



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA -BEJAÏA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de Fin de Cycle

Présenté par :

ZIDANE Yanis & DOUMBIA Ibrahim

Pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème :

*Modélisation et simulation d'un
système de pompage photovoltaïque*

Encadré par :
M^{me} **S. BELAID**

Figure (I.1) : trajectoire du soleil selon les saisons.

Figure (I.2) : coordonnées terrestres

Figure (I.3) : cellule solaire photovoltaïque

Figure (I.4) : la courbe caractéristique puissance-tension avec le point de puissance maximale.

Figure (I.5) : de la cellule vers le champ photovoltaïque.

Figure (I.6) : influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau PV.

Figure (I.7) : influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau PV.

Figure (I.8) : schéma explicatif d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil (sans stockage).[29]

Figure (I.9) : modulation par hystérésis.

Figure (I.10) : courbes caractéristiques d'allure plate et raide.

Figure (I.11) : système de pompage photovoltaïque

Figure (II.1) : plage de fonctionnement Pression-débit pour les pompes centrifuges et volumétriques.

Figure (II.2) : constitution générale d'une pompe centrifuge.

Figure (II.3) : positionnement de la pompe vis-à-vis de l'aspiration et le refoulement.

Figure (II.4) : pompe centrifuge à rotor ouvert et à rotor fermé.

Figure (II.5) : pompe centrifuge multi-étagée.

Figure (II.6) : caractéristique $H-Q$ d'une pompe centrifuge.

Figure (II.7) : caractéristique Π_p-Q d'une pompe centrifuge.

Figure (II.8) : usure due au phénomène de la cavitation.

Figure (II.9) : caractéristique $NPSH-Q$ d'une pompe centrifuge.

Figure (II.10) : caractéristique du point de fonctionnement d'une pompe centrifuge.

Figure (II.11) : choix graphique du débit souhaité.

Figure (II.12) : détermination graphique du H à Q nul d'une pompe centrifuge.

Figure (II.13) : détermination graphique du H à Q max d'une pompe centrifuge.

Figure (III.1) : schéma équivalent d'un module photovoltaïque.

Figure (III.2) : schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster.

Figure (III.3) : détermination du PPM.

Figure (III.4) : organigramme de la méthode PO.

Figure (III.5) : module PV avec variation et commande MPPT.

Figure (III.6) : principe de commande par hystérésis.

Figure (III.7): schéma d'un circuit RL.

Figure (IV.1) : Système de pompage PV

Figure (IV.2) : caractéristiques courant-tension du panneau photovoltaïque

Figure(IV.3) : caractéristiques puissance-tension du panneau photovoltaïque

Figure (IV.4) : caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque avec MPPT

Figure(IV.5) : caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque avec MPPT

Figure (IV.6) : puissance totale à la sortie du générateur photovoltaïque

Figure(IV.7) : Tension V_{dc} à la sortie du bus-continu

Figure(IV.8.a) : Courants statoriques du moteur asynchrone

Figure(IV.8.b) : zoom sur les Courants statoriques du moteur asynchrone

Figure(IV.9) : Vitesse de rotation du rotor en rd/s

Figure(IV.10) : Couple électromagnétique comparé au couple résistant.

Figure (IV.11) : Flux à la sortie du moteur comparé au flux de référence

Figure (IV.12) : La hauteur manométrique totale résultante.

Figure(IV.13) : Le débit réel à la sortie de la pompe

Figure (IV.14.a) : Variation de l'ensoleillement.

Figure(IV.14.b) : Variation de la température

Figure(IV.15.a) : Caractéristique I_{pv} - V_{pv} du panneau PV

Figure(IV.15.b) : Caractéristique P_{pv} - V_{pv} du panneau PV

Figure(IV.16) : Puissance totale à la sortie du générateur photovoltaïque.

Figure(IV.17) : Tension de sortie du bus continu.

Figure (IV.18) : Vitesse de rotation du moteur avec à la vitesse de référence.

Figure (IV.19) : Couple électromécanique avec le couple résistant du moteur.

Figure (IV.20) : Le flux du moteur et flux de référence.

Figure (IV-21.a) : Courants statoriques du moteur asynchrone

Figure(IV.21.b) : zoom sur les Courants statoriques du moteur asynchrone

Figure(IV.22) : Hauteur manométrique totale résultante de la pompe.

Figure(IV.23) : débit à la sortie de la pompe.

Figure(IV.24) : Courbes caractéristiques du circuit hydraulique et de la pompe

Figure(IV.25) : Variation du Débit réel en fonction de l'insolation

Figure(IV.26) : Variation du débit réel en fonction de la température

Figure(IV.27) : Rendement de la pompe centrifuge durant le temps de fonctionnement

Table des matières

Introduction générale.....	4
Chapitre I :.....	6
Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïques.....	6
• Introduction.....	7
I.1 L'énergie solaire photovoltaïque.....	7
I.1.1 Soleil.....	7
I.1.2 Rayonnement solaire.....	7
I.1.3 Coordonnées terrestres.....	9
I.1.4 La conversion d'énergie.....	10
I.2 Constitution d'un panneau solaire photovoltaïque :.....	10
I.2.1 Cellule solaire photovoltaïque :.....	10
I.2.2 Association des cellules photovoltaïque.....	14
I.2.3 Modules et générateurs photovoltaïque.....	14
I.2.4 Implantation des champs photovoltaïque.....	15
I.2.5 Influence des conditions climatiques.....	16
I.2.6 Les configurations des systèmes photovoltaïques.....	17
I.3 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	18
I.3.1 Convertisseurs électroniques de puissance :.....	19
I.3.2 Groupe moteur pompe.....	21
I.3.2.1 Moteurs.....	21
I.3.2.2 Pompes.....	22
Structure du système de pompage à étudier :.....	23
• Conclusion :.....	24
Chapitre II :.....	25
Technologies des pompes et dimensionnement du système de pompage photovoltaïque.....	25

