

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université de Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES et TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commande Electrique  
Thème

***Etude et conception des systèmes de stockage d'une  
station photovoltaïque***

Présenté Par :

- 1) Melle BENYETTOU HIND.
- 2) Melle. LAOUEDJ IKRAM

Devant le jury composé de :

Dr BENAZZA BAGHDADI	MCB	UAT.B.B	Président
Dr AISSOU MASSINISSA	MCA	UAT.B.B	Examineur
Dr. FLITTI MOHAMMED	MCA	UAT.B.B	Encadrant

*Année universitaire 2020/2021*

# *REMERCIEMENT*

*Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir  
donné du courage,*

*Volonté et patience pour terminer ce travail en cours.*

*Nous remercions également Mr FLITTI MOUHAMED,  
le superviseur de ce message*

*Pour ses précieux conseils.*

*Un grand merci à tous les membres du jury pour  
l'intérêt qu'ils portent à ce travail.*

*Nous remercions nos parents pour tous leurs sacrifices  
pour notre éducation,*

*Nos amis pour leur soutien qui nous a permis d'opérer  
dans les meilleures conditions.*

*Nous exprimons notre gratitude à tout le personnel du  
département de génie électrique.*

*Dédicace :*

*Nous dédions ce travail à nos chers parents, et  
nos amis.*

*HIND & IKRAM*

# **Sommaire**

### **Sommaire.**

Liste des figures.	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	01
<b>Chapitre I : état de l'are</b>	
I.1. Introduction	05
I.2. Les différents types de centrales électriques	05
I.2.1. L'énergie l'énergie primaire :	05
I.2.1.1. La biomasse	05
I.2.1.2. L'énergie géothermiques :	05
I.2.1.3. L'énergie solaire :	05
I.2.1.4. L'énergie hydraulique :	05
I.2.1.5. L'énergie éolienne	06
I.2.2. Les centrales solaires photovoltaïques	06
I.2.2.1-Un système de concentration	07
I.2.2.2-Systèmes photovoltaïques solaires	08
I.2.2.3 Fonctionnement	09
I.2.2.4. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	09
I.2.2.4.1.Avantages	09
I.2.2.4.2. Inconvénients.	10
I.2.3. Etat de l'art de la production de l'électricité photovoltaïque nocturne	10
I.3. Le besoin de systèmes de stockage :	11
I.3.1. Les technologies de stockage d'énergies	11
I.3.2. Comparaison des différentes technologies de stockage :	12
I.3.3. Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité :	12
I.3.3.1. Stockage mécanique :	12
I.3.3.1.1. Station de pompage	12
I.3.3.1.2. Stockage d'énergie par air comprimé	13
I.3.3.1.3. Stockage inertiel :	14
I.3.3.2. Stockage électrochimique	15
I.3.3.2.2. Batteries :	15
I.3.3.2.3. Batteries à circulation	16

I.3.3.3. Stockage électromagnétique :	17
I.3.3.4. Stockage thermique:	18
I.4. Conclusion	18
<b>Chapitre II : Etude et Modélisation d'une station photovoltaïque avec le système de stockage.</b>	
II.1-Introduction	20
II.2-Rayonnement solaire :	20
II.2.1 Les différents types de rayonnement :	20
II.2.1.1- Rayonnement direct RD	20
II.2.1.2- Rayonnement diffus Rd	20
II.2.1.3-Rayonnement réfléchi Rr	20
II.2.1.4- Le rayonnement global RG	20
II.3-La modélisation d'une cellule solaire :	21
II.3.1-Modèles de cellules solaires :	21
II.3.2-Caractéristiques d'une cellule solaire :	24
II.3.2.1-Le courant de court circuit :	24
II.3.2.2-La tension en circuit ouvert $V_{co}$ :	25
II.3.2.3- Le facteur de forme :	25
II.3.2.4-Rendement de conversion d'énergie :	25
II.3.3-Groupement des cellules solaires :	26
II.3.3.1-Module photovoltaïque.	26
II.3.3.2-Panneau photovoltaïque	26
II.4-Modélisation du convertisseur DC-DC	27
II.4.1-Hacheur élévateur (Boost)	27
II.5-La commande MPPT :	28
II.5.1-Principe de la technique "Perturb and Observe" (P&O)	28
II.6-Modélisation du stockage électrochimique :	30
II.6.1-MODÉLISATION DES BATTERIES AU PLOMB	30
II.6.1.1-Le modèle électrique simple de la batterie	30
II.6.1.2-MODÈLE CIEMAT	31
II.6.1.2.1: La tension $V_{bat}$ :	31
II.6.1.2.2: La capacité $C_{bat}$ :	31
II.6.1.2 .4-Courant de batterie :	34

## Sommaire

---

II.7-Conclusion	34
<b>Chapitre III : gestion de l'écoulement de puissance (simulation)</b>	
III.1.-Introduction	36
III.2 - Panneaux photovoltaïques..	36
III.3- Convertisseur DC/AC (réversible)	16
III.4- Simulation	39
III.5 -Conclusion :	39
Conclusion générale	40
Bibliographie	42
Résumé	

### Les figures :

#### Chapitre I : état de l'are

Figure. I.1 : Les centrales solaires photovoltaïques	06
Figure. I. 2: Les 4 principaux systèmes de concentration	08
Figure I. 3:La composition d'un panneau solaire	08
Figure I. 4 :L'effet photovoltaïque	09
Figure I. 5 : Une centrale à tour solaire, pour produire jour et nuit	11
Figure I.6: Le stockage dans le système de production - transport - distribution électrique	11
Figure I. 7 : Schéma de fonctionnement d'une STEP	13
Figure I.8: Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé	13
Figure I. 9 : Le stockage d'énergie par volant d'inertie	14
Figure I.10: Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène	15
Figure. I.11 : Schéma d'une batterie à circulation	16
Figure I.12. Des supercapacités	17
Figure I.13 : Schéma d'une installation de stockage thermique	18

#### Chapitre II : Etude et Modélisation d'une station photovoltaïque avec le système de stockage

Figure II-1 : Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque	20
Figure II-2 : Les différentes composantes du rayonnement solaire..	21
Figure II-3 : Modèle idéal de cellule solaire	22
Figure II-4 : Modèle de cellule solaire réelle avec résistance série et parallèle	23
Figure II-5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque idéale et réelle	24
Figure II-6 : Schéma électrique d'un hacheur élévateur	27
Figure II-7: Caractéristique P(V) d'un panneau solaire	29
Figure II-8 : Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O)	29
Figure II-9 : le modèle R-C de la batterie	30
Figure II-10 : Schéma électrique équivalent de nb éléments de batteries en séries	31

#### Chapitre III : gestion de l'écoulement de puissance (simulation)

Figure III.1 : Système Photovoltaïque lié à un réseau actif de puissance 250 Kw	36
Figure III.2 : Irradiation en ( $W/m^2$ )	37
Figure III.3 : la tension aux bornes des batteries (Volts)	37
Figure III.4 : la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque (W)	38

## Sommaire

---

Figure III.5 : la puissance coté AC (W)	38
Figure III.6.a : tension simple $V_{an}$ (V)	38
Figure III.6.b : tension composé avant filtrage $V_{ab}$ (V)	38
Figure III.7 : courant alternatif délivré par le système photovoltaïque (A)	39

### **Les tableaux :**

Tableau I.1 : les plus grandes centrales PV au monde (top 4)	07
Tableau I. 2 : Principales technologies de stockage électrique	12
Tableau I.3 : comparatif des différentes technologies de batteries	16
Tableau II-1 : Caractéristiques du module PV	26

### Les symboles :

**PV** : photovoltaïque

**STEP** : Les stations de transfert d'énergie par pompage

**CAES**: Compressed Air Energy Storage

**DC**: direct courant

**RD** : Rayonnement direct

**Rd** : Rayonnement diffus

**Rr** : Rayonnement réfléchi

**RG** : Rayonnement global

**I<sub>ph</sub>** : photocourant

**I<sub>0</sub>** : Le courant d'obscurité

**I<sub>D</sub>** : Courant de diode

**I<sub>S</sub>** : Courant de saturation inverse

**A** : le facteur d'idéalité de la jonction

**V<sub>T</sub>** : Tension thermique(V)

**k** - Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K,

**T** - température (K)

**q** - charge d'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  As

**R<sub>S</sub>** : Résistance série

**R<sub>P</sub>** : Résistance parallèle.

**FF**: Le facteur de forme

**$\eta$**  : Le rendement

**S** : Surface de la cellule solaire

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit

**V<sub>co</sub>** : Tension de circuit ouvert

***Gr*** : Eclairement

**N<sub>S</sub>**: est le nombre de cellules en série

**N<sub>P</sub>**: est le nombre de cellules en parallèle

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking

**$\alpha$**  : le rapport cyclique, est la sortie du système de commande MPPT (P&O).

**V<sub>o</sub>** : la tension de sortie

**I<sub>o</sub>** : le courant de sortie

**CS** : convertisseur statique

## Sommaire

---

**P&O** : Perturb and Observe

**Q<sub>batt</sub>** : la quantité de charge électrique en Coulomb,

**Q<sub>d</sub>** : la quantité de charge

**I** : le courant a travers la capacité,

**t** : le temps de fonctionnement,

**C** : la capacité en Farad,

**V<sub>bat</sub>** : la tension de la batterie

**I<sub>bat</sub>** : le courant de la batterie

**E<sub>b</sub>** : la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie

**R<sub>i</sub>** : sa résistance interne

**C<sub>bat</sub>** : la capacité de la batterie

**C<sub>10</sub>** : Capacité nominale de la batterie (en Ah)

**I<sub>10</sub>**: Courant nominal de la batterie (en A)

**ΔT** : L'échauffement de la batterie

**PWM** : Pulse width Modulation.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion.

Introduction générale

L'électricité est l'un des éléments nécessaires pour la vie humaine, elle participe au développement de la société et de la vie moderne. Cependant, les dernières statistiques montrent que plus de deux milliards de personnes dans le monde n'ont toujours pas d'électricité ; ceux des régions isolées. Habituellement, l'installation de réseaux électrique dans ces régions nécessite un investissement important et une énorme dépense en raison de leur éloignement des centrales électriques et aussi de la difficulté d'accès. Et pour résoudre ce problème, il faut utiliser des énergies renouvelables. [1]

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fissiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité. [2]

Les sources d'énergies renouvelables ont l'inconvénient d'être intermittents et instable, donc pose des problèmes en termes de stabilité, de qualité ou encore de sûreté de fonctionnement par rapport aux réseaux électriques. Pour pallier au problème de disponibilité de l'énergie, nous avons recours à des systèmes de stockages qui emmagasinent l'énergie produite par ces sources et la restituent lorsque les utilisateurs en expriment la demande. Le stockage de l'électricité est primordial il permet en effet d'utiliser l'énergie photovoltaïque (PV) pendant les périodes nocturnes et les jours nuageux à faible production et d'augmenter ponctuellement la puissance fournie par le système par rapport à celle directement fournie par le générateur PV.[3]

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales, pour utiliser de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable.

Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus rapidement que cette capacité installée est faible. Afin de protéger les batteries contre une recharge excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser la totalité de la ressource renouvelable. le dimensionnement du champ photovoltaïque est surestimé par rapport aux besoins réels de l'utilisateur final.

Le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.[4]

Dans ce travail notre vision se base sur la modélisation de la chaine de production photovoltaïque tels que les panneaux photovoltaïques, le convertisseur DC-DC- Batterie et la gestion de la puissance générée en appliquant la technique MPPT, et pour se faire nous allons reparti ce manuscrit de la façon suivante :

En premier chapitre l'état de l'art des différents systèmes de production et système de stockage électrique..

Le deuxième chapitre modélisation de la chaine de production photovoltaïque sera présenté.

Dernièrement, le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un la chaine de production photovoltaïque.

## Chapitre I : état de l'art

**I.1-Introduction :**

La production d'électricité est essentiellement un secteur industriel qui approvisionne ses consommateurs en énergie électrique adaptée à leurs besoins. Pour les fournisseurs d'électricité, il s'agit de la première étape de cet approvisionnement, qui est suivie du transport et de la distribution et comprend le stockage [5], le stockage de l'énergie améliore l'efficacité énergétique et favorise l'insertion des énergies renouvelables variables. Elle apporte aussi sécurité et flexibilité aux réseaux. [6]

La production d'électricité est réalisée dans des centrales électriques, Les centrales électriques transforment des sources d'énergie naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité des consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointain. Le réseau électrique est utilisé pour transporter et distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs. [7]

**I.2- Les différents types de centrales électriques :****I.2.1- Selon l'énergie primaire :**

On distingue, parmi les énergies primaires converties en énergie électrique dans les centrales électriques, celles dites « renouvelables » (biomasse, solaire, géothermique, hydraulique et éolienne).

**I.2.1.1- La biomasse :**

Les biomasse et Les déchets sont directement brûlés dans des chaudières spécifiques en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux. Mais ces combustibles sont plutôt utilisés dans des réseaux de chaleur.

**I.2.1.2- L'énergie géothermique :**

Cette chaleur provient des profondeurs de la terre ou de certains sites tels qu'en Islande, permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques

**I.2.1.3-L'énergie solaire :**

Elle est utilisée soit dans des centrales thermodynamiques, où la vapeur d'eau destinée à être turbinée est produite dans des chaudières solaires, soit dans des centrales photovoltaïques constituées d'une multitude de panneaux, qui captent les rayonnements solaire.

**I.2.1.4- L'énergie hydraulique :**

Dans les centrales hydroélectriques, l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes, est utilisée pour actionner la turbine entraînant l'alternateur. [19]

### **I.2.1.5-L'énergie éolienne :**

Quand le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur. [30]

### **I.2.2- Les centrales solaires photovoltaïques :**

Une centrale solaire photovoltaïque est un dispositif technique de production d'électricité par d'un ensemble de modules solaires photovoltaïques reliés en série ou en parallèle et branchés au réseau électrique par des onduleurs.

Les centrales solaires photovoltaïques ont l'avantage de pouvoir être construite n'importe où tant qu'il y a un réseau électrique à proximité. Comme les zones désertiques, et posséder par exemple de dispositifs avec trackers pour suivre la course du Soleil. Ces dispositifs facilitent également la combinaison de systèmes à concentration et optimisent ainsi l'utilisation. La puissance des centrales varie en général de 1MwC à plusieurs dizaines de MW



Figure I.1 : Les centrales solaires photovoltaïques [5]

Au début des années 2010, les Etats-Unis restaient maître des méga-centrales avec des capacités de quelques centaines de MwC. Aujourd'hui, la Chine et surtout l'Inde se livrent la bataille de la plus grosse centrale au monde.[8]

Puissance (MW crête)	Localisation	Description	Production (ans)
<b>1365 MW</b>	Inde Bhadla, jodhpur, rajasthan	Bhadla solar	2018
<b>1000 MW</b>	Chine Yan chi, province du Qinghai	Station solaire PV de yanchi	2016
<b>1000MW</b>	Inde Gadivemula Andhra pradesh	Station solaire PV de kurnool	2017
<b>850MW</b>	Chine Barrage de Longyangxia, province du Qinghai	Station hydro-solaire PV de Longyangxia	2013-2017

Tableau I- 1 : les plus grandes centrales PV au monde (top 4)[9]

### I.2.2.1-Un système de concentration :

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration lumineux. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante. [21] Un système de concentration est la composition de réflecteurs et d'un absorbeur. C'est cette composition qui va permettre la concentration de l'énergie solaire pour obtenir des températures exploitables. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel, fixe ou mobile. [20]

La figure. I.2 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. Les systèmes de génération d'électricité sont divers : turbine à gaz, cycle de Rankine, Moteur Stirling, Cycle de Rankine organique sont les options généralement choisies. et Le stockage permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire [21]



Figure I. 2: Les 4 principaux systèmes de concentration

### I.2.2.2-Systèmes photovoltaïques solaires :

Les panneaux photovoltaïques (solaires électriques) contiennent des semi-conducteurs tels que le silicium qui convertissent directement le rayonnement solaire en électricité. Contrairement aux sources d'énergies non renouvelables, l'énergie solaire est gratuite, elle ne produit aucune émission et est à la portée de tous. Les panneaux photovoltaïques n'ont pas de pièces mobiles et exigent peu d'entretien. [22]

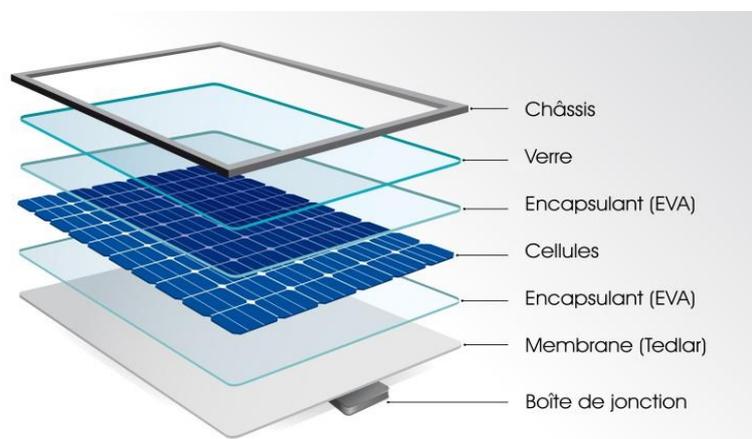


Figure I. 3: La composition d'un panneau solaire

### I.2.2.3- Fonctionnement :

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes posées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [23]

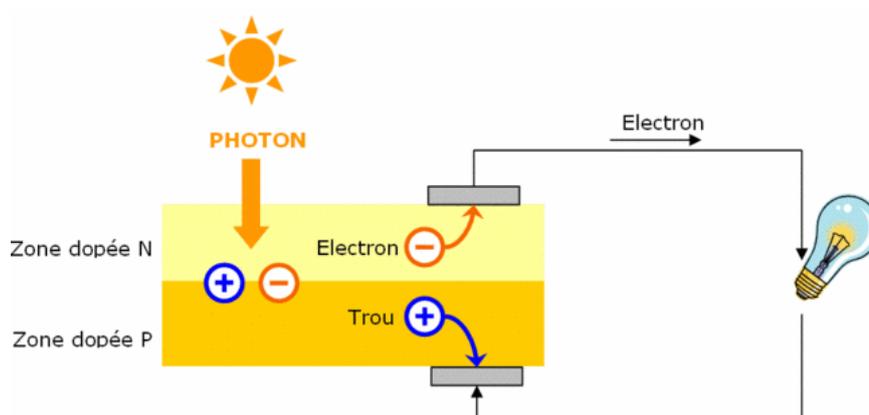


Figure I. 4 :L'effet photovoltaïque

### I.2.2.4-Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

#### I.2.2.4.1- Avantages :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Génère l'énergie requise
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- en produisant votre propre électricité, vous faites jusqu'à 40% d'économies sur vos factures.

- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Ils sont silencieux, absence de bruit et de nuisance des panneaux solaires.

#### **I.2.2.4.2-Inconvénients :**

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Production plus faible l'hiver, alors que la consommation est plus forte.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher. [11]

#### **I.2.3-Etat de l'art de la production de l'électricité photovoltaïque nocturne :**

Des chercheurs de l'école d'ingénierie et des sciences appliquées de Harvard (SEAS) proposent d'optimiser la production électrique des panneaux solaires en créant de l'électricité la nuit.

Ces panneaux révolutionnaires, de longues recherches ont été réalisées depuis 50 ans sur les diodes infrarouges émis par la terre , celle-ci renvoie la nuit toute la chaleur accumulée durant la journée dans l'espace. Ce flux de chaleur d'un corps chaud vers un corps froid permettrait de générer de l'énergie, bien-sûr moins intense que le rayonnement solaire direct. Celle-ci sera alors récupérée par les panneaux pour être transformée en électricité. Un projet encore au stade expérimental [12].



Figure I. 5 : Une centrale à tour solaire, pour produire jour et nuit [9]

### I.3-Le besoin de systèmes de stockage :

Les énergies vertes sont dites renouvelables, car elles proviennent de sources naturelles, supposées inépuisables. S'il est vrai que l'énergie issue du soleil semble sans limites, il n'est pas possible de la puiser à toutes heures de la journée ni durant toute l'année, ce qui limite le rachat du photovoltaïque. Au problème d'intermittence s'ajoute celui de la météo, souvent capricieuse, qui rend cette source d'énergie incertaine. D'où l'importance du stockage de l'énergie solaire pour couvrir les besoins énergétiques. Il faut être capable de stocker l'énergie que l'on produit en surplus pendant les périodes propices (quand il y a beaucoup de soleil et de vent) afin de la redistribuer pendant les périodes creuses, où la production est basse. [14][10]

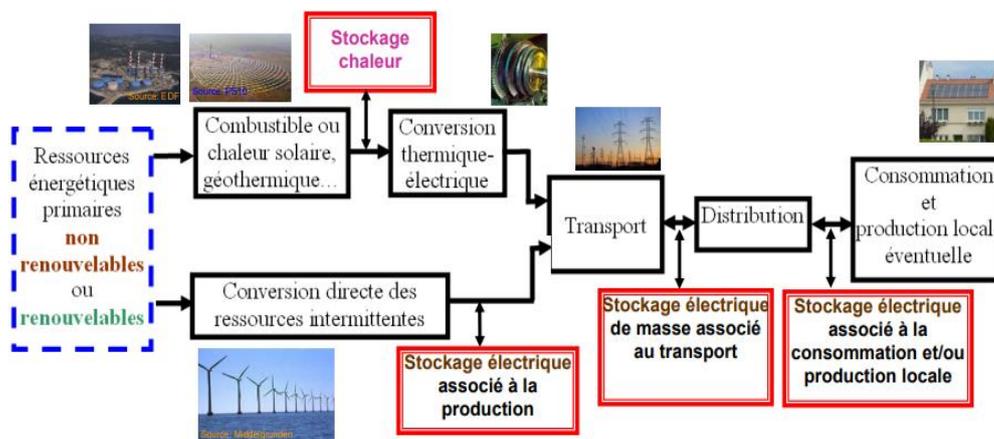


Figure I.6: Le stockage dans le système de production - transport - distribution électrique.

