

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA  
Faculté des Sciences et Technologies  
Département de Génie électrique



Filière : Electromécanique

**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

***Thème***

**Les stratégies de commande et la gestion énergétique d'un  
système photovoltaïque alimentant un site isolé**

**Présenté par :**

NAIT AMARA Zaid

KHELFI Mahmoud

**Membres de jurée :**

Mr. BENDAHMANE Boukhalfa

Mr. TAMALOUZT Salah

**Encadré par :**

Mr. DJERMOUNI Kamel

**Promotion 2022/2023**

# REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui ce Travail a pu être réalisé. On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragée et soutenue.

Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à notre promoteur Mr. DJERMOUNI. K pour son encadrement efficace, son soutien, sa disponibilité et sa gentillesse. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous le remercions aussi pour ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier Mr MEBARKI.N, pour l'aide qu'il nous a apporté aussi bien sur le plan moral que travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

En fin un grand Merci à toutes personnes ayant contribués de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.

# DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Ma chère femme,

Mes chères frères et sœurs,

Toute ma famille,

Tous mes amis et à mes proches.

.

MAHMOUD

# DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mes chère frères et sœurs,

Toute ma famille,

Tous Mes amies et à mes proches.

# TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur le système photovoltaïque.....	3
I.3 Avantages et Inconvénients de l'Énergie solaire.....	3
I.3.1 Avantages du système photovoltaïque .....	3
I.3.2 Inconvénients du système photovoltaïque .....	4
I.4 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV .....	4
I.5 Module photovoltaïque.....	4
I.6 Différents types d'installations photovoltaïques .....	4
I.6.1 Systèmes photovoltaïques autonomes .....	6
I.6.2 Systèmes autonomes « au fil du soleil » .....	6
I.6.2.1 Alimentation directe sans transformation .....	7
I.6.2.2 Alimentation directe avec transformation .....	7
I.6.3 Système autonome avec stockage .....	8
I.6.4 Systèmes photovoltaïque hybrides .....	8
I.6.5 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	9
I.6.5.1 Injection de la totalité de la production.....	9
I.6.5.2 Injection du surplus de production .....	10
I.7 Conclusion .....	11
<b>Chapitre II : Modélisation de système pompage photovoltaïque</b>	
II.1 Introduction.....	12
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	12
II.2.1 Cas d'une cellule idéale .....	12
II.2.2 Cas d'une cellule réel :.....	13
II.3 Constitution d'un panneau photovoltaïque .....	14
II.4 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	15
II.5 Protection d'un GPV .....	16
II.6 Influence de l'éclairement et de la température .....	16
II.7 Etude et réalisation du convertisseur .....	19
II.7.1 Liaison à travers un convertisseur DC/DC contrôle par la commande MPPT .....	19
II.7.2 Convertisseur statique DC/DC.....	19
II.7.3 Hacheur abaisseur (Buck).....	19

II.7.4 Hacheur élévateur (Boost) .....	20
II.7.5 Hacheur abaisseur-élévateur(Buck-Boost).....	20
II.8 Optimisation de point de puissance maximale .....	21
II.8.1 Description de la méthode .....	21
II.9 Modélisation de groupe motopompe .....	24
II.9.1 Moteur à courant continu(MCC) .....	24
II.9.1.1 Modélisation d'une machine à courant continu (MCC) .....	25
II.9.1.2 Mise en équation de la machine à courant continu à excitation séparé .....	25
II.9.1.3 Validation du modèle de moteur .....	27
II.9.1.5 Equation de deuxième ordre.....	28
II.9.2 Modélisation de la pompe centrifuge .....	30
II.9.2.1 Principe de fonctionnement :.....	30
II.9.2.2 Mise en équation.....	31
II.9.2.3 Rendement du groupe motopompe .....	32
II.10 Modélisation de l'électrolyseur.....	33
II.10.1 Modèle de l'électrolyseur .....	33
II.11 Modélisation de la pile à combustible .....	35
II.12 Conclusion .....	38

### **Chapitre III : Dimensionnement de système pompage photovoltaïque**

III.1 Introduction.....	41
III.2 Démarche globale de dimensionnement .....	41
III.3 Description de l'installation de pompage photovoltaïque.....	41
III.4 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque .....	41
III.4.1 Evaluation des besoins en eau .....	42
III.4.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire .....	42
III.4.3 Inclinaison du générateur photovoltaïque.....	43
III.4.4 Mois de dimensionnement .....	43
III.5 Choix des composantes .....	43
III.5.1 Dimensionnement du réservoir d'eau .....	43
III.5.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge .....	43
III.5.3 Dimensionnement de moteur à courant continu .....	44
III.5.4 Dimensionnement de la pile à combustible.....	45
III.5.5 Dimensionnement d'électrolyseur.....	46
III.6 Stratégie de fonctionnement de système de gestion d'énergie .....	46
III.6.1 Durant la période où les besoins en eau sont nuls ( $Q = 0$ ; %débit) .....	47
III.6.2 Durant la période où les besoins existent ( $Q = 1$ ; %débit) .....	48

III.7 Conclusion .....	51
------------------------	----

**Chapitre VI : Simulation et interprétation des résultats**

IV.1 Introduction .....	52
IV.2 Simulation du système globale .....	52
IV.3 Résultats de simulation .....	52
IV.4 Conclusion .....	62
Conclusion générale .....	63

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> Association des cellules en série .....	5
<b>Figure I.2</b> Association des cellules en parallèle .....	6
<b>Figure I.3</b> Alimentation direct sans transformation.....	7
<b>Figure I.4</b> Alimentation directe avec transformation .....	8
<b>Figure I.5</b> Système photovoltaïque autonome avec stockage.....	8
<b>Figure I.6</b> Système autonome hybride photovoltaïque/groupe électrogène .....	9
<b>Figure I.7</b> Injection de la totalité de la production .....	10
<b>Figure I.8</b> Injection du surplus de production .....	10
<b>Figure II.1</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule idéale .....	13
<b>Figure II.2</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule réelle .....	14
<b>Figure II.3</b> Caractéristique « Tension-Courant » I(V) d'un panneau photovoltaïque .....	15
<b>Figure II.4</b> Caractéristique « Tension-Puissance » P(V) d'un panneau photovoltaïque.....	16
<b>Figure II.5</b> Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension-Courant ».....	17
<b>Figure II.6</b> Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension - Puissance » d'un panneau photovoltaïque P(V).....	17
<b>Figure II.7</b> Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Courant » d'un panneau photovoltaïque I(V).....	18
<b>Figure II.8</b> Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Puissance » d'un panneau photovoltaïque P(V) .....	18
<b>Figure II.9</b> Liaison entre PV et la charge à travers DC/DC .....	19
<b>Figure II.10</b> Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur (Buck).....	20
<b>Figure II.11</b> Schéma du circuit électrique d'un hacheur élévateur (Boost) .....	20
<b>Figure II.12</b> Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) .....	21
<b>Figure II.13</b> Caractéristique Ppv (Vpv) d'un panneau photovoltaïque .....	22
<b>Figure II.14</b> Organigramme de la méthode perturbation et observation .....	23
<b>Figure II.15</b> Moteur à courant continu avec balais.....	24
<b>Figure II.16</b> Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série.....	25
<b>Figure II.17</b> Schéma électrique de la machine à courant continu à excitation séparée .....	26
<b>Figure II.18</b> Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse.....	28
<b>Figure II.19</b> Schéma-bloc de moteur à courant continu .....	30
<b>Figure II.20</b> Caractéristiques de la pompe centrifuge .....	31
<b>Figure II.21</b> Rendement d'une pompe immergée en fonction de la HMT .....	32
<b>Figure II.22</b> L'électrolyse PEM [22].....	33
<b>Figure II.23</b> Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur.....	33
<b>Figure II.24</b> Courbe tension-courant typique d'une pile à combustible.....	36
<b>Figure II.25</b> Allure générale du rendement et de la tension électrique associée .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure II.26</b> Allure générale du rendement et de la puissance électrique associé.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure III.1</b> Organigramme de gestion durant la période où la demande d'eau est nulle .....	49
<b>Figure III.2</b> Organigramme de gestion durant la période où la demande d'eau existe .....	50
<b>Figure IV.1</b> Schéma global de système pompage .....	52
<b>Figure IV.2</b> Variation de l'ensoleillement.....	53
<b>Figure IV.3</b> Variation de la température .....	53
<b>Figure IV.4</b> Variation de la quantité d'eau stockée dans le réservoir (en %).....	54

<b>Figure IV.5</b> Variation de la quantité d'hydrogène stockée dans le réservoir (en %)	54
<b>Figure IV.6</b> Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques	55
<b>Figure IV.7</b> Variation des besoins en eau	55
<b>Figure IV.8</b> Tension délivrée par le Buck-Boost	56
<b>Figure IV.9</b> Puissance de charge (MCC)	56
<b>Figure IV.10</b> Courant de (MCC)	57
<b>Figure IV.11</b> Couple de la (MCC)	57
<b>Figure IV.12</b> Vitesse de la (MCC)	58
<b>Figure IV.13</b> Puissance d'électrolyseur	58
<b>Figure IV.14</b> Puissance délivrée par la pile à combustible	59
<b>Figure IV.15</b> Variation de la hauteur manométrique HMT(m)	59
<b>Figure IV.16</b> Variation des différentes puissances	60

### ***LISTES DES TABLEAUX***

<b>Tableau II. 1</b> Valeurs des paramètres du modèle électrochimique	38
<b>Tableau III.1</b> Totalité des besoins d'eau	42

## LISTE DES SYMBOLES

**PV**: Photovoltaïque ;

**GPV**: Générateur Photovoltaïque ;

**PN** : positif négatif ;

**Ns** : Nombre de cellule en série dans le panneau ;

**Np** : nombre de cellule en parallèle dans le panneau ;

**DC**: Courant Continu ;

**AC** : Courant alternative ;

**Icc** : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A) ;

**Vco** : Tension du circuit ouvert (V) ;

**n**: Facteur d'idéalité ;

**E** : Energie de chaque photon ;

**G** : Eclairement (W/m<sup>2</sup>) ;

**Pmax**: Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV ;

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking;

**Iph** : Photo-courant (A) ;

**Rsh** : Résistances parallèle shunt ( $\Omega$ ) ;

**Rs**: Résistance série ( $\Omega$ ) ;

**Vopt** : Tension optimale (V) ;

**Iopt** : Courant optimum (A) ;

**T** : Température de jonction (K) ;

**Is** : Courant de saturation en Ampère ;

**K** : Constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K ;

**q** : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C) ;

**Ipv** : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

**Vpv** : Tension de sortie d'un panneau photovoltaïque ;

$\Sigma j$  : Moment d'inertie totale (machine et charge) ;

**f** : Frottement proportionnelle à la vitesse de rotation ;

**Ce** : Couple électromagnétique ;

**Cr** : Couple de charge ;

$\tau_e$  : Constante de temps électrique de l'induit ;  
 $H_g$  : Est à hauteur géométrique entre la nappe de l'eau pompé et le plan d'utilisation ;  
 $P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites ;  
 $\lambda$  : Coefficient de régulation de pression de la canalisation ;  
 $L, d$  : longueur et diamètre respectives de la canalisation ;  
 $\xi$  : Est le coefficient des pertes de pression locales ou singulières dans les coudes, les valves et les différentes connections de la canalisation ;  
 $Q$  : Le débit de l'eau ( $m^3/s$ ) ;  
 $P_n$  : Puissance nominale du moteur asynchrone(W) ;  
 $\Omega_n$  : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s);  
 $\Omega$  : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s) ;  
 $R_i$ : Résistance initiale ;  
 $V_i$  : Tension initiale ;  
 $e_{irev}$  : Potentiel idéal (électrochimique) ;  
 $\Delta G$ : Changement d'énergie libre de Gibbs ;  
 $F$  : Constante Faraday ;  
 $V_m$  : Volume molaire ;  
 $V_h$  : Taux de production d'hydrogène ;  
 $P_{bi}$  : Pression initiale du réservoir ;  
 $P_b$  : Pression du réservoir mesurée;  
 $V_b$  : volume du réservoir ;  
 $T$  : Température de fonctionnement ;  
 $R$  : Constant des gaz parfaits ;  
 $Z$  : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule ;  
 $P$  : Pression atmosphérique ;  
 $T$  : Temps correspondant à la production de volume V ;  
 $A$  : Surface active de la pile ( $cm^2$ ) ;  
 $l$  : Epaisseur de la membrane ( $\mu m$ ) ;  
 $T$  : Température opératoire absolue de la pile (k) ;  
 $P_{anode}$  : Pression partielle de l'hydrogène (atm) ;

$P_{cath}$  : Pression partielle de l'oxygène (atm) ;  
 $R_C$  : Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons ( $\Omega$ ) ;  
 $B$  : Constante empirique qui dépende de type de pile et son fonctionnement (V) ;  
 $\xi_1$  : Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile ;  
 $\xi_2$  : Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile ;  
 $\xi_3$  : Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile ;  
 $\xi_4$  : Coefficients paramétrique pour chaque modèle de pile ;  
 $\lambda_{H_2O/SO_3^-}$  : Teneur de l'eau dans la membrane ;  
 $J_{max}$  : Densité de courant maximale ( $A/cm^2$ ) ;  
 $W_{éle}$  : Travail électrique de pile à combustible ;  
 $W_{max}$  : Travail maximale de pile à combustible ;  
 $\eta_{élec}$  : Rendement électrique de pile à combustible ;  
 $\eta_{rev}$  : Rendement énergétique de pile à combustible ;  
 $P_{PAC}$  : Puissance de pile à combustible ;  
 $U_{PAC}$  : Tension de pile à combustible (v) ;  
 $I_{PAC}$  : Courent de pile à combustible (A) ;  
 $CO_2$  : Représente les concentrations de l'oxygène ( $mol/cm^3$ ) ;  
 $P_{O_2}$  : Pression de l'oxygène à la cathode ;  
 $P_{H_2}$  : Pression de l'hydrogène à l'anode ;  
 $R_M$  : Résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons ( $\Omega$ ) ;  
 $r_M$  : Résistance spécifique de la membrane ( $\Omega$ ) ;  
 $P_{AC}$  : pile à combustible ;  
 $V_{act}$  : Pertes d'activation ;  
 $V_{ohm}$  : Pertes hormique ;  
**PEMFC** : Proton Echange Membrane Fuel Cella FC ;  
 $P_{pv}$  : Puissance photovoltaïque ;  
 $P_{ele}$  : Puissance d'électrolyseur ;  
 $P_{pile}$  : Puissance de la pile à combustible ;  
 $Soc$  : Etat de réservoir d'hydrogène ;

***Soc\_max*** : Etat de réservoir d'hydrogène maximale ;

***Soc\_min*** : Etat de réservoir d'hydrogène minimale;

***Vres*** : Etat de Réservoir d'eau ;

***Vres\_max*** : État de réservoir d'eau maximale ;

***Vres\_min*** : État de réservoir d'eau minimale ;

***R*** : la charge des besoins supplémentaires ;

***Q = 1*** : durant la période où la demande d'eau existe;

***Q = 0*** : durant la période où la demande d'eau nulle.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La production de l'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques ne cessent d'augmenter dans les pays industrialisés, d'une autre part les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener leur développement [19].

De nos jours, la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelable comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. La consommation de ces sources possède un mauvais effet sur l'environnement. Comme par exemple l'émission de gaz à effet de serre provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques [20].

Aujourd'hui, on fait revivre l'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout dans des régions ayant des conditions climatiques favorables ou encore pour les applications dans des sites isolés. Parmi ces applications considérables nous citons le pompage d'eau pour la consommation d'irrigation en agriculture dans les sites isolés où les conditions climatiques sont favorables surtout dans les pays en voie de développement. En effet, pour nombreux de ces pays, il est difficile de connecter ces sites au réseaux électriques national.

Les moteurs à courant continu ont été les premiers moteurs utilisés dans les systèmes de pompage car ils étaient faciles à contrôler, mais la présence d'un collecteur et de balais a toujours été un inconvénient [19].

L'utilisation d'électrolyse d'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut venir de différentes sources. Elle peut être prise de la mer dans le cas des sites côtier ou des nappes phréatiques particulièrement pour le grand sud. L'utilisation des eaux thermales peut s'avérer choix judicieux [22].

Il est très important de noter que la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité fournie par les énergies renouvelables (éoliennes, capteurs photovoltaïques) permettrait sans polluer, de stocker, de transporter et de réutiliser ces énergies [22].

Pour la production de l'énergie électrique propre à partir de l'énergie chimique dégagé par la combustion de l'hydrogène dans le cadre de nouvelles technologie, la pile à combustible est un élément clé de la filière hydrogène pour la production d'énergie électrique propre et à hauts rendement [22].

L'objectif de notre travail est l'élaboration des stratégies de commande et de gestion énergétique d'un système photovoltaïque alimentant un site isolé. Dans ce cadre notre mémoire sera organisé autour de quatre chapitre :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques en précisant leurs avantages et inconvénients, le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque et la description de module photovoltaïque et les différentes types installations photovoltaïques.

## Introduction générale

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du système de pompage photovoltaïque partant du modèle de la cellule solaire, l'étude d'un convertisseur DC/DC dans le système photovoltaïque puis on présentera l'algorithme de la méthode de poursuite de point de puissance maximale (Perturbation et Observation) et qui permettant d'extraire le maximum de la puissance des panneaux solaires, la modélisation de groupe motopompe, modélisation de système de stockage d'énergie comme l'électrolyse et la modélisation d'une pile à combustible comme une source secondaire.

Le troisième chapitre sera consacré au dimensionnement du système pompage photovoltaïque et on présentera l'algorithme de gestion d'énergie.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation du système global et la discussion des résultats obtenus.

# **Chapitre I :**

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

## I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque PV est l'une des sources d'énergie les plus importantes des énergies renouvelables qui attirent de plus en plus l'attention ces dernières années. Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont : très propre relativement aux autres énergies, capacité de puissance élevée par unité de poids, grande modularité et faible entretien.

Dans notre chapitre nous allons détailler quelques généralités sur les systèmes photovoltaïques, en commençons par les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV et d'un module photovoltaïque, ainsi que les différents types d'installations photovoltaïques.

## I.2 Généralités sur le système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure induisant un courant électrique : c'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. L'électricité produite est utilisée sous forme d'électricité directe ou stockée dans des batteries (énergie électrique décentralisée) ou injectée dans le réseau domestique. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux-mêmes composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils se trouvent, à travers l'irradiation auxquels ils sont soumis [01].

## I.3 Avantages et Inconvénients de l'Énergie solaire

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

### I.3.1 Avantages du système photovoltaïque

Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien ;

- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes ;
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable ;
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets ;
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.

## I.3.2 Inconvénients du système photovoltaïque

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles ;
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit ;
- Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

## I.4 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV

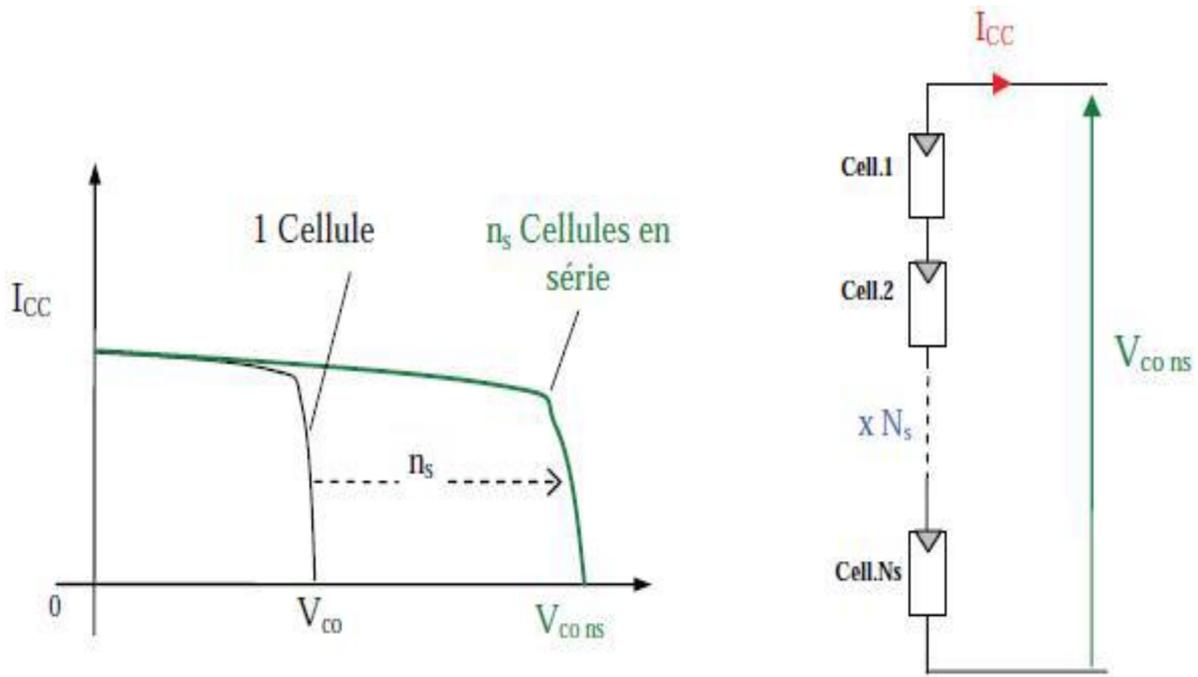
La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN [2].

## I.5 Module photovoltaïque

La cellule solaire, unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit typiquement au maximum une puissance de 1,3 W pour une surface de 100 cm<sup>2</sup>. Pour produire plus de puissance. Donc un générateur électrique de faible puissance est insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules ou des modules élémentaires. Une association de ( $Ns$  cellules) en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules ou modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure I.1). L'équation (I.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $Ns$  cellules [3].