• Introduction	26
II.1 Technologies des pompes	26
II.1.1 Les pompes volumétriques	26
II.1.2 Les pompes centrifuges	28
II.2 Critères de choix d'une pompe	32
II.2 Dimensionnement de l'installation de pompage photovoltaïque	33
II.2.1 Estimation des besoins en eau :	33
II.2.2 Dimensionnement du réservoir	34
II.2.3 Dimensionnement des conduites de l'installation	35
II.2.4 Dimensionnement du groupe motopompe	35
II.2.5 Le point de fonctionnement	39
II.2.6 Critères de choix des pompes centrifuges	41
II.2.7 Dimensionnement du générateur photovoltaïque	43
• Conclusion :	43
Chapitre III :	44
Modélisation du système de pompage photovoltaïque	44
• Introduction :	45
III.1 Modélisation du panneau photovoltaïque	45
III.2 Convertisseur statique DC/DC (hacheur survolteur):	47
III.3 Optimisation du générateur photovoltaïque :	47
III.4 Association de la Commande MPPT , le hacheur BOOST et la régulation.....	49
III.5 Convertisseur statique DC/AC (Onduleur MLI) :	50
III.6 Mise en équation de la MAS en vue de la commande :	52
III.7 Pompe centrifuge.....	57
• Conclusion :	59
Chapitre IV :	60

Simulation du système de pompage photovoltaïque.....	60
• Introduction :	61
IV.1 Simulation du système global :	61
IV.1.1 Premier essai :	61
IV.1.2 Deuxième essai	69
• IV.2 Interprétation des résultats	75
• Conclusion :	76
Conclusion générale	77

Introduction générale

La consommation en énergie ne cesse d'augmenter à travers le monde et ce en raison de la croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique [1]. En parallèle, on prévoit que les ressources combustibles fossiles (non renouvelables) sont en voie d'épuisement [2]. Alors, plusieurs travaux de recherche visent à trouver des solutions alternatives, basées sur les énergies renouvelables inépuisables [3] permettant de garantir la satisfaction de la demande en énergie électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) commence à séduire dans de diverses applications utiles et comme solutions de remplacement aux systèmes d'alimentations classiques (réseau électrique, groupe électrogène etc..) à titre d'exemple l'éclairage, le pompage, les télécommunications...etc. Le système (PV) dans sa constitution physique et matérielle, ne contient aucune pièce mobile ou amovible et ne nécessite aucun combustible, et donc aucun entretien sur cet aspect-là de sa constitution, par conséquent les coûts récurrents à l'installation sont relativement faible, c'est pour cela que l'énergie photovoltaïque s'avère une solution plus qu'intéressante pour les habitations dans des endroits ruraux et isolés du réseau électrique avec une faible consommation en énergie électrique.

De ce fait, le pompage photovoltaïque représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. Plusieurs travaux sur le dimensionnement et l'optimisation des systèmes de pompage PV et notamment sur le gain énergétique ont été publiés. Ces travaux se basent sur la simulation du fonctionnement de chaque composante des systèmes photovoltaïques.[4]

Le premier chapitre de ce projet est consacré aux généralités sur un système de pompage photovoltaïque en commençant de la source d'énergie brut qui est le soleil aux composants d'un système (PV) (modules ou cellules PV, convertisseurs et récepteurs) ainsi que des généralités sur le pompage.

Le deuxième chapitre concerne le dimensionnement d'un système de pompage PV , en fonction des besoins en eau, en énergie électrique d'un groupe d'habitations formant un village isolé et détermine le dimensionnement de chaque composant de la chaine de production de l'installation en commençant par le choix des caractéristiques d'un panneau PV à utiliser, leur nombre qui doit être déterminé par le calcul de la puissance requise afin que l'installation puisse fonctionner à régime suffisant, c'est-à-dire l'établissement du cahier des charges et les caractéristiques du site ou le pompage s'effectue, ceci est suivi du choix et du dimensionnement

du groupe moteur-pompe le mieux adapté aux conditions du site avec justifications, tandis que le troisième chapitre est totalement consacré à la modélisation de l'ensemble du système, ce qui permettra d'entamer le quatrième chapitre, qui est consacré à la simulation et à l'interprétation des résultats de simulation de l'installation du pompage photovoltaïque (panneau PV, régulation MPPT, hacheur élévateur de tension, onduleur DC/AC, moteur asynchrone et la pompe centrifuge) avec tous les paramètres de pertes de charges, ensoleillement, température et rendements pris en charge.

En dernier lieu, une conclusion générale est présentée avec les déductions et les objectifs atteints du projet de modélisation et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, ces avantages ainsi que la potentielle réalisation et faisabilité du projet.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïques

- **Introduction**

Ce chapitre traite les principes du phénomène de conversion d'énergie, les technologies des cellules solaires ainsi que la composition de chaque partie d'un système photovoltaïque, son utilité et sa nécessité à être intégrée afin d'avoir des configurations différentes telle que les systèmes de pompage autonomes « pompage au fil du soleil » avec ou sans stockage, systèmes autonomes hybrides ainsi que des systèmes simplement raccordés au réseau. Les composants en question sont : (modules ou cellules PV, le stockage d'énergie, les régulateurs, les convertisseurs DC/DC et DC/AC, le groupe Moteur-Pompe).

I.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait partie des grandes familles des énergies renouvelables et puise sa source du soleil en captant les rayonnements lumineux et en les convertissant en électricité grâce à des modules photovoltaïques composés de cellules solaires appelées photopiles. Il ne faut donc pas confondre avec l'énergie solaire thermique qui se base sur la chaleur produite par le rayonnement solaire infrarouge.

Soleil ou lumière ? : L'énergie « solaire » doit être interpréter sur le fait que, toute source lumineuse peut être convertie en électricité, sauf que chaque source a son intensité qui permet d'avoir une certaine puissance sur le panneau PV, et cela va de soi que le soleil est la source la plus intense en énergie, et donc un panneau PV sera bien plus efficace dehors aligné face au soleil qu'à l'intérieur d'une maison.

I.1.1 Soleil

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, dont elle est distante d'environ 150 millions de kilomètres. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [5].

