



جامعة بجاية  
Tasdawit n' Bgayet  
Université de Béjaïa

*Université Abderrahmane Mira - Bejaia*  
*Faculté de Technologie*  
*Département de Génie Electrique*  
*Spécialité : Electrotechnique*  
*Option : Commande des systèmes électrique*

## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

*Thème :*

---

# ***Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque - Eolien)***

---

**Réalisé par :**

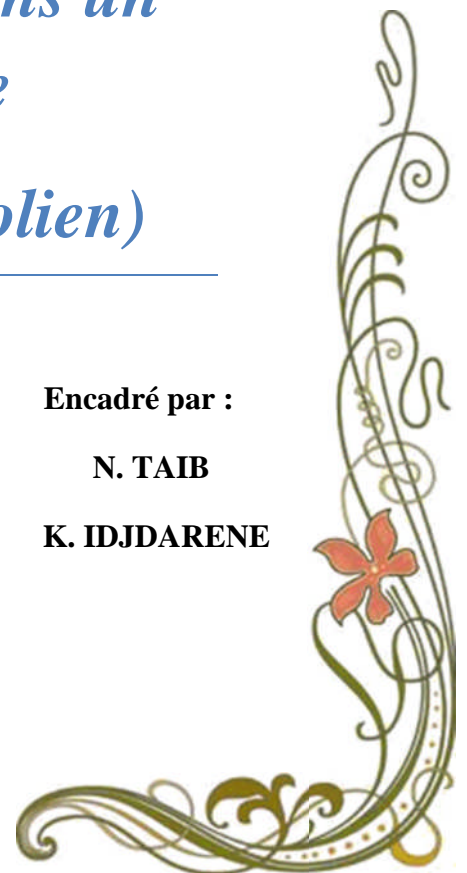
**M. SADAoui Elias**

**MEDDOURI Mustapha**

**Encadré par :**

**N. TAIB**

**K. IDJDARENE**



# REMERCIEMENT

*Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et  
d'exprimer notre gratitude envers le Bon  
Dieu, qui nous a donné la patience et le courage  
pour que nous puissions achever ce travail.*

*Nous tenons à adresser nos sincères et respectueux  
remerciements à nos promoteurs,*

*Messieurs N. Taïb et N. Djidarene pour leurs  
disponibilité, leurs dévouement, et leurs orientations qui  
nous ont permit d'enrichir nos connaissances, durant  
la réalisation de ce travail.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent aux membres  
du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

**DEDICACES**

# DEDICACES

*Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage, la santé, et la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à le dédier particulièrement à mes très chers parents pour leurs sacrifices, patience, leur présence, leur soutien tout au long de mes années d'études, que le bon dieu les garde et les protège.*

*A ma sœurs Hanifa, mes frères, Riad, Ilyas et Nadir et sa femme Yasmina qui n'ont jamais pu me refuser quoique se soit et soutenu tout au long de mes études.*

*A mes meilleurs amies Zohra, Hassiba, Karim, nadjim, Rabah, Mohamed, Mokhtar, khelaf, Mokrane, Morad, Zahra... Qui m'ont soutenu tout au long de mes études.*

*A toute la promotion Master 2 (2011/2012)*

*A mon binôme Elias.*

*En fin à tous ceux que je connais où qui me connaissent que je n'ai pas pu citer.*



**M.MEDDOURI**  
**Merci A vous tous**

## Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables.	
Introduction .....	2
I.1. Description de la chaîne de conversion photovoltaïque .....	2
I.1.1. Les cellules photovoltaïques .....	2
I.1.2. Description d'une cellule photovoltaïque .....	3
I.1.3. Mise en parallèle et en série des cellules .....	3
I.1.4. Protection d'un générateur photovoltaïque .....	5
I.1.5. Les différents systèmes photovoltaïques .....	5
I.1.6. Les avantages et les inconvénients de système photovoltaïque .....	6
I.1.7. Fonctionnement et constitution d'un système photovoltaïque .....	6
I.2. Description de la chaîne de conversion éolienne .....	7
I.2.1. Historique et développement de l'énergie éolienne .....	7
I.2.2. Applications des éoliennes .....	7
I.2.3. Constitution d'une éolienne .....	9
I.2.4. Classification des éoliennes .....	8
I.2.5. Mode de fonctionnement .....	11
I.2.6. Avantages et inconvénients .....	12
I.2.7. Composants d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne .....	13
I.3. D'autres énergies renouvelables .....	14
I.3.1 Energie hydraulique .....	14
I.3.2. Energie géothermique .....	16
I.3.3. La biomasse .....	17
I.4. Le stockage .....	18
I.4.1 Les batteries .....	19
I.4.2. Les super-condensateurs .....	20
I.4.3. le stockage inertiel .....	21
I.5. Le système hybride .....	22
I.5.1. La configuration des systèmes hybride .....	23

I.5.3. Les différentes combinaisons de système hybride .....	24
I.5.4. Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	26
I.6. La problématique de la gestion d'énergie électrique .....	26
Conclusion .....	27

## Chapitre II : Modélisation et simulation.

Introduction .....	28
II.1. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne .....	28
II.1.1. Modèle du vent .....	28
II.1.2. Modèle de la turbine .....	28
II.1.3. Equation dynamique de l'arbre.....	29
II.1.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	29
A. Les hypothèses simplificatrices.....	29
B. Modèle en Abc.....	30
C. Modèle biphasé (transformation de Park) .....	30
II.2. Le redresseur PD3 à diode .....	32
II.3. Modélisation de système photovoltaïque .....	33
II.3.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque .....	33
A. Modèle à une diode .....	33
B. Modèle simplifié à une diode .....	36
C. Modèle à deux diodes .....	36
II.4. Modélisation simplifiée de la batterie .....	38
II.5. Résultats de simulation.....	39
II.6.1. Simulation de la MSAP avec redresseur .....	39
II.6.2. Simulation du système photovoltaïque.....	42
A. Influence de la température : .....	43
B. Influence de l'ensoleillement.....	44
II.6.3. Simulation de la batterie .....	46
Conclusion .....	47

## Chapitre III : Gestion de l'énergie du système hybride.

Introduction .....	48
III.1. Les différentes possibilités .....	49
III.2. Explication de déroulement du programme de gestion.....	50
III.3. Simulation du système global .....	50
III.4. Simulation du système photovoltaïque-batteries.....	55
conclusion .....	58
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	60
Annexes.....	63

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	Cellule photovoltaïque 4 puces.
<b>Figure I.2</b>	Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque.
<b>Figure I.3</b>	Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de $n_p$ cellules identiques.
<b>Figure I.4</b>	Caractéristique résultante d'un groupement en série de $n_s$ cellules identiques.
<b>Figure I.5</b>	Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque.
<b>Figure I.6</b>	Éléments constituant une éolienne.
<b>Figure I.7</b>	Eolienne à axe horizontal.
<b>Figure I.8</b>	Eolienne sous le vent.
<b>Figure I.9</b>	Eolienne face au vent.
<b>Figure I.10</b>	Structure de conversion de l'énergie éolienne.
<b>Figure I.11</b>	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.
<b>Figure I.12</b>	Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine.
<b>Figure I.13</b>	Cellule électrochimique de base.
<b>Figure I.14</b>	Connexion des cellules en série (gauche) ou en parallèle (droite).
<b>Figure I.15</b>	Constitution d'un système de stockage inertiel.
<b>Figure I.16</b>	Configuration du Système Hybride à bus CC.
<b>Figure I.17</b>	Configuration du Système hybride à deux bus à CC et à CA.
<b>Figure I.18</b>	Taux de croissance des énergies renouvelables annuel moyen 2000-2010.
<b>Figure I.19</b>	Schéma de la conversion d'énergie électrique hybride (éolienne-photovoltaïque).
<b>Figure II.1</b>	Représentation symbolique de la MSAP.
<b>Figure II.2</b>	le redresseur PD3 à diodes.
<b>Figure II.3</b>	Modèle équivalent à une diode.
<b>Figure II.4</b>	Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.
<b>Figure II.5</b>	Modèle équivalent à deux diodes.
<b>Figure II.6</b>	Vitesse mécanique de la machine en ( rd/s ).
<b>Figure II.7</b>	Allure des tensions statoriques.
<b>Figure II.8</b>	Allure des courants statoriques.



<b>Figure II.9</b>	Allure du couple électromagnétique.
<b>Figure II.10</b>	Allure de la tension redressée.
<b>Figure II.11</b>	Allure de la puissance.
<b>Figure II.12</b>	Caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_c = 25^\circ \text{ C}$ .
<b>Figure II.13</b>	Variation du courant en fonction de la tension pour $T_c=25^\circ\text{C}$ , $T_c=35^\circ\text{C}$ et $45^\circ\text{C}$ .
<b>Figure II.14</b>	Variation de la puissance en fonction de la tension pour $T_c=25^\circ\text{C}$ , $T_c=35^\circ\text{C}$ et $T_c=45^\circ\text{C}$ .
<b>Figure II.15</b>	Variation du courant en fonction de la tension pour $G = 400 \text{ W/m}^2$ , $G=600 \text{ W/m}^2$ , $G=800 \text{ W/m}^2$ , $G=1000 \text{ W/m}^2$ .
<b>Figure II.16</b>	Variation de la puissance en fonction de la tension pour $G=400 \text{ W/m}^2$ , $G=600 \text{ W/m}^2$ , $G=800 \text{ W/m}^2$ , $G=1000 \text{ W/m}^2$ .
<b>Figure II.17</b>	La tension de la batterie.
<b>Figure II.18</b>	L'état de charge de la batterie Soc.
<b>Figure III.1</b>	Schéma bloc du système global.
<b>Figure III.2</b>	La vitesse d'entraînement de la génératrice.
<b>Figure III.3</b>	Puissance fournie par le système éolien.
<b>Figure III.4</b>	Puissance demandée par la charge
<b>Figure III.5</b>	Courant à dissiper dans une charge dérivative
<b>Figure III.6</b>	Courant de décharge de la batterie.
<b>Figure III.7</b>	Etat de charge de la batterie (soc).
<b>Figure III.8</b>	Courant de charge de la batterie.
<b>Figure III.9</b>	Eclairement du soleil
<b>Figure III.10</b>	Schéma bloc d'un système photovoltaïque-batteries débitant sur une charge
<b>Figure III.11</b>	Etat de charge de la batterie
<b>Figure III.12</b>	Tension de la batterie
<b>Figure III.13</b>	Courant de charge de la batterie
<b>Figure III.14</b>	Courant de décharge de la batterie

## Nomenclature

SEH	Système d'énergie hybride.
PV	Photovoltaïque.
CC	Courant continu.
CA	Courant alternatif.
$P_v$	La puissance fournie par le vent (W).
$P_t$	Puissance de la turbine éolienne (W).
$\rho$	Masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ).
S	La surface balayée par la turbine éolienne ( $\text{m}^2$ ).
V	La vitesse du vent (m/s)
$\Omega_t$	Vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$C_t$	Le couple de la turbine.
$C_{em}$	Le couple électromagnétique.
P	Le nombre de paire de pôle.
W	La vitesse du rotor avec $w=P*\Omega_t$
$E_{a,b,c}$	Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.
$i_{a,b,c}$	Les courants de phase de la machine.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V).
R	Resistance d'une phase statorique (Ohm).
$I_a, i_b, i_c$	Courants statoriques (A).
$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$	Les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c) (wb).
$[v_s]$	Matrice des tensions statorique (V).
$[i_s]$	Matrice des courants statoriques (A).
$[v_{dq}]$	Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q) du repère Park.
$[i_{dq}]$	Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q) du repère Park.
$L_d, L_q$	Inductances statoriques
$\Psi_f$	Flux des aimants permanents.
$\omega_r$	Vitesse rotorique
$V_{redmoy}$	La valeur moyenne de la tension redressée
$V_m$	La valeur max de la tension redressé.
I	Le courant délivré par le module.
$I_{ph}$	Photo courant.
$I_d$	Courant de diode.
$I_{sh}$	Le courant shunt.
$T_a$	Température ambiante.
$N_{oct}$ :	Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur ( $45^\circ\text{C}$ ).
$E_G$	Irradiation solaire.
$P_1, P_2, P_3, P_4$	Paramètres.
$E_{ref}$	Irradiation de référence $1000 \text{ W/m}^2$ .

$T_j$	Température de la cellule
$T_{ref}$	Température de référence 25°C.
$E_g$	Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.
$A$	Facteur d'idéalité de la jonction.
$N$	Nombre de cellules en séries dans un module 72.
$R_s$	Résistance série
$R_p$	Résistance parallèle.
$R_{sh}$	Résistance shunt.
$Q$	La charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19} C$ .
$K$	Constant de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ .
$I_{sc}$	Le courant de court circuit.
$I_m$	Le courant à puissance maximale.
$V_m$	La tension à puissance maximale.
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert
$K_1, K_2, K_3, K_4$	Paramètres.
$E$	Tension continue.
$V_{ond}$	Tension à la sortie de l'onduleur.
$T_1, T_2, T_3, T_4$	Interrupteurs de commande
$K_1, K_2, K_3, K_4$	Les signaux de commande.
$V_{char}$	La tension instantanée de la batterie lorsque la batterie se charge (V).
$V_{déch}$	La tension instantanée de la batterie lorsque la batterie se décharge (V).
$E_0$	f .e.m de la batterie (V).
$R_b$	Représente la résistance interne ( $\Omega$ ).
$a, b$	Sont des paramètres qui dépendent de la batterie
$Q$	Capacité de batterie (Ah).
$Soc$	l'état de charge de la batterie.
$G1$ et $G2$	L'ensoleillement du système photovoltaïque ( $G1+G2 = G$ ).
$P_{charge}$	La puissance demandée par la charge.
$Vit$	La vitesse de rotation de l'arbre de la machine.
$P_w$	La puissance générée par le système éolien.
$I_{pv} = i_{char}$	Le courant généré par le système photovoltaïque.
$V_{bat}$	Tension de la batterie.
$I_{dech}$	Courant de décharge de la batterie.
$I_s$	Le courant surplus.
$Soc$ initiale	Etat de charge initiale de la batterie.

## Introduction générale

La production décentralisée d'énergie électrique, bénéficie actuellement d'un essor très important. Plusieurs sources d'énergie renouvelables et gratuites, telles que le vent (éoliennes), le soleil (thermiques ou photovoltaïques), sont de plus en plus utilisées pour produire l'énergie électrique localement sur des sites isolés. A cause de l'inconstance du vent et de la lumière, la gestion de l'énergie constitue l'un des défis majeurs dans les systèmes électriques éoliens déconnectés du réseau, ainsi que dans les systèmes photovoltaïque.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono-source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable et leur souplesse de fonctionnement. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval.

L'efficacité de toute installation électrique dépend fondamentalement de la rigueur de son dimensionnement et de son utilisation. Dans le cas du système hybride de production d'énergie électrique (photovoltaïque, éolien), il est utile de noter que le dimensionnement sera fait sur des données météorologiques, l'irradiation solaire et la vitesse du vent, ainsi que sur le profil de charge exacte des consommateurs sur de longues périodes.

Dans ce travail nous allons nous intéresser en premier lieu à ces sources d'énergies, prendre connaissance de leurs caractéristiques et comprendre leur fonctionnement et ensuite faire une analyse de la gestion.

Le premier chapitre, sera consacré à des généralités sur les énergies renouvelables où nous allons décrire plus particulièrement le principe de fonctionnement de nos deux sources d'énergies (éolienne et photovoltaïque), et notamment le système de stockage qui leur sera relié.

Dans le second chapitre, on procédera à une modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, et une simulation de leur fonctionnement.

Dans le dernier chapitre nous établirons une approche de gestion pour l'ensemble de l'installation.

# Chapitre I

# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

---

## **Introduction :**

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et leur exploitation cause moins de dégâts écologiques, c'est-à-dire : l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, etc...

Pour de très nombreuses applications d'intérêt très sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les maisons rurales, etc..., hors-réseau d'électricité conventionnel, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionnée dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

Les nouvelles solutions technologiques proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono-source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif [1].

## **I.1. Description de la chaîne de conversion photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% pour le silicium poly cristallin et en fin 7 à 8% pour les siliciums en films minces [2].

### **I.1.1. Les cellules photovoltaïques :**

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière (photons) génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu [3].



Figure I.1 : cellule photovoltaïque 4 puces

## I.1.2. Description d'une cellule photovoltaïque :

Un cristal semi-conducteur dopé 'P' est recouvert d'une zone très mince dopée 'N' et d'épaisseur 'e' égale à quelques mm. Entre les deux zones se trouve une jonction 'J'. La zone 'N' est couverte par une grille métallique qui sert de cathode 'k' tandis qu'une plaque métallique 'a' recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode [4].

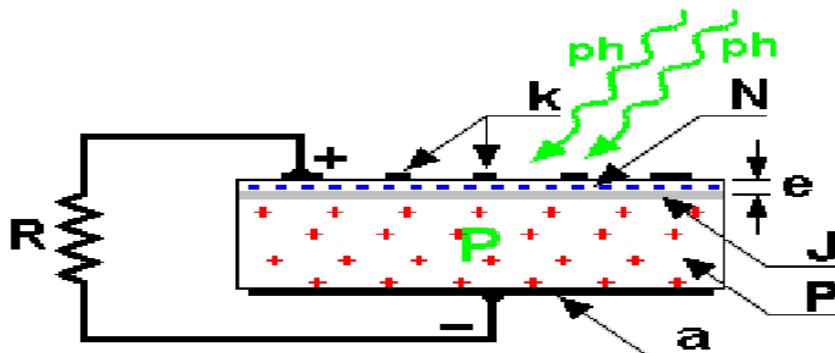


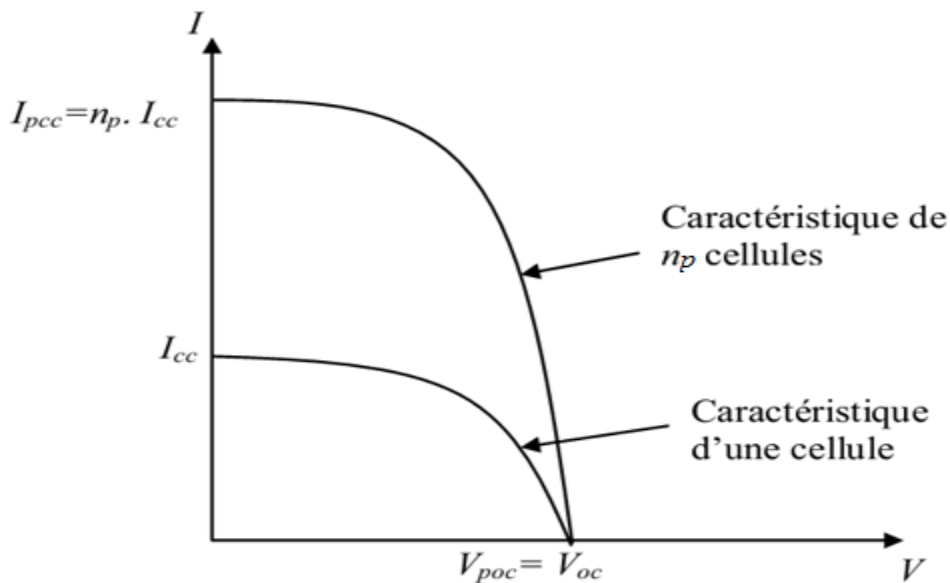
Figure I.2 : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque

## I.1.3. Mise en parallèle et en série des cellules :

### A. Mise en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [5].

La figure 3 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $n_p$  cellules identiques.