### I.3.1-Les technologies de stockage d'énergies :

Cette section dresse un état de l'art des technologies disponibles ou en développement. Les technologies étudiées dans le cadre de cette étude ont été sélectionnées pour couvrir toutes les grandes typologies de système de stockage d'énergies

### I.3.2-Comparaison des différentes technologies de stockage :

Les technologies de stockage existantes sont nombreuses et d'autres, encore au stade de la recherche ou de l'expérimentation, se développent.

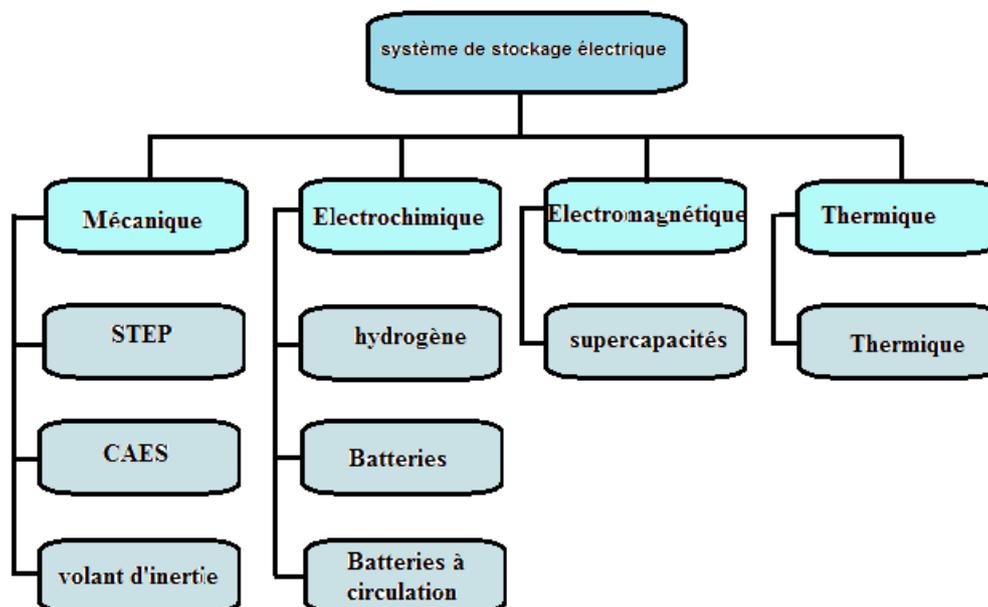


Tableau I.2 : Principales technologies de stockage électrique.

### I.3.3- Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité :

#### I.3.3.1-Stockage mécanique :

##### I.3.3.1.1-Station de pompage :

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont des technologies de stockage par gravitation, et sont un type particulier d'installations hydroélectriques est composée d'un bassin supérieur avec une retenue d'eau et d'un bassin inférieur entre lesquels est placé un groupe hydroélectrique réversible, dit « synchrone ». Ce dernier peut fonctionner comme un ensemble pompe-moteur ou turbine-alternateur. En mode

pompe-moteur, il consomme de l'électricité pour pomper l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. En mode turbine-alternateur, il produit de l'électricité lors du transfert d'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur.[24]

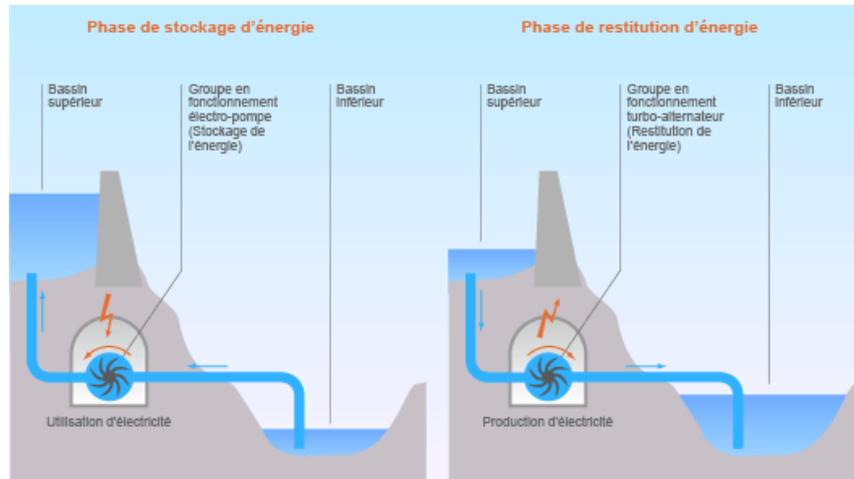


Figure I. 7 : Schéma de fonctionnement d'une STEP

### I.3.3.1.2-Stockage d'énergie par air comprimé :

Le « CAES » (Compressed Air Energy Storage) est un système de stockage et de restitution d'énergie sous forme d'air comprimé greffé sur des turbines à gaz. Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air, l'air comprimé est déchargé dans une turbine qui entraînera un alternateur, pour récupérer énergie potentielle. Cette étape nécessite un combustible pour détendre l'air (généralement du gaz naturel). Du courant est alors produit et est ensuite réinjecté sur le réseau.[25]

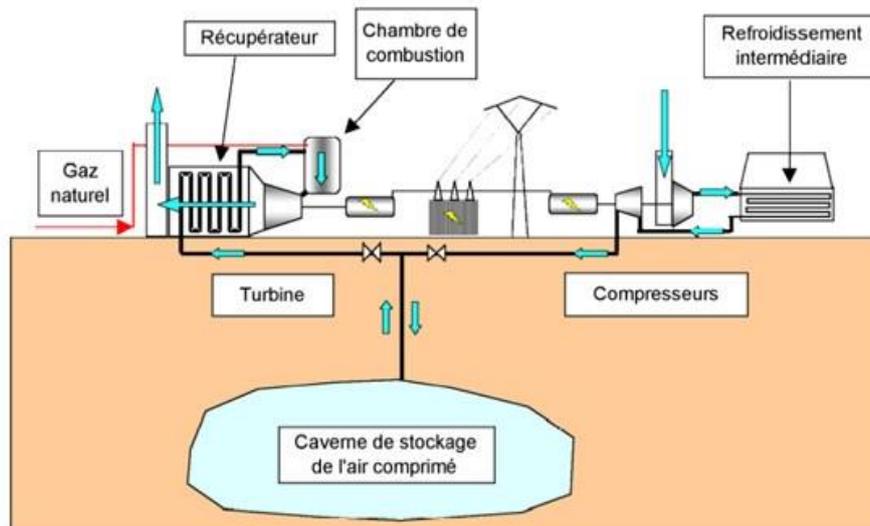


Figure I.8: Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

### I.3.3.1.3- Stockage inertiel :

Le stockage d'énergie par volant d'inertie consiste à emmagasiner de l'énergie cinétique grâce à la rotation d'un objet lourd (une roue ou un cylindre), généralement par un moteur électrique, et à restituer ensuite cette énergie en utilisant le moteur en sens inverse comme générateur d'électricité. Entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.[26]

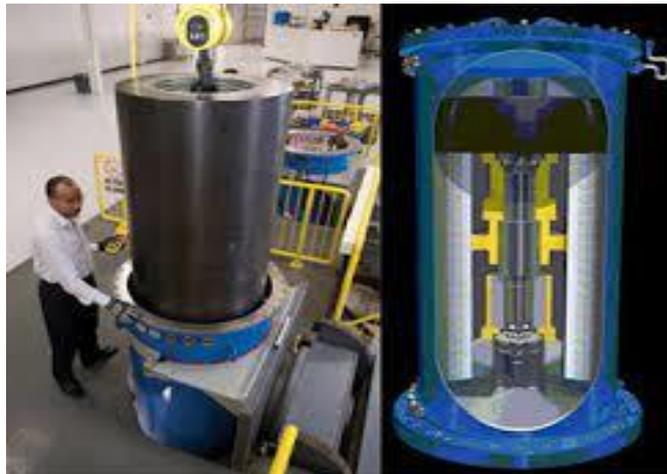


Figure I. 9 : Le stockage d'énergie par volant d'inertie

### I.3.3.2- Stockage électrochimique :

#### I.3.3.2.1- Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène :

Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène permet de pallier l'intermittence des énergies renouvelables (éolien et solaire) en optimisant la capacité de production électrique, Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation.

$2H_2O=2H_2 + O_2$  .Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.[17]

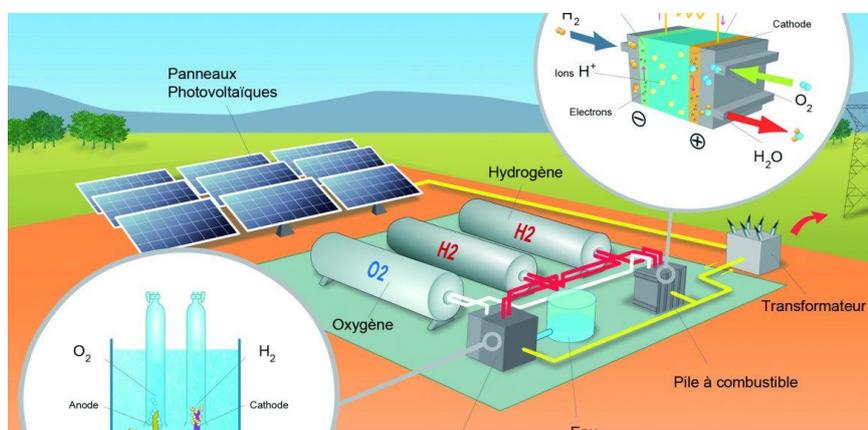


Figure I.10: Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

#### I.3.3.2.2-Batteries :

Les batteries (ou accumulateurs) et les piles sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les batteries sont basées sur un système électrochimique réversible, contrairement aux piles. Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zebra), etc., La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies, Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité [27].

