on remarque que la tension de batterie varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée. On remarque aussi que l'état de charge de batterie de manière notable à l'ensoleillement G .

3.2.2.3 Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie

Les figures (3.8) et (3.9) représentent les variations de la tension et l'état de charge de la batterie pour différentes valeurs de la température ($T=25, 45, 50^{\circ}C$) dans ce test on garde l'ensoleillement constante $G=1000/m^2$.

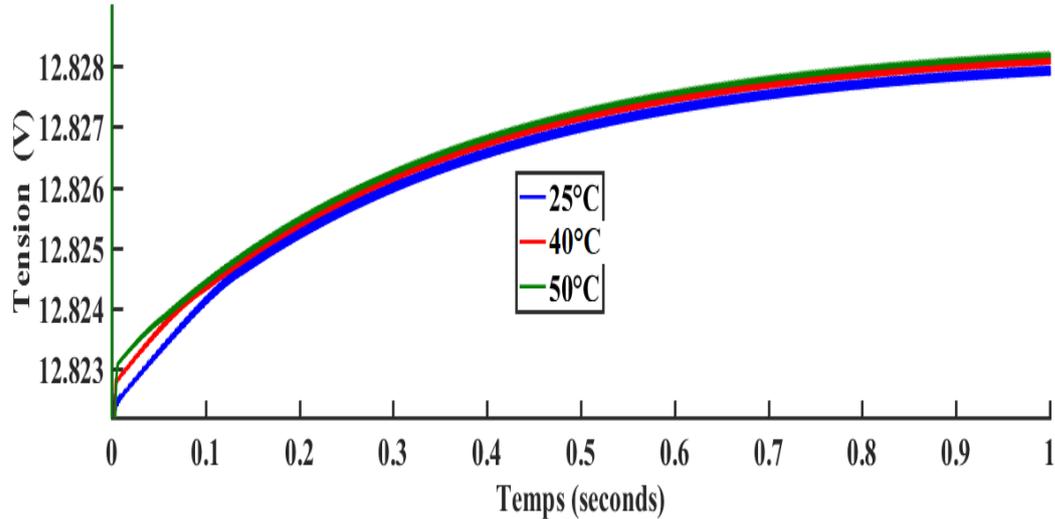


Figure 3.8 : Influence de la température sur la caractéristique tension de batterie

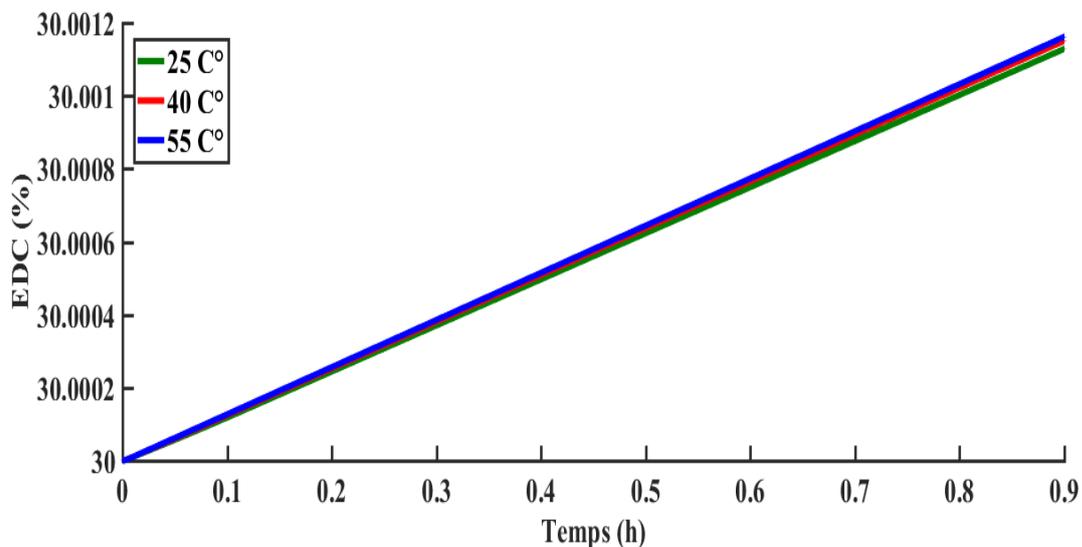


Figure 3.9 : Influence de la température sur la caractéristique de l'EDC de batterie

D'après ces figures on constate que la tension et l'état de charge de batterie ne sont pas beaucoup affectés par le changement de la température.

3.2.2.3 Influence de la résistance sur les caractéristiques de batterie

Les figures (3.10) et (3.10) montrent les variations de la tension et l'état de charge de la batterie pour différentes valeurs résistance interne de la batterie ($R=1, 15, 50 \Omega$) dans les conditions standard ($G=1000/m^2$ et $Ta=25^\circ C$).

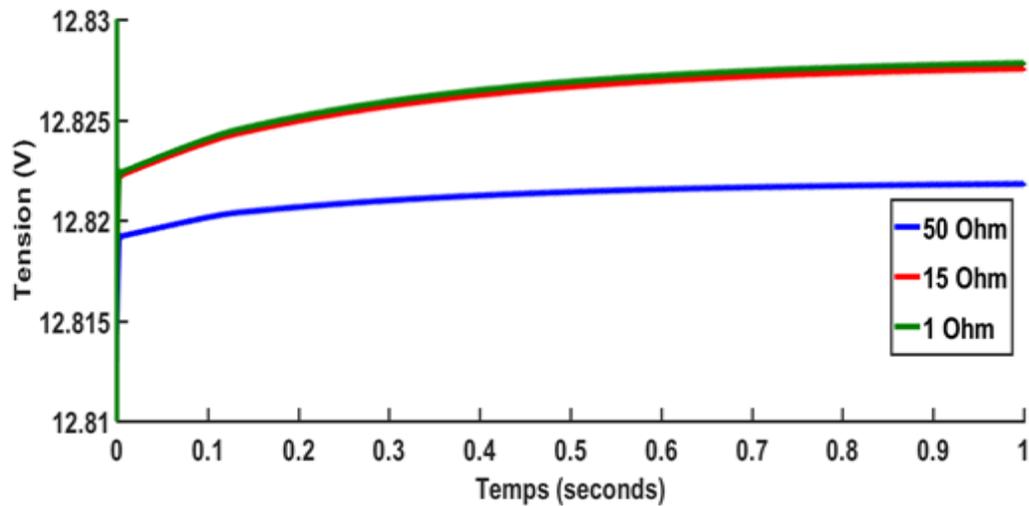


Figure 3.10 : Influence de la résistance sur la caractéristique tension de batterie

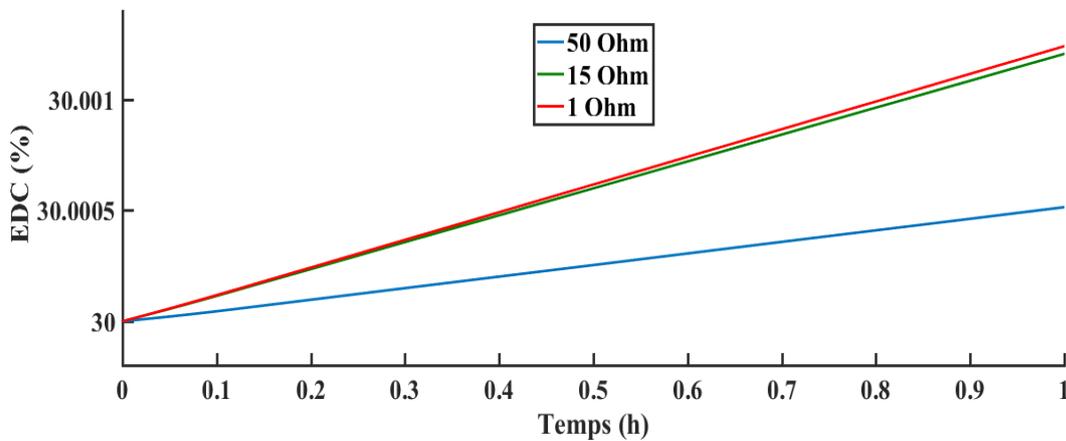


Figure 3.11 : Influence de la résistance sur la caractéristique l'EDC de batterie

D'après ces résultats on remarque que la tension de batterie augmente lorsque la résistance interne diminue. On remarque aussi que temps de charge diminue lorsque la résistance interne diminue.

3.3 Convertisseur DC/DC

Généralement le convertisseur *DC-DC* est utilisé pour réguler la tension de sortie, mais son rôle, dans le cadre de la chaîne PV, est de faire l'adaptation entre le générateur PV et la charge pour un transfert de puissance maximale. Ceci se fait en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du point de puissance maximale pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, charge, etc.) [45].

3.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck) :

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la *figure (3.12)*. Les composants clés sont : l'inductance L , l'interrupteur H , la diode D et le condensateur C . Le convertisseur Buck est utilisable lorsque la tension de la charge est inférieure à celle du panneau photovoltaïque.

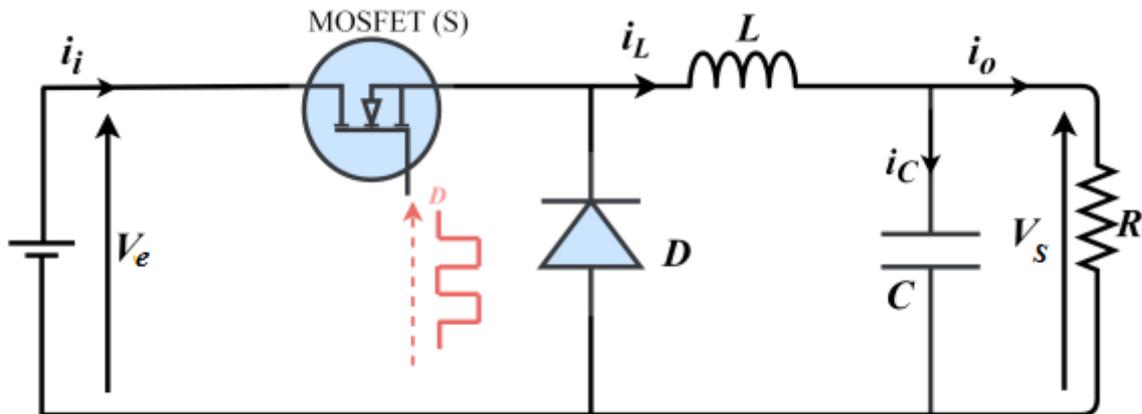


Figure 3.12 : Schéma électrique d'un convertisseur buck.

