



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Maintenance en Electromécanique industrielle

Thème

Modélisation et contrôle d'un générateur photovoltaïque actif à stockage intégré

Présenté et soutenu publiquement par :

MOUCER Massinissa

et

HARZOUN Belkacem

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
LALAOUI Med El Amine	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Président
CHOUITEK Mama	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
BELKACEM Belkacem	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

*On tient avant tout à remercier dieu qui nous a aidés et donnés la
volonté et la résistance pour réaliser ce travail.*

*On tient particulièrement à remercier Madame Chouitek
Mama, pour avoir accepté d'assurer l'encadrement de ce travail*

*Nous adressons nos vifs remerciements aux membres de jury,
d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*On a le plaisir de remercier toute personne, qui de près ou de loin a
généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*À mes chers parents pour leur soutien, je leur exprime tout ma tendresse et
ma gratitude. Que Dieu les protège.*

À la mémoire de ma grand-mère.

À mon oncle.

À mes sœurs.

À mes frères.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À tous mes amis.

À toute ma famille.

Enfin, à vous les lecteurs de ce mémoire.

HARZOUN BELKACEM

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*Mes très chers parents, pour leur sacrifice, ils n'ont jamais cessé de
m'encourager. Que le grand*

Dieu les protège.

A ma très chère sœur Bahdja

A mes très chers frères Ali et Youva

A toute ma famille

A mes très chers amis qui m'ont aidé de près

Ou de loin dans la réalisation de ce travail.

A tous ceux qui m'ont encouragé durant mon parcours d'étudiant.

MASSMSSA

Sommaire

Introduction générale :	2
Chapitre I : Etude théorique des systèmes de stockage d'énergie photovoltaïque.....	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Systèmes de stockage :	4
I.3 Techniques de stockage à court terme :	5
I.3.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Super conductor Magnetic Energy Storage) :	5
I.3.2 Stockage par Condensateurs à double couche : super condensateurs	5
I.3.3 Stockage sous forme d'énergie cinétique : volant d'inertie (flywheel) :	5
I.4 Techniques de stockage à long terme :	6
I.4.1 Stockage sous forme gravitaire :	6
I.4.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression)	7
I.4.3 Stockage sous forme thermique :	8
I.4.4 Stockage sous forme chimique.....	9
I.4.5 Comparaison entre les modes de stockage présentés	11
I.4.6 Principe du fonctionnement des Batteries	12
I.4.7 Les différents types de Batteries	13
I.4.7.1 La Batterie au plomb	13
I.4.7.2 La Batterie Nickel – Cadmium.....	14
I.4.7.3 La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)	15
I.4.7.4 La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion).....	15
I.4.7.5 La Batterie Nickel-NaCl.....	15
I.4.7.6 La Batterie Nickel-Zinc	16
I.4.8 Grandeurs caractéristiques des Batteries.....	16
I.4.8.1 Capacité de stockage	16
I.4.8.2 Rendement.....	17

I.4.8.2.1	Rendement faradique	17
I.4.8.2.2	Rendement énergétique.....	17
I.4.8.2.3	Tension à vide	17
I.4.8.2.4	Durée de vie	17
I.4.8.2.5	Profondeur de décharge	17
I.4.8.2.6	Autodécharge	18
I.4.8.2.7	L'état de charge.....	18
I.4.9	Différentes méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie.....	18
I.4.10	Méthode de la mesure de la densité de l'électrolyte	19
I.4.11	Méthode par intégration du courant (coulométrie)	20
I.4.12	Méthode de mesure de tension en circuit ouvert.....	21
I.4.13	Méthode utilisant la mesure d'impédance	22
I.4.14	Méthode adaptative	22
I.4.15	Modèles électriques de la Batterie	22
I.4.16	Modèle idéal	22
I.4.17	Modèle simplifié de la batterie.....	23
I.4.18	Modèle R-C de la batterie	24
I.4.19	Modèle de traction.....	25
I.4.20	Modèle de Thévenin.....	25
I.4.21	Modèle modifié de Thévenin	26
I.4.22	Modèle dynamique linéaire de Thévenin	27
I.4.23	Modèle dynamique non linéaire de Thévenin	27
I.4.24	Modèle dynamique de 4ème ordre	28
I.4.25	Modèle de CIEMAT.....	29
I.5	Conclusion	29
Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque.....		30
II.1	Introduction	31

II.2	Modélisation du système de conversion photovoltaïque.....	31
II.2.1	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	32
II.2.2	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	32
II.2.3	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	33
II.2.3.1	Modèle à une diode.....	33
II.2.3.1.1	Modèle à trois paramètres (modèle idéal).....	33
II.2.3.1.2	Modèle à quatre paramètres.....	34
II.2.3.1.3	Modèle à cinq paramètres(LP5).....	35
II.2.3.2	Modèle à deux diodes.....	36
II.2.4	Influence des paramètres sur les courbes d'une cellule :.....	37
II.2.4.1	Effet de la température :.....	37
II.2.4.2	Effet de l'éclairement :.....	38
II.2.4.3	Effet du facteur d'idéalité :.....	39
II.2.4.4	Influence de la résistance série R_s :.....	40
II.2.4.5	Influence de la résistance parallèle R_p :.....	40
II.3	Régulateur de charge.....	40
II.3.1	II.2.1 Définition :.....	40
II.3.2	Types des régulateurs de charge :.....	41
II.3.2.1	Régulateur de charge solaire avec technologie PWM (Pulse Width Modulation).....	41
II.3.2.2	Régulateur de charge solaire avec technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	42
II.3.2.3	Régulateur de type série :.....	43
II.3.2.4	Régulateur de type shunt :.....	43
II.3.3	Choix d'un régulateur solaire :.....	43
II.4	Onduleur (convertisseur).....	44
II.4.1	Définition.....	44
II.4.2	Rôle de l'onduleur.....	44

II.4.2.1	Fonction pratique	44
II.4.2.2	Fonction sécuritaire	44
II.4.3	Différents types d'onduleurs :	45
II.4.3.1	Les micro-onduleurs :	45
II.4.3.2	Onduleur string :	45
II.4.3.3	Onduleur central :	46
II.4.4	Principe de fonctionnement :	46
II.4.5	Caractéristiques d'un onduleur PV	47
II.5	Les différents types de systèmes photovoltaïques :	48
II.5.1	Système photovoltaïque connecté au réseau :	48
II.5.1.1	Injection totale sans stockage :	48
II.5.1.2	Injection totale avec stockage	49
II.5.2	Systèmes photovoltaïques autonomes	49
II.5.3	Système autonome sans stockage électrochimique	50
II.5.4	Système autonome avec stockage électrochimique	50
II.6	Le schéma synoptique :	51
II.7	Conclusion	51
Chapitre III : Simulation et résultat d'un système photovoltaïque à stockage intégré		53
III.1	Introduction :	54
III.2	Description de la simulation	54
III.3	Les différentes parties du système global	55
III.3.1	Système de distribution (réseau)	55
III.3.2	BESS	55
III.3.2.1	Principaux composants du système de contrôle BESS	55
III.3.2.1.1	Unité de resynchronisation	55
III.3.2.1.2	Contrôle du statisme	55
III.3.2.1.3	Mesure	56

III.3.2.1.4 Régulateurs de tension et régulateurs de puissance	56
III.3.2.1.5 Régulateurs actuels	56
III.3.2.1.6 Génération Vref.....	56
III.3.2.1.7 Compensateur de déséquilibre	56
III.3.3 Charge 600V	57
III.3.4 Centrale solaire.....	57
III.3.5 Résultats de simulation selon les tests effectués :	58
III.4 Conclusion	62
Conclusion générale :	64
Références bibliographiques	65

Listes de figures

Figure I-1 : Stockage par volant d'inertie.	6
Figure I-2: Principe de stockage gravitaire hydraulique.	7
Figure I-3 : Stockage à air comprimé en caverne.....	8
Figure I-4 : Système de stockage thermique.	9
Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule.	10
Figure I-6 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	11
Figure I-7 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.	14
Figure I-8 : état de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte.	20
Figure I-9 : Modèle idéal d'une batterie.....	23
Figure I-10 : Modèle simplifié de la batterie.....	23
Figure I-11 : Modèle R-C de la batterie.	24
Figure I-12 : Modèle de traction.	25
Figure I-13 : Modèle de Thévenin.....	26
Figure I-14 : Modèle modifié de Thévenin.	26
Figure I-15 : Modèle dynamique linéaire de Thévenin.....	27
Figure I-16 : Modèle dynamique non linéaire de Thévenin.....	28
Figure I-17 : Modèle dynamique du 4ème ordre.....	29
Figure II-1: Schéma équivalent électrique de la cellule PV.....	31
Figure II-2 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.	32
Figure II-3 : Caractéristique $P(V_{pv})$ d'une cellule PV.	33
Figure II-4 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Model idéal.....	33
Figure II-5 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (LP4).....	34
Figure II-6 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (L5P).....	35
Figure II-7 : Circuit électrique équivalent à double diode (2M7P).....	36
Figure II-8 : Effet de la température sur la courbe $I(V)$ d'une cellule PV.	38
Figure II-9 : Effet de la température sur la courbe $P(V)$ d'une cellule PV.	38
Figure II-10 : Effet de l'éclairement sur courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.	38
Figure II-11 : Effet de l'éclairement sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.	39
Figure II-12 : Effet du Facteur d'idéalité sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.....	39
Figure II-13 : Effet du Facteur d'idéalité sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule.	40
Figure II-14 : régulateur de charge.....	41
Figure II-15 : Schéma de principe du régulateur MPPT	42

Figure II-16 : régulateur de type série	43
Figure II-17 : Régulateur de type shunt	43
Figure II-18 : schéma synoptique de rôle de l'onduleur.	44
Figure II-19 : Onduleur module.	45
Figure II-20 : Onduleur string.	45
Figure II-21 : Onduleur centrale.....	46
Figure II-22 : Schéma de principe de fonctionnement d'un onduleur PV.	46
Figure II-23 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage	49
Figure II-24 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale avec stockage.	49
Figure II-25 : Exemple sur un système autonome sans stockage électrochimique.....	50
Figure II-26 : Exemple sur un système autonome avec stockage électrochimique.....	51
Figure II-27 : Schéma synoptique de système photovoltaïque de panneau jusqu'à la charge. 51	
Figure III-1 : schéma du système global.	54
Figure III-2 : schéma bloc des différentes composantes de bess.	57
Figure III-3 : schéma bloc de la station photovoltaïque.....	58
Figure III-4 : variation d'irradiation.....	58
Figure III-5 : tension de générateur photovoltaïque.....	58
Figure III-6 : courant de générateur photovoltaïque.	58
Figure III-7 : puissance du système global.....	59
Figure III-8 : fréquence de synchronisation de réseau avec la station photovoltaïque.	59
Figure III-9: tension du système de distribution.	60
Figure III-10 : déphasage de réseau avec la station photovoltaïque.	60
Figure III-11 : puissances du système global.....	60
Figure III-12 : variation d'irradiation.....	61
Figure III-13 : tension de générateur photovoltaïque.....	61
Figure III-14 : courant de générateur photovoltaïque.	61
Figure III-15 : variation des puissances sur les différentes parties du système	61

Liste des tableaux

Tableau I-1 : comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.	11
Tableau I-2 : Comparaison des caractéristiques techniques des batteries.....	16

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie renouvelable est d'une importance telle qu'elle est devenue un défi pour l'avenir des pays producteurs et consommateurs. Les pays technologiquement développés ont de plus en plus besoin de cette énergie, du fait de sa simplicité et sa disponibilité.

Les systèmes de stockage sont une partie indispensable dans les installations photovoltaïques du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique car ils représentent 40 à 50 % du coût de l'installation ; en plus dans ces systèmes les batteries sont les équipements les plus sensibles, fonctionnant souvent dans des conditions sévères qui sont les zones de travail indésirables. Ces zones sont (la zone de surcharge, saturation, décharge et d'épuisement) affectant la durée de vie de la batterie.

Il existe de nombreux types de batteries, qui varient selon leurs applications, telles que les batteries nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, et Lithium-ion, tandis que les batteries acides -plomb sont parmi les types les plus courants pour le stockage d'énergie renouvelable.

Dans les applications photovoltaïques, la batterie est soumise à un travail dynamique aléatoire résultant le changement continu de l'irradiation et de la température.

Dans ce contexte, notre travail est focalisé sur l'étude du système de stockage d'énergie et ses déférentes interventions sur la station photovoltaïque, le réseau, la charge. Ce manuscrit est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude théorique des systèmes de stockage d'énergie photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents circuits électriques du modèle à une seule diode et à deux diodes d'une cellule PV et les régulateurs, convertisseurs, ainsi que leurs modèles mathématiques.

Le dernier chapitre, sera destiné à la simulation sur laquelle on a effectué trois testes pour démontrer le rôle de système du stockage sur la station photovoltaïque et le réseau de distribution et la charge.

Enfin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale et quelques perspectives.

I. Chapitre I

Etude théorique des systèmes de stockage d'énergie photovoltaïque.

I.1 Introduction

Les moyens de stocker l'énergie électrique sont divers et variés et peuvent être classés dans différentes catégories en fonction de leurs performances (capacité de stockage, énergie/puissance, ...) et de leurs caractéristiques : stockage centralisé ou décentralisé, direct ou indirect. Le stockage est dit « centralisé » lorsque le moyen de stockage est couplé au réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est « décentralisé » lorsque le dispositif de stockage est embarqué dans un dispositif mobile et autonome en termes d'énergie. On distingue également le stockage direct et indirect. Pour le stockage « direct », l'énergie est stockée sous sa forme électrique. Dans le cas d'un stockage « indirect », l'énergie est stockée sous une autre forme : électrochimique, mécanique ou gazeuse (air, hydrogène), nécessitant une conversion réversible pour passer d'une forme à une autre.

I.2 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. [1]

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 : [2] [3]

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

I.3 Techniques de stockage à court terme :

I.3.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Super conductor Magnetic Energy Storage)

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. La bobine court-circuitée permet de stocker l'énergie sous forme de $\frac{1}{2}LI_{sp}^2$.

Avec L l'inductance de la bobine et I_{sp} le courant la traversant.

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 de l'ordre de 10 – 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW.[4]

I.3.2 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 très inférieure à celle des autres sources de puissance : seulement de 3 à 7 Wh/kg ! Compte tenu par ailleurs des considérations de poids et d'encombrement, on n'arrive ainsi qu'à une ou deux centaines de wattheures d'énergie. [5]

I.3.3 Stockage sous forme d'énergie cinétique : volant d'inertie (flywheel)

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 inertiel 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. [3] [5].

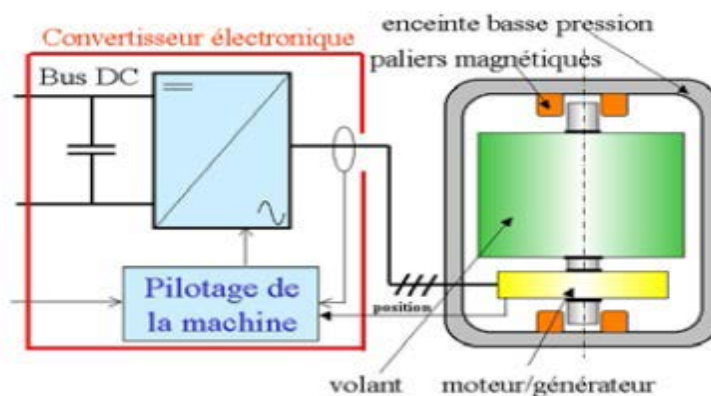


Figure I-1 : Stockage par volant d'inertie.

I.4 Techniques de stockage à long terme

I.4.1 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 fournit jusqu'à 1000 MW, sauf qu'elle est conditionnée 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%. [3]

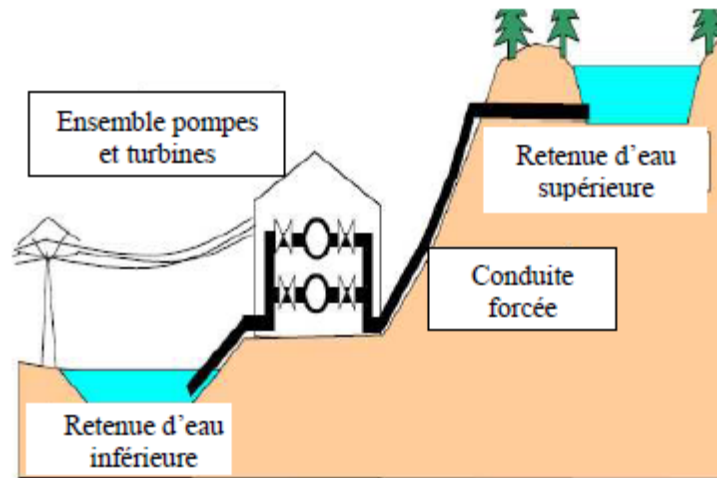


Figure I-2: Principe de stockage gravitaire hydraulique.

I.4.2 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 kWh d'électricité durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage. [4]

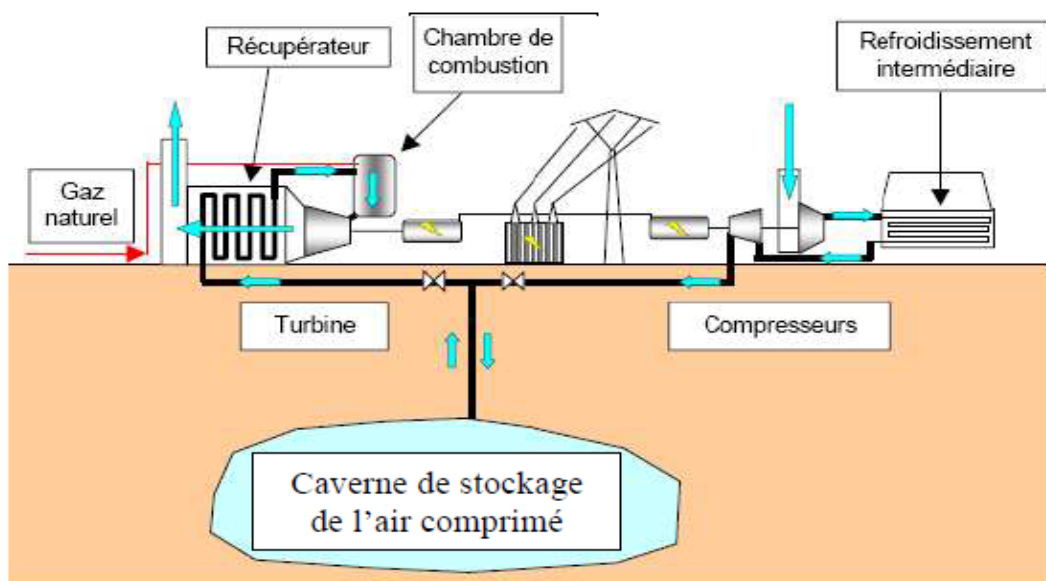


Figure I-3 : Stockage à air comprimé en caverne.

