

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 1 |
| I.2. Le soleil | 1 |
| I.3. Rayonnement solaire | 2 |
| I.3.1. Rayonnement en Algérie | 3 |
| I.4. L'effet photovoltaïque | 4 |
| I.4.1 Formation de la jonction PN | 4 |
| I.5. Cellule solaire | 5 |
| I.5.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque | 5 |
| I.6. Modélisation de la cellule solaire | 6 |
| I.6.1. Modèle de la cellule photovoltaïque | 6 |
| I.6.2. La caractéristique I-V de la cellule solaire | 7 |
| I.6.3. Paramètres de la cellule solaire | 8 |
| I.6.4. Les différents types des cellules solaires | 9 |
| I.7. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$ | 10 |
| I.7.1. Influence de l'éclairement | 11 |
| I.7.2. Influence de la température | 12 |
| I.8. Les modules photovoltaïques | 12 |
| I.8.1. Association série | 13 |
| I.8.2. Association Parallèle | 13 |
| I.8.3. Association mixte (Série + Parallèle) | 14 |
| I.7. Conclusion | 15 |

Chapitre II : Système hacheur - moteur DC- pompe

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction | 16 |
| II.2. Moteur à courant continu | 16 |
| II.2.1. Principe de fonctionnement du moteur à courant continu | 17 |
| II.2.1.1. Force électromotrice | 17 |
| II.2.1.2. Couple électromagnétique | 18 |
| II.2.2. Puissance | 18 |
| II.2.3. Différentes pertes | 19 |
| II.2.4. Rendement | 20 |
| II.2.5. Les différents types de moteurs à courant continu | 20 |
| II.2.6. Processus énergétique d'un moteur à courant continu | 21 |
| II.2.7. Caractéristique mécanique | 24 |
| II.2.8. Modélisation et simulation d'un MCC | 25 |

| | |
|---|----|
| II.2.8.1. Moteur à Excitation shunt | 25 |
| II.2.8.1.1. Les résultats de la simulation à vide | 26 |
| II.2.8.2. Moteur à courant continu à aimant permanent | 28 |
| II.2.8.2.1. Résultat de simulation de moteur à aimant permanent..... | 29 |
| II.3. Les pompes | 30 |
| II.3.1. Pompe volumétrique..... | 30 |
| II.3.1.1. Principe de fonctionnement | 30 |
| II.3.1.2. Constitution | 31 |
| II.3.1.3. Caractéristiques | 31 |
| II.3.2. Pompe centrifuge | 32 |
| II.3.2.1. Principe de fonctionnement | 32 |
| II.3.2.2. Constitution | 32 |
| II.3.2.3. Caractéristiques d'une pompe centrifuge..... | 33 |
| II.3.3. Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétrique..... | 35 |
| II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs | 36 |
| II.4.1. Hacheur survolteur (Boost | 37 |
| II.4.1.1. Principe de fonctionnement | 37 |
| II.4.2. Etude théorique en condition continue | 37 |
| II.4.3. Formes d'ondes | 39 |
| II.4.4. Tension moyenne et ondulation..... | 40 |
| II.4.5. Avantages et inconvénients du convertisseur « Boost » | 40 |
| II.4.6. Simulation du convertisseur « boost » | 41 |
| II.5. Conclusion | 41 |
| | |
| Chapitre III : Optimisation de système de pompage PV | |
| III.1. Introduction | 42 |
| III.2. Couplage direct | 42 |
| III.3. Fonctionnement avec MPPT | 43 |
| III.4. Techniques de recherche de point de puissance maximale | 43 |
| III.4.1. Technique de perturbation et d'observation (P&O)..... | 44 |
| III.4.1.1. Le fonctionnement de l'algorithme(P&O) | 44 |
| III.4.2. Technique classique (Hill Climbing)..... | 45 |
| III.5. simulation d'un couplage direct (sans régulation)..... | 47 |
| III.6. Simulation avec régulation..... | 49 |
| III.7. L'entraînement des pompes | 51 |
| III.8. Types de pompage..... | 52 |
| III.9. La conversion d'énergie des panneaux vers la pompe | 52 |
| III.10. Conclusion | 53 |
| Conclusion Général | |
| Bibliographie | |

Les systèmes de pompage à base d'énergie solaire, ont reçu une attention considérable grâce au développement de la technologie du photovoltaïque. Un nombre important d'expériences se base sur le pompage avec entraînement à l'aide de moteurs DC.

Les Générateurs Photovoltaïque (GPV) représentent des systèmes qui fournissent une puissance non linéaire qui nécessite une identification en temps réel et une adaptation avec la charge pour un fonctionnement optimal. Cette poursuite du point de puissance maximale (MPP: Maximum Power Point) dépend de facteurs climatiques tels que l'ensoleillement et la température. Par conséquent, le MPP varie largement dans le temps.

Quand on connecte une charge aux bornes d'un GPV, cette charge impose un point de fonctionnement qui peut être très éloigné du PPM. Pour assurer l'adaptation optimale on doit introduire un dispositif électronique et le commander de façon à ce que le GPV opère à sa puissance maximale. Ce dispositif, appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un convertisseur DC/DC de puissance, communément appelé hacheur, commandé par un algorithme de recherche du MPP.

Cette étude concerne l'analyse, la modélisation et l'optimisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur DC-DC élévateur de tension, «Boost», afin d'obtenir le meilleur rendement quels que soient l'état du ciel et les conditions climatiques d'éclairement et de température.

Le document présenté est rédigé en trois parties principales résumées dans ce qui suit:

-La première partie donne un aperçu théorique sur le générateur photovoltaïque où l'on présentera un modèle de la cellule et du module photovoltaïque. Les influences des différents paramètres électriques et climatiques sur le comportement du générateur PV.

-La deuxième partie met en relief le cœur de notre système hacheur-moteur-pompe.

-La troisième partie aborde les résultats de la simulation ainsi que l'optimisation du système de pompage.

Une conclusion générale comportera une discussion des résultats obtenus.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes Photovoltaïques

I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'Homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le biais des cellules photovoltaïques qui convertissent les photons en énergie électrique.

Le phénomène photovoltaïque fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres n'apparaissent qu'au début des années 70. Le photovoltaïque fut utilisé pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [1]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante. [5]

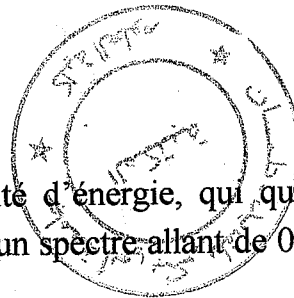
Pour comprendre ce phénomène, nous allons développer dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire en premier lieu, puis une deuxième partie sera consacrée aux propriétés des semi-conducteurs, matériaux de base des cellules photovoltaïques. Une fois ces rappels théoriques faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet.

I.2. Le soleil

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie, qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de $0,2\mu\text{m}$ (ultra-violet) à $4\mu\text{m}$ (infrarouge).

Cette énergie représentera une source majeure d'énergie dans le futur. Malgré la distance considérable de la terre du soleil (150.10^6km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie de 180.10^6 Gw .

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Elle représente un potentiel considérable; en effet, l'Algérie reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour. [2]



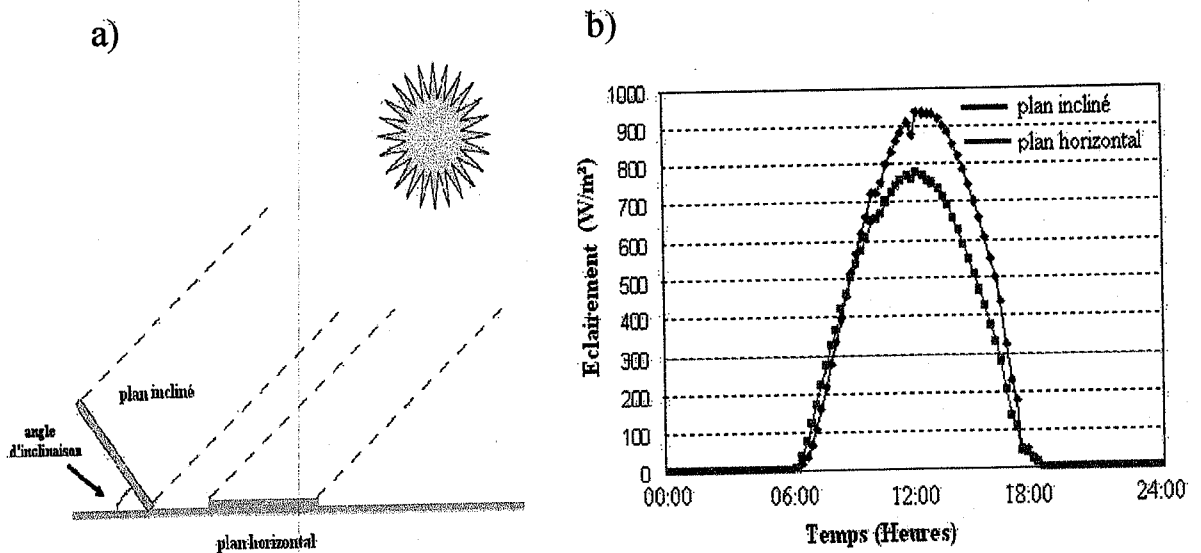


Fig. I.2 : a) : Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné,
 :b) : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.

I.3.1 Rayonnement en Algérie

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m². L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6 KWh/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KWh/m².

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie. [8]

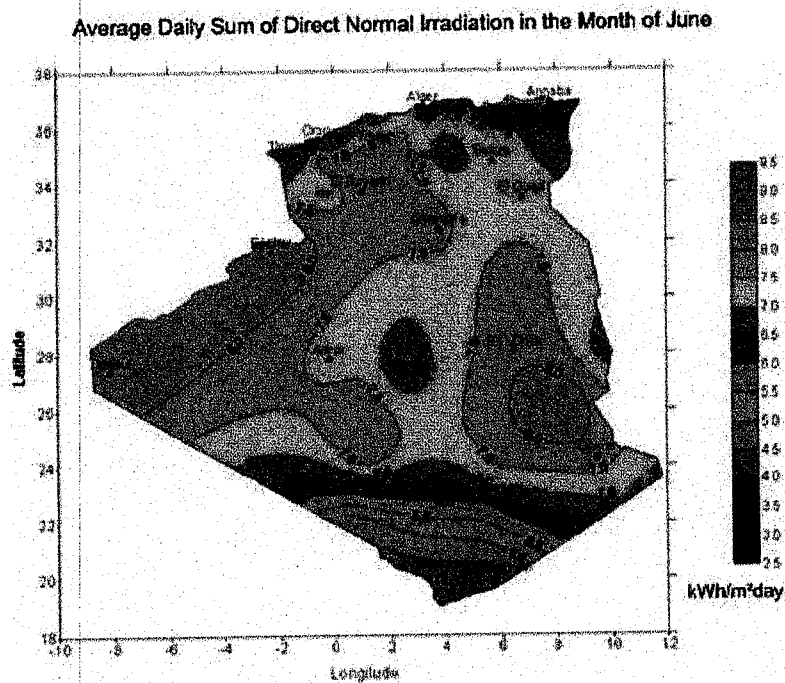


Fig I.3 : Zones énergétiques en Algérie

I.4. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité

I.4.1 Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres (Fig. 1.4). [5]

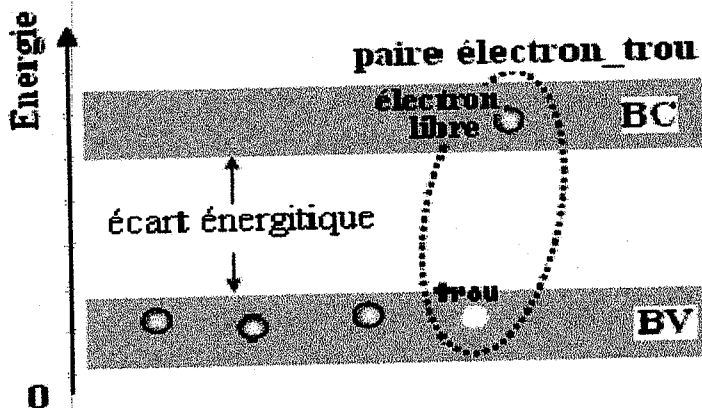


Fig. I.4 Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photogénérateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode, (Fig 1.5). [5]

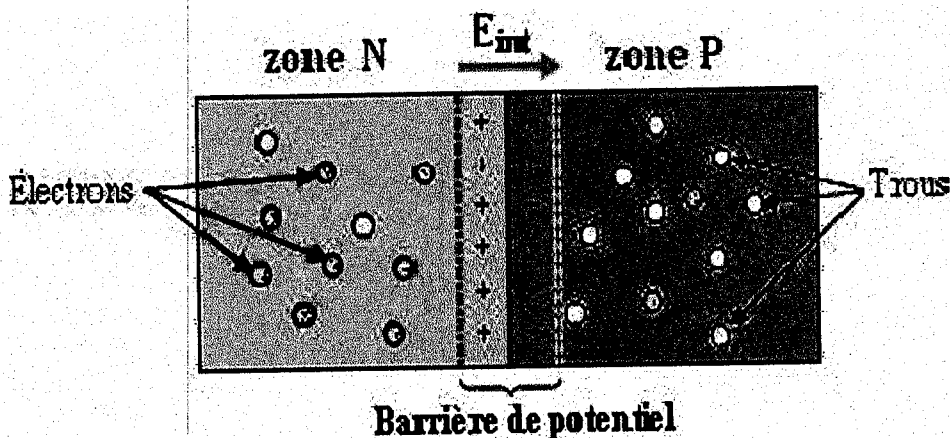


Fig. I.5 La jonction PN.

I.5 Cellule solaire

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs utilisés en tranches fines ou en dépôts. [5] Les matériaux les plus connus sont:

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (Cds)
- l'arséniure de gallium (As Ga)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanim (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

I.5.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée *P* et l'autre dopée *N* créant ainsi une jonction *PN* avec une barrière de potentiel. Une différence de potentiel entre les deux face de la cellule est créée. Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit. Si le photon est très énergétique, il ne peut tout de même extraire qu'un seul électron. L'énergie excédentaire est perdue en chaleur. La zone *N* est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. [13]

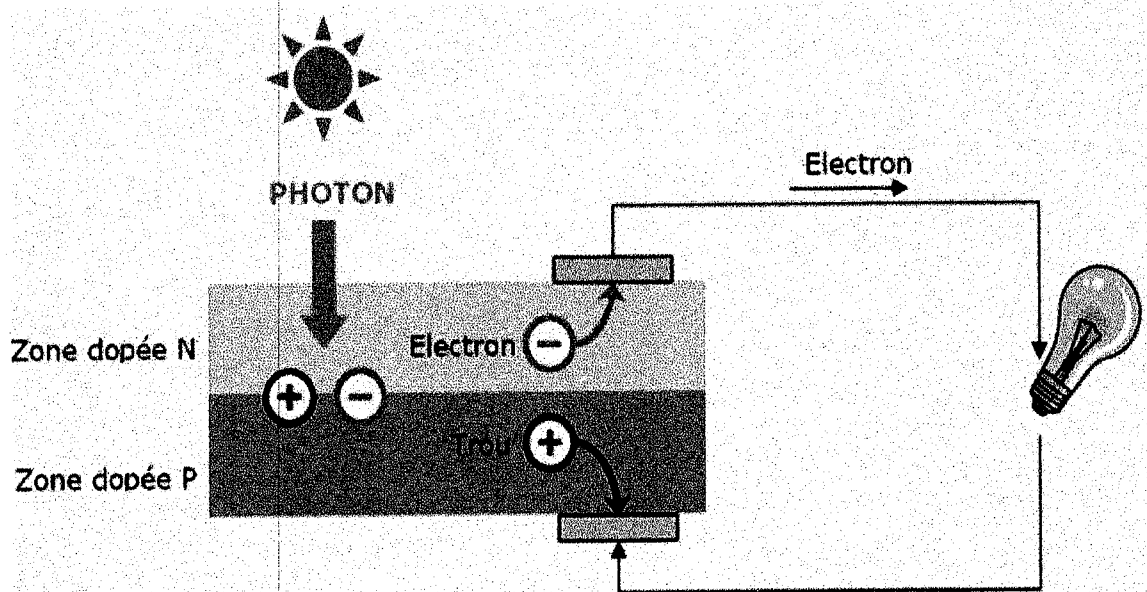


Fig. I.6 Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.6 Modélisation de la cellule solaire

I.6.1 Modèle de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est modélisé par le circuit équivalent de la figure (Fig. I.7). Ce modèle est composé d'un générateur de courant dont la valeur du courant est proportionnel à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, une diode qui modélise la jonction PN présente dans une cellule PV, une résistance série qui modélise les pertes ohmique due aux contacts électriques et enfin une résistance shunt qui modélise les courants de fuite présents dans la cellule PV, Comme le montre la figure ci-dessous:

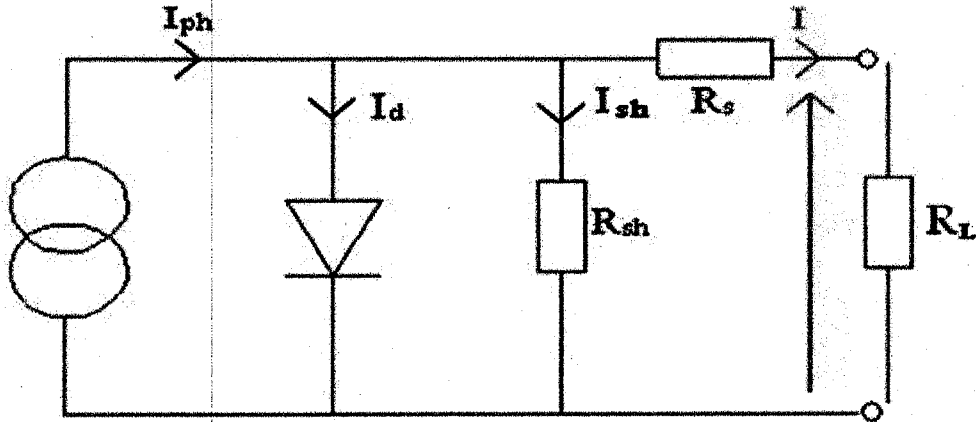


Fig. I.7 Schéma équivalent électrique d'une cellule photovoltaïque.