**Figure 1.1** Association des cellules en série

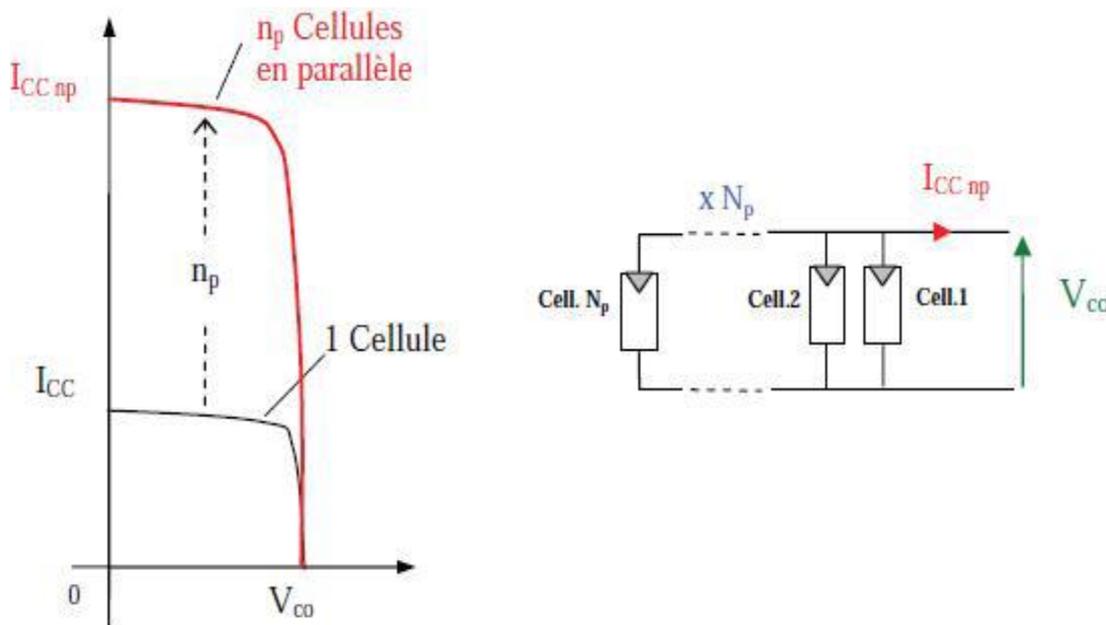
$$V_{co}(N_s) = N_s \times V_{co} \quad (I.1)$$

$V_{co}(N_s)$  : Somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série ;

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques commercialisés.

Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

D'autre part, une association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé (Figure I.2). L'équation (I.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules. Dans un groupement des cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [3].



**Figure I.2** Association des cellules en parallèle

$$I_{cc}(N_p) = N_p \times I_{cc} \quad (I.2)$$

$I_{cc}(N_p)$  : Somme des courants de court-circuit de  $N_p$  cellules en parallèle ;

L'association mixte (série et parallèle) des panneaux solaires permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque (GPV) [3].

## I.6 Différents types d'installations photovoltaïques

Il existe deux grandes familles d'installations photovoltaïques, les plus couramment rencontrés sont :

- Les installations photovoltaïques autonomes à alimenter sur place certaines applications, soit avec une source d'énergie photovoltaïque unique, ou avec une source d'énergie supplémentaire, on parle donc du système hybride ;
- Les installations photovoltaïques connectées au réseau dont l'électricité produite est injectée dans le réseau de distribution électrique.

### I.6.1 Systèmes photovoltaïques autonomes

Un système autonome photovoltaïque répond aux besoins en électricité de ceux qui sont isolés et ne sont pas connectés au réseau électrique de distribution. Ce type de système nécessite l'utilisation d'un système de stockage d'énergie pour assurer l'autonomie du système.

### I.6.2 Systèmes autonomes « au fil du soleil »

Ce sont les systèmes les moins compliqués, car l'énergie photovoltaïque est employée directement à partir des panneaux, sans stockage électrique.

Ils peuvent être trouvés en deux types.

### I.6.2.1 Alimentation directe sans transformation

Dans un système photovoltaïque autonome avec alimentation directe sans transformation, les panneaux photovoltaïques sont raccordés directement avec les charges. Les fonctions du système se réduisent à « Produire » et « Consommer ».

Le système présente l'avantage d'être simple et d'un coût assez bas et s'avère très intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de lumière. S'il y a de la lumière, ça fonctionne, sinon ça s'arrête [4].

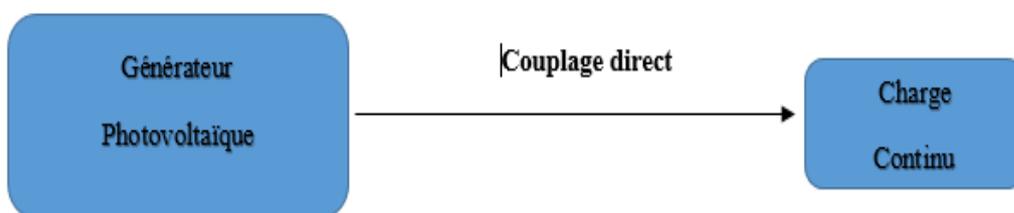


Figure I.3 Alimentation direct sans transformation

### I.6.2.2 Alimentation directe avec transformation

Le système photovoltaïque autonome avec alimentation directe est pareil au cas précédent sauf qu'il y a un étage d'adaptation de l'énergie entre la source (panneaux photovoltaïques) et la charge. Cet étage d'adaptation offre la possibilité de transformer l'énergie produite afin d'alimenter la charge. De ce fait, selon le type de charge, nous avons également un étage d'adaptation des convertisseurs DC/DC et/ou DC/AC [4].

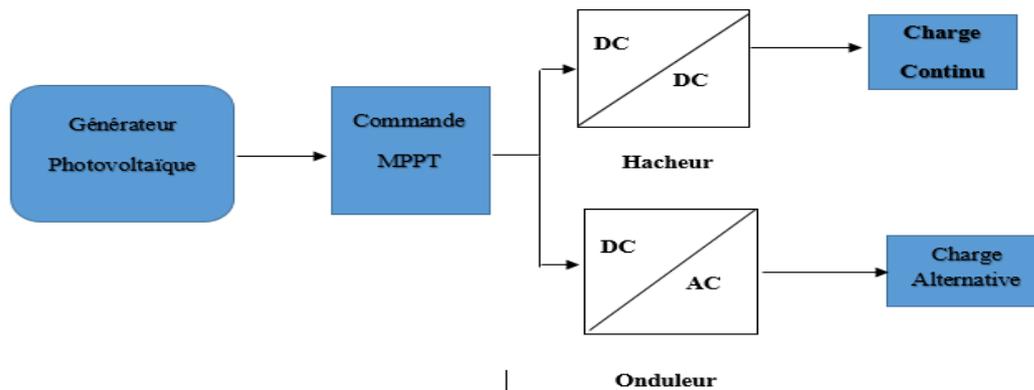


Figure I.4 Alimentation directe avec transformation

## I.6.3 Système autonome avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes qui est appelé en anglais « Stand-Alone Systems ». Le composant de stockage permet de donner une autonomie au système pour des applications nocturnes ou lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers éléments de stockage, dont les plus courants sont : les accumulateurs électrochimiques, le stockage d'hydrogène, les volants d'inertie et les super capacités [4], [5].

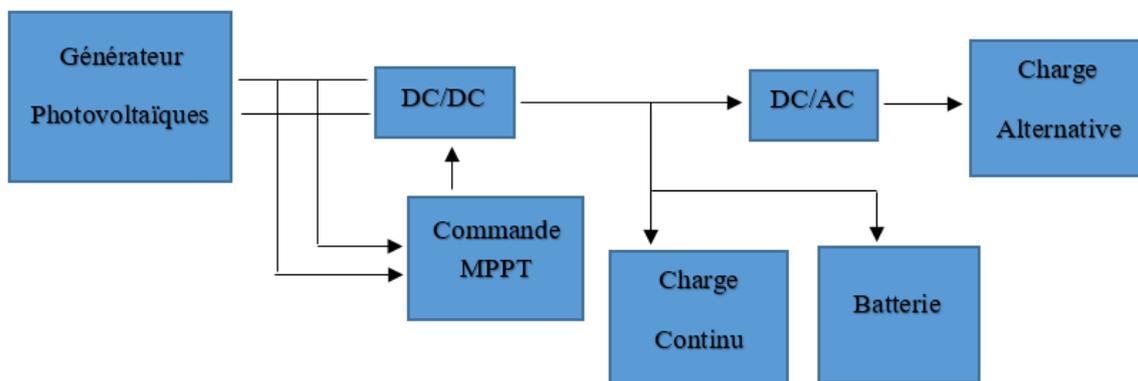


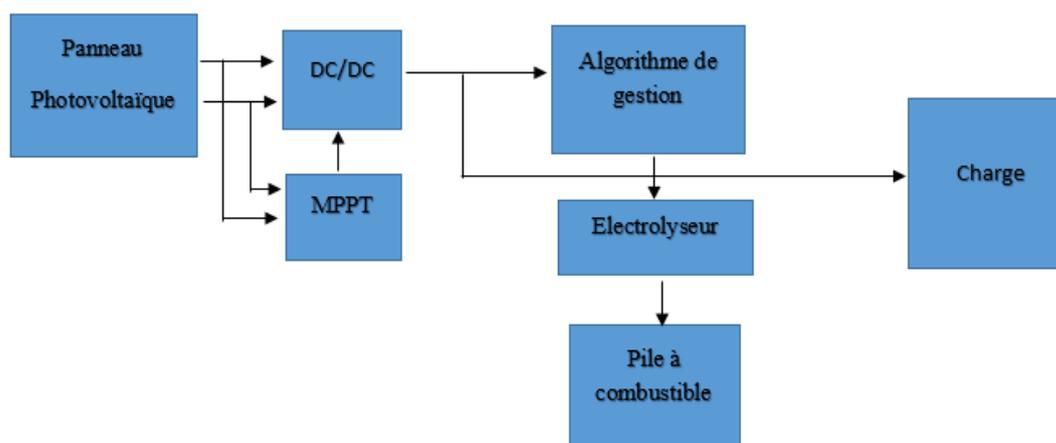
Figure I.5 Système photovoltaïque autonome avec stockage

## I.6.4 Systèmes photovoltaïque hybrides

Une des limites d'un système autonome uniquement photovoltaïque, comme on vient de le détailler, fournit une puissance donnée, variable selon la saison, ce qui fait qu'on est capable de consommer plus qu'on ne produit, ce qui peut provoquer la détérioration de la batterie par décharge profonde. Donc, les consommateurs ont de temps à autre des besoins qui évoluent, et pas obligatoirement en phase avec les saisons.

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

La nouvelle solution technologique apportée par le système hybride, c'est avoir une autre source d'électricité autonome qui vient accomplir l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène ou une éolienne particulièrement. On choisira l'éolienne si le site est parfaitement venté, plutôt au cours des saisons où l'ensoleillement est faible. Mais quand la réserve en diesel est possible, le groupe électrogène est plus confortable, car on y a recours à volonté. Et il permet de recharger la batterie lorsqu'elle est faible [1], [6].



**Figure I.6** Système autonome hybride photovoltaïque/groupe électrogène

Dans notre travail on se base sur le système photovoltaïque hybride avec stockage, on utilisera un électrolyseur pour produire l'hydrogène, une pile à combustible comme une source d'énergie secondaire et un algorithme de gestion pour gérer les puissances.

### I.6.5 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau permettent la décentralisation de la production sur le réseau électrique. Ces installations qui sont totalement couplées au réseau électrique dans lequel elles injectent l'électricité qu'elles produisent via un convertisseur de puissance DC-AC. L'énorme avantage de ces installations, c'est que le réseau joue le rôle de stockage illimité, et par conséquent la totalité de l'énergie est récupérée.

Il existe deux types d'installations pour l'injection de la production d'énergie solaire dans le réseau électrique :

#### I.6.5.1 Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau coïncident aux périodes de production photovoltaïque.

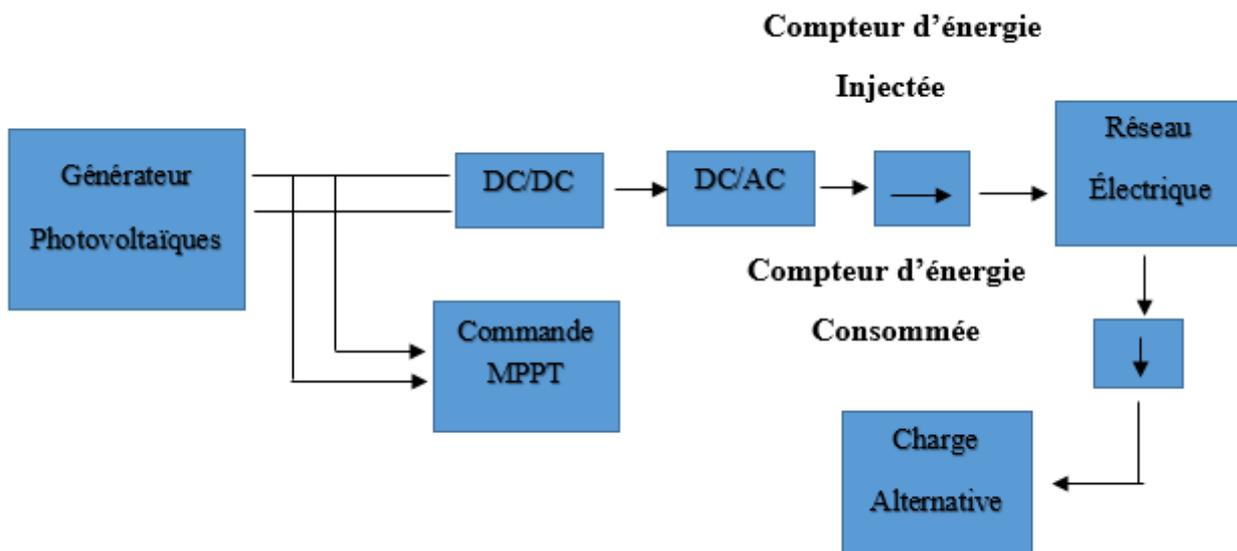


Figure I.7 Injection de la totalité de la production

## I.6.5.2 Injection du surplus de production

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est consommée directement par les charges, le surplus d'énergie de production par rapport à la consommation instantanée est injecté au réseau local de distribution.

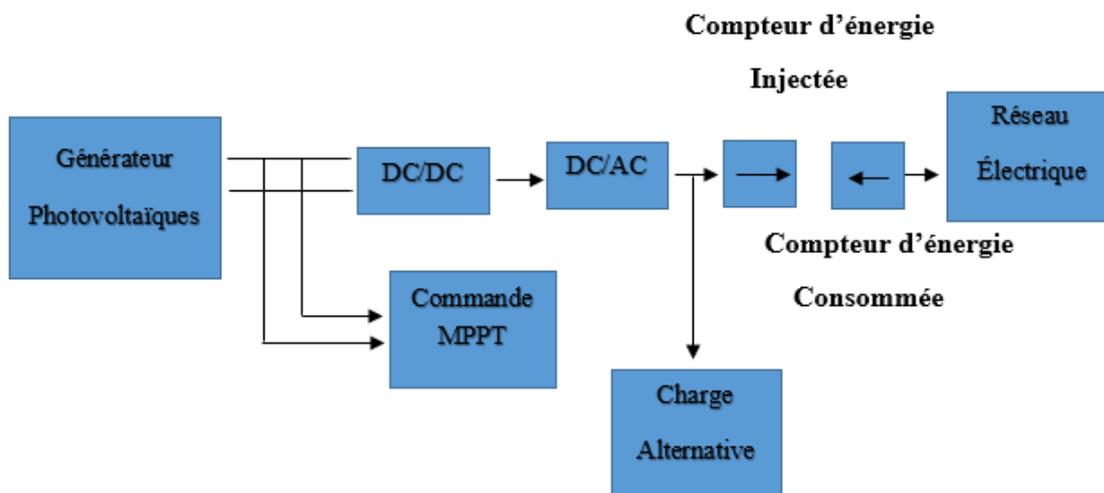


Figure I.8 Injection du surplus de production

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons on a défini les systèmes photovoltaïques et on a présenté les avantages et inconvénients de l'énergie solaire. On a aussi présenté le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différentes types d'installations.

# **Chapitre II :**

## **Modélisation de système pompage Photovoltaïque**

### II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, compris dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs (nommée cellule PV) fabriqués avec des matériaux sensibles. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté.

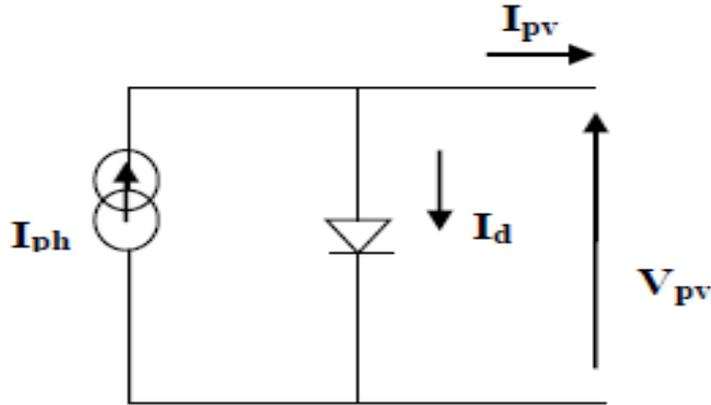
La puissance délivrée par le panneau photovoltaïque dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. Vu cette dépendance, la position du point de puissance maximale (MPP) n'est jamais constante dans le temps. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes de panneau solaire et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation entre le PV et la charge doit être utilisé.

Les systèmes de poursuite du point de puissance maximale MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques. C'est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

### II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

#### II.2.1 Cas d'une cellule idéale

La cellule photovoltaïque est équivalente à un générateur de courant  $I_{ph}$  induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction P-N du semi-conducteur, qui peut être représentée par le schéma électrique équivalent suivant :



**Figure II.1** Schéma électrique équivalent d'une cellule idéale

L'équation d'une cellule idéale est de la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{qv}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

$I_d$  : Le courant de diode est par :

$$I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{qv}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$I_{pv}$  : Courant généré par le panneau photovoltaïque;

$I_{ph}$  : Courant généré par les photons ou photo-généré ;

$I_{sat}$  : Courant inverse de saturation ou le courant de fuite de la diode (A) ;

$q$  : La charge de l'électron qui est égale à  $1,60217646 \cdot 10^{-19}$  C ;

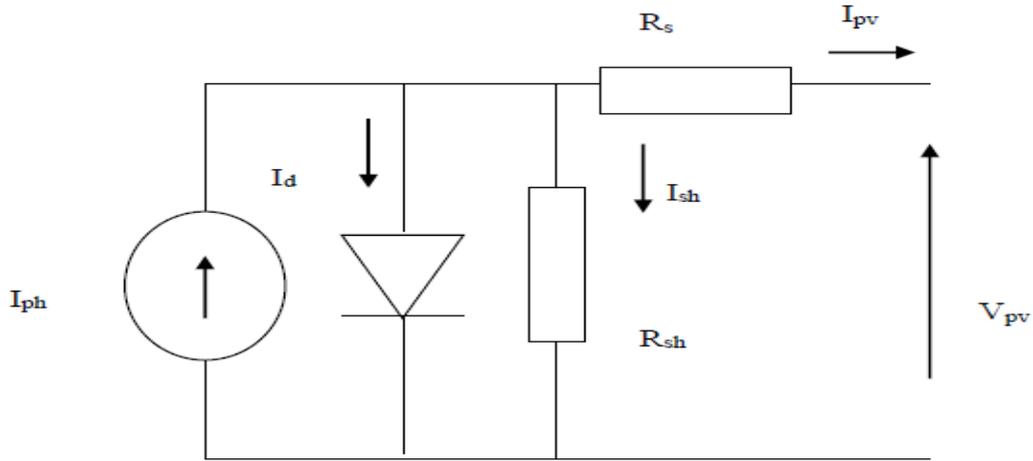
$K$  : La constante de Boltzmann qui est égale à  $1,3806503 \cdot 10^{-23}$  J. K<sup>-1</sup> ;

$T$  : La température de la jonction PN (K) ;

$n$  : La constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

### II.2.2 Cas d'une cellule réel :

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt).



**Figure II.2** Schéma électrique équivalent d'une cellule réelle

Le courant de la diode est donné par :

$$I = I_{sat} * \left[ e^{\frac{q*(V+R_s*I)}{nKT}} - 1 \right] \quad (II.3)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.4)$$

$I_{ph}$  : Courant généré par les photons ou photo-généré ;

$I_{Rsh}$  : Courant traversant la résistance shunt, si cette résistance est très grande, le courant devient très faible est indépendant de la tension.

$$I_{Rsh} = \frac{Vd}{Rsh} = \frac{(V+R_s \cdot I_{pv})}{Rsh} \quad (II.5)$$

$$I_{pv} = \left[ I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{q \cdot (V + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_s})}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + \frac{R_s \cdot I_{pv}}{N_s}}{Rsh} \right] N_p \quad (II.6)$$

### II.3 Constitution d'un panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est généralement constitué de plusieurs cellules connectées en série. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentes ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du

semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [7], [8].