I.4.3 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 résistances nécessaires existent. 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. [7] [3]

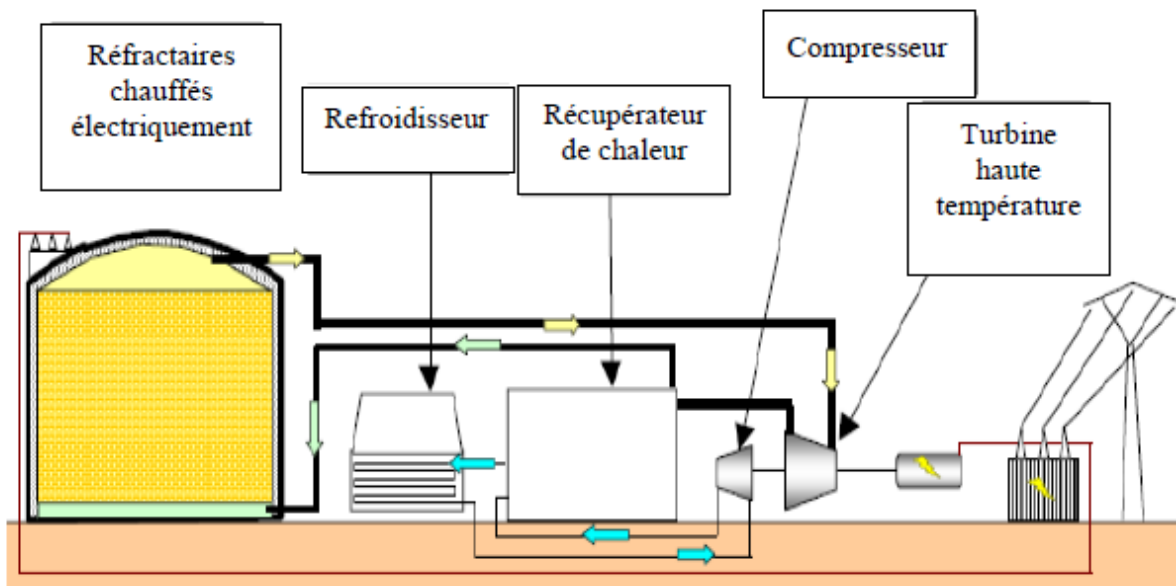


Figure I-4 : Système de stockage thermique.

I.4.4 Stockage sous forme chimique

1. Les Batteries

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière. [2]

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 la 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. [4]

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, elle 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 liées 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. [8]

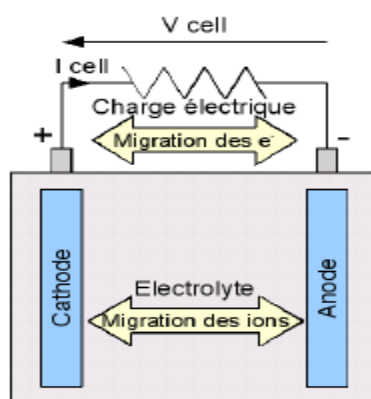


Figure I-5 : Principe de fonctionnement d'une cellule.

2. Les piles à combustibles

La pile à combustible est parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée. 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. [9]

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, elles sont 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. [8]

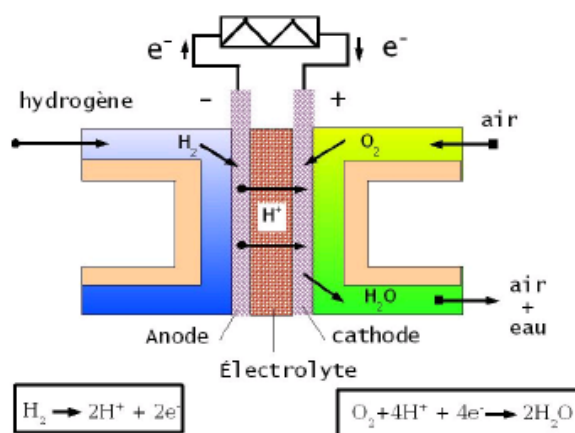
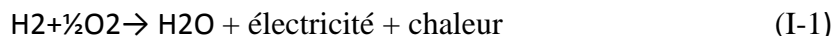


Figure I-6 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

La réaction globale s'écrit :



I.4.5 Comparaison entre les modes de stockage présentés

Tableau I-1 : comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.

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

- 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 coût/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité. [2] [3]

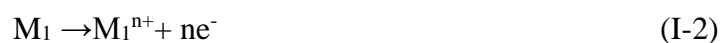
Vu tous les avantages présentés par le stockage par batteries, leur association au système photovoltaïque est presque impératif dans les systèmes de production décentralisée.

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.

I.4.6 Principe du fonctionnement des Batteries

Deux électrodes plongeant dans un électrolyte constituent une chaîne électrochimique. Des lames métalliques de nature différente peuvent jouer, par exemple, le rôle d'électrodes. La chaîne électrochimique joue le rôle d'un générateur de courant par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. C'est au niveau de ces électrodes que se passent les réactions électrochimiques. On peut décrire en générale ces réactions comme suit [10] :

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation pendant la décharge et cela se caractérise par la formule suivante :



M_1 : étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés vont transiter via le circuit extérieur pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, là où se fait la réaction de réduction :



M_2 : étant l'espèce active de la cathode.

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :



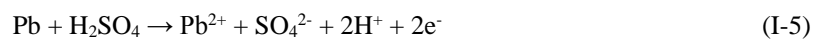
I.4.7 Différents types de Batteries

I.4.7.1 La Batterie au plomb

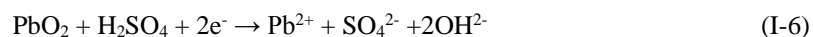
Elle se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte. L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO_2) et la négative en plomb (Pb).

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.

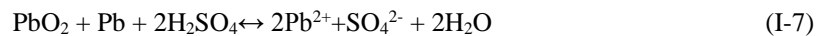
La réaction chimique au niveau de l'anode



La réaction chimique au niveau de la cathode



La réaction globale en partant du produit chimique PbO_2 , Pb, et H_2SO_4 est la suivante :



Cela se passe pendant la décharge et pour la charge ça se fait en sens inverse

La tension de ce type d'accumulateur est voisine de 2V.

On parle ici d'une cellule et 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 appelé batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif :

- les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité.
- si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre une valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène O_2 gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène H_2 gazeux à l'électrode négative.

[2][8][10]

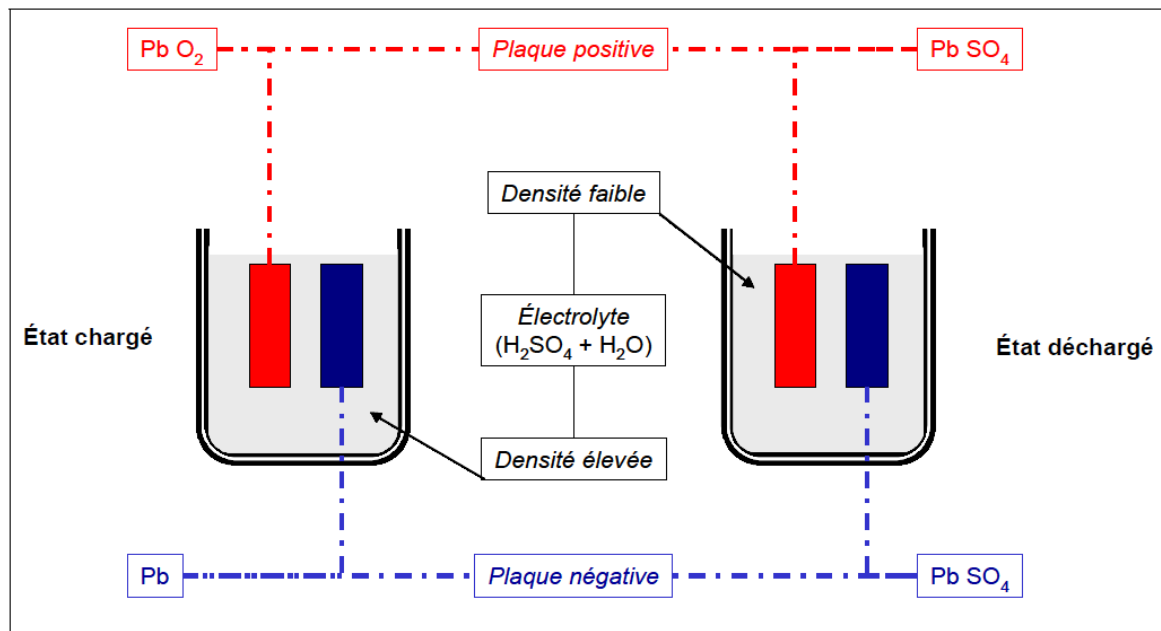
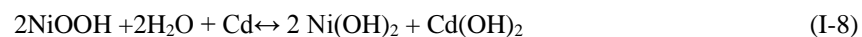


Figure I-7 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.

I.4.7.2 La Batterie Nickel – Cadmium

Les batteries Cadmium-Nickel sont réalisés à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et

Cadmium) immergés dans une solution de potasse. La réaction réversible globale est la suivante :



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative. L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants :

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
- supportent les décharges totales
- pas d'émanation toxique. [11]

I.4.7.3 La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH diffèrent des Ni-Cd de par la constitution de l'électrode négative, ici basée sur de l'hydrogène adsorbé dans un métal, Cette technologie apporte des améliorations intéressantes par rapport au Ni-Cd. Tout d'abord, l'énergie spécifique est plus élevée.

Ensuite, l'absence de cadmium rend le retraitement de l'accumulateur en fin de vie beaucoup plus aisé et une éventuelle rupture de la cuve moins problématique. Le coût de ce type de batterie reste malheureusement des plus élevés. Ces batteries ont été développées avec 3 objectifs :

- augmenter la capacité par unité de volume.
- favoriser les charges rapides.
- éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et est déjà interdit dans certains pays.

A part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces batteries ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire.

Ils sont même moins bons en ce qui concerne la tenue au froid. [12][8]

I.4.7.4 La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevées et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances. [13][11]

I.4.7.5 La Batterie Nickel-NaCl

Simple, de très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles et extrêmement robustes.

Ces accumulateurs fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisoirement arrêté mais pourrait bien reprendre. [11]

I.4.7.6 La Batterie Nickel-Zinc

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait le bienvenu et ces batteries ont une densité d'énergie élevée (25% plus que la batterie NiCd). La tension d'une cellule varie de 1.6 à 1.8 V. La durée de vie reste le problème majeur à résoudre. [11]

Il existe d'autres types de batteries qu'on n'a pas citées. On donne ci-dessous un tableau de comparaison entre quelques différents types batteries.

Tableau I-2 : Comparaison des caractéristiques techniques des batteries.

Technologie	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/Ion
Energie spécifique (Wh/kg)	35-50	50-60	70-95	60-130
Puissance spécifique (W/kg)	80-150	150-400	200-1000	500-4000
Rendement (%)	>80	75	70	>95
Nombre cycle	500-1000	800	750-1200	1000
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	Toxicité	Comportement en température	Le coût élevé

I.4.8 Grandeurs caractéristiques des Batteries

I.4.8.1 Capacité de stockage

La capacité de stockage C exprimée en ampères-heures représente 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 1/2 heure. [14]

Les courants de décharge, appelés aussi régime de décharge, utilisent la même nomenclature que la capacité C_n et sont définis de la manière suivante :

$$I_n = \frac{C_n}{n} \quad (\text{I-9})$$

I.4.8.2 Rendement

I.4.8.2.1 Rendement faradique

Le rendement en ampères-heures (ou faradique) η_f 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 (Ah récupérés lors de la décharge/ Ah fournis pendant la charge).

Pour la batterie au plomb il est supérieur à 90%. [11]

$$\eta_f = \frac{C_d}{C_c} \quad (\text{I-10})$$

I.4.8.2.2 Rendement énergétique

La définition du 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. [14]

$$\eta_e = \frac{E_d}{E_c} \quad (\text{I-11})$$

I.4.8.2.3 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.

I.4.8.2.4 Durée de vie

Les batteries vont voir leurs performances décroître durant toute leur vie. Celles-ci sont considérées en fin de vie lorsque leurs performances ne répondent plus à celles nécessaires pour l'application visée. [14]

Les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C. Elle varie de 2 à 7ans pour les batteries au Pb et de 10 à 25 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10 °C de la température d'utilisation. [11]

I.4.8.2.5 Profondeur de décharge

Sans importance pour le Ni-Cd qui peut se décharger complètement. Ce paramètre en revêt une importance considérable pour les batteries au Pb puisqu'elles survivent rarement à une décharge totale.

On limite en général la décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 40 %, les accumulateurs étant souvent surdimensionnés afin d'augmenter leur durée de vie. [11]

I.4.8.2.6 Autodécharge

Le taux d'autodécharge d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée. Cette autodécharge peut résulter de plusieurs causes. En premier lieu, la densité de l'électrolyte diminue au cours du temps. Elle est principalement due à la présence de petites impuretés métalliques sur les électrodes, conduisant à la formation de micro piles et la génération d'un faible courant interne.

Elle est généralement donnée pour une température de 20°C. Les valeurs typiques sont de 3 à 15%/mois pour le Pb et jusqu'à 30 % /mois pour le Ni-Cd.

I.4.8.2.7 L'état de charge

L'état de charge d'une batterie **EDC**, noté SOC pour "State Of Charge" en anglais, est un paramètre vital pour la plupart des applications faisant intervenir des accumulateurs. Dire dans quel état est une batterie est une étape primordiale pour sa bonne utilisation.

Il est alors possible d'éviter des modes de fonctionnement dommageables à la batterie comme des surcharges, des sur-décharges. Mais aussi, il est possible de prévoir si la batterie peut assurer ou non sa fonctionnalité par exemple, autonomie restante d'une voiture électrique.

L'état de charge n'étant pas, loin s'en faut, lié de manière univoque à un ou quelques paramètres facilement mesurables, il est nécessaire de travailler avec plusieurs propriétés électriques et électrochimiques de la batterie, comme par exemple la tension à vide, la tension en charge, le courant, la température, l'impédance interne, la gravité spécifique de l'électrolyte ainsi que sa conductivité. Un "mixage" de ces paramètres par divers algorithmes permet d'obtenir une estimation de cet état de charge. Il fournit également des informations précieuses sur l'état interne de la batterie et peut renseigner l'utilisateur sur sa durée de vie restante. [15][5]

I.4.9 Différentes méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie

Il existe trois manières principales d'estimer l'état de charge d'une batterie :

- Méthodes physiques : basées sur la mesure des changements physiques (concentration de l'électrolyte) prenant place dans la batterie durant la décharge.
- Méthodes électriques : basées sur la modification des paramètres électriques (tension, courant) de cellules ou de la batterie complète durant la décharge.

- Méthodes de mesure d'impédance : basées sur la superposition d'un signal alternatif par-dessus la composante continue afin d'avoir une estimation de l'état interne de la batterie. [5]

I.4.10 Méthode de mesure de la densité de l'électrolyte

Pour certains types de batteries, comme les batteries au plomb, la densité (ou la gravité spécifique) de l'électrolyte est une fonction quasi linéaire de l'état de charge. Par contre, dans les cellules pour lesquelles l'électrolyte n'intervient pas, dans la réaction, comme c'est le cas des batteries au nickel-cadmium, la densité de l'électrolyte est quasi constante lors de toute la décharge et ne peut par conséquent pas fournir d'indication sur le EDC.

Pour les batteries au plomb, la mesure à l'aide d'un hydromètre de la densité de l'électrolyte permet donc en théorie d'obtenir une estimation directe de l'état de charge.

Malheureusement, cela n'est pas aussi simple en réalité : cette densité n'est pas homogène dans toute la batterie, et la relation n'est vraiment linéaire que lors d'une décharge à courant constant.

Des variations relativement brusques peuvent apparaître lors de transitoires de courant importants et induire en erreur un estimateur basé sur une telle relation linéaire.

De plus, la mesure de cette densité impose l'installation de capteurs à l'intérieur même des batteries, ce qui risque de poser des problèmes d'étanchéité et d'aménagement intérieur des cellules.

Le capteur risque en outre d'être induit en erreur par des dépôts de métaux provenant de la dégradation des électrodes, et l'état d'une ou deux cellules du pack de batteries n'est pas toujours une bonne indication de l'état de la batterie complète.

La figure ci-dessous, montre l'évolution de l'état de charge d'une batterie de 12 V en fonction de la densité de l'électrolyte.