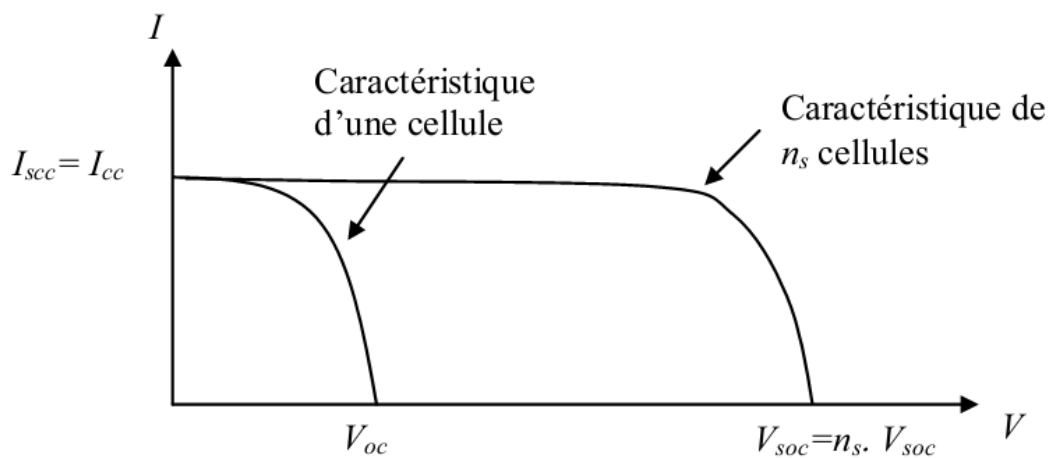


**Figure I.3 :** Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules identiques

### B. Mise en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [5].

La figure 4 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques.



**Figure I.4 :** Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques



## **I.1.4. Protection d'un générateur photovoltaïque :**

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, deux types de protections sont utilisés dans l'installation :

- Les diodes en série : la protection lors de la mise en série de modules photovoltaïques, pour éviter les courant inverse dans les générateurs photovoltaïques, dite diode anti-retour.
- Les diodes en parallèles : la protection en cas de la mise en parallèle de modules photovoltaïques, pour limiter la tension inverse aux bornes de modules photovoltaïques et minimiser la perte de production.

## **I.1.5. Les différents systèmes photovoltaïques :**

Les systèmes PV sont trois types :

### **a) Systèmes photovoltaïques autonomes :**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau Électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage d'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [6].

### **b) Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu – courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [6].

## c) Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [6].

### I.1.6. Les avantages et les inconvénients de système photovoltaïque :

#### a- Les Avantages :

- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé [6].

#### b- Les inconvénients :

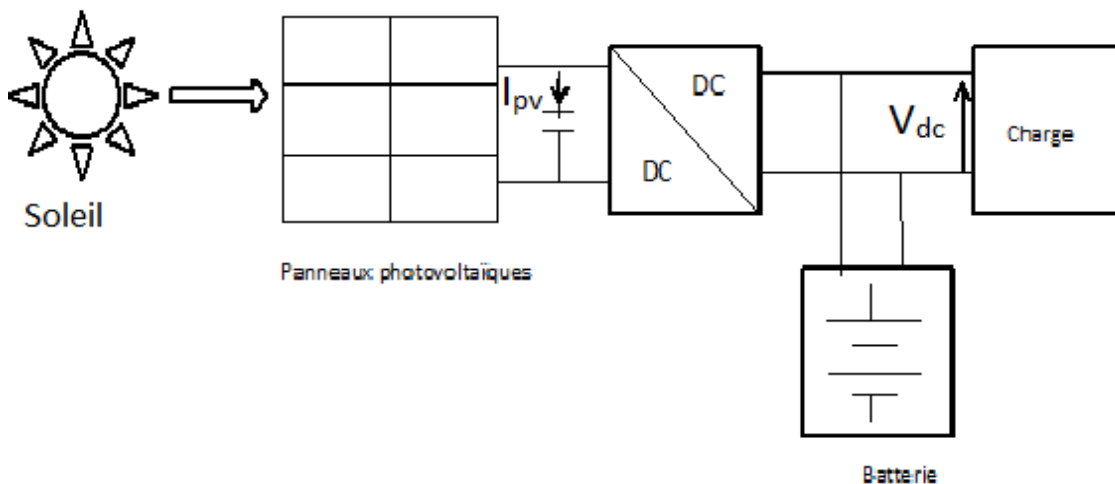
- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le non disponibilité de la source d'une façon permanente.
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensions [6].

### I.1.7. Fonctionnement et constitution d'un système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est un dispositif utilisé pour fournir de l'énergie à partir d'irradiation solaire à fin d'être utilisée par l'homme. Le système est constitué généralement des éléments suivants :

# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

- Un champ photovoltaïque, composé d'un ensemble de module orientés et interconnectés en série et en parallèle, qui recueillent les radiations lumineuses du soleil et les transforment en courant continu a basse tension.
- Un convertisseur statique DC/DC (hacheur survolteur ou dévolteur).
- Charge, l'utilisation.
- Des batteries qui stockent l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et qui permettent de disposer du courant électrique pendant les périodes non ensoleillé.



**Figure I.5 :** structure de la chaîne de conversion photovoltaïque.

## I.2. Description de la chaîne de conversion éolienne :

### I.2.1. Historique et développement de l'énergie éolienne :

Depuis l'antiquité, l'énergie du vent fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée [7].

### I.2.2. Applications des éoliennes :

L'éolienne transforme l'énergie cinétique des masses d'air en énergie mécanique de rotation qui peut être exploitée soit [8]:

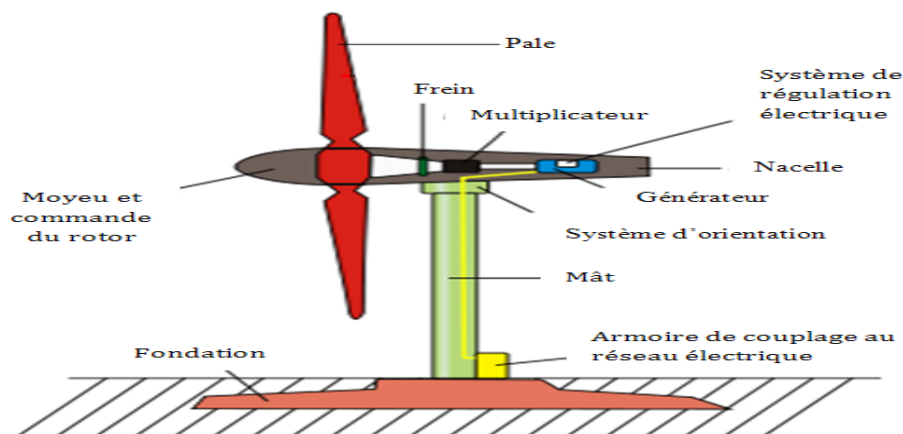
# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

- Directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Pour entraîner une génératrice électrique. Dans ce cas, on distingue deux types de configuration :
  - Stockage de l'énergie dans les accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
  - Injection directe de l'énergie dans un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part de complémentarité avec les moyens traditionnels de produit (centrales thermiques classiques ou nucléaire, barrages ...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de région peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement.

## I.2.3. Constitution d'une éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie produite à partir du vent, qui exerce sa force sur les pales d'une hélice. Celle-ci est reliée à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.



**Figure I.6 :** Eléments constituant une éolienne

Une éolienne est constituée essentiellement :

# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

---

- **Un mât** : son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, pour lui permettre de tourner à une vitesse importante.
- **Un rotor** : il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du moyeu de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique.
- **Une nacelle** : montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [9].

## I.2.4. Classification des éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

### A- Eolienne à axe vertical

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques classiques qui sont construites de façon à laisser arriver l'eau perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue. En fait, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal, mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice. Il existe trois structures de ce type d'éoliennes : les rotors Savonius, les rotors Darrieus et la structure en H. Elles présentent comme avantages : l'absence de la tour (la génératrice, le multiplicateur, etc., sont placés à terre) ; pas de mécanisme d'orientation pour diriger le rotor dans la direction du vent. Leurs inconvénients principaux sont : la vitesse du vent est très faible à proximité de la surface du sol, faible rendement aérodynamique, elles nécessitent un dispositif de démarrage; enfin, la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour des puissances élevées [10].

## B- Eolienne à axe horizontal

Aujourd'hui, la plus grande partie des éoliennes commerciales sont à axe horizontal. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Elles sont construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

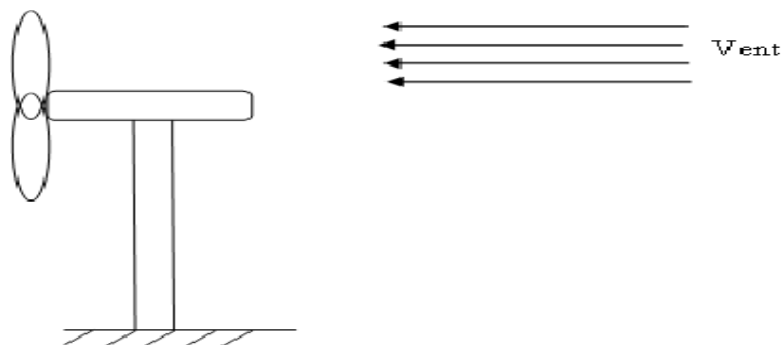


**Figure I.7 :** Éolienne à axe horizontal

En général, on les classe en deux types “sous le vent” et “face au vent” :

- **Eolienne sous le vent**

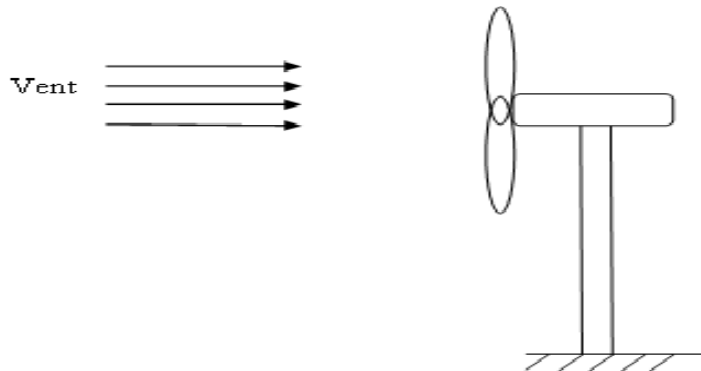
Ce sont les plus simples car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe derrière le pylône. Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône [11].



**Figure I.8 :** Eolienne sous le vent

- **Eolienne face au vent :**

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent en amont et n'est pas perturbé par le pylône [11].



**Figure I.9 :** Eolienne face au vent

### **I.2.5. Mode de fonctionnement :**

Il existe actuellement deux technologies d'éoliennes, celle dont la vitesse est constante et celle dont la vitesse est variable :

- **Eolienne à vitesse constante :**

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau, sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice asynchrone à cage, cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone (glissement négatif) et génère de la puissance électrique sur le réseau. Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation de pales [12].

- **Eolienne à vitesse variable :**

Le principal intérêt des éoliennes à vitesse variable est la maximisation de la puissance extraite du vent. Dans ce cas, la génératrice fournit de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre

## Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

---

celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage de tension continue.

L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau. Ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables [10].

### I.2.6. Avantages et inconvénients :

L'évolution de l'exploitation de l'énergie éolienne est due aux nombreux avantages qu'elle présente, néanmoins certains inconvénients doivent être pris en considération afin de ne pas entraver son développement.

#### 1- **Avantage :**

➤ Ecologiquement l'énergie éolienne est une énergie propre :

- Elle ne nécessite aucun carburant.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- Elle n'est pas une énergie à risque.

➤ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable : elle est issue d'un potentiel énorme et inépuisable.

➤ Economiquement :

- Les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés et non raccordés au réseau électrique général.
- L'énergie éolienne est la moins couteuse par rapport aux autres énergies renouvelables (pour les sites bien ventés) [9], [13].



## 2- Inconvénients :

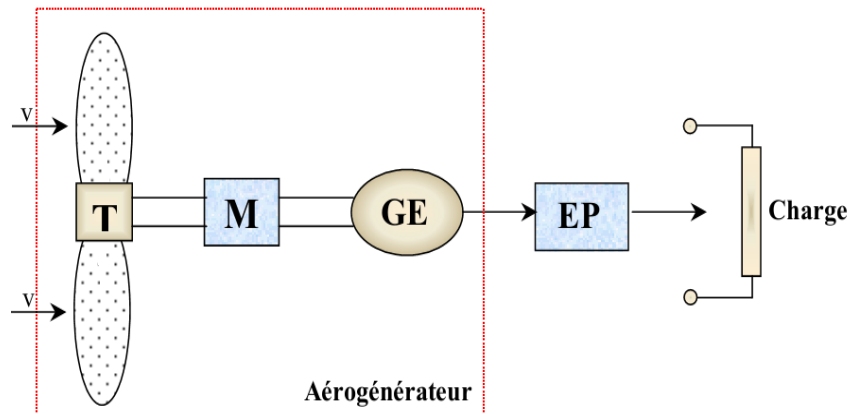
- Le problème majeur de l'énergie éolienne, est l'instabilité de la puissance fournie, car lorsqu'elle est inférieure à la capacité du réseau, on utilise des sources de puissance complémentaires (groupes électrogènes). Quand cette puissance dépasse la capacité de la charge du réseau, l'intervention d'un système de régulation (stockage, ajout de charge de délestage...) est nécessaire.
- Coûts d'achat et d'installation élevés ne rendant rentable l'investissement que sur plus de 10 ans.
- Impacts visuel et sonore : ça reste néanmoins un thème subjectif (grandes puissances).
- La perturbation de l'écologie locale des sites : il faut éviter que les fermes soient situées sur le couloir de migration des oiseaux. Ce problème ne concerne pas seulement la vie des oiseaux mais plus globalement celle de la faune et de la flore en général.
- La non disponibilité de la source de façon permanente [9], [13].

### I.2.7. Composants d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne :

Les principaux composants d'un système de conversion d'énergie éolienne sont [14]: Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse ' $v$ ', tourne à la vitesse ' $\Omega$ ' et fournit sur son arbre un couple de moment ' $\Gamma$ ' .

- Un générateur électrique, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Une charge ou utilisation, reçoit cette énergie électrique. Celle-ci peut être une résistance (chauffage électrique), un moteur, une pompe, un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes.
- Un dispositif d'interconnexion, il s'agit d'un convertisseur qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et éventuellement, en régime dynamique.

La plus simple structure de conversion d'énergie éolienne est présentée dans la figure si dessus :



**Figure I.10** : Structure de conversion de l'énergie éolienne

T : Turbine,

M : multiplicateur de vitesse,

GE : générateur électrique,

EP : circuit d'électronique de puissance.

On considère que le système alimente une charge électrique.

### I.3. D'autres énergies renouvelables :

#### I.3.1 Energie hydraulique :

L'électricité d'origine hydraulique provient de la captation, avec un rendement d'environ 85 %, de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux [15].

##### I.3.1.1. Les divers types d'aménagement hydroélectrique :

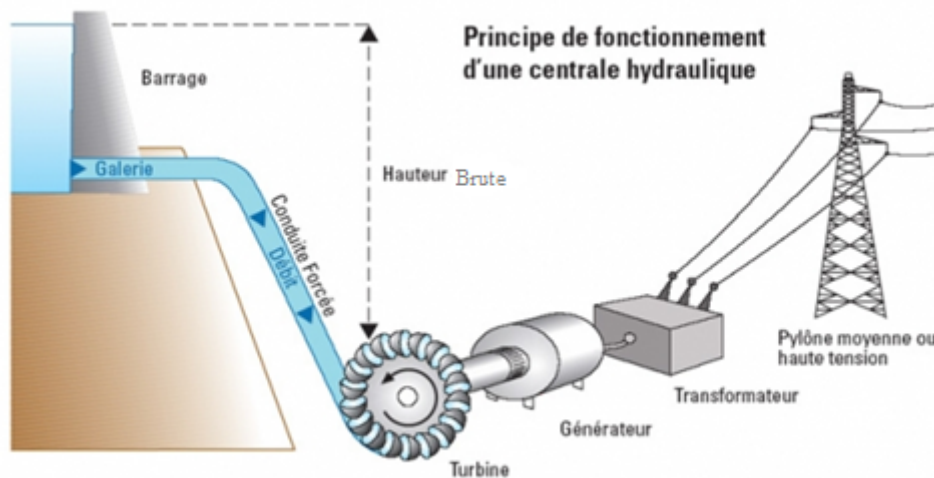
Chaque site possède des caractéristiques géographiques, géologiques, topographiques et hydrologiques qui lui sont propres, pour cela on distingue 04 grands types d'aménagements [16] :

- Les centrales au fil de l'eau (barrages de basse chute).
- Les centrales d'éclusée (barrages de moyenne chute).
- Les centrales de lac (barrages de haute chute).
- Les stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P).

## I.3.1.2. Principe de fonctionnement :

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée dans les prises d'eau constitue une énergie potentielle utilisée pour actionner la roue de la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation à fin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible dépend de la hauteur de la chute et du débit disponible [16].



**Figure I.11** : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.

## I.3.1.3. Les turbines:

Les alternateurs utilisés dans les centrales hydrauliques sont entraînés par des turbines, celles-ci sont adaptées aux caractéristiques de la chute : hauteur, vitesse de l'eau et débit. Cependant pour chaque type de turbine on définit un type de centrale [16].

### A. Turbine PELTON :

Ce type de turbine dite aussi turbine à action est utilisé dans les centrales de haute chute.

### B. Turbine FRANCIS :

Ce type de turbine dite aussi turbine à réaction est utilisé dans les centrales de moyenne chute.