I.1.2 Rayonnement solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi:

– 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),

- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$). [Iupf1]

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt par mètre carré (KW/m^2), à plus ou moins 3%, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2 \text{ KW}/\text{m}^2$ ($1200 \text{ W}/\text{m}^2$). La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus. [Iupf1]

Le Rayonnement du soleil pose un problème du fait qu'il ne soit pas toujours disponible étant donné qu'on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter c'est pour cela que le concepteur doit déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible. C'est de là que réside l'importance de connaître l'effet de la rotation et l'inclinaison de la Terre sur le rayonnement solaire. Il est donc évident que lorsque le soleil est à son point le plus haut la distance qui existe entre le soleil et la Terre sera minimale ce qui donnera une intensité de rayonnement optimale : c'est le « Midi-Solaire ». Selon les saisons la quantité d'énergie totale reçue sur un plan horizontale est plus grande en été qu'en hiver du fait que les journées sont plus longues en été.

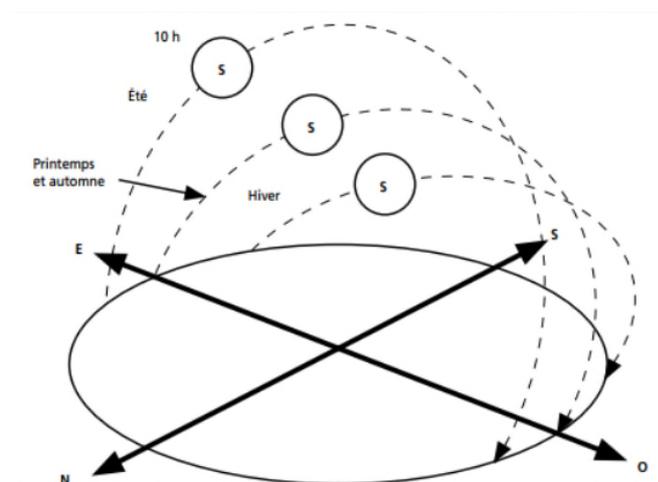


Figure (I.1) : trajectoire du soleil selon les saisons.

Il y existe quatre types de rayonnement qui sont : *le rayonnement direct ; le rayonnement diffus ; le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol et le rayonnement global.*

1.1.3 Coordonnées terrestres

Afin de pouvoir optimiser les modes de poses et inclinaisons des panneaux photovoltaïques il faut connaître la localisation du panneau dans le globe terrestre et donc connaître les coordonnées de Longitude, Latitude et Altitude.

▪ **Longitude :**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. Elle sera désignée ici par la lettre (λ). Elle peut aussi être comprise entre -180° et 180° pour un lieu donné, tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. [7]

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est du méridien de Greenwich, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest de celui-ci.

Par exemple la Longitude de la ville de Bejaia est $5^\circ 5.0598'$ Est

▪ **Latitude :**

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère Nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère Sud. La latitude sera désignée ici par lettre (φ), et peut ainsi être comprise entre -90° et $+90^\circ$. [7]

Par exemple la Latitude de la ville de Bejaia est $36^\circ 45.3522'$ Nord

▪ **L'altitude :**

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). [7]

Par exemple L'altitude par rapport au niveau de la mer à Bejaia est : 86 m

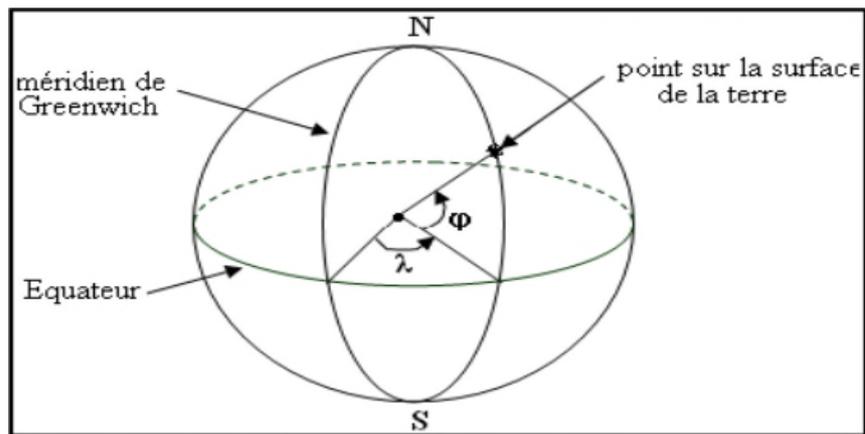


Figure (I.2) : coordonnées terrestres

I.1.4 La conversion d'énergie

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [Rnc 02]

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un isolant électrique, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un semi-conducteur, la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

I.2 Constitution d'un panneau solaire photovoltaïque :

I.2.1 Cellule solaire photovoltaïque :

Le phénomène physique dont lequel est basé la cellule photovoltaïque se nomme « effet photovoltaïque ». Lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière une force électromotrice

apparaît. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p . Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p . La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

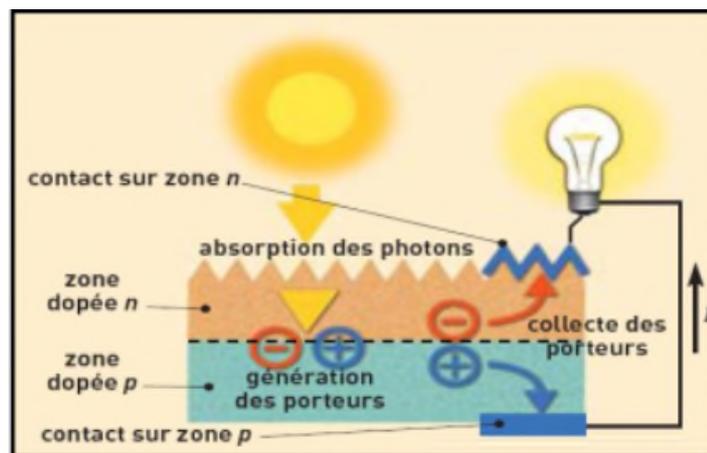


Figure (I.3) : cellule solaire photovoltaïque

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p . Une jonction (dite $p-n$) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p , une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. [36]