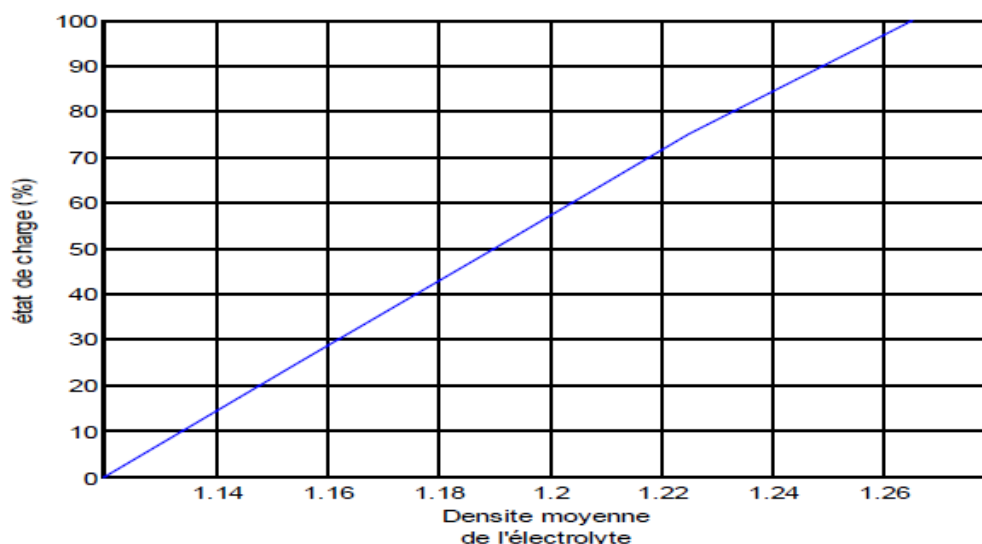


Figure I-8 : état de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte.

I.4.11 Méthode par intégration du courant (coulométrie)

Cette technique de contrôle de l'état de charge de la batterie 'EDC', est la plus pratique et la plus utilisée, consiste en la mesure et le calcul des quantités d'électricité entrantes et sortantes dans les deux processus de charge et de décharge en termes d'ampères-heures. Cette technique est appelée la mesure coulomb métrique.

Pendant la charge, le courant est pris positif alors que lors de la décharge le courant est négatif.

L'état de charge de la batterie à un instant donné dépend directement de l'état de charge précédent, qui doit être connu au préalable, et cela est l'inconvénient de cette méthode. [33][34]

$$EDC_t = EDC_{t-1} + \frac{1}{C_n} \int \delta \cdot I_{bat} dt \quad (I-12)$$

Avec :

EDC_t : état de charge estimé.

EDC_{t-1} : état de charge initial.

C_n : capacité nominale ou évaluée de la batterie.

I_{bat} : courant de la batterie.

δ : c'est le coefficient de perte courant en général il est compris entre 0.98-1.

I.4.12 Méthode de mesure de tension en circuit ouvert

Cette méthode consiste à mesurer la tension en circuit ouvert de la batterie. Pour cela, il faut une stabilisation de la tension de circuit-ouvert. Cette dernière, n'est atteinte qu'après plusieurs heures de repos. La tension au repos est la tension de batterie non chargée. Cela veut dire il n'y a pas de courant qui écoule.

Alors le terme "tension au repos" est équivalent au terme "tension de source". Parce que la tension de repos dépend de la masse volumique de l'électrolyte, elle peut servir comme indication de l'état de charge.

Une fois que la tension en circuit ouvert est mesurée alors il est très facile de déterminer l'état de charge de la batterie par l'équation suivante :

$$EDC(t)=S(t)=\frac{V_{co} - b}{a} \quad (I-13)$$

Avec :

EDC(t) : état de charge de la batterie.

V_{co} : tension en circuit ouvert de la batterie

Les valeurs des paramètres a et b peuvent être trouvées expérimentalement quand la batterie est chargée entièrement (EDC = 100%) et quand la charge de batterie est vidangée complètement (EDC= 0%), respectivement. Alors l'état de charge (EDC) de la batterie peut être facilement déterminé connaissant la tension en circuit ouvert (V_{co}) de la batterie à n'importe quel instant donné. [16][17]

Dans un système photovoltaïque, où dans toute application faisant intervenir une batterie de stockage, Il est insensé de laisser le système photovoltaïque hors service durant toute cette période pour le relevé de l'état initial ou la mise à jour de l'état de charge.

Pour cela, il est nécessaire de prédire la valeur de la tension de circuit-ouvert avant que la batterie se stabilise complètement après une période de repos raisonnable.

Le modèle de prédiction de la tension de circuit-ouvert tient compte de la réduction adéquate du temps de repos de la batterie 'durée de stabilisation de la tension' à été développé par K. Short et J.H. Aylor.

Dans ce modèle, permet de prédire la tension par réduction du temps de repos, la tension est exprimée par la relation linéaire simple suivante :

$$V_{co}=1.64M + V_0$$

La pente de cette droite est calculée par l'expression suivante :

$$M=\frac{V_1 - V_0}{0.7} \quad (I-14)$$

Avec :

V_0 : tension en circuit-ouvert a $t = 1$ minute.

V_1 : tension en circuit-ouvert a $t = 5$ minutes.

I.4.13 Méthode utilisant la mesure d'impédance

Ces méthodes sont apparues assez récemment et présentent une approche relativement différente de celles présentées jusqu'alors. Leur principe de base est d'imposer à la batterie une excitation en tension ou en courant afin de déduire, par la réponse de la batterie à cette excitation, une image "ohmique" de son état interne.

Les recherches s'orientent actuellement vers la liaison entre l'impédance interne et l'état de charge, mais il a déjà été prouvé que cette impédance pouvait assez facilement être liée à l'état interne global de la batterie, c'est-à-dire sa durée de vie restante. L'impédance interne d'une batterie augmente en effet tout au long de sa vie, et sa valeur peut avoir doublé voire même triplé en fin de vie utile.

En pratique, les mesures d'impédance sont souvent utilisées sur des batteries stationnaires pour des raisons de facilité. [5]

I.4.14 Méthode adaptative

Les estimations du filtre de Kalman reposent avant tout sur une modélisation de la dynamique du système observé.

Filtrage de Kalman : il s'agit d'une structure d'observateur dont la correction est effectuée de manière optimale et utilisée pour ajuster la variable EDC.

L'état de charge est mis comme une variable d'état du système pour qu'il soit estimé instantanément. [16]

I.4.15 Modèles électriques de la Batterie

Il existe dans la littérature plusieurs modèles pour simuler le comportement d'une batterie, on donne quelques modèles parmi les plus utilisés.

I.4.16 Le modèle idéal

Dans ce modèle la batterie est représentée simplement par une source de tension comme circuit équivalent et tous les autres paramètres internes ne sont pas pris en compte.

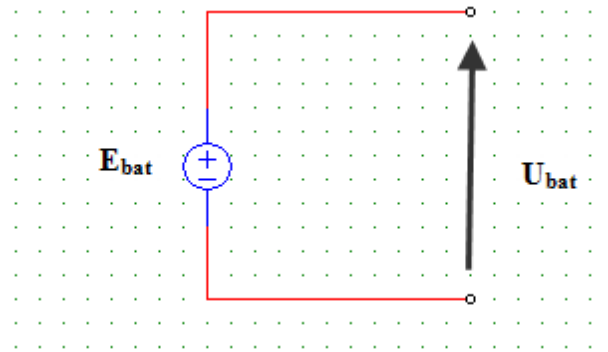


Figure I-9 : Modèle idéal d'une batterie.

I.4.17 Modèle simplifié de la batterie

Le modèle de la batterie généralement utilisé est montré dans la figure (I-10). Il utilise la tension à vide de la batterie E_b en série avec une résistance interne R_b . Il est très utilisé, et ne tient pas compte des variations de l'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge et de la température. Un tel modèle est seulement applicable dans certaines simulations où l'état de charge de la batterie a moins d'importance. [19]

Ce modèle tient compte d'un autre effet, qui est donné par l'équation de Peukert. L'équation de Peukert, est une manière commode de caractériser le comportement de cellules et de mesurer la capacité excentrée en termes mathématiques. C'est une formule empirique qui rapproche comment la capacité disponible d'une batterie change selon le taux de décharge. [20]

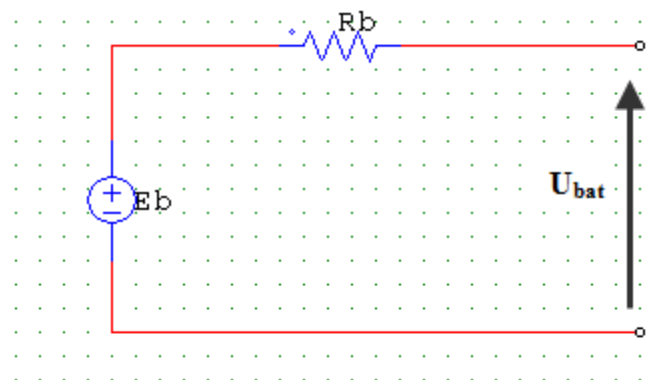


Figure I-10 : Modèle simplifié de la batterie.

L'équation de Peukert :

$$C = (I_d)^n \cdot T_d \quad (I-15)$$

Avec :

I_d = courant de décharge en ampère.

n = constante de batterie ($n=1.35$ pour les batteries d'acide de plomb).

T_d = temps de décharge en heure.

C = Capacité théorique de la batterie en ampèreheures.

L'équation de Peukert prouve qu'à des courants plus élevés, il y a moins d'énergie disponible dans la batterie.

Le nombre de Peukert n est directement lié à la résistance interne de la batterie. Des courants plus élevés signifient plus de pertes et moins de capacité disponible. Une valeur de près de 1 indique que la batterie est très performante ; plus le nombre est haut, plus la capacité est perdue quand la batterie est déchargée aux courants élevés.

Le nombre de Peukert d'une batterie est déterminé empiriquement. Pour les batteries d'acide de plomb le nombre est typiquement entre 1.3 et 1.4 [20]

I.4.18 Modèle R-C de la batterie

Le modèle électrique R-C comprend une fem. E_b modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R_b). [2]

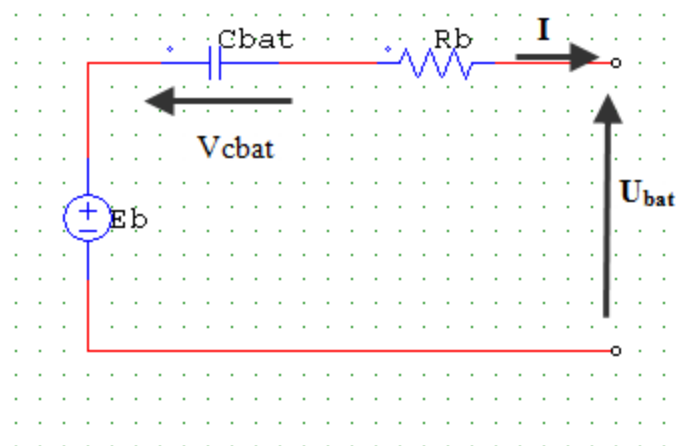


Figure I-11 : Modèle R-C de la batterie.

$$U_{bat} = E_b - V_{cbat} - R_b \cdot I_{bat} \quad (I-16)$$

Avec :

E_b : tension à vide de la batterie.

R_b : résistance interne de la batterie.

C_{bat} : capacité de la batterie.

I.4.19 Modèle de traction

Ce modèle mathématique est utilisé dans les applications des véhicules électriques et hybrides. Il est modélisé, par la mise en série d'une f.é.m. en série avec une résistance et une capacité. [18]

Le modèle de la batterie est donné par la figure suivante :

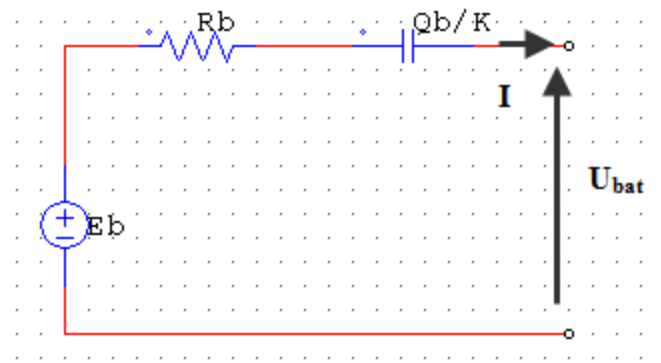


Figure I-12 : Modèle de traction.

$$U_{bat} = E_b - R_b \cdot I_{bat} - K \cdot \int (I_{bat}/Q_b) \cdot dt \quad (I-17)$$

Avec :

U_{bat} : Tension aux bornes de la batterie.

E_b : Tension à vide de la batterie chargée.

K : Constante qui dépend de la batterie.

R_b : Résistance de la batterie.

Q_b : Capacité de la batterie en (Ah).

$\int (I_{bat}/Q_b) \cdot dt$: Indique l'état de décharge de la batterie.

I.4.20 Modèle de Thévenin

Dans ce modèle la batterie est décrite par une tension idéale de batterie (E_b), la résistance interne (R_b), et une combinaison d'une capacité C_o et une résistance tension R_o comme le montre la figure suivante :

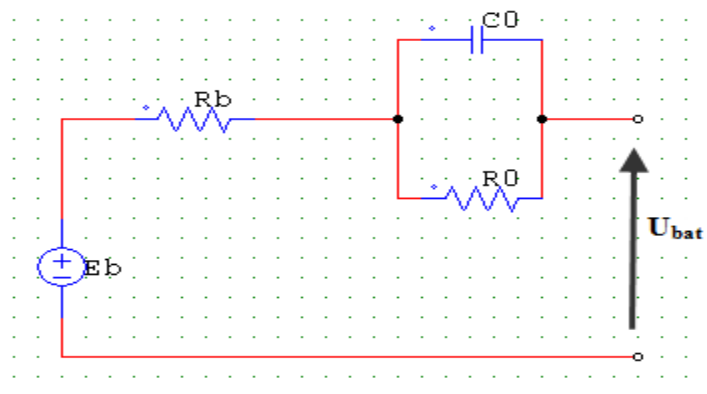


Figure I-13 : Modèle de Thévenin.

L'inconvénient de ce modèle est que tous les paramètres dans ce modèle sont constants mais en réalité ces paramètres changent selon la température et l'état de la charge de la batterie. [19]

I.4.21 Modèle modifié de Thévenin

Une nouvelle approche pour évaluer des batteries est un modèle modifié pour le modèle de Thévenin.

Le modèle modifié du model de Thévenin est basé sur l'opération de combinaisons d'une gamme de charge.

Le schéma électrique équivalent du modèle proposé est celui représenté sur la figure suivante :

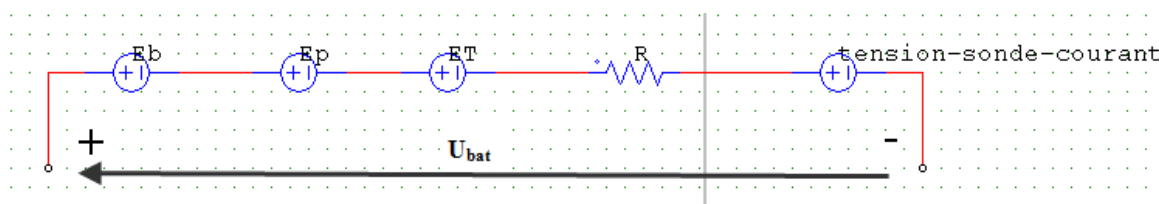


Figure I-14 : Modèle modifié de Thévenin.

Avec :

E_b : C'est une source simple de tension CC Indiquant la tension dans les cellules de batterie.

E_p : représente les effets de polarisation dus à la disponibilité des matériaux actifs dans la batterie.

E_T : représente l'effet de la température sur la tension aux bornes de batterie.

R : est l'impédance interne de la batterie, la valeur d'où découle principalement la relation entre la tension de cellules et l'état de charge (EDC) de la batterie.

Tension sonde-courant : est fondamentalement une source de tension avec une valeur de 0V.

Elle est employée pour enregistrer la valeur du courant de batterie.

Ainsi, ce modèle de simulation est capable de traiter de divers modes de charge/décharge : Il est comparativement plus précis et peut être prolongé pour l'usage avec les batteries de Cd et de Li-ion, qui pourraient être appliquées aux véhicules électriques hybrides et à d'autres applications de traction.

Seulement quelques modifications doivent être effectuées afin de varier les paramètres, tels que l'état de charge, la densité de courant, et la température. [20]

I.4.22 Modèle dynamique linéaire de Thévenin

Une variante améliorée du modèle de Thévenin est un modèle électrique linéaire de batterie. Ce modèle est une étape en avant du modèle de Thévenin. Il modélise le comportement de la batterie pendant la surtension et la décharge spontanée de la batterie.

Ce modèle, représenté sur le schéma la figure (I.15), est plus précis que le modèle de Thévenin mais il ne considère toujours pas la modification des valeurs des paramètres selon les différentes conditions de fonctionnement.

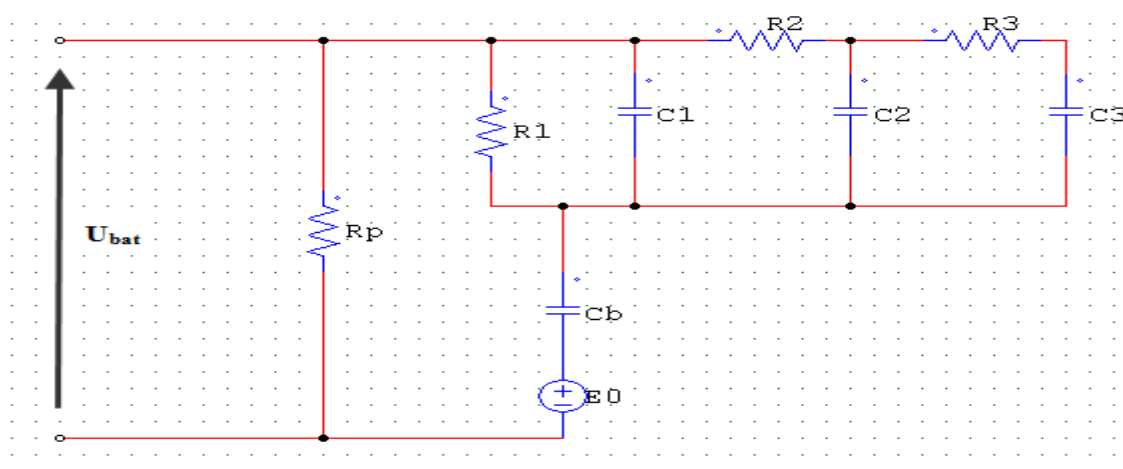


Figure I-15 : Modèle dynamique linéaire de Thévenin.