### C. Turbine KAPLAN :

Ce type de turbine est utilisé dans les centrales de basse chute.

# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

## I.3.2. Energie géothermique :

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermie (la chaleur), est une partie de la géophysique qui s'intéresse à l'étude des phénomènes thermique de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe [17].

On distingue 04 types de géothermies selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

1. **La géothermie haute énergie** : géothermie des régions privilégiées caractérisée par des températures supérieures à 150°C, grâce auxquelles la production se fait d'une manière directe.
2. **La géothermie moyenne énergie** : caractérisée par des températures allant de 80 à 150°C, pour lesquelles la production se fait par cycle binaire.
3. **La géothermie basse énergie** : géothermie des aquifères profonds (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures allant de 60 à 80°C.
4. **La géothermie très basse énergie** : géothermie des faibles profondeurs, des nappes phréatiques aux niveaux de température allant de 20 à 60°C.

Les deux derniers types ne permettent pas la production d'électricité.

**Tableau 1** : diagramme de lindal

Température (°C)	Domaine d'utilisation	
200 et plus		
190	Réfrigération par absorption	Production d'électricité par méthode conventionnelle
180	Préparation de pâte à papier	
170	Fabrication d'eau lourde	
160	Séchage de poisson, séchage de bois	
150	Fabrication d'alumine	
140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
130	Evaporation	
120	Production d'eau douce par distillation	
110	Séchage de parpaings de ciment	
100	Séchage de légumes	
90	Déshydratation	
80	Chauffage urbain - chauffage de serres	
70	Réfrigération	
60	Elevage d'animaux	
50	Balnéothérapie	
40	Chauffage de sols	
30	Piscine, fermentation	
20	Pisciculture	

## I.3.2.1. Principe de fonctionnement :

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur. La plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87%) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre : Radioactivité produite par la désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium. Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température (le gradient géothermique) plus on creuse, plus la température augmente ; en moyenne de 3 °C par 100 mètres [17].

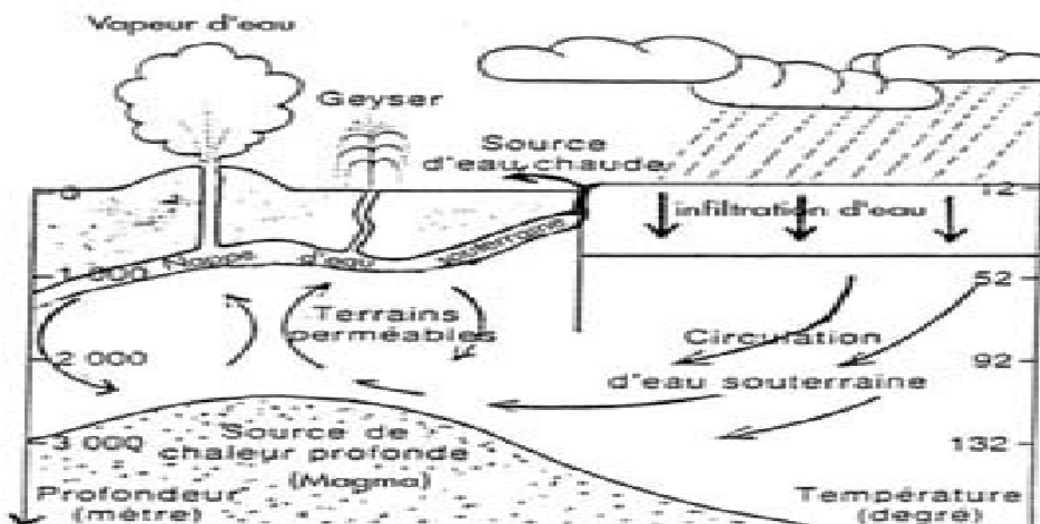


Figure I.12 : Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine.

## I.3.3. La biomasse :

Bio = vivant, Masse = matière, la biomasse est de la matière issue du vivant, elle est dérivée de la combustion de matières organiques (bois, résidus agricoles, déchets organiques divers...), Elle constitue la plus ancienne source d'énergie utilisée par les humains. On peut transformer la biomasse en énergie à l'aide de nombreux procédés : en la brûlant, en la gazéifiant, en la transformant grâce à la biochimie, etc.[18].

## I.3.3.1. Constituants de la biomasse :

On en distingue trois principaux, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques :

- **La biomasse lignocellulosique, ou lignine**, constituée par :
  - le bois et les résidus verts,
  - la paille,
  - la bagasse de canne à sucre,
  - le fourrage.

La valorisation se fait plutôt par des procédés par voie sèche, dits conversions thermochimiques.

- **La biomasse à glucide**, riche en substance glucidique facilement hydrolysable :
  - les céréales
  - les betteraves sucrières
  - les cannes à sucre

La valorisation se fait plutôt par fermentation ou par distillation dits conversions biologiques.

- **La biomasse oléagineuse**, riche en lipides :
  - Colza,
  - Palmier à huile, etc.

## I.4. Le stockage :

L'électricité ne peut être stockée facilement et nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie (chimique, thermique, potentielle, mécanique, etc.). Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable. Il y a plusieurs méthodes de stockage d'énergie pouvant être différenciées en deux catégories [19].

- Stockage à long terme (les batteries);
- Stockage à court terme (le stockage inertiel, Les super-condensateurs).

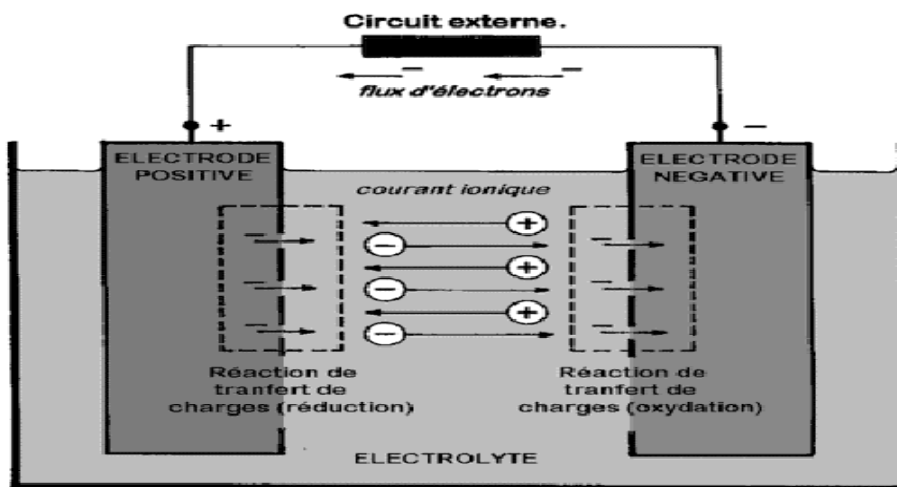
## I.4.1 Les batteries :

Une batterie ou un accumulateur électrochimique est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique d'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie [20].

### I.4.1.1. Descriptions générales :

Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en désoxydation et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie [21].

Le schéma de principe d'une cellule électrochimique est le suivant:

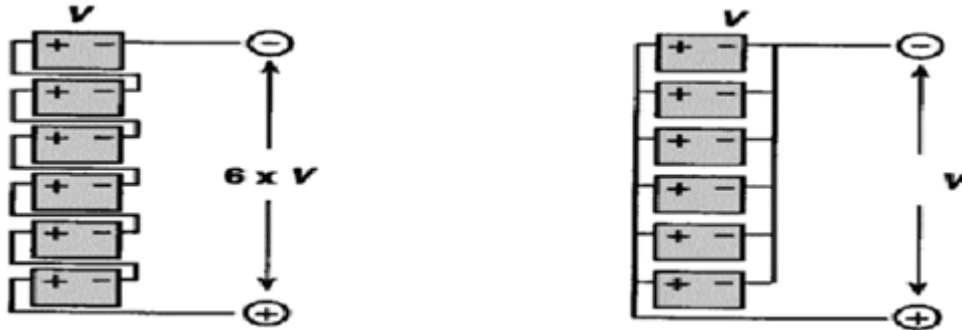


**Figure I.13 :** Cellule électrochimique de base.

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit, et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge). La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons) ; les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode. En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode la borne positive. Par contre, en charge, l'électrode négative est la cathode et le positif est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens.

## Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

Les cellules sont assemblées en série lorsque l'on désire disposer d'une tension plus grande que celle d'une seule cellule, et en parallèle bien que cette configuration soit beaucoup moins courante lorsque le courant requis dépasse la capacité d'une seule cellule



**Figure I.14:** Connexion des cellules en série (gauche) ou en parallèle (droite).

Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser une cellule [22] :

- sa capacité ;
- sa tension ;
- la charge et le courant maximum qu'elle peut supporter ;
- la conservation de la charge (donc son auto-décharge) ;
- sa durée de vie, en nombre de cycles ou en années.

Une bonne connaissance de ces grandeurs est importante afin d'assigner à chaque type de batterie une application qui lui convient. Donc les type de batteries sont :

- Batterie plomb acide ;
- Batterie nickel cadmium ;
- Batterie sodium chlorure de nickel ;
- Batterie lithium-ion ;
- Batterie zinc air ;

### I.4.2. Les super-condensateurs :

Le principe de la double couche électrochimique est découvert par le physicien Helmholtz dans les années 1850. Il remarque que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement des ions de cet



# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

---

électrolyte à la surface de cette interface. Pour des raisons technologiques il a fallu attendre 100 ans pour que les condensateurs à double couches électriques voient le jour, soit vers la fin des années 1950 dans l'idée de renouveler les systèmes de stockage d'énergie, les industriels et les scientifiques, par les progrès qu'ils apportent aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte depuis ces 30 dernières années, ont permis de créer le super-condensateur s'imposant aujourd'hui de plus en plus dans les systèmes de forte puissance. [23].

La nature du matériau utilisé pour les électrodes divise les super-condensateurs en deux familles :

- Les super-condensateurs électrostatiques dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques, l'énergie est donc stockée dans la double couche électrique, les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux par exemple acide sulfurique.
- Les super-condensateurs électrochimiques dans lesquels interviennent, en plus des processus faradiques réversibles. Les électrodes seront donc organiques (oxydes de métaux), ou inorganiques (polymères conducteurs).

## ➤ Principe de fonctionnement :

Le principe général de fonctionnement des super-condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode- électrolyte.

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge).

### **I.4.3. le stockage inertiel :**

Ce stockage est relatif à une utilisation locale d'énergie électrique, stationnaire ou mobile, il se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique et, réciproquement, conversion dont les machines électriques sont naturellement le siège suivant qu'elles sont génératrices (si elles sont entraînées) ou motrices (si elles sont entraînant) [24].

## I.4.3.1. Constitution d'un système de stockage inertiel :

Il est constitué [25] :

- D'un volant d'inertie qui emmagasine l'énergie cinétique de rotation, de son axe, et de paliers qui peuvent être mécaniques ou électromagnétiques pour éviter les frottements.
- D'un convertisseur électromagnétique tournant qui est réversible par essence et qui peut fonctionner en moteur ou en générateur.
- D'un convertisseur électronique de puissance qui assure l'interface entre le convertisseur électromagnétique et l'utilisation extérieure.
- D'une enceinte qui contient, la plupart du temps, les pièces tournantes du système (volant et rotor du moteur d'entraînement). Cette enceinte a pour fonction d'assurer la sécurité du système en cas de rupture du volant, de tenir un vide plus ou moins poussé et enfin de favoriser l'évacuation des pertes générées en son sein.
- D'un ensemble d'équipements auxiliaires tels que pompe à vide, réservoir d'hélium ou d'hydrogène selon les cas, capteurs de vitesse, de pression, de courant..., régulateur gestionnaire de l'énergie...

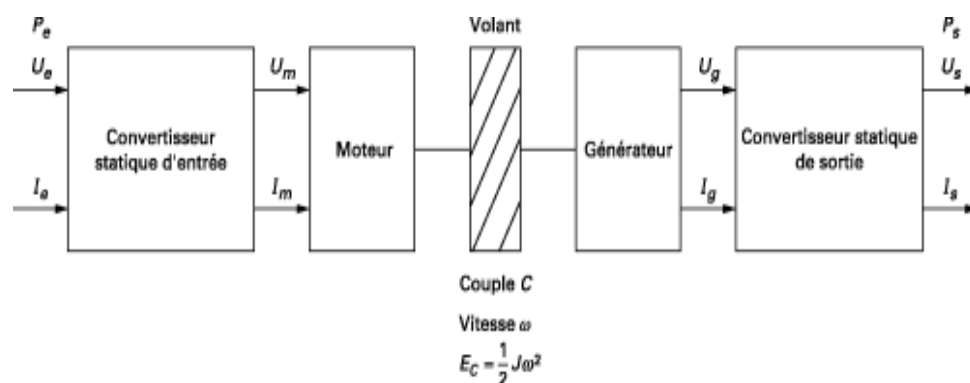


Figure I.15 : Constitution d'un système de stockage inertiel

## I.5. Le système hybride:

La combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelable permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien de point de vue technique qu'économique [26].

### I.5.1. La configuration des systèmes hybride :

Les générateurs électriques d'un Système Hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable, avec ou sans stockage [27] :

#### A) Architecture à bus à CC :

Dans le système hybride présenté dans la figure I.16, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des charges [27].

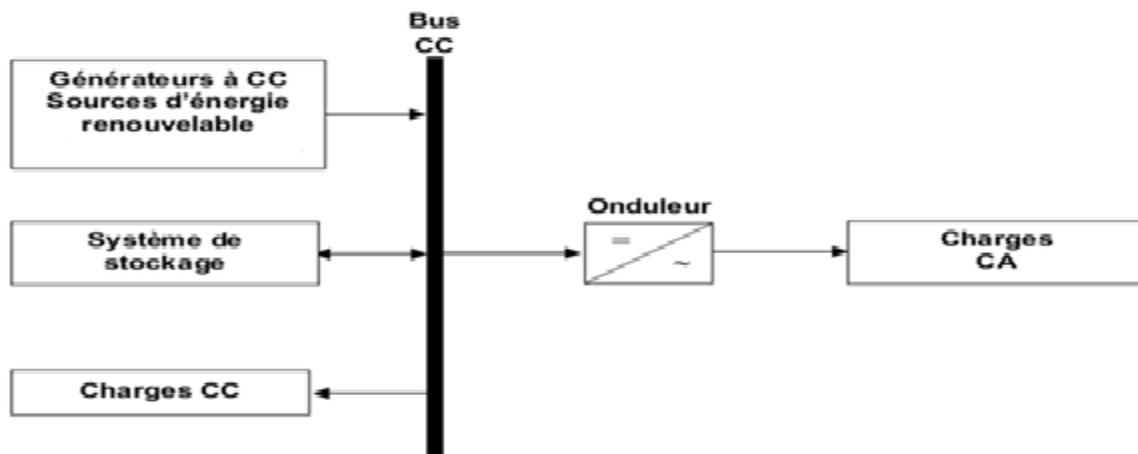
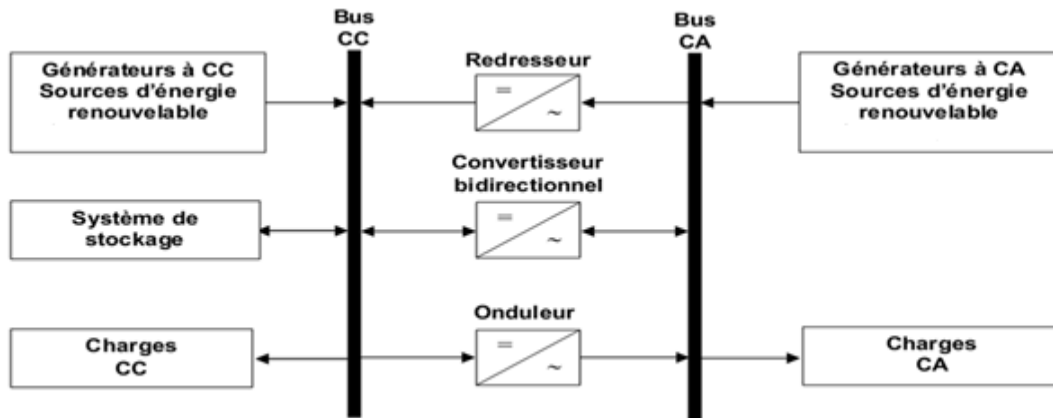


Figure I.16 : Configuration du Système Hybride à bus CC.

#### B) Architecture mixte à bus à courant continu (CC)/courant alternatif(CA) :

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la Figure I.17. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur). Quand il y a un surplus les batteries se charge (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge [27].



**Figure I.17** : Configuration du Système hybride à deux bus à CC et à CA

### I.5.3. Les différentes combinaisons de système hybride :

Il existe plusieurs combinaisons :

- Photovoltaïque-groupe électrogène
- Eolien-diesel
- Eolienne-photovoltaïque-diesel
- photovoltaïque-éolien, stockage à batteries,
- photovoltaïque -éolien, stockage à hydrogène,

Bien que le groupe électrogène et le moteur diesel ne sont pas des sources d'énergie renouvelable en soit, ils sont utilisés généralement dans les systèmes hybride comme alimentation de secours.

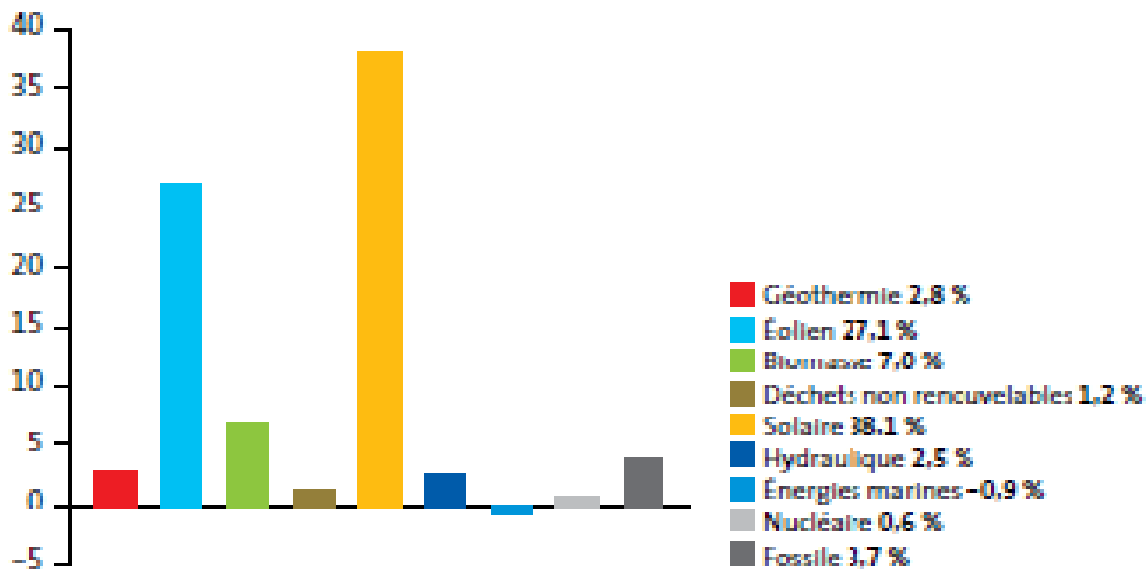
L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pour pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux. La forme et le type de la charge, le régime de vent, le rayonnement solaire, le coût, la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autre facteurs d'efficacité. Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour l'installation de faible puissance. Pour les systèmes d'énergie autonomes le coût de stockage représente les plus grandes contraintes du coût global du système pour l'installation de grande puissance.