D'après la loi des nœuds, le courant délivré par une cellule PV est donné par l'expression ci-après:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (I.1)$$

D'où, le courant de la diode I_D est donné par l'équation suivante:

$$I_D = I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \quad (I.2)$$

Le courant aux bornes de la résistance shunt est exprimé par la relation suivante :

$$I_{sh} = (V + R_s I)/R_{sh} \quad (I.3)$$

En pratique $R_{sh} \gg R_s$ donc on peut négliger I_{sh} et conséquence :

$$I = I_{ph} - I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \quad (I.4)$$

En circuit ouvert le courant est nul donc :

$$I = 0, V_{co} \approx \left(\frac{kT}{q}\right) \log[(I_{cc} + I_s)/I_s] \approx (kT/q) \log(I_{cc}/I_s) \quad (I.5)$$

La puissance fournie par cette pile s'écrit sous la forme :

$$P = VI = V \left[I_{ph} - I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \right] \quad (I.6)$$

Avec:

I_{ph} : Photocourant, ou courant photogénéré par l'éclairement (A).

I_s : Courant de saturation de la diode (A).

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

k : Constante de Boltzmann ($k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$).

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

T : Température de la cellule ($^{\circ}\text{K}$).

I.6.2-La caractéristique I-V de la cellule solaire

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire présente le fonctionnement de cette dernière pour toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, Figure I.8. En observant la caractéristique, on peut voir qu'il y a trois points importants:

- Point un (1) correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro volt (courant à court-circuit).
- Point trois (2) correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge; (circuit ouvert).
- Point deux (3) correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire en charge.

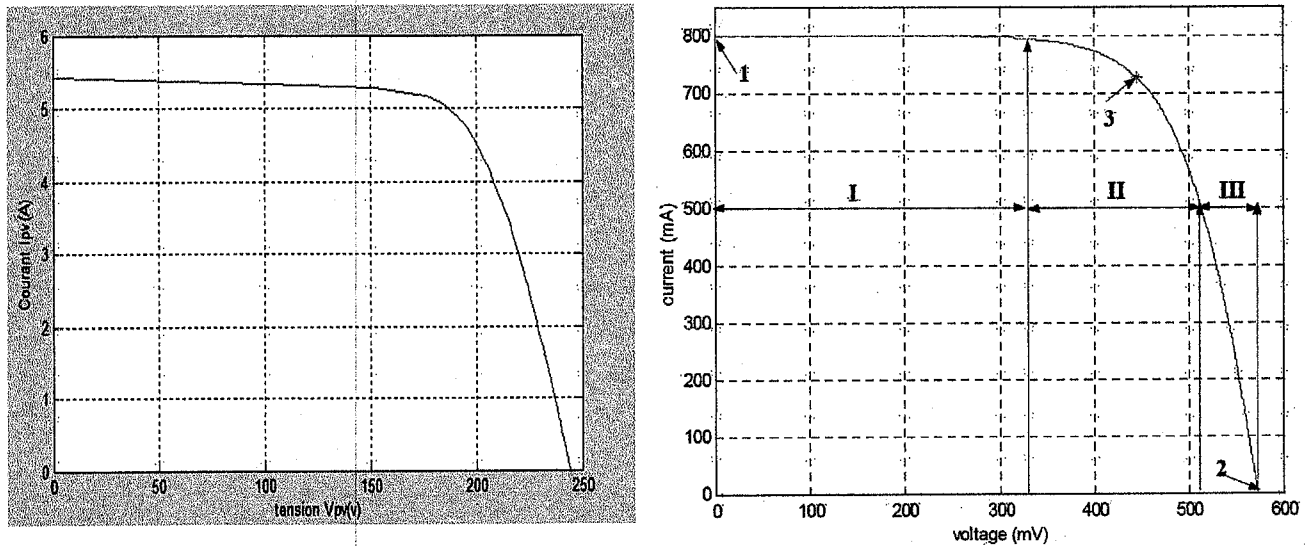


Figure I.8 Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire

La caractéristique (I-V) peut être divisée en trois intervalles différents:

- L'intervalle I où la cellule solaire est considérée comme une source courant; le courant est constant alors que la tension est variable.
- L'intervalle II où la cellule solaire, n'est considérée ni comme une source de courant ni comme une source de tension.
- L'intervalle III où la tension est variable et le courant est constant. La cellule solaire est considérée comme une source tension.

Une fois qu'une cellule solaire est connectée à une charge résistive constante, la charge est représentée par un point fixe quelque part sur la caractéristique I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche.

I.6.3-Paramètres de la cellule solaire

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion, une tension à circuit ouvert V_{oc} , un courant de court-circuit I_{cc} et un facteur de suffisance ff . Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leurs déterminations permettent les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques. [9], [10]

❖ **Courant de court-circuit, I_{cc}**

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes de sortie sont reliées par un fil de résistance nulle. Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée du spectre du rayonnement solaire et de la température.

❖ **Tension de circuit ouvert, V_{oc}**

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de cellules est nul. elle est reliée à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

❖ **Factor de suffisance, FF**

Le facteur de suffisance d'une cellule solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la cellule solaire. Pendant que la cellule solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter le résultat en un facteur inférieur de suffisance.

$$FF = V_{oc} I_{op} / I_{sc} V_{oc} \quad (I.7)$$

❖ **Rendement de la cellule, η_s**

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse incidente.

$$\eta_s = V_{op} I_{op} / GA \quad (I.8)$$

A est la surface génératrice en m^2 et G l'ensoleillement en W/m^2

I.6.4- Les différents types de cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules :

❖ **Les cellules mono- cristallines :** Les capteurs photovoltaïques sont à base de cristaux de silicium encapsulés dans une enveloppe plastique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Leur Rendement est de 15 à 22%.

❖ **Les cellules poly-cristallines. Plusieurs cristaux :** Les capteurs photovoltaïques sont à base de polycristaux de silicium, notablement moins coûteux à fabriquer que le silicium monocristallin, mais qui ont aussi un rendement un peu plus faible. Ces polycristaux sont obtenus par fusion des rebuts du silicium de qualité

électronique. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. [11]

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Leur rendement est de 10 à 13% et un peu moins cher à fabriquer.

❖ **Les cellules amorphes :** (cellules de calculatrices par exemple)

- . Coût de production bien plus bas;
- Rendement plus bas: 8-10% (13% en labo);
- Durée de vie plus faible

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. [11]

I.7 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$

I.7.1 Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. La figure (I.9 a et b) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. [6]

On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement. [9], [12]

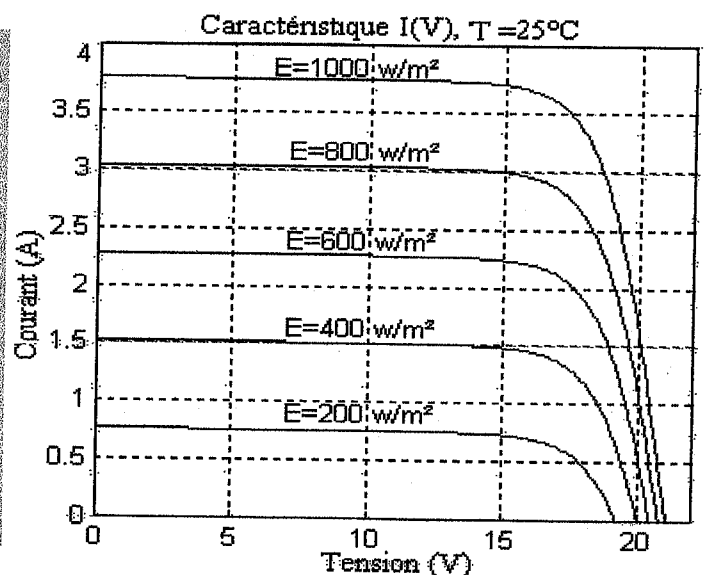
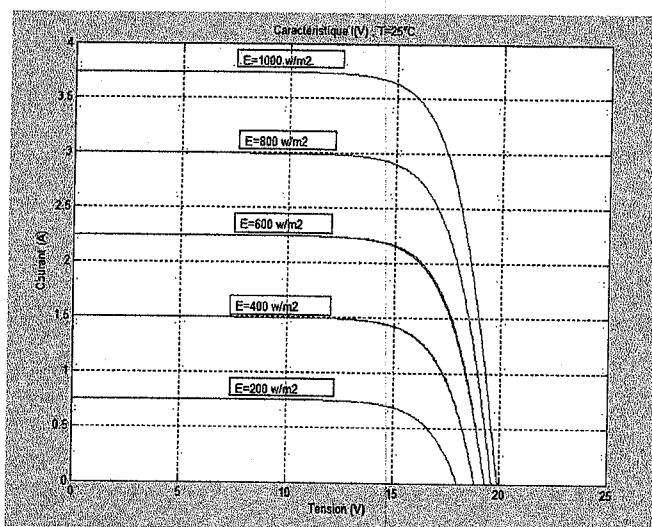


Fig. I.9 a Caractéristique courant-tension sur influence de l'éclairement sur le module

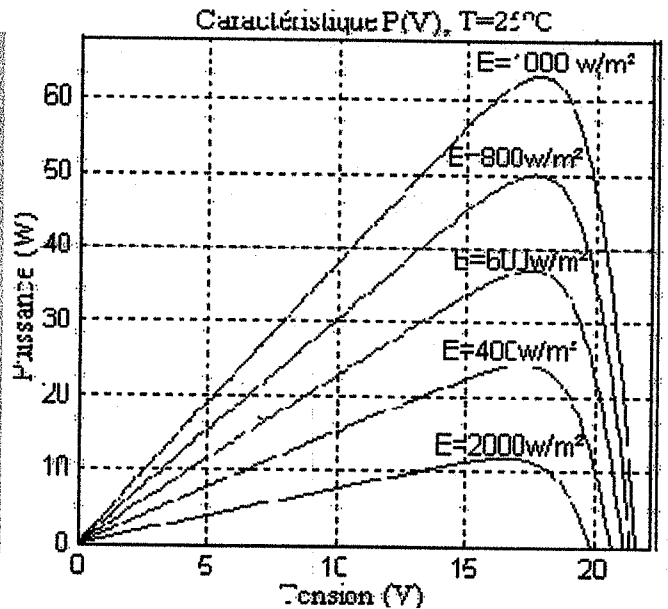
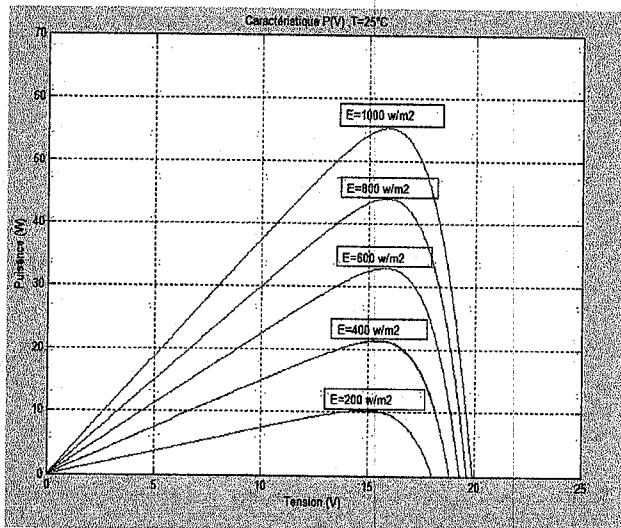


Fig. I.9 b Caractéristique puissance-tension Influence de l'éclairement sur le module

I.7.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température. [6]

La figure (I.10 a et b) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement et constante.

On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale. [9],[12]

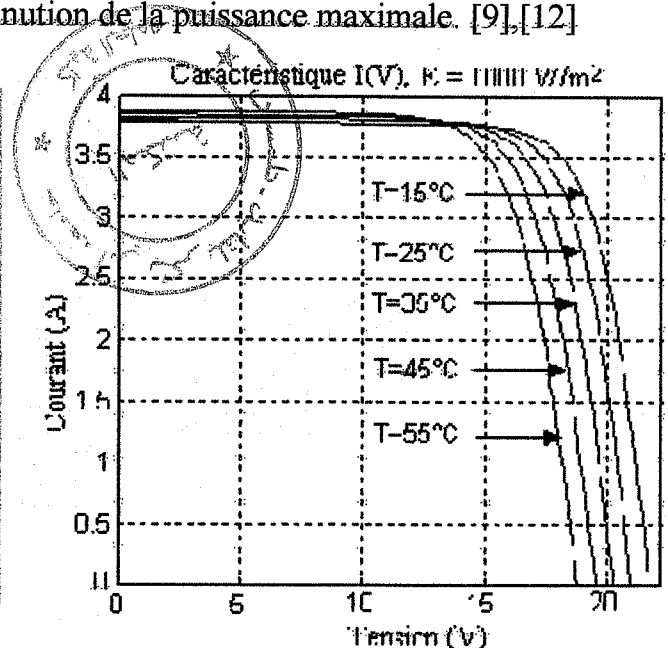
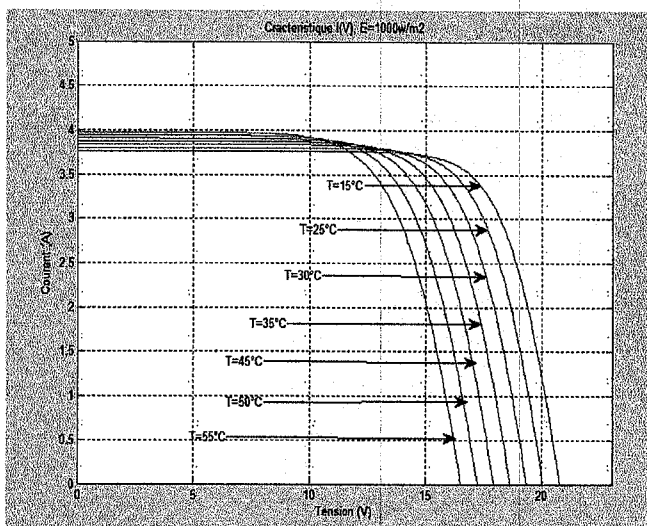


Fig. I.10 a: Caractéristique courant-tension sur influence de la température sur le module

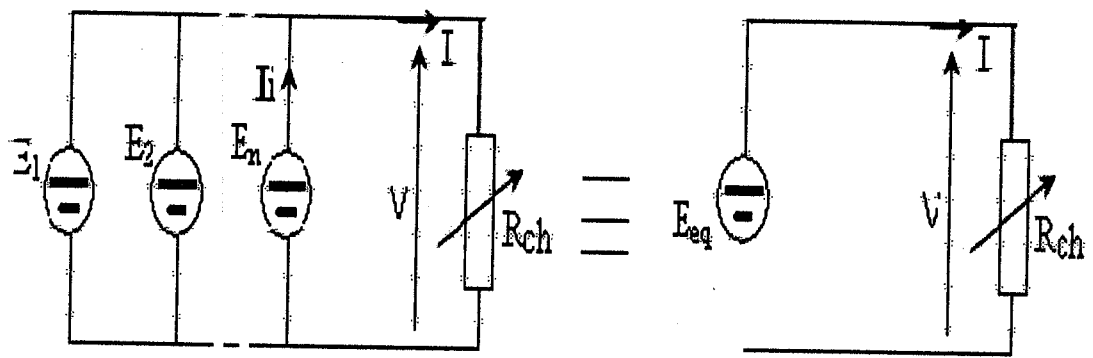


Fig. I.14 Association de N_p modules solaires en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