	Pb	Ni- Cd	Ni- Mh	Ni- Zn	Zebra	LMP	Li- ion	Li- Po	LiFePo4	Li- air
Wh/kg	40	60	90	80	120	110	150	190	110	100
Durée de vie (cycles)	500	2000	1500	nc	nc	1800	1000	2000	2000	nc

Tableau I.3 : comparatif des différentes technologies de batteries

### I.3.3.2.3-Batteries à circulation :

Dans les batteries à circulation d'électrolyte, les composés chimiques, responsables du stockage de l'énergie, sont liquides en solution dans l'électrolyte évitant les réactions électrochimiques classiques qui créent des composés solides et surtout permettent d'être stockés dans des réservoirs d'anolyte et de catholyte. La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes. A ce jour, seuls des projets expérimentaux sont en cours de développement.[29]

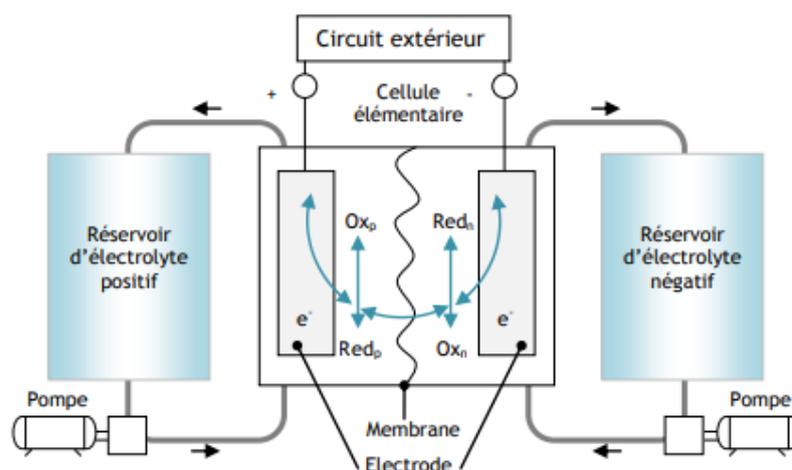


Figure I.11 : Schéma d'une batterie à circulation

### I.3.3.3-Stockage électromagnétique :

Le principe des supercapacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydoréduction. L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts.

Les systèmes de stockage magnétique supercapacités sont principalement destinés à L'alimentation des lanceurs électromagnétiques et sont parfois envisagés pour des applications d'amélioration de la qualité de l'énergie sur les réseaux

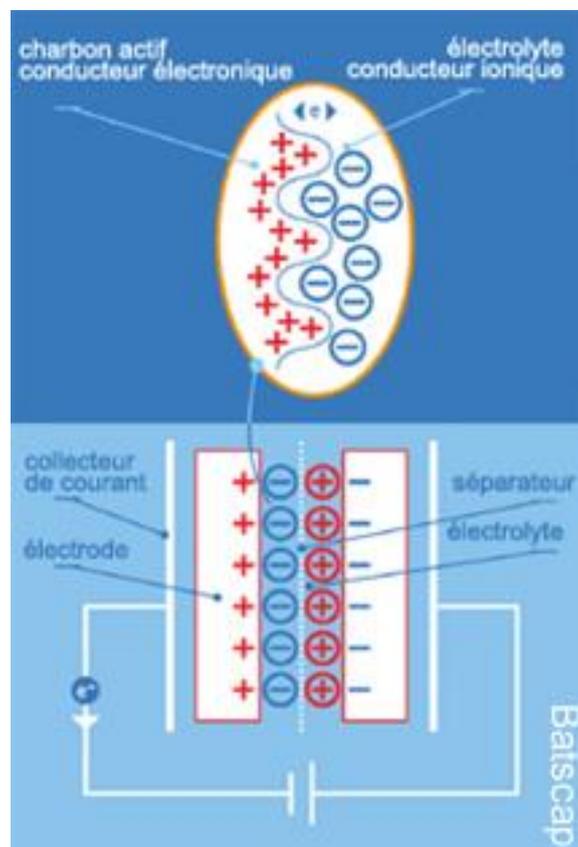


Figure I.12. Des supercapacités

### I.3.3.4- Stockage thermique:

Le stockage de la chaleur, une solution de flexibilité pour la transition énergétique. La chaleur en tant que vecteur énergétique se stocke facilement, ce qui ouvre la porte à de nombreuses applications comme l'apport de flexibilité aux réseaux de chaleur, l'efficacité des procédés industriels et le lissage de la production d'énergie.

Le stockage de chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire mobilise aujourd'hui un parc de plusieurs millions d'installations, ce qui représente un appel de puissance de plusieurs gigawatts. Cet appel de puissance est prédictible et commandable, ce qui permet de le décaler de manière programmée et à des heures auxquelles le réseau électrique n'est pas en situation contrainte.[28]

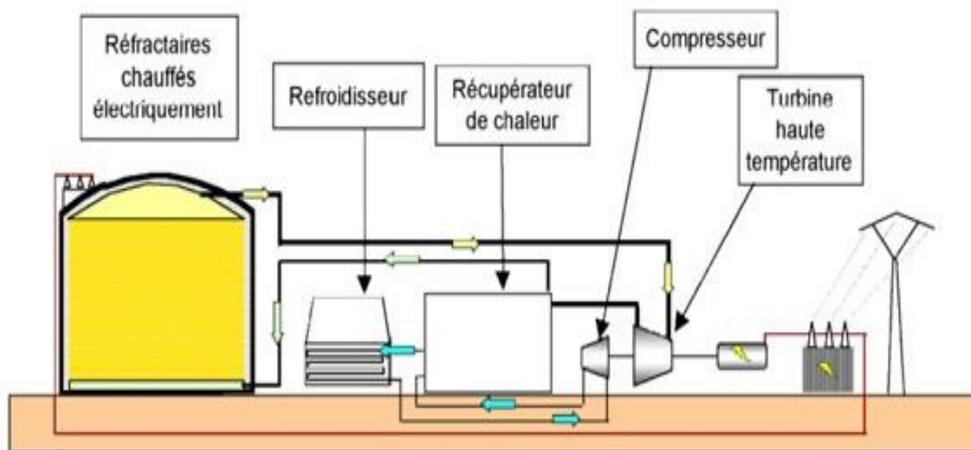


Figure I.13 : Schéma d'une installation de stockage thermique

## I.4- Conclusion :

Ce chapitre est divisé en deux parties, il nous a permis tout d'abord d'identifier les différentes sources d'énergie mondiale ; Il s'agit d'énergies renouvelables tel que le biomasse, solaire, géothermique, hydraulique et éolienne.

En second lieu nous avons discuté notre besoin de stocker l'énergie renouvelable car ils ne sont pas permanents et instables, nous avons mentionné des différents types de systèmes de stockage.

## **Chapitre II :**

Etude et Modélisation d'une station photovoltaïque avec le système de stockage.

## II.1-Introduction :

Dans ce chapitre, nous représenterons un modèle d'une chaîne de production photovoltaïque, cette chaîne comprend le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC (Hacheur) et l'ensemble du système de stockage [1].

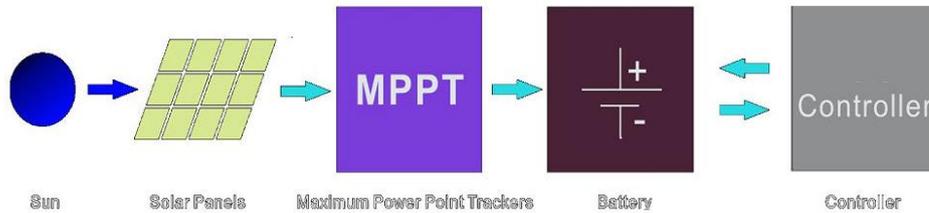


Figure II-1 : Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

## II.2-Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire, c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10–6m, sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

### II.2.1- Les différents types de rayonnement :

**II.2.1.1- Rayonnement direct RD :** est reçu directement du soleil, sans diffusés par l'atmosphère ce rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut par des modules.

**II.2.1.2- Rayonnement diffus Rd** C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable ...).

**II.2.1.3-Rayonnement réfléchi Rr** L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur le plan incliné.

**II.2.1.4- Le rayonnement global RG** Le rayonnement global désigne l'intensité globale de flux solaire sur une surface réceptrice. [7]

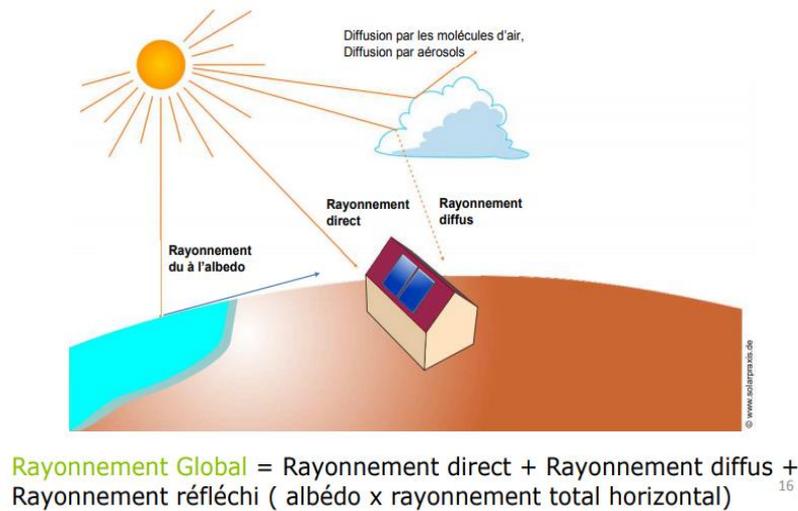


Figure II-2 : Les différentes composantes du rayonnement solaire.

### II.3-La modélisation d'une cellule solaire :

#### II.3.1-Modèles de cellules solaires :

Le modèle de cellule solaire le plus simple consiste en une diode et une source de courant connectées en parallèle. Le courant de la source de courant est directement proportionnel au rayonnement solaire. La diode représente la jonction PN d'une cellule solaire. L'équation de la cellule solaire idéale, qui représente le modèle de cellule solaire idéal, est

$$I = I_L - I_D = I_L - I_o \left( e^{V/V_T} - 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

$I_L$  : Courant généré par la lumière(A) Parfois, le terme photocourant  $I_{ph}$  est également utilisé.

$$I_L = I_{cc} + ki(T - T_r) * \frac{G}{G_r} \quad (\text{II-2})$$

$$Ki=0.0017$$

$$T_r=298k$$

$$G_r=1000 \text{ w/m}^2$$

$I_D$  : Courant de diode

$$I_D = I_o \left( e^{V/V_T} - 1 \right) \quad (\text{II-3})$$

$I_0$  : le courant d'obscurité

$$I_0 = I_s \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 e^{\left[ \frac{q \cdot E_q}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (\text{II-4})$$

$E_q$  : Bank curb 1.1.