### II.4 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque (GPV)

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants :

- La puissance de crête  $P_c$  : Puissance électrique que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>) ;
- La tension à vide  $V_{oc}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement donnée;
- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement donnée ;
- Le point de fonctionnement optimum ( $V_{pm}, I_{pm}$ ) : lorsque la puissance de crête est :

$$P_{max} = V_{pm} \cdot I_{pm} \quad (II.7)$$

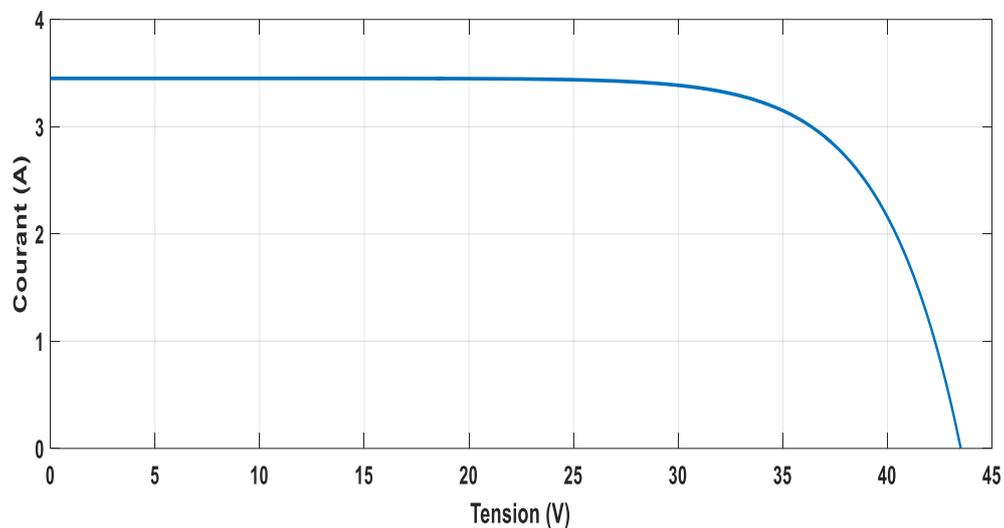
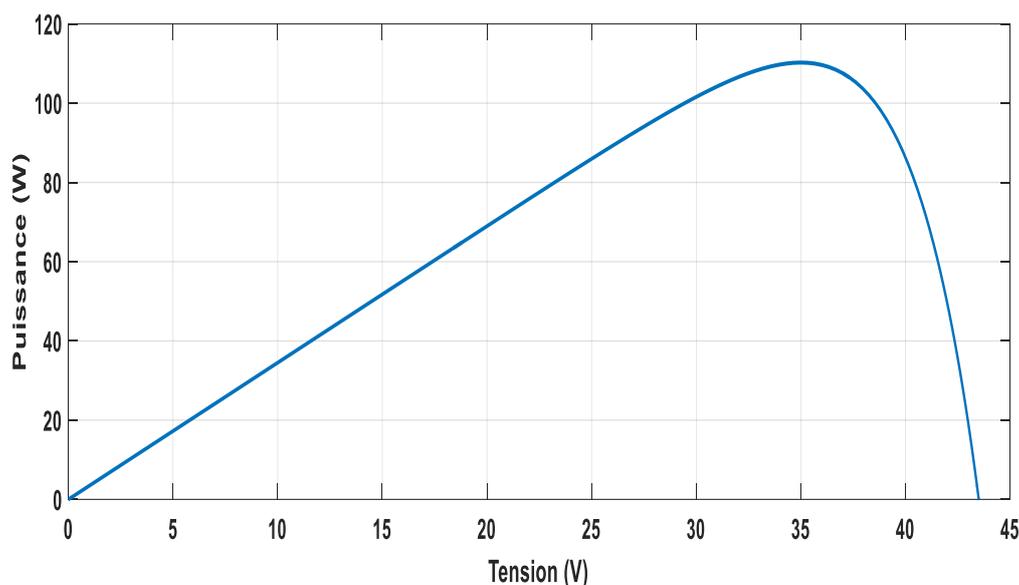


Figure II.3 Caractéristique « Tension-Courant » I(V) d'un panneau photovoltaïque



**Figure II.4** Caractéristique « Tension-Puissance » P(V) d'un panneau photovoltaïque

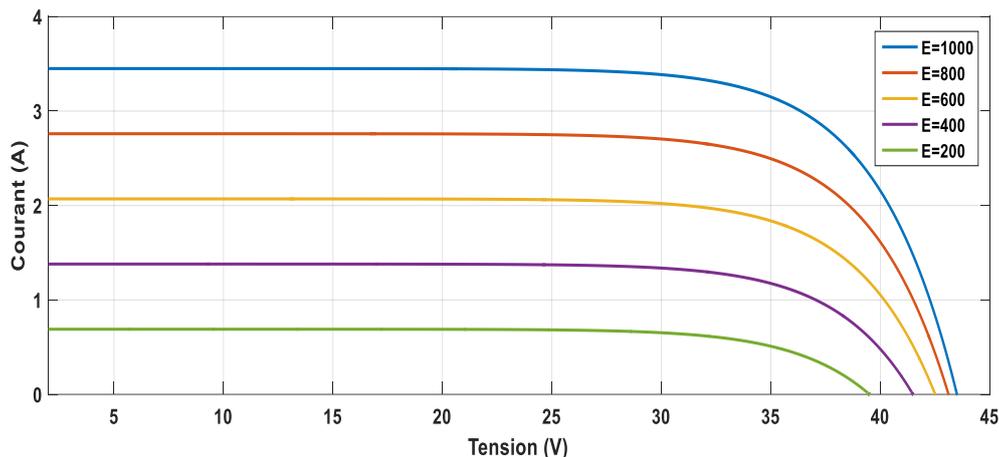
### II.5 Protection d'un GPV

Lorsque l'on conçoit une installation photovoltaïque, il faut assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

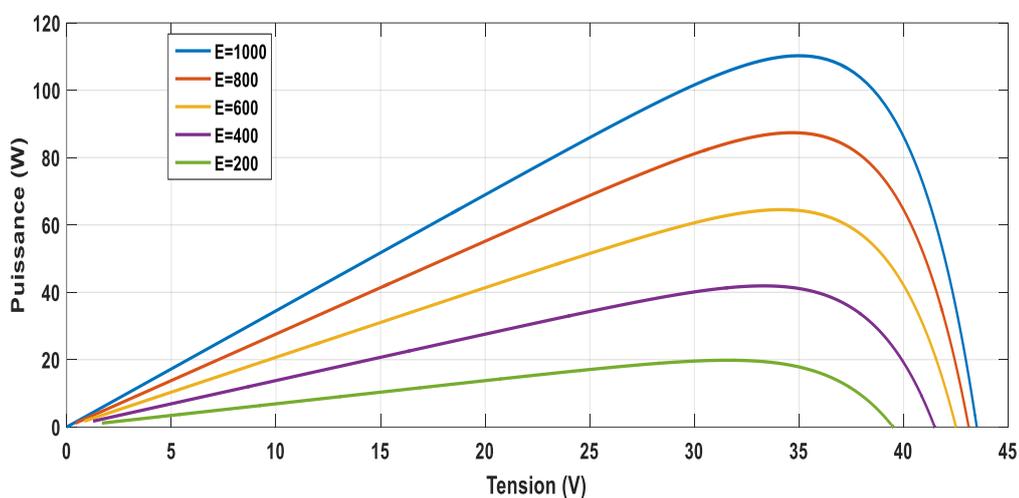
- La protection en cas de connexions en parallèle ou série de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour) ;
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).

### II.6 Influence de l'éclairement et de la température

- Premièrement, on va effectuer une simulation où nous avons maintenu la température constante à 25°C pour les différents éclairements, Les figures (II.05, II.06) présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différents niveaux de rayonnement à une température constante.



**Figure II.5** Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension-Courant »



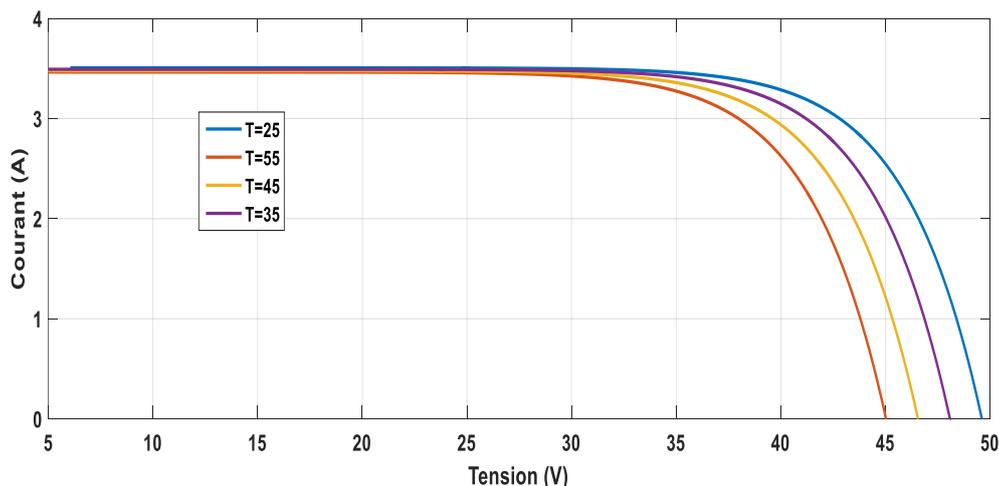
**Figure II.6** Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension - Puissance » d'un panneau photovoltaïque P(V)

On remarque l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique, et on voit aussi que la tension diminue légèrement avec la diminution de l'éclairement.

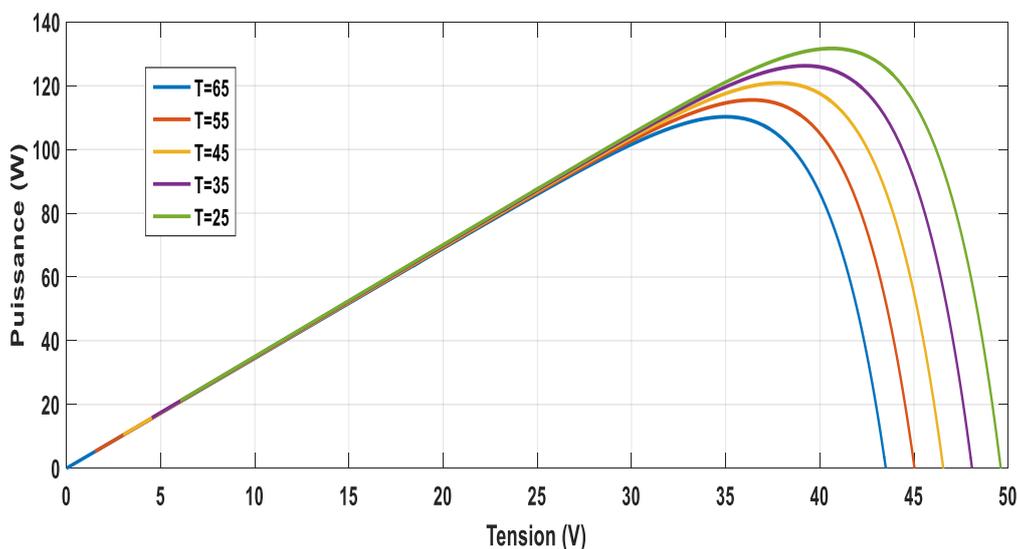
La variation de l'éclairement affectera la puissance du panneau, nous obtenons (115W à 1000W/m<sup>2</sup> et 3,5A) à 200W/m<sup>2</sup> qui descendent en dessous de 20W et 0,75A respectivement.

Donc, on conclure que l'éclairement influe directement sur la puissance de panneau photovoltaïque.

- Deuxièmement nous avons effectué une simulation où on a maintenu un rayonnement constant est de 1000W/m<sup>2</sup> pour différentes températures. Les figures (II.07, II.08) présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différents niveaux de température à une l'éclairement constante.



**Figure II.7** Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Courant » d'un panneau photovoltaïque I(V)



**Figure II.8** Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Puissance » d'un panneau photovoltaïque P(V)

On voit que la tension à vide baisse avec l'augmentation de la température tel qu'on obtient plus de 48V pour une température de 25°C et une tension de 45V pour une température de 55°C alors il y a une diminution de tension à l'intervalle de 25°C à 55°C, par contre le courant de court-circuit qui reste presque constant avec l'augmentation de la température tel qu'on obtient un courant de court-circuit du 3.5 A.

On conclure que la température influe directement sur la tension de panneau photovoltaïque.

### II.7 Etude et réalisation du convertisseur

#### II.7.1 Liaison à travers un convertisseur DC/DC contrôle par la commande MPPT

L'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation est d'assurer que la charge reçoit le maximum de puissance du PV à chaque moment. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale MPP, on incorpore un hacheur entre le générateur photovoltaïque et la charge. Des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés pour minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques [10].



Figure II.9 Liaison entre PV et la charge à travers DC/DC

#### II.7.2 Convertisseur statique DC/DC

Le rôle du convertisseur DC/DC dans le circuit est convertir une source de courant continu DC d'un niveau de tension spécifié à un autre différent [11]. Dans le contexte du PV est la procédure d'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximale. Ceci est assuré en maintenant le point de fonctionnement proche du MPP.

#### II.7.3 Hacheur abaisseur (Buck)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de faible valeur par rapport la tension d'entrée  $E_e$ . La tension moyenne de sortie  $E_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $E_e$  [12], pour un rapport cyclique  $D$  donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$E_s = D \cdot E_e \quad (\text{II.8})$$

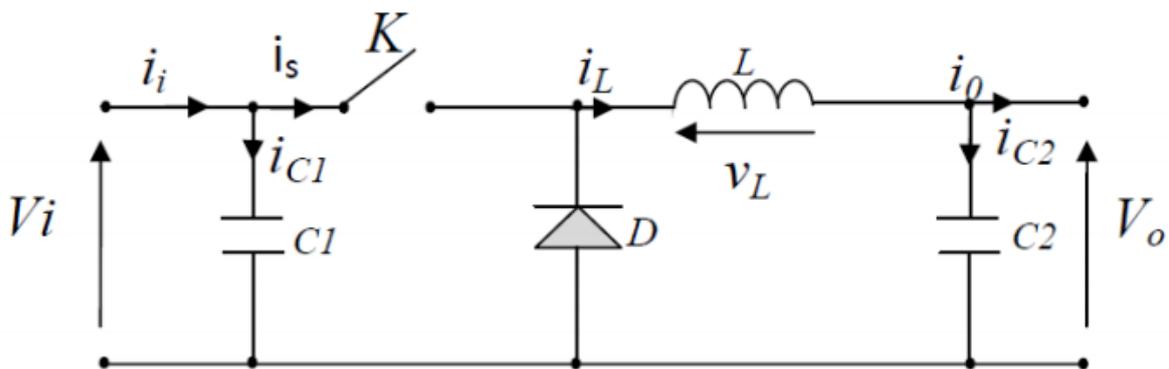


Figure II.10 Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur (Buck)

### II.7.4 Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de forte valeur par rapport la tension d'entrée. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé [13].

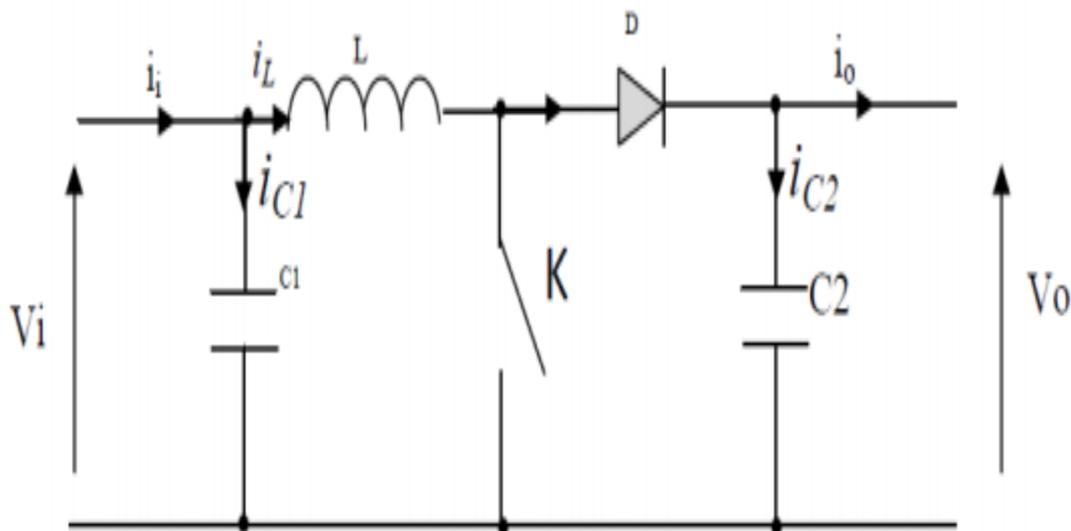


Figure II.11 Schéma du circuit électrique d'un hacheur élévateur (Boost)

### II.7.5 Hacheur abaisseur-élévateur(Buck-Boost)

Dans le cas d'un hacheur Boost ou Buck, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens de la source GPV vers la charge. Ainsi pour réaliser le transfert d'énergie pour élever et abaisser la tension, un hacheur Boost et un hacheur Buck ont été associés [14].

Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) combine les propriétés dans deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour avoir n'importe quelle tension à la sortie désirée, soit supérieure ou inférieure de celle de l'entrée selon le mode de commutation topologie de base de ce convertisseur [15], [16].

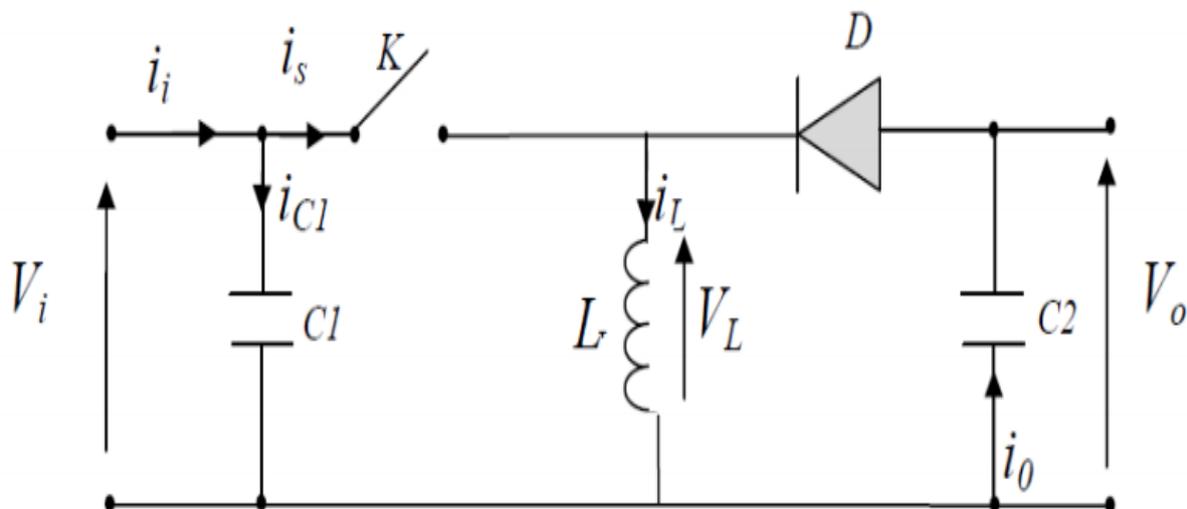


Figure II.12 Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)

$$V_s = \frac{a}{1-a} \cdot V_e \quad (\text{II.9})$$

## II.8 Optimisation de point de puissance maximale

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Dans la référence [17], l'auteurs passent en revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

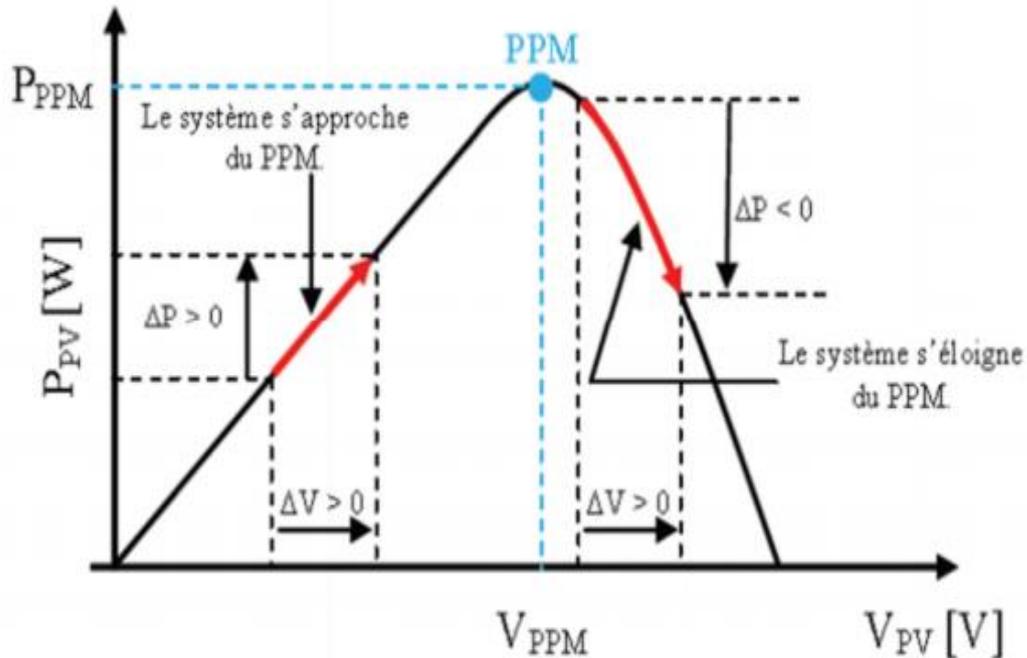
Parmi les méthodes directes on trouve : la méthode P&O (perturbation et observation), qui nous avons choisi.

### II.8.1 Description de la méthode

La méthode Perturbation & Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension \$V\_{pv}\$ d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance \$P\_{pv}\$ qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la (figure II.13), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension \$V\_{pv}\$ engendre un accroissement de la puissance \$P\_{pv}\$ cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique \$P\_{pv} (V\_{pv})\$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

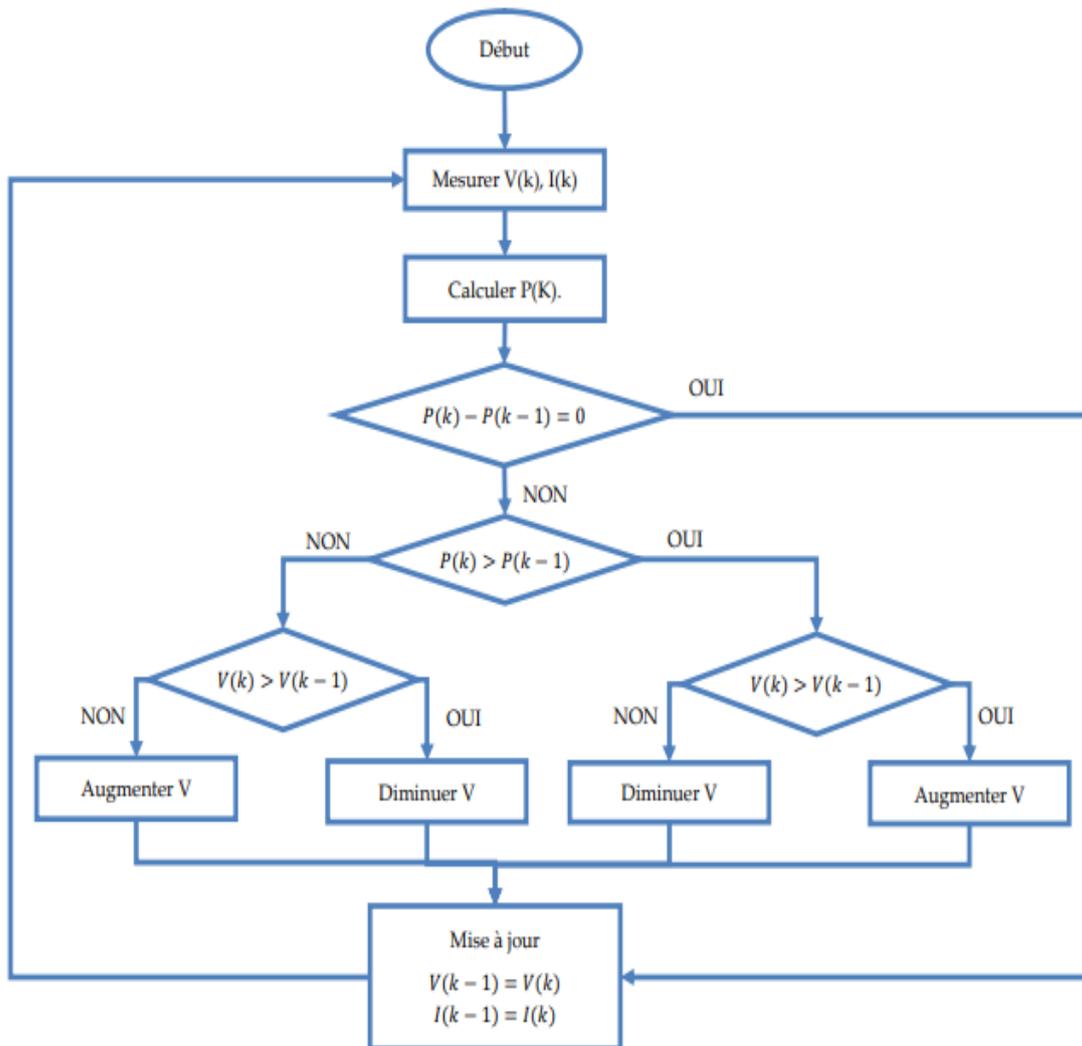
## Chapitre II : Modélisation de système de pompage photovoltaïque

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.