3.3.1.1 Modélisation du convertisseur buck:

✓ Pendant le premier temps $t \in [0, \alpha T]$

$$\begin{aligned} V_e - V_s &= L \frac{di_L}{dt} \\ \Rightarrow \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_e - V_s}{L} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Avec :

V_e : La tension de sortie de convertisseur.

V_s : La tension à l'entrée de convertisseur.

α : Le rapport cyclique.

✓ Pendant le deuxième temps $t \in [\alpha T, T]$:

$$V_s = -L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_s}{L}$$
(3.12)

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (3.11) et (3.12) donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \alpha V_e$$
(3.13)

3.3.1.2 Résultat des simulations du convertisseur buck

Afin de valider le convertisseur buck deux tests de simulation ont été effectués. Le premier test pour une tension de référence fixe $V_d=12V$. Le deuxième test pour une tension V_d variable. La figure (3.13) représente le modèle Simulink d'un convertisseur buck.

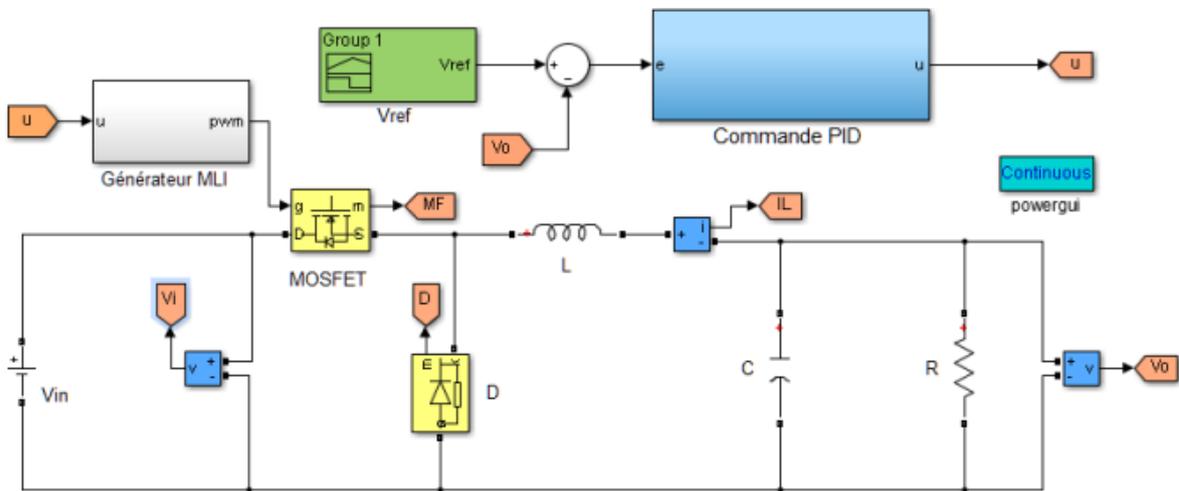


Figure 3.13 : Modèle Simulink du convertisseur buck commandé par PID

Les figures (3.14), (3.15), représentent respectivement les allures des tensions d'entrée et de référence pour $V_d=12V$ et V_d variable.

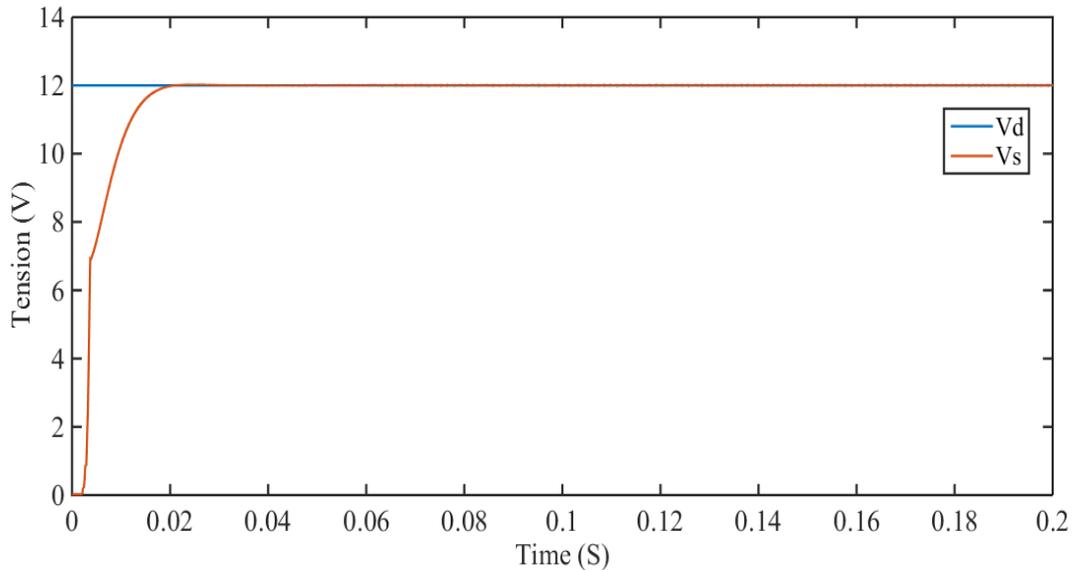


Figure 3.14 : caractéristique de sortie V_s et V_d en fonction de temps

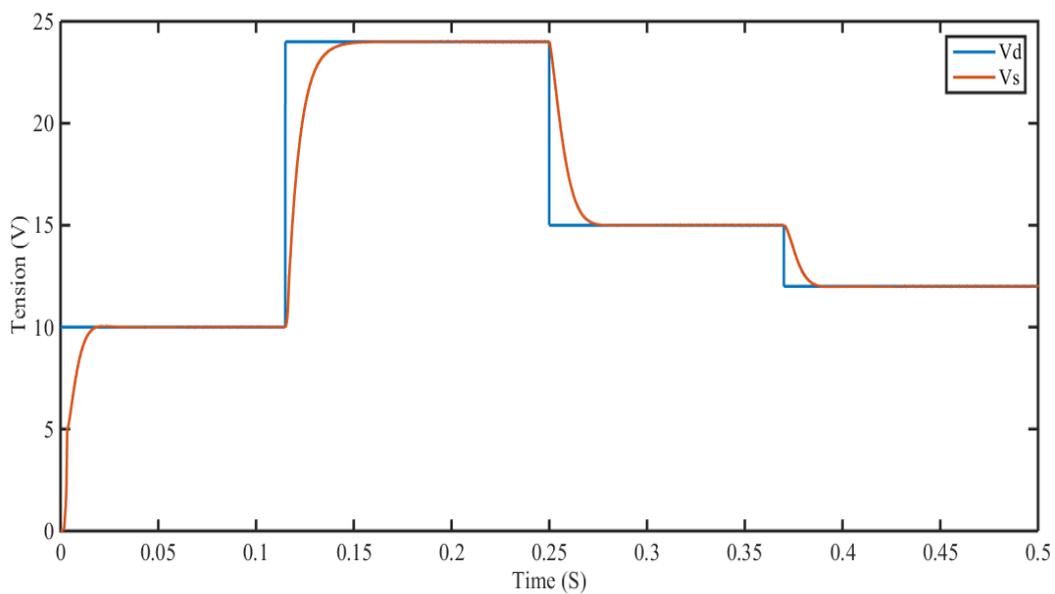


Figure 3.15 : caractéristique de sortie buck V_s et V_d en fonction de temps

- A partir de ces résultats, on peut dire que l'utilisation du contrôleur classique *PID* donne de bonnes performances.

3.3.2 Convertisseur élévateur (boost)

Le principe d'un tel convertisseur est d'assurer la fluence d'énergie entre une source de courant continu, et une source de tension continue.

Dans ce type de hacheur, la valeur moyenne de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Le schéma de la *figure (3.16)* représente le circuit électrique du convertisseur boost.

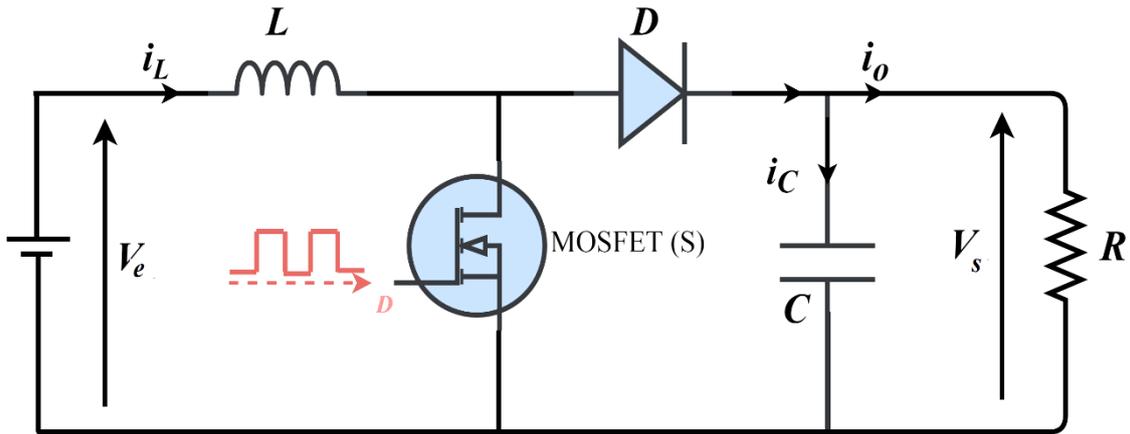


Figure 3.16 : Schéma électrique d'un convertisseur boost.

3.3.2.1 Modélisation du convertisseur boost

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté sur la *figure (3.16)* et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur [46].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - (1 - \alpha)V_s \quad (3.14)$$

Lorsque \$K\$ est ouvert et \$D\$ est fermée durant l'intervalle \$[\alpha T_d, T_d]\$. On a l'équation suivante :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (3.15)$$

Ceci dit, l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (3.14) et (3.15) donne la valeur moyenne de la tension de sortie \$V_s\$:

$$V_s = \frac{1}{(1-\alpha)} V_e \quad (3.16)$$

3.3.2.2 Résultat de simulation du convertisseur boost

Afin de valider le convertisseur boost deux tests de simulation ont été effectués. Le premier test pour une tension d'entrée fixe \$V_e=12v\$. Le deuxième test pour une tension \$V_e\$ variable. La *figure (3.17)* représente le modèle simulink d'un convertisseur boost.