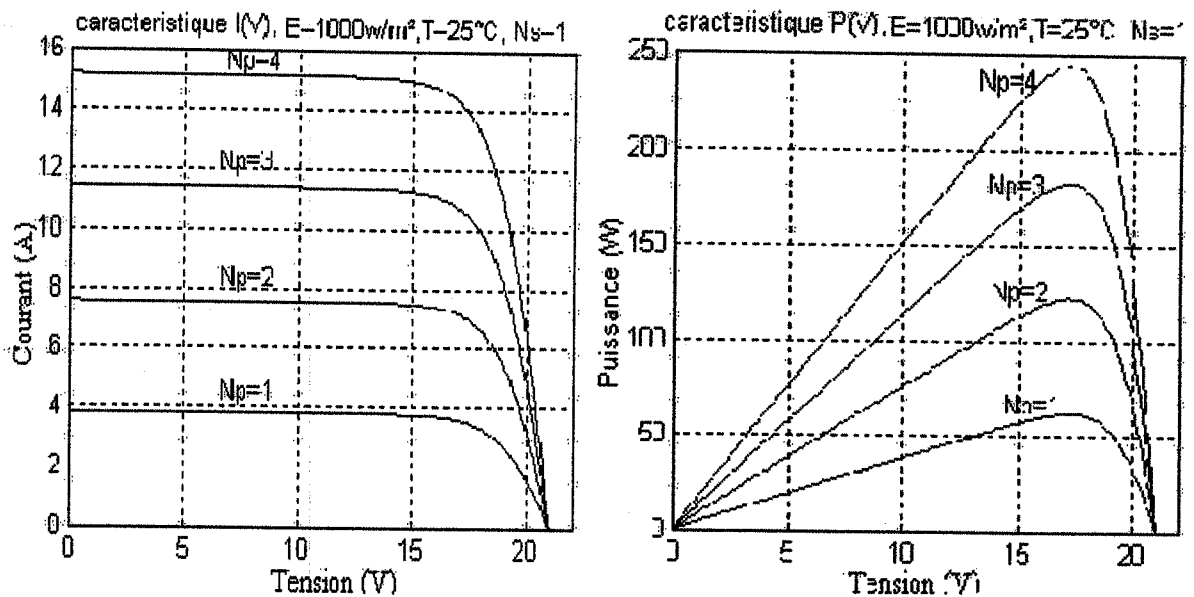


Fig. I.15 Caractéristique de nombre des modules en parallèles

I.8.3 Association mixte (Série + Parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle. [13]

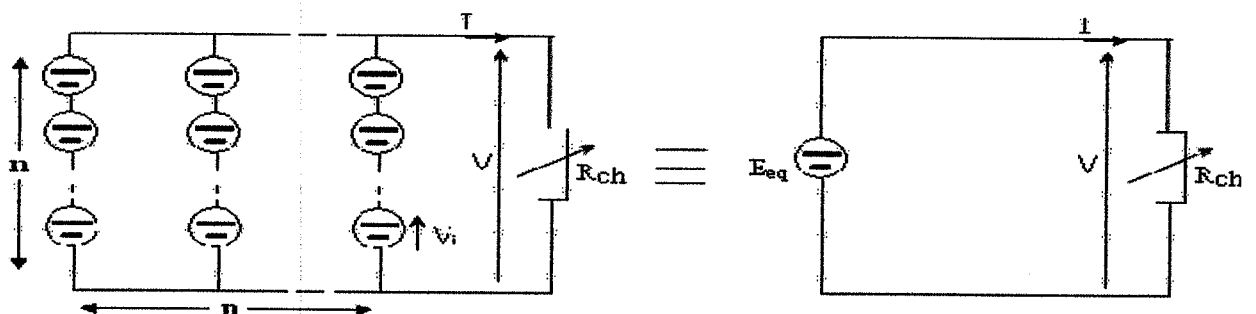


Fig. I.16 Association mixte $N_s N_p$ modules solaires.

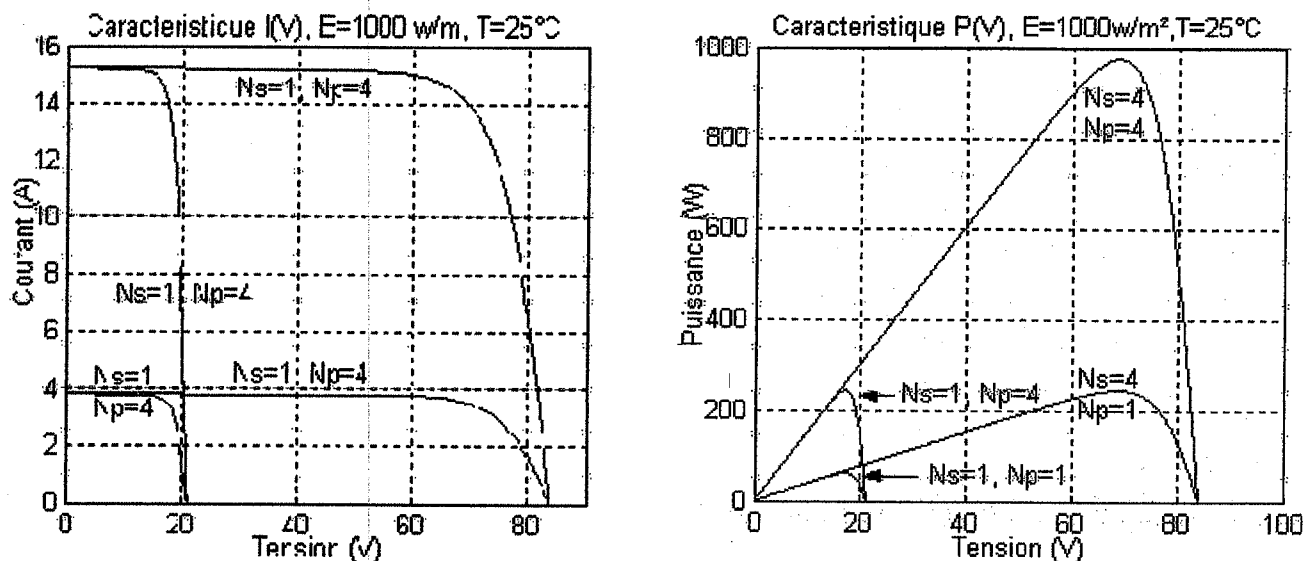


Fig. I.17 Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la nécessité d'étudier la caractéristique du modèle de la photopile. Nous avons présenté les différentes zones de fonctionnement, l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$. Ainsi la synthèse d'assemblage des panneaux peut être soit en série, parallèle ou mixte.

Chapitre II

Systeme hacheur - moteur DC- pompe

II.1. Introduction

Une pompe à énergie solaire est une pompe ordinaire munie d'un moteur électrique. Pour générer sur place l'électricité nécessaire au moteur, un panneau solaire convertit l'énergie du soleil en courant électrique continu. Comme les panneaux solaires génèrent un courant électrique continu, on doit utiliser une pompe à énergie solaire équipée d'un moteur à courant continu, à moins d'y ajouter des composants électriques supplémentaires. [6]

Le groupe moteur-pompe se décompose en deux parties :

- ❖ Le moteur, immergé ou hors d'eau, est à courant alternatif ou continu. Dans le premier cas, sa conception se rapproche des moteurs standards utilisés sur le réseau électrique. Dans le second, ils peuvent être à balais ou à commutation électronique.
- ❖ La pompe est centrifuge ou volumétrique. Les atouts et limites de chaque technologie sont précisés. [15]

II.2. Moteur à courant continu

Les machines électriques tournantes sont des convertisseurs d'énergie. Lorsqu'elles transforment de l'énergie électrique en énergie mécanique, on dit qu'elles fonctionnent en moteur. En revanche, si elles transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique on dit qu'elles fonctionnent en génératrice. Comme indiqué sur la figure (II-1). [17]

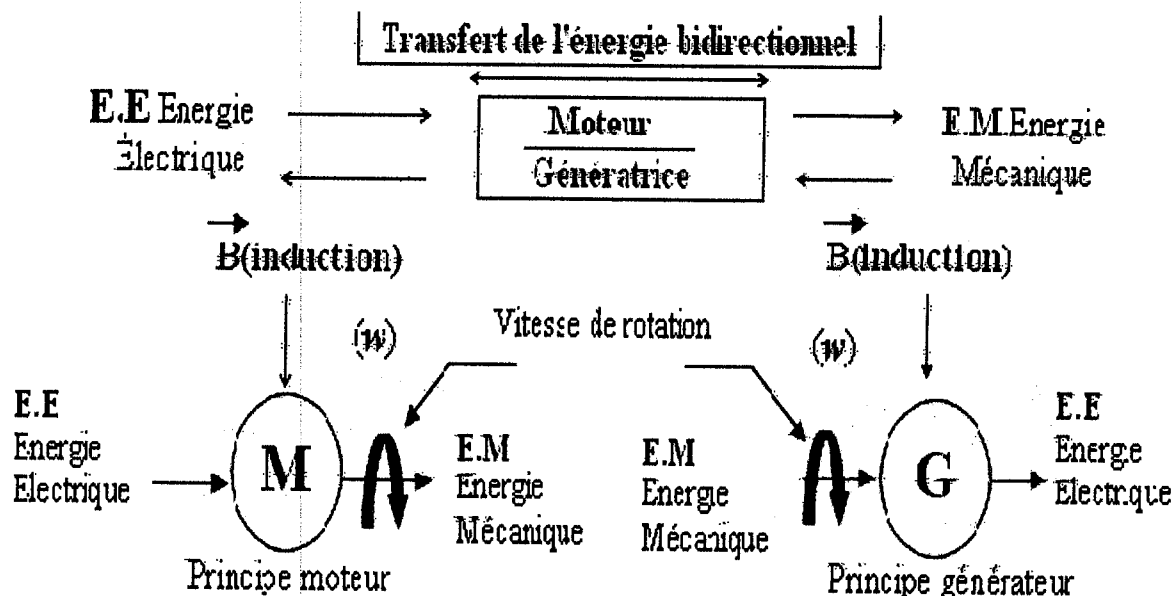


Fig. (II.1): Principes d'une machine à courant continu

II.2.1 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu se compose d'un stator inducteur, électro-aimant qui produit un champ magnétique dans les entrefers, d'un rotor induit qui, en tournant, déplace dans le champ magnétique les conducteurs actifs de son enroulement ; d'un collecteur dont les lames sont soudées aux conducteurs de l'induit et de balais qui sont les liaisons entre le circuit induit mobile et le circuit extérieur fixe. [18]

b

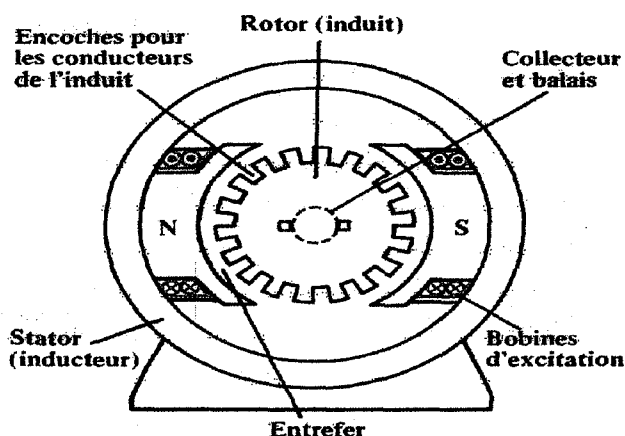


Fig. (II.2.a) : Constitution du MCC

II.2.1.1. Force électromotrice

L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe B . Ce stator peut être un aimant permanent ou un électro-aimant (fig. II.2.a).

L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces F (forces dites « de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m E qui est redressée par l'ensemble {collecteur + balais}. [19]

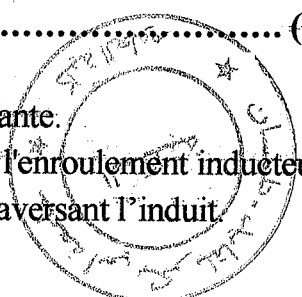
$$F = B \cdot I \cdot L \dots \dots \dots (II.1)$$

F : représente la force électromagnétique résultante.

B : représente l'induction magnétique créée par l'enroulement inducteur.

I : représente l'intensité du courant électrique traversant l'induit.

L : représente la longueur utile d'un conducteur.



La valeur moyenne de la f.é.m E est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire ($\phi = B \cdot S$) et à une constante K qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, surface de chaque spire, nombre de paires de pôles,...)

$$K = P.N/2.\pi.a$$

Avec :

- ❖ P : le nombre de paires de pôles.
- ❖ a : le nombre de paires de voies d'enroulement.
- ❖ N : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires).
- ❖ ϕ : flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb).
- ❖ Ω : vitesse de rotation (en rad.s^{-1}).

Loi de Faraday :

$$E = K . \Omega . \phi \quad [\text{V}] \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

II.2.1.2 Couple électromagnétique

Pour une spire : les deux brins d'une spire placée dans le champ magnétique B, subissent des forces de Laplace F_1 et F_2 formant un couple de force.

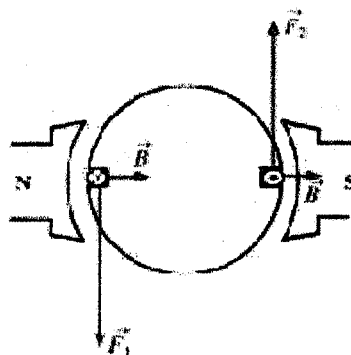


Fig. (II.2.b) : le couple de force dans une MCC

Le couple électromagnétique développé est :

$$C_e = K . \phi . I \quad [\text{N.m}] \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

Le couple utile sur l'arbre moteur peut être déduit de la relation de la puissance utile, soit :

$$C_u = p_u / \Omega \quad [\text{N.m}] \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

II.2.2. Puissance

❖ Puissance électromagnétique (p_{em})

Si l'induit présente une f.é.m E et s'il est parcouru par le courant I, il reçoit une puissance électromagnétique ($P_{em} = E . I$)

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.[19]

$$P_{em} = C_e \cdot \Omega = E \cdot I \quad [w] \dots \dots \dots (II.5)$$

❖ Puissance électrique absorbée (Pa)

$$P_a = U \cdot I \quad [w] \dots \dots \dots (II.6)$$

❖ La puissance utile (pu)

est la puissance disponible sur l'arbre moteur. C'est cette puissance qui est donnée dans les catalogues constructeurs.

$$P_u = C_e \cdot \Omega \quad [w] \dots \dots \dots (II.7)$$

II.2.3. Différentes pertes

| Pertes | Pertes magnétiques P_{fer} | Pertes joules P_J | Pertes mécaniques $P_{méca}$ |
|----------------|---|---|---|
| Causes | Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω . | Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages. | Elles sont dues aux Frottements des diverses pièces en mouvement. |
| Parades | Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit. | Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation. | Utilisation de roulements et de lubrifiants. |

Tableau(II.1): Pertes du MCC.

Remarque

La somme des pertes mécaniques et fer est appelée pertes constantes P_c . Comme elles dépendent de la vitesse de rotation et de l'état magnétique de la machine, on peut déterminer C_p appelé couple de pertes avec :

$$C_p = P_c / \Omega \quad [N.m] \dots \dots \dots (II.8)$$

La figure suivante résume les différents types de puissance et l'emplacement de leur production.

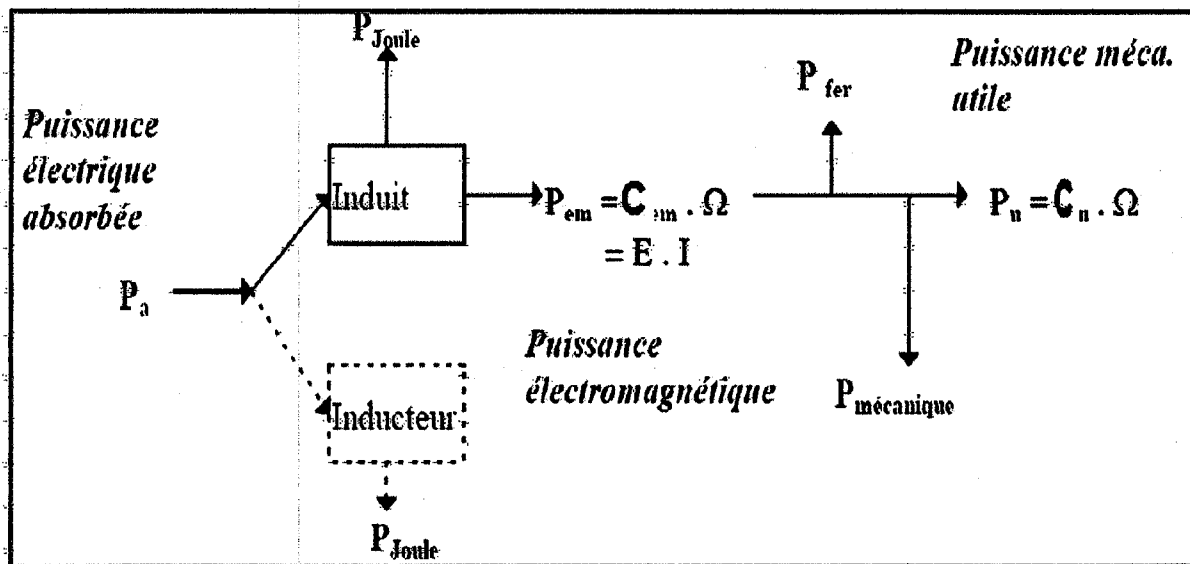


Fig. (II.3) : Diagramme de puissance.