Minimiser le coût de stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éoliens et photovoltaïque.

## Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

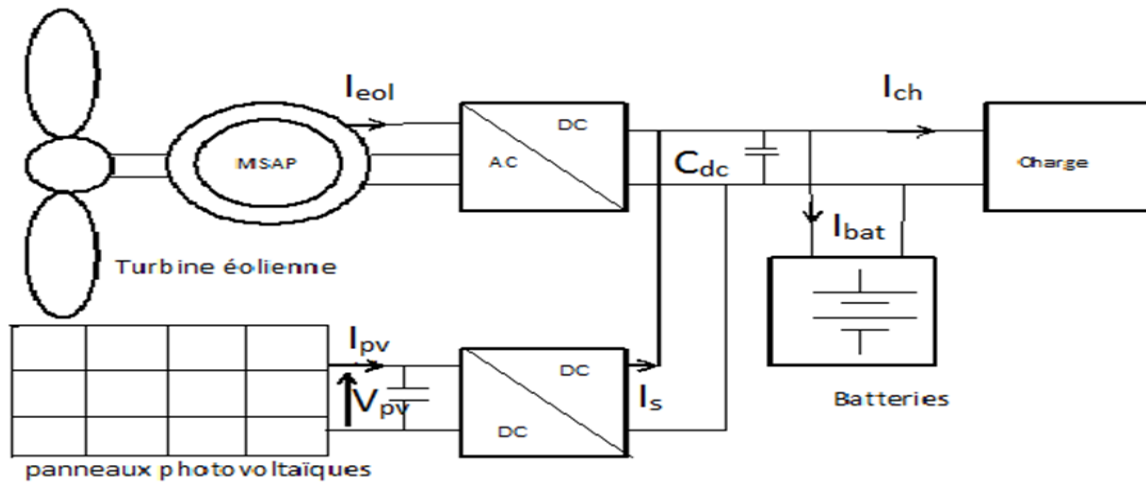
L'objectif de la chaîne hybride est d'alimenter une charge bien déterminée avec une énergie issue de la combinaison entre l'apport énergétique et la demande (la charge) qui est une fonction du temps (jour, saison et année). Chaque source d'énergie (l'énergie éolienne et photovoltaïque), varie en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. L'équilibre entre l'apport énergétique de chaque source et la demande (type de charge) n'est pas toujours possible [26]. Le manque d'énergie sera compensé par l'introduction d'un stockage dans le système.

Dans notre travail on s'intéresse au système hybride Photovoltaïque-Eolien, car comme on peut le constater sur la figure I.18, les énergies photovoltaïque et éolienne connaissent un taux de croissance assez important ces dernières années et ceci grâce au développement technologique relatif à une meilleure exploitation de ces deux sources. Pour toutes ces raisons, elles sont très convoitées dans le monde, et particulièrement en Algérie qui dispose d'une position géographique stratégique qui permet le développement de ces deux sources vu la disponibilité et la complémentarité des gisements solaire et éolien.



**Figure I.18** : Taux de croissance des énergies renouvelables annuel moyen 2000-2010.

Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie (éolienne-photovoltaïque) passant par le stockage (batterie).



**Figure I.19** : Schéma de la conversion d'énergie électrique hybride (éolienne-photovoltaïque)

### I.5.4. Avantages et inconvénients d'un système hybride [28]:

#### A). Avantage :

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
- Faible couts liés au cycle de vie de l'électricité pour des applications.

#### B). Inconvénients :

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électrique isolés ; nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité.

### Problématique de la gestion d'énergie électrique :

La production décentralisée d'énergie électrique, bénéficie actuellement d'un essor très important. Plusieurs sources d'énergie renouvelables et gratuites, telles que le vent (éoliennes), le soleil (thermiques ou photovoltaïques), sont de plus en plus utilisées pour produire l'énergie électrique localement sur des sites isolés. A cause de l'inconstance du vent et de la lumière, la gestion de l'énergie constitue l'un des défis majeurs dans les systèmes électriques éoliens, ainsi que dans les systèmes photovoltaïque déconnectés du réseau. Dans ce travail nous nous intéresserons à l'étude de la gestion d'énergie d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage (batterie).

# Chapitre I : généralités sur les énergies renouvelables

---

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description des diverses énergies renouvelables, systèmes de stockage et hybrides. Après cette description, on a opté pour une chaîne hybride composée de deux chaînes de conversion d'énergie éolienne et photovoltaïque avec batteries de stockage.

# Chapitre II



## Introduction

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler son évolution dans le temps sous un logiciel, qui dans notre cas est la bibliothèque Simulink de Matlab.

Notre système global est composé de deux sous systèmes éolien et photovoltaïque avec des batteries de stockage.

### II.1. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

#### II.1.1. Modèle du vent

Le vent peut être modélisé par une simple loi exponentielle jusqu'à des distributions spectrales et spatiales très complexes qui tiennent compte de sa phénoménologie turbulente.

Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s. [7]

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{II.1}$$

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. [29]

#### II.1.2. Modèle de la turbine

Le système éolien classique est composé d'une turbine éolienne qui transforme une énergie du vent en énergie mécanique, le dispositif étudié ici est une turbine éolienne comprenant des pales de rayon R entraînées par le vent et qui à leur tour entraînent la génératrice [30].

La puissance aérodynamique apparaissant au rotor s'écrit alors :

$$P_t = C_p \cdot P_V = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad \text{II. 2}$$

Le couple aérodynamique est donné alors par la formule suivante:

$$c_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \frac{1}{\Omega_t} \quad \text{II. 3}$$

### II.1.3. Equation dynamique de l'arbre

L'expression du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_{em} = \frac{p}{w} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \quad \text{II. 4}$$

Avec :

- $p$  : Le nombre de paire de pôle.
- $w$  : La vitesse du rotor avec :  $w = p * \Omega_t$
- $E_{a,b,c}$ : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.
- $i_{a,b,c}$ : Les courants de phase de la machine.

### II.1.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est dû aux inductances et aux coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé est nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations) [31].

#### A. Les hypothèses simplificatrices

Pour une représentation plus simple, on admet les hypothèses simplificatrices suivantes [31] :

- Caractéristique magnétique de la machine est supposé linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.

- L'influence des pièces polaires est négligeable.

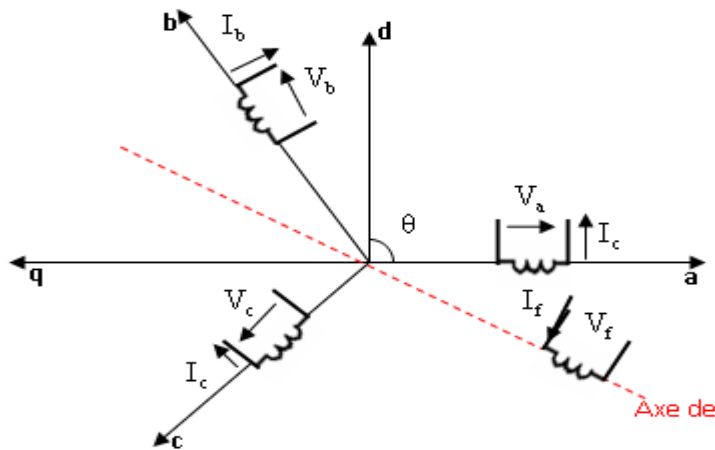
**B. Modèle en Abc**

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} v_a = R \cdot i_a + \frac{d}{dt} \Psi_a \\ v_b = R \cdot i_b + \frac{d}{dt} \Psi_b \\ v_c = R \cdot i_c + \frac{d}{dt} \Psi_c \end{cases} \quad \text{II. 5}$$

On désigne par  $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par ( $i_a, i_b, i_c$ ) les courants qui circulent dans ces enroulements.

**C. Modèle biphasé (transformation de Park)**



**Figure II.1** : Représentation symbolique de la MSAP

A l'aide de la transformation de PARK on passe de grandeurs réelles ( $v_a, v_b, v_c$ ) et ( $i_a, i_b, i_c$ ) à leurs composantes ( $v_o, v_d, v_q$ ) et ( $i_o, i_d, i_q$ ).

La matrice de PARK s'exprime par

$$[P_3(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos \theta & -\sin \theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II. 6}$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \text{II.7}$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.9}$$

### Equations électriques

On a :

$$[v_{dq}] = [P_2(\theta)] \cdot [v_s] \quad \text{II.10}$$

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1} \cdot [i_s] \quad \text{II.11}$$

Tel que :

$$[v_{dq}] = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}, [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [v_s] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

Après simplifications on aura:

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega_r \quad \text{II.13}$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \Psi_d \cdot \omega_r \quad \text{II.14}$$

Avec :

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_f \quad \text{II.15}$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad \text{II.16}$$

$\Psi_f$  : Flux des aimants permanents.

Les relations (II-13) et (II-14) deviennent alors :

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad \text{II.17}$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \Psi_f) \cdot \omega_r \quad \text{II.18}$$

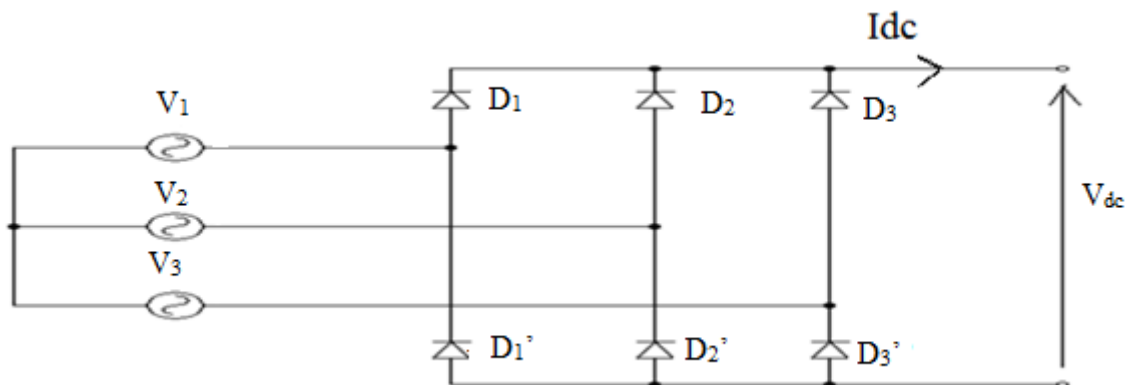
### II.2. Le redresseur PD3 à diode [32]

$$V_{redmoy} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \quad \text{II.19}$$

Avec :

$v_{dc}$  : La tension redressée.

$V_m$  : La valeur max de la tension.



**Figure II.2** : Le redresseur PD3 à diode

Lorsque  $D_1$  conduit l'une des deux diodes  $D_2'$  et  $D_3'$  conduit également; il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ .

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $V_{dc}$  à la sortie de redresseur est :

$$V_{dc} = \max(V_j) - \min(V_j)$$

### II.3. Modélisation de système photovoltaïque

### II.3.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

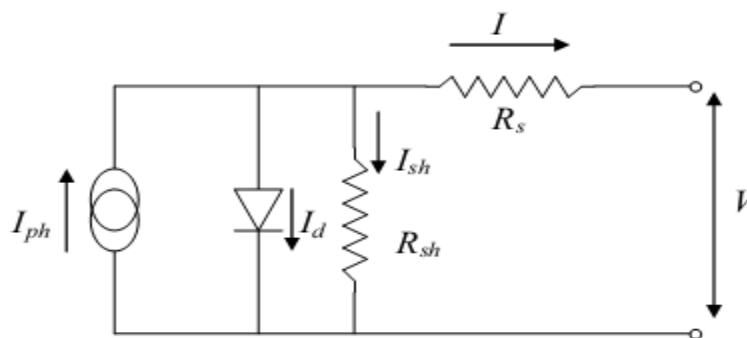
Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source, de nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On présentera trois modèles du GPV [33]:

- Modèle à une diode.
- Modèle simplifié à une diode.
- Modèle à deux diodes

#### A) Modèle à une diode

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure II.3. C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt  $R_{sh}$  est une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$ , une diode en parallèle qui modélise jonction PN [33].



**Figure II.3 :** Modèle équivalent à une diode

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{II.20}$$

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de diode.

$I_{sh}$  : Le courant shunt.

Le courant  $I_{ph}$  est directement dépendant des rayonnements solaires  $E_G$  et de la température de la cellule  $T_j$ , est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_G \cdot [1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad \text{II.21}$$

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_j = T_a + E_G \cdot \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad \text{II.22}$$

Où :

$T_a$  : Température ambiante.

$N_{oct}$ : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{A_n \cdot k \cdot T_j} \right) \right] \quad \text{II.23}$$

Avec :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad \text{II.24}$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.25}$$

Le courant total est donné par :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot [1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \left[ P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \right] \cdot \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{A_n \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.26}$$

Avec :

$E_G$  : irradiation solaire.

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : Paramètres.

$E_{ref}$  : irradiation de référence 1000 W/m<sup>2</sup>.

$T_j$  : température de la cellule.

$T_{ref}$  : température de référence 25°C.

$E_g$  : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

$n$  : nombre de cellules en séries dans un module 72.

$R_s$  : Résistance série.

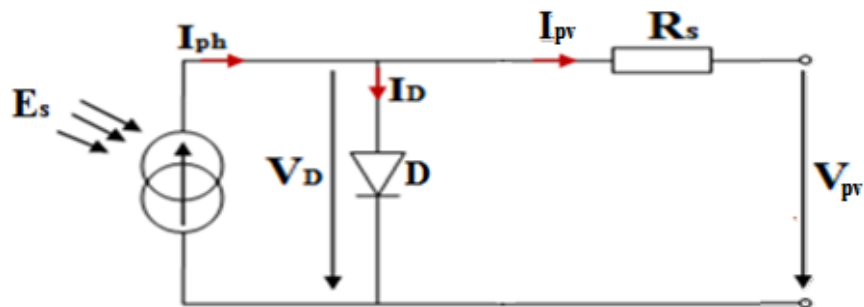
$R_{sh}$  : Résistance shunt.

$q$  : La charge d'électron  $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

$k$  : Constant de Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

#### A) Modèle simplifié à une diode

On peut simplifier le modèle précédent en un modèle de cinq paramètres ( $I_{sc}, I_{mpp}, V_{oc}, V_{mpp}, R_s$ ), qu'on peut modéliser comme suite : [34].



**Figure II.4** : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :



$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - k_1 \cdot (e^{k_2 \cdot V_{PV}^m} - 1)] \quad \text{II. 27}$$

Où les coefficients  $k_1, k_2$  et  $m$  sont donnés par :

$$k_1 = 0,01175 \quad \text{II. 28}$$

$$k_2 = \frac{k_4}{V_{oc}^m} \quad \text{II. 29}$$

$$k_3 = \ln \left[ \frac{I_{sc} \cdot (1+k_1) - I_m}{k_1 \cdot I_{sc}} \right] \quad \text{II. 30}$$

$$k_4 = \ln \left[ \frac{1+k_1}{k_1} \right] \quad \text{II. 31}$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{k_3}{k_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_m}{V_{oc}} \right]} \quad \text{II. 32}$$

### B) Modèle à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.5). On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant  $I_{ph}$  modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur ( $I_{d1}$ ), et le courant de génération-recombinaison ( $I_{d2}$ ). Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer [33] :

- Une résistance série  $R_s$ , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle  $R_p$ , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2} - I_{sh}) \quad \text{II. 33}$$

Avec

$$I_{d1} = I_{01} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad \text{II. 34}$$

$$I_{d2} = I_{02} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2 \cdot n \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad \text{II.35}$$

$$I_{01} = P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad \text{II.36}$$

$$I_{02} = P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2 \cdot k \cdot T_j}\right) \quad \text{II.37}$$

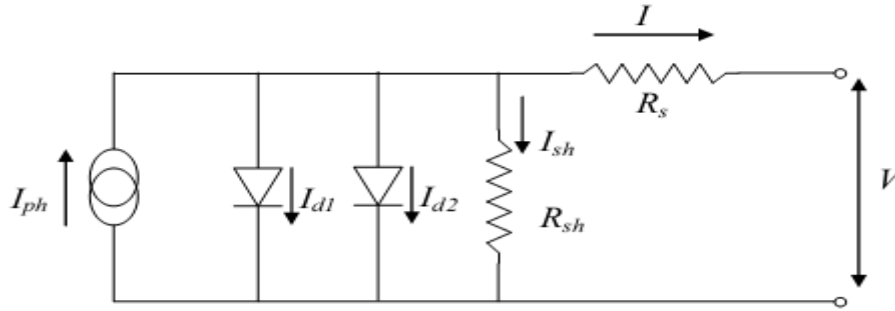


Figure II.5 : Modèle équivalent à deux diodes

$I_{ph}$  et  $I_{sh}$  garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant total s'écrit :

$$\begin{aligned} I = & P_1 \cdot E_G \cdot [1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \\ & - \left[ P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \\ & - \left[ P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2 \cdot k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2 \cdot n \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad \text{II.38}$$

#### II.4. Modélisation simplifiée de la batterie

Beaucoup de modèles sont utilisés pour décrire le comportement de la batterie, mais ici le modèle utilisé est tiré de SimPowerSystem de Matlab \_simulink [35].

La tension de décharge est donnée par l'équation suivante :

$$V_{déch} = E_0 - R_b \frac{Q}{Q - it} + \text{Laplace}^{-1} \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \quad \text{II.39}$$

La tension de charge est donnée par l'équation suivante :

$$V_{char} = E_0 - R_b \frac{Q}{Q-it} + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad \text{II. 40}$$

Avec :

$$\frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} = \frac{a}{\frac{1}{(b.i(t))^{s+1}}} \quad \text{II. 41}$$

L'état de charge (Soc) est donné par l'équation suivante :

$$\text{Soc} = \left( 1 - \frac{\int i. dt}{Q} \right) \cdot 100 \quad \text{II. 42}$$

Où :

$V_{char}$ ,  $V_{déch}$  : représentent la tension instantanée de la batterie respectivement lorsque la batterie se charge ou se décharge (V).