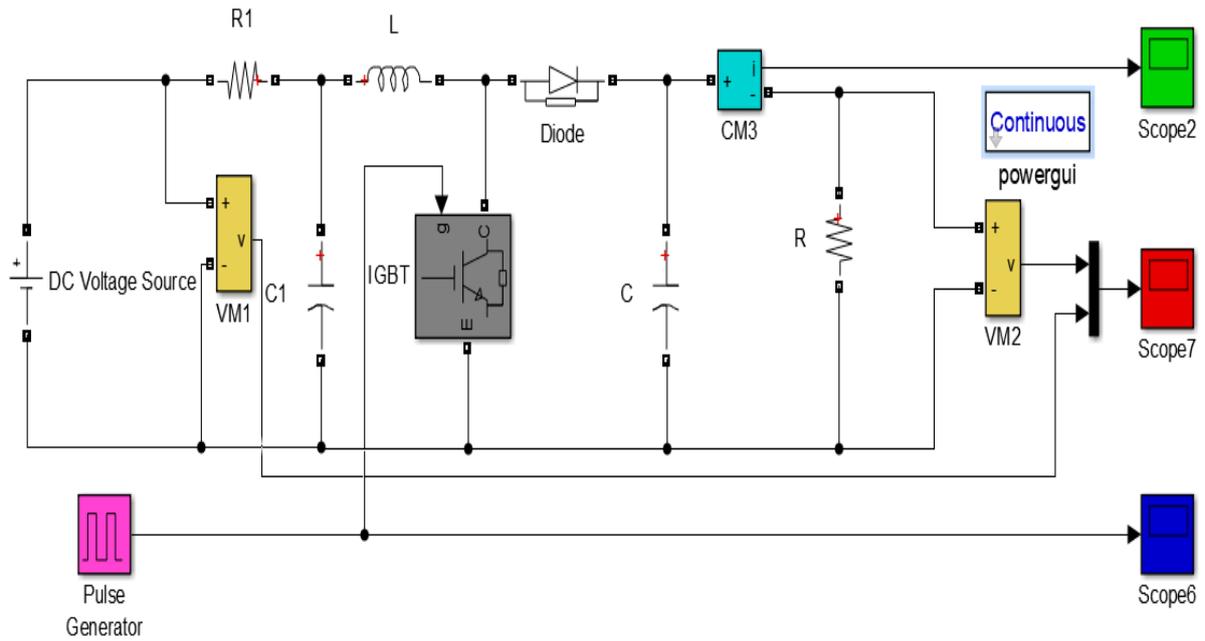


Figure 3.17 : Modèle Simulink du convertisseur boost

Les figures (3.18), (3.19), représentent respectivement les allures des tensions d'entrée et de sortie pour $V_e=12V$ et V_e variable.

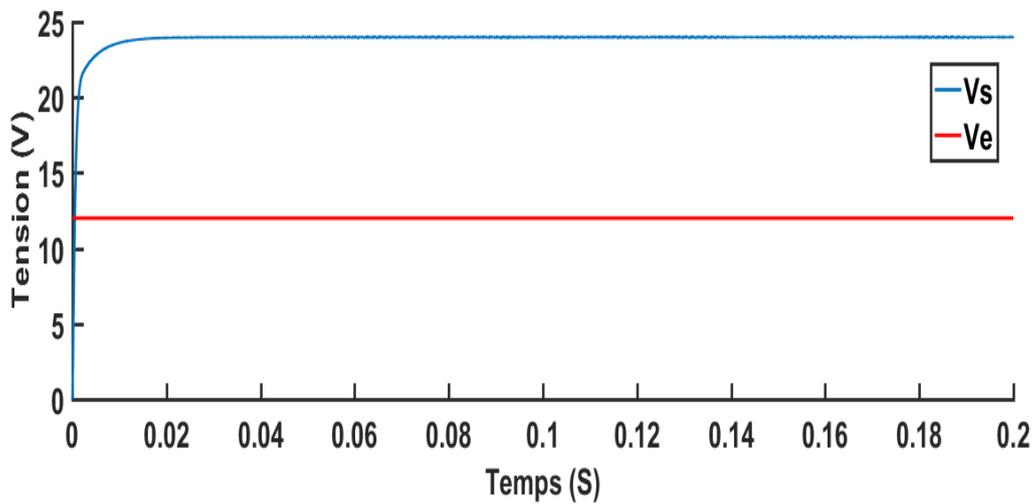


Figure 3.18 : caractéristique de sortie boost V_s et V_d en fonction de temps

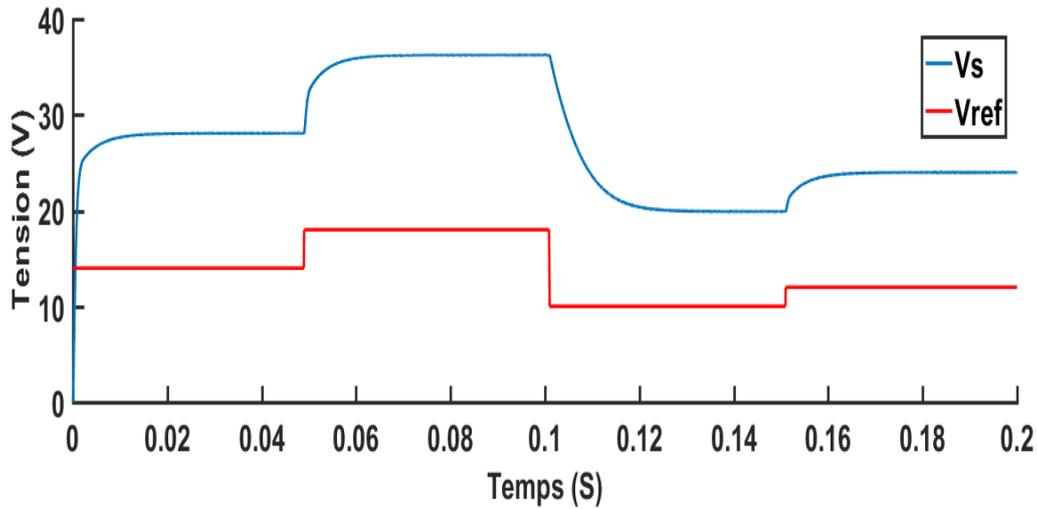


Figure 3.19 : caractéristique de sortie boost V_s et V_d en fonction de temps

3.4. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté le modèle *CIEMAT* de la batterie pour simuler son fonctionnement. Ceci nous a permis de prévoir son comportement et permis la détermination de l'état de charge, à tension en charge et en décharge et en plus de la résistance interne. Le comportement physique d'une batterie est loin d'être une chose aisée à déterminer vu la complexité de la modélisation des différents phénomènes qui se manifestent à l'intérieur de la batterie, et qui ne sont pas pris en considération. Les résultats obtenus montrent que le modèle *CIEMAT* est précis et peut être utilisé dans la simulation du fonctionnement des batteries. Dans la deuxième partie on a étudié les convertisseurs *DC/DC* utilisés dans la conversion d'énergie solaire photovoltaïque.

Chapitre 04 :

*Simulation et dimensionnement du
système photovoltaïque avec batterie de
stockage*

4.1. Introduction

Les différents étages du système de stockage photovoltaïque ont été déjà modélisés dans les chapitres précédents.

Dans ce chapitre, on représente le système de stockage PV considéré ensuite on étudie le dimensionnement de différents composants pour alimenter une charge résistive, assurer le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries qui maintiennent la continuité du transfert d'énergie à la charge surtout lorsque conditions environnementale varient. Enfin on présente les résultats obtenus dans les conditions standards et aléatoires.

4.2 Présentation du système étudié

La figure (4.1) représente le système photovoltaïque. Il est composé de :

- Générateur photovoltaïque.
- Module de supervision.
- Convertisseur de type buck.
- Moyen de stockage électrochimique (batterie).
- Convertisseur de type Boost.
- Etage de commande *MPPT* pour transférer le maximum de puissance à la charge.
- Contrôleur *PID* pour contrôler la tension de sortie du convertisseur buck.

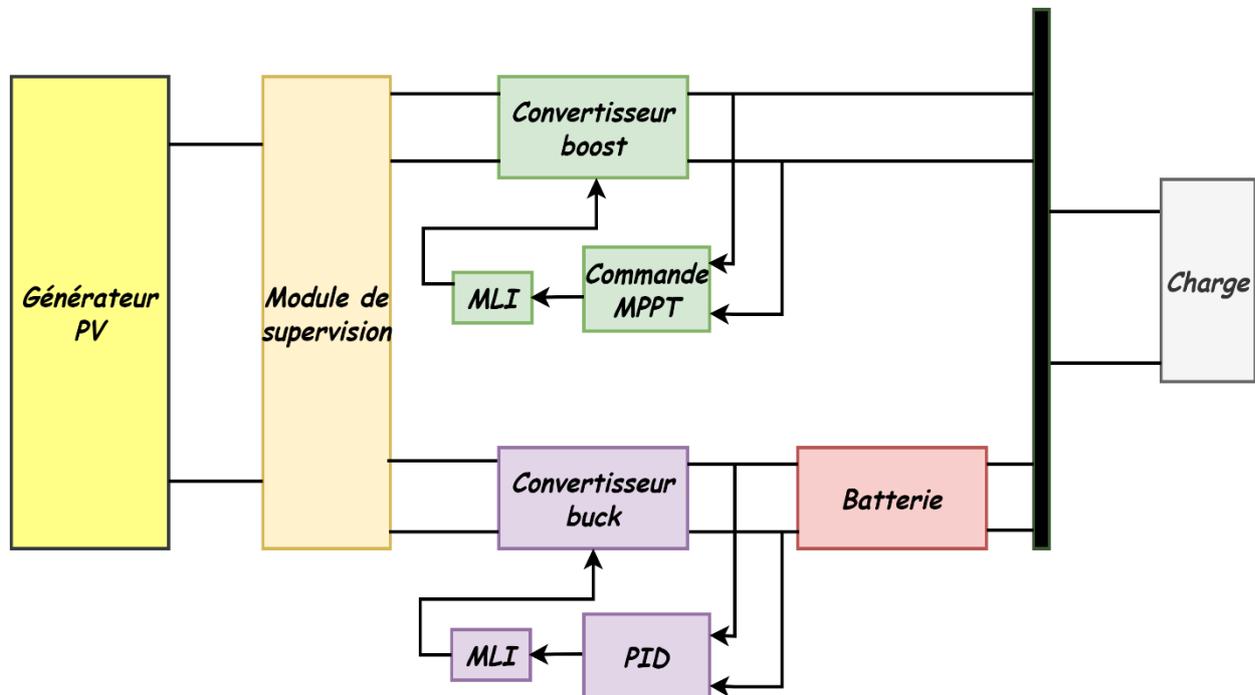


Figure 4.1 : Schéma synoptique du système étudié.