**Figure II.13** Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque [3]

La figure II.14 représente organigramme de l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.



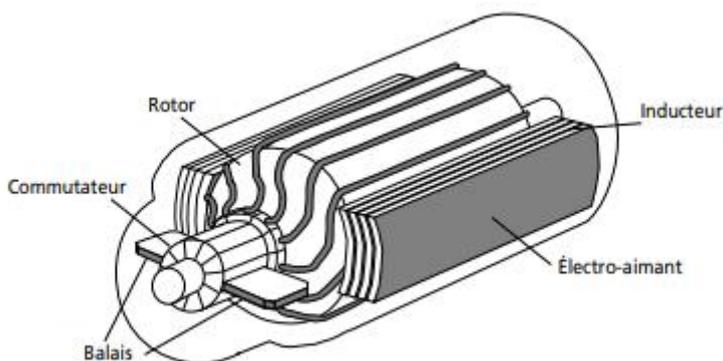
**Figure II.14** Organigramme de la méthode perturbation et observation

### II.9 Modélisation de groupe motopompe

#### II.9.1 Moteur à courant continu(MCC)

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique.

Les moteurs à balais sont les plus communs, mais leurs balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. De plus, l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains fabricants offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant cet entretien à toutes les 5 000 heures de fonctionnement [18].



**Figure II.15** Moteur à courant continu avec balais

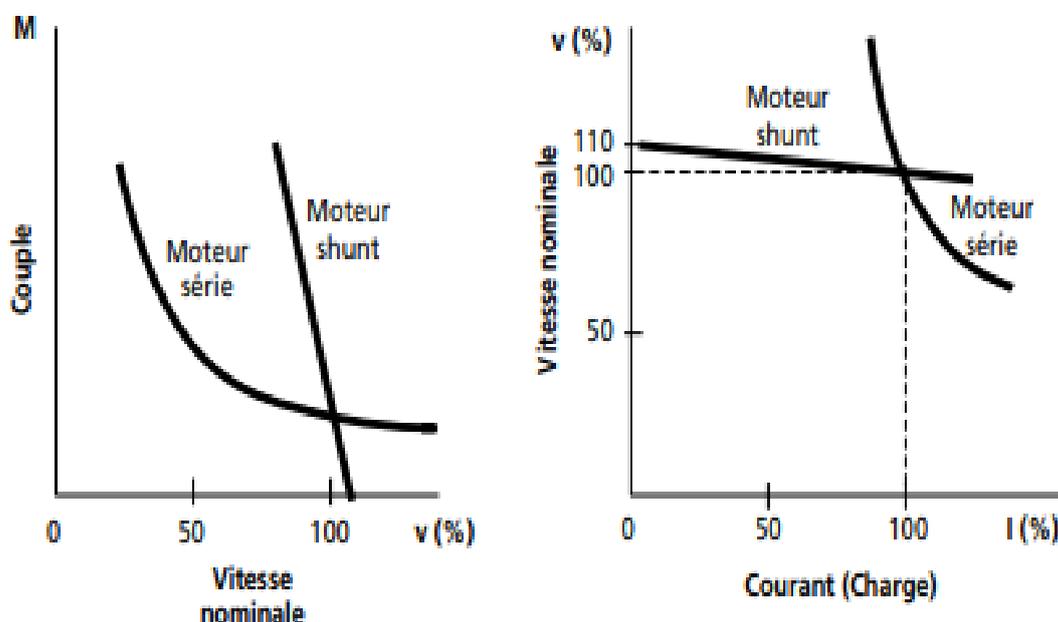
Les moteurs à commutation électronique (sans balais) utilisent un circuit électronique pour inverser le courant circulant dans le rotor. Ces moteurs ne requièrent pas autant de maintenance, mais le circuit électronique peut être une cause de problèmes et doit être conçu pour un environnement difficile.

Le champ magnétique de l'inducteur dans un moteur à courant continu est produit soit par un bobinage électromagnétique, soit par des aimants permanents. Dans le cas d'inducteur à bobinage, les moteurs peuvent être de type série, de type parallèle (moteur shunt) ou de type à excitation composée (moteur compound) selon la manière dont l'induit et l'inducteur sont alimentés.

Dans un moteur série à bobinage électromagnétique, l'enroulement inducteur est en série avec l'induit. Le couple moteur est relativement grand à faible vitesse et décroît à mesure que la vitesse augmente. Réciproquement, le moteur ralentit lorsque le couple résistant augmente. Ainsi, un moteur série ne peut fonctionner à vide car il peut s'emballer. Lorsque le courant décroît rapidement, la vitesse augmente et peut prendre des valeurs dangereuses. D'autre part, la puissance demandée croît moins vite que le couple résistant, ce qui limite l'importance des variations du courant lorsque le couple résistant varie.

Le moteur série s'adapte particulièrement à la traction électrique parce que sa vitesse varie en fonction de la tension et son couple moteur est bien adapté au service demandé. Ainsi, en régime de démarrage, à faible vitesse, le couple moteur est important et permet de fournir l'énergie cinétique suffisante pour la mise en route d'un équipement présentant une grande inertie. À vitesse normale, le couple décroît, mais le moteur n'a plus qu'à vaincre les divers frottements. Ce type de moteur est donc bien adapté à un pompage variable au fil du soleil.

Dans un moteur shunt, les enroulements induits et les inducteurs sont alimentés, en dérivation, par la même source, sous tension constante. La vitesse d'un moteur shunt sera sensiblement constante, peu importe le couple résistant. Par ailleurs, à excitation constante, le couple moteur est proportionnel au courant absorbé ( $I$ ); la puissance demandée sera donc proportionnelle au couple résistant. Le moteur shunt est utilisé surtout dans les machines-outils pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge. Ce type de moteur est peu adapté au pompage où le couple de démarrage est important [18].



**Figure II.16** Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série

### II.9.1.1 Modélisation d'une machine à courant continu (MCC)

La modélisation de la machine à courant continu se réalise en régime transitoire car il permet de mettre en évidence certains phénomènes lors de fonctionnement de la machine : démarrage, freinage, variation de la vitesse...etc.

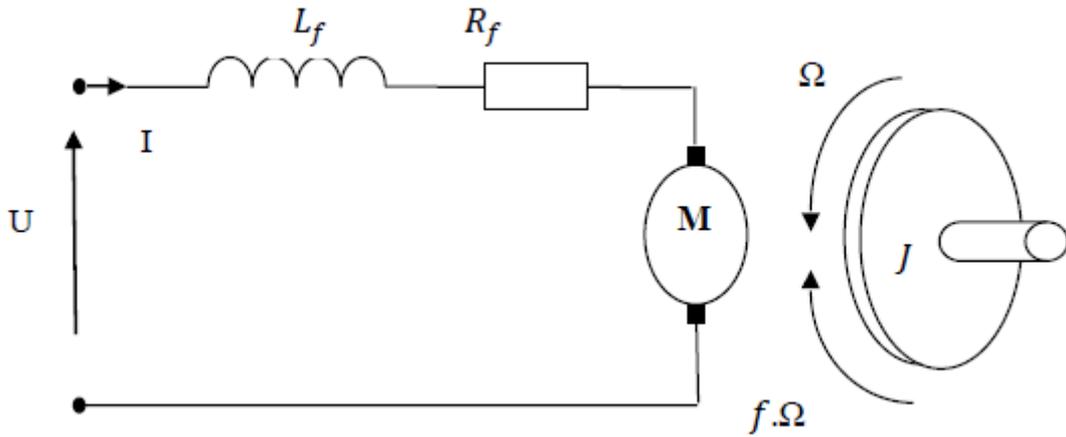
Pour avoir une commande en vitesse relativement simple, considérons un moteur à courant continu à flux constant obtenu par l'excitation séparé qui est opérée par une action sur la tension de l'induit.

### II.9.1.2 Mise en équation de la machine à courant continu à excitation séparé

La modélisation de moteur est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique [19].

## Chapitre II :Modélisation de système de pompage photovoltaïque

La figure ci-dessus représente le schéma électrique de la machine à courant continu :



**Figure II.17** Schéma électrique de la machine à courant continu à excitation séparée [19]

- 'e' et 'a' sont des indices : 'excitation' et 'alimentation'
- Equation d'inducteur :

$$U_e = R_e \cdot I_e \cdot \frac{dI_e}{dt} \quad (\text{II. 10})$$

- Equation d'induit :

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + K \Omega \Phi_e \quad (\text{II. 11})$$

Avec  $\Omega$  la vitesse de rotation en rad/s.

- Equation de flux :

On réalise une simulation simple où le flux est toujours une fonction linéaire de courant d'excitation et donc on néglige les effets de la saturation [2] :

- Equation de couple :

A partir de la puissance électromagnétique on obtient le couple

$$P_e = I_a \cdot E = I_a \cdot K \Omega \cdot \Phi = C_e \cdot \Omega \quad (\text{II. 12})$$

Cela nous donne :

$$C_e = K \cdot I_a \cdot \Phi \quad (\text{II. 13})$$

- Equation mécanique :

$$\sum j \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_e - C_r \quad (\text{II. 14})$$

$\sum j$  : Moment d'inertie totale (machine et charge) ;

$f$  : Frottement proportionnelle à la vitesse de rotation ;

$C_e$  : Couple électromagnétique ;

$C_r$  : Couple de charge.

### II.9.1.3 Validation du modèle de moteur

L'ensemble moteur est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et du principe fondamental de la dynamique. Les équations des tensions de l'induit et celle du couple moteur sont représentées par la fonction de transfert de la partie électrique [19]:

La tension d'induit du moteur est écrite sous la forme :

$$V(t) = E(t) + Ri(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II. 15})$$

Puis le couple est écrit sous la forme :

$$C_e(t) = C_r(t) + f \cdot \Omega(t) + J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

$$E(t) = K\Phi\Omega(t) \quad (\text{II. 17})$$

$$C_e(t) = K\Phi i(t) \quad (\text{II. 18})$$

En appliquant la transformation de Laplace :

$$V(p) = E(p) + RI(p) + L \cdot P \cdot I(p) \quad (\text{II. 19})$$

$$C_e(p) = C_r(p) + f \cdot \Omega(p) + J \cdot P \cdot \Omega(p) \quad (\text{II. 20})$$

Et d'autre part :

$$E(p) = K\Phi\Omega(p) \quad (\text{II. 21})$$

A partir de l'équation de tension d'induit, nous obtenons :

$$I(p) = \frac{V(p) - E(p)}{R + L \cdot P} = \frac{V(p) - E(p)}{R \left(1 + \frac{L}{R} \cdot P\right)} \quad (\text{II. 22})$$

La fonction de transfert de la partie électrique est écrite comme suit :

$$G(p) = \frac{I_d(p)}{U_a(p) - E(p)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{L_a}{R_a} \cdot P} \quad (\text{II. 23})$$

$$I(p) = \frac{\frac{V(p) - E(p)}{R}}{1 + \tau_e \cdot P} \quad (\text{II. 24})$$

Avec :  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$  constante de temps électrique de l'induit.

### II.9.1.4 Partie mécanique :

La fonction de transfert de la partie mécanique se réalise en appliquant le principe fondamental de la dynamique en rotation.

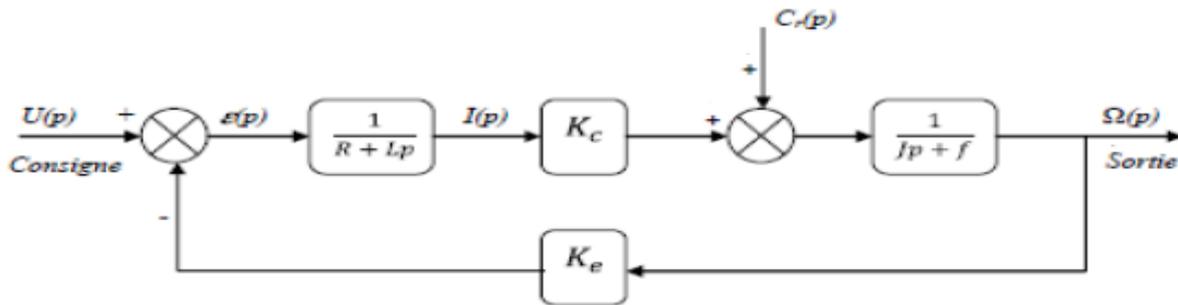
On obtient par l'équation mécanique :

$$\Omega(p) = \frac{C_e(p) - C_r(p)}{f + J \cdot P} = \frac{C_e(p) - C_r(p)}{f \left(1 + \frac{J}{f} \cdot P\right)} \quad (\text{II. 25})$$

$$\Omega(p) = \frac{\frac{(C_e(p) - C_r(p))}{f}}{1 + \tau_m \cdot P} \quad (\text{II. 26})$$

### II.9.1.5 Equation de deuxième ordre

Le schéma bloc de modèle moteur à courant continu en vitesse est représenté dans la figure (II.23) :



**Figure II.18** Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse [19]

En appliquant le théorème de fonctionnement et de superposition, on aura :

$$\Omega(p) = \frac{G1(p)}{1 + G1(p)H1(p)} U(p) - \frac{G2(p)}{1 + G2(p)H2(p)} C_r(p) \quad (\text{II. 27})$$

Avec :

$$G1(p) = \frac{\frac{K}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)} \quad (\text{II. 28})$$

$$H1(p) = K \quad (\text{II. 29})$$

$$G2(p) = \frac{\frac{1}{f}}{\tau_m \cdot p + 1} \quad (\text{II. 30})$$

$$H2(p) = \frac{\frac{K^2}{R}}{\tau_e \cdot p + 1} \quad (\text{II. 31})$$

Par application :

## Chapitre II : Modélisation de système de pompage photovoltaïque

$$\Omega(p) = \frac{\frac{\frac{K^2}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\frac{K^2}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)}} U(p) - \frac{\frac{\frac{1}{f}}{\tau_m \cdot p + 1}}{1 + \frac{\frac{1}{f} \frac{K^2}{R}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)}} C_r(p) \quad (\text{II. 32})$$

La fonction de transfert associée à U possède les caractéristiques suivantes :

- Si on néglige le couple résistant, on obtient :

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{\frac{\frac{K^2}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\frac{K^2}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1)}} \quad (\text{II. 33})$$

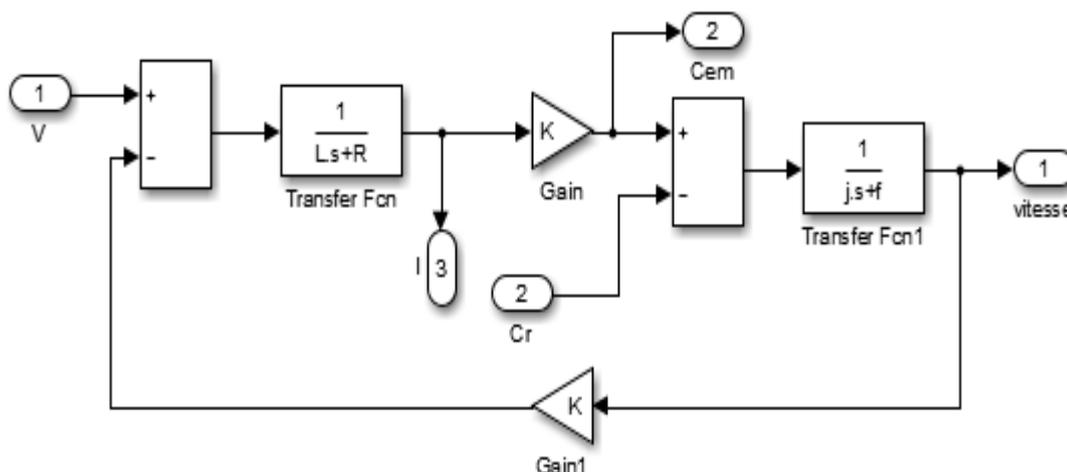
- Par simplification :

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{\frac{K}{R_f}}{(\tau_e \cdot p + 1)(\tau_m \cdot p + 1) + \frac{K^2}{R}} \quad (\text{II. 34})$$

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K}{(R \cdot f \cdot \tau_e \cdot \tau_m)P^2 + (R \cdot f)(\tau_e + \tau_m)P + (R \cdot f + K^2)} \quad (\text{II. 35})$$

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{\frac{K}{R \cdot f + K^2}}{\left(\frac{R \cdot f \cdot \tau_e \cdot \tau_m}{R \cdot f + K}\right)P^2} + \frac{R \cdot f(\tau_e + \tau_m)}{(R \cdot f + K^2)P + 1} \quad (\text{II. 36})$$

En introduisant les différentes fonctions de transfert des parties nous pouvons réaliser le schéma fonctionnel ci-dessous :



**Figure II.19** Schéma-bloc de moteur à courant continu

### II.9.2 Modélisation de la pompe centrifuge

Les pompes sont des machines permettant d'aspirer et de refouler un fluide pour produire une différence de pression au moyen de l'organe actif (piston, roue, etc.). Elle est soumise à une force mécanique qui sort du moteur qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette énergie est retransmise au fluide sous forme d'énergie cinétique qui est le débit et énergie potentielle qui est une pression [20].

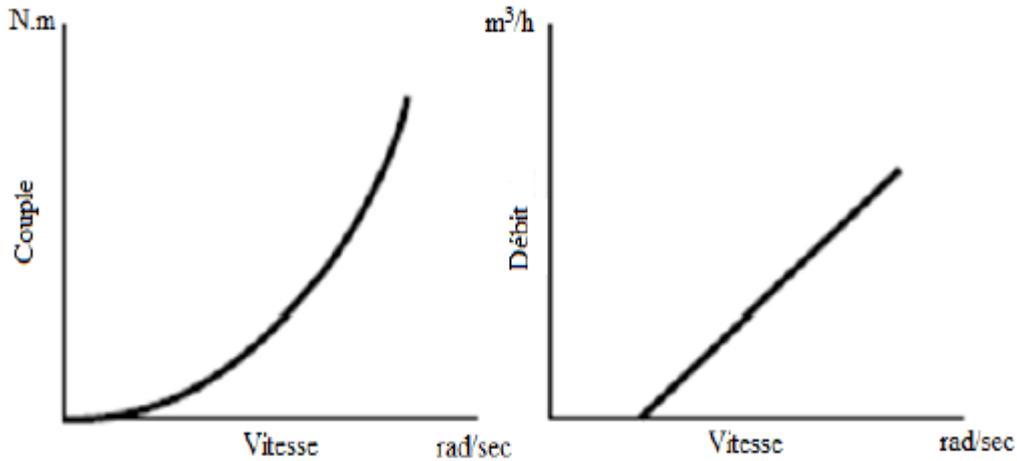
#### II.9.2.1 Principe de fonctionnement :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entrant se dirige vers la roue en rotation qui est sous l'effet de la force centrifuge lui déclare de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans l'enroulement [20].

La pompe centrifuge génère une hauteur HMT (Hauteur manométrique) relativement fixe. La variation de débit de cette pompe est proportionnelle à la vitesse de rotation de moteur. L'augmentation très rapide de son couple est en fonction de cette vitesse et de la hauteur de refoulement et aussi en fonction du carré de la vitesse de rotation de moteur. Pour garantir un bon débit il faut que la vitesse de rotation de moteur soit très importante. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les débits important et les profondeurs moyens ou faibles (10 à 100 mètres) [21].

Parce que on a une limitation de couple de démarrage au couple de frottement de la pompe pour une vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), pour avoir un débit de départ non nul la pompe reçoit une vitesse minimale à une HMT donnée.

Il est important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon les conditions de terrain, parce que la pompe fonctionne de façon efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée et que aussi son rendement et en fonction de débit [21].



**Figure II.20** Caractéristiques de la pompe centrifuge

On remarque que le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse de rotation et que le débit est proportionnel à la vitesse de rotation, donc à une vitesse minimale pour une HMT donnée on obtient un débit.

### II.9.2.2 Mise en équation

La hauteur manométrique HMT est définie par le modèle de PLEIDER-PETERMAN.

$$HMT = a_0 \cdot \omega_r^2 - a_1 \cdot \omega_r Q - a_2 \cdot Q^2 \quad (\text{II. 37})$$

Avec :  $a_0, a_1$  et  $a_2$  paramètre donné par le constructeur.

$$HMT = Hg + P_c \quad (\text{II. 38})$$

$$P_c = \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \xi \right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g} \quad (\text{II. 39})$$

D'où

$H_g$  : Est la hauteur géométrique entre la nappe de l'eau pompé et le plan d'utilisation ;

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites ;

$\lambda$  : Coefficient de régulation de pression de la canalisation ;

$L, d$  : longueur et diamètre respectives de la canalisation ;

$\xi$  : Est le coefficient des pertes de pression locales ou singulières dans les coudes, les valves et les différentes connections de la canalisation.