$E_0$  : f .e.m de la batterie (V).

$R_b$  : représente la résistance interne ( $\Omega$ ).

a et b sont des paramètres qui dépendent de la batterie

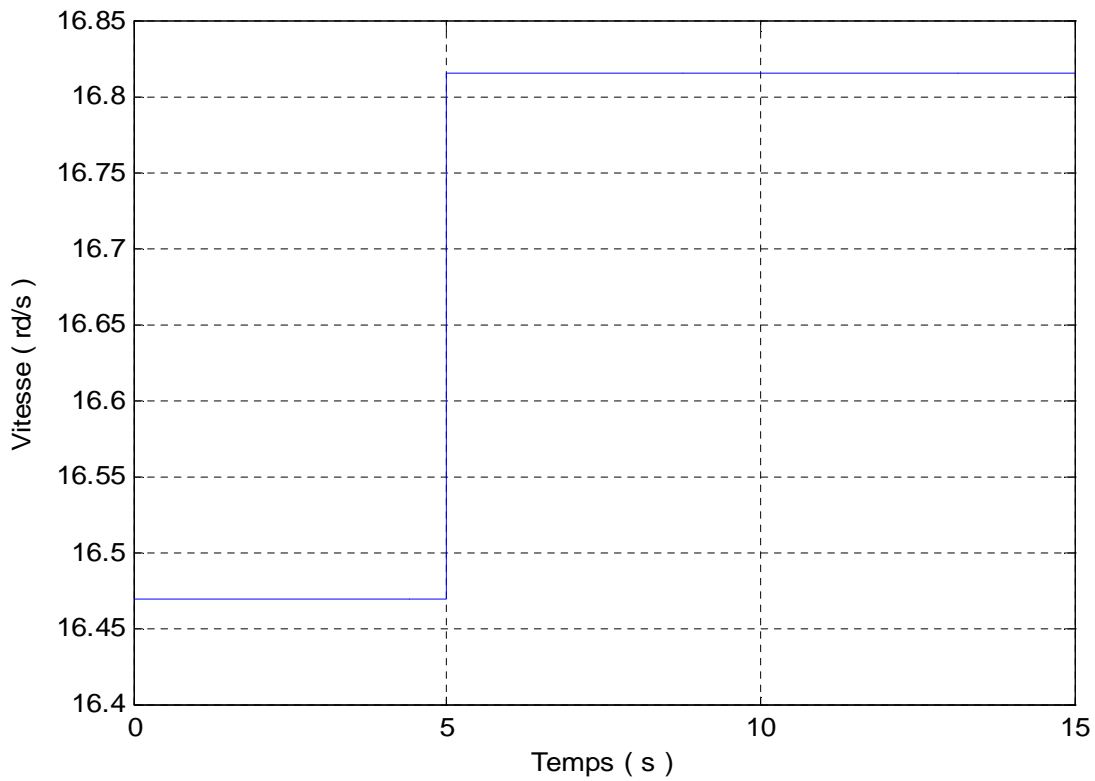
Q : Capacité de batterie (Ah).

Soc : l'état de charge de la batterie.

## II.5. Résultats de simulation

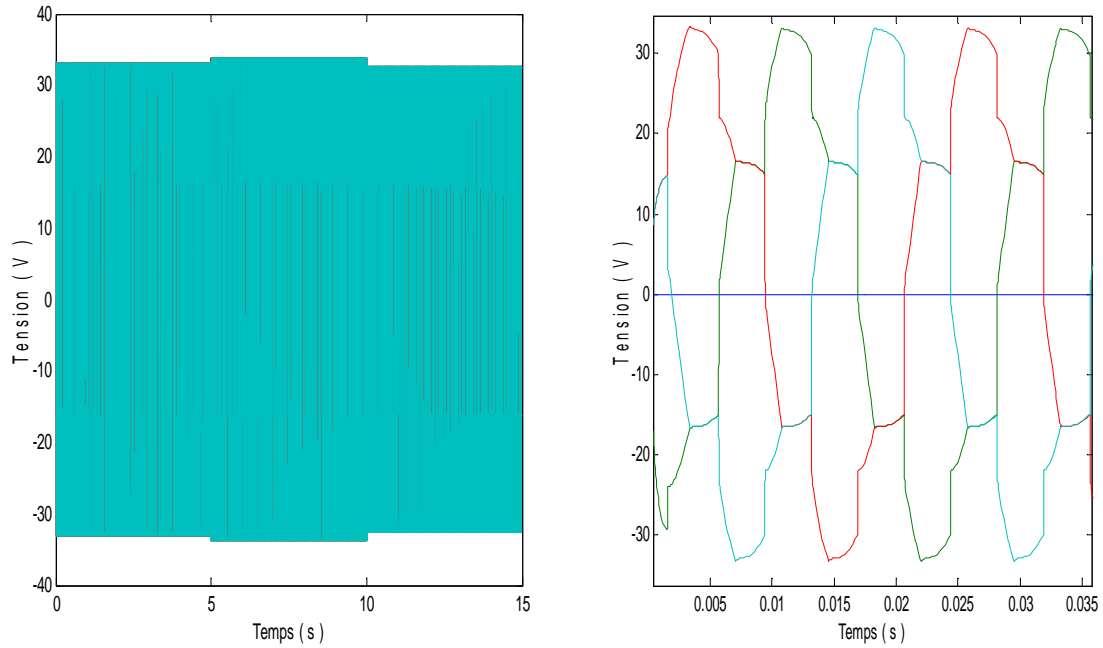
### II.6.1. Simulation de la MSAP avec redresseur

On impose à notre machine un échelon de vitesse d'une amplitude de 16.47 rd/s de  $t = 0s$  à  $t = 5s$ , et d'une amplitude de 16.81 rd/s de  $t = 5s$  à  $t = 15s$  comme le montre la Figure II.6, et une charge résistives dont la valeur sera diminué à partir de l'instant  $t = 10s$  jusqu'à 15 s, pour visualiser son évolution en termes de grandeurs considérées.

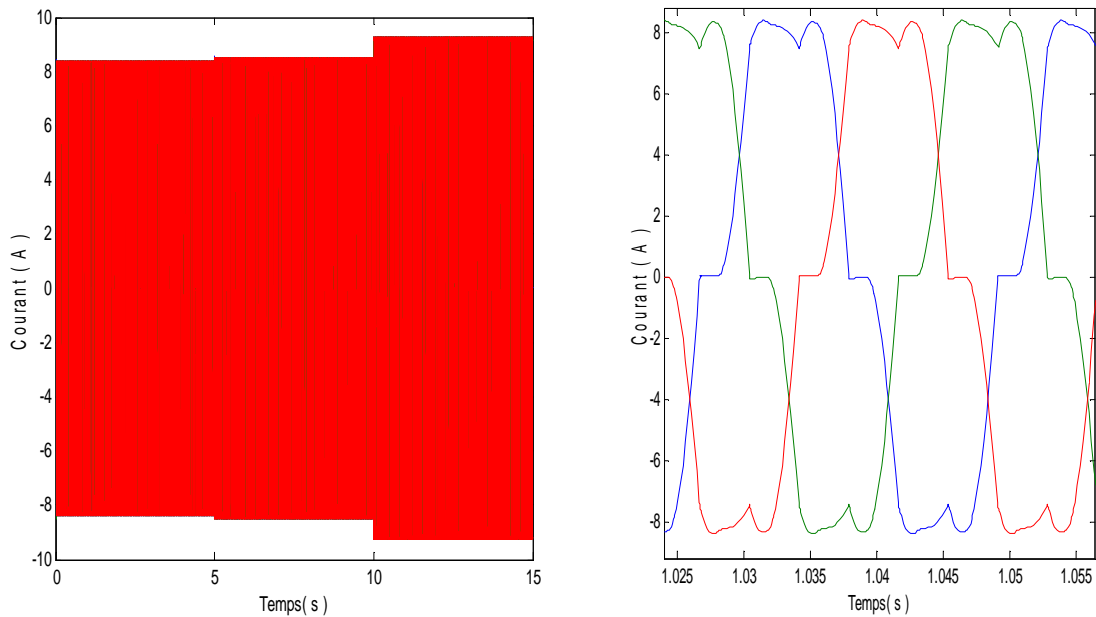


**Figure II.6 :** Vitesse mecanique de la machine en ( rd/s )

On constate à travers la figure II.7, dans la période de  $t = 5s$  à  $t = 10s$ , que la tension varie proportionnellement à la vitesse pour une charge fixe, et ceci est tout à fait normal vu la relation linéaire qui lie la tension et la vitesse. De  $t = 10s$  jusqu'à  $t = 15 s$  la vitesse est maintenue fixe tandis que la charge diminue, ce qui entraîne une diminution de la tension et là aussi c'est tout à fait plausible puisque pour des raisons de perméabilité électrique lorsque la charge diminue le courant a tendance à augmenter (voir figure II.8), ce qui entraîne la chute de la tension.

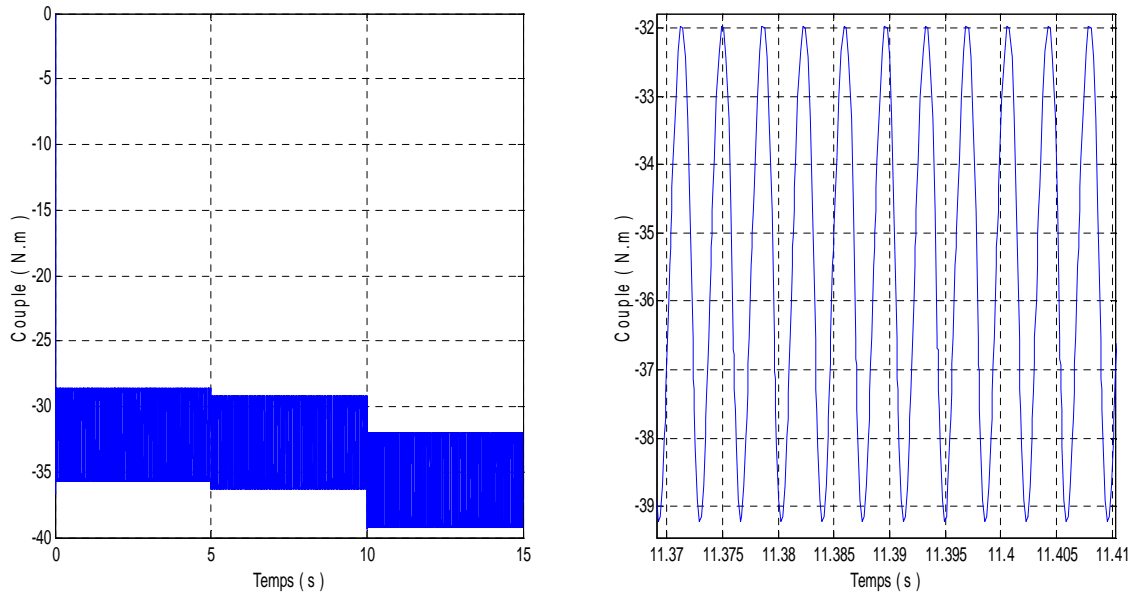


**Figure II.7 :** Allure des tensions statoriques.



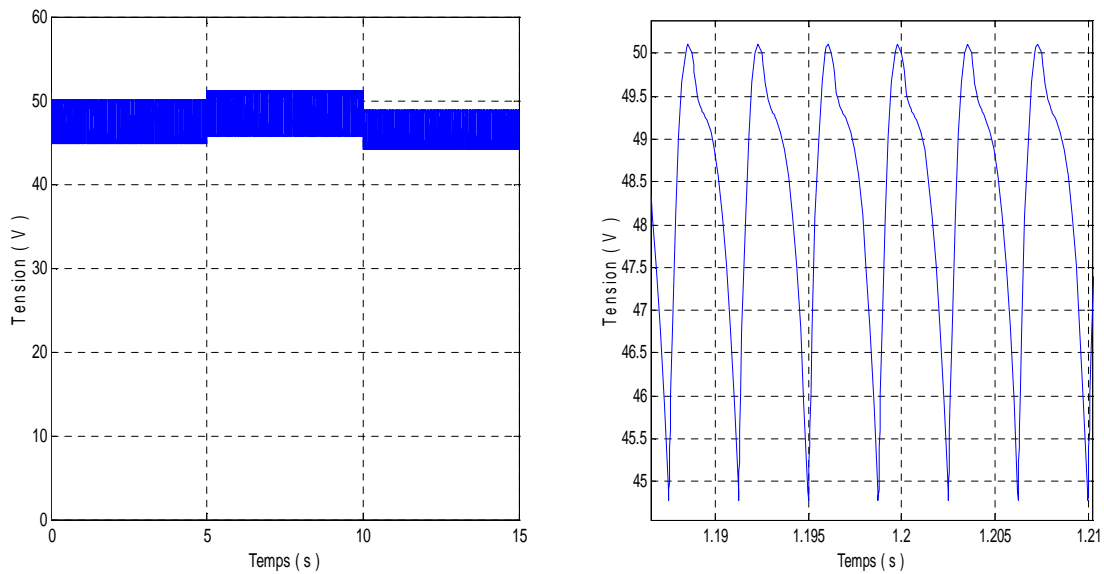
**Figure II.8 :** Allure des courants statoriques.

Le couple électromagnétique étant négatif indique le fonctionnement en mode génératrice (voir Figure II-9). La valeur du couple s'adapte avec les variations de la vitesse et de la charge selon la puissance fournie.



**Figure II.9 :** Allure du couple électromagnétique.

La figure II.10 nous donne l'allure de la tension redressée avec le pont PD3



**Figure II.10 :** Allure de la tension redressée.

Les paramètres de la génératrice pris en considération nous définissent une puissance nominale de 600 W, donc la valeur de la charge et de la vitesse pour la période de  $t = 10s$  à  $t = 15s$  ont été choisie de telle manière à ce que la génératrice puisse fournir cette puissance (voir Figure II.11).

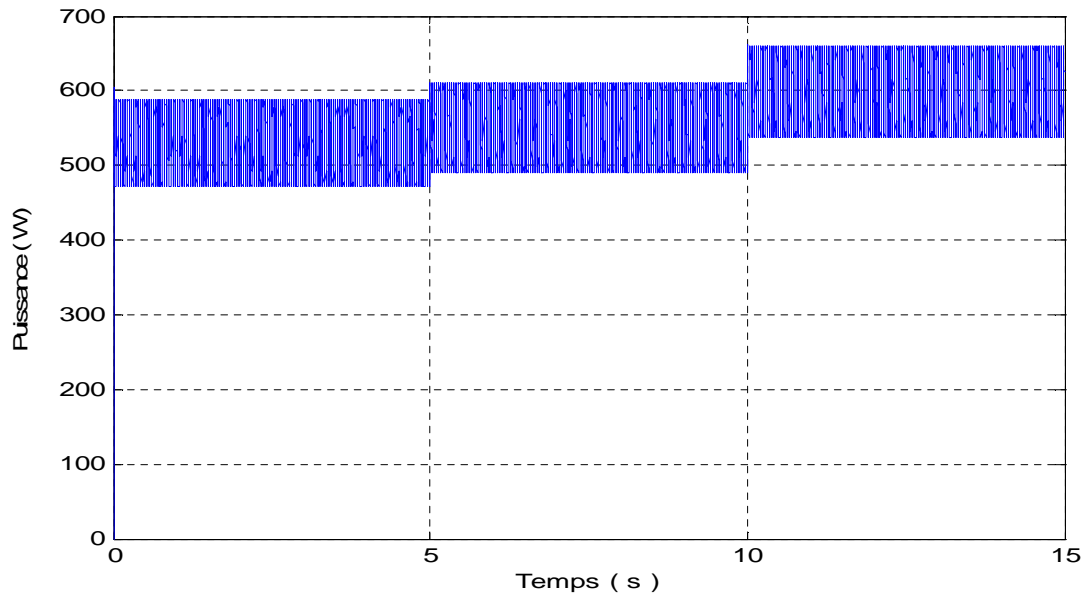
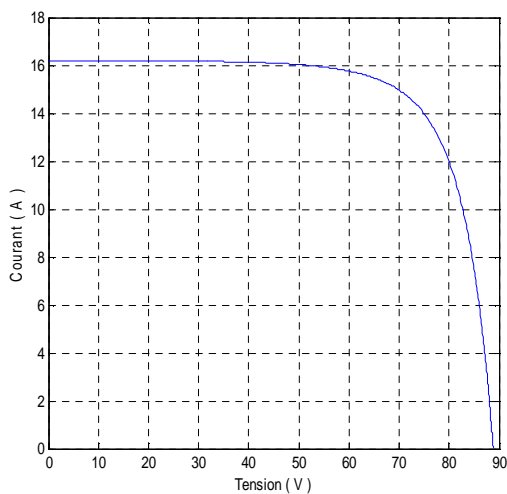


Figure II.11 : Puissance de la génératrice.

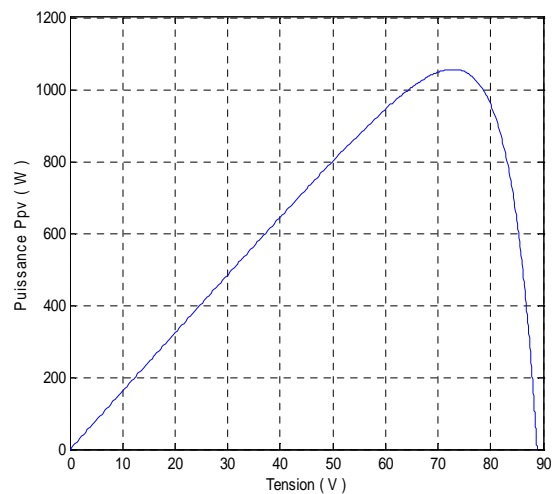
### II.6.2. Simulation du système photovoltaïque

Avant tout il est nécessaire de préciser que notre source photovoltaïque est composée de six panneaux formant trois branches montées en parallèle où chaque branche est une association en série de deux panneaux.

La figure II.12 représente la caractéristique  $I_{pv} = f(V_{pv})$  et  $P_{pv} = f(V_{pv})$  de l'ensemble du système photovoltaïque pour les conditions standards d'ensoleillement et de température.