$I_s$  : Courant de saturation inverse (A) (plage approximative  $10^{-8} \text{ A/m}^2$  Parfois

V : tension de diode

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

$V_T$  : Tension thermique(V)

La tension thermique  $V_T$ (V) peut être calculée avec l'équation suivante :

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (\text{II-5})$$

k - Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ,

T - température (K)

q - charge d'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q \cdot V}{K T}} - 1 \right) \quad (\text{II-6})$$

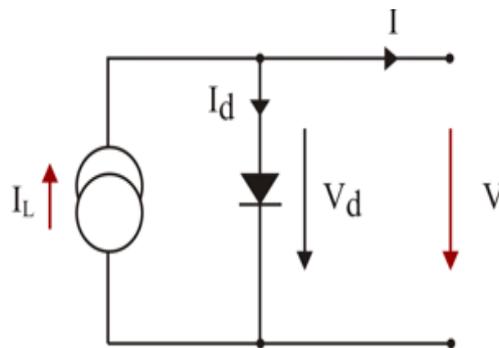


Figure II-3 : Modèle idéal de cellule solaire

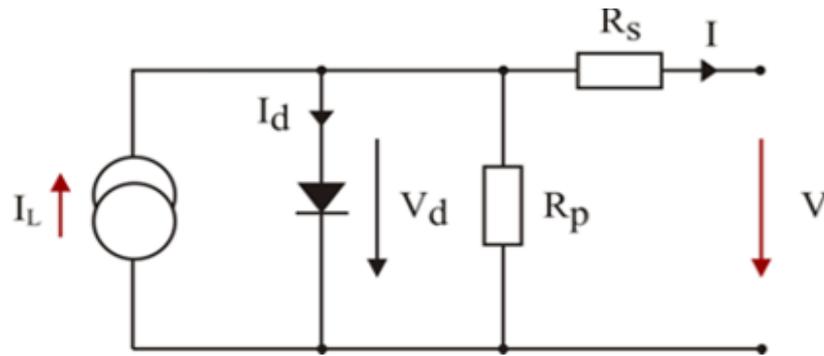


Figure II-4 : Modèle de cellule solaire réelle avec résistance série et parallèle.

$R_S$  et  $R_P$

La résistance interne entraîne une chute de tension et des courants parasites [2]

$$I = I_L - I_D - I_{R_P} = I_L - I_o \left( e^{\frac{q \cdot v}{kT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

$$I_{R_P} = \frac{V + IR_S}{R_P}$$

Courant traversant, si  $R_P$  est très grande, il devient très faible et indépendant de la tension

$R_S$  : Résistance série

$R_P$  : Résistance parallèle.

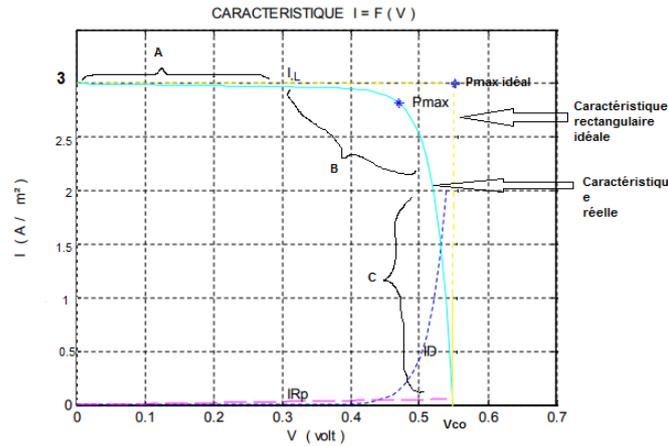


Figure II-5 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque idéale et réelle

La figure ci-dessus représente la courbe  $I = f(v)$  d'une cellule photovoltaïque Typique dans des conditions d'irradiation et de température constantes

La caractéristique se divise en trois parties :

- \* La zone (A) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'éclairement,
- \* La zone (B) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$ ,
- \* La zone (C) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [3]

## II.3.2-Caractéristiques d'une cellule solaire :

### II.3.2.1-Le courant de court circuit :

Le courant de court-circuit exprime en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et sans application de tension (en prenant  $V=0$ ). Il croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairé, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [5].

$$I_{CC} (v=0)=I_L$$

### II.3.2.2-La tension en circuit ouvert $V_{co}$ :

La valeur de la tension diminue avec la température et change peu avec l'irradiation. Et elle obtenue quand le courant de cellule est nul.  $V$  (à  $I=0$ ) =  $V_{co}$ . Une équation pour  $V_{co}$  est trouvée en fixant le courant net égal à zéro dans l'équation de la cellule solaire pour donner: [6]

$$V_{CO} = V_T \ln \left( \frac{I_L}{I_o} + 1 \right) = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (II-8)$$

### II.3.2.3- Le facteur de forme :

Le facteur de forme est le rapport de  $I_{mpp} \cdot V_{mpp}$ , valeur maximale de la puissance pouvant être extraite, au produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$ . Le facteur de forme est défini par la relation suivante :[4]

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \quad (II-9)$$

### II.3.2.4-Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement  $\eta$  des cellules photovoltaïque désigne le rendement de conversion en puissance. Il est définit comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Le rendement énergétique s'écrit : [8]

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{S \cdot \phi} = \frac{I_{max} \cdot v_{max}}{S \cdot \phi} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}}{S \cdot \phi} \quad (II-10)$$

Avec :

$S$  : Surface de la cellule solaire ( $m^2$ )

$\phi$  : est l'éclairement -irradiance- ( $W/m^2$ )

### II.3.3-Groupement des cellules solaires :

#### II.3.3.1-Module photovoltaïque :

Grandeurs	Valeurs
Nombre de cellule	36
Pmax	100 Wc
Tension au MPP (Vmp)	19 V
Courant de court-circuit (Icc)	5.6 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	23 V
Courant au MPP (Imp)	5.1 A
Température de la cellule(T)	25 C°
Eclairement (Gr)	1000 W/m <sup>2</sup>
Coefficient de température de Vco	-0.334(%/°c)
Coefficient de température d'Icc	0.0509 (%/°c)
Coefficient de température de Pmax	-0.413 (%/°c)

Tableau II-1 : Caractéristiques du module PV.

Un module solaire est un groupement de cellules en série, sa caractéristique est extrapolée de celle d'une cellule solaire, est donnée par :

$$I_{Module} = I_L - I_o \left[ \left( e^{\frac{X(V+IR_S)}{N_S}} - 1 \right) \right] \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (II-11)$$

Avec :

$$X = \frac{q}{AKT}$$

$N_S$ : est le nombre de cellules en série

#### II.3.3.2-Panneau photovoltaïque :

$$I_{PV} = N_p I_L - N_p I_o \left[ e^{\frac{X(V+IR_S)}{N_S}} - 1 \right] - N_p \frac{V+IR_S}{R_L} \quad (II-12)$$

## II.4-Modélisation du convertisseur DC-DC

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.[10]

Les convertisseurs DC-DC sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. [9]

### II.4.1-Hacheur élévateur (Boost)

Le convertisseur statique continu/continu (DC/DC) utilisé, est le plus fréquemment utilisé comme convertisseur élévateur (Boost)

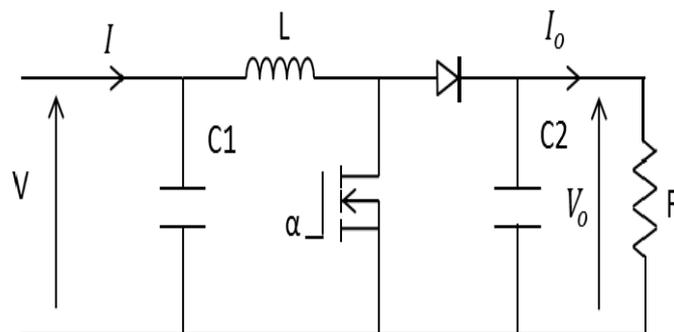


Figure II-6 : Schéma électrique d'un hacheur élévateur

Ce convertisseur est régi par les équations suivantes :

$$V_o = (1 - \alpha)V$$

$$I_o = (1 - \alpha)I \tag{II-13}$$

Avec :

$\alpha$  : le rapport cyclique, est la sortie du système de commande MPPT (P&O).

$V_o$  : la tension de sortie

$I_o$  : le courant de sortie

-En appliquant les lois de Kirchhoff et les lois de nœuds, on obtient les systèmes d'équations suivants :

Un hacheur boost fermé :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = I(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad (\text{II-14})$$

$$V_L = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V$$

Un hacheur boost ouvert :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV(t)}{dt} = I(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (\text{II-15})$$

$$V_L = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_{pv} - V_0$$

## II.5-La commande MPPT :

Une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (*VPPM et IPPM*). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la figure suivant : [11]

### II.5.1-Principe de la technique "Perturb and Observe" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la Variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure II-7, si suite à une perturbation de tension, la puissance  $PPV$  augmente, la direction de Perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure 10 représente l'algorithme classique associé à une

commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.[12]

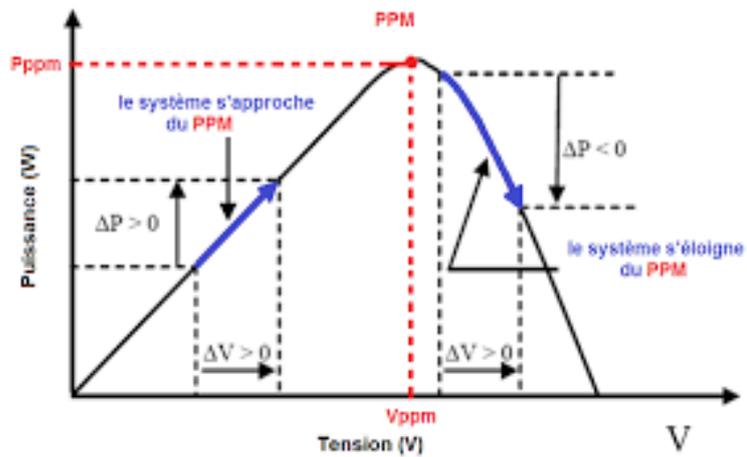


Figure II-7: Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

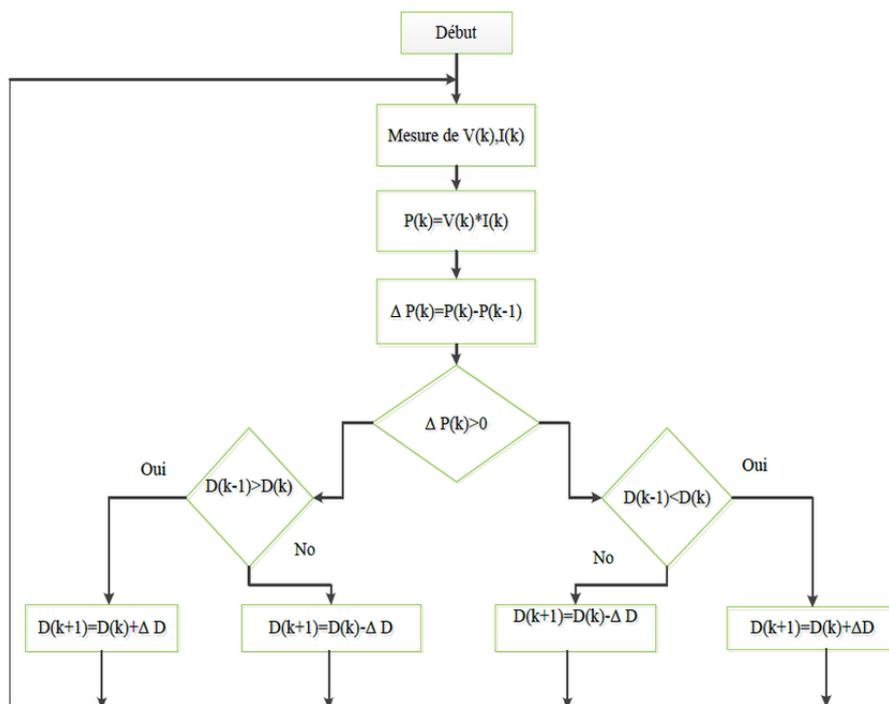


Figure II-8 : Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O)