▪ **Technologies des cellules solaires :**

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le plus stable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le silicium poly-cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'arséniure de

Galium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires et présentent un rendement de (38%). [36]

- **Caractéristiques électriques :**

La cellule photovoltaïque possède des caractéristiques de courant-tension ($I_{pv}=f(V_{pv})$) non-linéaire (figure (I.4)). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie trois quadrants sur les quatre existants. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est de faire travailler la cellule dans ce quadrant. [37]

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants

- **Courant de court-circuit (I_{cc}) :** C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$).
- **Tension en circuit ouvert (V_{oc}) :** La tension de circuit ouvert est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par la photopile est nul (correspond à la tension maximale de la photopile). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{mKT_C}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad \text{où} \quad V_t = \frac{mKT_C}{e} \quad (I.1)$$

V_t : La tension thermique.

T_C : La température absolue.

m : Facteur idéal de la jonction.

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

e : Charge de l'électron ($e=1.6 \cdot 10^{-19}C$).

- **Point de puissance maximale (P_{max}):**

La puissance utile maximale est déduite en optimisant le produit courant-tension. Au point P_{max} , situé au coude de la caractéristique I-V, la puissance fournie par la cellule est maximale pour l'éclairement donné. Ce point dit de puissance maximale correspond à une tension dite de tension maximale V_{opt} et de courant maximal I_{opt} . [38]

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (I.2)$$

V_{opt} : La tension optimale et I_{opt} : Le courant optimal

- **Facteur de qualité :**

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode, (compris entre 1 et 2).

- **Facteur de forme :** On appelle facteur de forme ff (*filling factor*), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max} = V_{max} \cdot I_{max}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $V_{co} * I_{cc}$ où: [GAD 01].

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.3)$$

Plus la courbe caractéristique I-V tend vers une forme carrée, plus la puissance maximale, est élevée. Cette propriété est mesurée par le facteur de forme exprimé comme suit :

- **Rendement maximum :** est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{A_{pv} \cdot G} \quad (I.4)$$

Où :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de **1000W/m²** d'une température ambiante de **25°C** et d'un spectre **AM de 1.5**. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort. La figure suivante représente la caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque avec les points importants qui le caractérise.

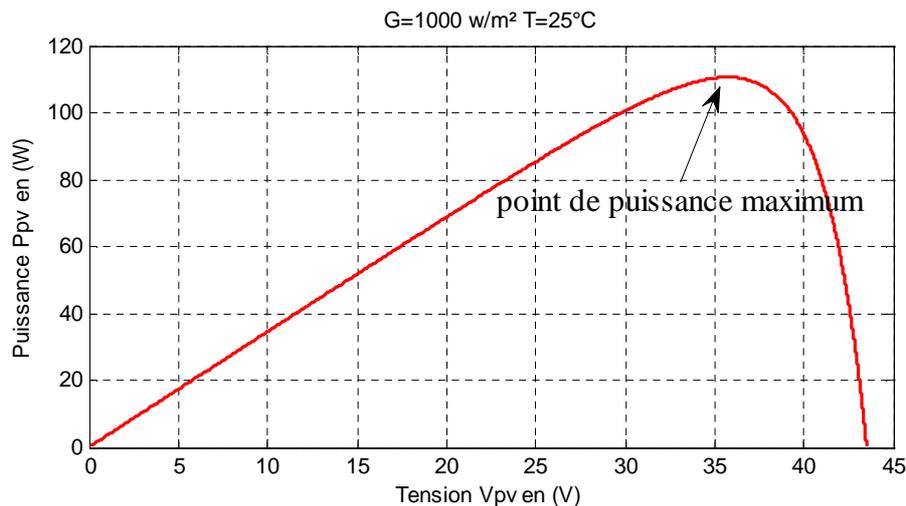


Figure (I.4) : la courbe caractéristique puissance-tension avec le point de puissance maximale.

1.2.2 Association des cellules photovoltaïque

- **Association en série :**

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module.

- **Association Parallèle :**

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'un seul module.

- **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. [41]

1.2.3 Modules et générateurs photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont connectées en série afin d'augmenter la tension d'utilisation. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12V et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [16]. Tandis que pour le générateur photovoltaïque, Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, dont les caractéristiques sont connues, La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries N_s et d'un nombre de modules parallèles N_p . En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes

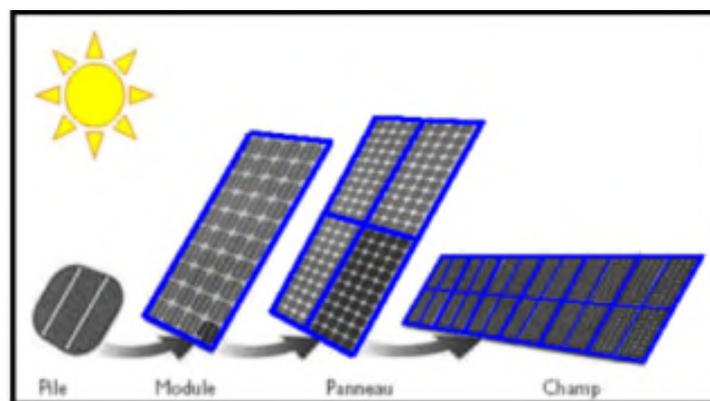
peuvent être assemblés pour constituer le générateur photovoltaïque. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$I_{GPV} = Np * I \quad (I.5)$$

$$V_{GPV} = Ns * V \quad (I.6)$$

I_{GPV} et V_{GPV} sont le courant et la tension du générateur photovoltaïque Np et Ns sont les nombres des modules en série et en parallèle respectivement.



Figure(I.5) : de la cellule vers le champ photovoltaïque.

I.2.4 Implantation des champs photovoltaïque

L'implantation du panneau solaire nécessite de respecter certains choix et critères qui maximisent les performances :

- **Orientation du champ de modules :**

Une orientation sud dans l'hémisphère Nord procure un maximum d'ensoleillement dans la journée.