I.4.23 Modèle dynamique non linéaire de Thévenin

Après avoir passé en revue différentes méthodes de modélisation, il a été décidé pour modéliser la batterie par un modèle dynamique plus réaliste par la modification du modèle de Thévenin. Dans ce modèle tous les paramètres sont affectés par l'état de charge de la batterie et de la température. Ce modèle tient compte de la variation de différents paramètres avec l'état de charge de batterie, et la température de la batterie. Le modèle est montré sur la

figure(I.16). Comme il peut être vu dans le modèle, il emploie deux résistances internes différentes pendant la charge et la décharge.

Les diodes dans le modèle sont idéales et elles sont employées pour dévier des résistances internes pendant la charge ou la décharge. Il y a un condensateur dans le modèle qui représente le comportement de coupure de la batterie. [20]

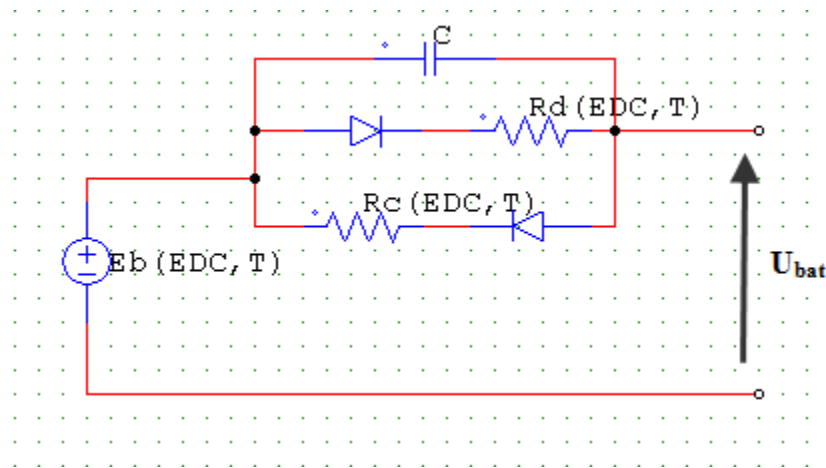


Figure I-16 : Modèle dynamique non linéaire de Thévenin.

I.4.24 Modèle dynamique du 4ème ordre

Le modèle de batterie présenté dans la figure (I-17) est composé de deux parties :

a- le courant I_p traversant la résistance R_p (réaction d'électrolyte), R_d (effet ohmique) et sa capacité associée C_a et R_w (gaspillage de fuite d'énergie) et son onde entretenue associée de capacité de fuite.

b- le courant I_s traverse la résistance R_s (décharge spontanée).

Bien que ce modèle soit sophistiqué et précis pour but de simulation, il a toujours quelques inconvénients dans celui :

- un plus long temps est exigé pour le calcul dû à l'ordre élevé du modèle.
- la modélisation du procédé est compliquée. [19]

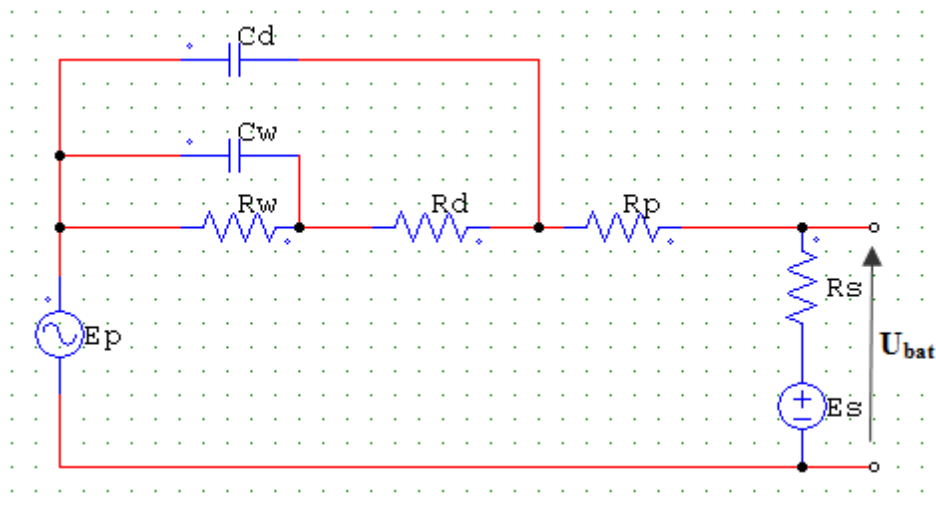


Figure I-17 : Modèle dynamique du 4ème ordre.

I.4.25 Modèle de 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). [2]

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{bat} \quad (I-18)$$

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents systèmes de stockage et les grandeurs caractéristiques d'une batterie, tel que l'état de charge. Nous avons présenté un état de l'art des méthodes utilisées pour la détermination de l'état de charge ainsi que les quelques modèles de batterie existants dans la littérature.

II. Chapitre II

Modélisation d'un système photovoltaïque.

II.1 Introduction

Une installation photovoltaïque se compose d'un générateur photovoltaïque et d'un Groupe de composants électriques (convertisseur statique, batterie avec son Contrôleur de charge, câblage et protection), permettant l'adaptation à la puissance Produit selon les spécifications du récepteur. Ce chapitre est consacré à la modélisation des systèmes photovoltaïques. Nous Présenter différents modèles mathématiques des sous-systèmes du système à l'étude.

II.2 Modélisation du système de conversion photovoltaïque

La littérature offre de nombreux modèle avec différentes configuration dépendant du besoin d'utilisation. La caractéristique I(V) du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure(II.1). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances en séries R_s et en parallèle (shunt) R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [21].

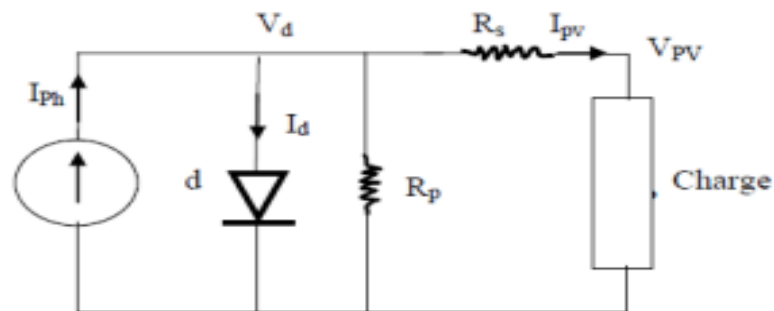


Figure II-1: Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Selon le schéma de la figure(II.1) on peut écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{N_s A K T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (\text{II-1})$$

Où :

I_0 est le courant de saturation,

K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T est la température effective des cellules en Kelvin(K),

q est la charge de l'électron ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$)

I_{PV} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

V_{PV} est la tension aux bornes de cette même cellule,

I_{ph} est le photo courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

R_P est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_S est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [21].

Le module PV est constitué par un regroupement, en série et on parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaire. L'association parallèle de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Une association parallèle de N_P cellules possible afin d'accroitre le courant de GPV.

II.2.1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopé P (dopé 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 (charge N) et des trous. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches [22].

II.2.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La figure (II.2 et II.3) illustre les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule en silicium ayant les caractéristiques : $V_{co} = 0.6$ V, $I_{cc} = 2.55$ A, $P_m = 1,153$ W on peut trouver deux courbes de la cellule PV dans les conditions standard ($T = 25^\circ\text{C}$, $E = 1000\text{W}/\text{m}^2$) comme suit : [33]

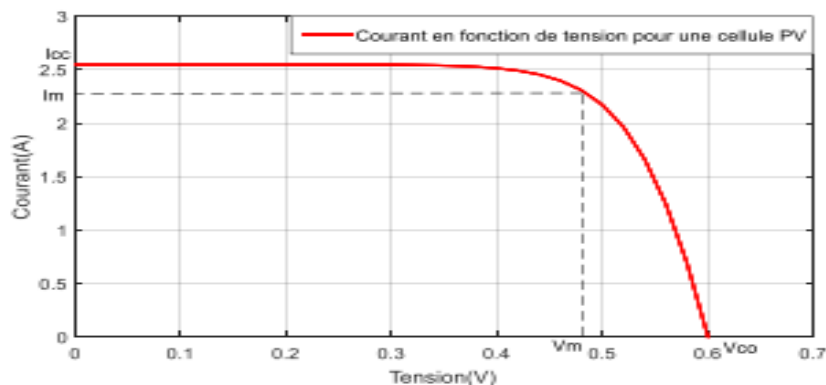
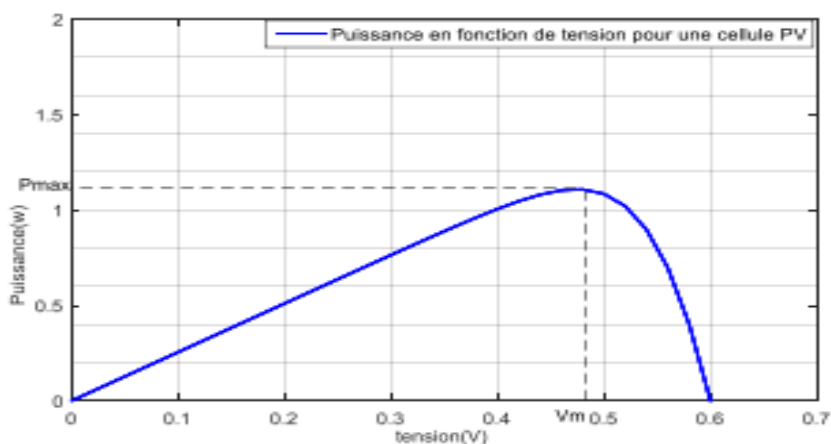


Figure II-2 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.

Figure II-3 : Caractéristique P(V_{pv}) d'une cellule PV.

II.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.2.3.1 Modèle à une diode

II.2.3.1.1 Modèle à trois paramètres (modèle idéal)

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïque, il est représenté par une source de courant, qui modélise le courant généré par la photo porteuse, en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction PN [24].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (II.4) :

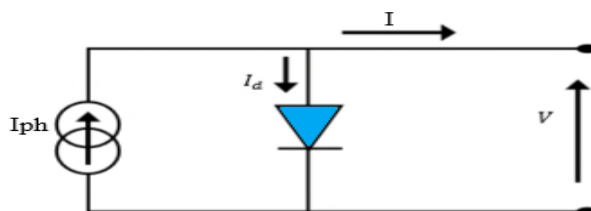


Figure II-4 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Model idéal.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n-V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

La tension V_T est souvent donnée par :

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (\text{II-4})$$

$$D'où : \quad I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n-V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-5})$$

Avec :

I: représente le courant de sortie fournie par la cellule solaire [A] ;

I_{ph}: représente le courant génère par la cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil [A] ;

I_d : représente le courant de la diode [A] ;

I_s: Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A] ;

V: représente la tension de sortie du modèle [V] ;

V_T : représente la potentielle thermodynamique [V] ;

n: représente le facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule PV, en général : $(1 < n < 2)$).

q : Charge d'électron ($q=1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$) ;

K: Constante de Boltzmann ($K = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ j/k}$) ;

T : représente la température de la jonction des cellules PV donnée en kelvin [K].

II.2.3.1.2 Modèle à quatre paramètres

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé, il a été étudié par Townsend [25]. La cellule est modélisée par une source du courant I_{ph} , dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s qui modélise les pertes aux contacts et aux connections. Elle est très faible. La figure ci-dessous illustre le circuit électrique équivalent pour ce modèle.

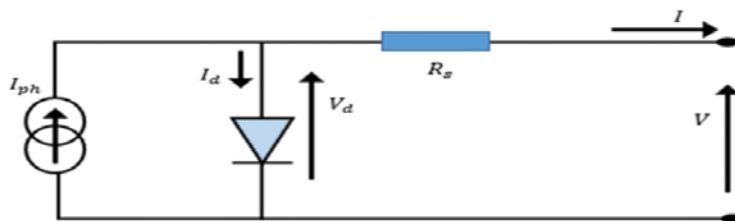


Figure II-5 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (LP4).

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant **I** est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{n-V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{n-V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-8})$$

II.2.3.1.3 Modèle à cinq paramétré (LP5)

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la figure II-5, une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt en parallèle R_p est ajoutée ayant une grande influence sur le courant généré par le modèle. Physiquement, la résistance shunt sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule [26] [27]

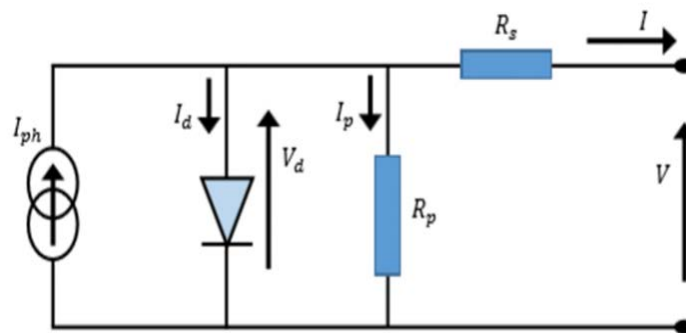


Figure II-6 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (L5P).

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV, et sa simplicité pour le calcul mathématique.

En général, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II-9})$$

Avec :

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad \text{II-10}$$

Ou

I_p : représente le courant circulant dans la résistance

R_p : Le courant de la cellule PV peut alors s'écrire sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{n-V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{II-11})$$

En général, un générateur photovoltaïque est composé de plusieurs cellules PV connectées en série et en parallèle. De plus, l'équation caractéristique « courant-tension » du circuit équivalent pour un panneau photovoltaïque, dispose en cellules parallèles N_p et séries N_s , peut être définie à l'aide des deux équations suivantes :

$$I^P = N_p \cdot I \quad (\text{II-12})$$

$$V^S = N_s \cdot V \quad (\text{II-13})$$

Donc l'équation du courant devient comme suit :

$$I^P = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s I^P}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I^P}{R_p} \quad (\text{II-14})$$

Avec I^P et V^P sont, respectivement, le courant de sortie et la tension de sortie fournie par le panneau solaire.

II.2.3.2 Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes). Ce modèle est composé de deux exponentiels. Le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion [28] [29].

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent à deux diodes ci-dessous figure (II.7). Il consiste à la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{S1} et I_{S2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire [30].

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut.

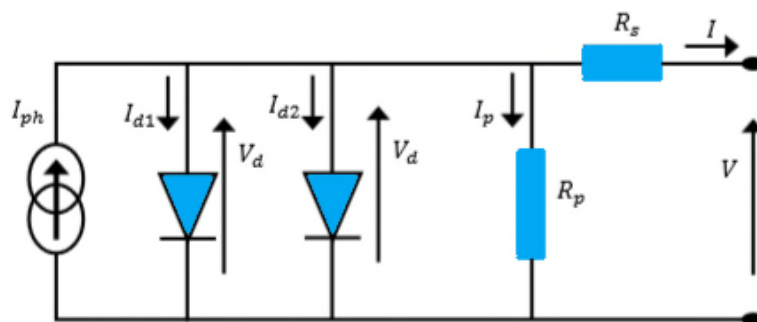


Figure II-7 : Circuit électrique équivalent à double diode (2M7P).

Les résistances R_s et R_p tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule photovoltaïque. Plus la valeur de R_s est grande, moins il y a de courants de fuite et le facteur de forme est meilleur. En revanche, plus la valeur de R_p est petite, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur [31].

A partir de la figure II.7, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (\text{II-15})$$

Où I_{d1} et I_{d2} sont les courants qui traversent la première et de la deuxième diode respectivement.

$$I_{d1} = I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-16})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-17})$$

Avec :

I_{s1} Représente le courant de saturation la première diode ;

I_{s2} Représente le courant de saturation de la seconde diode ;

n_1 Et n_2 représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes.

Le courant prédit par le circuit présenté par la figure (II.7) peut être exprimé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II-18})$$

II.2.4 Influence des paramètres sur les courbes d'une cellule

Au cours d'une journée, le niveau d'éclairement et la température d'une cellule vont varier entre 0 W/m² et 1000 W/m² ainsi que la variation de la température. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement et en fonction de la température. A l'aide de la caractéristique courant -tension d'une cellule PV, sous éclairement et température bien déterminée, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque. [23]

II.2.4.1 Effet de la température

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($E=1000\text{W /m}^2$) pour différentes température (25°C, 50°C ,75°C ,100°C). La courbe des caractéristiques va présenter quatre allures différentes selon la température voir les figures

(II.8) et (II.9). Les paramètres de la cellule considérés sont : $R_s = 0.01\Omega$, $R_p = 4\Omega$, $I_{cc} = 2.55$ A, $V_{co} = 0.6$ V et $A = 1.6$. [23]

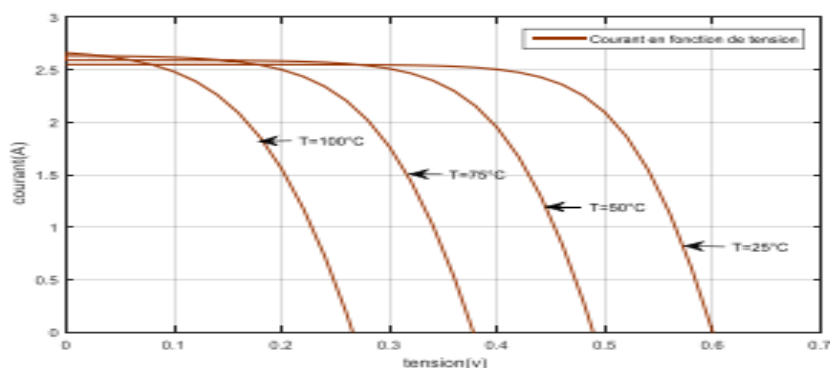


Figure II-8 : Effet de la température sur la courbe I(V) d'une cellule PV.