4.3 Dimensionnement du système PV

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- évaluation des besoins énergétiques.
- dimensionnement des panneaux PV.
- dimensionnement du stockage.
- Prendre en compte les pertes énergétiques.

Notre système sera dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation d'une charge résistive, évaluée à 480 Wh.

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_{pv,tot} = \frac{B_j}{E_s C_p} \quad (4.1)$$

$$N_{pv} = \frac{P_{pv,tot}}{P_{pv,uni}} \quad (4.2)$$

Avec :

$P_{pv,tot}$: Puissance totale des panneaux PV [W].

B_j : Besoins énergétiques journaliers [Wh].

E_s : Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable [kWh/m²/j].

C_p : Coefficient de perte.

N_{pv} : Nombre de panneaux PV.

P_{pv} : Puissance d'un panneau PV.

La détermination de la taille des batteries se fait comme suit :

$$C_{batt} = \frac{B_j \cdot Aut}{U_{batt} P_{DD} \eta_b} \quad (4.3)$$

C_{batt} : la capacité nominale des batteries [Ah].

Aut : le nombre de jour d'autonomie.

U_{batt} : la tension nominale des batteries [V].

P_{DD} : la profondeur de décharge des batteries.

η_b : rendement de la batterie.

D'après les calculs, les batteries doivent ainsi avoir une capacité de 56 Ah. On utilise alors trois batteries de (12V, 56Ah), montées en série.

Pour assurer la fourniture d'énergie électrique à la charge, les panneaux PV devront avoir une puissance totale de 330W (3 panneaux de 110W montés en parallèles) et le stockage, une capacité nominale de 56Ah.

Besoins énergétique journaliers : B_j [Wh]	480
Rayonnement moyenne quotidien du mois le plus défavorable : E_s [KWh/m ² /j]	2.2
Tension de bus continu : U_{batt} [V]	12
Nombre de jours d'autonomie : Aut	1
Rendement électrique des batteries : η_b	0.9
Coefficient de perte : C_p	0.65
Profondeur de décharge des batteries : P_{DD}	0.8
Puissance des panneaux PV (W)	330
Capacité nominale des batteries (Ah)	56

Tableau 4.1 : Caractéristiques du système PV étudié.

4.4 La commande MPPT

Le principe de cette commande est de faire varier le rapport cyclique du convertisseur *DC-DC* pour extraire le maximum de puissance que le générateur *PV* peut fournir quelles que soient les changements climatiques. L'algorithme *MPPT* peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le *PPM*. En général, cet algorithme est basé sur la variation du rapport cyclique en fonction de l'évolution de ses paramètres d'entrée (courant, tension et puissance du générateur *PV*) jusqu'à l'atteinte du *PPM*. Plusieurs méthodes *MPPTs* sont développées dans la littérature, on utilise dans cette étude la méthode de perturbation et observation (*P&O*).

La méthode *P&O* est généralement la plus utilisée dans le milieu industriel en raison de sa simplicité et sa facilité d'implémentation. Son principe est basé sur la perturbation du système (en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement) et sur l'observation de son effet sur la puissance de sortie (figure 4.2)

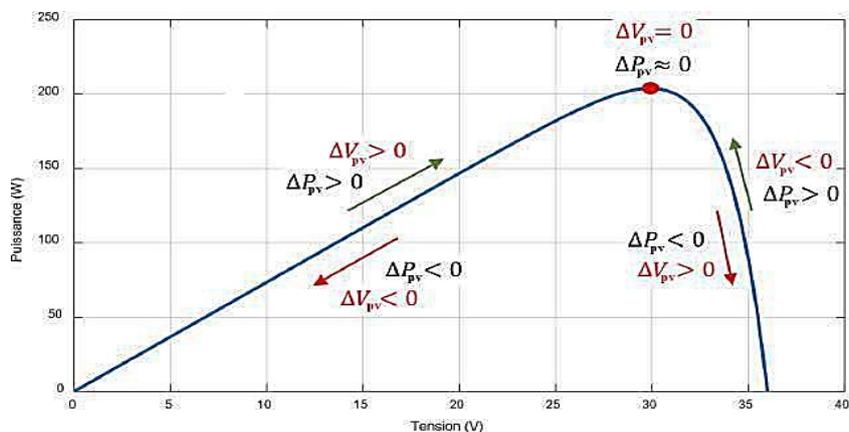


Figure 4.2 : caractéristique de l'organigramme de la méthode P&O [47].

La figure 4.3 représente l'organigramme de la méthode P&O.

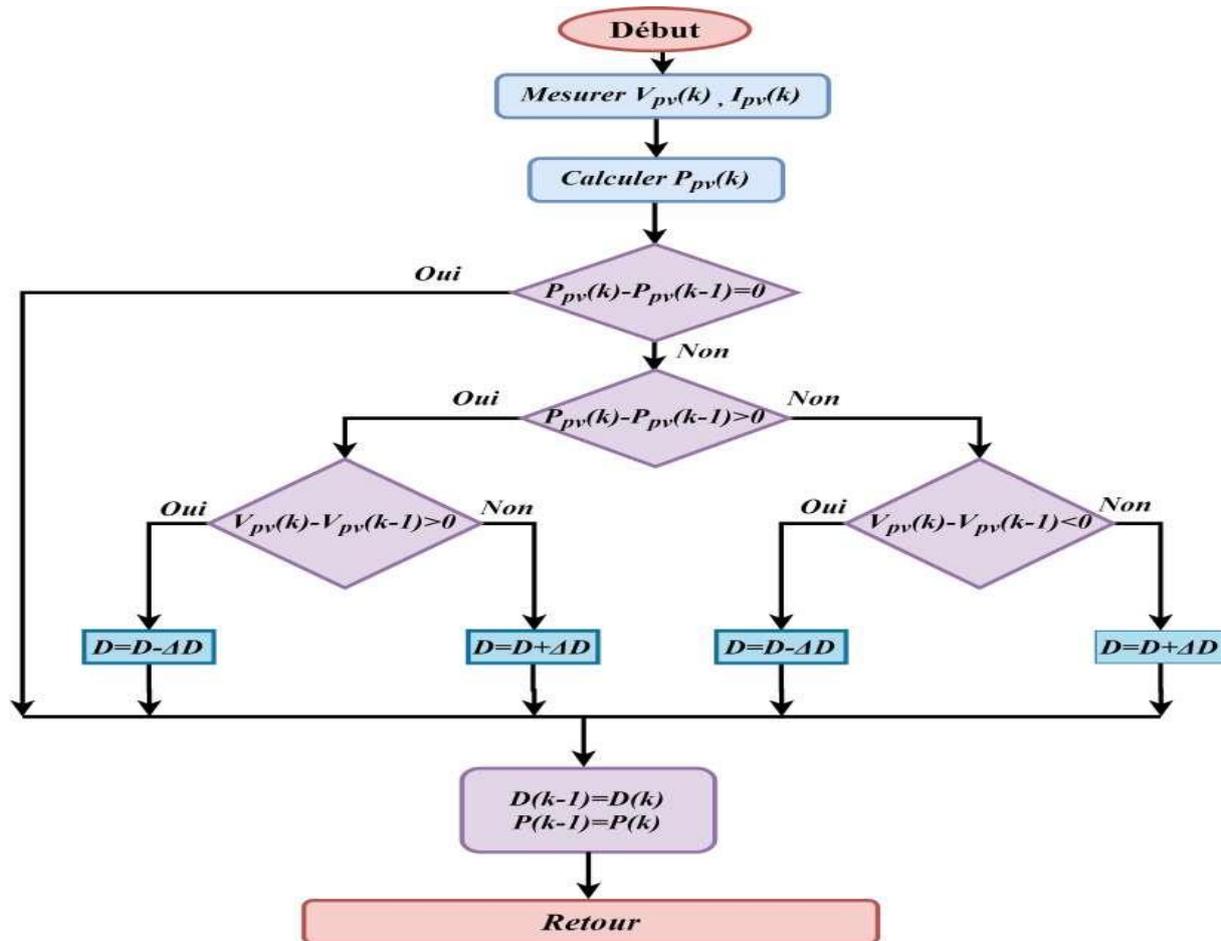


Figure 4.3: Organigramme de la méthode P&O.

4.5 Le module de supervision

Dans un système photovoltaïque il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part.

A cet effet, le module de supervision sera chargé de gérer l'énergie provenant des panneaux PV et du stockage suivant la demande du consommateur qui est la charge dans notre cas.

Le système de gestion d'énergie, est basé sur trois scenarios :

- Alimentation de la charge à travers le convertisseur boost et le stockage de l'énergie excédentaire si la puissance délivré par le générateur PV est suffisante (journée ensoleillée).
- Alimentation de la charge par le convertisseur boost et la batterie de stockage si la

puissance délivré par le générateur PV est insuffisante (temps nuageux).

- Alimentation de la charge par la batterie de stockage si la puissance délivré par le générateur PV est nulle (mode nuit).

On adopte la convention suivant lorsque le courant est fourni par la batterie, alors il est négatif et lorsqu'elle se charge le courant est positif.