II.2.4. Rendement (η)

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \dots \dots \dots (II.9)$$

II.2.5. Les différents types de moteurs à courant continu

Suivant la façon que l'induit est monté par rapport à l'inducteur on distingue :

❖ **Le moteur à excitation indépendante**

L'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes. Les cas fréquents où la tension d'excitation est constante sont équivalents à ceux des moteurs à aimants permanents, dont le flux est constant.

❖ **Le Moteur à excitation shunt**

L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle.

❖ **Le Moteur à excitation série :**

L'inducteur et l'induit sont connectés en séries

Il existe aussi des moteurs à courant continu à aimant permanent ou l'inducteur est constitué d'un aimant permanent.

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants: [4]

- ❖ Bon rendement.
- ❖ Souplesse de fonctionnement.
- ❖ Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- ❖ Fiabilité et autonomie de l'installation.
- ❖ Faible puissance au démarrage.

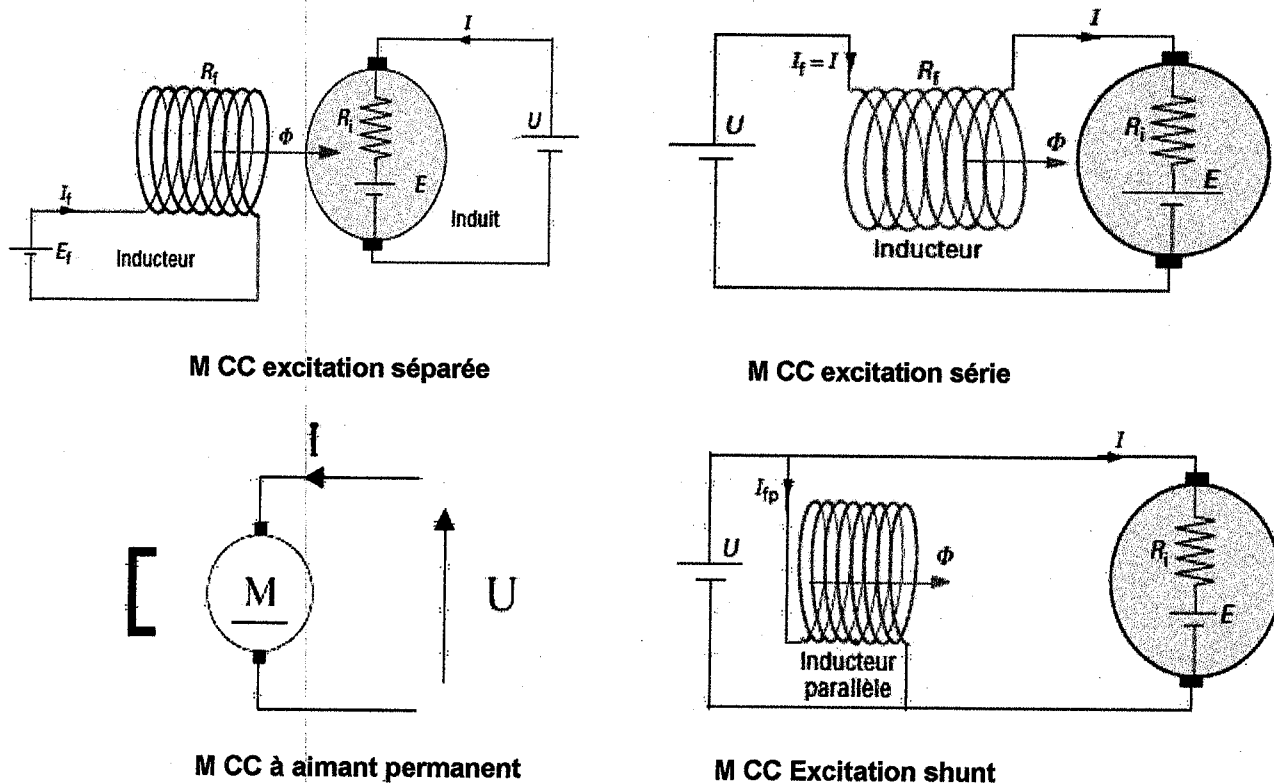


Fig. (II.4) : différents modes d'excitation

II.2.6.Processus énergétique d'un moteur à courant continu [20]

Soit un moteur à excitation shunt alimenté par tension U_a absorbant un courant d'induit I_a et courant d'excitation I_f .

La puissance totale amenée au moteur P_a égale :

$$P_a = U (I_a + I_f) \dots\dots\dots (II.10)$$

Une partie P_e de P_a est dépensée pour compenser les dans l'enroulement inducteur telle que :

$$P_e = U_a \cdot I_f \dots \dots \dots (II.11)$$

Une partie P_{ca} est dépensée dans l'enroulement d'induit et est donnée par :

$$P_{ca} = R_a \cdot I_a^2 \dots \dots \dots (II.12)$$

R_a : résistance entre les deux bornes de l'enroulement d'induit. Le reste de la puissance est transformée en puissance électromagnétique P_{em} qui est à son tour transformé en puissance mécanique $P_{méc}$ sachant que :

$$P_{em} = E \cdot I_a \dots \dots \dots (II.13)$$

La puissance mécanique utile P_u fournie par le moteur est inférieure à la puissance P_{em} d'une valeur $(\Delta P_f + \Delta P_{méc})$ égale à la somme des pertes fer dans l'induit et des pertes mécaniques.

$$P_u = P_{em} - (\Delta P_f + \Delta P_{méc}) \dots \dots \dots (II.14)$$

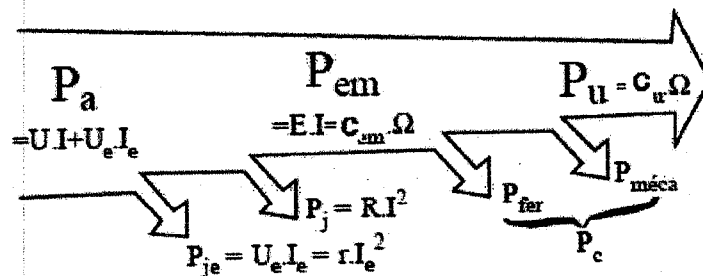


Fig.(II.5): Bilan énergétique du MCC a auto excitation

❖ Équation de tension du circuit d'induit

$$U_a = E + R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \dots \dots \dots (II.15)$$

Avec :

- U_a : Tension aux bornes de l'induit.
- E: Force contre électromotrice (f.é.m).
- I_a : Courant d'induit.
- R_a : Résistance d'induit.
- L_a : Inductance d'induit.

Pour le circuit d'excitation l'équation des tensions est donnée par :

$$U_f = R_f \cdot I_f + L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} \dots \dots \dots (II.16)$$

Avec :

I_f : Courant d'inducteur.

R_f : Résistance d'inducteur.

L_f : Inductance d'inducteur.

En régime permanent (statique), l'équation (II.14) et (II.15) deviennent respectivement :

$$U_a = E + R_a \cdot I_a \dots\dots\dots (II.17)$$

$$U_f = R_f \cdot I_f \dots\dots\dots (II.18)$$

On note qu' I_a et I_f sont le courant d'induit et le courant d'inducteur en régime permanent.

❖ Equations des couples

Sur l'arbre du moteur agisse les couples suivants :

Le couple électromagnétique C_e .

Le couple statique C_r .

Le couple dynamique C_d .

Le couple statique peut être représenté sous la forme de la somme suivante :

$$C_r = C_0 + C_2 \dots\dots\dots (II.19)$$

Avec :

C_0 : couple de la marche à vide dû au frottement et aux pertes fer.

C_2 : couple résistant produit par tous les éléments entraînés par le moteur. C_2 est le couple résistant utile car il correspond à la puissance utile P_u .

Il reste le couple dynamique qui est donné par :

$$C_D = J \cdot d\Omega/dt \dots\dots\dots (II.20)$$

C_D l'équation du couple s'écrit :

$$C_e - C_r = J \cdot d\Omega/dt \dots\dots\dots (II.21)$$

J : moment d'inertie.

II.2.7. Caractéristique mécanique [21]

Le couple d'une machine varie en générale avec la vitesse de la machine.

❖ Fonctionnement à couple constant

Dans ce mode de fonctionnement du moteur, le couple est indépendant de la vitesse, tandis que la puissance est proportionnelle à la vitesse.

❖ fonctionnement à puissance constante

Ce mode de fonctionnement est l'inverse du 1^{er} mode d'entraînement, c'est-à-dire que le couple est inversement proportionnel à la vitesse et que la puissance est constante.

Les (II.6) et (II.7), montrent les caractéristiques électromécaniques pour chacun des modes de fonctionnement.

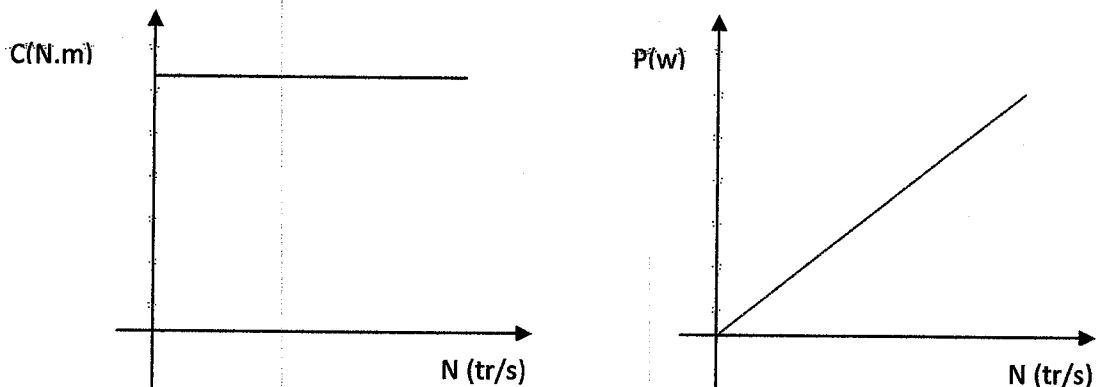


Fig. (II.6) : fonctionnement à couple constante

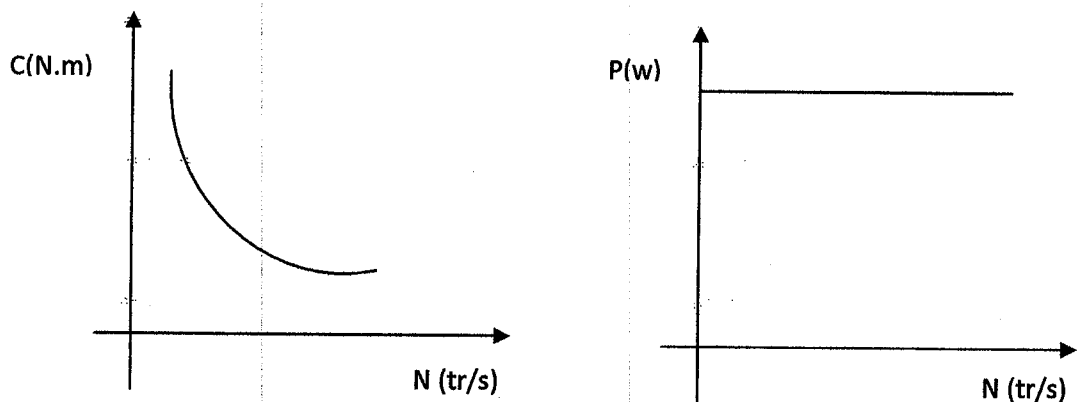


Fig. (II.7) : fonctionnement à puissance constante

II.2.8. Modélisation et simulation d'un MCC

La modélisation numérique du moteur à courant continu peut se faire de plusieurs manières, et plusieurs repères sont possibles. [22]

Pour cela, notre choix est porté sur la modélisation du moteur à courant continu dans le système d'axes « d, a » (voir figure II.8). L'outil Matlab Simulink présente une bonne plateforme pour la validation et la simulation de nos modèles.

II.2.8.1. Moteur à Excitation shunt

Le modèle du moteur à excitation shunt est représenté dans le système d'axes (d, a) comme suit :

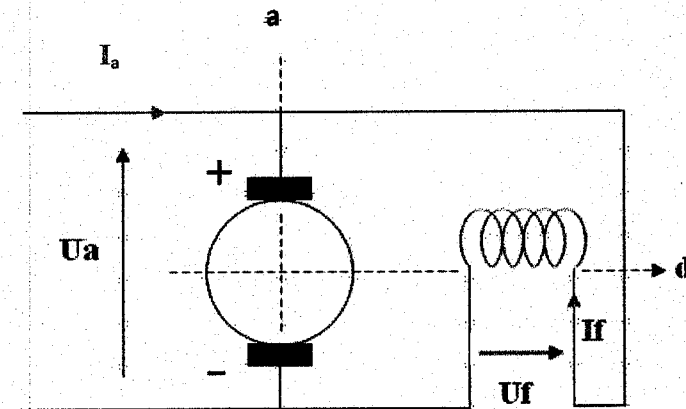


Fig. (II.8) : Schéma du MCC à excitation shunt.

Le circuit d'induit est en parallèle avec l'inducteur, donc la tension aux bornes des deux circuits est la même, par contre le courant diffère parce qu'il dépend des paramètres de chaque circuit.

$$U_a = U_f \dots \dots \dots (II.22)$$

❖ Equations électriques

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = M_d f \cdot I_a \cdot I_f \dots \dots \dots (II.23) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_f = R_f \cdot I_f + L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} \dots \dots \dots (II.24) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = R_a \cdot I_a + \Omega \cdot M_d f + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \dots \dots \dots (II.25) \end{array} \right.$$

❖ Equations mécaniques

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r \dots \dots \dots (II.26)$$

On remplace « C_e » par son expression, l'équation (II.22) devient :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{M_{fd} \cdot I_a \cdot I_f}{J} - \frac{C_r}{J} \dots\dots\dots (II.27)$$

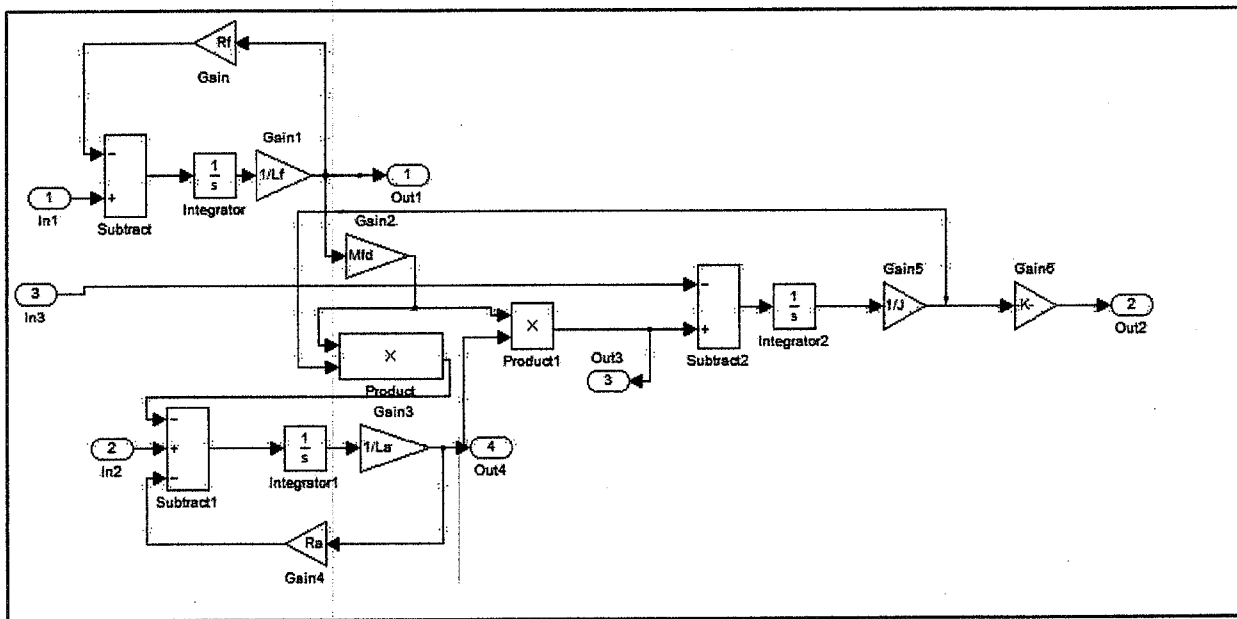


Fig.(II.9) : Le schéma bloc du moteur à courant continu à excitation shunt

❖ paramètres utilisés pour la simulation

- Tension nominale : Un= 180v.
- Courant nominale In = 4.9 A.
- Résistance de l'induit : Ra= 3 Ω .
- Inductance de l'induit : La= 0.011 H.
- Résistance de l'inducteur : R_f= 900Ω.
- Inductance de l'inducteur : L_f= 40 H.
- Moment d'inertie : J=0.005 Kgm².
- Mutuelle : M_{fd}= 5.56.