- **Inclinaison des modules :**

Une inclinaison optimale permet d'optimiser la production des panneaux solaires pendant le mois le moins ensoleillé, pour les régions tempérées ou l'hiver est la plus mauvaise période l'inclinaison est souvent la latitude +10°. [31]

- **L'ombre portée sur le champ de modules :**

Un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.

- **La distance modules-batteries :**

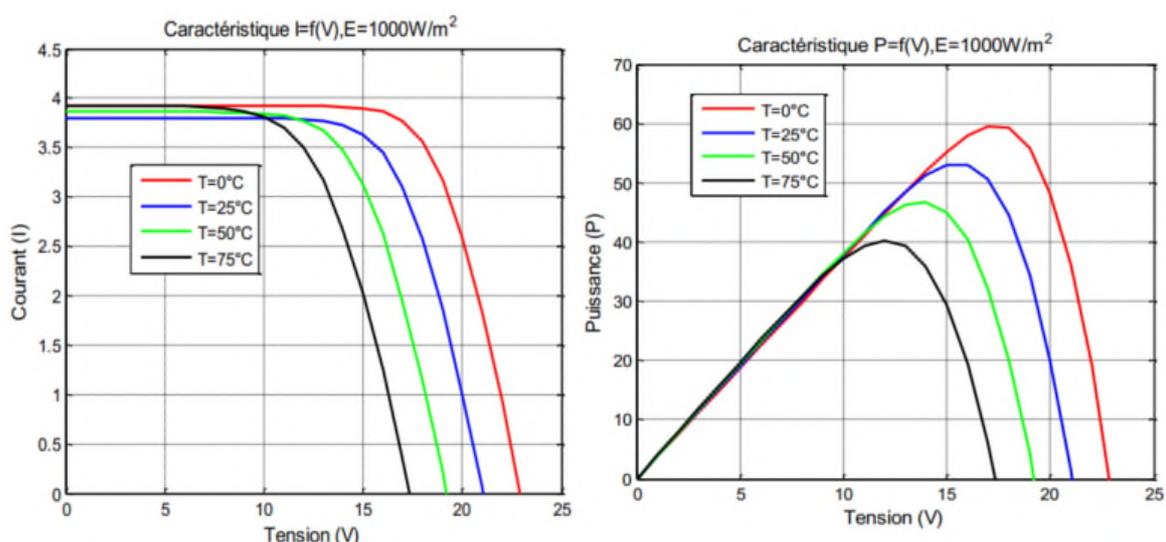
En courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de section importantes (10 ou 16 mm² voir plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usages en courant continu. [31]

1.2.5 Influence des conditions climatiques

Certaines grandeurs liées aux conditions climatiques telles que la température et l'ensoleillement agissent de façon directe sur la puissance du générateur photovoltaïque modifiant ainsi les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

- **Influence de la Température :**

La température est un paramètre important dans le comportement du générateur photovoltaïque. La figure (I.6) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale. [41]



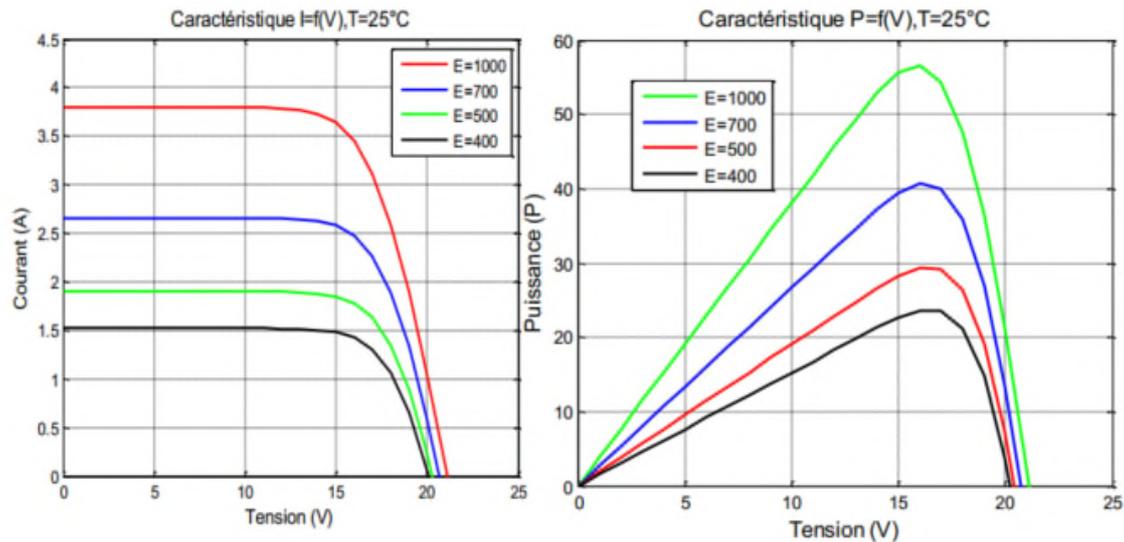
Figure(I.6) : influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau PV.

- **Influence de l'ensoleillement :**

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. [41]

La figure (I.7) montre que la puissance maximale produite par la cellule est proportionnelle au rayonnement solaire. C'est un paramètre extrêmement influant sur le point de fonctionnement de la cellule solaire. En effet, il est reporté que si l'ensoleillement

augmente, l'intensité du courant croît, d'où production de puissance électrique plus importante. [42]