## II.6-Modélisation du stockage électrochimique :

### II.6.1-MODÉLISATION DES BATTERIES AU PLOMB

#### II.6.1.1-Le modèle électrique simple de la batterie

Le modèle électrique simple comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension a vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_s$ )

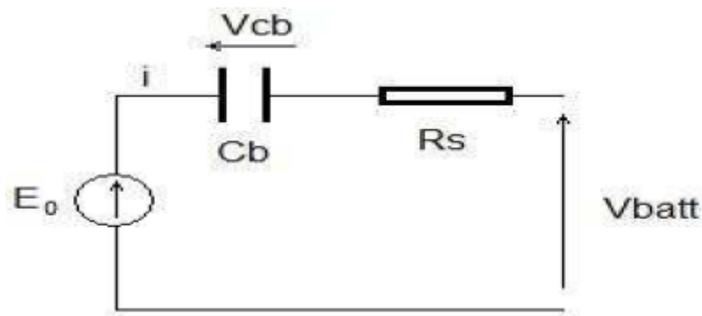


Figure II-9 : le modèle R-C de la batterie

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{Cb} \quad (II-16)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C_{bat}} \quad (II-17)$$

Avec  $C_{bat}$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport a  $C_{bat}$ . [14].

D'après le modèle R-C de la batterie présentée au Figure la capacité en ampères heure est modélisée par  $C_{bat}$  dont la valeur est donnée par l'expression suivante  $Q_{bat} = I * t_{bat}$

$$C = \frac{Q_{bat}}{v} \quad (II-19)$$

Avec:

$Q_{batt}$  : la quantité de charge électrique en Coulomb,

$I$  : le courant a travers la capacité,

$t$  : le temps de fonctionnement,

$C$  : la valeur de la capacité en Farad,

$V$  : la différence de potentiel correspondant a une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% à 100%. Nous considérons  $V=2V$  pour une batterie au plomb de 12V.

### II.6.1.2-MODÈLE CIEMAT

Ce modèle est basé sur un schéma électrique. Il définit la tension aux bornes de l'accumulateur fr fonction de quelques paramètres tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charger, tout en engage la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène) qui est un phénomène propre aux piles au plomb, être une importante élévation de la tension en fin de (MB Camara, 2007).[15]

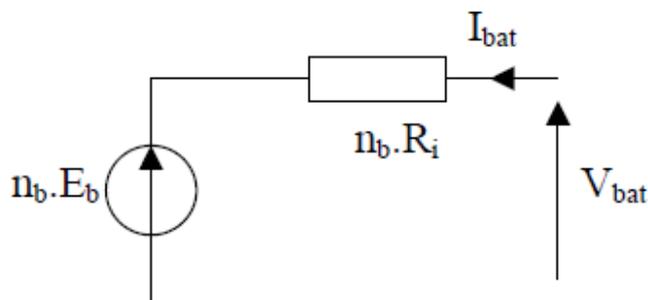


Figure II-10 : Schéma électrique équivalent de  $n_b$  éléments de batteries en séries

#### II.6.1.2.1: La tension $V_{bat}$ :

Dans ce modèle, pour  $n_b$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b \pm n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (II-20)$$

$V_{bat}$  : la tension de la batterie

$I_{bat}$  : le courant de la batterie

$E_b$  : la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie

$R_i$  : sa résistance interne

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [14]

Les tensions en décharge

$$V_{bat-d} = n_b [1.965 + 0.12 * EDC] - n_b * \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 * \Delta T) \quad (II-21)$$

Avec :

$$E_{b-d} = 1.965 + 0.12 * EDC \quad (II-22)$$

$$R_{i-d} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 * \Delta T) \quad (II-23)$$

Les tensions en charge

$$V_{bat-c} = n_b [2 + 0.16 * EDC] - n_b * \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 * \Delta T) \quad (II-24)$$

Avec :

$$E_{b-c} = 2 + 0.16 * EDC \quad (II-25)$$

$$R_{i-c} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 * \Delta T) \quad (II-26)$$

### II.6.1.2.2: La capacité Cbat:

La capacité Cbat donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge Ibat. Cette capacité est donnée par :

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 * \left( \frac{I_{bat}}{I_{10}} \right)^{0.9}} (1 + 0.005 * \Delta T) \quad (II-27)$$

Avec :

$C_{10}$  : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{nom} = C_{10} = 10 * I_{10} \quad (II-28)$$

$I_{10}$ : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante de 25°Celsius

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité  $C_{bat}$  et de la quantité de charge manquante à la batterie  $Q_m$ . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par

$$Q_m = I_{bat} * t \quad (II-29)$$

Où  $t$  est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{bat}$ . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par :[13]

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (II-30)$$

### II.6.1.2.3-Rendements de charge et de décharge :

Le rendement global résulte du produit des rendements coulombien et du rendement Joule. Le rendement Joule correspond aux pertes résistives. En décharge, le rendement coulombien de la batterie est supposé être de 100%.

$$\eta_{cb-d} = 1$$

En charge, il dépend fortement du taux de charge. Il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge

$$\eta_{cb-c} = 1 - e^{-\frac{20.73}{I_{bat} + 0.55} * (EDC - 1)} \quad (II-31)$$

#### II.6.1.2 .4-Courant de batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par :

$$I_{bat-c} = \frac{p_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} \quad (II-32)$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :[13]

$$I_{bat-d} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} - \frac{p_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (II-33)$$

#### II.7-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé le sujet de la modélisation de l'ensemble du système photovoltaïque. Le principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC à été présenté. La gestion de la puissance générée par le système proposé est indispensable, c'est la raison pour laquelle un système de contrôle MPPT est implanté. Le chapitre suivant sera sacré pour la simulation de l'ensemble du système présenté en utilisant l'outil MATLAB-SIMULINK.

## **Chapitre III : gestion de l'écoulement de puissance**

### III.1-Introduction :

Le modèle ci présent est un système photovoltaïque transmis une puissance de 250 kW sous tension de 25 kV connecté avec un réseau alternatif triphasé. Les résultats de simulation de notre modèle par logiciel Matlab/Simulink

### III.2 : Panneaux photovoltaïques :

Le générateur photovoltaïque proposé se compose de 86 panneaux montés en parallèles. Chaque quitte comprend 7 modules de type -SunPower SPR-415E- connectés en série. Il faut Noter que le modèle vous permet de tracer les caractéristiques I-V et P-V de chaque module ou bien de l'ensemble du quitte.

### III.3-Convertisseur DC/AC (réversible)

Le convertisseur présent est constitué d'un pont IGBT à 3 niveaux contrôlé par la technique MLI. Un filtre est installé à la sortie du convertisseur qui nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordres supérieures. Un transformateur triphasé 250 kVA 250 V/25 kV est installé qui permet l'installation de l'onduleur avec le réseau de distribution.

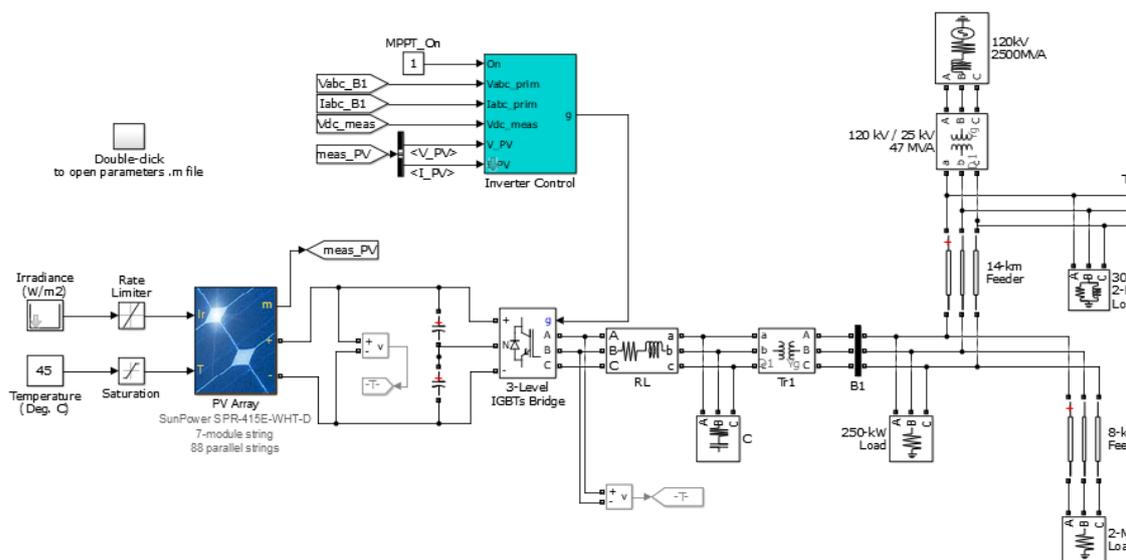


Figure III.1 : Système Photovoltaïque lié à un réseau actif de puissance 250 kW

Le système de contrôle se compose de pas mal de sous système de contrôle de base en site parmi :

- Contrôleur MPPT : Le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) est basé sur la technique « Perturbation et observation ». Ce système MPPT fait varier automatiquement la tension  $V_{dc}$  à un seuil référentiel afin d'obtenir la puissance maximale du générateur photovoltaïque.
- Régulateur de la tension  $V_{dc}$ : cette boucle permet de stabiliser la tension

continue (Vdc)

- Deux autres boucles sont implantés, leurs rôles principale est la régulation des courant directe et en quadrature  $I_d$  et  $I_q$ .
- La technique MLI utilisé dans notre système est une MLI simple, la fréquence de commutation utilisé est de 1980Hz ( $33 \times 60$ ).