II.2.8.1.1. Les résultats de la simulation à vide

Les figures ci-dessus représentant les caractéristiques dynamiques et statiques du MCC commandé par la tension d'induit pour un essai caractérisé par démarrage à vide.

On remarque qu'en régime transitoire, le courant au démarrage fait un pic ou il atteint ça valeur maximale puis diminue jusqu'à la valeur 2,1.10⁻⁶A et reste constant, parallèlement au couple, la vitesse de rotation ce stabilise a la valeur de 1550 (tr/min).

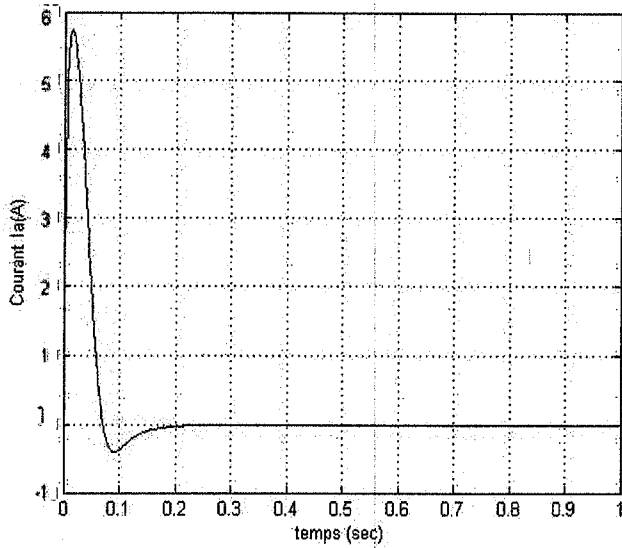


Fig.(II.10) : Courant d'induit(I_a) en fonction du temps

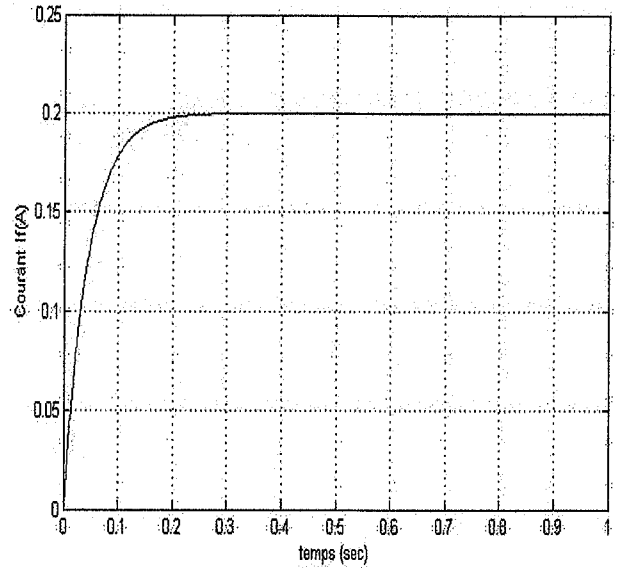


Fig.(II.11) : Courant d'induit(I_f) en fonction du temps

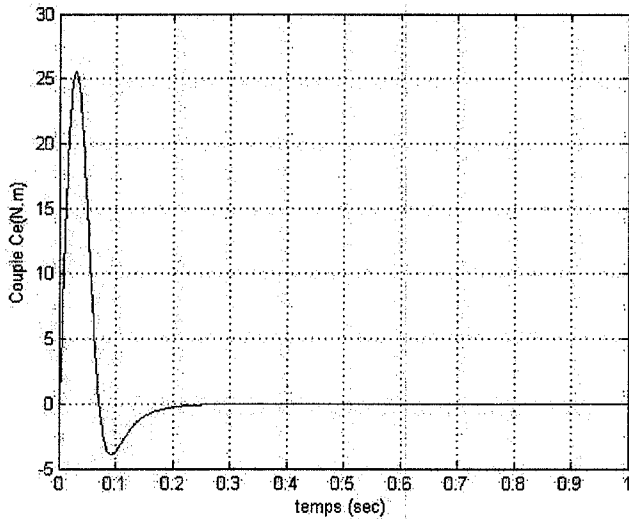


Fig. (II.12) : Couple électromagnétique(C_e) fonction du temps

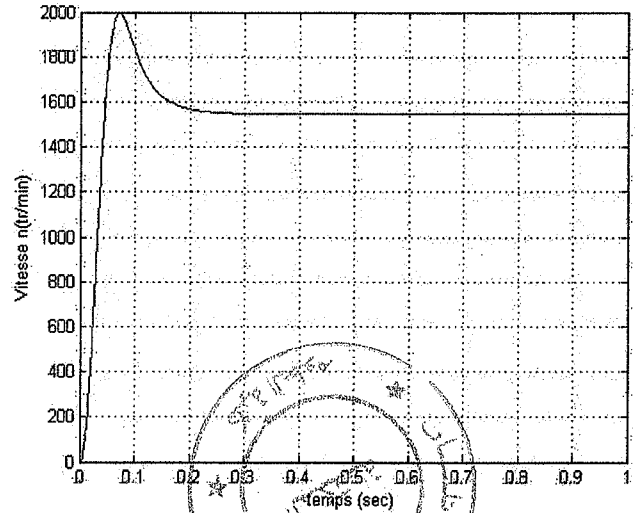


Fig.(II.13) : Vitesse de rotation(n) fonction du temps

II.2.8.2. moteur à courant continu à aimant permanent

La modélisation du moteur est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu. [1]

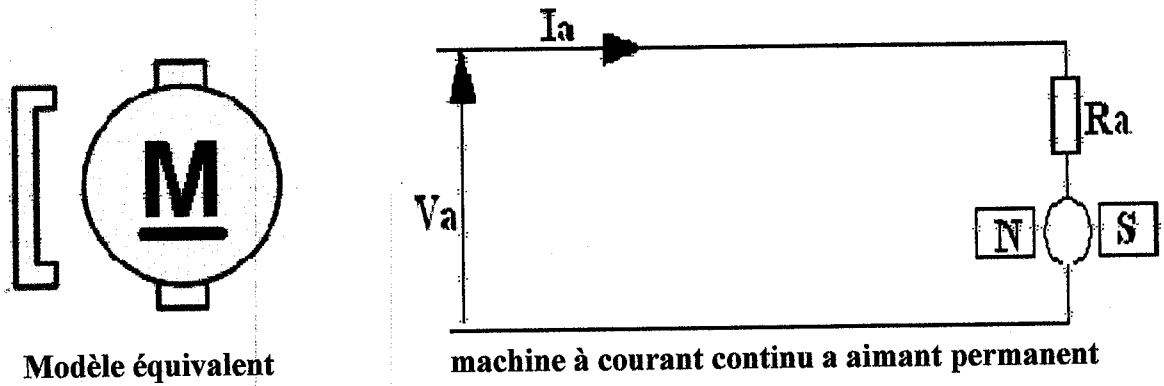


Fig. (II.14) : schéma du Mcc à aimant permanent

❖ Equations électriques

$$U_a = \Omega \cdot k_e + R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \dots \dots \dots (II.28)$$

$$C_e = k_t \cdot I_a \dots \dots \dots (II.29)$$

k_e, k_t : constantes de tension et de couple de moteur.

❖ Equations mécaniques

$$C_e - C_r = J/P \cdot d\Omega/dt \dots \dots \dots (II.30)$$

Représentation sous variables d'état : [9]

$$\frac{d(I_a)}{dt} = \frac{1}{L_a} \cdot (- R_a \cdot I_a - \Omega \cdot k_e + U_a) \dots \dots \dots (II.31)$$

$$\frac{d(\Omega)}{dt} = (C_e - C_r) \cdot \frac{P}{J} \dots \dots \dots (II.32)$$

La résolution du modèle mathématique du moteur est écrite en variable d'état sous la Forme matricielle suivante :

$$[X'] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \dots \dots \dots (II.33)$$

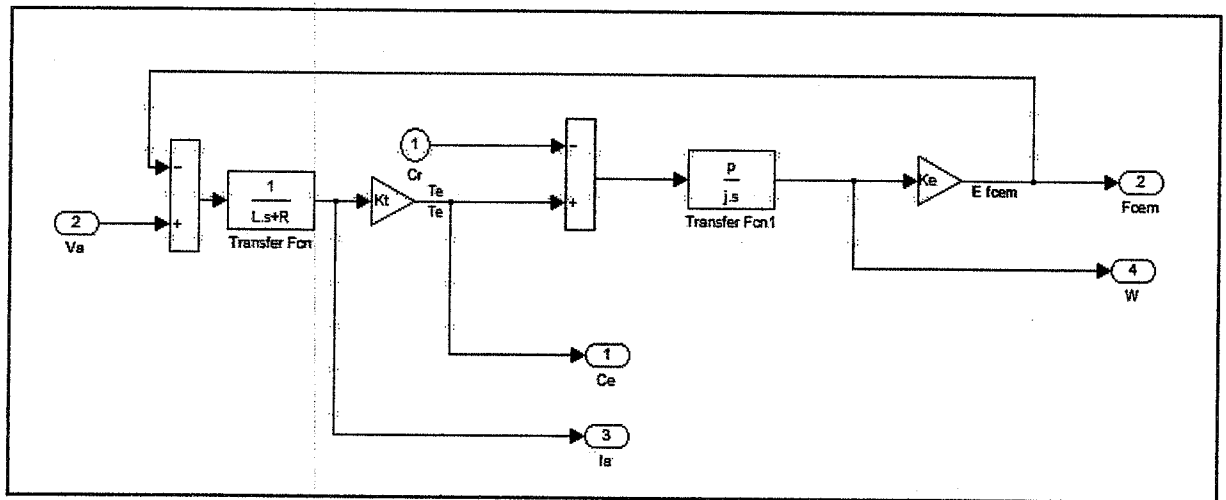


Fig.(II.15) : Schéma bloc du moteur à aimant permanent

❖ paramètres utilisés pour la simulation

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Tension nominale : | Un= 180v. |
| Courant nominale | In = 4.9 A. |
| Résistant de l'induit : | Ra= 3Ω |
| Inductance de l'induit : | La= 0.034 H |
| Moment d'inertie : | J=0.0024 Kgm ² |
| Constante de F.é.m. | ke = 0.94 |
| Couple résistant : | Cr=0. |

II.2.8.2.1. Résultat de simulation de moteur à aimant permanent à vide

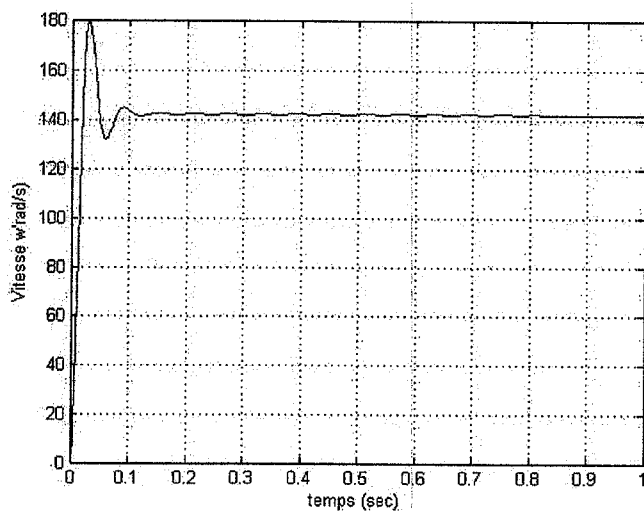


Fig.(II.16) : Vitesse w(rad/sec) en fonction du temps

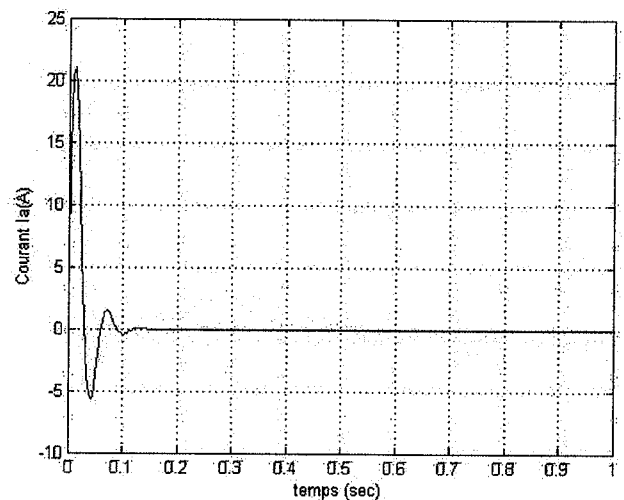


Fig.(II.17) : Courant d'induit(Ia) en fonction du temps

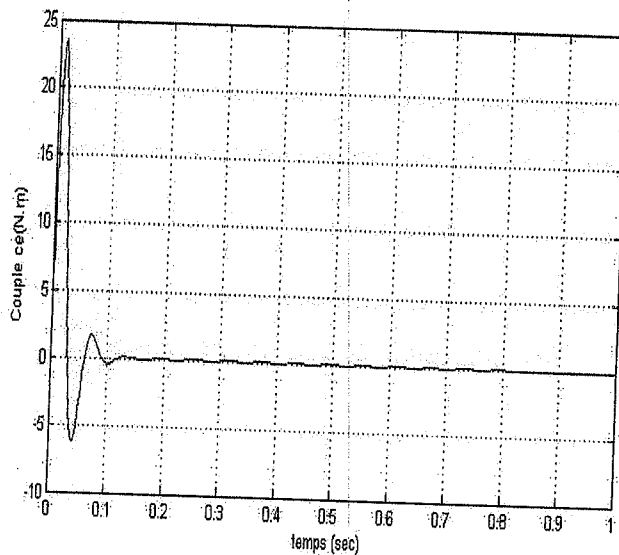


Fig. (II.18) : Couple électromagnétique (C_e) fonction du temps

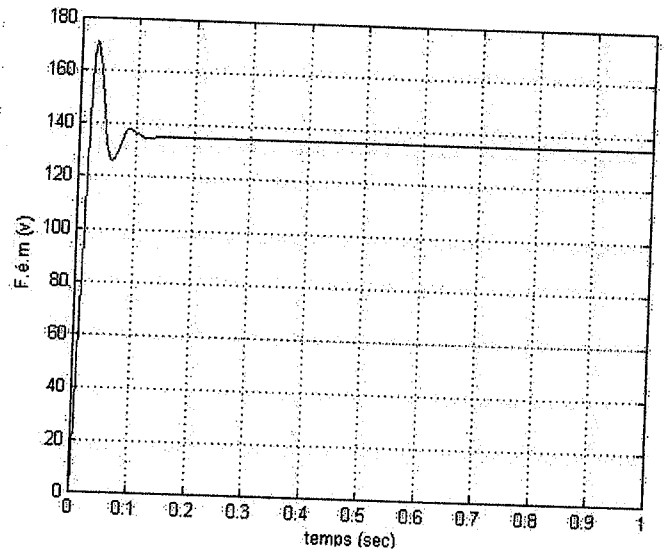


Fig. (II.19) : (F.é.m.) fonction du temps

II.3. Les pompes

On appelle pompes les machines qui réalisent l'écoulement d'un liquide en utilisant une quantité d'énergie mécanique fournie par un moteur. Cette dépense d'énergie est nécessaire parce que l'écoulement a lieu dans le sens des pressions croissantes, la pompe doit par conséquent vaincre une certaine résistance dont la nature varie suivant l'utilisation de l'appareil.

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants: [23]

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaités.
- L'énergie consommée.

II.3.1. Pompe volumétrique

II.3.1.1. Principe de fonctionnement

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

L'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide. L'eau est pratiquement incompressible. Par suite, si un piston coulisse parfaitement dans un tuyau plein d'eau, l'eau sera déplacée le long du tuyau sous l'effet du mouvement du piston. De même, si le tuyau plonge en partie ou en totalité dans l'eau, au moment où

l'on soulève le piston le vide est produit dans la partie inférieure du tuyau, et l'eau monte dans le tuyau par aspiration.

Le débit de ces pompes est en général un débit continu ou quasi-continu. Le principal avantage des machines rotatives c'est qu'elles se prêtent aisément à la mécanisation et aux grandes vitesses de fonctionnement. Cet avantage est un facteur important, car à dimensions égales, plus une pompe est rapide, plus son débit est fort et plus elle est productive et rentable. En outre, dans un régime continu de fonctionnement les risques de coups de bélier et de cavitation sont bien moins importants que dans le cas des machines à mouvement alternatif.