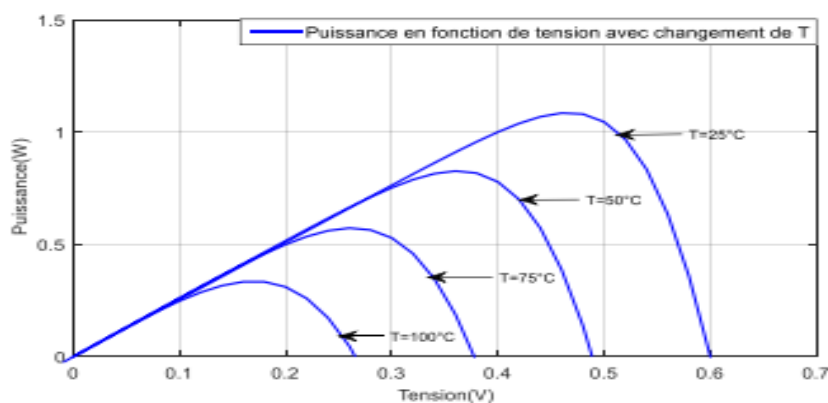


Figure II-9 : Effet de la température sur la courbe P(V) d'une cellule PV.

II.2.4.2 Effet de l'éclairement

Selon la figure (II.10) avec une température constante de 25°C, nous pouvons remarquer que des fortes variations du niveau d'éclairement provoquent des variations relativement importantes de I_{cc} , alors que les variations relatives de la tension V_{co} restent faibles [23]

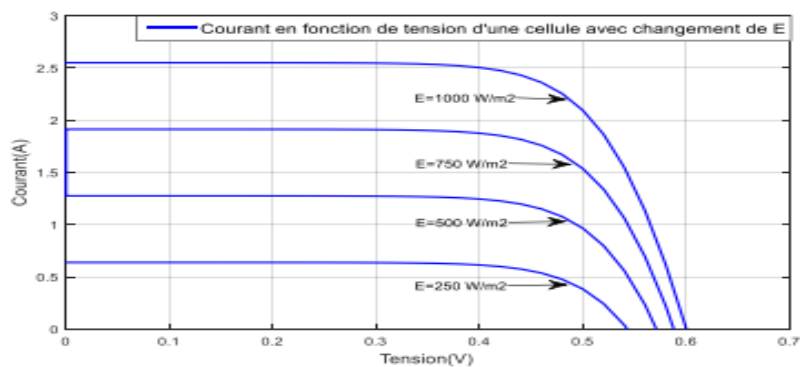


Figure II-10 : Effet de l'éclairement sur courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV.

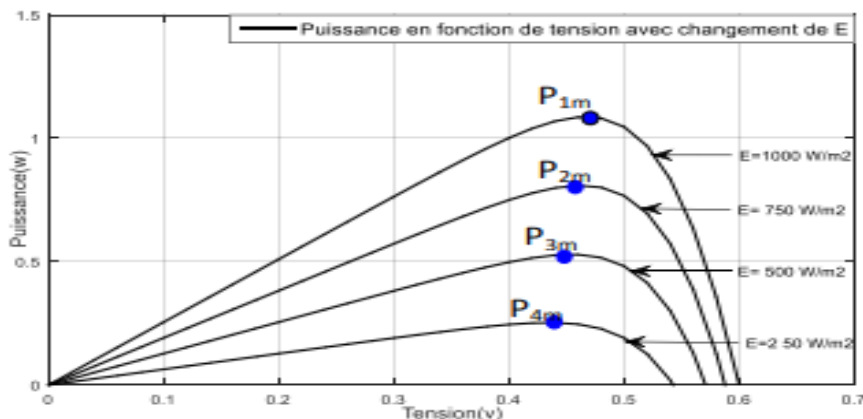


Figure II-11 : Effet de l'éclairement sur la courbe P_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.

Nous avons également remarqué que la lumière la puissance et l'efficacité de la batterie. ça signifie la puissance optimale de la batterie P_{max} est proportionnelle à l'éclairement Et le point de puissance maximale est presque à la même tension. [23]

II.2.4.3 Effet du facteur d'idéalité

On peut voir sur la figure (II.12) que la tension en circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} ne changent pas avec l'augmentation du facteur d'idéalité, mais les caractéristiques se déforment lentement sous l'influence du changement du facteur d'idéalité. L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode affectera négativement le point de puissance maximale, ce qui entraînera une diminution de la puissance au niveau de la zone de travail, comme le montrent les figures (II.12) et (II.13). [23]

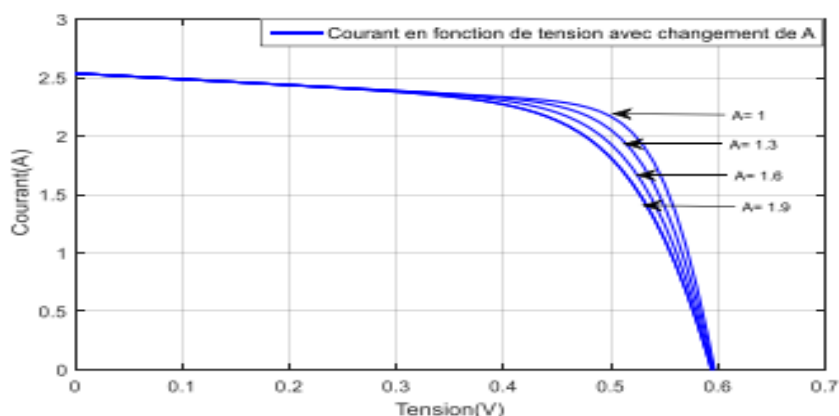


Figure II-92 : Effet du Facteur d'idéalité sur la courbe I_{pv}(V_{pv}) d'une cellule PV.

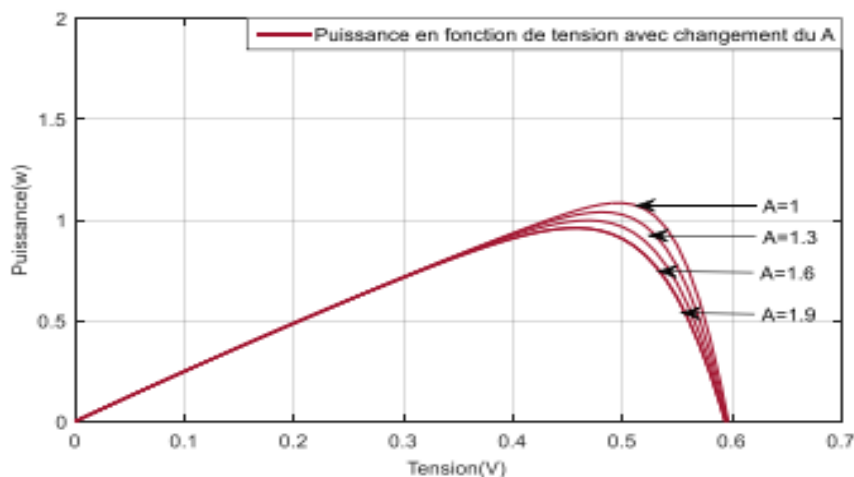


Figure II-13 : Effet du Facteur d'idéalité sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule.

II.2.4.4 Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [36]

II.2.4.5 Influence de la résistance parallèle R_p :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (R_p).

Ordre de grandeur de R_p pour une cellule au Si : $R_p = 10^2$ à 10^4 R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [36]

II.3 Régulateur de charge

II.3.1 Définition

Le régulateur de charge/décharge est l'électronique entièrement automatique à laquelle sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataires de l'électricité solaire.

Sa fonction principale est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge et interrompt l'alimentation des destinataires si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti-décharge profonde, prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui est le seul composant fragile du générateur photovoltaïque.



Figure II-14 : régulateur de charge

- **Remarque**

Il est important de laisser suffisamment d'espace libre tout autour du régulateur de charge solaire afin qu'il puisse suffisamment être refroidi par l'air ambiant. Dans tous les cas, il convient d'observer les instructions dans les manuels d'utilisation.

II.3.2 Les types des régulateurs de charge

Il faut savoir qu'il y a plusieurs types de régulateur, les plus répandus :

- Le régulateur de charge solaire avec technologie PWM.
- Le régulateur de charge solaire avec technologie MPPT.
- Le régulateur de type shunt.
- Le régulateur de type série. [32].

II.3.2.1 Régulateur de charge solaire avec technologie PWM (Pulse Width Modulation)

Le régulateur est inséré entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé. La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Bulk".

Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating"

II.3.2.2 Le régulateur de charge solaire avec technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.
- Conversion DC/DC.
- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Bulk, Absorption et Floating).

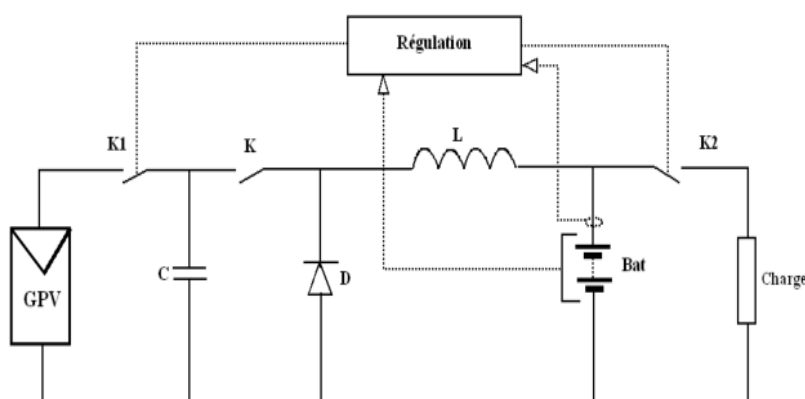


Figure II-15 : Schéma de principe du régulateur MPPT

II.3.2.3 Régulateur de type série

Le composant de puissance qui assure la liaison du module et la batterie est placée en série, ce dernier ferme le contact A, lorsque la batterie est déchargée le courant passe sinon il s'ouvre une fois que la batterie est chargée.

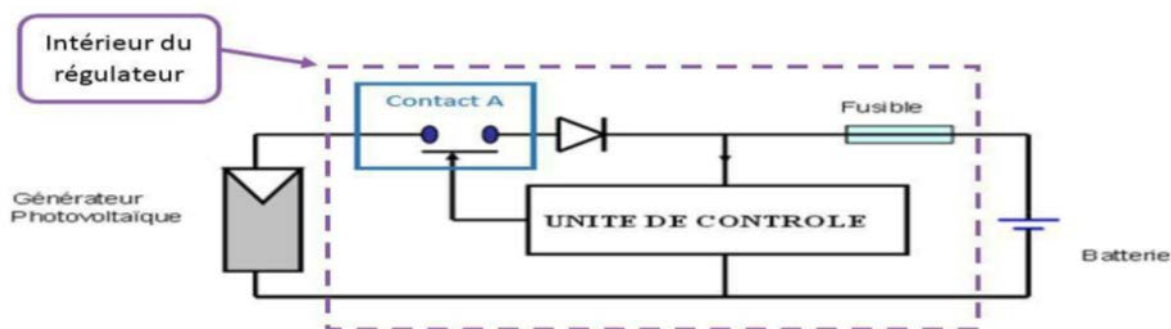


Figure II-16 : régulateur de type série

II.3.2.4 Régulateur de type shunt

Le même principe que le régulateur série seulement le contact est situé entre les polarités du panneau. Le contact qui un transistor assure la liaison de puissance entre le module et la batterie, il fonctionne en deux modes :

1. Mode saturé : (Rien) le module shunté et l'énergie fournie est dissipée en chaleur.
2. Mode désamorçé : (Tous) Toute l'énergie fournie par le module passe à la batterie.

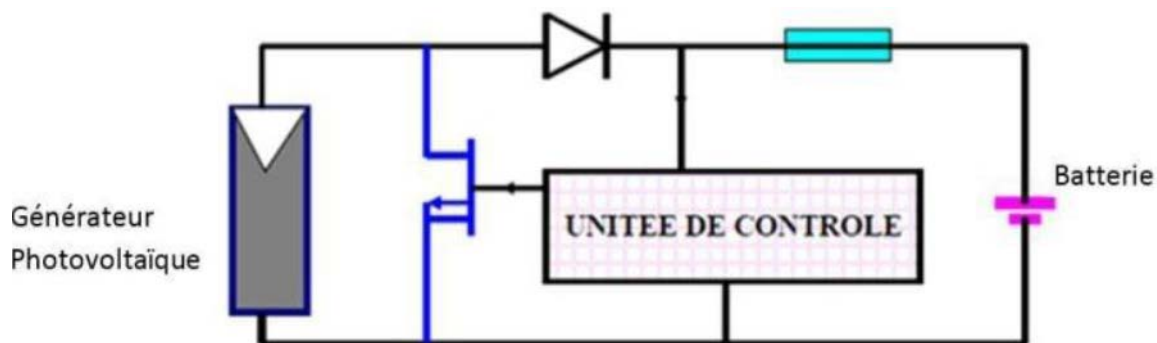


Figure II-17 : Régulateur de type shunt

II.3.3 Choix d'un régulateur solaire

Le choix d'un régulateur solaire dépend de deux critères principaux :

- L'intensité maximale admissible par le circuit d'entrée et le circuit de sortie du régulateur doit être supérieure à l'intensité du courant produit par les panneaux [32]

- La tension nominale doit correspondre à la tension entre les panneaux et la batterie photovoltaïque 12, 24 ou 48 Volts

II.4 Onduleur (convertisseur)

II.4.1 Définition

Les fonctions de l'onduleur sont de convertir et d'acheminer l'électricité produite, avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité, vers le réseau électrique, dans le cas du raccordé réseau, ou à l'utilisateur, dans le cas des sites isolés. L'onduleur convertit le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau

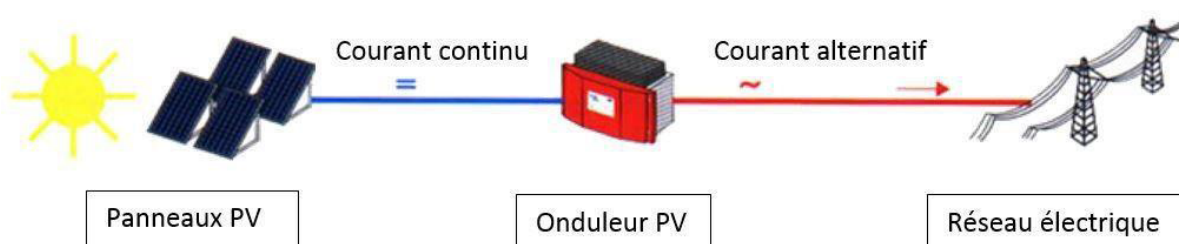


Figure II-18 : schéma synoptique de rôle de l'onduleur.

II.4.2 Rôle de l'onduleur

L'onduleur est l'élément fondamental dans la production de l'électricité et il a deux fonctions principales :

II.4.2.1 Une fonction pratique

Étant donné que le rôle des onduleurs est commun à toutes les applications domestique ou autre, le rôle de l'onduleur photovoltaïque, change d'une configuration à une autre, (c'est-à-dire qu'on opte pour un onduleur autonome dans le cas d'un système autonome, et un onduleur connecté au réseau dans le cas d'un système connecté au réseau ...etc)

II.4.2.2 Une fonction sécuritaire

Un onduleur doit fournir une tension et une fréquence compatible avec les charges électriques, dans le cas d'un système autonome, ou bien avec le réseau public, dans le cas d'une installation connectée au réseau. Dans ce cas, l'onduleur cesse toujours de fonctionner,

lors de la coupure d'électricité du réseau public, pour éviter le risque d'électrocution de l'agent qui travaille dessus.

II.4.3 Les différents types d'onduleur

II.4.3.1 Les micro-onduleurs

Le Micro-onduleur appelé aussi onduleur module, est un onduleur qui est incorporé directement derrière le panneau PV (sous forme de kit), l'ensemble fournit alors du courant alternatif. Ce kit est idéal pour les installations à petites puissances (moins d'un KW).

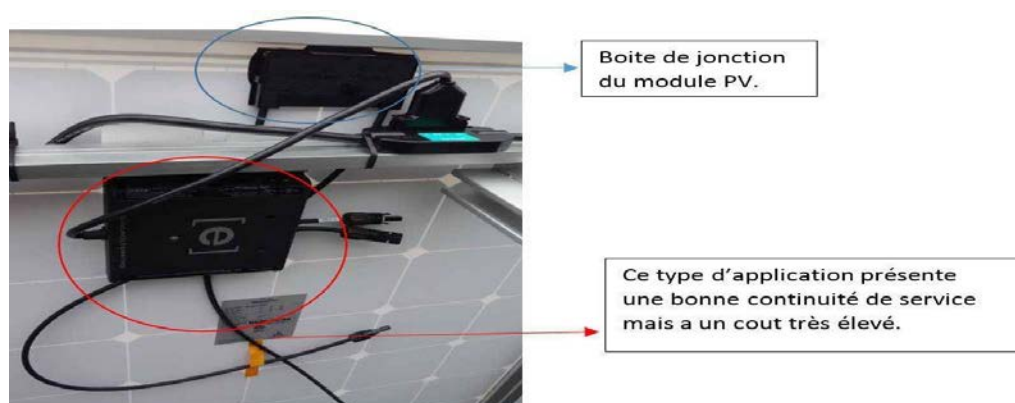


Figure II-19 : Onduleur module.

II.4.3.2 Onduleur string

L'Onduleur string est un onduleur qui regroupe un ensemble de panneau (string= une chaîne de panneau interconnectés en série jusqu'à avoir la tension nominale de l'onduleur). Pour augmenter en puissance on regroupe plusieurs chaînes jusqu'à atteindre la puissance de l'onduleur (plusieurs KW par onduleur).

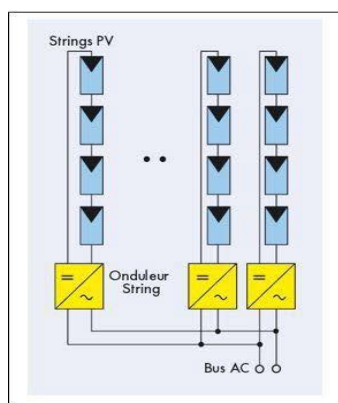


Figure II-20 : Onduleur string.

II.4.3.3 Onduleur central

Un système centralisé présente de nombreux atouts dans le cas de projets présentant de grands générateurs photovoltaïques homogènes (peut atteindre 1 MW par onduleur). Leur coût au Watt-crête peut être plus faible et la maintenance peut être facilitée sur un lieu centralisé.