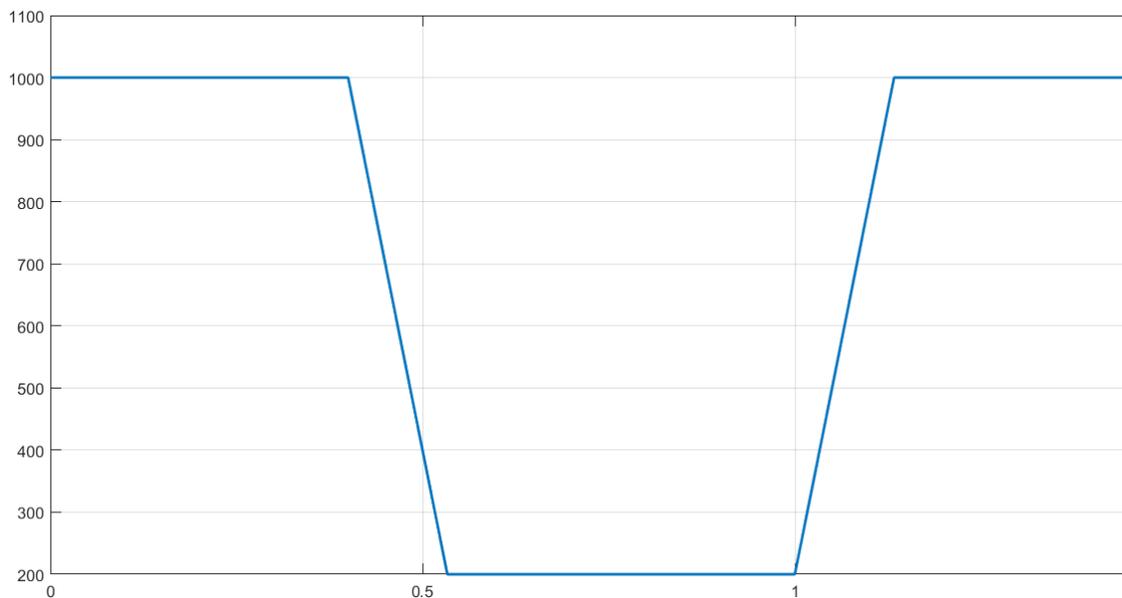


Figure III.2 : Irradiation en ( $W/m^2$ )

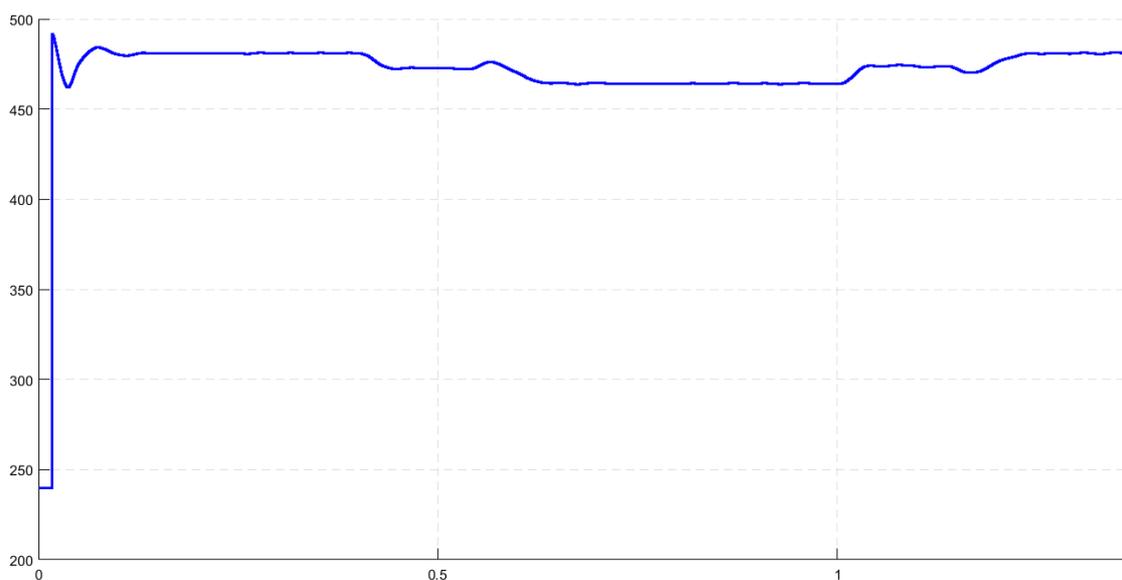


Figure III.3 : la tension aux bornes des batteries (Volts)

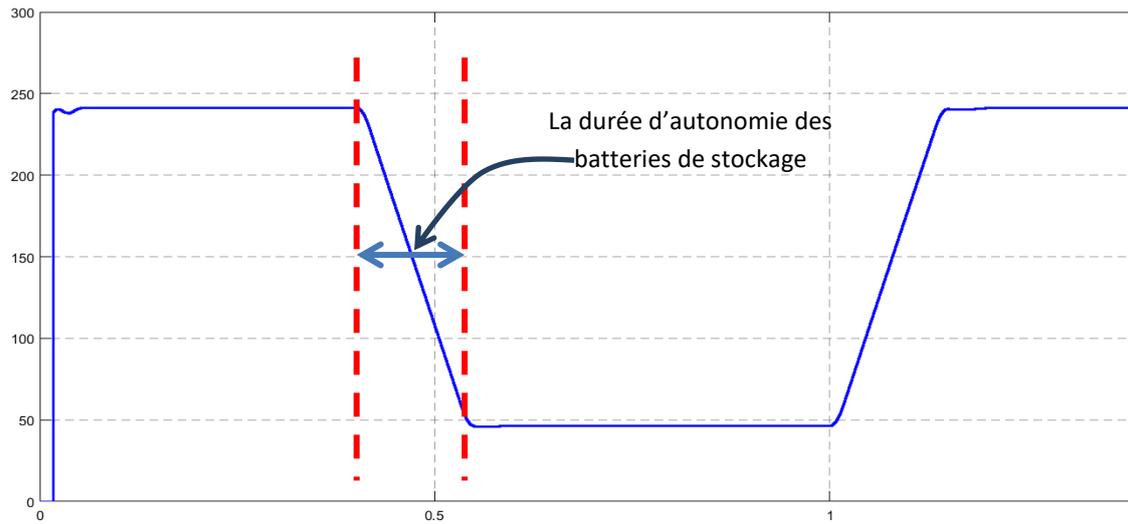


Figure III.4 : la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque (W)

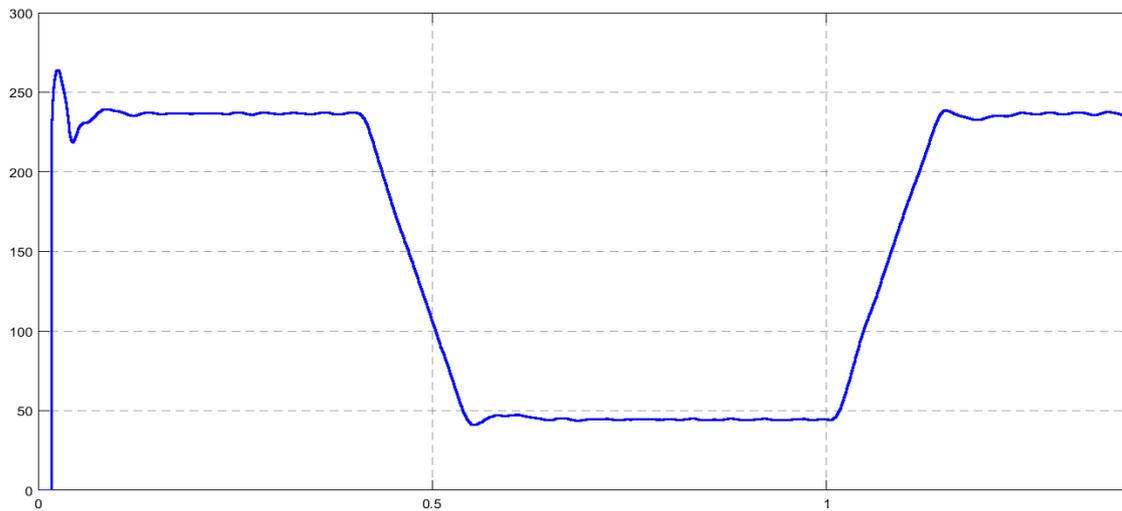


Figure III.5 : la puissance coté AC (W)

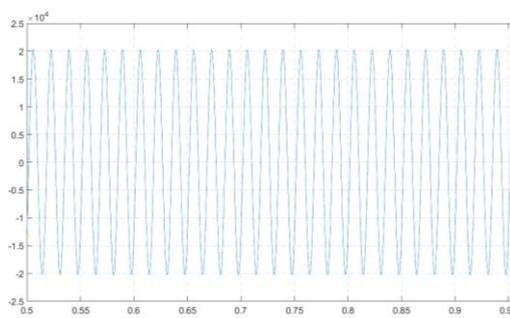


Figure III.6.a : tension simple Van (V)

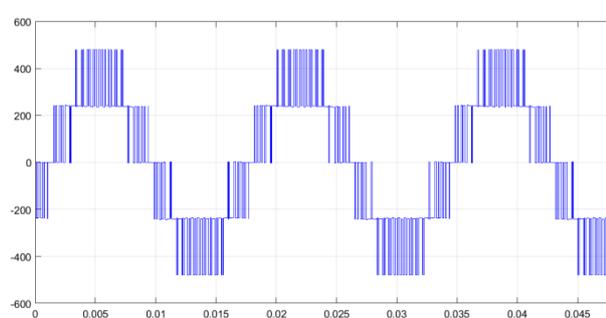


Figure III.6.b : tension composé avant filtrage Vab(V)

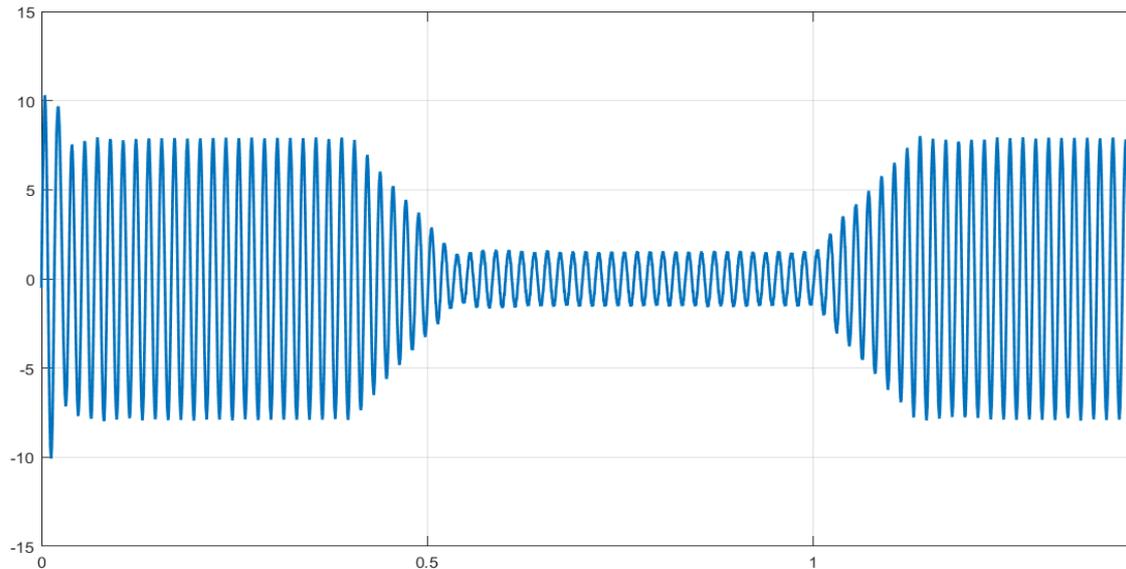


Figure III.7 : courant alternatif délivré par le système photovoltaïque (A)

### III.4-Simulation

Dès que la simulation est exécutée nous pouvons observer les résultats suivants :

La Figure III.2 nous montre l'irradiation initiale projetée sur la surface des générateurs photovoltaïques qui atteint les  $1000 \text{ W/m}^2$  sous une température de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lorsque le régime permanent est atteint (environ  $t=0,15 \text{ sec.}$ ), nous obtenons une puissance de  $236 \text{ kW}$  tension Vdc de sous une tension de  $481 \text{ V}$ . Ces valeurs correspondent très bien aux valeurs attendues des spécifications du fabricant de modules PV (figure III.3 & III.4).