II.3.1.2. Constitution

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté.

On distingue généralement les pompes volumétriques rotatives et les pompes volumétriques alternatives.

❖ Les pompes volumétriques rotatives

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de la pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

Ces pompes se subdivisent en : pompes à palettes, pompes à engrenages, pompes à rotors hélicoïdaux excentrés, pompes péristatiques.

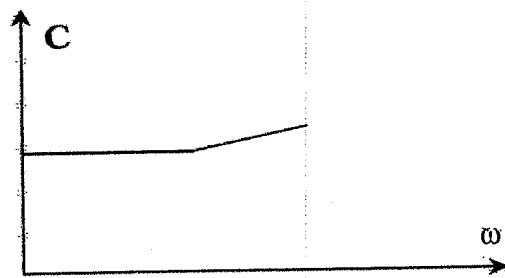
❖ Les pompes volumétriques alternatives

La pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. On distingue :

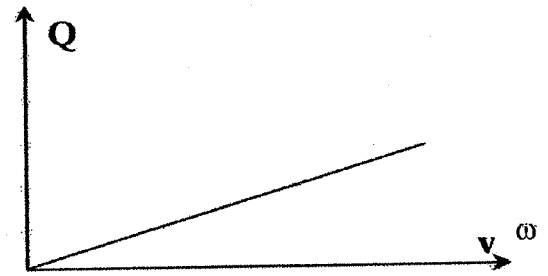
Les pompes à piston, les pompes doseuses.

II.3.1.3. Caractéristiques

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse.



Le couple C_e (N.m) est pratiquement constant quelle que soit la vitesse (a)



Le débit Q (m^3/s) est proportionnel à la vitesse.(b)

Fig. (II.20) : courbes caractéristiques du couple en fonction de la vitesse (a) et du débit en fonction de la vitesse (b)

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

II.3. 2. Pompe centrifuge

II.3.2.1. 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 entre au centre de la pompe et est poussé vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

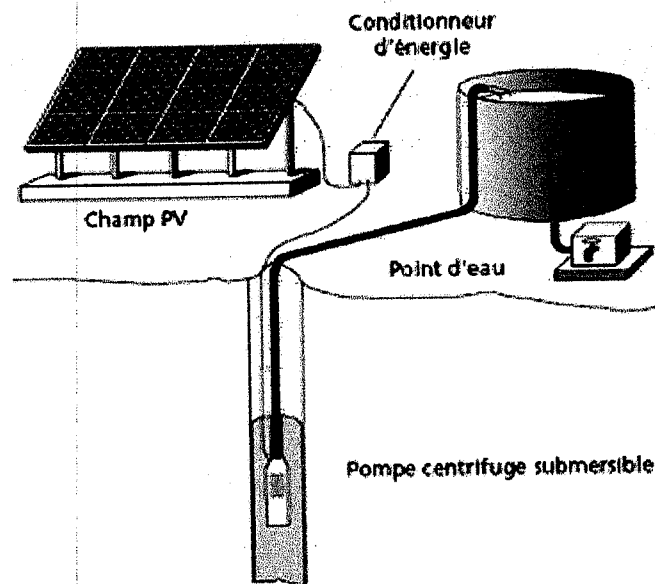


Fig.(II.21) : Exemple d'installation avec une pompe centrifuge

II.3.2.2 Constitution

Une pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe
- Un distributeur dans l'axe de la roue
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale.

Le schéma (II.22) représente le type de pompe le plus courant, la pompe centrifuge à volute, généralement connue sous le nom simple de "pompe centrifuge". Elle comporte un carter en volute, communiquant avec un canal extérieur en forme de coquille d'escargot à section transversale graduellement variable. L'écoulement de l'eau à la sortie du rotor se transforme en écoulement tangentiel dans ce canal où il sera ralenti progressivement. Ainsi l'eau sort tangentielllement et passe dans la conduite de refoulement à vitesse réduite et à forte pression.

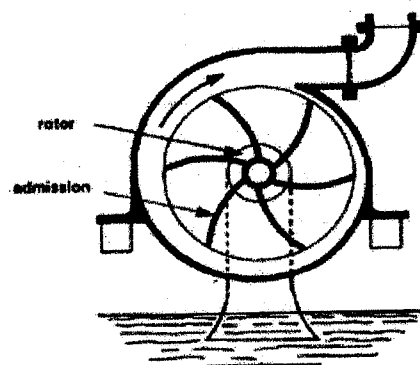


Fig. (II.22) Illustration d'une pompe centrifuge à volute

II.3.2.3. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

Ces pompes peuvent s'adapter à de petits forages, ce qui permet de capter les nappes phréatiques profondes qui ont souvent un niveau d'eau dynamique.

$Q_n = 2.597 \text{ l/s}$; $\omega_n = 150 \text{ rad/s}$; $P_{ab} = 521 \text{ W}$;
 $k_0 = 7,1365 \cdot 10^{-4} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$; $k_1 = -1,84127 \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})(\text{m}^3/\text{h})$;
 $k_2 = 209,5238 \cdot 10^3 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{sec})^2$
 Paramètres de canalisation:
 $H_g = 8 \text{ m}$; $k_h = 0,7178 \cdot 10^5$; $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{sec}$; $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$;

❖ Caractéristiques débit- vitesse

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une H_m donnée pour obtenir un débit. [24]

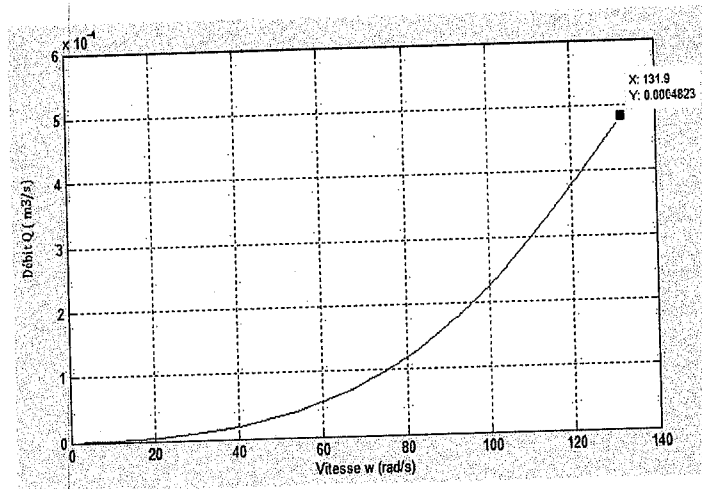


Fig. (II.23) Caractéristiques débit- vitesse d'une pompe centrifuge

❖ Caractéristiques débit- temps

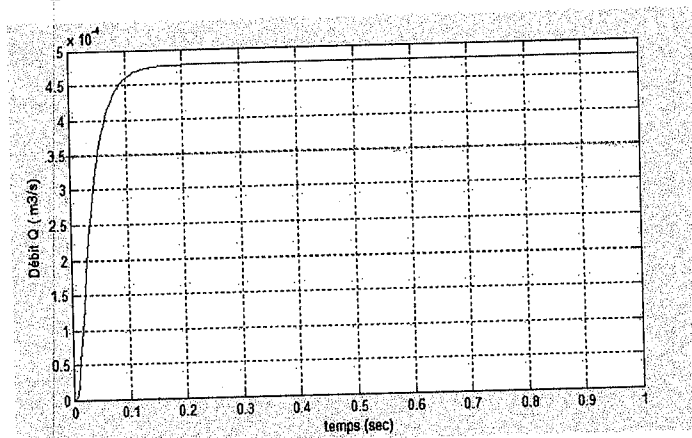


Fig. (II.24) Caractéristiques débit- temps d'une pompe centrifuge

❖ **Caractéristiques débit - hauteur**

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit.

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client les courbes Q(Hm) maximale et minimale correspondant aux diamètres maximal et minimal possibles de la roue. [22]

Si la charge du moteur est une pompe émergee monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale Hm en fonction du débit Q. En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN "

$$H_m = k_0 \omega^2 - k_1 \omega Q - k_2 Q^2 \dots \dots \dots (II.34)$$

Avec :

k_0, k_1, k_2 : des constantes propres de la pompe donnée par le constructeur.

ω : La vitesse (rad/sec)

Hm : la hauteur (mètre)

Q : débit (m³/s)

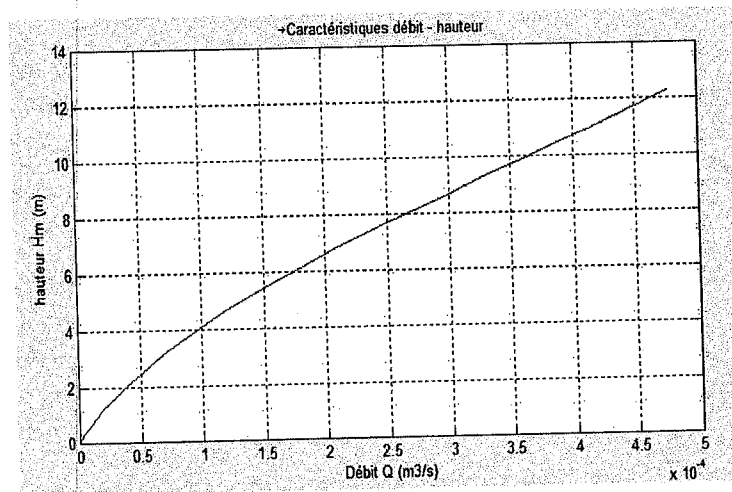


Fig. (II.25) Caractéristiques débit - hauteur d'une pompe centrifuge.

II.3.3. Comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques

Pour comparer au mieux les technologies centrifuges et volumétriques, j'ai dressé le tableau ci dessous:

| Les pompes | Principe de fonctionnement | Avantages | Inconvénients | Technologie |
|--------------------|---|--------------------------|--|---|
| Pompe centrifuge | Variation de la vitesse de l'eau pour augmenter la pression | Couple nul au démarrage. | | |
| Pompe volumétrique | Variation du volume d'eau pour augmenter la pression. Débit d'eau proportionnel à la vitesse moteur | Bon rendement | Couple important au démarrage (pas idéal pour un panneau solaire). Faible débit 5m ³ /h | A palette, piston, diaphragme (pour les grandes profondeurs). |

Tableau (II.2) : comparaisons entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques

II.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [7].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [7].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II.1), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [7].

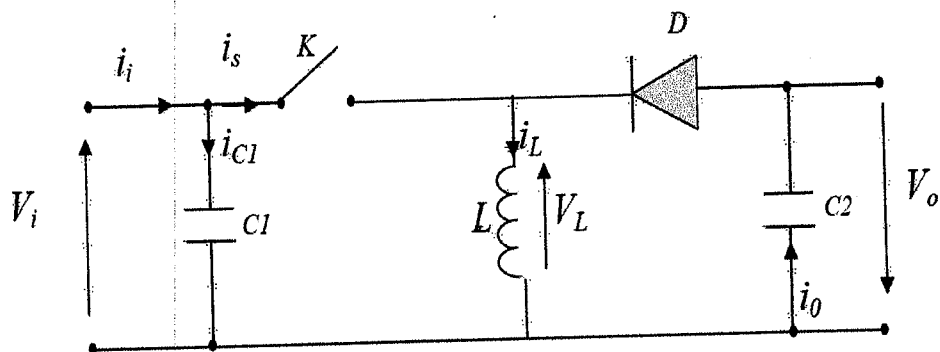


Figure (II.26) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

II.4.1 Hacheur survolteur (Boost)

II.4.1.1 Principe de fonctionnement:

Dans ce hacheur la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'ou sans nom. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

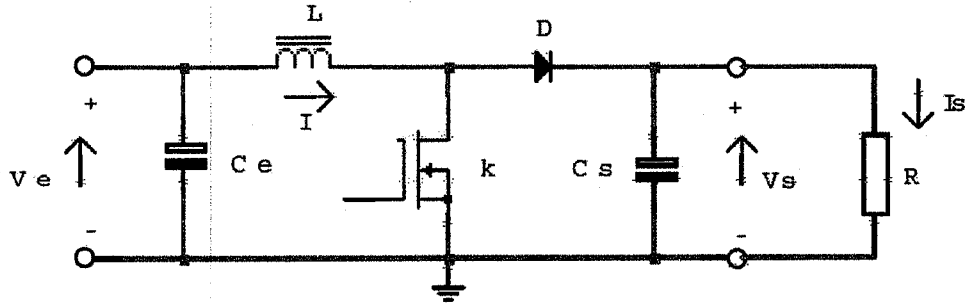


Fig. (II.27) Convertisseur Boost

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

II.4.2. Etude théorique en condition continue

II.4.2.1. Phase 1 (0 < t < αT)

Durant l'intervalle [0 , αT] l'interrupteur commandé k est fermé. Seule l'inductance L se trouve connectée à la source ; elle emmagasine alors une certaine énergie sous forme de courant. La diode D est bloquée.

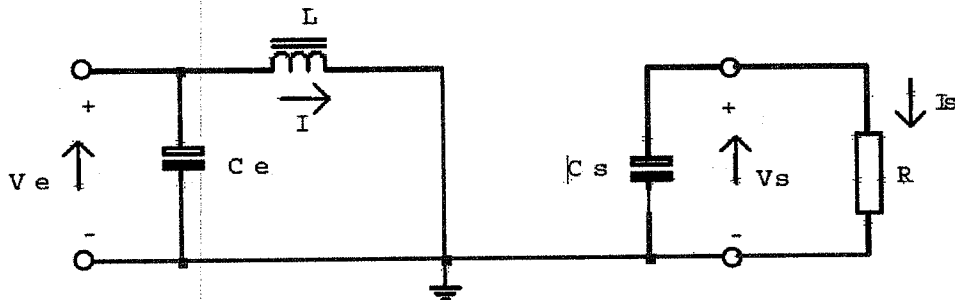


Fig. (II.28) : Convertisseur Boost où l'interrupteur commandé k est fermé

On a:

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad \text{d' où} \quad i(t) = I_m + \frac{v_e}{L} t$$

A l'instant t = αT le courant dans l'inductance atteint la valeur crête :

$$I_M = I_m + \frac{V_e}{L} \alpha T \tag{II.35}$$

II.4.2.2. Phase 2 ($\alpha T < t < T$)

Pendant l'intervalle $[\alpha T, T]$, l'interrupteur est bloqué. L'énergie emmagasinée sera rendue à la charge via la diode D. La tension visible en sortie sera $V_s = V_e - VL$ dépassant de loin la valeur V_e .

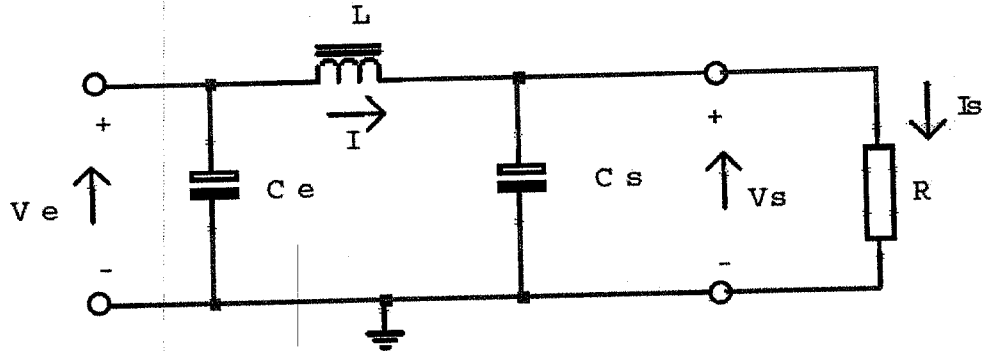


Fig. (II.29) : Convertisseur Boost où l'interrupteur commandé k est ouvert

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad \text{ou} \quad V_s - V_e = -L \frac{di}{dt}$$

$$i(t) = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (t - \alpha T)$$

A l'instant $t = T$ le courant dans l'inductance atteint sa valeur minimale :

$$I_m = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha)T \tag{II.36}$$

Soit ΔI l'ondulation du courant dans l'inductance : $\Delta I = I_M - I_m$

De l'équation (1) on tire:

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L} \alpha T \tag{II.37}$$

Et de l'équation (2):

II.4.4. Tension moyenne et ondulation:

- ❖ valeur moyenne de la tension de sortie.

On sait que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle donc on a, en conduction continue

$$E.\alpha.T = (-E+V_s).(1-\alpha).T$$

Soit :

$$V_s = \frac{E}{1-\alpha} \dots \dots \dots (II.40)$$

Or comme α est inférieur à 1, la tension moyenne de sortie est bien supérieure à la tension d'entrée.

- ❖ Relation entre le courant moyen de sortie est le courant moyen dans la diode.

$I_s = I_d$ car le courant moyen dans la capacité est nul.