Figure II-21 : Onduleur centrale

II.4.4 Principe de fonctionnement

Une des caractéristiques les plus importantes d'un onduleur est son efficacité de conversion. Cette valeur indique le rapport entre l'énergie produite en courant alternatif par rapport à celle « insérée » en courant continu. Les appareils modernes peuvent fonctionner avec un rendement d'environ 98 %.

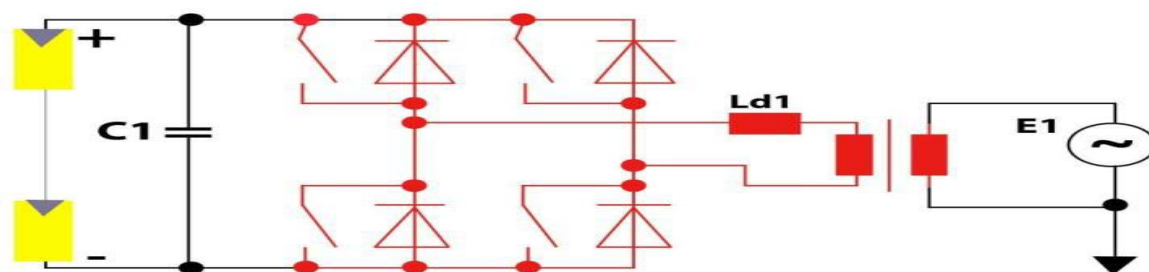


Figure II-22 : Schéma de principe de fonctionnement d'un onduleur PV.

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).

Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandée de manière appropriée, le plus souvent par MLI, l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau.

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser la conversion d'énergie électrique, le montage le plus simple est composé de thyristors. Cette technologie

était utilisée dans les premiers onduleurs PV et elle est encore disponible en monophasé et triphasé.

Peu cher, ce montage présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire.

Ce montage est un circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance L_d située avant le transformateur afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau. Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par le transformateur et une fréquence de 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique Isolation.

Le choix du convertisseur (ou onduleur) est fonction des paramètres suivants :

- Sa puissance nominale.
- Son rendement ou efficacité.
- Sa forme de signal (ou d'onde).

II.4.5 Caractéristiques d'un onduleur PV

- **Puissance nominale**

Il faut connaître la puissance totale nécessaire au fonctionnement des appareils utilisant le courant alternatif pour pouvoir choisir la taille et la puissance nominale de l'onduleur. Il est toujours conseillé de sur-dimensionner légèrement la puissance nominale de l'onduleur par rapport à la puissance totale des appareils.

- **Puissance de maximale ou puissance crête**

Majorité des appareils équipés d'un moteur (comme les réfrigérateurs, les outils électriques, etc.) ont besoin d'un courant très important lors de leur démarrage, équivalent à une puissance très élevée, appelée aussi puissance crête. L'onduleur doit pouvoir supporter cette puissance pendant un court instant lors du démarrage.

- **Tension d'entrée**

Choisir une tension d'entrée en courant continu pouvant supporter la tension de la batterie et/ou celle du générateur (ex. panneaux solaires). Cette tension correspond à la tension de la source d'alimentation.

- **Tension de sortie**

Elle doit correspondre à la tension des appareils qui seront utilisés (en général 220/230 Volts alternatif) et doit être réglée pour rester stable quel que soit le niveau de tension dans la batterie (tant que la batterie reste dans une plage de tension acceptable)

- **Rendement**

Le rendement s'exprime en % et correspond au rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée de l'onduleur. Plus le rendement est élevé moins les pertes seront importantes et plus l'appareil sera considéré comme performant.

- **Forme de signal (ou onde)**

Les appareils alimentés à partir de l'onduleur doivent pouvoir supporter la forme du signal (ou onde) de sortie de l'onduleur. On peut alors recenser les types suivants :

- **L'onduleur avec signal (ou onde) sinusoïdale pure ou "pur sinus"**

Il est recommandé pour tous les types d'installations car il produit un courant électrique semblable à celui du réseau de distribution électrique.

Cependant, il ne possède généralement pas de système de synchronisation réseau.

- **L'onduleur avec signal (ou onde) carré**

Il est peu coûteux car la qualité de son signal (ou onde) est souvent médiocre et est utilisé pour de petites charges. Certains appareils tels que le réfrigérateur ne fonctionnent pas avec ce type d'onduleur. Ce type d'onduleur est de moins en moins utilisé.

- **L'onduleur avec signal (ou onde) trapézoïdal ou "sinus modifiée "ou "pseudo sinus" ou "quasi sinus"**

Il convient à la plupart des appareils (éclairage, équipement électronique, moteurs) et présente généralement un bon rapport qualité/prix.

II.5 Les différents types de systèmes photovoltaïques

II.5.1 Système photovoltaïque connecté au réseau

II.5.1.1 Injection totale sans stockage

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est le suivant (Figure (II.23) ci-dessous). Un générateur photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité. Le courant continu produit par les modules photovoltaïques est transformé, via un onduleur PV, en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution. L'énergie produite est intégralement injectée sur le réseau public de distribution afin d'être valorisée dans les meilleures conditions économiques pour le producteur. En cas de défaillance du réseau électrique (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), l'onduleur PV s'arrête de fonctionner. [37]

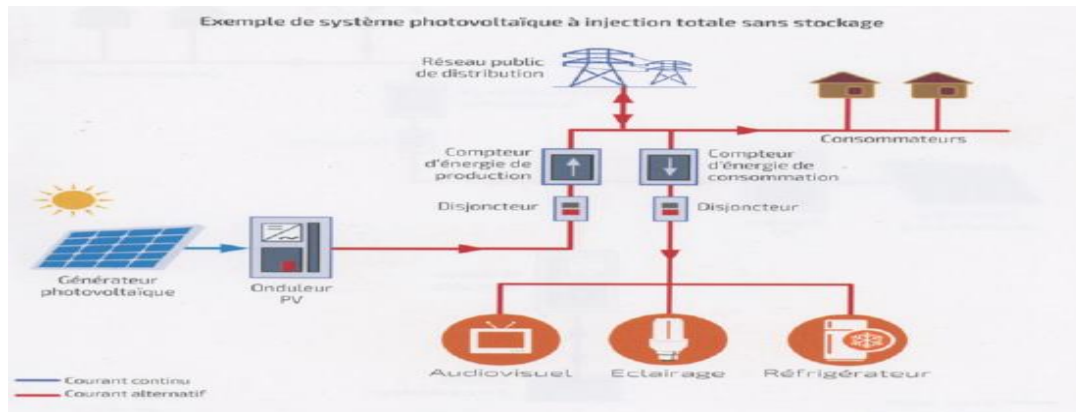


Figure II-23 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale sans stockage

II.5.1.2 Injection totale avec stockage

Le principe de fonctionnement est le même que précédemment mais un stockage d'énergie par accumulateurs est intégré à la centrale de production (Figure 3). Toutefois, pour des raisons économiques, le stockage est très limité et a pour but de lisser la production et/ou de restituer l'énergie en fin de journée pour faire face à un pic de consommation sur le réseau électrique. [37]

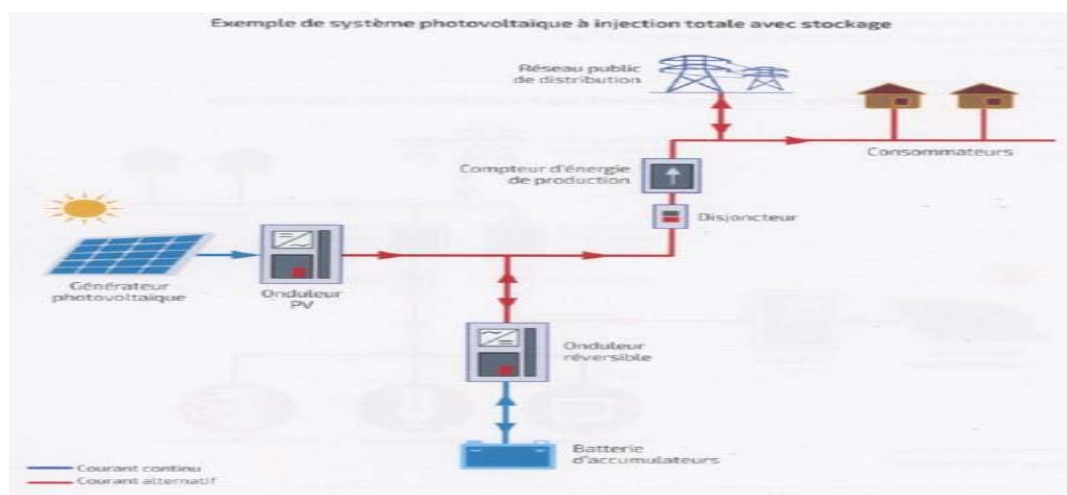


Figure II-24 : Exemple de système photovoltaïque à injection totale avec stockage.

II.5.2 Système photovoltaïque autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit : [35]

- Des systèmes autonomes sans stockage électrochimique
- Des systèmes autonomes avec stockage électrochimique

II.5.3 Système autonome sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome.

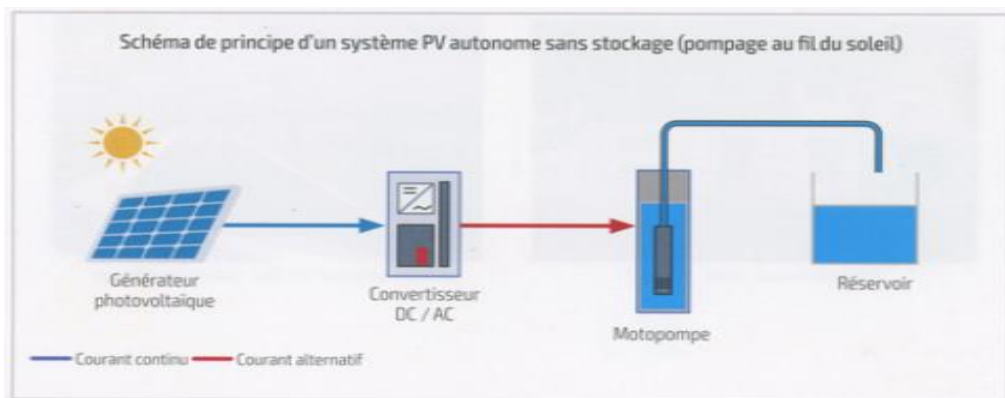


Figure II-25 : Exemple sur un système autonome sans stockage électrochimique.

II.5.4 Système autonome avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

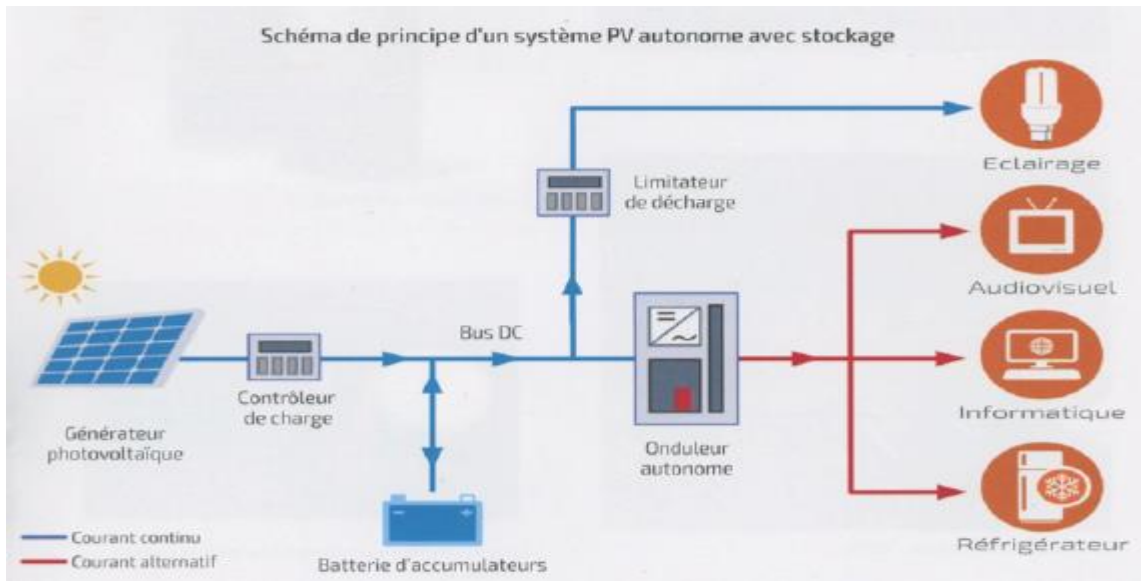


Figure II-26 : Exemple sur un système autonome avec stockage électrochimique.

II.6 Le schéma synoptique :

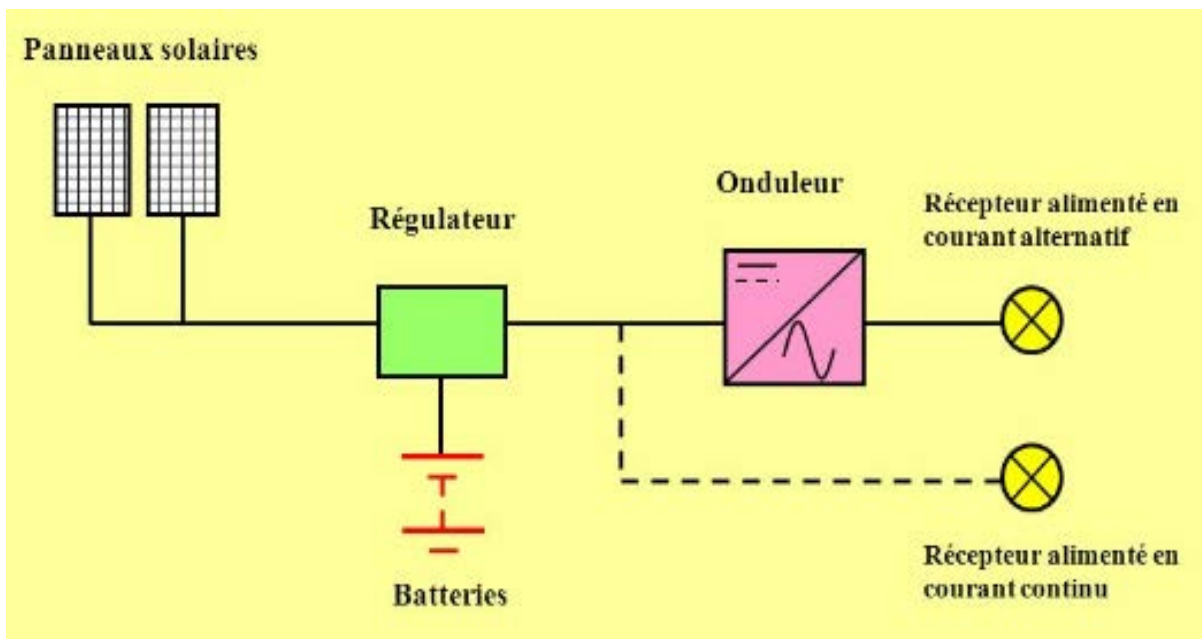


Figure II-27 : Schéma synoptique de système photovoltaïque de panneau jusqu'à la charge.

II.7 Conclusion

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet est développée à partir des modèles de la littérature (champ photovoltaïque, convertisseur, stockage batterie) ; cette modélisation est une étape indispensable, elle peut introduire un

certain nombre de modèles, puis Evaluer les caractéristiques de chaque élément du dispositif et les paramètres des composants.

La mise en œuvre de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Les outils résultants seront utilisés pour déterminer la taille optimale de tels systèmes pour les cas d'application définis dans les chapitres suivants. Pour des raisons économiques, l'étude est encore incomplète, ce qui nécessite de bonnes dimensions

III. Chapitre III

Simulation et résultat d'un système photovoltaïque à stockage intégré.

III.1 Introduction

Dans n'importe quel système photovoltaïque avec système de stockage d'énergie connecte au réseau il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents parties du notre système global.

Notre simulation a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents parties du système d'une part mais aussi de démontrer les interventions de BESS (système de stockage d'énergie) à chaque fois par des tensions, courants, puissances, fréquences pour assurer une bonne gestions et protection des déférents parties de notre système.

III.2 Description de la simulation

Ce modèle montre un système photovoltaïque connecte au réseau composé d'une charge et d'un système de stockage d'énergie (BESS) et une centrale solaire.

Plusieurs tests peuvent être effectués sur cet exemple pour illustrer le rôle de système de stockage d'énergie sur les différents concepts liés au système tels que :

- Opération d'intervention en cas de manque de puissance.
- Donner l'ordre a la synchronisation en cas de connexion et déconnexion du système photovoltaïque avec le réseau.
- Absorption de surplus et communication avec MPPT en cas de réduction de charge.

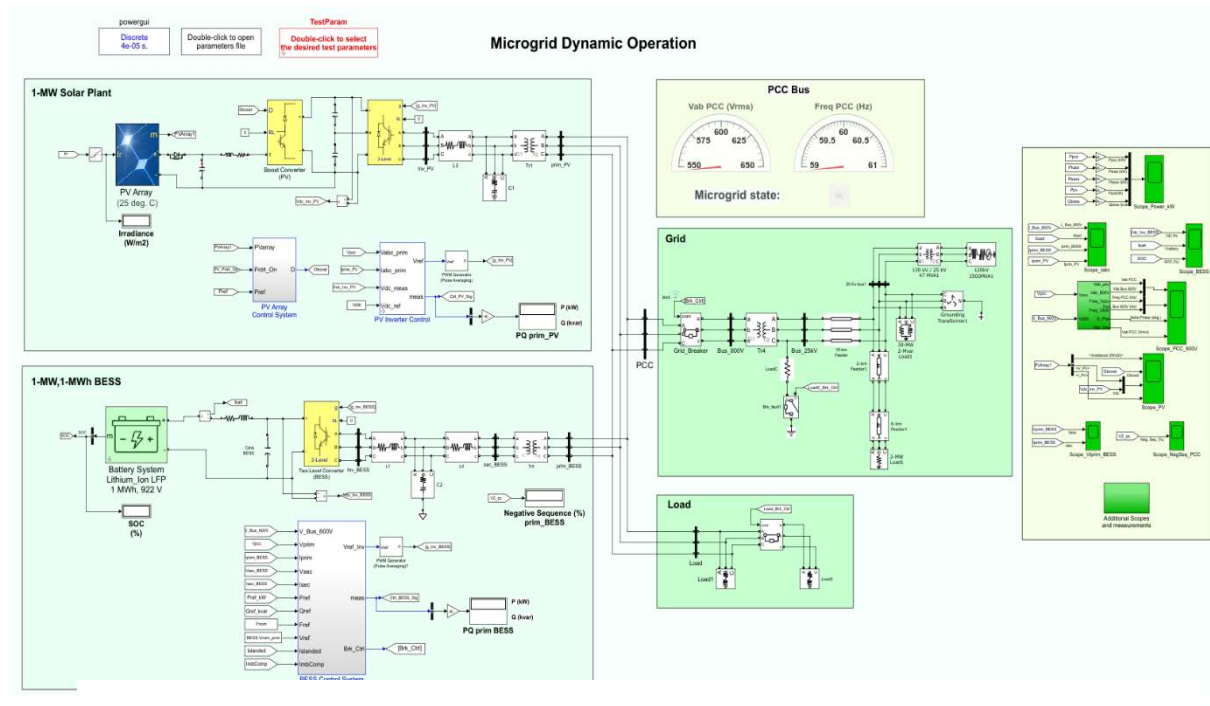


Figure III-1 : schéma du système global.