Un test de performance est appliqué sur le système, nous observons qu'à l'instant  $t=0,3 \text{ s}$ , l'irradiance solaire chute rapidement de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $200 \text{ W/m}^2$ . En raison du fonctionnement MPPT, le système de contrôle réduit la référence VDC à  $464 \text{ V}$  afin d'extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque ( $46 \text{ kW}$ ). Aussi à travers ce test nous constatons l'effet des batteries lors des perturbations (figure III.4).

### III.5-Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'analyser les performances du système PV-Syst, en particulier dans les conditions d'apparition de perturbation. Ces perturbation, qui ont été appliquées à l'instant  $t=0.5\text{s}$  sur le flux de rayonnement solaire nous a permis de constater les changements projetés sur la puissance transmise et son influence sur la tension continue, on note ici que l'augmentation de l'autonomie du système à travers des quitte de batteries est indispensable afin de rendre plus en plus le consommateur plus indépendant en matière d'énergie électrique.

## **Conclusion générale**

En seulement quelques décennies, le solaire photovoltaïque a fait la moitié du chemin entre ses débuts modestes et sa débouché vers la production d'électricité, en complément des sources classiques (fossiles et nucléaires). Il franchit cette étape avec un dynamisme remarquable qu'il faut encourager. Actuellement, et même s'il apparaît plus limité quantitativement dans certains pays, il pourrait bien nous surprendre dans les années à venir, puisqu'il a joué et il jouera un rôle primordial dans l'avancée vers les sources d'énergies nouvelles.

En effet, l'électricité photovoltaïque représente une énergie inépuisable puisqu'elle est directement générée à partir du soleil. C'est pour ça nous avons besoin des systèmes de stockage.

Le stockage est un élément clé de la croissance des énergies renouvelables. Lorsque la source d'énergie est intermittente et située dans une zone isolée qui ne peut pas être connectée au réseau de distribution, le stockage devient crucial, on dénombre plusieurs méthodes de stockage : sous forme de STEP, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, de CAES, de thermique, dans une batterie, dans des Batteries à circulation, ou une supercapacité, Ce que nous avons abordé dans la première partie.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb Ce sont les plus utilisés, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans.

Dans la deuxième partie, on a donné la modélisation d'une chaîne de photovoltaïque, cette chaîne comprend le générateur photovoltaïque, Ce système fonctionne à sa puissance Optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT et l'ensemble du système de stockage, cette modélisation est une étape importance permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants.

Dans la dernière partie, nous avons exposé les résultats de simulations obtenus par la Modélisation d'une chaîne de photovoltaïque.

## Bibliographie

[1]- KAOUAANE MOHAMED, « contribution à la commande d'un système de conversion hybride PV-éolien avec stockage de l'énergie » thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie HOUARI BOUMEDIENE, Alger 2018.

[2]- <https://www.edfenr.com/lexique/energies-renouvelables>

[3]-DEGLA AICHA ? « Modélisation, simulation et contrôle de batterie de stockage à usage solaire, these de doctorat. Université des sciences et de la technologie HOUARI BOUMEDIENE, Alger 2018.

[4]- Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2007-2008

[5]- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Production\\_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9)

[6]- <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/stockage-lenergie>

[7]-<https://www.techno-science.net>

[8]-[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=La\\_centrale\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=La_centrale_solaire_photovolta%C3%AFque)

[9]-<http://www.pvresources.com/>

[10]-<https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>

[11]-HARAOUBIA Mohamed «Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019, MASTER

[12]-<https://www.quelleenergie.fr/magazine/energie-solaire/panneaux-photovoltaïques-fonctionnent-nuit-28984/>

[13]- <https://www.journaldunet.com/web-tech/start-up/1155308-une-centrale-a-tour-solaire-pour-produire-jour-et-nuit/>

[14]- <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/stockage-de-l-energie-solaire-solutions-et-innovations>

[15] - Le stockage d'énergie pour le vecteur électricité, J. Perrin, F. Cuevas, B. Multon, Colloque du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS, Montpellier, mars 2011, [http://energie.promes.cnrs.fr/IMG/pdf/Atelier\\_Vecteur\\_electricite\\_JP.pdf](http://energie.promes.cnrs.fr/IMG/pdf/Atelier_Vecteur_electricite_JP.pdf)

[16]-Étude sur le potentiel du stockage d'énergies, [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20140409\\_rapport-potentiel-stockage-NRJ.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20140409_rapport-potentiel-stockage-NRJ.pdf)

[17]- <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-stockage-deelectricite/les-differentes-technologies-stationnaires-de-stockage-de-leelectricite>

- [18]-<https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/avantages-et-aleas-du-stockage-d-electricite-photovoltaique-48170>
- [19]- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A9lectrique)
- [20]-[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Solaire\\_thermique\\_%C3%A0\\_concentration](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Solaire_thermique_%C3%A0_concentration)
- [21]- Quoilin Sylvain « Les Centrales Solaires à Concentration » Université de Liège Faculté des sciences appliquées, 2007.
- [22]-**FEBRUARY 13, 2021**, [http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/sol\\_elec.htm](http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/sol_elec.htm)
- [23]-LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES NOVEMBRE 2010
- [24]- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step-07/09/2021>
- [25]-<https://www.air-techniques.fr/blog/air-comprime-pour-stockage-energie-caes/07/09/2021>
- [26]- <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-stockage-d-energie-par-volant-d-inertie07/09/2021>
- [27]-Annexe : Principe de fonctionnement et constituants d'une batterie,01/01/2004.
- [28]-<https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Axes-de-recherche/Solutions-de-flexibilite/Stockage-Thermique.aspx>
- [29]- Hélène HORSIN MOLINARO – Bernard MULTON « Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique » Edité le 30/04/2019.
- [30]-[https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/energie\\_eolienne.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_eolienne.php4)
- [31]-HANANOU FATIHA et ROUABAH AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2013/2014
- [32]-<https://www.pvresources.com/img/solarcells/solarcellmodel01.png>
- [33].H. Chenoufi, «Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion». Mémoire de Magistère, Université de Batna-2005.
- [34]. Kahoul foudad « Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si » Université Mohamed Khider Biskra, Mémoire de MASTER, : 2013 / 2014
- [35] Sarra Maalla et Massilia Mansour « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en AlGaAs/InP » Université Mohamed Khider de Biskra, MÉMOIRE DE MASTER, 2020

[36]- Bouchra BENABDELKRIM « Etude et simulation de l'effet de paramètre climatique sur les modules solaires en couche mince en région saharien » UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR, DOCTEUR, 22 /04 /2021

[37] Djounaidi Karim « Mémoire de fin d'étude master : Etude d'un système photovoltaïque autonome », université de Biskra, 2013.

[38] SALAHEDDINE BENSALÉM « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2011

[39] Korichi Taki Eddine]« Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, MEMOIRE DE MASTER, 2016

[40] Zahi Houssem « Modélisation Et simulation d'un système photovoltaïque » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, ANNABA, 2019

[41] F. OUDIAI, K.LAGHA-MENOUER, A. HADJ ARAB, R. ZIRMI, « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance » Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 2019

[42]-Zahar soria et Makhoulf cheymaa « Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Mémoire de Master, 2016 /2017

[43]-**A. Ould Mohamed Yahya 1, A. Ould Mahmoud 1 et I. Youm 2** : « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) » Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.

[44] **O.Gergaud**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur" Ecole Normale Supérieure de Cachan, Thèse soutenue le 9 septembre 2002.

[45] « Modélisation De Composants d'un système hybride Panneaux Photovoltaïque Stockage d'énergie Via L'hydrogène Piles » Institut National Polytechnique Houphouët Boigny, Groupe Energies Nouvelles et rénovations, Laboratoire de Mécanique et Sciences des Matériaux, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

## Résumé :

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, la production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours nuageux. Dans ce mémoire, une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage électrochimique à l'aide de batterie d'accumulateur sera présenté.

la deuxième partie est une modélisation des différents éléments qui constituent le système. Une stratégie de commande avancée est adaptée pour contrôler le système, Et le faire simuler à l'aide de MATLAB SIMULINK

### **Abstract:**

*Photovoltaic energy is the youngest of the renewable energies, it has the advantage of being non-polluting, and the energy production by the photovoltaic systems is very fluctuating and depends enormously on the weather conditions. This is why it will be necessary to think of storing this energy to restore it during the night and the cloudy days.*

*In this work a theoretical study on photovoltaic solar energy, as well as the system storage of the latter to knowing electrochemical storage using accumulators.*

*The second part is modeling the various components of the system. An advanced strategy is adapted to control the system, and experiment it by MATLAB SIMULINK.*

### **ملخص:**

الطاقة الكهروضوئية هي أحدث الطاقات المتجددة ، وتتميز بكونها غير ملوثة و إن إنتاجها مهم جدا وهو مرتبط أساسا بواسطة ظروف مناخية هذا ما يجعلنا نفكر في تخزين هذه الطاقة لاستعمالها أثناء الليل و الأيام الغائمة. في بحثنا نقوم بدراسة نظرية على الطاقة الشمسية الفوتوضوئية إضافة إلى جهاز تخزين الطاقة كيميائيا باستعمال بطاريات.

الجزء الثاني هو نمذجة العناصر المختلفة التي تشكل النظام ومحاكاته باستخدام MATLAB SIMULINK