On pose : $P = P_{pv} - P_{ch}$

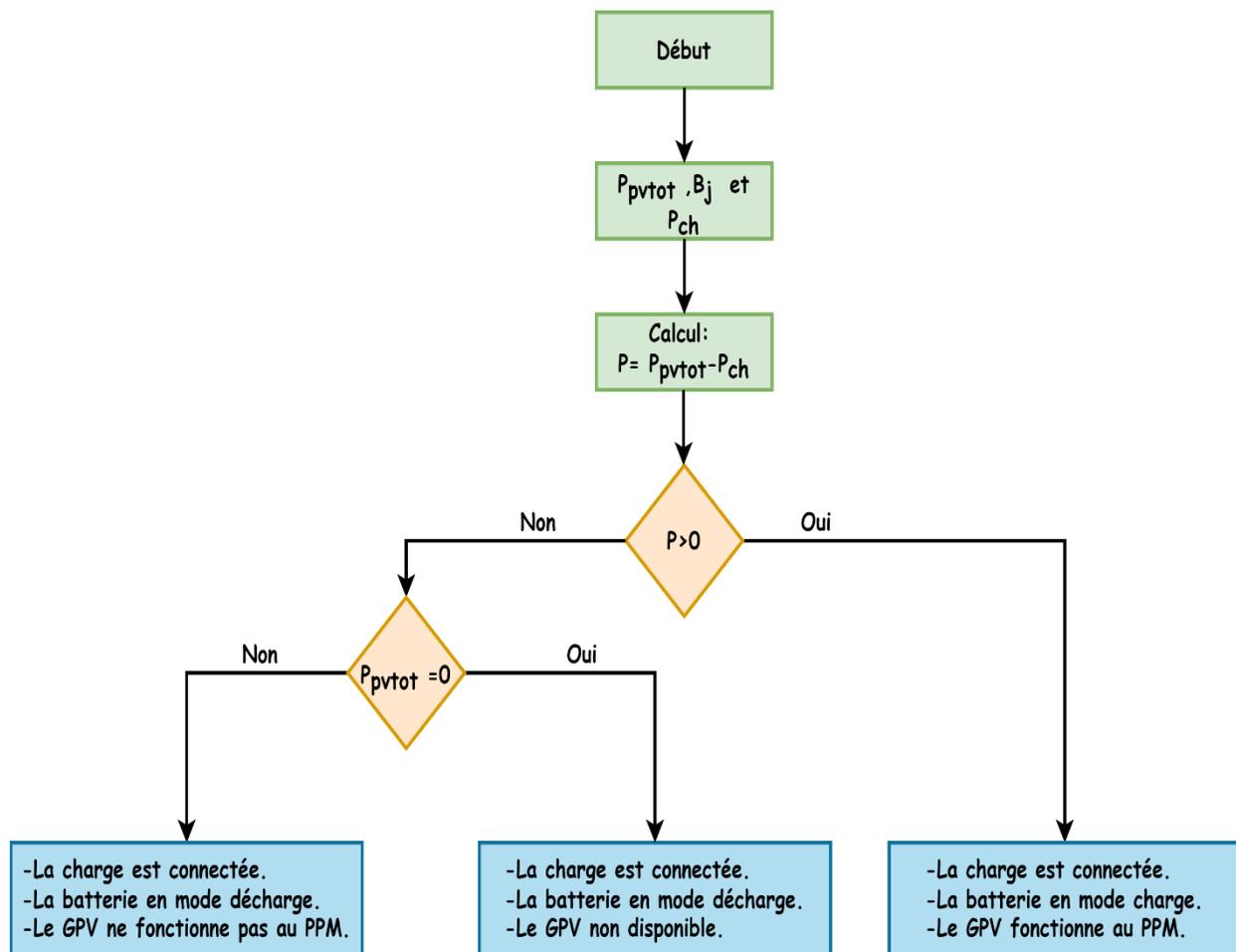


Figure 4.4: Principe de gestion de l'énergie par le module de supervision.

4.6 Résultats de simulation

Afin de valider notre travail, le système photovoltaïque autonome fonctionnant à puissance maximale assurant le stockage d'énergie et la régulation de tension de sortie a été simulé par un programme Simulink que nous avons réalisé en utilisant la plateforme Matlab/Simulink.

La figure suivante représente le modèle simulink du système étudié.

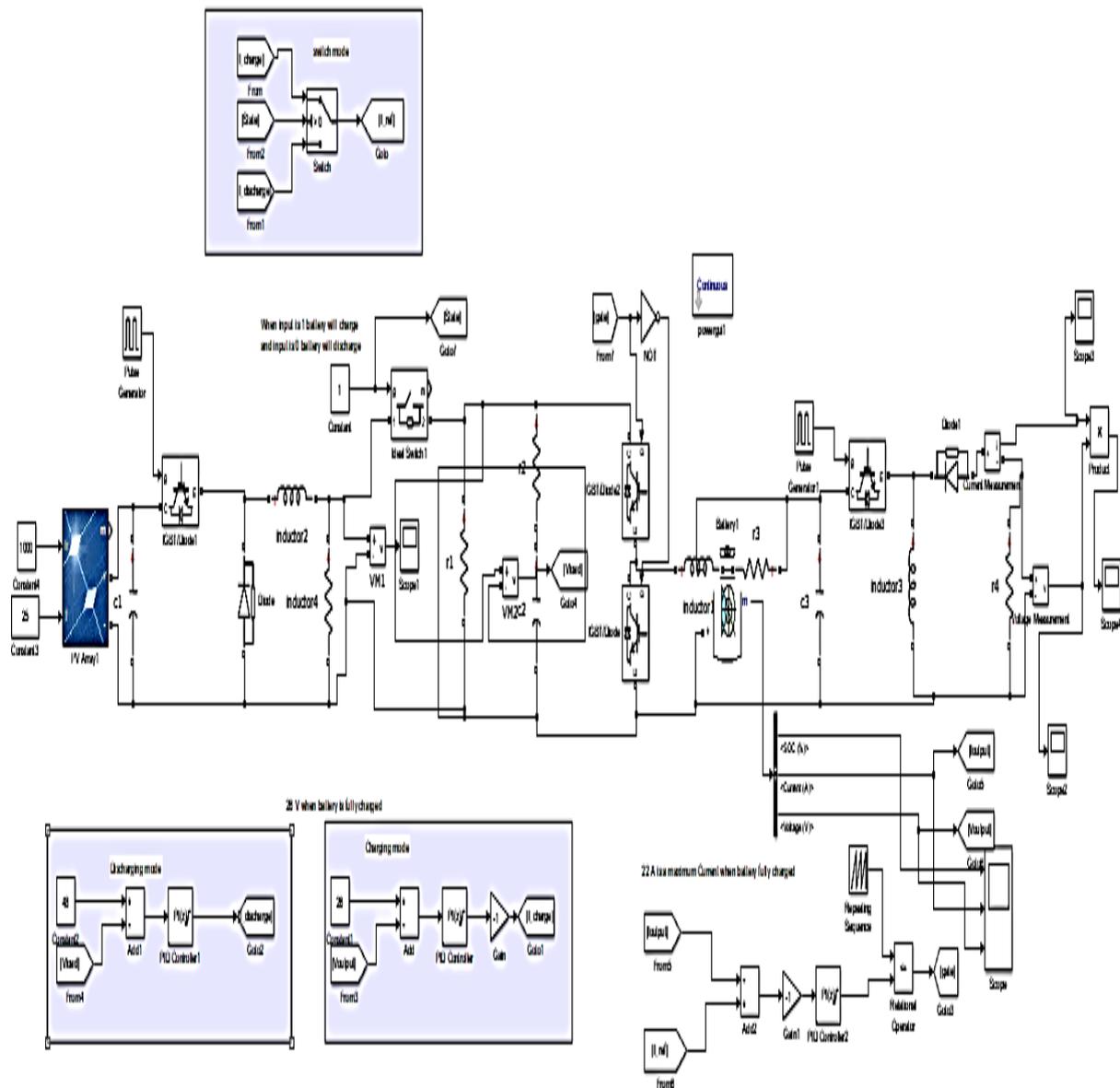


Figure 4.5 : Modèle Simulink du système PV

4.6.1 Simulation dans les conditions standards

Les figures suivantes représentent les caractéristiques du générateur photovoltaïque dans les conditions de fonctionnement standard ($G=1000W/m^2$, $T_a=25^\circ C$). Les caractéristiques puissance-tension et courant-tension du générateur PV sont représentés par les figures (4.6) et (4.7)

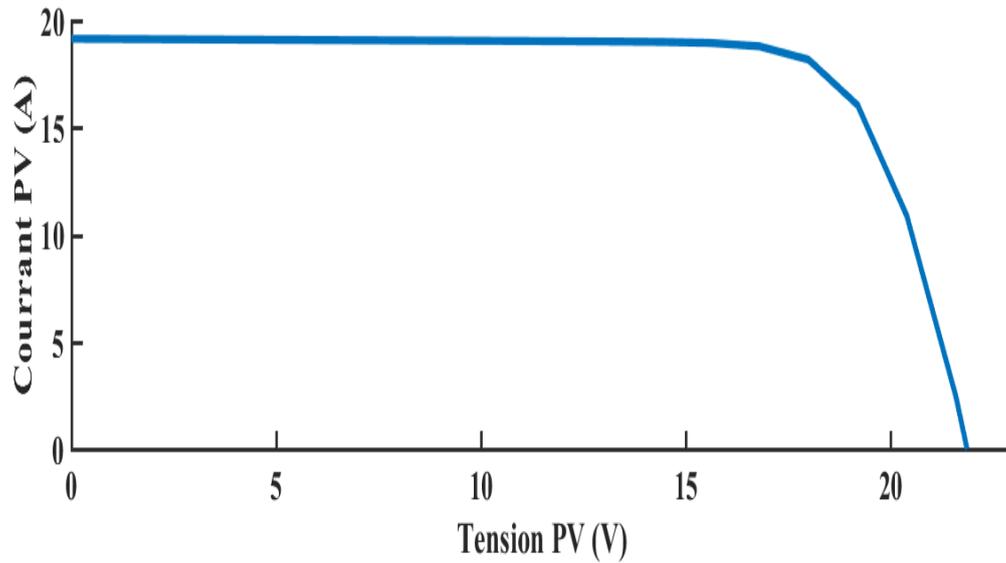


Figure 4.6 : Caractéristique courant –tension du générateur PV.

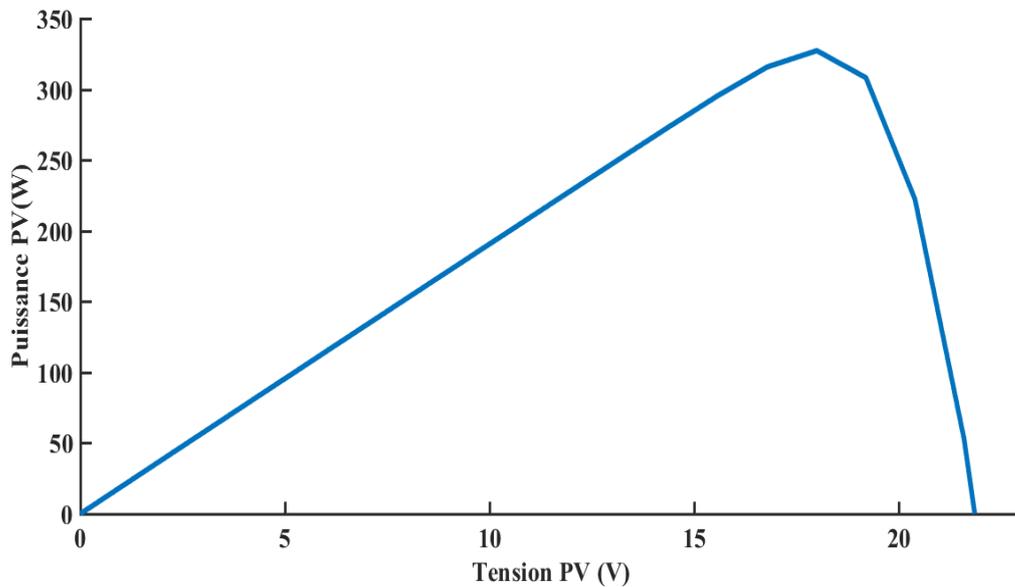


Figure 4.7 : Caractéristique puissance –tension du générateur PV.