$Q$  : Le débit de l'eau ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Le couple résistant de la pompe s'écrit :

$$C_r = k \cdot \Omega^2 \quad (\text{II. 40})$$

Avec : 
$$k = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II. 41})$$

D'où :

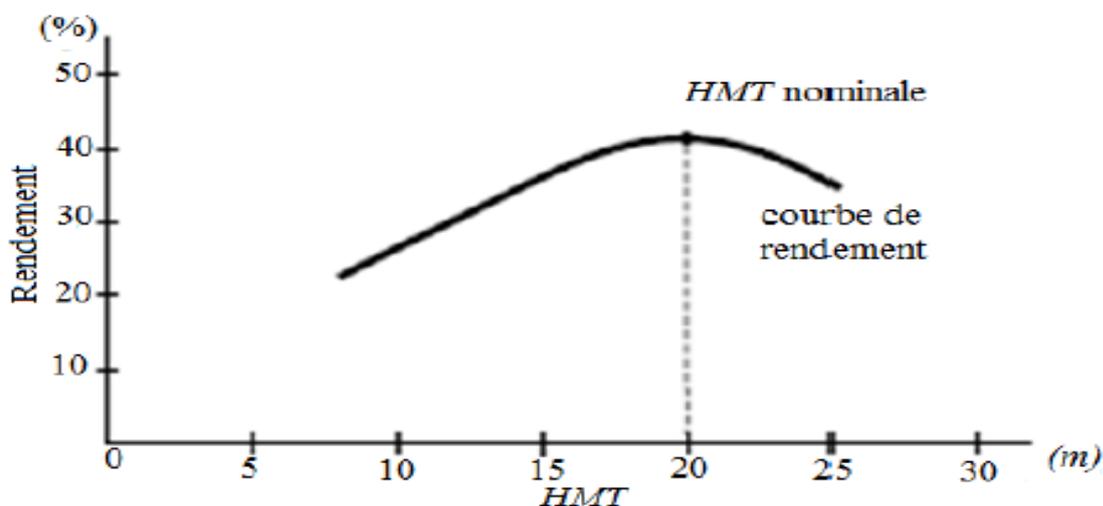
$P_n$  : Puissance nominale du moteur à courant continu (W) ;

$\Omega_n$  : Vitesse nominale du moteur à courant continu (rad/s);

$\Omega$  : Vitesse du moteur à courant continu (rad/s).

### II.9.2.3 Rendement du groupe motopompe

Le rendement d'un moteur à courant continu est de 80% à 85% sur une plage de fonctionnement important. Le rendement hydraulique des pompes solaire est de l'ordre de 45% à 60% mais ce rendement décroît beaucoup hors du point de fonctionnement nominal et est particulièrement évident pour une pompe centrifuge. Il est nécessaire de tenir compte de la variation de la HMT, donc de la désadaptation possible de la pompe, lors de la conception d'une installation. Notamment, une mauvaise évaluation du calcul de la HMT lors de la conception pourrait entraîner le choix d'une pompe mal adaptée, celle-ci ne pouvant fonctionner au point de fonctionnement maximal [18].



**Figure II.21** Rendement d'une pompe immergée en fonction de la HMT

Le choix d'un adaptateur de puissance adéquat permettra d'améliorer le rendement pour une certaine variation de la HMT mais ne constitue pas un palliatif à une pompe mal conçue. Les caractéristiques du site et de l'utilisation de l'eau devront donc être établies avec attention afin de bien choisir les composants de la pompe. Dans de bonnes conditions d'utilisation, et pour un système bien conçu, on peut s'attendre à un rendement du groupe motopompe oscillant entre 35% et 45% [21].

## II.10 Modélisation de l'électrolyseur

L'électrolyseur que nous utilisons est de types PEM (Proton Exchange de Membrane) d'une manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en hydrogène et oxygène gazeux. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible.

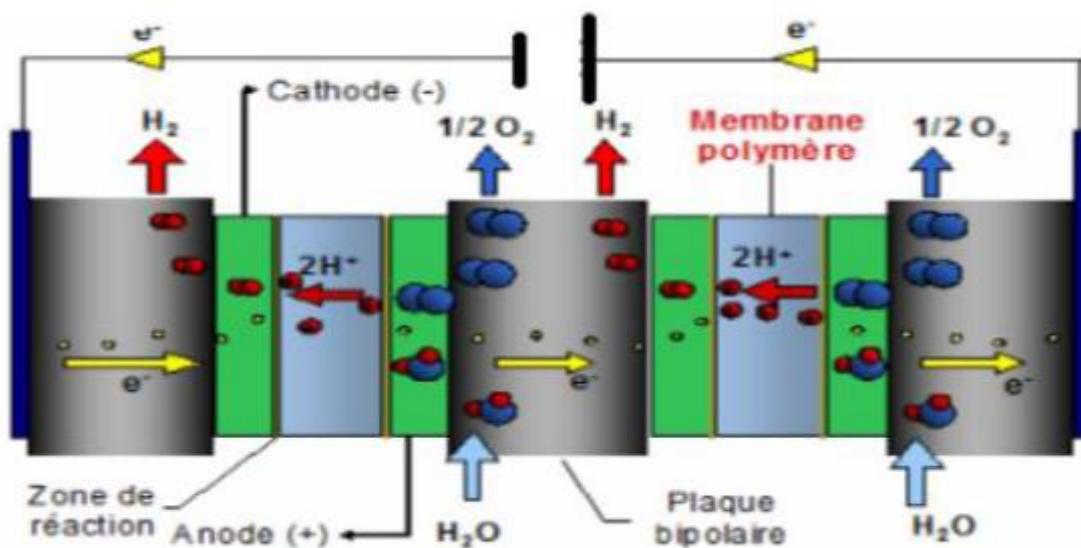


Figure II.22 L'électrolyse PEM [22]

### II.10.1 Modèle de l'électrolyseur

Un circuit électrique d'électrolyseur peut être représenté comme une charge CC non linéaire sensible à la tension, de sorte que la tension la plus élevée appliquée est la charge la plus élevée courant qui circule et plus  $H_2$  peut être généré [23].

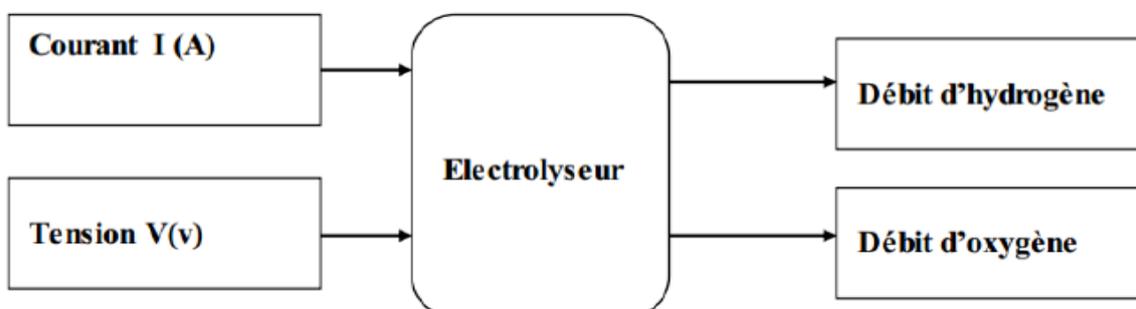


Figure II.23 Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur [22]

### II.10.1.1 Model électrique d'électrolyseur

Modélisation de l'électrolyse s'écrit comme suit :

$$V = \left( \frac{1}{3.064} \right) \cdot I + 1.476 = 0.326 \cdot I + 1.476 \cong I \cdot R_i + e_{rev} \quad (\text{II.42})$$

eq. (II.42) indique un modèle de circuit équivalent simple pour le PEM, qui a une résistance initiale de  $R_i$ , et potentiel inverse  $e_{rev}$ . Le potentiel idéal  $V_i$  (électrochimique) est calculé par eq (II.43) [23] :

$$V_i = \frac{\Delta G}{2 \cdot F} \quad (\text{II.43})$$

Où  $\Delta G$  est le changement d'énergie libre de Gibbs (J / mol) de l'hydrogène gazeux et  $F$  est la constante de Faraday (96 487 C / mol).

Si l'eau est en phase liquide, alors  $\Delta G$  pour en fonction de température  $T$  (° C) peut être calculée par eq (II.44) :

$$\Delta G = 28540 - 163 \cdot (273 + T) \quad (\text{II.44})$$

La valeur de  $V_i$  est calculée dans des conditions de fonctionnement nominales à une température ambiante de 20 ° C et 1 atm de pression. Cela équivaut à 1,223 V, ce qui est utile pour l'électrolyse et la production d'hydrogène. C'est aussi associé à l'électrochimie, de sorte que celui le volume molaire  $V_m$  est connu à partir du gaz parfait expression dans l'eq (II.45) [23] :

$$V_m = \frac{R \cdot (273 + T)}{P} \quad (\text{II.45})$$

Où,  $R$  et  $P$  sont la constante de gaz idéale (0,082 l atm k-1 mol-1) et la pression, respectivement. Le taux de production d'hydrogène qui est  $V_h$  (ml / min) par rapport au courant d'entrée  $I$  (A) est déterminé par eq (II.46) [23] :

$$V_h = V_m(I) \left( \frac{10^3 \text{ ml}}{1} \right) \left( \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} \right) \left( \frac{I \left( \frac{\text{C}}{\text{S}} \right)}{2F(\text{C})} \right) = \frac{V_m(10^3)(60)I}{2F} \quad (\text{II.46})$$

### II.11 Modélisation de la pile à combustible

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est basé sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau, connu depuis 1802 après une découverte concrétisée par Sir Henry DAVID. Une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [26].

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> à 25 °C et à 1 atm, est de l'ordre de 1.23 V, mais le potentiel réel ( $E_{PAC}$ ) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations  $\eta$  (surtension) qui sont: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration.

Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit:

$$U_{PAC} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{omh} - V_{conc} \quad (II. 47)$$

Pour calculer la tension ( $E_S$ ) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage

$$E_S = n \times E_{PAC} \quad (II. 48)$$

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst (II.49) arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nerst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.13 \times 10^{-5} \times \left[ \ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \quad (II. 49)$$

Où T est la température opératoire absolue de la pile en Kelvin (K),  $P_{H_2}^*$  et  $P_{O_2}^*$  sont les pressions partielles à l'interface respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène (atm).

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> à 25 °C et à 1 atm, est de l'ordre de 1.23 V, mais le potentiel réel ( $E_{PAC}$ ) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations  $E_{PAC}$  (surtension) qui sont: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration [26].

Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit:

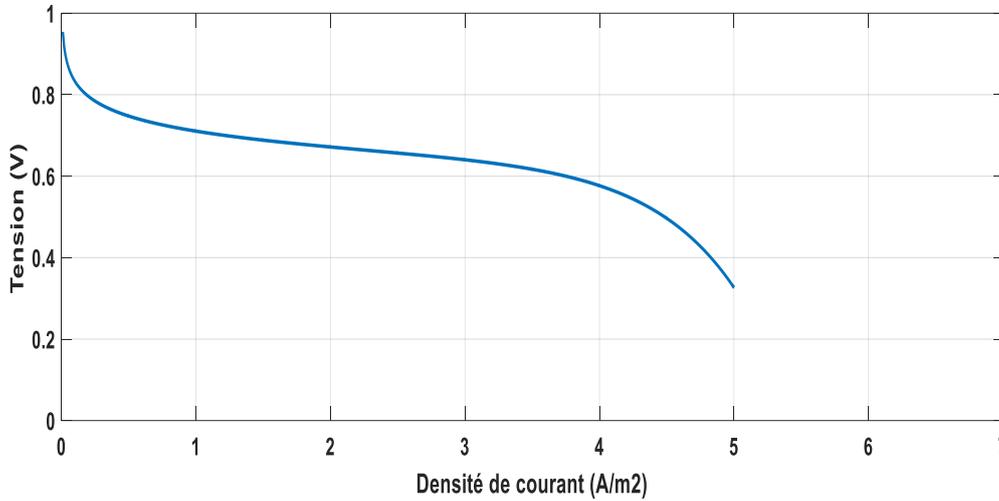
$$U_{PAC} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{omh} - V_{conc} \quad (II. 50)$$

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activations sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante:

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(CO_2) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{PAC}) \quad (II. 51)$$

## Chapitre II :Modélisation de système de pompage photovoltaïque

Où  $I_{PAC}$  est le courant de fonctionnement de la pile et  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  et  $\xi_4$  sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC, dont leurs valeurs dans les équations empiriques sont données dans le (Tableau II.2).



**Figure II.24** Courbe tension-courant typique d'une pile à combustible

Le  $C_{O_2}^*$  Représente les concentrations de l'oxygène ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [26].

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (\text{II. 52})$$

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur, donc :

$$P_{O_2}^* = P_{cathode} \times (1 - x_H^{sat}) \quad (\text{II. 53})$$

$P_{cathode}$  Est la pression de l'oxygène à la cathode,  $x_{H_2O}^{sat}$  la fonction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée  $\approx$  à 50%, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} \times P_{cathode} \quad (\text{II. 54})$$

A l'anode, on utilise l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone :

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \times x_H^{sat}\right) \quad (\text{II. 55})$$

$P_{anode}$  la pression de l'hydrogène à l'anode, et a  $x^{sat} = 0.5$ .

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons.

La chute de tension correspondante s'écrit:

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (\text{II. 56})$$

## Chapitre II :Modélisation de système de pompage photovoltaïque

$R_C$  : Est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons ;

$R_M$  : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivant :

$$R_M = \frac{l \cdot r_M}{A} \quad (\text{II. 57})$$

Où  $l$  est l'épaisseur de la membrane ( $\mu\text{m}$ ),  $r_M$  est la résistance spécifique de la membrane. Obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{\left[ 1 + 0.03 \times \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left( \frac{T}{303} \right)^2 \times \left( \frac{I_{PAC}}{T} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \times \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II. 58})$$

Le terme  $\frac{181.6}{[\lambda_{H_2O/SO_3^-}] - 0.634}$  représente la résistance spécifique de la membrane ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) à  $I_{PAC}=0$  et à une température de  $30^\circ\text{C}$  ( $T = 303 \text{ K}$ ). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à  $30^\circ\text{C}$ .

- $[\lambda_{H_2O/SO_3^-}] - 0.634$  : Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 ;
- $A$  : Est la surface active de la pile ( $\text{cm}^2$ ).

En remplaçant les relations (II.57) et (II.58) dans l'équation (III.56), l'expression de la polarisation ohmique devient :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[ \frac{\left[ 1 + 0.03 \times \frac{I_{PAC}}{A} + 0.062 \times \left( \frac{T}{303} \right)^2 \times \left( \frac{I_{PAC}}{T} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \times \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \times 1. A. R_C \right] \quad (\text{II. 59})$$

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{conc} = -B \cdot \left( 1 - \frac{j}{J_{max}} \right) \quad (\text{II. 60})$$

**Tableau II. 1** Valeurs des paramètres du modèle électrochimique [24]

Paramètre physique	Description	Valeurs
A	Surface active de la pile	16 cm <sup>2</sup>
l	Épaisseur de la membrane	280 μm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15 K
$P_{anode}$	Pression partielle de l'hydrogène	0.01 atm
$P_{cathode}$	Pression partielle de l'hydrogène	0.02 atm
$R_C$	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003 Ω
B	Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement	0.016 V
$\xi_1$	Coefficient paramétrique pour chaque modèle de pile	0.9514
$\xi_2$	Coefficient paramétrique pour chaque modèle de pile	3.12 10 <sup>-3</sup>
$\xi_3$	Coefficient paramétrique pour chaque modèle de pile	1.96 10 <sup>-4</sup>
$\xi_4$	Coefficient paramétrique pour chaque modèle de pile	1.87 10 <sup>-4</sup>
$\lambda_{H_2O/SO_3^-}$	Teneur de l'eau dans la membrane	14molH <sub>2</sub> O/molSO <sub>3</sub>
$J_{max}$	Densité de courant	0.04934375 A/cm <sup>2</sup>

### II.12 Conclusion

Dans cette partie nous avons modélisé le système de pompage photovoltaïque avec MATLAB Simulink. On a utilisé le modèle à une seule diode pour simuler le fonctionnement du module PV pour différents ensoleillements et température. Par la suite, nous avons présenté le convertisseur statique utilisé qui est un hacheur abaisseur-élevateur(Buck-Boost), et on a présenté l'organigramme d'algorithme de la commande MPPT (P&O) pour maximisé la puissance du panneau et aussi on a présenté les caractéristiques de la pile à combustible et de l'électrolyseur d'eau.



# **Chapitre III :**

**Dimensionnement de système pompage  
Photovoltaïque**

### III.1 Introduction

Nous avons décrit dans le chapitre précédent la modélisation de chaque élément du système complet qui est constitué un panneau photovoltaïque, commande MPPT, un convertisseur statique (Buck-Boost), électrolyseur, pile à combustible, moteur à courant continu et une pompe. Nous souhaitons satisfaire la demande de la charge, pour cela le dimensionnement des éléments du système est indispensable.

Dans ce chapitre nous allons aussi proposer un organigramme de la stratégie de gestion d'énergie du système étudié.

L'organigramme sera modélisé sur MATLAB function et il sera introduit dans le système global de simulation, les résultats de simulation seront aussi présentés et discutés dans le chapitre suivant.

### III.2 Démarche globale de dimensionnement

Le dimensionnement consiste à déterminer la taille et les caractéristiques des sous-ensembles suivants: le panneau photovoltaïque, commande MPPT, un convertisseur statique (Buck-Boost), électrolyseur, pile à combustible, moteur à courant continu et une pompe et un algorithme de gestion d'énergie permet de gérer le système.

### III.3 Description de l'installation de pompage photovoltaïque

Nous avons un système de pompage photovoltaïque située dans un site isolé (autonome), destinée pour le pompage de l'eau.

Il est constitué d'un :

- Panneau photovoltaïque ;
- Commande MPPT ;
- Un convertisseur statique (Buck-Boost) ;
- Un électrolyseur ;
- Une pile à combustible ;
- Un moteur à courant continu ;
- Une pompe centrifuge.

On considère la source d'énergie photovoltaïque comme une source principale pour satisfaire au maximum la puissance demandée par la charge, et la pile à combustible comme une source d'énergie secondaire.

### III.4 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau ;
- Calcule de l'énergie hydraulique nécessaire ;
- Inclinaison du générateur photovoltaïque ;
- Mois de dimensionnement ;
- Choix et dimensionnement des composants.

### III.4.1 Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau d'une population particulière dépend largement de son mode de vie.

Pour notre application en essaye d'estimer les besoins pendant une journée en eau dans le sud du pays. Là où en les estimant à environ 50 litres par personne et 5 litres par tête de bétail (mouton).

Les besoins en eau d'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques (tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évaporation du sol), de la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de s'appuyer sur la pratique et l'expérience locales. La capacité du réservoir sera déterminée en fonction de la demande en eau quotidienne et de l'autonomie requise par le système [21].

Tout d'abord, en vas essayer de faire une estimation globale des besoins en eau d'une écurie de 300 mouton avec 5 travailleurs et un terrain pour l'irrigation.

Voici un tableau qui résume les besoins en eau pour notre application

**Tableau III.1** Totalité des besoins d'eau

	Besoins en eau
Travailleurs	0.25 m <sup>3</sup> /j
Mouton	1.5 m <sup>3</sup> /j
L'irrigations	45 m <sup>3</sup> /j

Les besoins totaux sont 46.75 m<sup>3</sup>/J

### III.4.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

L'énergie hydraulique est en fonction de deux facteurs :

- Débit d'eau ;
- La hauteur manométrique totale (HMT) à la quelle cette eau doit être élevée pour pouvoir être utilisée.

La puissance hydraulique est défini par la relation suivante :

$$P_h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot HMT \quad (\text{III.1})$$

$Q$  : Est le débit horaire moyenne de la pompe centrifuge ;

$\rho$ : Densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$g$ : Constante de la gravité.

### III.4.3 Inclinaison du générateur photovoltaïque

Le rayonnement solaire qui atteint les plaques perpendiculairement à leur surface sera toujours plus important que si le module est placé dans une direction autre que perpendiculaire. Cependant, l'azimut et la hauteur solaire sont variables tout au long de la journée et de l'année, donc, si nous utilisons des systèmes fixes, cette inclinaison optimale ne peut être atteinte qu'à un moment de la journée.

### III.4.4 Mois de dimensionnement

Le mois de conception sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire le mois avec le plus petit rapport entre le rayonnement solaire et l'énergie hydraulique requise. En principe, chaque inclinaison  $\beta$  correspond à un mois le plus défavorable. Le mois de taille pour l'inclinaison optimale sera le mois avec le plus petit rapport entre le rayonnement solaire et l'énergie de l'eau. L'éclairement solaire  $E_s(\beta)$  et l'énergie hydraulique nécessaire correspondant à ce mois seront utilisés pour la sélection des composants. En conclusion, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire varie fortement selon :

- La localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude) ;
- La saison ;
- L'heure ;
- Les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...) ;
- L'altitude du lieu.

### III.5 Choix des composantes

#### III.5.1 Dimensionnement du réservoir d'eau

Le dimensionnement du réservoir dépend également de la disponibilité de l'eau au cours des jours ou des saisons. Ainsi, en certaines régions, un ensoleillement très constant permet d'estimer un volume d'eau suffisant pour répondre à la demande journalière pour tous les jours et de dimensionner le réservoir pour un maximum d'une journée d'autonomie. Par contre, en d'autres régions, la variation d'ensoleillement journalier oblige à choisir un réservoir suffisamment volumineux permettant de stocker l'eau pendant quelques jours afin de répondre à la demande en tout temps.

Le réservoir d'eau le plus simple et le plus économique en énergie consiste en un réservoir très bas au sol, près de la pompe à eau, l'utilisateur doit alors être autonome au robinet placé près du réservoir.

Dans notre cas, on a pris un exemple d'un réservoir d'eau d'une capacité de stockage de 50 m<sup>3</sup> et qui satisfait les besoins en eau pendant un jour dans le cas défavorable ou moyen terme.

#### III.5.2 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Comme on l'a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette puissance nous ramène à dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus.

Pour notre système, le débit nominal ( $Q$ ) de la pompe est égal à 21 m<sup>3</sup> /h.

## Chapitre III : Dimensionnement de système pompage Photovoltaïque

La hauteur manométrique totale ( $HMT$ ) correspondant au débit nominal est de 26.6m, on aura alors une puissance hydraulique :

$$P_h = (21 \times 1000 \times 9.81 \times 26.6)/3600$$

$$P_h = 1.522 \text{ kW}$$

Or que, la puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) que recevoir la pompe pour assurer la puissance hydraulique et qui dépend du rendement ( $\eta_p$ ) de la pompe est :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_p} \quad (\text{III.2})$$

Si le rendement de la pompe centrifuge est de 60%, la puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{mec} = 2.536 \text{ kW}$$

### III.5.3 Dimensionnement de moteur à courant continu

Le dimensionnement du moteur se situe dans le calcul de la puissance électrique qu'il lui faut pour entrainer la pompe, cette puissance est exprimée en (W) et se calcule par la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur, par la suite nous aurons :

$$P_{éle} = \frac{P_{mec}}{\eta_{mot}} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$P_{éle}$  : Puissance électrique nécessaire pour le fonctionnement du moteur ;

$\eta_{mot}$  : Rendement du moteur.