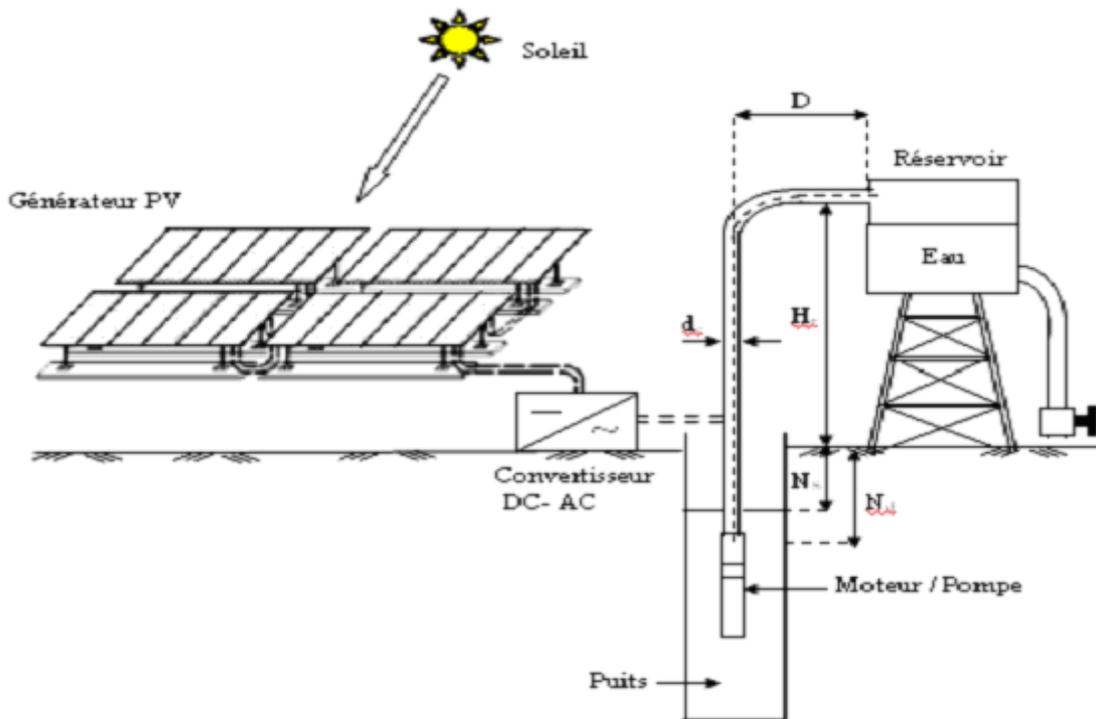
Figure(I.7) : influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques I(V) et P(V) d'un panneau PV.

1.2.6 Les configurations des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont classés en trois types : systèmes autonomes, systèmes hybrides et systèmes reliés au réseau. Le type de systèmes dépend des besoins, de l'emplacement et du budget [18]. Dans ce projet nous nous intéressons au système autonome sans batterie de stockage qui est aussi appelé « système au fil du soleil ».

- **Système au fil du soleil :**

Très utilisés dans le pompage photovoltaïque, ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut-être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe. [28]



Figure(I.8) : schéma explicatif d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil (sans stockage). [29]

I.3 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Le besoin d'eau étant plus important dans les pays les plus chauds et lors des périodes les plus sèches, et donc généralement les plus ensoleillées, la production d'énergie solaire coïncide avec le besoin d'eau. La pompe solaire est née de cette convergence, et on en installe depuis plus de 30 ans. Mais on ne saurait réduire cette application à la seule fonction de pompage. Une installation d'adduction en eau potable (AEP) est tout un ensemble. Quand la pompe est animée par l'énergie solaire, le prestige porté à cette dernière fait que l'on a tendance à résumer l'ensemble de l'AEP en « pompage solaire ». Le danger qui en découle est que la qualité des autres infrastructures risque d'être négligée ; on a en effet tendance à se focaliser sur la seule partie pompage. Pourtant, chaque élément a son importance et c'est le maillon faible qui peut compromettre le but final et entacher la réputation de l'énergie solaire qui, étant sous les projecteurs, est trop rapidement montrée du doigt en cas de contre-performance, cette analyse ainsi que la présentation qui suit sont extraites d'un document de synthèse rédigé par H.bonneviot et édité par Energies pour le Monde. [30]

Un tel système d'AEP comporte :

- Une source d'eau (puits ou forage) ;
- Un groupe moteur-pompe mécanique ;

- Un champ photovoltaïque et des infrastructures (convertisseurs etc.) ;
- Un château d'eau (réservoir placée en hauteur) ;
- Un réseau de tuyauteries ;
- Des bornes-fontaines publiques, parfois complétées par des branchements individuels.

Il n'y a généralement pas besoin de batterie, puisque c'est le réservoir qui joue le rôle de stockage. Par contre un booster de démarrage peut être nécessaire pour amorcer la pompe en début de journée dès que l'ensoleillement est suffisant. [30]

Le dimensionnement de chaque composant et l'évaluation des besoin en termes d'eau et d'énergie se révèle primordiale pour l'optimisation des performances du système de pompage photovoltaïque et cela en commençant par la source d'eau, sa profondeur de nappe, sa capacité et son évolution dans le temps seront déterminés, le réservoir remplira les fonction d'alimentation par gravité des points d'eau et le stockage de l'eau pour combler les périodes ou le pompage est à l'arrêt (nuit etc....) son volume sera calculé selon la production et les besoins. Il faudra en conséquence dimensionner les panneaux solaires de sorte à avoir une puissance suffisante pour faire fonctionner la pompe.

1.3.1 Convertisseurs électroniques de puissance :

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique on peut remplacer les « machines » par des convertisseurs statiques utilisant des composants électroniques en commutation. Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux.

- Contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance ;
- Système moins lourd et moins encombrant ;
- Excellent rendement ;
- Facilité de mise œuvre grâce à l'automatisation;
- Protections de plus en plus efficaces;
- Coût relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des Composants ;
- **Convertisseurs DC-DC:**

Le hacheur est un convertisseur continu-continu permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.[41]

Les composants du hacheur sont basiques, condensateurs et inductances ce qui implique une consommation d'énergie active quasi nulle c'est pour cela que le rendement d'un hacheur

n'est presque pas détérioré. Le procédé de ces convertisseurs se base sur le découpage d'une tension ou courant continu à l'entrée, il en résulte à la sortie une tension ou un courant également en continu (généralement à très faible ondulation).