Les réponses de la puissance délivrée par le générateur PV, la puissance de sortie du convertisseur boost est présenté sur la *figure (4.8)*.

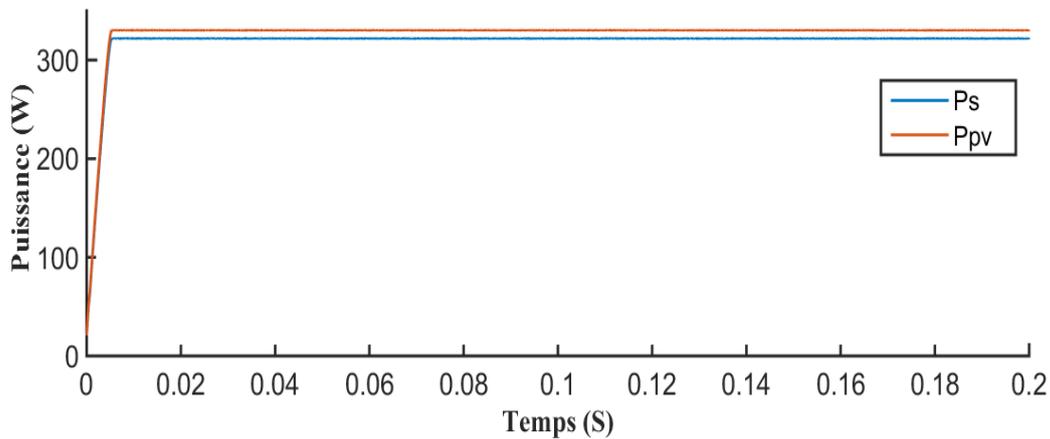


Figure 4.8 : Puissances du GPV et puissance de sortie.

Les réponses de la tension délivrée par le générateur PV et la tension de sortie du convertisseur boost est présenté sur la figure (4.9).

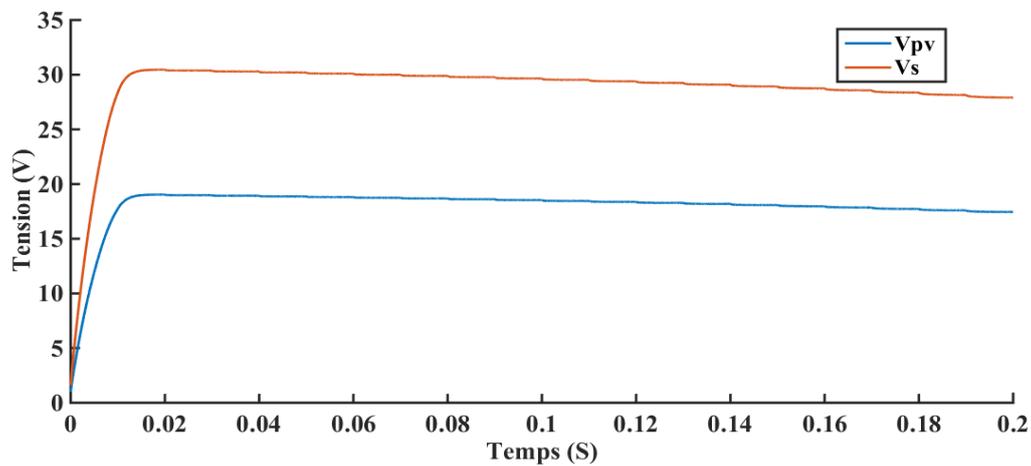


Figure 4.9 : Tension du GPV et tension de sortie.

La figure (4.10) représente les réponses du courant délivrée par le générateur PV et du courant de sortie du convertisseur boost.

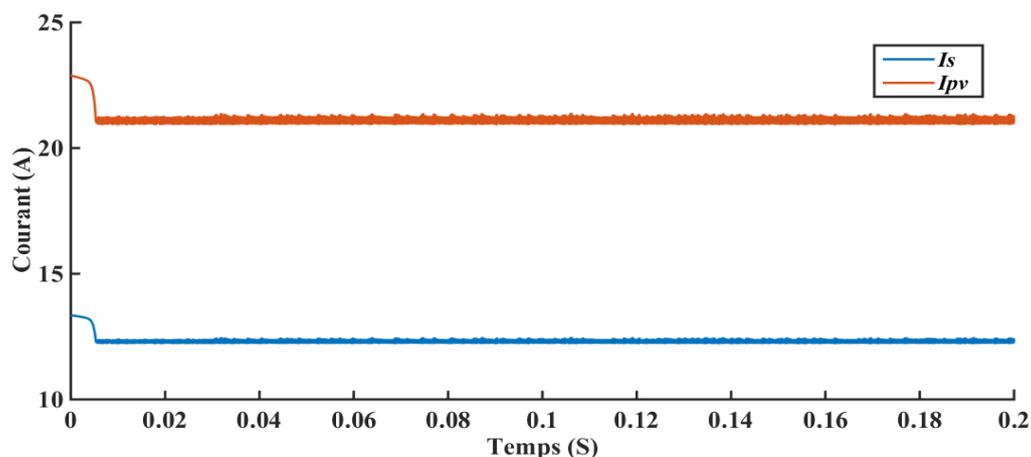


Figure 4.10 : Puissances du GPV et puissance de sortie.

La figure (4.11) représente les réponses de la tension de la batterie et la tension de référence.

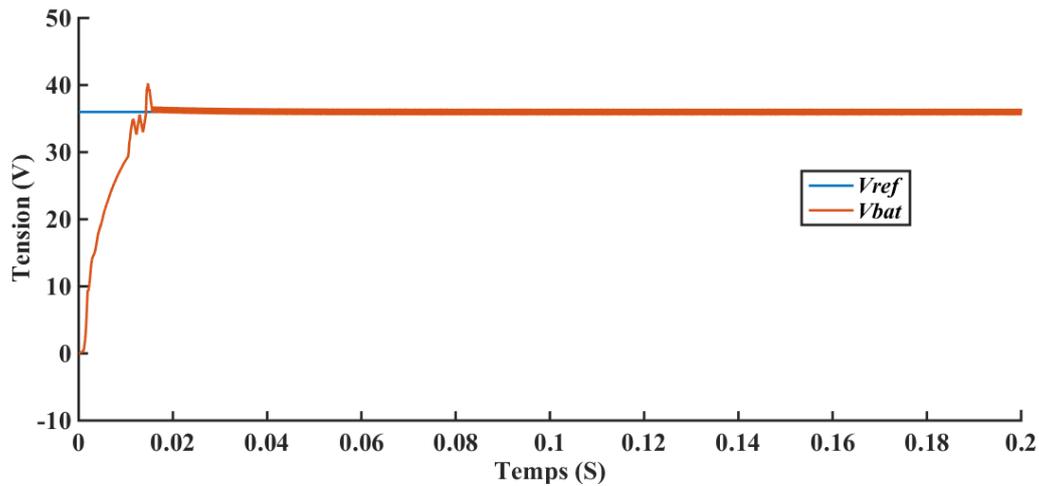


Figure 4.11 : Tension de la batterie et tension de référence.

Les figures (4.12) et (4.13) représentent respectivement l'état de charge et le courant de la batterie.

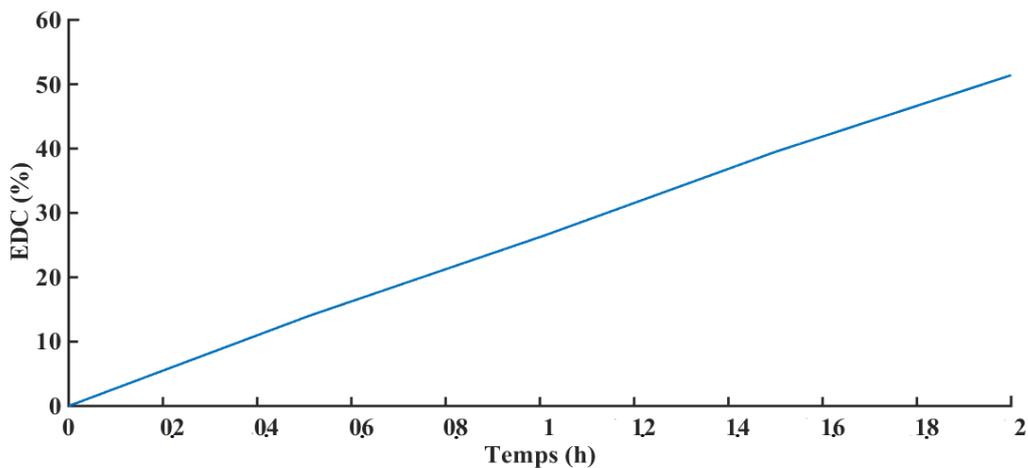


Figure 4.12 : Etat de charge de la batterie.

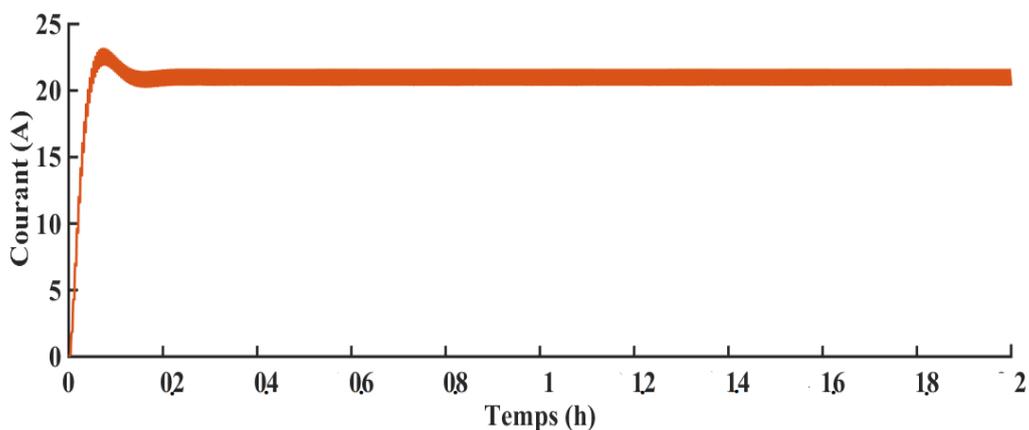


Figure 4.13 : Courant de la batterie.