( a )



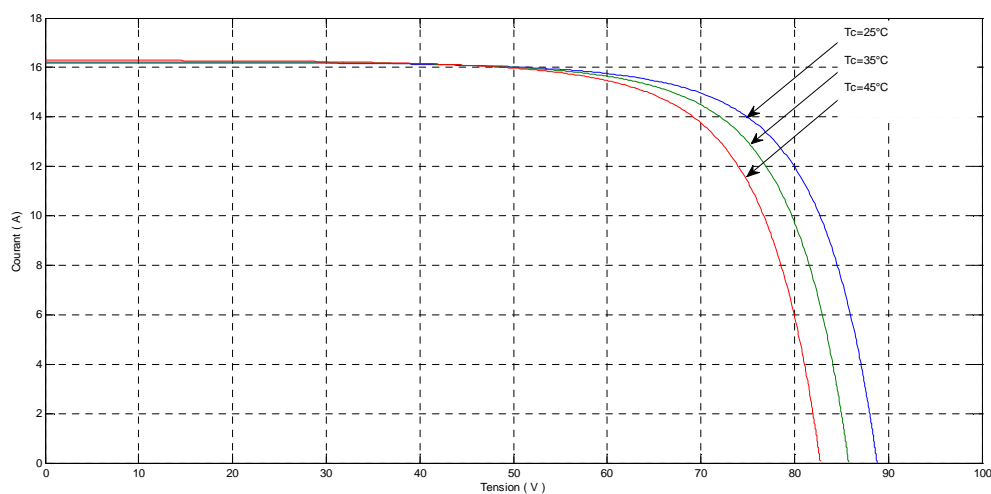
( b )

**Figure II.12 :** Caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension pour  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T_c = 25^\circ \text{ C}$ .

Sur la figure (a) on voit bien qu'à partir d'un certain seuil de la tension le courant a tendance à diminuer, Tandis que la figure (b) met en évidence l'existence d'un point de fonctionnement optimal pour lequel la puissance est maximale.

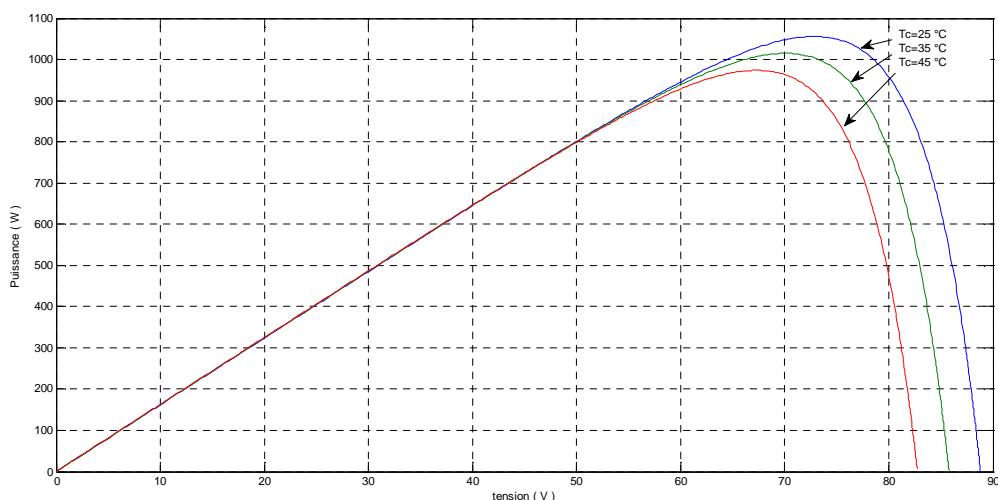
**A) Influence de la température :**

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. voir figure II.13 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une faible augmentation du courant de court-circuit, ainsi que une diminution de la puissance maximale (voir figure II.14).



**Figure II.13 :** Variation du courant en fonction de la tension pour  $T_c=25^\circ \text{ C}$ ,  $T_c=35^\circ \text{ C}$  et  $45^\circ \text{ C}$ .



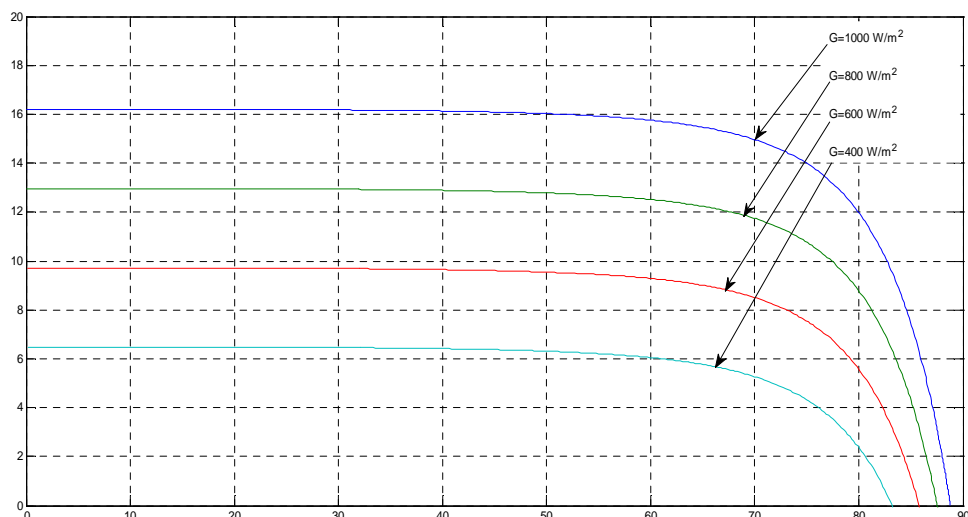


**Figure II.14 :** Variation de la puissance en fonction de la tension pour  $T_c=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c=35^{\circ}\text{C}$  et  $T_c=45^{\circ}\text{C}$ .

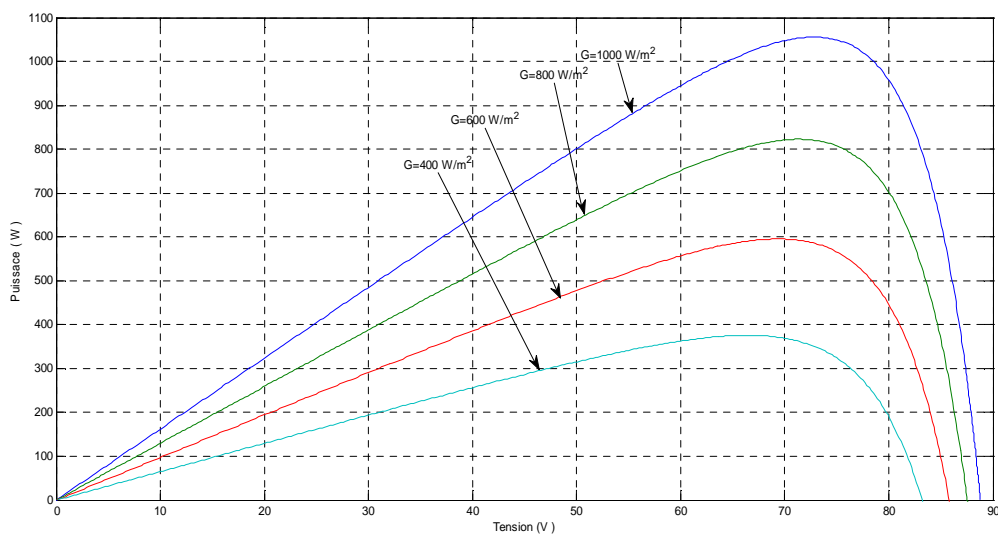
### B) Influence de l'ensoleillement

L'augmentation de l'ensoleillement voire figure II.15 se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I=f( V )$  suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

La puissance maximale  $P_m$  augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Mais, les points de tension qui correspondent à la puissance maximale varient peu voire figure II.16.



**Figure II.15 :** Variation du courant en fonction de la tension pour  $G=400 \text{ W/m}^2$ ,  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .



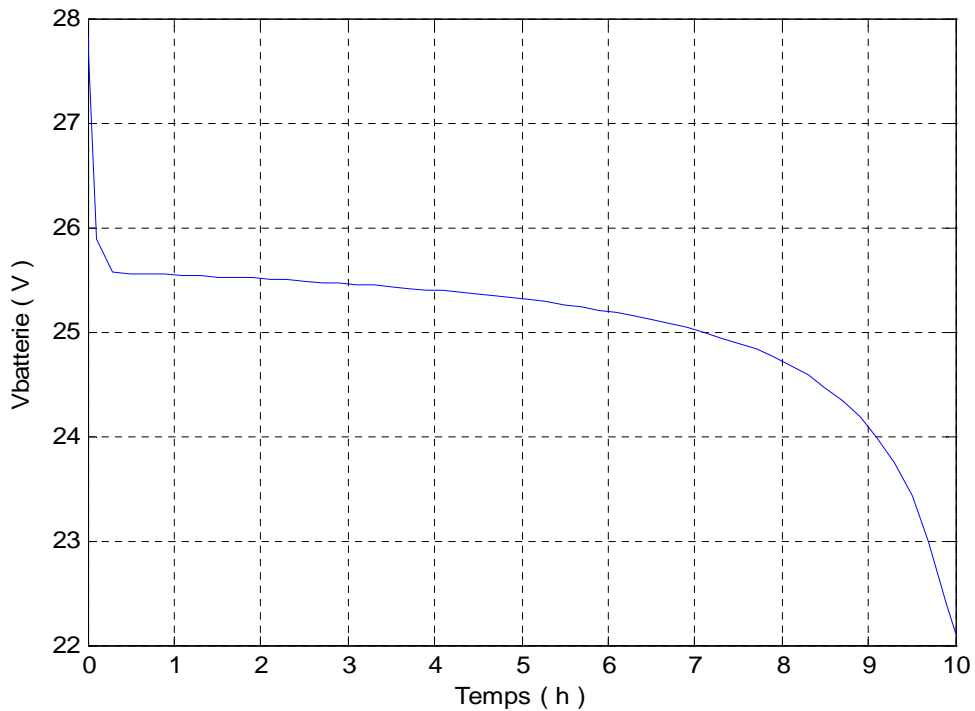
**Figure II.16 :** Variation de la puissance en fonction de la tension pour  $G = 400 \text{ W/m}^2$ ,  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .

### II.6.3. Simulation de la batterie

#### Caractéristique de décharge de la batterie et estimation de l'état de charge

Cette caractéristique est obtenue en simulant le système de stockage dans son ensemble, c'est-à-dire d'une capacité de 400 Ah composé de huit Batterie Plomb-acide (12V, 100Ah), dont chaque deux sont montées en série et les quatre branches en parallèle.

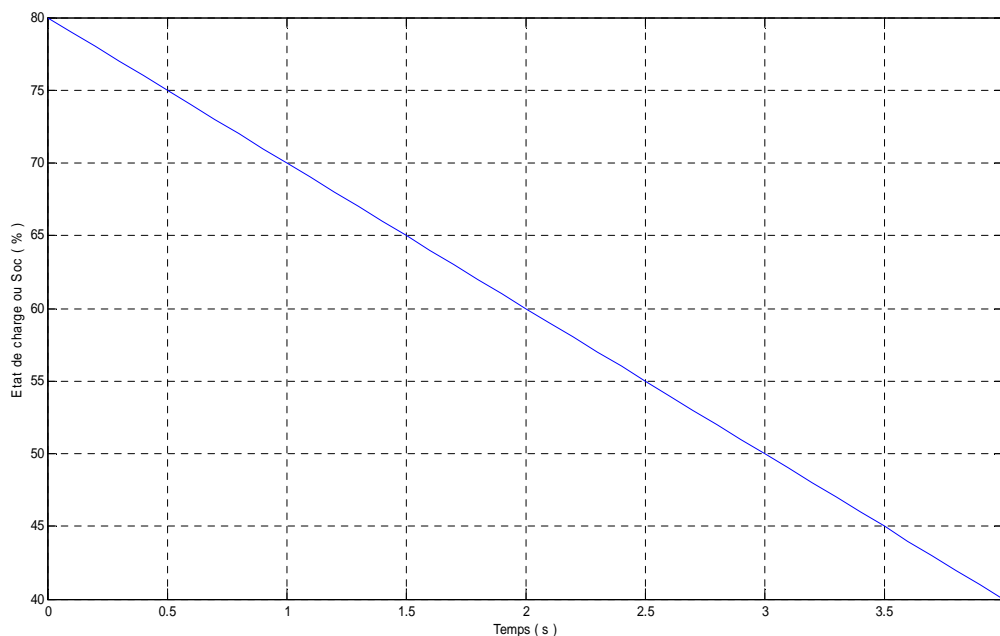
Afin de rendre visible la zone exponentielle de départ nous avons imposé un courant de décharge de 40 A.



**Figure II.17** : La tension de la batterie.

La décharge d'une batterie passe par trois zones de fonctionnement, on assiste au départ à une chute brusque de la tension, ensuite vient la zone linéaire et pour finir une diminution progressive qui vient annoncer la décharge complète. Et bien sur dans le but de simplifier la simulation nous avons imposé un courant de décharge constant qui s'annule dès que le seuil minimal de l'état de charge sera atteint, ce rôle est tenu en pratique par le contrôleur de charge.

La zone nominale de fonctionnement de la batterie est la zone linéaire.



**Figure II.18** : L'état de charge de la batterie Soc

En pratique afin de préserver les propriétés physico-chimiques de la batterie et de prolonger sa durée de vie on limite la charge et la décharge de la batterie, c'est-à-dire dans notre cas on l'a limité entre 40% et 80%, grâce à cette limitation on exploite la zone de fonctionnement linéaire.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques de chaque élément des chaînes de conversion éolienne, photovoltaïque avec les batteries.

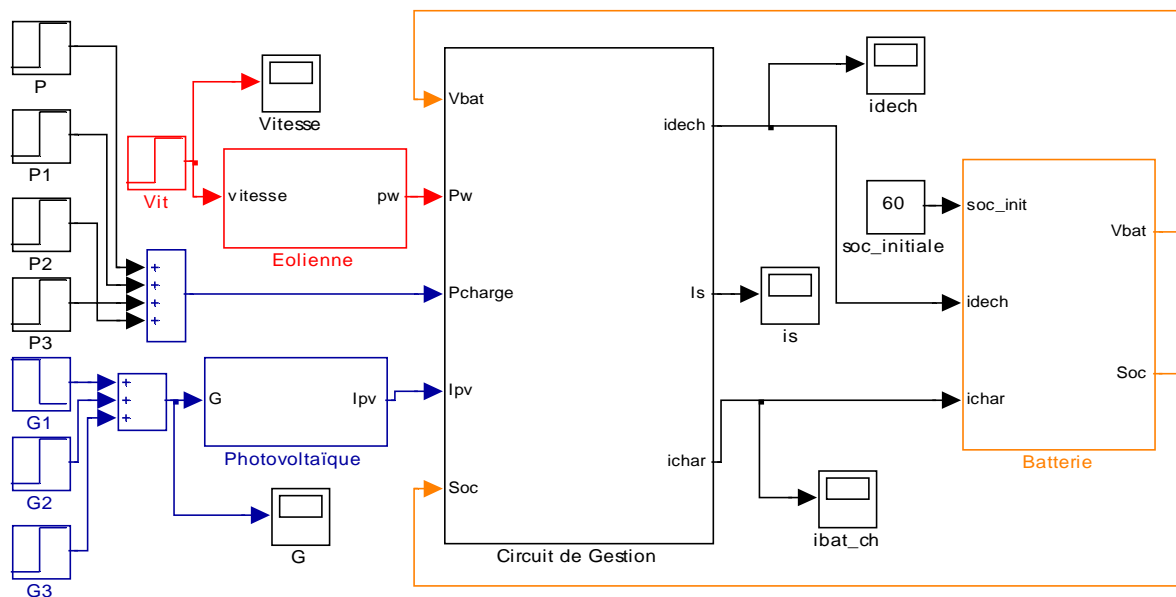
Après, nous avons présenté les résultats de simulation des systèmes éolien et photovoltaïque, avec les batteries de stockage en utilisant les modèles qu'on a obtenus dans la modélisation.

# Chapitre III

## Introduction

On se propose la gestion de l'énergie pour un système hybride constitué d'une chaîne de conversion éolienne connectée à une charge, et d'une chaîne de conversion photovoltaïque dont l'énergie produite sert uniquement à charger la batterie qui constitue notre système de stockage. Et cela dit l'énergie emmagasinée dans la batterie va servir à compenser le manque au niveau de la charge dans le cas où l'éolienne ne satisfait pas cette dernière.

Pour ce faire nous avons conçu un algorithme qu'on a implémenté sous Matlab-Simulink qui traite les différentes situations possibles auxquelles nous sommes appelés à être confrontés. Parmi ces possibilités on distingue celles qui sont favorables et d'autres défavorables. Le schéma de la figure III.1 représente l'association de nos deux sources d'énergie et de notre système de stockage avec le circuit de gestion.



**Figure III.1 :** Schéma bloc du système global

Avec :

G1 et G2 : L'ensoleillement du système photovoltaïque ( $G1+G2+G3 = G$ ).

Pcharge : La puissance demandée par la charge ( $P+P1+P2+P3 = Pcharge$ ).

Vit : La vitesse de rotation de l'arbre de la machine.

$P_w$  : La puissance générée par le système éolien.

$I_{pv} = i_{char}$  : Le courant généré par le système photovoltaïque.

$Soc$  : Etat de charge de la batterie.

$V_{bat}$  : Tension de la batterie.

$I_{dech}$  : Courant de décharge de la batterie.

$I_s$  : Le courant surplus.

$Soc_{initiale}$  : Etat de charge initiale de la batterie.

### III.1 Les différentes possibilités

#### A. 1<sup>er</sup> cas

Ce cas est plutôt favorable, car il correspond à une situation où notre source éolienne satisfait pleinement la charge, et que le surplus de puissance est dirigé vers une charge dérivée. Dans ce cas la batterie est déconnectée de la charge et si  $Soc < Soc_{max}$  et qu'il y a une énergie disponible du côté photovoltaïque, cette dernière est injectée dans la batterie.

#### B. 2<sup>ème</sup> cas

Ce cas est moins favorable que le premier, car il représente la situation où la puissance fournie par la source éolienne est inférieure à celle demandée par la charge, dans ce cas le manque sera compensé par la batterie si son  $Soc > Soc_{min}$ .

#### C. 3<sup>ème</sup> cas

Dans cette situation, qu'on définit comme étant assez défavorable, l'éolienne est incapable de satisfaire la charge et la batterie à son tour se décharge plus vite qu'elle se charge, dans ce cas la charge reçoit uniquement la puissance produite par l'éolienne malgré la puissance fournie est inférieure à celle demandée par la charge.