Donc $I_s = (1-\alpha).I_L$ de plus connaissant la tension moyenne de sortie et la résistance de charge, on en déduit facilement I_s ce qui permet de connaître I_L .

- ❖ Calcule de l'ondulation de courant crête à crête dans l'inductance L.

$$\Delta i_L = \frac{\alpha.E}{L.f} \dots \dots \dots (II.41)$$

- ❖ La tension de sortie prise aux bornes du condensateur varie linéairement selon une pente de I_s/C . On en déduit la valeur de l'ondulation de tension de sortie

$$\Delta V_s = \frac{\alpha.T.I_s}{C} = \frac{\alpha.I_s}{f.C} \dots \dots \dots (II.42)$$

II.4.5. Avantages et inconvénients du convertisseur « Boost »

Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance L. il peut fonctionner même avec une tension d'entrée faible, ce qui dans le cas d'une installation PV permet récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclairément. Si la tension à vide du générateur PV devient supérieur à la tension de la charge, il n'est plus possible d'annuler le courant en bloquant le transistor, mais il reste la possibilité d'annuler le courant de sortie en rendant le transistor conducteur en permanence ($\alpha=1$), ce qui revient à court-circuiter le générateur PV.

Un court-circuit du transistor n'a pour effet que de court-circuiter le générateur PV, ce qui ne conduit pas à une situation dangereuse. Il faut par contre prévoir un circuit de protection contre le cas de court-circuit de la diode.

II.4.6. Simulation du convertisseur « boost »

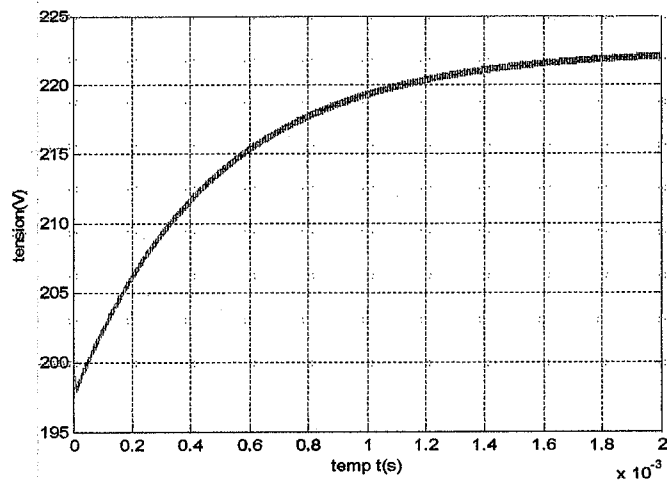


Fig. (II.31) : tension en fonction du temps

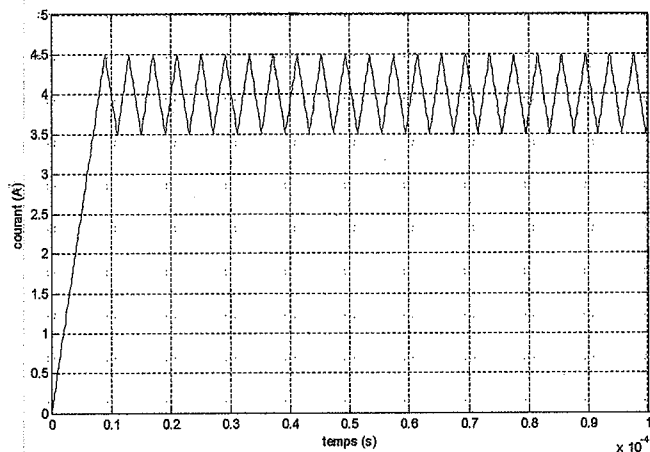


Fig. (II.32): Courant en fonction du temps

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les machines à courant continu, le principe de fonctionnement et les équations de base de la machine à courant continu à excitation shunt et la machine à courant continu à aimant permanent. La deuxième partie est consacrée à la pompe (principe de fonctionnement, les différents types de pompes et la caractéristique de chaque type), et nous avons donné une comparaison entre les deux types de pompes (volumétrique et centrifuge). Aussi nous avons présenté le convertisseur « Boost », son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients.

Chapitre III

Optimisation de système

De pompage PV

III.1 Introduction

Le coût élevé du générateur photovoltaïque, nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier pour aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la région où il délivre sa puissance maximale. Notre système est composé d'un générateur photovoltaïque alimentant un ensemble moteur-pompe à travers un convertisseur de tension.

L'optimisation de ce système se fait par une boucle de régulation comprenant un contrôleur MPPT (Traqueur du Point de Puissance Maximale).

III.2 Couplage direct

Ce couplage est illustré dans la figure (III.1). Toute charge couplée directement avec le générateur photovoltaïque ne fonctionne pas généralement pour chaque valeur de l'énergie solaire reçue dans la zone où la puissance de ce dernier est optimale. Le couplage direct consiste à alimenter l'entrée du moteur directement par la tension de sortie du générateur photovoltaïque sans tenir compte de l'optimisation de la puissance convertie ; le moteur tourne avec une vitesse variable pour chaque valeur d'éclairement. Le point de fonctionnement du système sera obtenu par l'intersection de la caractéristique I-V du générateur et celle du groupe motopompe [12].



Fig. (III.1) Couplage direct d'un système de pompage PV

Comme on peut le voir sur la figure (III. 2), le générateur n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, mais c'est la charge elle même qui fixe le point de fonctionnement [11].

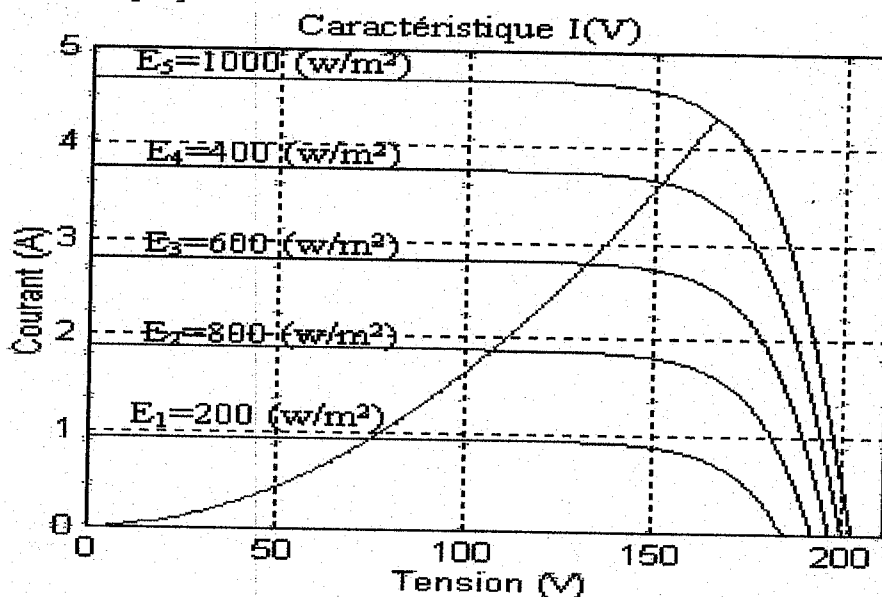


Fig. (III.2) Caractéristiques I (V) pour différents éclairements.

III.3 Fonctionnement avec MPPT

Pour que le système motopompe soit optimisé et fonctionne toujours au point de puissance maximale, il faut intégrer un dispositif MPPT qui a pour rôle de détecter ce point et obliger le système d'opérer précisément sur ce dernier car le fonctionnement y est optimale.

La commande MPPT peut être définie comme étant une commande qui fait varier le rapport cyclique d'un convertisseur statique hacheur de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit entièrement utilisée par la charge qu'il alimente [12].

$$P_{ma} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (III-1)$$

Où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement la tension et le courant optimaux du générateur photovoltaïque pour une courbe $I-V$ donnée.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher la puissance maximale, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le point de puissance maximale en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique (I et V). [12]

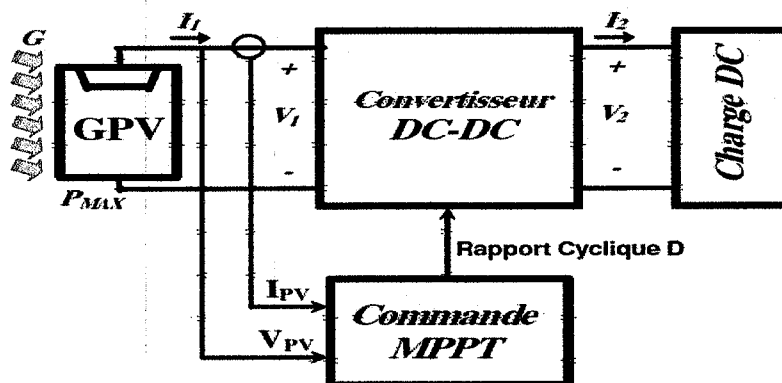


Fig. (III.3) : Conversion PV à base d'un convertisseur DC contrôlé par une commande MPPT

III.4 Techniques de recherche de point de puissance maximale

En général le point de fonctionnement n'est pas au MPP du panneau photovoltaïque. Alors dans les couplages directs des charges, les panneaux photovoltaïques sont souvent surdimensionnés pour assurer une puissance suffisante à fournir à la charge ; ceci conduit à un système excessivement cher. Pour surmonter ce problème, le tracking de la puissance maximale peut être utilisé pour maintenir le fonctionnement du panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. Pour ce faire on utilise des techniques de recherche du MPP [6] qu'on va décrire ci-après.

III.4.1 Algorithme P&O: Perturber et observer.

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau.

Le point maximum est atteint quand $dP_{pv}/dV_{pv}=0$. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure III.4 donne l'organigramme de cet algorithme [13].

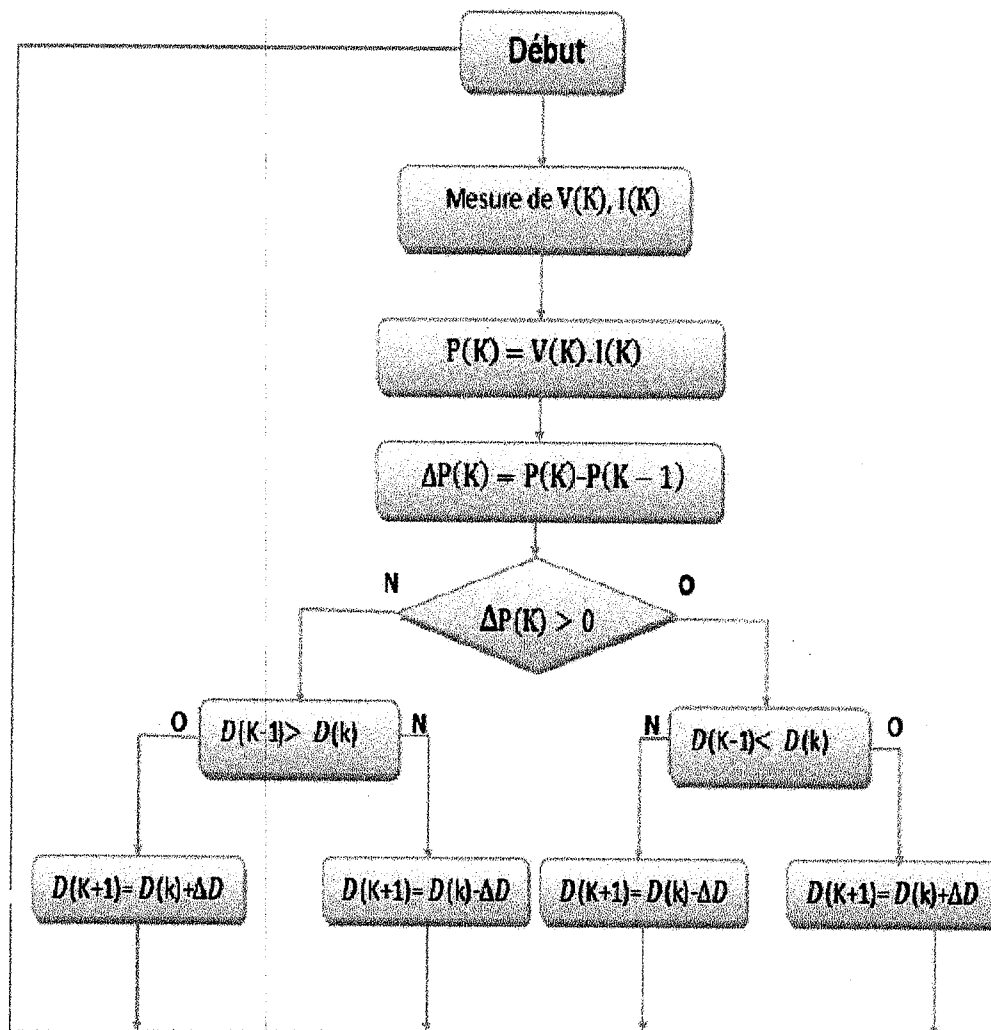


Fig. III.4. Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P and O).

III.4.1.1 Le fonctionnement de l'algorithme P&O

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière

mesure, l'incrémentation ou la désincrémentations du rapport cyclique d continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV . Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire

$D(k+1) = D(k) + \Delta D$ Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D(k+1) = D(k) - \Delta D$ donc on termine dans le chemin ou P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la des incréments du rapport cyclique d sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle. [13]

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [14]

III.4.2 Technique de Hill Climbing

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint.

Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque dP_{PV}/dD est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure III.5 [14].

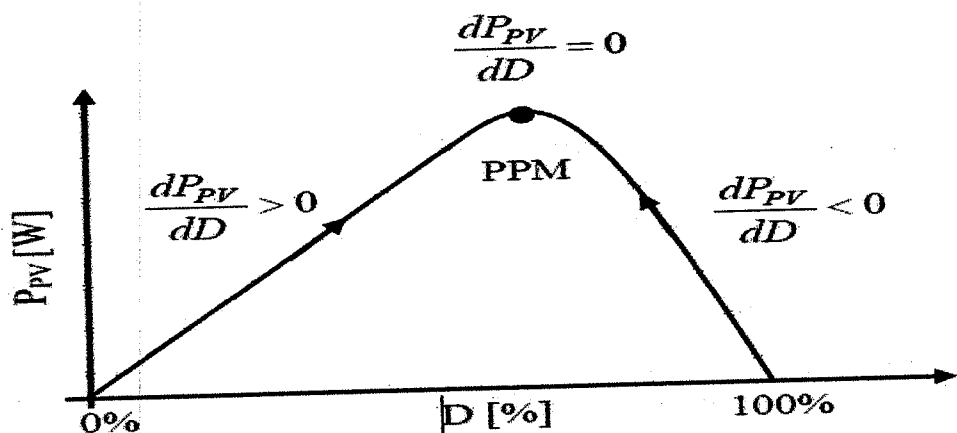


Fig. III.5 : Relation entre P_{PV} et le rapport cyclique D du convertisseur statique

L'organigramme de la technique de *Hill Climbing* est illustré sur le schéma III.6. L'incrément d'étape du rapport cyclique est représenté avec la lettre ' d ', qui est un nombre constant entre 0 et 1. L'augmentation ou la décrémentation du rapport cyclique α représenté par $(+d)$ ou $(-d)$ indique la direction qui doit être suivie sur la courbe de rapport $P-\alpha$, où P représente la puissance photovoltaïque de sortie du générateur et α est le rapport cyclique d'un mode de commutation de convertisseur de DC/DC, le rapport cyclique est incrémenté avec la valeur $(+d)$. Dans chaque itération, la tension et le courant d'entrée de convertisseur de DC/DC sont mesurés et la puissance d'entrée est calculée. La puissance d'entrée est comparée à sa valeur calculée dans l'itération précédente et selon le résultat de la comparaison, le rapport cyclique α est incrémenté ou décrémenté avec le nombre d . Puis, le rapport cyclique de PWM est changé en conséquence. Le point de départ change selon les conditions atmosphériques, alors que le rapport cyclique est changé sans interruption, selon l'algorithme mentionné ci-dessus, ayant pour résultat l'opération d'état d'équilibre de système autour du point maximum de puissance. [9]