Initialement, la batterie se décharge à travers la charge jusqu'à ce que la puissance des panneaux photovoltaïques P_{pv} devienne supérieure ou égale à celle de la charge. A ce moment la charge est alimentée via le convertisseur boost et la batterie sera chargée à travers du convertisseur buck.

4.6.2 Simulation dans les conditions aléatoires

Pour voir le comportement de notre système, nous l'avons simulé à différents niveaux d'ensoleillement et on garde la température ($T=25^{\circ}C$).

La figure (4.14) représente le profil d'irradiation tandis que les réponses de la puissance délivrée par le générateur PV, la puissance de sortie du convertisseur boost sont présentés sur la figure (4.15).

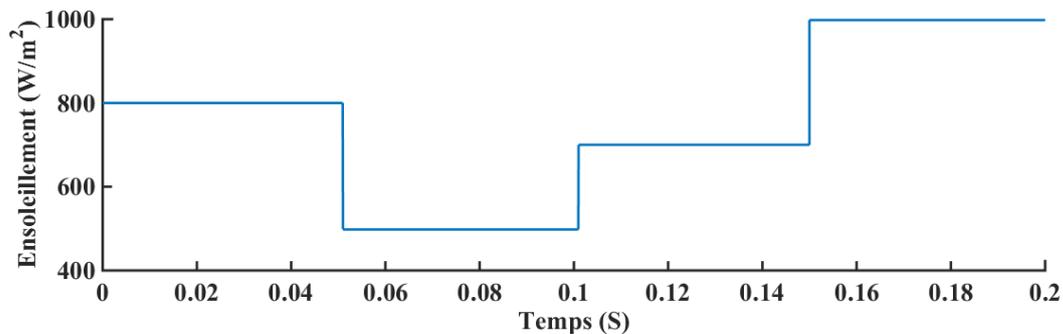


Figure 4.14 : Profil d'ensoleillement solaire.

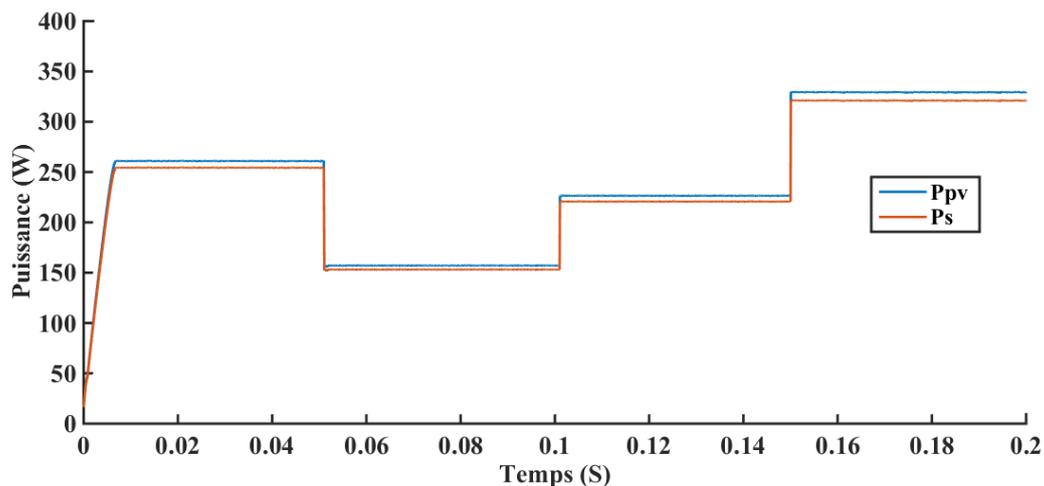


Figure 4.15 : Puissances du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement.

Les réponses de la tension délivrée par le générateur PV et la tension de sortie du convertisseur boost pour différents niveaux d'ensoleillement est présenté sur la figure (4.16).

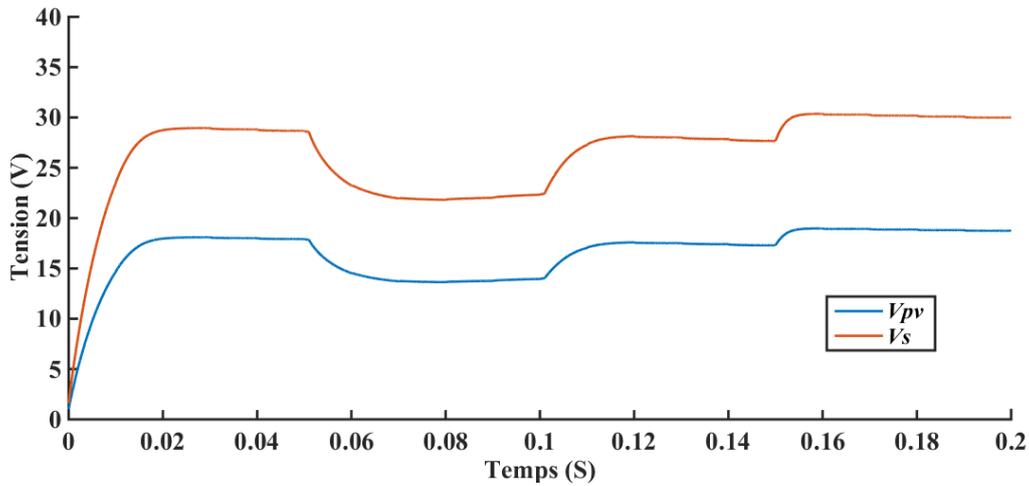


Figure 4.16 : Tensions du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement.

Les réponses du courant délivré par le générateur PV et du courant de sortie du convertisseur boost pour différents niveaux d'ensoleillement est présenté sur la figure (4.17).

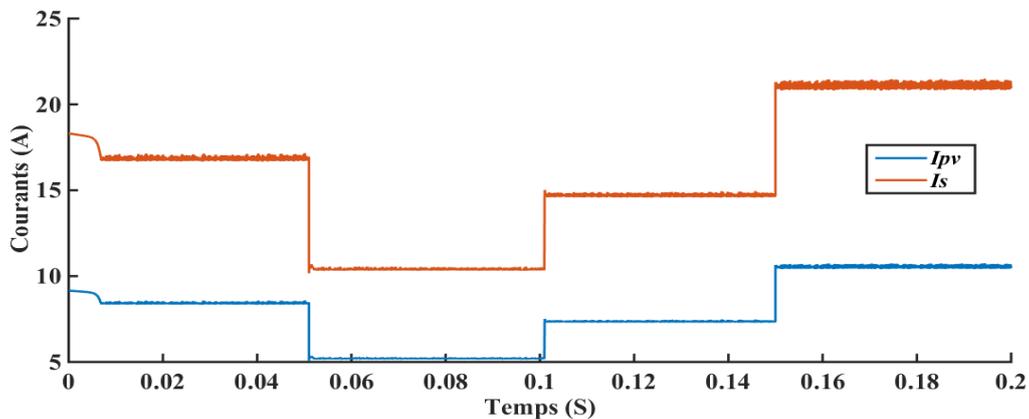


Figure 4.17: Courants du GPV et puissance de sortie pour différents niveaux d'ensoleillement.

La figure (4.18) représente l'état de charge de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement.

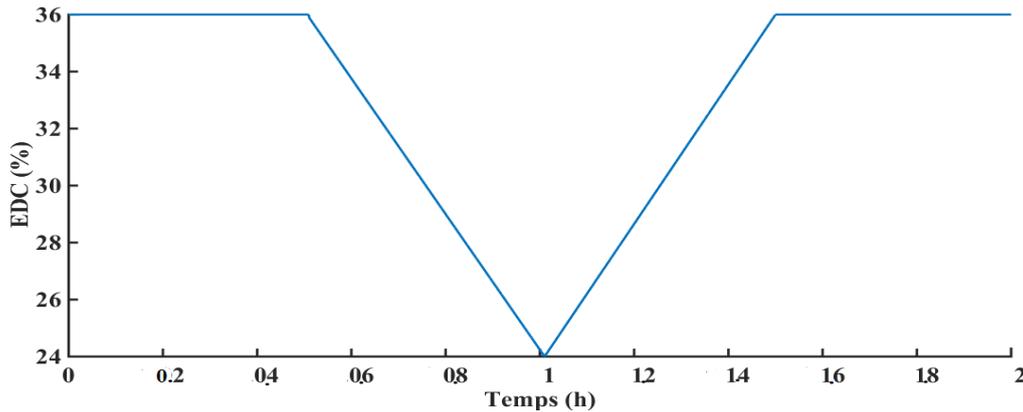


Figure 4.18 : Etat de charge de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement.

Le courant de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement est représenté sur la figure (4.19).

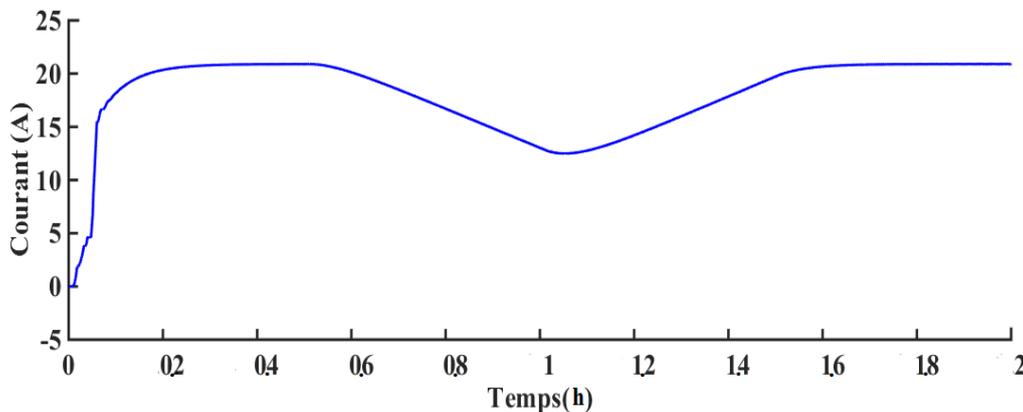


Figure 4.19 : Courant de la batterie pour différents niveaux d'ensoleillement.

Après les résultats obtenus on remarque que la gestion du flux d'énergie est correctement assurée par le module de supervision. Les batteries se chargent quand la puissance délivrée par le générateur PV est suffisante. Le superviseur se met en mode chargeur de batterie et le courant de la batterie est positif. Durant les périodes de production insuffisante, les batteries interrompent leurs cycles de charge et fournissent le supplément d'énergie et complètent ainsi l'énergie exigée par la charge.