#### D. 4<sup>ème</sup> cas

Cette situation est définie comme étant la plus défavorable, elle présente la situation où l'énergie produite par les deux sources principales est très faible, car dans ce cas on est obligé de puiser la totalité de l'énergie demandée par la charge dans la batterie dépendamment du  $Soc$  ( $Soc > Soc_{min}$ ).

### III.2. Explication du déroulement du programme de gestion

Tout d'abord on fait un test sur la puissance fournie par l'éolienne car c'est elle qui alimente la charge d'une manière directe, si cette puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, alors on doit évacuer le surplus de puissance vers une charge dérivative. Dans le cas contraire, nous devons appeler un courant de compensation de la batterie, mais seulement après avoir vérifié qu'elle est apte à fournir ce courant, c'est-à-dire que son état de charge est supérieur au  $Soc_{min}$ . Quant à la source photovoltaïque le test se fait seulement pour vérifier s'il y a un courant qui est disponible et si l'état de charge de la batterie est inférieur au  $Soc_{max}$  alors ce courant servira à la charger sinon la charge de la batterie n'aura pas lieu.

### III.3. Simulation du système globale

Pour montrer le fonctionnement du système global incluant l'algorithme de gestion, on a appliqué des échelons de vitesse, de charge et d'ensoleillement variables à des instants différents. L'objectif est de montrer toutes les situations possibles lors du fonctionnement du système hybride, aussi de montrer le bon comportement de l'algorithme de gestion dans chaque situation.

On a simulé le système à un temps de simulation de 85 s, on a appliqué au départ un soc initial égal à 60% et la vitesse d'entraînement de la génératrice, la puissance demandée par la charge, l'éclairement sont fixés à des valeurs indiquées dans le tableau suivant :

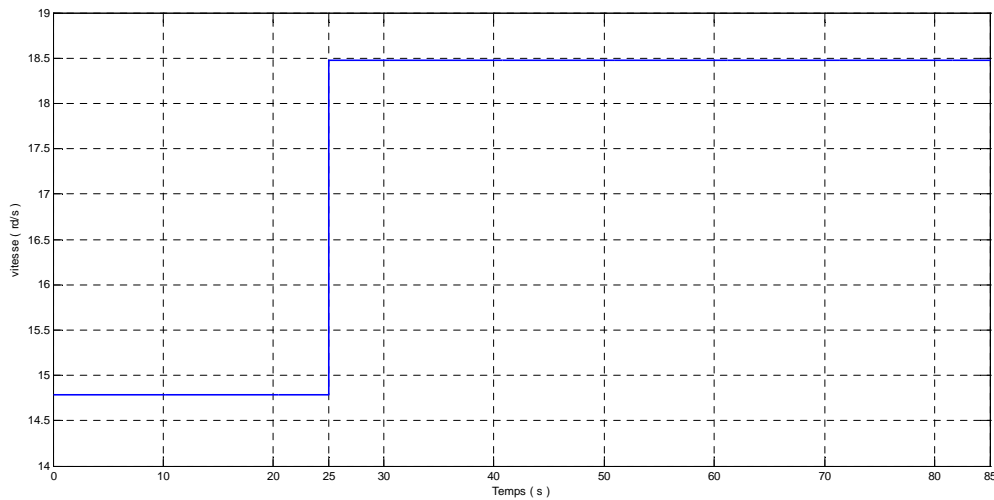
**Tableau III.1** : les grandeurs imposées.

Temps (s)	0-10	10-25	25-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-85
La vitesse (rad/s)	14,78		18,47					
La puissance demandée par la charge (W)	400			1000		1500	400	1500
L'éclairement ( $W/m^2$ )	0	500			0		1000	

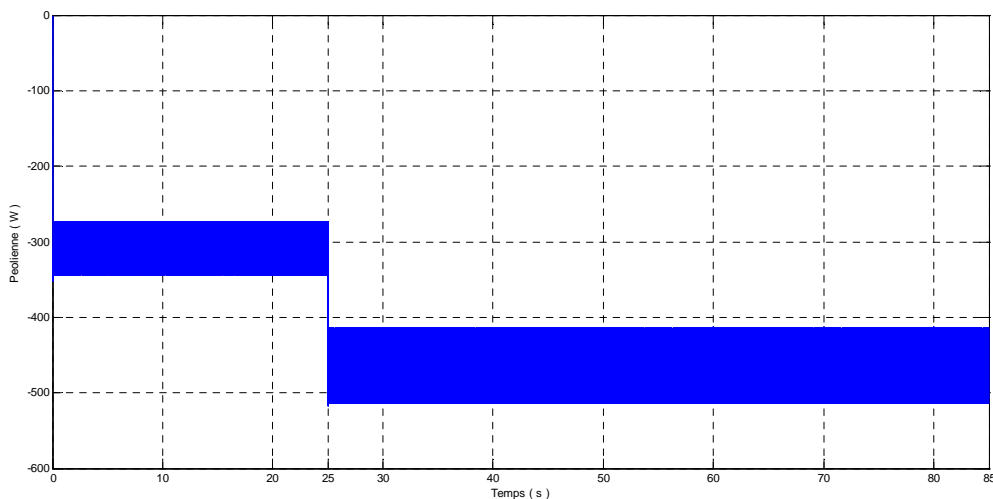
Les figures (III.2, III.3, III.4 et III.5) présentent respectivement les allures, de la vitesse d'entraînement de la génératrice, de la puissance fournie par le système éolien, de la puissance demandée par la charge et du courant à dissiper dans une charge dérivative. On voit bien que pour les intervalles de temps où le courant à dissiper dans une charge dérivative est nul, la totalité de l'énergie produite par la génératrice est consommée par la charge, contrairement aux intervalles de temps où la puissance fournie par le système éolien est supérieure à celle demandée par la charge.



Les figures (III.6, III.7, III.8 et III.9) présentent respectivement les allures, du courant de décharge, de l'état de charge (soc) et du courant de charge de la batterie ainsi que celle de l'éclairement du soleil. On constate que durant les intervalles de temps où la puissance fournie par le système éolien est inférieure à celle demandée par la charge, et l'état de charge de la batterie est supérieur au  $Soc_{min}$ , le courant de décharge de la batterie n'est pas nul. Par contre, il est nul ailleurs. On remarque aussi que durant les intervalles de temps où l'éclairement n'est pas nul, et l'état de charge de la batterie est inférieur au  $Soc_{max}$ , le courant de charge de la batterie n'est pas nul. Par contre, il est nul ailleurs.



**Figure III.2 :** La vitesse d'entraînement de la génératrice.



**Figure III.3 :** Puissance fournie par le système éolien

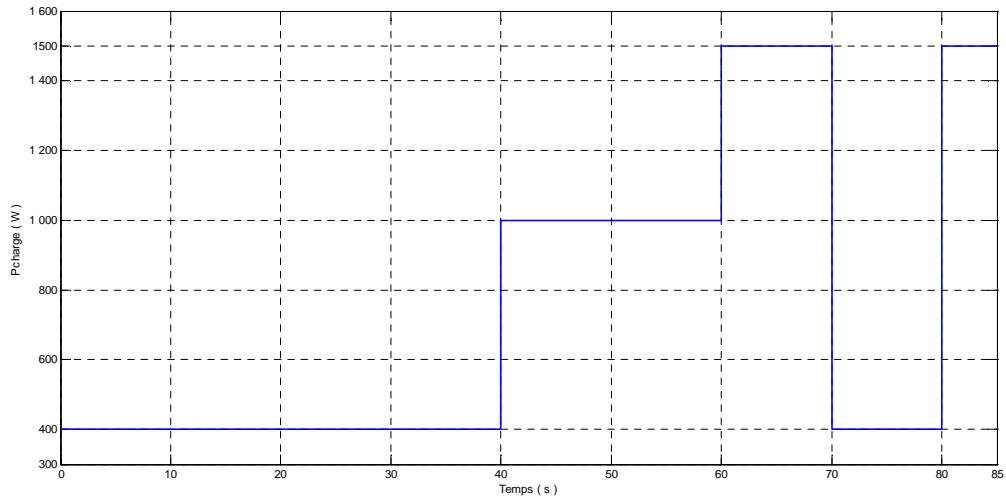


Figure III.4 : Puissance demandée par la charge

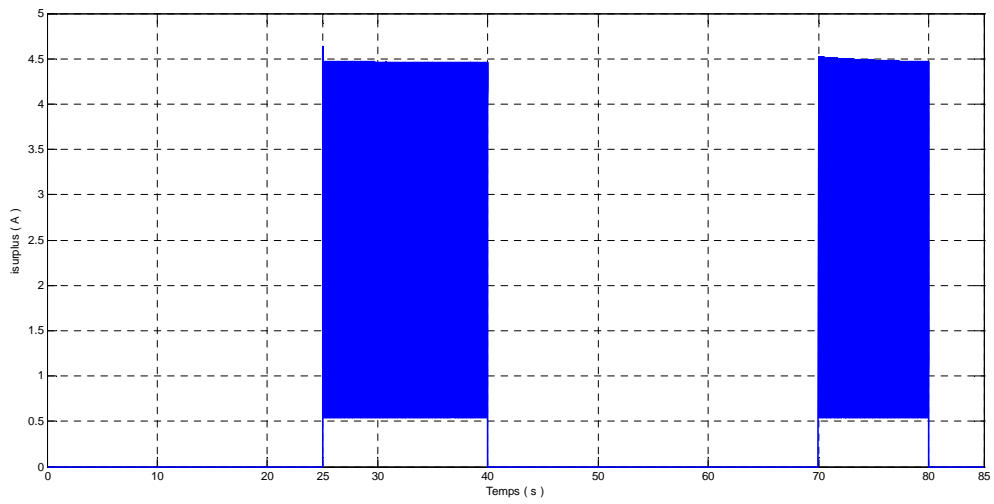


Figure III.5 : Courant à dissiper dans une charge dérivative

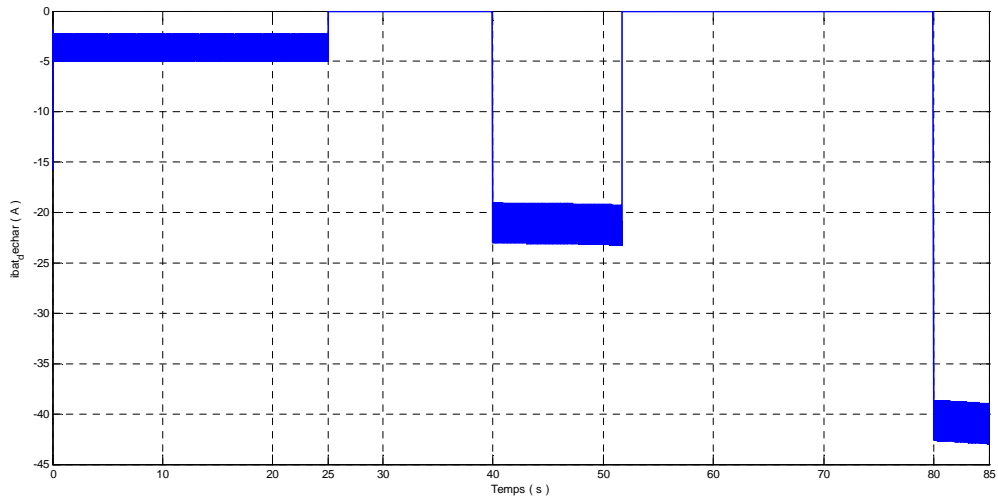


Figure III.6 : Courant de décharge de la batterie.

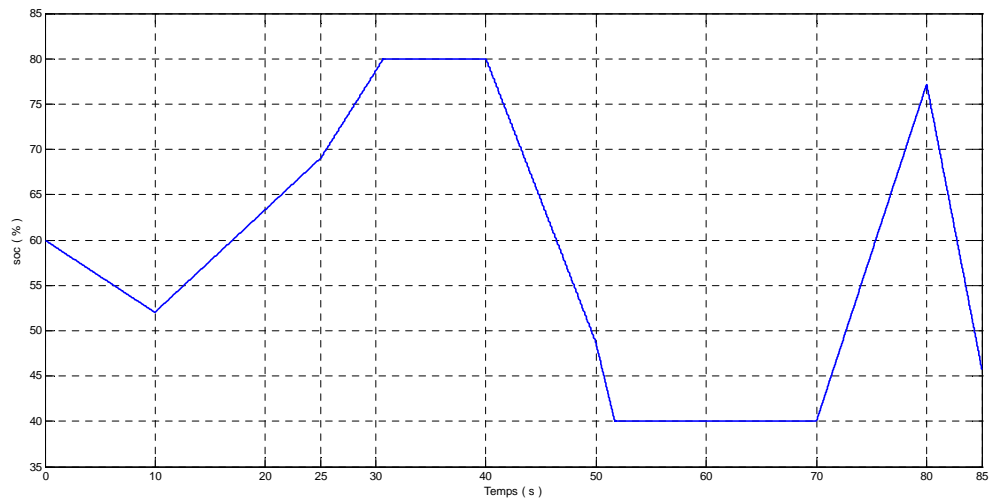


Figure III.7 : Etat de charge de la batterie (soc).

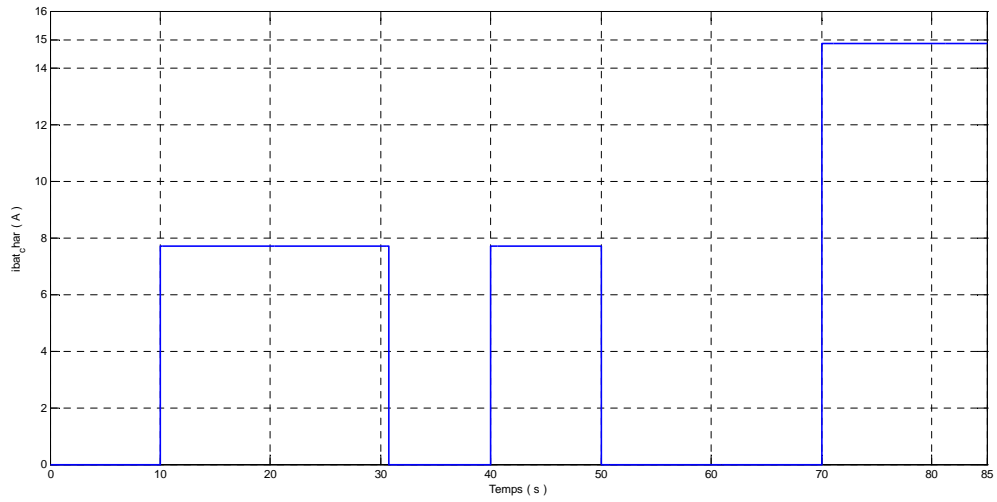


Figure III.8 : Courant de charge de la batterie.

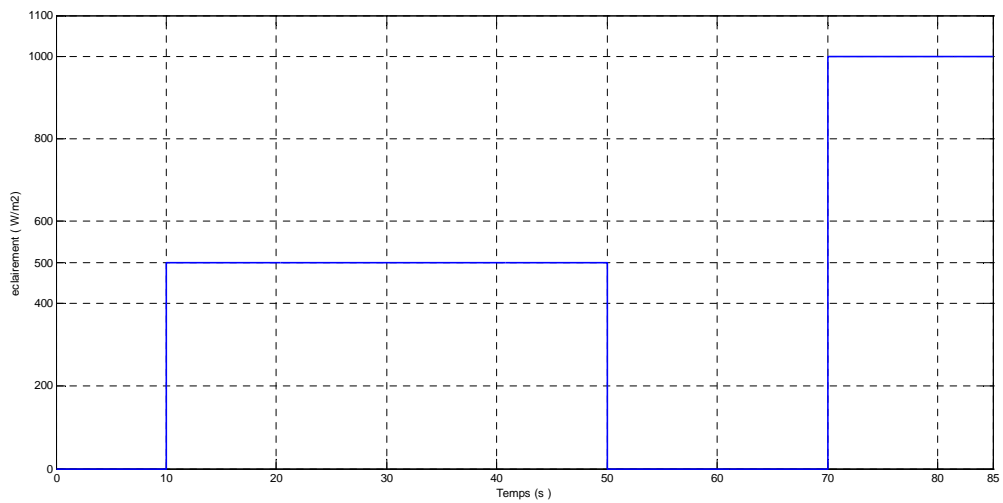
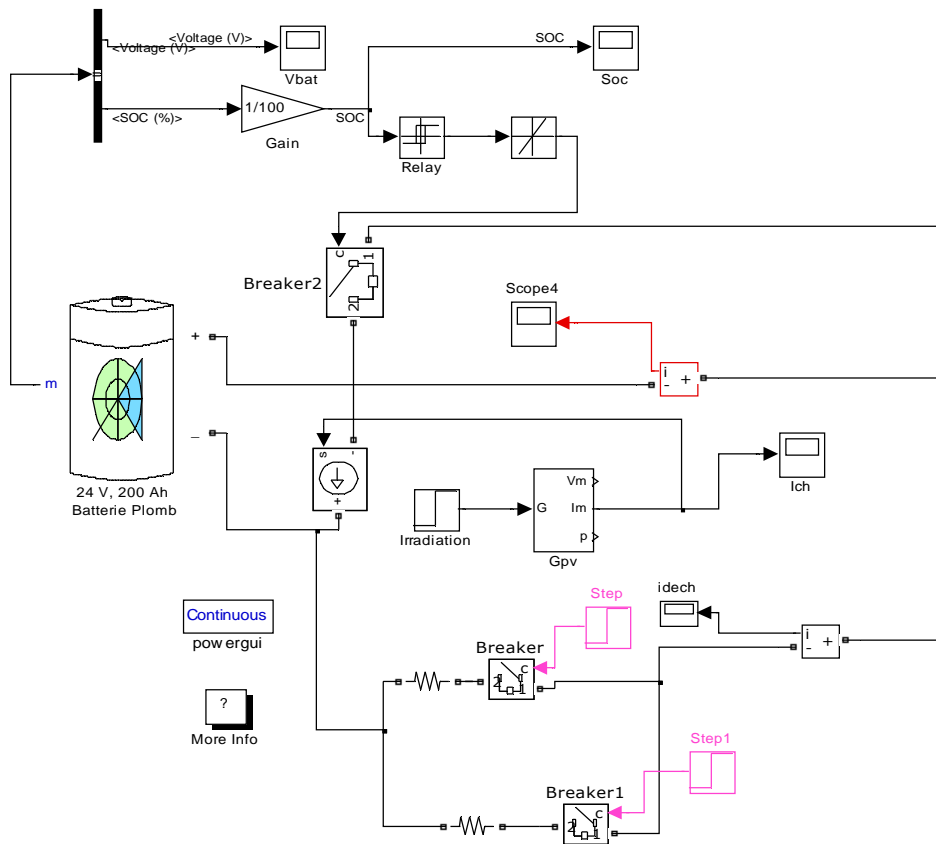