Pour notre cas :

$$P_{éle} = 2.536/0.85 = 2.983 \text{ kW}$$

Or que la puissance électrique demandée ( $P_d$ ) qui devra être réellement fournie transite par les convertisseurs statiques, ce qui occasionne une perte de puissance, ce qui nous permet donc de tenir compte du rendement ( $\eta_{bst}$ ) de la conversion DC-DC de Buck-Boost comme suit :

$$P_d = \frac{P_{éle}}{\eta_{bst}} \quad (\text{III.4})$$

Le rendement de Buck-Boost est de 90% ce qui nous donne :

$$P_d = 2.983/0.90 = 3.314 \text{ kW}$$

D'où les besoins journalier énergétique en électricité peuvent être estimés comme suite :

$$E_c = P_d \times t_p \quad (\text{III.5})$$

Tel que :

$E_c$  : est l'énergie journalière demander par la charge (le groupe motopompe) ;

$t_p$  : est le temps de pompage nécessaire pour satisfaire les besoins en eau et se calcule comme suite :

$$t_p = \frac{V}{Q_n} = \frac{50}{21} = 2.38 \frac{\text{heurs}}{\text{jour}} \quad (\text{III.6})$$

D'où l'énergie journalière  $E_c$  demandée par la charge sera égale :

$$E_c = 3.314 \times 2.38 = 7.88 \text{ kWhours/jours}$$

### III.3 Dimensionnement de moteur à courant continu

La puissance du générateur photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge ( $E_c$ ), de la durée moyenne journalière de l'ensoleillement (égale à  $t_p$  et des pertes qu'on suppose égale à environ 20% de la puissance attribuables à la température et la poussière. Donc la puissance théorique du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = \frac{E_c}{t_d \cdot (1 - \text{perte})} \quad (\text{III.7})$$

D'où :

$$P_{pv} = \frac{7.88}{2.38 \times (1 - 0.2)} = 4.142 \text{ kw}$$

Donc, le nombre de panneaux nécessaire est de :

$$N \geq \frac{4142}{165} = 25.1$$

Nous souhaitons avoir une tension de 200 V à la sortie de générateur photovoltaïque, et la tension au point de puissance maximale égale à 34.8 V.

Le nombre des panneaux en série et en parallèle, est calculés par les relations (III.8), (III.9) suivantes :

$$N_s = \frac{V}{V_c} \quad (\text{III.8})$$

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{III.9})$$

Donc on doit maitre,  $N_s = 6$  panneaux et  $N_p = 5$  panneaux

On prend  $N = 30$  panneaux

$N_s$  : Nombre des panneaux en série ;

$V$  : Tension de système photovoltaïque ;

$V_c$  : Tension au point de puissance maximale ;

$N_p$  : Nombre des panneaux en parallèle.

### III.5.4 Dimensionnement de la pile à combustible

Pour une  $P_{PAC}$ , la tension est dépendante des cellules qui doivent être assemblées en série, tout en sachant que chaque cellule fournit entre 0 et 1.1Volts. Par contre le courant est dépendant de la surface totale d'une cellule [25].

Pour un rendement de 60 %, la tension de travail est de 0.66V par cellule et la densité de courant est de 1300 mA/cm<sup>2</sup> [25].

Dans notre cas :

## Chapitre III : Dimensionnement de système pompage Photovoltaïque

Le nombre de cellules associés en série :

$$N_{cel_{série}} = \frac{V_{dc}}{0.66} = \frac{200}{0.66} = 303.03 \quad (\text{III. 10})$$

D'où :  $N_{cel_{série}} = 304 \text{ cellules}$

On a :

$$P_{éle} = V_{dc} \cdot I \quad (\text{III. 11})$$

Donc on aura :

$$I = \frac{P_{éle}}{V_{dc}} = \frac{2983}{200} = 14.915 \text{ A} \quad (\text{III. 12})$$

Et pour la surface des cellules le calcul se fait comme suite :

$$S_{cel} = \frac{I}{I_{PAC}} = \frac{14.915}{1.3} = 11.4 \text{ cm}^2 \quad (\text{III. 13})$$

Donc on a besoin de 304 cellules pour avoir une tension de 200V, et une surface de 11.4 cm<sup>2</sup>/par cellules, pour avoir la puissance espérée 2983 W.

Enfin la puissance délivrée par la pile est suivante :

$$P_{PAC} = \frac{2983}{0.6} = 4.971 \text{ kW} \quad (\text{III.14})$$

### III.5.5 Dimensionnement d'électrolyseur

Le choix de temps d'autonomie (en eau) assurer par le réservoir de l'électrolyseur par 24h sachant que le temps nécessaire pour pomper l'eau au réservoir est de 2.38 h/jour.

Besoin en hydrogène :

$$\begin{aligned} 1 \text{ litre d'hydrogène} &\longrightarrow 2.4 \text{ kWh} \\ X \text{ litres} &\longrightarrow 9.85 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Sachant que :

$$E_e = \frac{E_c}{n_e} = \frac{7.88}{0.8} = 9.85 \text{ kWh} \quad (\text{III. 13})$$

$E_e$ : l'énergie journalière consommé par l'électrolyseur ;

$n_e$  : Rendement d'électrolyseur.

D'après la règle on a trouvé 4.10 litres d'hydrogène.

### III.6 Stratégie de fonctionnement de système de gestion d'énergie

La gestion de système d'énergie est basée sur un algorithme qui permet au système de décider combien et quel générateur faut-il mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, la stratégie de fonctionnement choisie dans notre travail est la

gestion d'énergie disponible, selon la puissance demandée par la charge. Donc c'est une méthode déterministe.

Le stockage est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps. Cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique.

On propose dans notre travail 17 modes de fonctionnement selon la demande d'eau et la puissance produite par le générateur photovoltaïque pour stocke le maximum d'énergie.

- Pour faciliter la présentation des différents modes en a opté pour les abréviations suivantes :

$P_{pv}$  : Puissance photovoltaïque ;

$P_{ele}$  : Puissance d'électrolyseur ;

$P_{pile}$  : Puissance de la pile à combustible ;

$Soc$  : Etat de réservoir d'hydrogène ;

$Soc_{max}$  : Etat de réservoir d'hydrogène maximale ;

$Soc_{min}$  : Etat de réservoir d'hydrogène minimale;

$Vres$  : Etat de Réservoir d'eau ;

$Vres_{max}$  : État de réservoir d'eau maximale ;

$Vres_{min}$  : État de réservoir d'eau minimale ;

$R$  : la charge des besoins supplémentaires ;

$Q = 1$  : Il y'a une demande d'eau ;

$Q = 0$  : Il y'a pas une demande d'eau.

### III.6.1 Durant la période où les besoins en eau sont nuls ( $Q = 0$ ; %débit)

**Mode 1** : Dans ce mode si  $P_{pv} > P_{mot} > 0$ ,  $Vres < Vres_{max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) c'est le cas de pompage, et la puissance de chargement de l'électrolyseur sera égale à la différence de puissance entre  $P_{pv}$  et  $P_{mot}$ .

**Mode 2** : Dans ce mode si  $P_{pv} > P_{mot} > 0$ ,  $Vres < Vres_{max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) c'est le cas de pompage, la puissance de chargement des besoins supplémentaires sera égale à la différence de puissance entre  $P_{pv}$  et  $P_{pv}$ .

**Mode 3** : Dans ce mode si  $P_{pv} > 0$ ,  $Vres \geq Vres_{max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour chargement d'électrolyseur seulement.

**Mode 4** : Dans ce mode si  $P_{pv} > 0$ ,  $Vres \geq Vres_{max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter des besoins supplémentaires.

**Mode 5 :** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{min}$ , la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour charger l'électrolyseur seulement, il y'a pas de pompage.

**Mode 6 :** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , la puissance produite par le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter la charge (moteur pompe) il faut ajoute une autre source d'énergie pour faire le pompage, alors la différence de égale à la puissance de la pile à combustible  $P_{pile}$ .

**Mode 7 :** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour charger l'électrolyseur seulement.

**Mode 8 :** Dans ce mode si  $P_{pv} = 0$ , alors la puissance d'électrolyseur est nul pas de production d'énergie pas de stockage d'hydrogène.

### III.6.2 Durant la période où les besoins existent ( $Q = 1$ ; %débit)

**Mode 9 :** Dans ce mode si  $P_{pv} > P_{mot} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{min}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) c'est le cas de pompage, la puissance de chargement d'électrolyseur sera égale à la différence entre  $P_{pv}$  et  $P_{mot}$ .

**Mode 10:** Dans ce mode si  $P_{pv} > P_{mot} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) c'est le cas de pompage, la puissance de chargement des besoins supplémentaires sera égale à la différence entre  $P_{pv}$  et  $P_{mot}$ .

**Mode 11 :** Dans ce mode si  $P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , dans ce cas on va faire le turbinage, la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour charger d'électrolyseur, la puissance de chargement sera égale à la puissance  $P_{pv}$  plus la puissance  $P_{mot}$ .

**Mode 12:** Dans ce mode si  $P_{pv} > P_{mot} > 0$ ,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) on va faire le pompage direct vers les besoins en eau, la puissance de chargement des besoins supplémentaires sera égale à la différence entre  $P_{pv}$  et  $P_{mot}$ .

**Mode 13 :** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , la puissance produite par le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter la charge (moteur pompe) dans ce cas on peut pas faire n'est pompage n'est turbinage.

**Mode 14:** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , la puissance produite par le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter la charge (moteur pompe) il faut ajoute une autre source d'énergie pour faire le pompage, alors la puissance de la charge sera égale à la puissance  $P_{pv}$  plus la puissance de la pile à combustible.

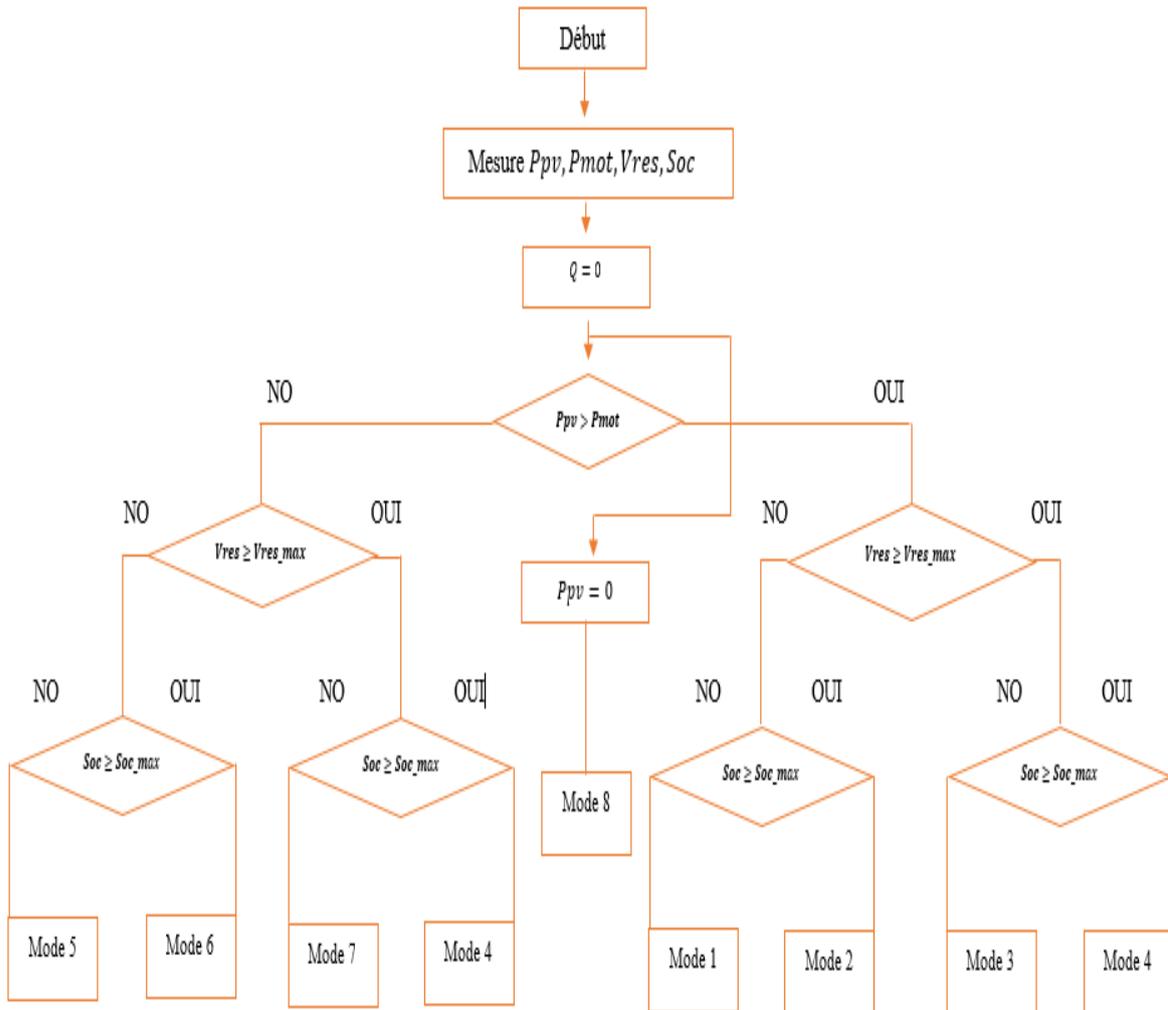
**Mode 15 :** Dans ce mode si  $P_{mot} > P_{pv} > 0$ ,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{min}$ , alors la puissance produite par le générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge (moteur pompe) c'est le cas de turbinage, la puissance de chargement d'électrolyseur sera égale à la puissance  $P_{pv}$  plus la puissance  $P_{mot}$ .

## Chapitre III : Dimensionnement de système pompage Photovoltaïque

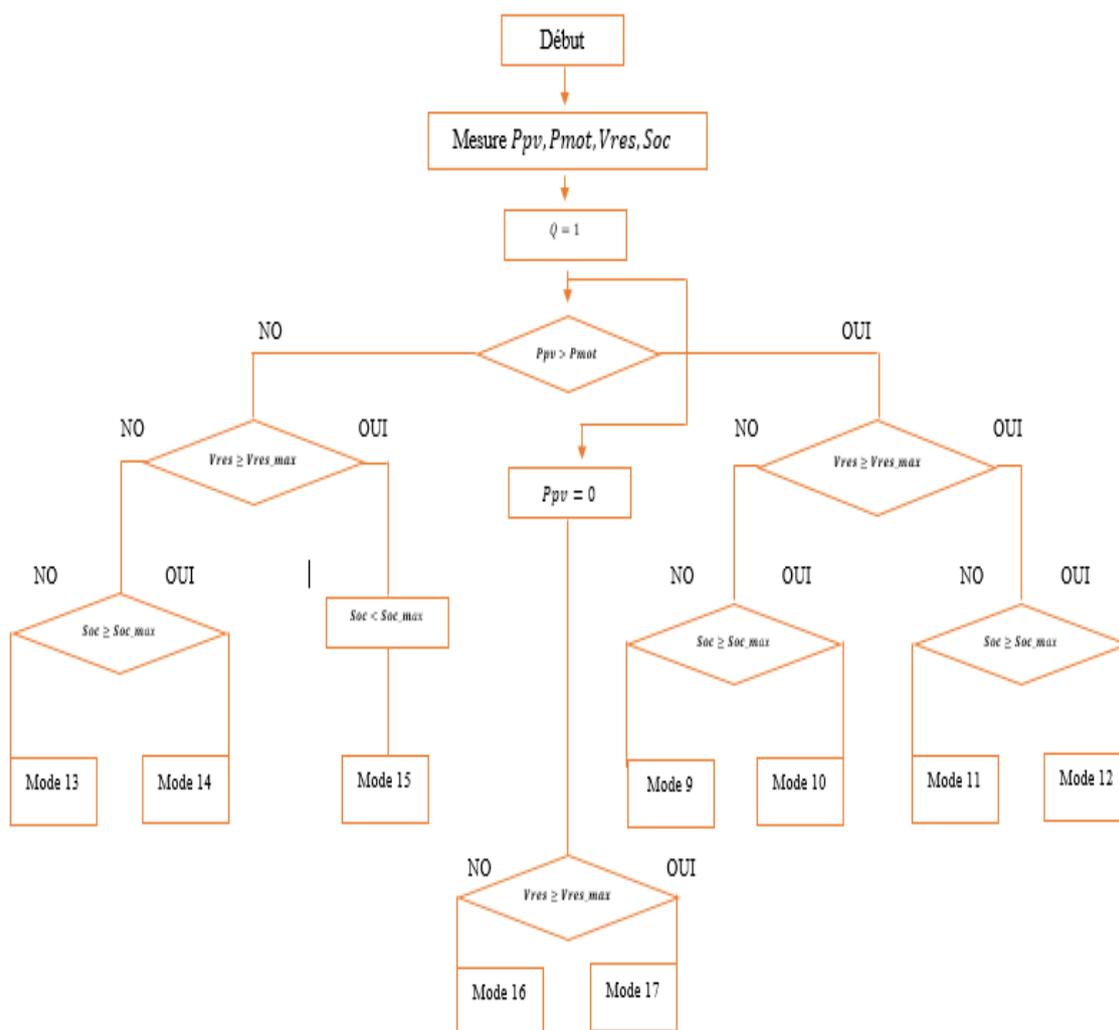
**Mode 16 :** Dans ce mode si  $P_{pv} = 0, V_{res} < V_{res\_min}$ , on va faire le pompage à partir de la pile à combustible.

**Mode 17 :** Dans ce mode si  $P_{pv} = 0$  et  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  on va faire turbinage, la puissance d'électrolyseur sera égale à la puissance de moteur.

L'organigramme qui récapitule les modes de fonctionnement est donné par les figures suivante :



**Figure III.1** Organigramme de gestion durant la période où la demande d'eau est nulle



**Figure III.2** Organigramme de gestion durant la période où la demande d'eau existe

### III.7 Conclusion

Ce chapitre était consacré pour le dimensionnement de système pompage photovoltaïque et la stratégie de gestion d'énergie d'un système hybride, pour cela le dimensionnement de sous système hybride était fait à partir des besoins en eau totale estimée et la puissance de la charge demandée.

Nous avons établi également dans ce chapitre une stratégie de gestion d'énergie, cette stratégie consiste à exploiter la puissance d'énergie des panneaux photovoltaïque avec son stockage en premier, puis la source secondaire qui est la pile à combustible intervienne en cas de l'insuffisance de puissance, Donc la demande d'énergie par la charge va déterminer quel générateur à utiliser.

La simulation de système étudiée et les résultats obtenir seront présentés dans le dernier chapitre.

# **Chapitre IV :**

**Simulation et interprétation des  
résultats**

### IV.1 Introduction

Les différents composants de système hybride étudié ont été déjà modélisés dans le deuxième chapitre.

Dans ce chapitre, après avoir présenté l'algorithme de gestion nous avons implanté ce dernier dans le système global et nous l'avons simulé sous l'environnement Matlab/simulink.

Différentes conditions ont été simulées pour permettre de retrouver le maximum possible de modes de fonctionnement, et pour gérer les puissances entre les différents composants dans le but de contrôler les échanges d'énergies dans le système global

### IV.2 Simulation du système globale

La figure (IV.1) présente le système globale étudié sous Matlab/simulink, il regroupe les différentes sources d'énergies et leurs outils de transformation à savoir: le générateur photovoltaïque, la pile à combustible, l'électrolyseur, le convertisseurs buck-Boost, la commande MPPT et le groupe motopompe avec un système de gestion d'énergie.

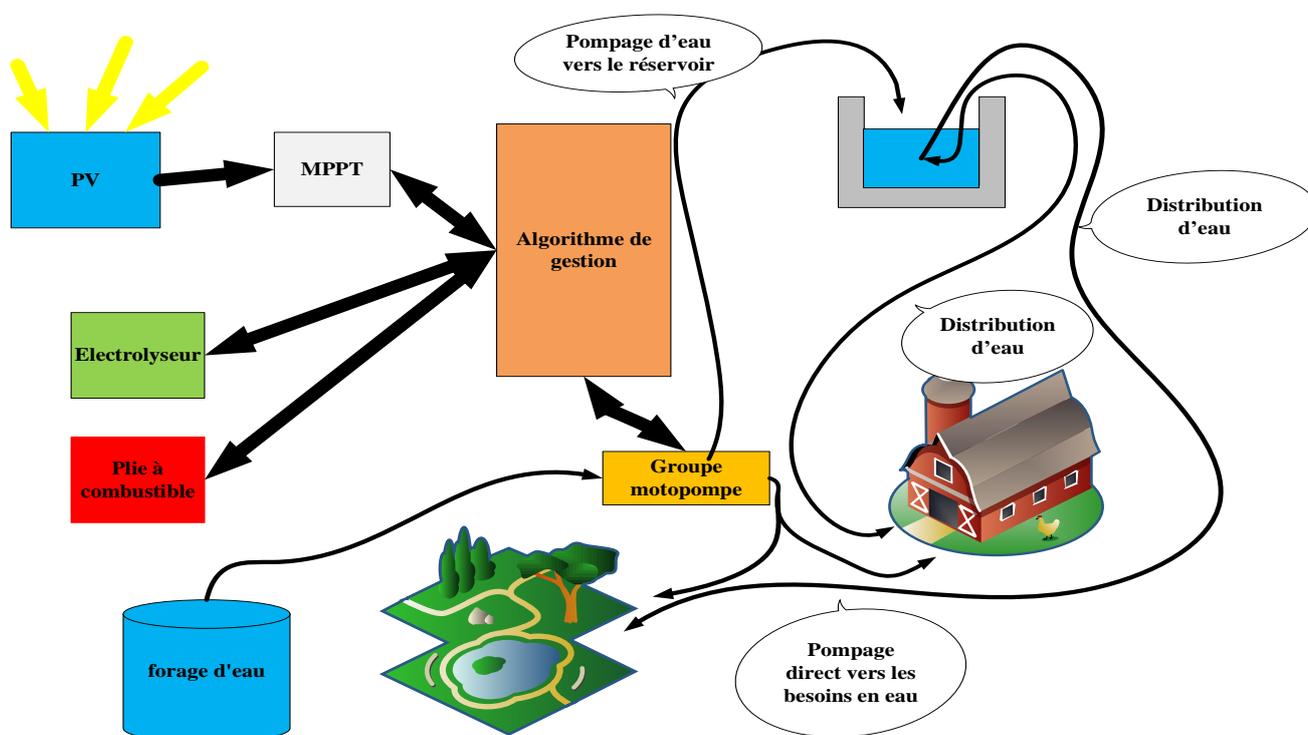


Figure IV.1 Schéma global de système pompage

### IV.3 Résultats de simulation

Nous avons procédé à la simulation du système global pour un profil durant une journée. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de système de gestion dans les différents cas possibles. Nous avons adopté des profils pour l'ensoleillement, la température, la quantité d'eau stockée dans le réservoir et la quantité d'hydrogène stockée dans le réservoir pour se rapprocher des scénarios réels.

## Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

En présentera dans ce qui suit les résultats de simulation du système globale durant la période où les besoins existent et aussi dans la période ou les besoins d'eau sont nulle :

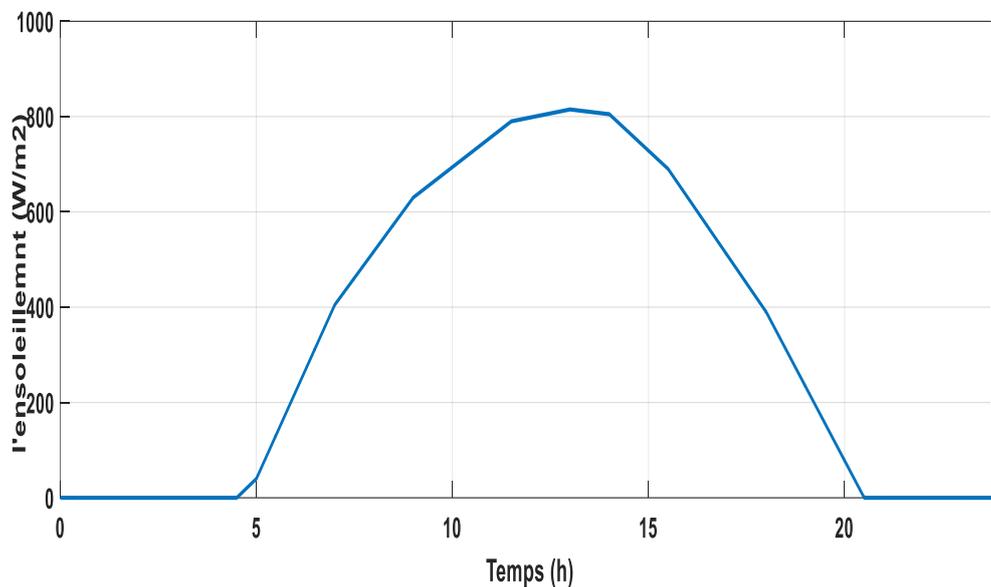


Figure IV.2 Variation de l'insolation

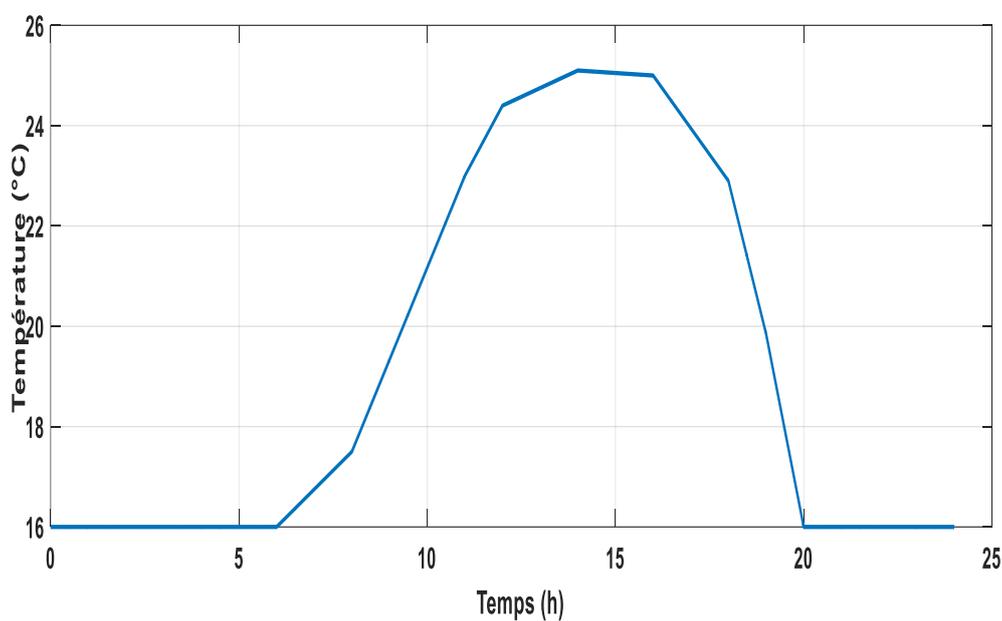
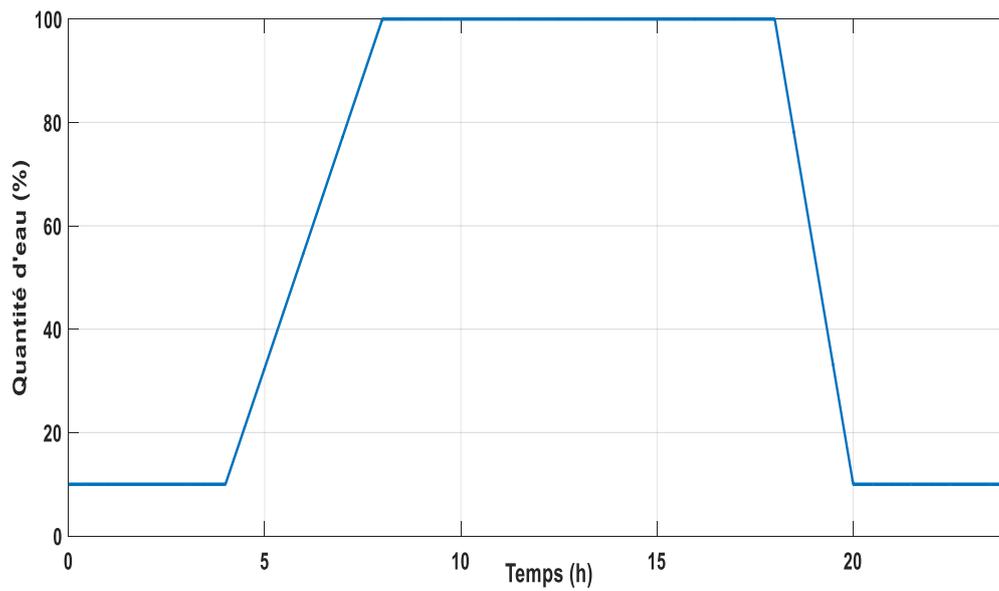
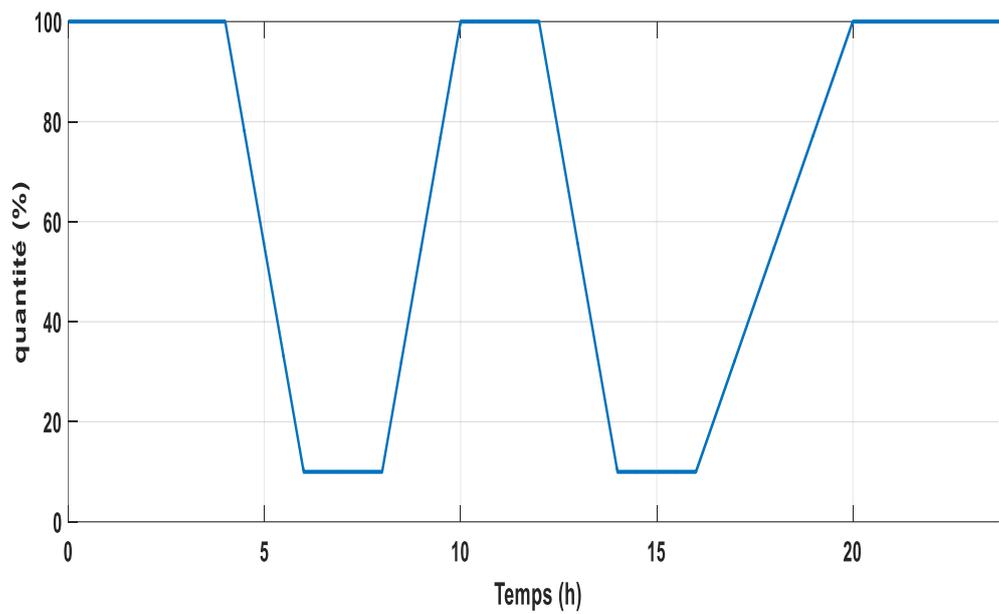


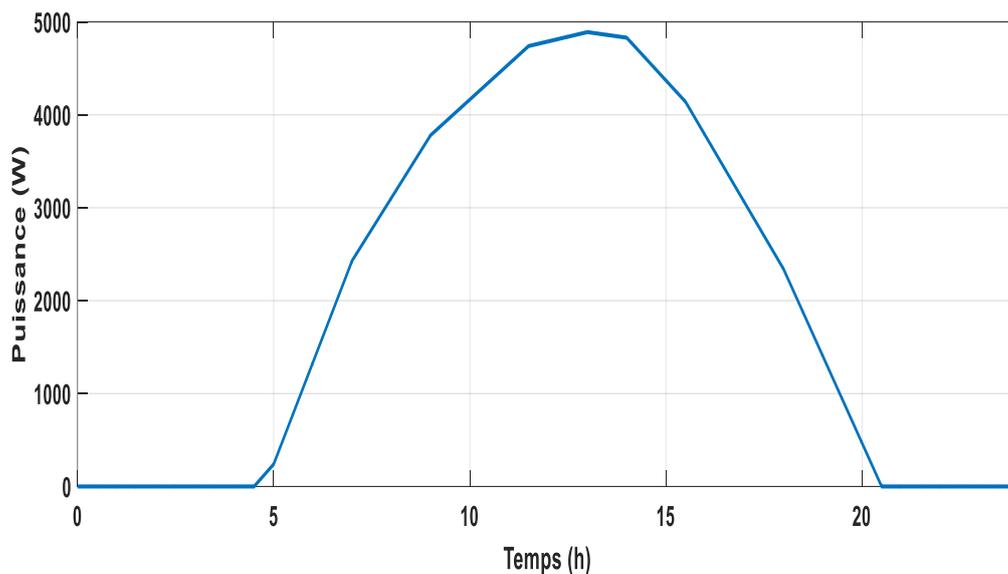
Figure IV.3 Variation de la température



**Figure IV.4** Variation de la quantité d'eau stockée dans le réservoir (en %)

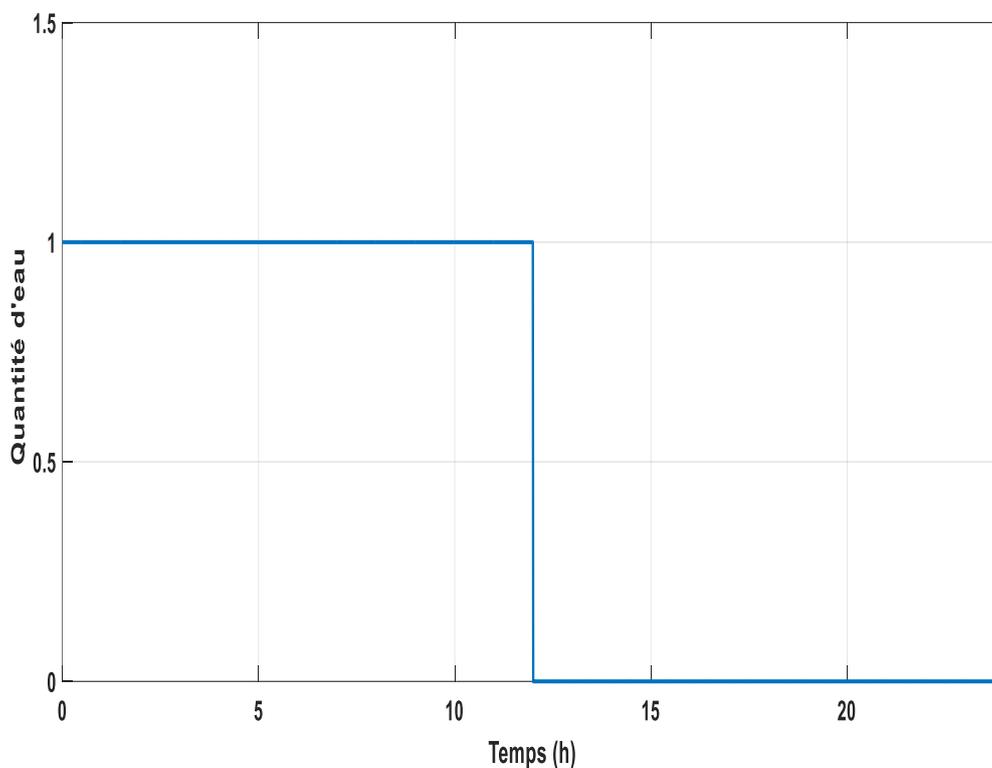


**Figure IV.5** Variation de la quantité d'hydrogène stockée dans le réservoir (en %)

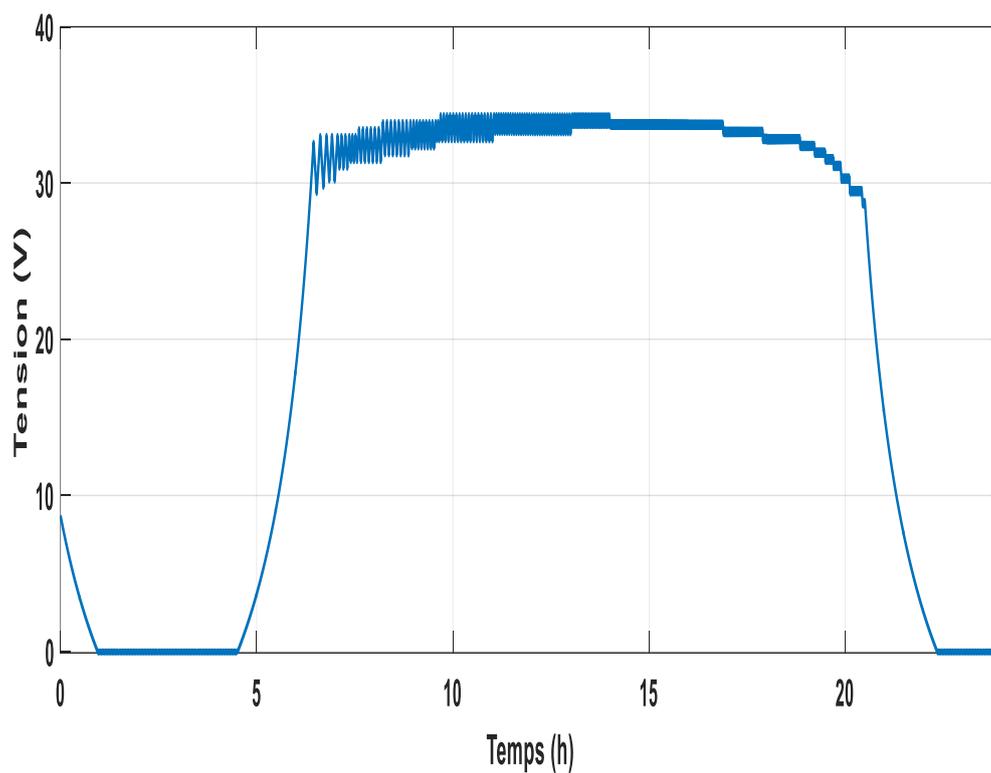


**Figure IV.6** Puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques

A partir de la figure IV.6, La puissance délivrée par les panneaux PV variée en fonction des conditions climatiques notamment l'insolation, donc la forme de la courbe obtenue est presque similaire à celle de l'insolation, elle atteint une valeur maximale plus de 4.9 kW. La puissance PV a une relation directe avec la variation d'éclairement.

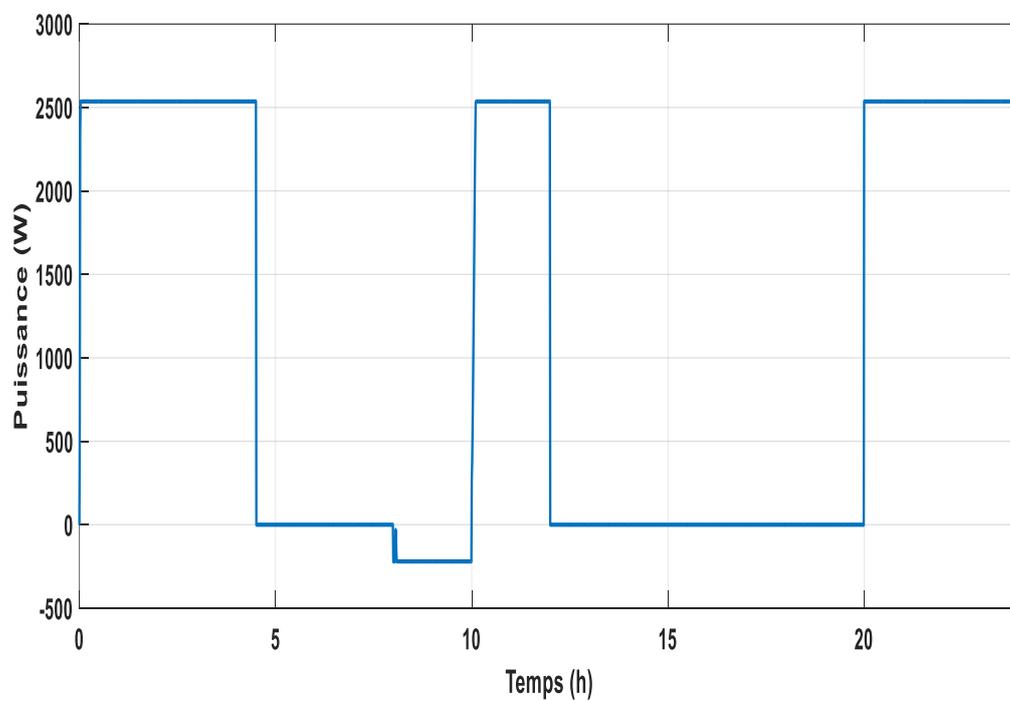


**Figure IV.7** Variation des besoins en eau

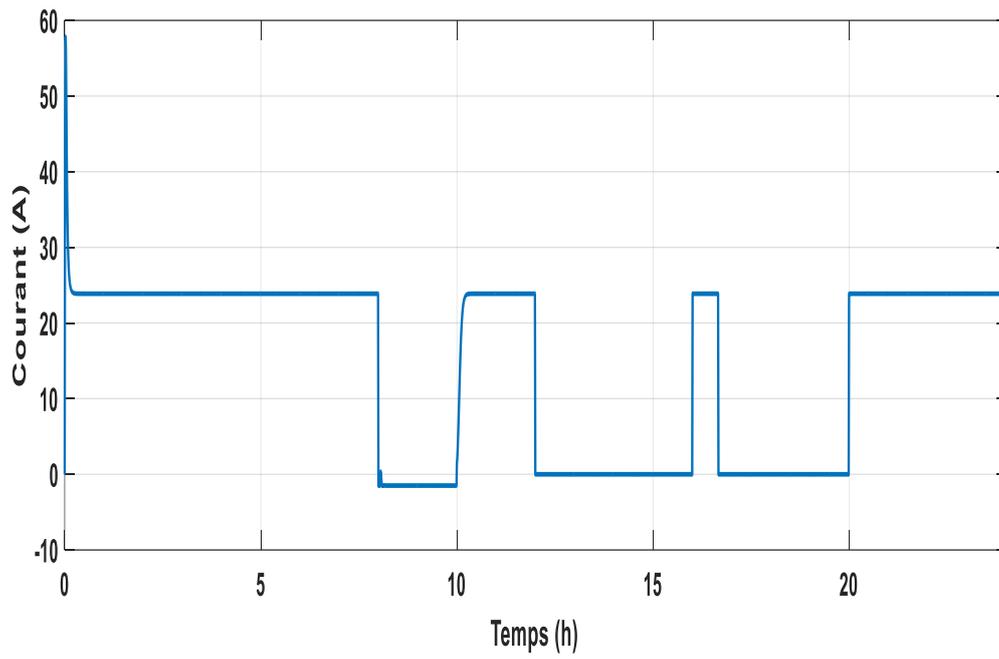


**Figure IV.8** Tension délivrée par le Buck-Boost

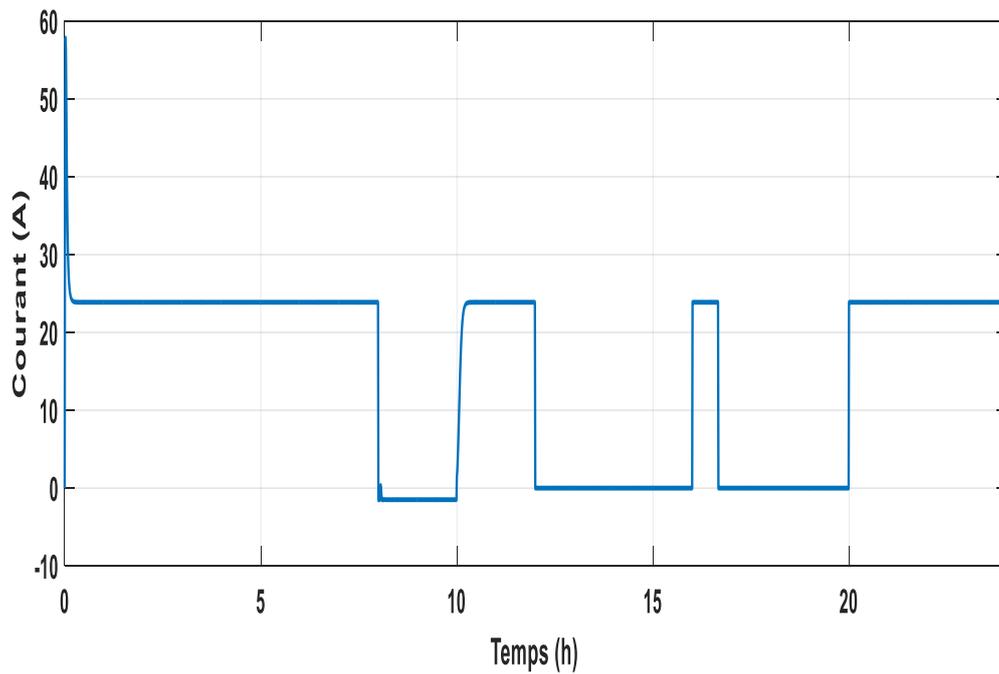
Les résultats de simulation liés à la machine à courant continu :