Le convertisseur DC-DC est l'organe qui doit forcer le GPV à fonctionner dans son point de puissance optimale via l'algorithme d'extraction du MPP. En effet l'algorithme MPPT fixe la tension de référence qui est la tension optimale ou le GPV travail à son maximum de puissance. Ainsi un rapport cyclique α est calculé afin de commander le convertisseur DC-DC. [40]

- **Différents types de hacheurs**

Nous prenons en considération que les convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension, du fait que dans notre système de pompage photovoltaïque, l'influence d'énergie ne peut se faire que dans un seul sens et donc on considère les éléments suivants :

Des sources de tension non réversibles unidirectionnelles en courant des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension. Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) : hacheur abaisseur (ou BUCK), hacheur élévateur (ou BOOST) et hacheur série-parallèle.[41] Pour la suite de nos travaux, nous utilisons l'hacheur boost, idéal pour l'étage d'adaptation continu à la sortie du GPV.

- **Convertisseur DC/AC:**

Les onduleurs de tension, associés aux machines à courant alternatif, sont de nos jours très largement utilisés dans les systèmes d'entraînement industriels. En premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation de convertisseurs statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques, notamment l'utilisation sans cesse grandissante du processeur de signaux (DSP, "Digital Signal Processing ") et des systèmes à base d'architecture reconfigurable (FPGA, "Field Programmable GateArray "), permet désormais d'exécuter en temps réel des algorithmes complexes de contrôle des convertisseurs. Compte tenu de ces deux principales avancées technologiques, les techniques de MLI ont été l'objet de recherches intensives pendant ces dernières décennies. Un nombre important de méthodes, différentes par leur concept et leur performance ont été développées. La simplicité d'implantation restant cependant encore un critère important. Nous nous limiterons ici aux généralités sur les techniques de MLI à base de régulation à hystérésis pour un onduleur triphasé, puisque notre objectif est le contrôle de l'onduleur à trois bras alimentant un moteur asynchrone.

❖ Modulation par hystérésis :

La commande par hystérésis appelé aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Le principe de cette méthode est expliqué à l'aide de la Figure (I.9). Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à ce que cette erreur reste à l'intérieur de cette bande. Cette méthode est simple mais les commutations à l'intérieur de la bande d'hystérésis évoluent librement. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

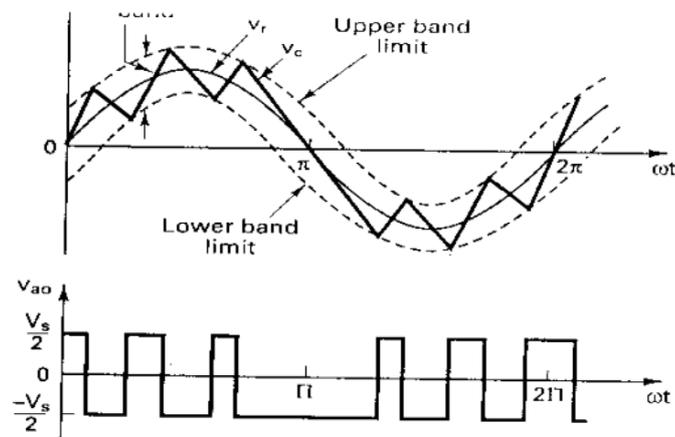


Figure (I.9) : modulation par hystérésis.

1.3.2 Groupe moteur pompe

Quel que soit la pompe elle est constituée de 3 parties distinctes :

- La partie motrice, qui fournit la puissance ;
- La transmission, qui transmet la puissance ;
- La partie hydraulique, qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer.

1.3.2.1 Moteurs

On peut voir fréquemment dans les systèmes de pompage photovoltaïque certains types de moteurs comme les moteurs à courant continu (excitation série, shunt, à aimant permanent etc.) et moteur alternatifs (Asynchrone, synchrone). Pour ce projet nous utilisons un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

L'utilisation du moteur à courant alternatif pour les applications de pompage photovoltaïques est de plus en plus croissante puisque le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour ce type de système. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le

pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. De plus, l'utilisation d'onduleurs efficaces permet un contrôle de la vitesse du moteur et ce dernier point est recommandé pour des applications de pompage solaire.

Le moteur alternatif pour le pompage solaire est habituellement de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage d'écureuil). Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85%. À ceci il faut ajouter le rendement de l'onduleur qui est de 90%-95% sur une plage de fonctionnement importante. Le rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80% sur une plage de fonctionnement relativement importante. De plus, ces onduleurs sont équipés pour suivre le point de puissance maximale du champ photovoltaïque.

Selon les besoins de l'installation et du site, nous avons jugé plus utiles de choisir une machine asynchrone à cage d'écureuil adéquate ; suite à ses nombreux avantages de robustesse et d'entretien minimal, de plus son cout est moins cher par rapport aux autres machines.

1.3.2.2 Pompes

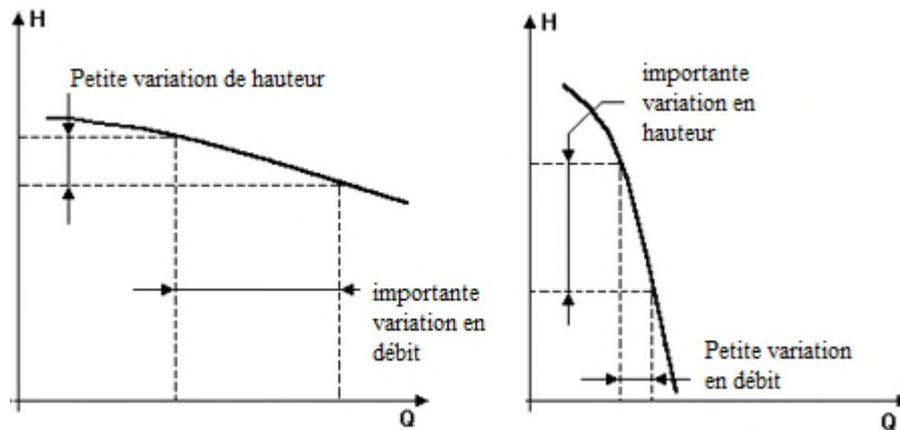
L'eau est une ressource essentielle et il faut pouvoir l'extraire quelque soit l'endroit de la planète. L'organe essentiel pour l'extraction de l'eau est la pompe [8].