Figure III.9 : Eclairement du soleil

### III.4. Simulation du système photovoltaïque-batteries

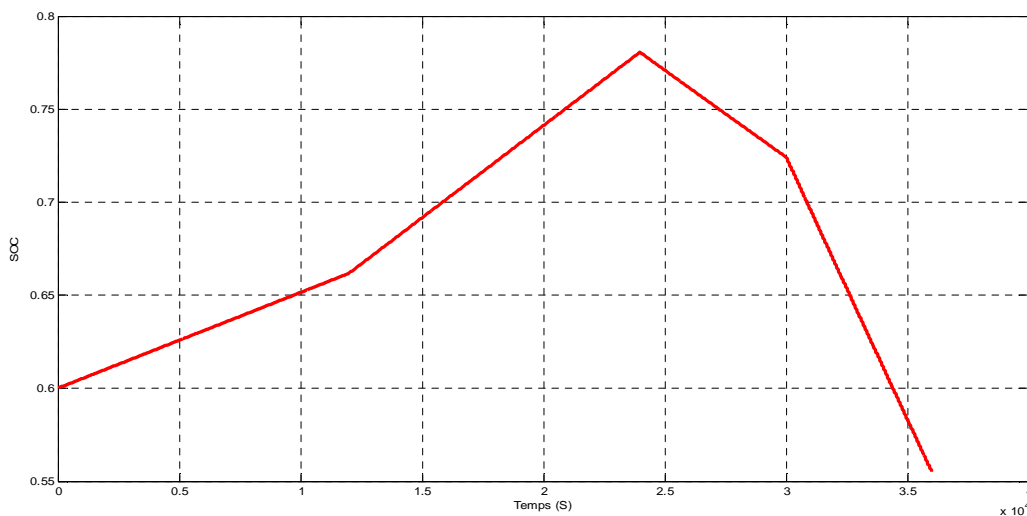


**Figure III.10 :** Schéma bloc d'un système photovoltaïque-batteries débitant sur une charge

La Figure (III.10) représente le schéma bloc d'un système photovoltaïque-batteries débitant sur une charge, qui va nous servir à simuler le comportement de la batterie pour une longue durée (des heures) afin de s'approcher de la réalité des temps qu'il faut pour charger ou décharger une batterie. On a appliqué un échelon pour la variation de l'éclairement et un autre pour la variation de la charge, tout en gardant la température de jonction des panneaux photovoltaïques constante ( $T_c=25^\circ\text{C}$ ). Le système étudié est simulé à un temps de dix heures (36000s). L'irradiation appliquées sont  $500 \text{ W/m}^2$  entre  $t=0\text{s}$  et  $t=12000\text{s}$  puis une irradiation  $1000 \text{ W/m}^2$  de  $t=12000\text{s}$  jusqu'au  $t=36000\text{s}$ .

Aucune charge n'a été branché aux bornes des batteries entre les instants  $t=0\text{s}$  et  $t=24000\text{s}$ . De  $t=24000\text{s}$  jusqu'au  $t=30000\text{s}$ , on a appliqué une charge d'une puissance 750W puis de l'instant de  $t=30000\text{s}$  jusqu'au  $t=36000\text{s}$  on a augmenté la charge à une puissance de 1500W.

Les figures ( III.11, III.12 , III.13 et III.14) illustrent les allures de l'état de charge, de la tension, des courant de charge et de décharge de la batterie. Les résultats de simulation obtenus entre  $t=0s$  et  $t=24000s$ , montrent que l'augmentation de l'éclairement engendre l'augmentation du SOC, du courant de charge et de la tension aux bornes de la batterie. Le courant de décharge est nulle étant donné aucune charge n'a été connecté. Ceux obtenus a partir de  $t=24000s$ , montrent que l'introduction puis l'augmentation de la charge engendre l'augmentation du courant de décharge. Par contre le courant de charge reste constant, étant donnée l'éclairement est gardé constant. La supériorité du courant de décharge par rapport au courant de charge, engendre une diminution du SOC et de la tension aux bornes des batteries.



**Figure III.11** : Etat de charge de la batterie

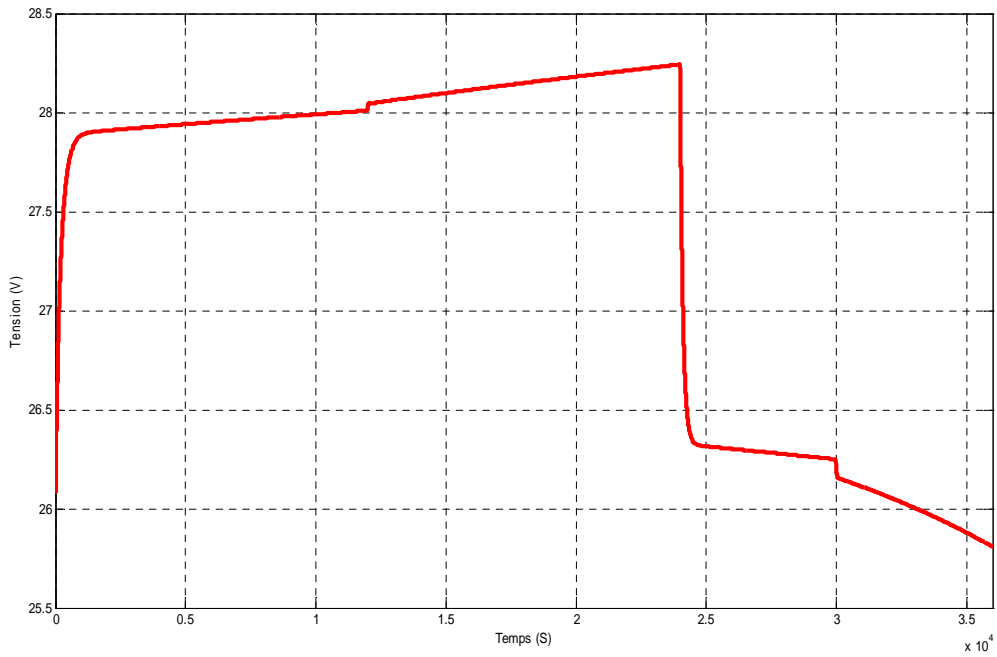


Figure III.12 : Tension de la batterie

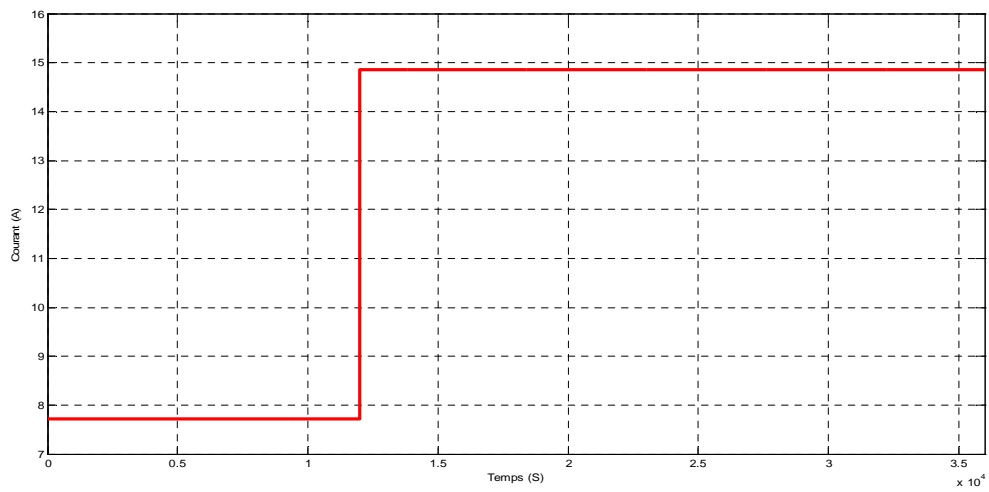
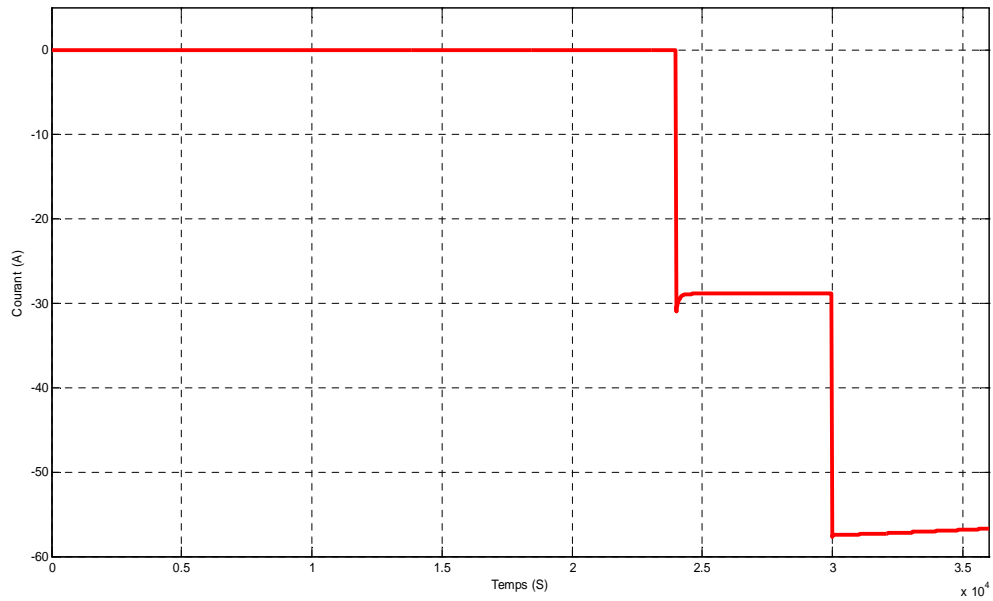


Figure III.13 : Courant de charge de la batterie



**Figure III.14 :** Courant de décharge de la batterie

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini un algorithme destiné à la gestion de l'énergie dans le système hybride étudié. Cet algorithme est basé sur l'analyse des cas de figures (situations) possible lors du fonctionnement de ce système et qui font que cette gestion soit primordiale.

L'algorithme présenté est programmé puis simulé sous Matlab/Simulink afin de vérifier son comportement dans le système étudié. Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié, ces résultats ont été présentés et commentés.



## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la problématique de la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides. Le système hybride étudié est constitué d'une éolienne, d'un générateur photovoltaïque, des batteries de stockages et ce système débite sur une charge.

Le problème de gestion de l'énergie dans les systèmes hybride st crucial. Cependant, il faut à chaque instant connaître les puissances fournies par les sources (éolienne et photovoltaïque dans notre cas), celle demandé par la charge et l'état de charges des éléments de stockages (batteries). Ensuite il faut que l'algorithme de gestion prenne une décision adéquate pour le bon fonctionnement du système.

Le chapitre I de ce mémoire est consacré à la description des diverses énergies renouvelables, systèmes de stockage et hybrides. Après cette description, on a choisie la chaine hybride étudié.

Dans le second chapitre, on a présenté la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, du système photovoltaïque avec les batteries. Après, Des résultats de simulation des systèmes éolien et photovoltaïque en utilisant les modèles qu'on a obtenus dans la modélisation ont été présentés et commentés.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté et simulé un algorithme de gestion de l'énergie du système hybride, et nous avons montre le bon déroulement de cette algorithme. Ce travail nous a permis de constater à quel point la gestion de l'énergie est complexe, mais importante et indispensable.

En perspective, il est intéressant de remplacer le redresseur non commandé par un autre commandé, d'introduire des algorithmes de détection du point de puissance maximales (MPPT) afin d'optimiser le fonctionnement du système globale.

## **Bibliographie :**

- [1] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne-diesel » Revue des énergies renouvelables vol.11, N°04, pages (623-633), Béjaia, 2008.
- [2] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. Sadasy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens » sous la direction de ARIC SCHILLER, université d'OTTAWA, 1998.
- [3] Site web: [http://fr.wikipedia.org/wiki/cellule\\_photovoltaïque](http://fr.wikipedia.org/wiki/cellule_photovoltaïque).
- [4] M. Hussein « Mise en œuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche » Thèse de doctorat, université de LIMOGES, 2007.
- [5] A. B. Learreta, « Réalisation de techniques MPPT numériques » rapport de stage projet de fin d'études ingénieur techniques industrielles, 2006.
- [6] R. Maouedj « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » mémoire de magister université abou bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005.
- [7] A. Mirecki « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut nationale polytechniques de Toulouse, France, 2005.
- [8] L. Leclercq « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2004.
- [9] En ligne : <http://www.wikipedia.org>.
- [10] F. Poitiers « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne » thèse de doctorat, université de Nantes, France, 2003.
- [11] A. Boyette « Contrôle-Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy1, France, 2006.
- [12] S. Elaimani « modélisation de différents technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, France, 2004.
- [13] S. Hamour « Modélisation et simulation des différentes techniques d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone dédiés à l'éolienne » projet de fin d'études, université abderrahmane Mira Béjaia, 2006.

- [14] K. Idjdarene « Analyse et contrôle de conversion électrique par énergie éolienne » mémoire de magister, université abderrahmane Mira Béjaia, 2005.
- [15] D. Madet « Hydraulique et géothermie : principe physique et modalité d'utilisation » école d'été de physique, 2001.
- [16] . [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com).
- [17] A. Boutiba « Accélération du durcissement par énergie renouvelable du béton frais et caractérisation du béton durci » mémoire de magister, universite de boumerdès
- [18] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com).
- [19] G. O. CIMUCA « Système inertiel de stockage d'énergie associe à des générateurs éolienne » thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, France, 2005.
- [20] A. J. Dhers « 10 questions sur le stockage de l'énergie électrique » académie des technologies commission énergie et environnement, 2006.
- [21] J. Kauv, J. Bonal et P. Odru « Stockage inertiel de l'énergie » technique de l'ingénieur.
- [22] J. F. colson « Modélisation de l'état de charge des batteries de véhicules électrique » mémoire d'ingénieur civil électricien et mécanicien, université de liège, Belgique, 1998.
- [23] A. Payman « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges » thèse de doctorat génie électrique, l'institut national polytechnique lorraine, Nancy université, France, 2009
- [24] D. Bouquain « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des architectures de véhicules hybrides » thèse de doctorat UTBM, 2008.
- [25] F. Delfosse « Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique » mémoire d'ingénieur de l'université de Liège, Belgique, 1998.
- [26] M. Belhamel, S. moussa, A. Kaabech « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diesel) » revue des énergies renouvelables pages (49-54), Algérie, 2002.
- [27] B. Wichert « PV-Diesel hybrid energy system for remote area power generation – A review of current practice and futur developments » renewable and sustainable energy reviews, 1997, vol 01, N°3, pp (209-228), Elsevier science, 1997.
- [28] S. Moussa « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) » bulletin des énergies renouvelables CDER, pages (9-10), juin, 2004.
- [29] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

- [30] L. khettache, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique Double alimentée », Mémoire de Magistère en électrotechnique Université de Batna, 2007.
- [31] R. REDJEM « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire de magister en Electrotechnique université de Constantine, 2009.
- [32] L. ZAROUR « Etude technique d'un système d'énergie Hybride photovoltaïque-éolien hors réseau » Thèse de doctorat Electrotechnique option machines électriques, université de Constantine, 2010.
- [33] Z. Roumila « commande d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diesel » Mémoire de magister en génie électrique université de bejaia, 2009.
- [34] S. Bensmail « Contribution à la modélisation et à l'optimisation du système photovoltaïque » mémoire de magister en electrtechnique option système électroénergétique université de bejaia, 2012.
- [35] bibliothèque de simulink Matlab 7.8.0 (R2009a)

## Annexe 1

### Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents:

- Puissance nominale : 600W.
- Tension nominale : 90V.
- Courant nominale : 4.8A.
- Nombre de paire de pôles : 17.
- Flux efficace:  $\phi=0.15\text{Wb}$ .
- Inductance cyclique :  $L_c=2.7\text{ mH}$ .
- Résistance statorique :  $R_s =1.137\text{ohm}$ .

### Caractéristiques des panneaux photovoltaïques :

Dimension extérieur : 1575\*826 mm.

Epaisseur : 40 mm.

Poids : 17.0 kg.

Puissance maximale du panneau :  $P_m = 175.3\text{ W}$ .

Courant au point de puissance maximale :  $I_m = 4.95\text{ A}$ .

Tension au point de puissance maximale :  $V_m = 35.4\text{ V}$ .

Courant de court-circuit :  $I_{sc} = 5.4\text{ A}$ .

Tension en circuit ouvert :  $V_{oc} = 44.4\text{ V}$ .

### Caractéristiques de Batterie:

Tension :  $V_{\text{batt}}= 12\text{ V}$ .

Capacité de batterie:  $C_{\text{batt}}=100\text{Ah}$ .

## Annexe 2

### Algorithme de gestion

Dans cet algorithme, on définit comme entrées les grandeurs suivantes : Vbat, Pw, Pcharge, Ipv, Soc.

Et les sorties sont : idech, Is, ichar.

### Début

Lecture de données

$I_w = P_w / v_{bat}$

Si  $P_w > P_{charge}$

$I_s = i_w - I_{charge}$

$I_{dech} = 0$

    Sinon si  $Soc > 40\%$

$I_s = 0$

$I_{dech} = I_{charge} - I_w$

    Sinon

$I_{charge} = I_w$

$I_{dech} = 0$

$I_s = 0$

End

Si  $I_{pv} > 0$

    Si  $Soc < 80\%$

$I_{char} = I_{pv}$

    Sinon

$I_{char} = 0$

**End**

## **Résumé**

La production décentralisée d'énergie électrique, bénéficie actuellement d'un essor très important. Plusieurs sources d'énergie renouvelables et gratuites, telles que le vent (éoliennes), le soleil (thermiques ou photovoltaïques), sont de plus en plus utilisées pour produire l'énergie électrique localement sur des sites isolés. A cause de l'inconstance du vent et de la lumière, la gestion de l'énergie constitue l'un des défis majeurs dans les systèmes électriques éoliens déconnectés du réseau, ainsi que dans les systèmes photovoltaïque.

Dans ce travail nous allons nous intéresser en premier lieu à ces sources d'énergies, prendre connaissance de leurs caractéristiques et comprendre leur fonctionnement et ensuite faire une analyse de la gestion.