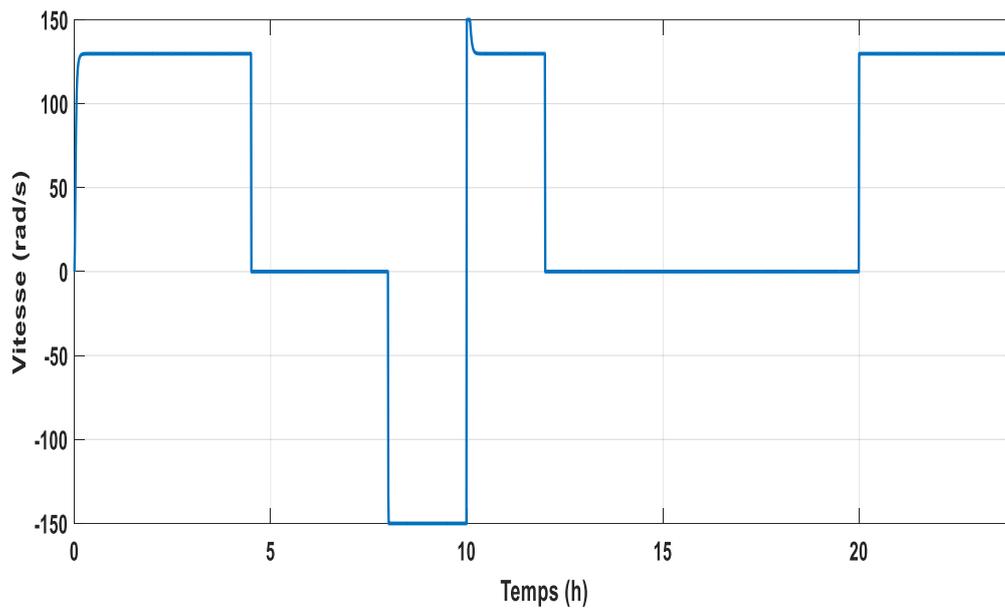
**Figure IV.9** Puissance de charge (MCC)



**Figure IV.10** Courant de (MCC)

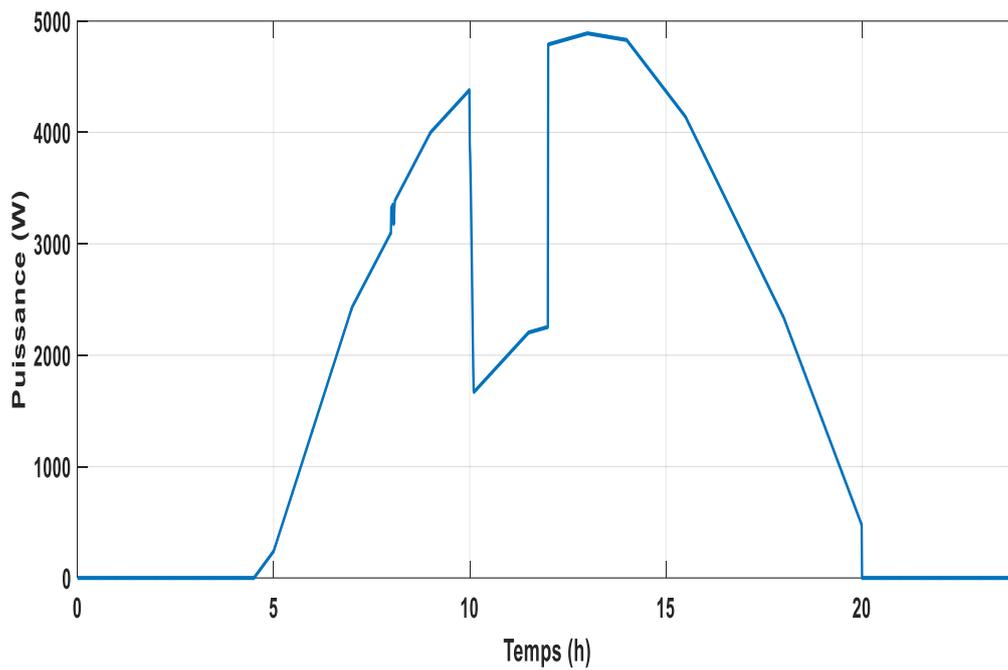


**Figure IV.11** Couple de la (MCC)



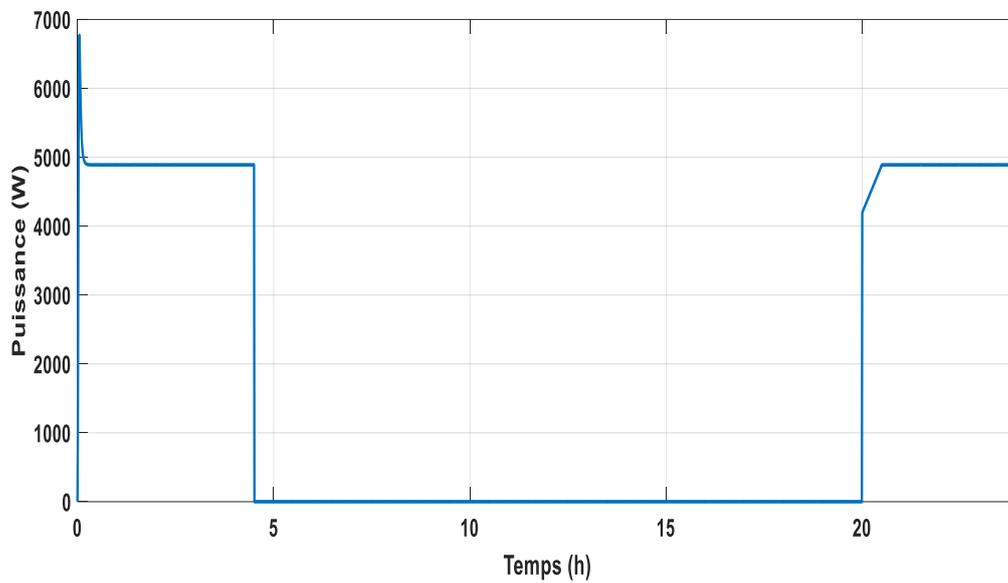
**Figure IV.12** Vitesse de la (MCC)

Les résultats de simulation liés à la machine à l'électrolyseur :



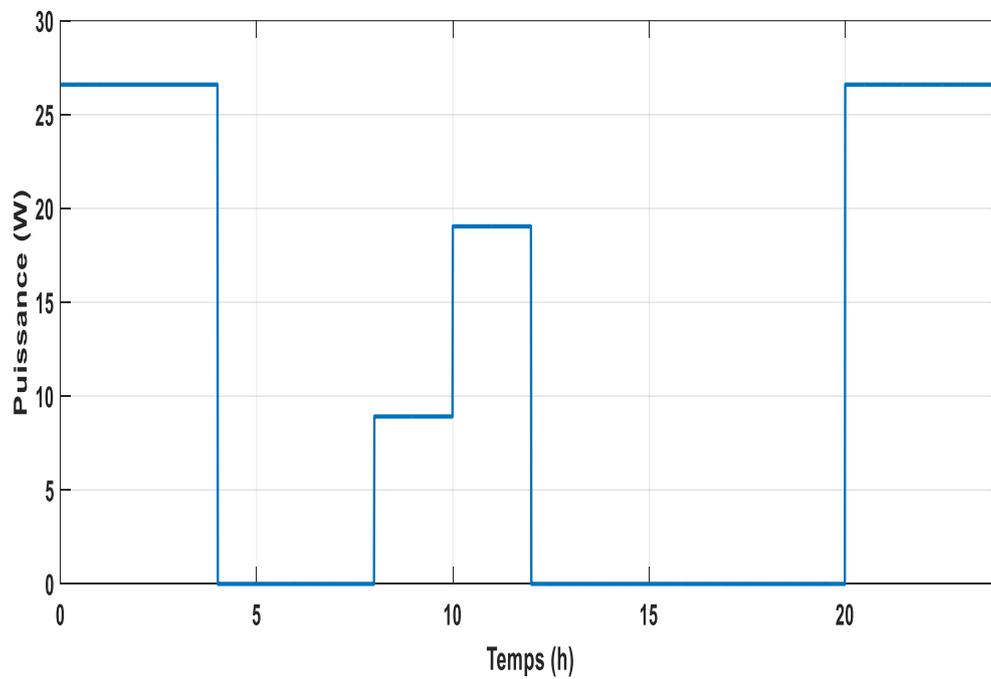
**Figure IV.13** Puissance d'électrolyseur

Les résultats de simulation liés à la machine à la pile à combustible :



**Figure IV.14** Puissance délivrée par la pile à combustible

Les résultats de simulation liés à la pompe centrifuge :



**Figure IV.15** Variation de la hauteur manométrique HMT(m)

## Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation des différentes puissances obtenus par l'application des profils précédant dans le système de gestion énergétique global sont représentés dans la figure IV.16 suivante :

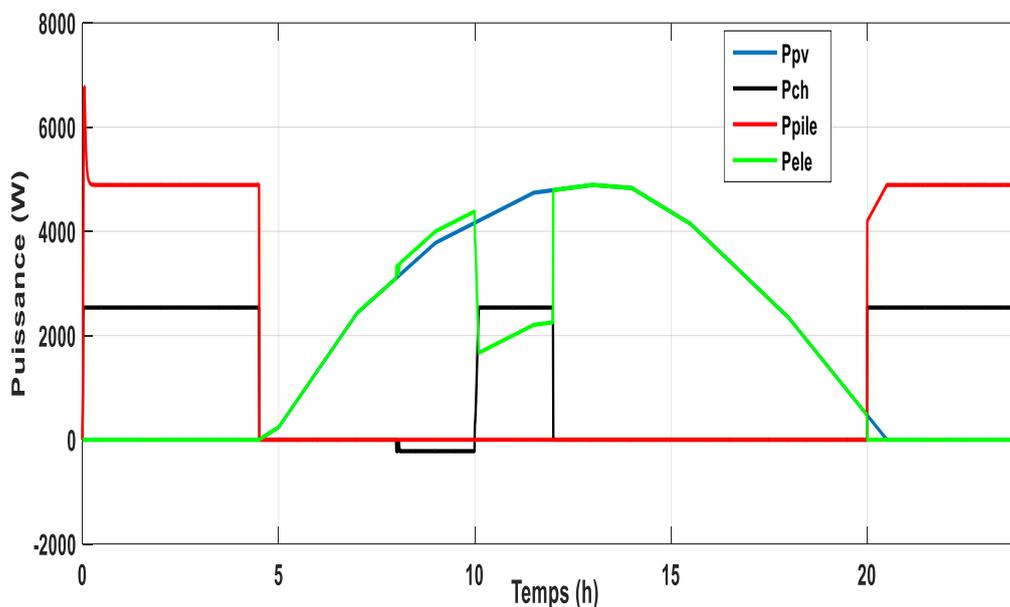


Figure IV.16 Variation des différentes puissances

A partir des allures (des figures IV.2 à IV.16) des différentes puissances des sources d'énergie de système hybride étudié, on remarque que : au début la pile à combustible fournit une puissance d'une manière à satisfaire la demande de la charge, ensuite les panneaux photovoltaïques délivrent une puissance importante pendant l'intervalle de [7.2h à 17.5h] (évidemment, lorsque les conditions météorologiques sont optimales, l'ensoleillement et la température adoptés), cette puissance elle répond au besoin énergétique de la charge, où l'électrolyseur produit une quantité d'hydrogène importante à travers le surplus d'énergie PV, la pile à combustible elle fournit une puissance suffisante pour alimenter la charge dans le cas où la puissance PV est insuffisante et la quantité d'hydrogène dépasse le seul minimal. Donc notre système répond au besoin de profile de la charge durant toute la journée.

### IV.4 Synthèse sur le fonctionnement par phase du système globale étudié avec l'algorithme de gestion

**t ∈ [0h ; 12h] Durant la période où les besoins existent (Q = 1; %débit)**

**Phase 1 :** t ∈ [0h ; 4h] : la puissance des panneaux photovoltaïques est insuffisante pour alimenter la charge,  $V_{res} < V_{res\_min}$  et  $Soc \geq Soc_{max}$ , alors dans ce cas on pompe vers le réservoir d'eau (ou utilisation directe), la pile à combustible intervienne pour alimenter la charge (fonctionnement du mode 14).

**Phase 2 :** t ∈ [4h ; 8h] : la puissance des panneaux photovoltaïques est insuffisante pour alimenter la charge,  $V_{res} < V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc_{max}$ , alors dans ce cas n'est pompage n'est turbinage, presque la totalité de la puissance des panneaux PV est envoyée vers

l'électrolyseur pour produire l'hydrogène et le stocker dans son réservoir (fonctionnement du mode 13).

**Phase 3** :  $t \in [8h ; 10h]$  : la puissance des panneaux photovoltaïques est supérieure à la puissance de la charge,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc\_max$ , alors dans ce cas c'est le mode turbinage, La somme de la puissance produite par panneaux PV et de la puissance récupérée par le fonctionnement en mode génératrice de la MCC est envoyée vers d'électrolyseur pour produire l'hydrogène (fonctionnement du mode 11).

**Phase 4** :  $t \in [10h ; 12h]$  : la puissance des panneaux photovoltaïques est supérieure à la puissance de la charge,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc \geq Soc\_max$ , alors dans ce cas le pompage d'eau est effectué directement pour les besoins de la ferme en eau, la différence entre la puissance des panneaux PV et la puissance de charge est utilisée pour alimenter des besoins secondaires et des accessoires (fonctionnement du mode 12).

**t  $\in$  [12h ; 24h] Durant la période où les besoins en eau sont nuls ( $Q = 0$ ; %débit)**

**Phase 5** :  $t \in [12h ; 18h]$  : la puissance des panneaux photovoltaïques est importante,  $V_{res} \geq V_{res\_max}$  et  $Soc < Soc\_max$ , alors dans ce cas n'est pompage n'est turbinage, la puissance des panneaux PV et la puissance de charge est utilisée pour le chargement de réservoir d'électrolyseur avec presque la totalité de la puissance PV (fonctionnement du mode 3).

**Phase 6** :  $t \in [18h ; 20h]$  : la puissance des panneaux photovoltaïques est supérieur à la puissance de la charge,  $V_{res} \geq V_{res\_min}$  et  $Soc < Soc\_max$ , alors dans ce cas on a un pompage vers le réservoir d'eau, la différence entre la puissance des panneaux PV et celle de la charge est envoyée vers d'électrolyseur pour produire l'hydrogène (fonctionnement du mode 1).

**Phase 8** :  $t \in [20h ; 24h]$  : la puissance des panneaux photovoltaïques est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge,  $V_{res} < V_{res\_min}$  et  $Soc \geq Soc\_max$ , alors dans ce cas c'est le pompage vers le réservoir d'eau, la pile à combustible intervienne pour alimenter la charge (fonctionnement du mode 6).

### IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation de système de pompage photovoltaïques hybride, pile à combustible et l'électrolyseur pour stockage d'hydrogène suivis de la simulation du système global. Pour une gestion rigoureuse de cette énergie une stratégie de commande été établie. Le gestionnaire d'énergie détermine la source d'énergie à utiliser et la puissance fournie par chacune.

On a conclu que les résultats de simulation obtenus sont compatibles avec les différents modes de fonctionnement de l'algorithme de gestion d'énergie cité dans le chapitre précédent, par conséquent un bon fonctionnement de système hybride étudié est assuré en fonction de temps et des conditions climatique et la charge demandée.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre, disponible, gratuite et n'est pas polluante. C'est pourquoi son utilisation est vraiment croissante dans le monde. D'une autre part, la demande de son énergie électrique produite, essentiellement pour les besoins des zones rural et les sites isolés n'arrête pas d'augmenter, en particulier, les systèmes de pompage d'eau.

Ce travail s'inscrit dans la thématique « Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources à énergie renouvelable ». Il a pour objectif l'étude des stratégies de gestion de l'énergie des différents systèmes hybrides composés d'un générateur photovoltaïque comme source principale et d'autres sources, pile à combustible.

La première partie de ce mémoire est consacré aux généralités des systèmes photovoltaïques, leur principe de fonctionnement et aussi leurs avantages et inconvénients. Puis on a présenté quelque types d'installations photovoltaïques.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des composants constitué le système de pompage photovoltaïque (les panneaux photovoltaïques, moteur à courant continu, pompe centrifuge, hacheur élévateur-abaisseur (Buck-boost), la pile à combustible et d'électrolyseur d'eau). Dans l'environnement de programme MATLAB Simulink.

Dans la troisième partie, nous avons dimensionné le système hybride. Cette méthode permet de calculer le nombre des panneaux en série et en parallèle, et le nombre des cellules de la pile à combustible pour couvrir les besoins de la charge. Le système photovoltaïque et composé de 30 panneaux photovoltaïques de 165W, et une pile à combustible de 304 cellule. Nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui est basé sur la comparaison entre la puissance produite par le système hybride est la puissance demandée.

Et pour finir, dans le dernier chapitre nous avons procédé à la simulation du système globale, là-où on a montré l'efficacité de l'algorithme de gestion d'énergie. Comme on a pu le voir sur les résultats de simulation. et le changement de mode de fonctionnement selon les conditions environnementales et la demande en eau. D'où on a conclu que ces résultats et d'une grande importance pour la maîtrise de ce genre d'installation.

Comme perspective nous proposons :

- Faire des essais sur une installation réelle afin de valider l'algorithme de gestion d'énergie proposé ;
- Améliorer l'algorithme de système de gestion d'énergies par d'autres techniques d'intelligence artificielle.

## Bibliographique

- [1] A. Labouret, M. villos « Energie solaire photovoltaïque ». Dunod. 3ème édition. 2006
- [2] Site : [https://www.univ-saida.dz/buscd/doc\\_num.php](https://www.univ-saida.dz/buscd/doc_num.php).visité le mois mai 2023
- [3] C.Cabal « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à conversation photovoltaïque » Thèse doctorat, Université Toulouse, France. Décembre 2008.
- [4] A.T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » thèse de doctorat en Génie électrique université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 2010.
- [5] B. Boukezeta, A. Chaoui, J-P. Gaubert, and M. Hachemi, « Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre parallèle » in symposium de Génie électrique 2014.
- [6] B. Wafa, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV connecté au réseau » Mémoire de Magister en électrotechnique, option : énergie renouvelables, université Mohamed khider biskra, 2013
- [7] A. Lyes, « Etude de connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011
- [8] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-Boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [9] Article, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01351493/> Saad Motahhir, Submitted on 19 Apr 2018
- [10] V. BOITIER, P.M., « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques ».
- [11] Rufer, A., « Cours d'électronique de puissance/ Conversion DC/DC » Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 2018.
- [12] Gao, D.W., « Energy storage for sustainable microgrid ». 2015.
- [13] Saurabh Kumar, R.K., Navdeep Singh, Performance of Closed Loop SEPIC Converter with DC-DC Converter for Solar Energy System. IEEE 4th International Conference on Power, 2017.
- [14] 1. Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat en Génie Électrique, Université du Havre, 2005.

- [15] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2018.
- [16] Y. Belkhier, M. Ait Mahdi, and S. Hadji, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master en Automatique, Université Abderrahmane Mira Bejaïa, Algérie, 2017.
- [17] H. Maker « optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super-condensateurs », Thèse de doctorat, l'université de technologie Belfort Montbéliard, France 2008
- [18] J. Royer, T. Djiako, « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention Des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA, 1998.
- [19] A. ismail, « Étude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à une générateur photovoltaïque » Mémoire de fin d'étude Master 2, Université LARBI BEN M'HIDI-OUM EL BOUAGHI, 2013.
- [20] M. B, SOUHEYB « Étude et réalisation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de fin d'étude Master 2, Ecole supérieure en sciences appliquées de TELEMEN, 2019.
- [21] DJ, kamel « Étude d'Algorithmes MPPT appliqué aux systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Université A-MIRA BEJAIA, 2010.
- [22] E.Fatima, S.Ibtissem « Étude, dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque » Mémoire de fin d'étude Master 2, Université d'ADRAR, 2016.
- [23] Ben ammar. Makhoulf « Modélisation D'électrolyseur proton Exchange Membrane (PEM) » Mémoire de fin d'étude Master 2, Université MOHAMED KHIDER-BISKRA, 2019.
- [24] Belatel, M. Aissous, Z et Ferhat, F « Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour production d'énergie électrique verte ». Revus des énergies renouvelable, 1, 13-28, 2012.
- [25] A. ADJATI, T. REKIOUA, Djamila REKIOUA, « Utilisation de la machine asynchrone à double étoile en pompage hybride photovoltaïque-pile à combustible ». Université de BEJAIA.
- [26] Azzeddine. MEBARKI, Tarek. MEBARKI « Gestion d'énergie d'une station multi sources dédiées au chargement des véhicules hybrides ». Université de BEJAIA.

## Annexe

### Caractéristiques des PV :

Paramètres	Valeur
Température conditions standard, T	25 °C
Eclairement au conditions standard, E	1000 W/m <sup>2</sup>
Tension de circuit ouvert, $V_{oc}$	0.589166
Courant de court-circuit, $I_{cc}$	5.27
$R_s$	$15.10^{-3}$
$R_p$	30
Ppv	165 W

### Caractéristiques de moteur :

Puissance nominale	3 kW
Tension	200 V
Vitesse nominale	1500 tr/min
L'inductance de l'induit, $L_a$	0.028 H
Résistance de l'induit $R_a$	2.581 $\Omega$
Moment d'inertie, J	0.02215 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement, f	0.002953 N. m. s
Constant, K	1.0665

### Pompe centrifuge :

Vitesse nominale, $W_n$	150 rad/s
Débit nominale	21 m <sup>3</sup> /h
Hauteur maximale	26.6m
Constante $C_1$	$4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m}/(\text{rad}/\text{s})^2$
Constante $C_2$	$1.5826 \cdot 10^{-5} \text{ m}/(\text{rad}/\text{s}) (\text{m}^2/\text{s})$
Constante $C_3$	$-188144 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$