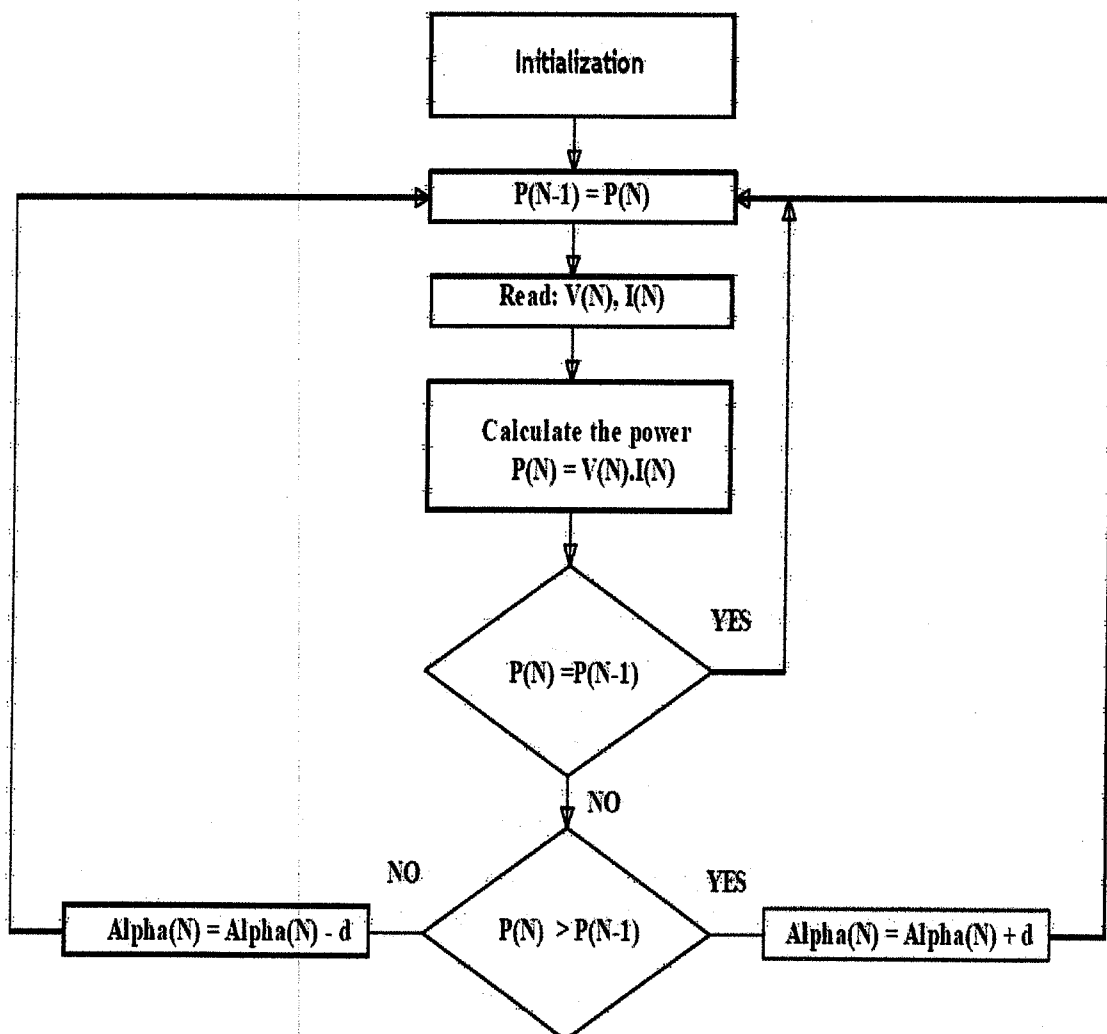


Fig. III.6 : Organigramme de la technique de Hill Climbing.

Le fonctionnement de cette commande est illustré sur la figure III.7 en reprenant la chaîne de conversion PV élémentaire.

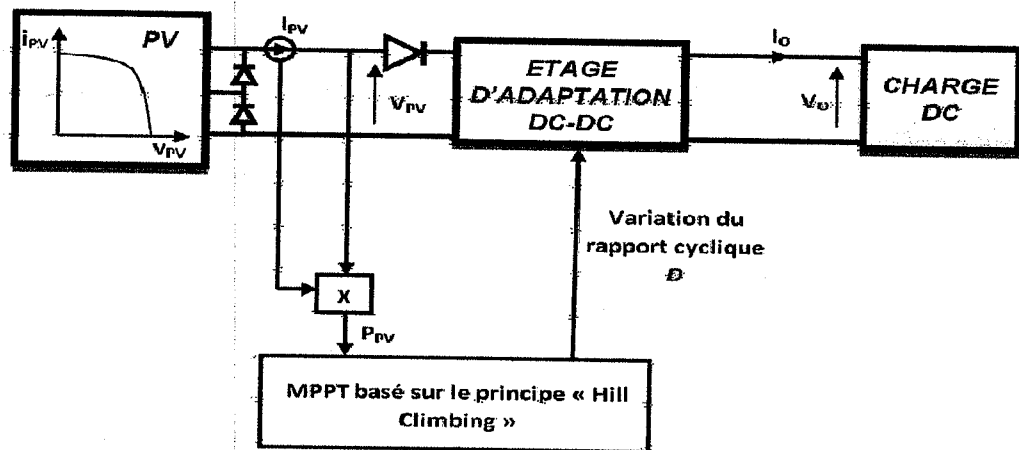


Fig. III.7 : Schéma de principe de la commande Hill Climbing

L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [14].

III.5 Simulation de couplage direct (sans régulation)

Le moteur à aimant permanent est le moteur qui présente la meilleure caractéristique de démarrage en couplage direct car dans les autres types de moteurs (moteur série et moteur shunt) une partie du courant est utilisée pour générer le champ magnétique. Aussi, le moteur shunt ne peut démarrer qu'à flux solaires élevé, l'inducteur étant de résistance beaucoup plus élevée que l'induit.

La pompe centrifuge dont le couple $T=K.\Omega^2$ croît avec le carré de la vitesse présente des propriétés favorables à un couplage direct :

- ❖ Elle permet d'assurer un couple suffisant au démarrage et en basse vitesse, ce qui permet d'exploiter convenablement les faibles courants délivrés aux bas éclaircissements en début et fin de journée ou par temps couvert.
- ❖ Entraînée par un moteur à aimant permanent, l'allure de la caractéristique de charge est similaire à celle de la charge optimale.

III.5.1 : Résultats de simulation

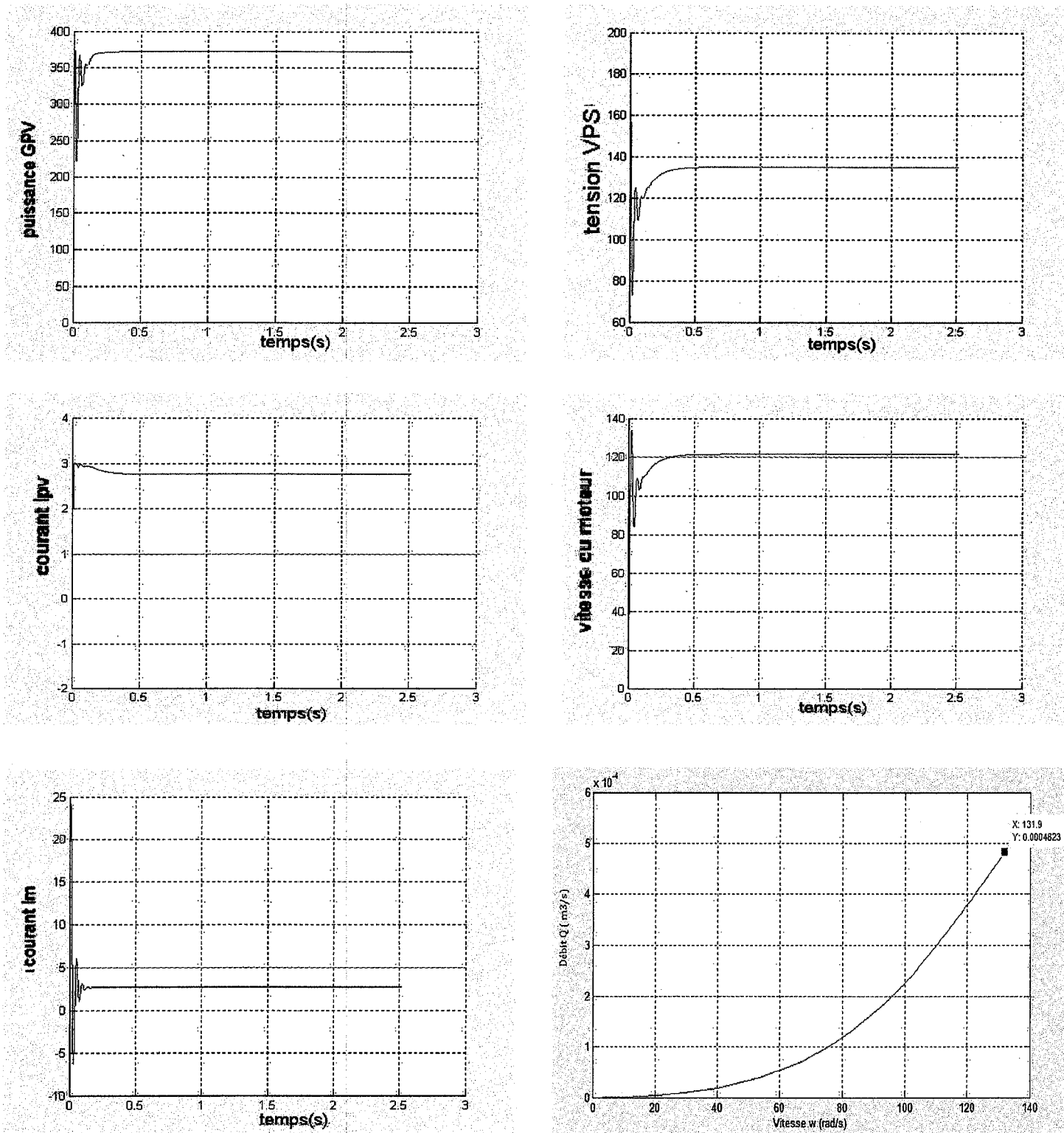


Fig. III.8 : Réponses transitoires du Système couplage direct

On remarque que pendant la phase de démarrage (figures III.8), l'ensemble moteur /charge fait appel à un grand courant, ce qui pousse le point de fonctionnement

vers la région du court-circuit du GPV. Cette situation disparaît dans le régime établi, dans lequel la charge se trouve quelque part dans la région du coude du GPV (pas nécessairement au point de fonctionnement maximal). Des cas exceptionnels peuvent apparaître, on cite par exemple un fonctionnement à faible ensoleillement ou à grande charge. Dans le dernier cas la charge opère dans la région de court circuit et donc pratiquement à tension presque nulle, ce qui ne permet pas d'avoir un couple important pour faire tourner la charge. Une régulation tentant de ramener le point de fonctionnement au point optimal s'avère fortement recommandée pour optimiser le rendement du système (fonctionnement en point de puissance maximale) et donc d'assurer un couple suffisant pour entraîner la charge. Le changement d'ensoleillement provoque le déplacement du point de fonctionnement sur une autre caractéristique $I=f(V)$, ce qui entraîne une diminution de tension aux bornes de la charge et donc une augmentation de la vitesse du moteur, le courant ne varie pas considérablement.

Pour les grandes charges, le courant tiré est grand, ce qui ramène le courant du GPV vers la région de court circuit. Lorsqu'on diminue la charge, l'appel de courant diminue aussi, ce qui provoque une augmentation de la tension aux bornes du GPV, et par suite une augmentation de la vitesse.

On remarque aussi qu'aux ensoleillements importants le point de puissance optimale se rapproche du point limite de fonctionnement à $\alpha = 1$. Pour apporter une bonne marge entre ces deux points de la caractéristique, on a légèrement augmenté la charge du moteur et on le montrera par la suite dans les résultats que l'accroissement de la charge étend la plage des points de fonctionnement du système.

III.6 Simulation Avec régulation

Dans notre travail (schéma de contrôle la figure III.7), nous proposons la méthode de Hill Climbing d'identification du MPP. Qui servira à générer le rapport cyclique pour opérer le hacheur à la puissance maximale du GPV.

Cette méthode permet la poursuite du point optimal d'un GPV en étudiant la différence de puissance prélevées entre deux points de la caractéristique I-V du GPV.

- On prélève deux mesures de puissance P1 et P2.
- On calcule la différence DP.
- Dans le cas où $DP > 0$ (positif) en retranche un pas de déplacement sinon $DP < 0$ (négatif), on ajoute ce pas

III.8. Types de pompage

Deux solutions sont possibles pour pomper de l'eau. La première consiste à utiliser l'énergie au fil du soleil. On parle alors de « Pompage au fil du soleil ». Cette première nécessite un stockage dans un réservoir, pour pouvoir par exemple utiliser l'eau pompée la journée. La deuxième consiste à utiliser un stockage via des batteries.

L'utilisation de batteries comporte d'avantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système. Les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent en outre un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie. [3]

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement. [3], [15]

III.9. La conversion d'énergie des panneaux vers la pompe

Parce qu'il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans les batteries, le moteur d'une pompe solaire fonctionnera habituellement « au fil du soleil », c'est à dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie. Dans ce cas, il est important que la puissance fournie par le générateur PV soit utilisée le plus complètement possible au point de fonctionnement maximal du groupe motopompe sur la plage de fonctionnement la plus large possible. Nous avons vu que différents types de moteurs et de pompes engendrent des caractéristiques de fonctionnement différentes. L'emploi d'une batterie, fixe le point de fonctionnement du groupe motopompe sur une plus petite plage de fonctionnement. Ainsi, dans le cas d'une pompe volumétrique, elle fonctionne à couple constant, donc à rendement constant. Le démarrage d'une pompe centrifuge sera également plus efficace, la puissance de démarrage, plus élevée, pouvant être fournie dès le départ. Néanmoins, l'emploi d'une batterie ne rend pas

***CONCLUSION
GENERAL***

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: **A. Saadi** "*Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque*", mémoire de magister en électrotechnique, université Mohammed Khider, Biskra, **2001**.
- [2]: **W. Achim**, "*Design issues of photovoltaic systems and their grid integration*", PhD, U.K. Leuven, December **2003**.
- [3]: **Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy**, "*Le Pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*", IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, **1998**.
- [4] **R.MAOUEDJ**, "*Application De L'énergie Photovoltaïque Au Pompage Hydraulique Sur Les Sites De Tlemcen Et De BOUZAREAH*", Thèse de magister en physique, Université ABOU BEKR BELKAÏD, **2005**.
- [5]: **Seddaoui Naoual**, "*Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique*", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif **2010**.
- [6]: **BOUDEN ABDELMALEK**, "*Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque*" Mémoire de Magister en électronique, Université Mentouri de Constantine, **2008**.
- [7] : **BENSASI Wafa** "*Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT*" Mémoire de Master en Génie électrique, Université de Kasdi Merbah–Ouargla, **2012**.
- [8]: Atlas d'ALGERIE, **2010**.
- [9]: **R.CHENNI**, "*Étude Technico-économique D'un Système De Pompage Photovoltaïque Dans Un Village Solaire* ", Thèse de doctorat en Sciences Physique Énergétique, Université MENTOURI De Constantine, **2007**.
- [10]: **M.ARROUF**, "*Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe Branche Sur Un Générateurs Photovoltaïque*", Thèse de doctorat en électronique, Université Mentouri De Constantine, **2007**.
- [11]: **CELINE BERNARD, CAROLINA SEBRAO – OLIVEIRA, BERNARD LAVAL, CLEMENT VAUDOUEUR**, "*Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT a base de logique floue*", Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 –Energie renouvelables, Automne **2009**.
- [12]: **MAKHLOUF MESSAOUD**, "*Etude Et Optimisation D'un Model De Conversion D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage*", Thèse de magister en électrotechnique, Université MENTOURI de CONSTANTINE, **2006**.

- [13]:**M. Angel Cid Pastor** "*conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*", thèse présentée en vue de doctorat, l'institut de Toulouse, **2006**.
- [14]:**Ameziane Sadek**, "*Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien*", Thèse de magister en électrotechnique, Université de Batna, **2009**.
- [15]:**M.Hatti**, "*Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque*" Centre de Recherche Nucléaire de Birnie, Djelfa Algérie, **2008**.
- [16]:**Cabal Cédric** "*Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*" Thèse de Doctorat en Génie électrique, Université de Toulouse **2008**.
- [17]:**Antoine Labonne** "*Alimentation d'une pompe à eau au Burkina Faso*" Ingénieur d'études (Laboratoire Electrotechnique Grenoble), **2007**.
- [19]:**L.Zarour** : "*Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, optimisation de la conversion d'énergie*", Mmoire de magister en électrotechnique, université mentouri de Constantine, **2005**.
- [20]: **M.Bellier, A.Gallichon** :« *Machines électrique* » Edition Delagrave **1972**.
- [21]:**F. Bernot** : Machine a courant continu « *constitution et fonctionnement* ». Technique de l'ingénieur, D3556 ; D3555.
- [22]:**Guy Séguier** : « *l'électronique de puissance- les fonctions de base leurs principales application* ». 5^{ème} édition.
- [23]:**R.Chauprade** « *électronique de puissance commande des moteurs à courant continu* » DUNOD.
- [24]:**R. Abdessemed** "*Modélisation des machines électriques*". Université de Batna, **1997**.
- [25]:**L. Zarour** "*Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, optimisation de la conversion d'énergie*», Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, **2005**.
- [26]:**NEB Nooma, SONG Taaba** "*Groupe moto-pompe*" mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, **2004**.
- [27]:**DAOUDI ALI**" *étude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque*», Thèse magister en électrotechnique, université de Constantine, **2010**.