III.3 Les différentes parties de notre système global

III.3.1 Système de distribution (réseau)

Le réseau électrique est modélisé à l'aide d'un équivalent de réseau 120 kV, de transformateurs et de départs 25 kV. Une charge monophasée peut être activée pour produire un déséquilibre du réseau. Un disjoncteur triphasé et un transformateur 25 kV/600 V sont utilisés pour connecter la station au système de distribution.

III.3.2 BESS

Le System de stockage de l'énergie se compose d'un système de batterie, d'un convertisseur à deux niveaux, d'un filtre LCL et d'un Transformateur 480V/600V. Le BESS comprend également un système de contrôle qui produit des références de tension (V_{ref}) au Générateur PWM contrôlant le convertisseur, ainsi qu'un signal de commande (ouverture/fermeture) vers le disjoncteur de réseau.

Le modèle du système de batterie est composé de cellules lithium-ion fer phosphate (LFP) de 3,2 V, 14 Ah. Ils sont disposés en plusieurs modules de cellules (72 modules de 4 cellules) connectés en série pour former une chaîne de batteries de 922V.

Le système batterie de notre modèle a 80 chaînes de batteries en parallèle pour former un système évalué à 1 MWh.

III.3.2.1 Les principaux composants du système de contrôle BESS sont

III.3.2.1.1 Unité de resynchronisation

Si la station photovoltaïque reconnecté au réseau de distribution sans synchronisation, un déclenchement déphasé se produisent et génèrent des courants d'appel très importants. Pour éviter cela, l'unité de resynchronisation amènera la tension de la station photovoltaïque en phase avec la tension du réseau de distribution avant de refermer le disjoncteur. Cela garantira une reconnexion transparente au réseau de distribution.

III.3.2.1.2 Contrôle du statisme

Dans le cas où la station photovoltaïque alimente la charge, le BESS doit contrôler à la fois la fréquence et la tension du la station photovoltaïque.

Le BESS a un affaissement P/F réglé sur 0,5%, ce qui signifie que la fréquence du la station photovoltaïque peut varier de 60,3 Hz (l'onduleur absorbe son puissance active nominale) à 59,7 Hz (l'onduleur produit sa puissance active nominale).

Le statisme Q/V est réglé sur 3%, ce qui signifie que la tension du de la station photovoltaïque sur le bus PCC peut varier de 609 Vrms (l'onduleur absorbe sa pleine puissance inductive) à 582 Vrms (l'onduleur produit sa pleine puissance capacitive).

III.3.2.1.3 Mesure

Le sous-système de mesure calcule la puissance active et réactive générée par l'onduleur. Il calcule également les composantes d-q des tensions et courants triphasés au niveau de la station photovoltaïque.

III.3.2.1.4 Régulateurs de tension et régulateurs de puissance

En cas ou la station photovoltaïque est la seule qui alimente la charge, les régulateurs de tension d-q sont actifs. Ils traitent les tensions d-q mesurées et la tension de référence V_{ref} pour générer les courants de référence I_{d_ref} et I_{q_ref} .

En cas ou la station photovoltaïque et le réseau alimentent la charge, les régulateurs de puissance réactive sont actifs. Ils traitent la puissance mesurée (P_{prim} & Q_{prim}) au BESS bus primaire et les signaux de référence de puissance P_{ref} et Q_{ref} pour générer les courants de référence I_{d_ref} et le I_{q_ref} .

III.3.2.1.5 Régulateurs actuels

Les courants de référence I_{d_ref} et I_{q_ref} sont fournis aux régulateurs de courant. Les régulateurs traitent les courants mesurés des références pour produire les tensions d-q requises (V_d V_{q_conv}) pour l'onduleur. Notez que le les régulateurs utilisent le calcul anticipatif pour obtenir une réponse dynamique élevée.

III.3.2.1.6 Génération V_{ref}

V_d V_{q_conv} sont mis à l'échelle et transformés en un signal triphasé V_{ref} alimentant le modulateur PWM générant impulsions vers l'onduleur.

III.3.2.1.7 Compensateur de déséquilibre

Lorsqu'il est activé, le compensateur de déséquilibre atténue la tension inverse sur le bus PCC en raison de déséquilibre de charge sur le réseau. Il utilise un régulateur de tension d-q à boucle externe et un régulateur de courant d-q à boucle interne.

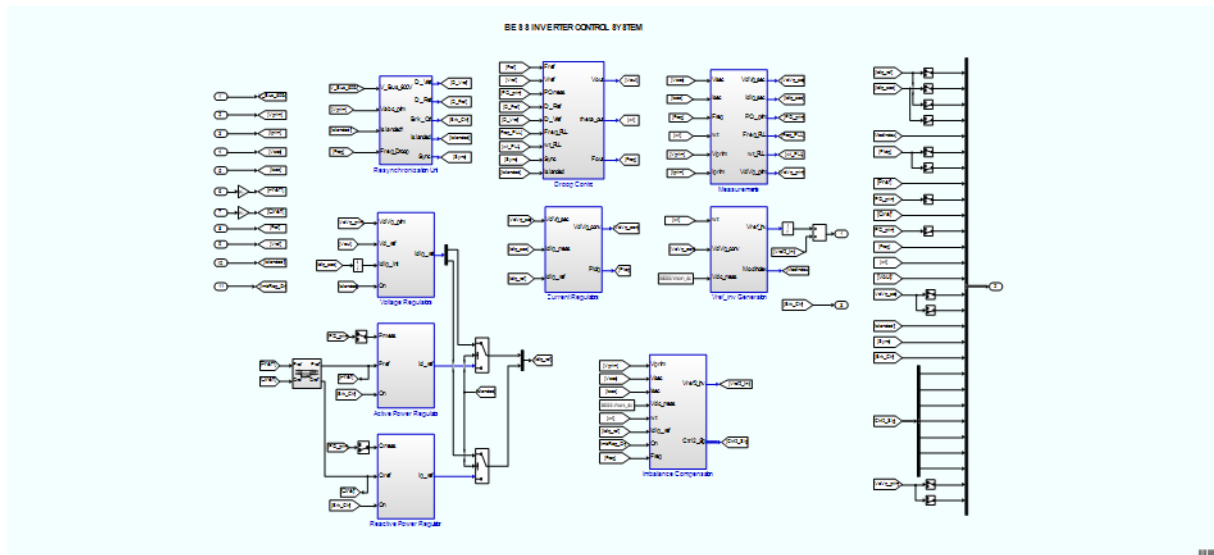


Figure III-2 : schéma bloc des différentes composantes de BESS.

III.3.3 Charge 600V

La représentation simple de la charge se compose d'un modèle de charge triphasé fixe (PQ) et d'un deuxième modèle de charge PQ qui peut être activé/désactivé.

III.3.4 Centrale solaire

La centrale solaire se compose d'un générateur photovoltaïque qui peut produire 1 MW à un rayonnement solaire de 1 000 W/m² et une température de cellule de 25 degrés C. Le générateur est connecté à un convertisseur boost. Le coup de pouce est contrôlé par un système MPPT (Maximum Power Point Tracker). Le MPPT utilise la technique Perturb and Observe faire varier la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin d'extraire le maximum de puissance possible. Cependant, Le boost sera contrôlé par un régulateur de puissance actif lorsqu'une opération de réduction est requise.

La sortie des convertisseurs boost est connectée à un bus DC de 1000 V.

Un convertisseur NPC à trois niveaux (commutation fréquence de 2340 Hz) convertit le 1000 V DC en environ 500 V AC.

Le convertisseur NPC est contrôlé par une tension continue régulatrice dont le rôle est de maintenir la tension du circuit intermédiaire à 1000V, quelle que soit la puissance active délivrée par les panneaux photovoltaïques. Un filtre LC et un transformateur de couplage triphasé 1-MVA 480V/600V sont utilisés pour connecter le convertisseur au système.

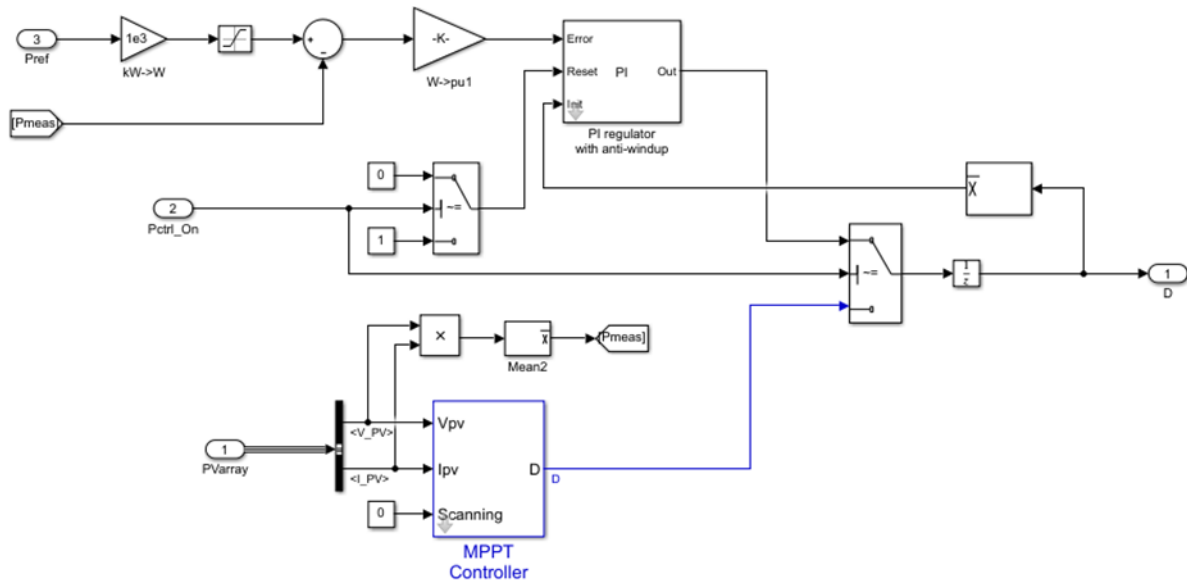


Figure III-3 : schéma bloc de la station photovoltaïque.

III.3.5 Résultats de simulation selon les tests effectuée :

❖ Essai 1

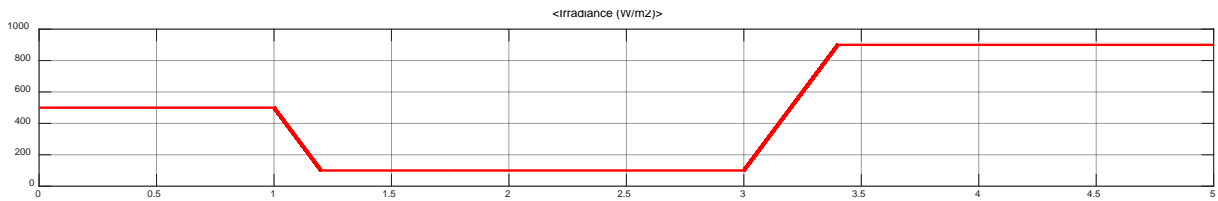


Figure III-4 : variation d'irradiation.

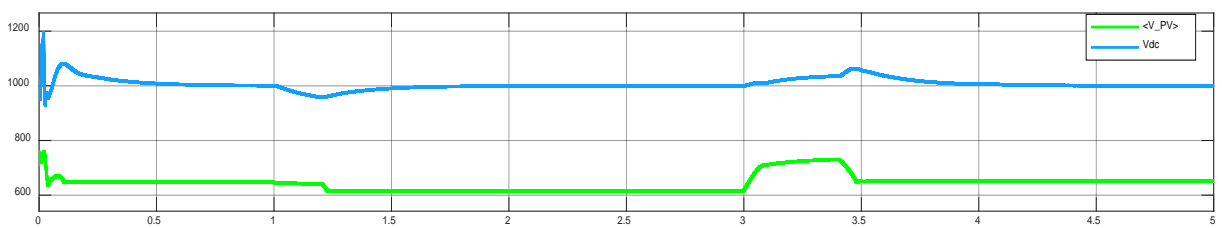


Figure III-5 : tension de générateur photovoltaïque.

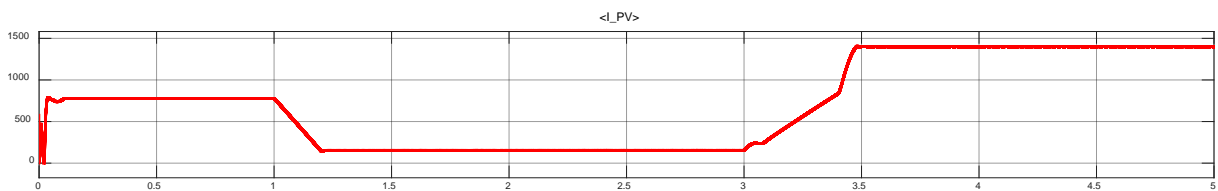


Figure III-6 : courant de générateur photovoltaïque.

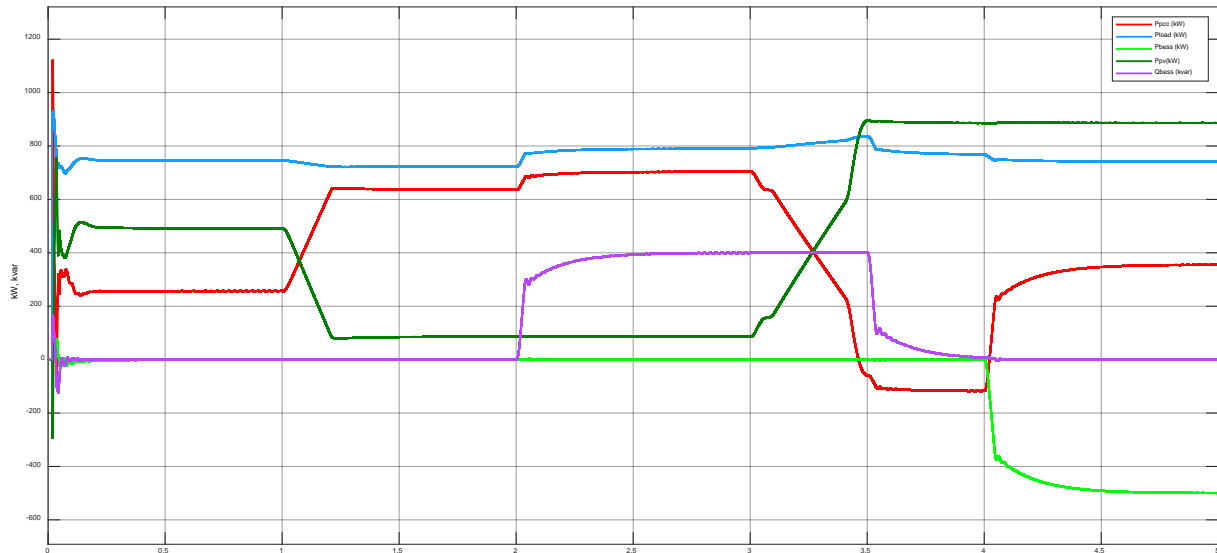


Figure III-7 : puissance du système global.

Le test 1 illustre le fonctionnement du BESS et l'impact d'une variation d'éclairement énergétique sur la centrale solaire et les systèmes BESS.

On remarque dans la première plage (0s à 1s figure III-7) la station photovoltaïque et le réseau débitent l'énergie pour alimenter la charge par la disponibilité de l'ensoleillement (figure III-4) de la part de la station photovoltaïque, après un certain moment à l'instant 1 s (figure III-7) on remarque une chute de puissance photovoltaïque dans la deuxième plage (1s à 3s figure III-7) à cause du manque d'ensoleillement (figure III-4) ce qui nous déduit que le panneau photovoltaïque n'est plus débité (ça veut dire il ne peut pas satisfaire la charge), durant cet instant (1s à 2s figure III-7) le réseau s'occupe de la charge et le BESS contrôle et calcule le manque de puissance pour intervenir à l'instant 2s (figure III-7) par la puissance stockée pour alimenter la charge jusqu'à la reprise de la station photovoltaïque à l'instant 3.5s (figure III-7) par la disponibilité d'ensoleillement (figure III-4).

Dans ce cas à plein ensoleillement, les panneaux permettent d'alimenter la charge et de recharger les batteries pour reprendre leur pleine charge et d'injecter le surplus dans le réseau.

❖ Essai 2

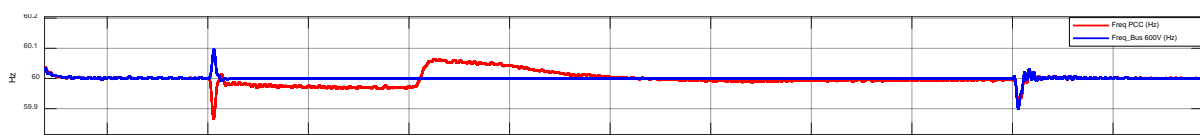


Figure III-8 : fréquence de synchronisation de réseau avec la station photovoltaïque.