4.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une présentation du système étudié et le dimensionnement de ce dernier pour alimenter une charge résistive et fonctionner en MPPT, assurant le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries qui maintiennent la continuité du transfert d'énergie à la charge surtout lorsque conditions environnementale varient. Les résultats obtenus montrent que le système proposé maintient une tension constante aux borne de la charge quelques soient les perturbations de à l'ensoleillement solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome couplé à une batterie de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue. Ce système fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur *DC/DC* commandé par *MPPT*.

Nous avons rappelé dans le premier chapitre la structure physique et le principe de fonctionnement d'une cellule PV, et les différents modèles mathématiques d'une cellule PV et retenu le modèle à simple diode avec cinq paramètres pour la modélisation du générateur PV considéré. Ensuite a été simulé pour déterminer les caractéristiques courant et puissance en fonction du temps ce qui nous a permis de présenter les influences des différents paramètres sur ces caractéristiques, Le groupement série, parallèle ou mixte des modules PV pour l'augmentation de la tension et/ou le courant du module considéré a été abordé à la fin de ce chapitre.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre on décrit les différents systèmes de stockage d'énergie. Ensuite, on aborde les technologies et les types de batteries ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, on présente les différents modèles de la batterie.

Dans le troisième chapitre est présenté le modèle *CIEMAT* de la batterie pour simuler son fonctionnement, et dans la deuxième partie on a étudié les convertisseurs *DC/DC* utilisés dans la conversion d'énergie solaire photovoltaïque.

Le dernier chapitre est présenté système étudié et le dimensionnement de ce dernier pour alimenter une charge résistive et fonctionner en *MPPT*, assurant le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries qui maintiennent la continuité du transfert d'énergie à la charge surtout lorsque les conditions environnementales varient. Les résultats obtenus montrent que le système proposé maintient une tension constante aux bornes de la charge quelque soient les perturbations de l'ensoleillement solaire.

Enfin nous suggérons comme perspectives d'améliorer et de développer nos résultats ajoutés l'étage des onduleurs pour générer des dispositifs de courant alternatif (*AC*).

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : **Belhadj Mohammed**, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Centre Universitaire De Bechar, Mémoire De Magister.
- [2] : **Abbassen Lyes**, « Etude De La Connexion Au Réseau Electrique D'une Centrale Photovoltaïque ». Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Mémoire De Magister Soutenu Le 05/05/2011.
- [3] : **Belhadj Mohammed**, « Modelisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister 2007/2008, Universitaire De Bechar.
- [4] : **NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari**, « Production d'énergie électrique à Partir d'un système photovoltaïque », mémoire master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, Soutenu publiquement, le 02 /07 /2019].
- [5] : **Akassawa Tchapo SINGO**, « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage Hybride pour l'habitat Energétiquement autonome », université Henri Poincaré, thèse de Doctorat.
- [6] : **M.Drif, A.Malek et F.Krim**, « Expérimentation d'un contrôleur de l'état de charge de la Batterie dans un système photovoltaïque autonome » Revue des. Energies Renouvelable.
- [7] : **Bouchareb Khalil et Touati Ayyoub**, « modélisation et simulation d'un système PV Adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant ».
- [8] : **Thomas Mambrini**, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en Conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie », Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
- [9] : **Bouزيد Allah El Moubarak**, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour L'alimentation d'une ferme (Etude de l'onduleur triphasé li a cette application) », Mémoire d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2008.
-

- [10] : **Zerguine B**, « Modelisation d'un système de production électrique par la cellule Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [11] : **B. Equer**, « Energie solaire photovoltaïque (volume 1 : physique et technologie de la Conversion photovoltaïque) », 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [12] : **Mehdi M**, « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le Réseau électrique », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2010.
- [9] : **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.
- [13]: **Widalys De Soto, Sanford a Klein ET William a Beckman**, « Improvement and Validation of a model for photovoltaic array performance». Solar energy, vol. 80, no. 1, Pages 78-88, 2006. (Cite en page 33.)
- [14]: **Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli et Ernesto Ruppert Filho**, « Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays». IEEE Transactions on power électroniques, vol. 24, no. 5, pages 1198-1208, 2009. (Cité en Page 33.)
- [15] : **BENSEDDIK.O, DJALOU.D.F**, «Etude et optimisation d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [16] : **Mohammed Souheyb Belhadj**, « Étude et réalisation d'un système de pompage Photovoltaïque », PhD thèses, Université Abou-Bekr Belkaïd à Tlemcen, 2019. (Cité en Page 22.).
- [17] : **B. MULTON, J. RUER.**, « Stocker L'électricité : Oui, C'est Indispensable Et C'est Possible. Pourquoi, Ou, Comment ? », Publication ECRIN En Contribution Au Débat National Sur L'énergie, Avril 2003.
- [18] : **Mr : Mazouz Karim** « Etude D'une Batterie De Stockage Dans Un Système Photovoltaïque », mémoire master, Université Abderrahmane-Mira-Bejaia, 2012.
- [19]: **E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte et al., Modelling**,« Ni-mH battery using Causer and Foster structures», Journal of Power Sources, Vol. 158, Issue 2, Pages 1490-1497, 2005.
-

- [20] : **M. Urbain**, «Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-ion. Estimation en ligne du SoC et du SoH», Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [21]: **M. Sarvi, M. Masoum**, « A neural network model for Ni-Cd batteries», IEEE Universities Power Engineering Conference, Pages 1-5, 2008.
- [22]: **S. Tian, M. hong, M. Ouyang**, « An experimental study and nonlinear modeling of Discharge I-V behavior of VRLA batteries», IEEE transactions on Energy Conversion, Vol. 24, Issue 2, Pages 452 – 458, 2009.
- [23] : **Olivier GERGAUD**, « caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour Batteries stationnaires de secours», Université de Montpellier II thèse de doctorat Soutenue le 14.12.2009.
- [24] : **Loïc BOULON**, « Modélisation Multiphasique Des Eléments De Stockage Et De Conversion D'énergies Pour Les Véhicules Electriques Hybrides. Approche Systémique Pour La Gestion D'énergie »Université De Franche-Comté, Thèse De Doctorat Soutenue Le 3/7/2009.
- [25] : **Guillaume Fontès**, « Modélisation Et Caractérisation De La Pile PEM Pour L'Étude Des Interactions Avec Les Convertisseurs Statiques ». Institut National Polytechnique De Toulouse, Thèse De Doctorat Soutenue Le 16/08/ 2005.
- [26] : **B. MULTON, J. RUER.**, « Stocker L'électricité : Oui, C'est Indispensable Et C'est Possible. Pourquoi, Ou, Comment ? », Publication ECRIN En Contribution Au Débat National Sur L'énergie, Avril 2003.
- [27] : **E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte et al.** «158, Issue 2, Pages 1490-1497, 2005».
- [28] : **E. Kuhn**, « Contribution à la conception optimale d'une motorisation hybride parallèle : Choix d'un modèle d'accumulateur», thèse de l'UTC, 2004.
- [29]: **Martin Coleman, Chi Kwan Lee, Chunbo Zhu, and William Gerard Hurley**, « State-of Charge Determination from EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries». Revue IEEE. VOL. 54, NO. 5, Octobre 2007
- [30] : **Dinh Vinh Do**, «Diagnostic De Batteries Lithium Ion Dans Des Applications Embarquées», Université De Technologie De Compiègne, Thèse De Doctorat Soutenue Le 5 Juillet 2010.
-

- [31]: **Baskar Vairamohan**, «State of charge estimation for batteries», Université De Tennessee, Knoxville, Mémoire De Master Soutenu En Décembre 2002.
- [32]: **KIAL ALI** et **LAHMAR OMAR FAROUK** « Intitule du sujet Techniques de Détection des défauts dans un panneau photovoltaïque », mémoire master université Abdelhamid Ibn Badais Mostaganem, 2019.
- [33]: **Maxime montaru**, « contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de Puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages». Institut Polytechnique de greoble, thèse de doctorat soutenue le 06.07.2009.
- [34]: **Din Vinh Do**, «diagnostic de batteries lithium ion dans des applications embarquées »; Université de technologie de compiègne, thèse de doctorat soutenue le 5 juillet 2010.
- [35]: **N. A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen et al.**, **Algorithms** for advanced battery-Management systems, IEEE Constrol Systems Magazine, Vol. 30, Issue 3, Pages 49-68, 2010.
- [36]: **W.F. Fang, O. Kwon, C. Wang et al.**, **modeling** « of Li-ion battery performance in Hybrid electric vehicles», SAE Int. J. Passeng. Cars –Electron. Electr. Syst., Volume 2, Issue 1, Pages 418-423, 2009.
- [37]: **T. Dao, C.P. Vyasarayani, J. McPhee**, «Simplification and order reduction of lithium-Ion battery model based on porous-electrode theory», Journal of Power Sources, Vol. 198, Pages 329-337, 2012.
- [38]: **M. Chen, G. A. Rincon-Mora**, «Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting runtime and I-V performance», IEEE transactions on Energy Conversion, Vol. 21, Issue 2, Pages 504 – 511, 2006.
- [39]: **Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec et al.**, «A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures», Control Engineering Practice, Vol. 7, Issue 10, Pages 1190-1201, 2009.
- [40]: **A. Munkherjee**, «Advances in battery management using neural networks and fuzzy Logic», Cornell University, 2003.
- [41]: **W. Luis, C. Delacourt, C. Forgez, S. Pelissier**, « Study of graphite/NCA Li-ion cell Degradation during accelerated aging tests – data analysis of the SimStock Project», IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Pages 1-6, 2011.
- [42]: **A. Jossen**, «Fundamentals of battery dynamics, Journal of Power Sources», Vol. 154, Issue 2, Pages 530-538, 2005
-

- [44] : **Olivier GERGAUD**, «Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Accumulateur ». Ecole Normale Supérieure De Cachan, thèse De Doctorat Soutenue Le 9 Décembre 2002.
- [43] :**A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm**, « Modélisation D'un Système De Stockage Intégré Dans Un Système Hybride (PV / Eolien / Diesel) ». Revue Des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.
- [45] : **Dhaouadi GUIZA**, « Contribution à l'Etude et Commande d'un Système Photovoltaïque », Université 20 Aout 1955 – Skikda, Thèse de doctorat Soutenue le 11/10/2020.
- [46] : **SPIROV Dimitar, Lazarov Vladimir, Roye Daniel, Zarkov Zahari, Mansouri Omar**, Université Technique de Sofia, 8 Kliment Ohridski, Sofia 1000, Bulgarie, G2ELab, UMR 5269 INPG-UJF-CNRS, ENSIEG - BP 46 – 38402, Saint-Martin-D'Hères.
- [47] : **F. Salma**, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, 2011.
-