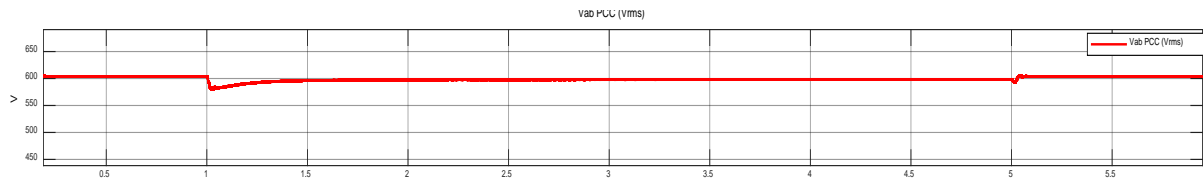


Figure III-9: tension du système de distribution.

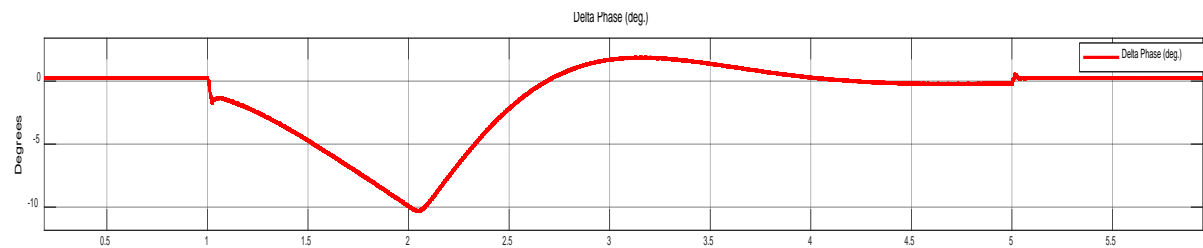


Figure III-10 : déphasage de réseau avec la station photovoltaïque.

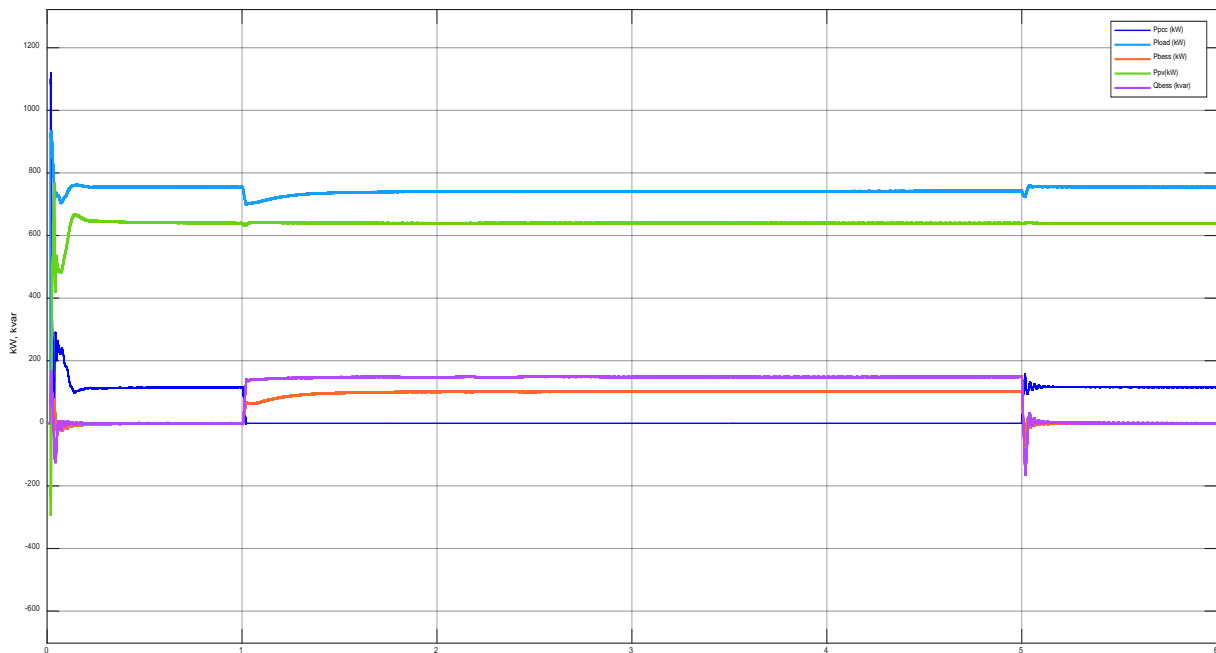


Figure III-11: puissances du système global.

Le test 2 montre le fonctionnement du BESS ou il donne un signal de resynchronisation pour reconnecter la station photovoltaïque au système de distribution d'une manière transparente.

Dans la première partie sur le graphe des puissances (0 s à 0.2s) en remarque que la station photovoltaïque et le système de distribution alimentent la charge à l'instant 0.2 s (figure III-11) le système-il a subi une perturbation à cause d'une chute de puissance de réseau.

Le BESS intervient à l'instant 1s (figure III-11) pour compenser et effectuer une synchronisation ou il amènera la phase de la station photovoltaïque avec la phase de réseau pour garantir une reconnexion transparente et assure la stabilité du système à partir de l'instant 5s (figure III-11).

❖ Essai 3

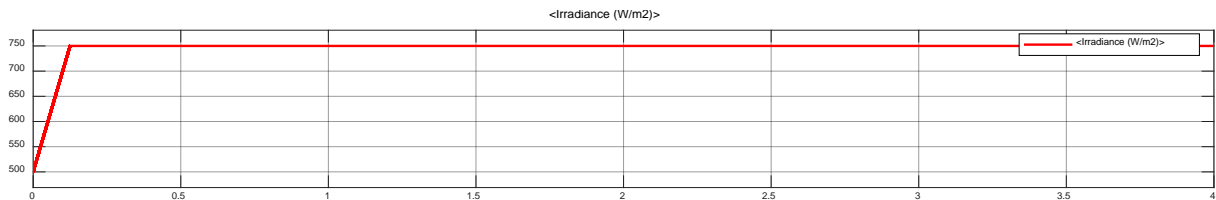


Figure III-9 : variation d'irradiation.

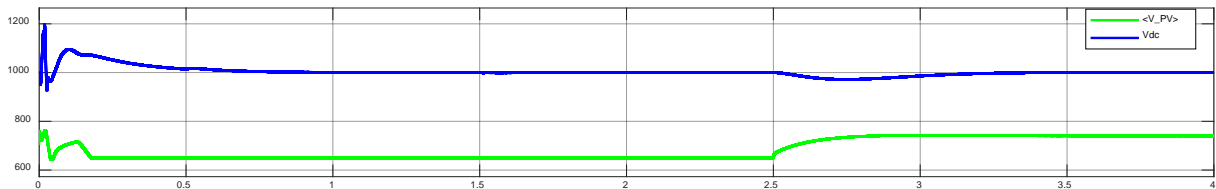


Figure III-10 : tension de générateur photovoltaïque.

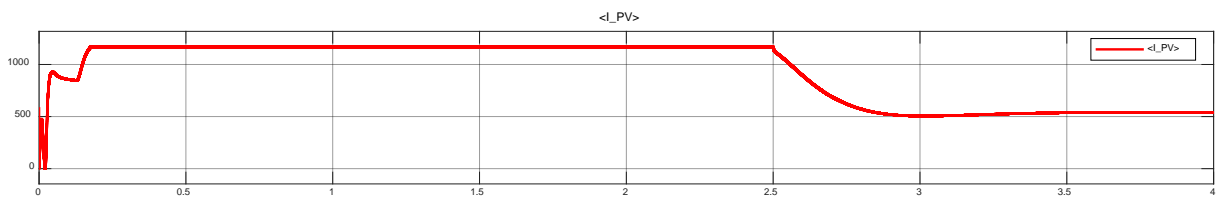


Figure III-11 : courant de générateur photovoltaïque.

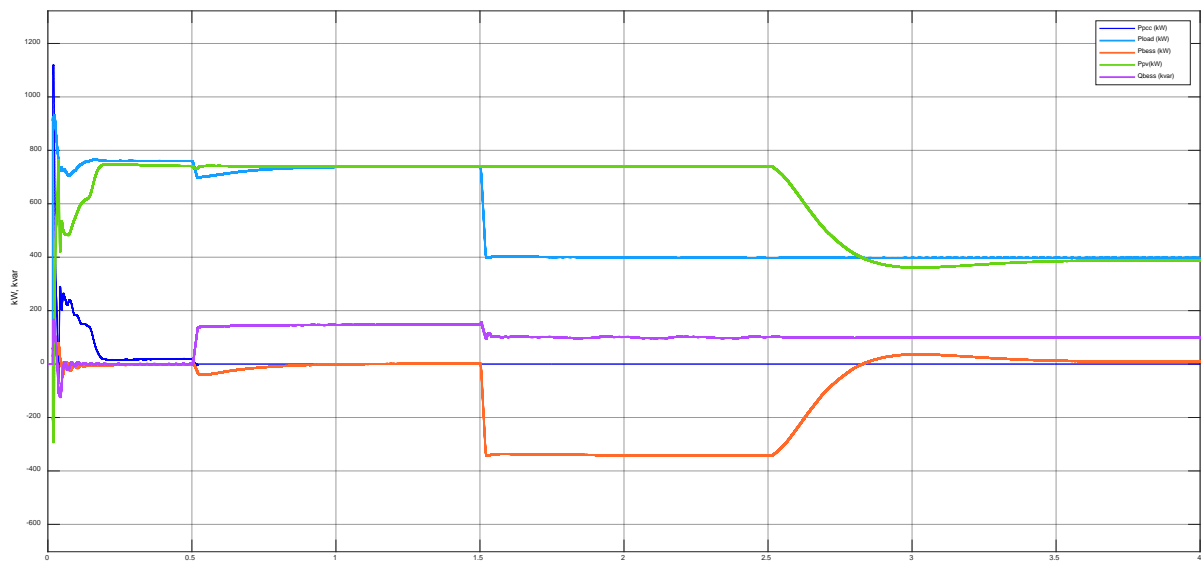


Figure III-12 : variation des puissances sur les différentes parties du système.

Dans la première partie le réseau et la station photovoltaïque alimentent la charge puis à l'instant 0.5s (figure III.15) le réseau il à déconnecté du système et le BESS intervient pour compenser le manque de puissance puis en a simulée une réduction de charge importante (figure III.15 à l'instant 1.5 s), créant une condition dans laquelle la puissance générée par la station photovoltaïque dépasse la demande de charge. Le BESS absorbe ensuite temporairement la puissance excédentaire (figure III.15 de 1.5 s à 2.8 s) et envoie un signal au système de contrôle du générateur photovoltaïque pour passer d'un contrôle MPPT à un mode de contrôle PQ (normal) afin de réduire la puissance de sortie de la centrale solaire.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une description des différentes parties de notre modèle d'une station photovoltaïque raccordée au réseau, et illustré les résultats réalisés sous Matlab Simulink.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque montrent le rôle de BESS sur le système global représentent les tensions, les courants et les puissances générées par le différent système (réseau, station photovoltaïque, BESS). Ainsi, la fréquence de déphasage, Ces résultats montrent que le BESS effectue correctement son rôle dans chaque intervention.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le contexte énergétique et environnemental mondial actuel, l'objectif visé est de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les substances polluantes, en exploitant les énergies renouvelables et en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées, en vue de son abondance, sa disponibilité en tout point du globe terrestre, en plus elle n'est pas polluante.

L'objectif de notre travail était la modélisation et le contrôle d'un générateur photovoltaïque à stockage intégré.

Le premier chapitre de ce mémoire étant destiné à l'étude des différents systèmes de stockage et la modélisation des batteries de stockage, leurs différentes technologies ainsi que leurs paramètres et architectures.

Le deuxième chapitre, nous avons décrits la modélisation des différents composants du système photovoltaïque tel que : la cellule, les régulateurs, les convertisseurs.

Dans le dernier chapitre nous avons fait la simulation avec Matlab Simulink d'une station photovoltaïque à stockage intégré connecté au réseau avec laquelle on a montré le rôle de BESS (système de stockage d'énergie) par trois essais résultants dues :

- Au manque de puissance dans le système.
- A la synchronisation à cause de connexion ou de déconnexion du système photovoltaïque avec le réseau.
- A l'absorption de surplus en cas de réduction de charge par la communication avec MPPT sur les différentes parties de notre système global (station photovoltaïque, réseau de distribution, la charge).

Comme perspectives et complètement à notre travail on suggérera un test additif qui étudiera l'étude de compensation de déséquilibre et une réalisation d'un banc d'essai.

Références bibliographique

- [1] Belhadj Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Centre Universitaire De Bechar, Mémoire De Magister.
- [2] Akassewa Tchapo SINGO, « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome », Université Henri Poincaré, Thèse De Doctorat Soutenue Le 3/02/2010.
- [3] Taraft Saci, « Etude Du Stockage Inertiel D'énergie Dans Une Chaîne De Conversion Eolienne A Vitesse Variable Basée Sur Une Machine Asynchrone A Double Alimentation ». Université A/MIRA De Bejaïa, Mémoire De Magister Soutenu Le 14/05/2008.
- [4] Gabriel-Octavian CIMUCA, « Système Inertiel De Stockage D'énergies Associe A Des Générateurs Eoliens ».Ecole Nationale Supérieure d'Arts Et Métiers Centre De Lille, Thèse De Doctorat Soutenue En 2005.
- [5] Fabrice Delfosse, « Détermination De L'état De Charge Des Batteries D'un Véhicule Electrique ». Université De Liège, Mémoire D'ingénieur Année Académique 1997-1998.
- [6] B. Multon, H. Ben Ahmed, « Le Stockage Stationnaire D'énergie Electrique : Pourquoi Et Comment ? », Revue IEEE., n°48, mars 2007, pp. 18-29.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Guillaume Fontès, « Modélisation Et Caractérisation De La Pile PEM Pour L'Etude Des Interactions Avec Les Convertisseurs Statiques ». Institut National Polytechnique De Toulouse, Thèse De Doctorat Soutenue Le 16/08/ 2005.
- [11] J.Hladik,« Livre : Accumulateurs Electrique ». 1ere Edition :1er Trimestre, Presses Universités De France 1977.
- [10] Alain Ricaud, « Modules Et Systèmes Photovoltaïques ».Université De Savoie. Article : Septembre 2008.

- [12] BELLALA Djamel, « Contribution A l'Optimisation Des Systèmes De Conversion d'Energie. Application Aux Systèmes Photovoltaïques ». Université De Batna, Thèse De Doctorat.
- [13] MOHAMED ARROUF, « Optimisation De L'ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branche Sur Un Générateur Photovoltaïque ». , Université Mentouri De Constantine, Thèse De Doctorat Soutenu Le 25/12/2007.
- [14] Maxime Montaru, « Contribution A L'évaluation Du Vieillissement Des Batteries De Puissance Utilisées Dans Les Véhicules Hybrides Selon Leurs Usages». Institut Polytechnique De Grenoble, thèse De Doctorat Soutenu Le 06 / 07 / 2009.
- [15] Stéphane VIGHETTI, « Systèmes Photovoltaïques Raccordés Au Réseau : Choix Et Dimensionnement Des Etages De Conversion ». , Université De Grenoble, Thèse De Doctorat Soutenu Le 24/09/2010.
- [16] Dinh Vinh Do, «Diagnostic De Batteries Lithium Ion Dans Des Applications Embarquées», Université De Technologie De Compiègne, Thèse De Doctorat Soutenu Le 5 Juillet 2010.
- [17] Baskar Vairamohan, «STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR BATTERIES», Université De Tennessee, Knoxville, Memoire De Master Soutenu En Décembre 2002.
- [18] Boussekine Abdeghani,Guermouche Nassim, «Contribution A L'étude Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque», Université De Bejaïa, Mémoire D'ingénieure D'état Soutenu En 2010.
- [19] H.L. Chan, D. Sutanto ,« A New Battery Model For Use With Battery Energy Storage Systems And Electric Vehicles Power Systems», Université Polytechnique De Hong Kong, Revue IEEE, 0-7803-5935-6/00/\$10.00 (C) 2000.
- [20] Siavash Zoroofi,« Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems».Université De Technologie De Chalmers Suède, Mémoire de master soutenu en 2008.
- [21] A. Ould Mohamed Yahya1, A. Ould Mahmoud et I. Youm, Etude Et Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque, Article, Revue Des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483, Université de Nouakchott, Mauritanie, Septembre 2011
- [22] Mornay Thomas, VernayAlexis,Volle Marion, les cellule photovoltaïque, Article, Classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux, Lyon, 2005, France
- [23] Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink Etude pratique site Oued Nechou à Ghardaïa Revue ElWahat pour les Recherches et les EtudesVol.10 n°1 (2017): 1-19
- [24] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/photovoltaïque-avantages.html>.

Consulte le 01/07/2020

- [25] N.SAADA et A.OUAZAR « Méthodes d'identification des Panneaux photovoltaïques.». Thème De Master. Université de Béjaia, 2015.
- [26] G. Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables.
- [27] A. Woyte, J. Nijs, and R. Belmans, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results," Sol. Energy, vol. 74, no. 3, pp. 217–233, 2003.
- [28] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [29] AkihKiro Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system," Thèse de Master de l'Université de California, Septembre 2005.
- [30] Bellala Djamel, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques," Thèse Doctorat de l'Université de Batna, 2009.
- [31] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ». IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [32] HAMDI Abderrazak, Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage, master, Réseau électrique ,2018.
- [33] M. Drif , A. Malek Et F. Krim, « Expérimentation D'un Contrôleur De l'Etat De Charge De La Batterie Dans Un Système Photovoltaïque Autonome »., Revue Des. Energies. Renouvelable. : Valorisation (1999) 147-152.
- [34] 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
- [35] A.Belhoucine et S.Zaidi. <<Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome>>. Mémoire de master II. Université de Bejaia 2012
- [36]https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8749/ArabSalim_ToudertDalila.pdf?sequence=1
- [37] infos@power-africa.comBP 11029 Niamey - NIGERLeader Africain des Energies Renouvelables et Economiques pour tous