Une pompe est une machine capable de transformer une énergie mécanique en énergie hydraulique. Il existe plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes de pompage photovoltaïques. On distingue principalement deux types de pompes ; Les pompes centrifuges et les pompes volumétriques et principalement deux modes d'utilisation, en surface ou immergée, en charge ou en aspiration. Ces deux types de pompes sont communément employés dans les installations photovoltaïques de pompage d'eau.

La première pompe construite plus spécifiquement pour le solaire a sans doute été la Solarjack (USA) dès la fin des années 1980. Il s'agit d'une électropompe monobloc immergée, c'est-à-dire que la pompe et le moteur ne font qu'un : On ne parle pas d'accouplement car l'arbre moteur est aussi une pièce de la pompe. Plusieurs fabricants ont repris la même architecture. [31]

La courbe caractéristique peut être "plate" ou "raide", suivant la réalisation du projet de la pompe et l'installation dans laquelle elle doit être intégrée. Comme le note la figure (I.10), les pompes qui présentent une courbe caractéristique plate donnent lieu à des variations faibles de hauteur manométrique pour des fortes amplitudes de débit, tandis que les pompes qui présentent une courbe caractéristique raide donnent lieu à des variations de débit faibles pour des variations de hauteur manométrique élevées. Par conséquent, les pompes du premier type

seront préférées quand on désirera une hauteur manométrique plus ou moins constante avec un débit variable dans des marges étendues (pompes destinées aux installations contre les incendies). Les pompes du deuxième type devront être choisies quand on voudra un débit presque constant avec une hauteur manométrique variable dans une aire relativement vaste (pompage de puits). [35]



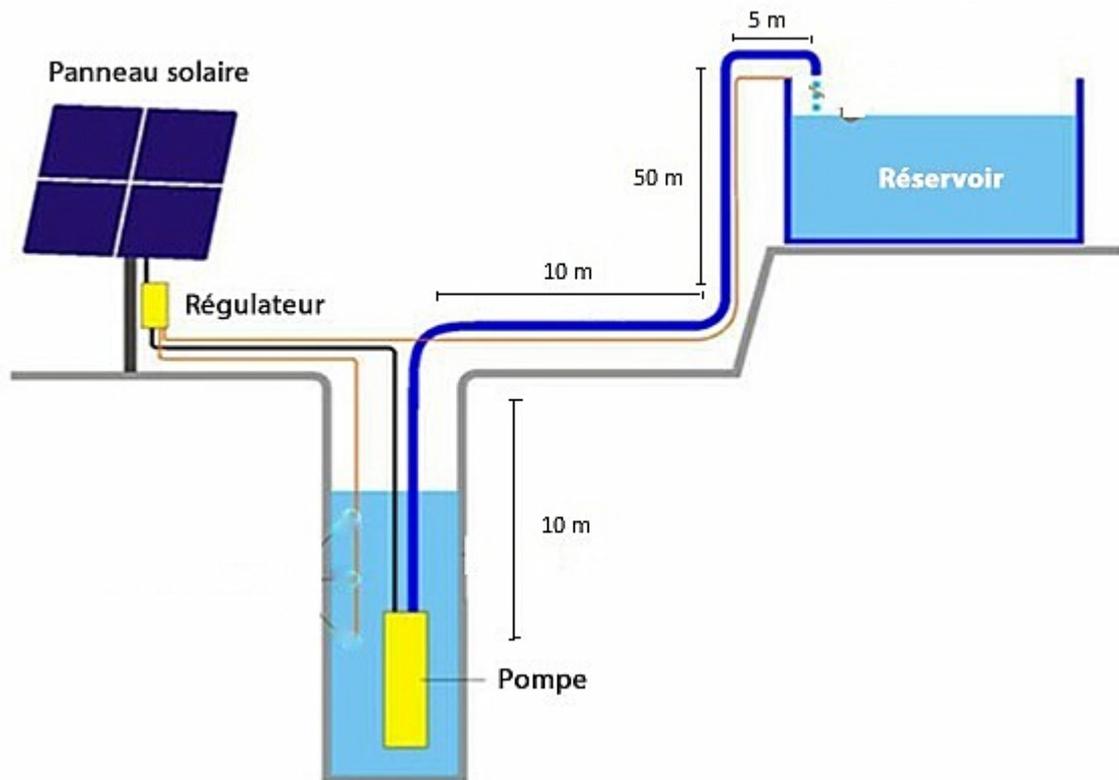
Figure(I.10) : courbes caractéristiques d'allure plate et raide.

Le rendement total d'une pompe tient compte de trois genres de perte de charge qui ont lieu dans cette pompe :

- Les pertes hydrauliques c'est-à-dire les pertes dues au frottement et à la formation de tourbillons.
- Les pertes volumétriques qui sont causées par les fuites du liquide à travers les jeux de la pompe
- Les pertes mécaniques, c'est-à-dire les pertes dues au frottement mécanique dans les paliers ; les presse-étoupes ...etc

Structure du système de pompage à étudier :

La structure du système de pompage photovoltaïque est composée de : quatorze (14) panneaux photovoltaïque de 110W, un hacheur boost, un onduleur MLI, une machine asynchrone de 1500W couplée à une pompe centrifuge et un réservoir. La nature du site nous impose une longueur de conduits et des hauteurs d'aspiration à connaître obligatoirement afin de définir un choix sur les types de pompes centrifuges. Ci-dessous une illustration du système de pompage photovoltaïque implantée dans le site du forage.



Figure(I.11) : système de pompage photovoltaïque

- **Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à l'établissement des généralités et définition du système de pompage photovoltaïque ainsi que la prise de connaissance des différents composants de ce système, nous permettant de pouvoir mieux assimiler et entamer la suite de ce travail de modélisation et de simulation.

Chapitre II :

Technologies des pompes et dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

• Introduction

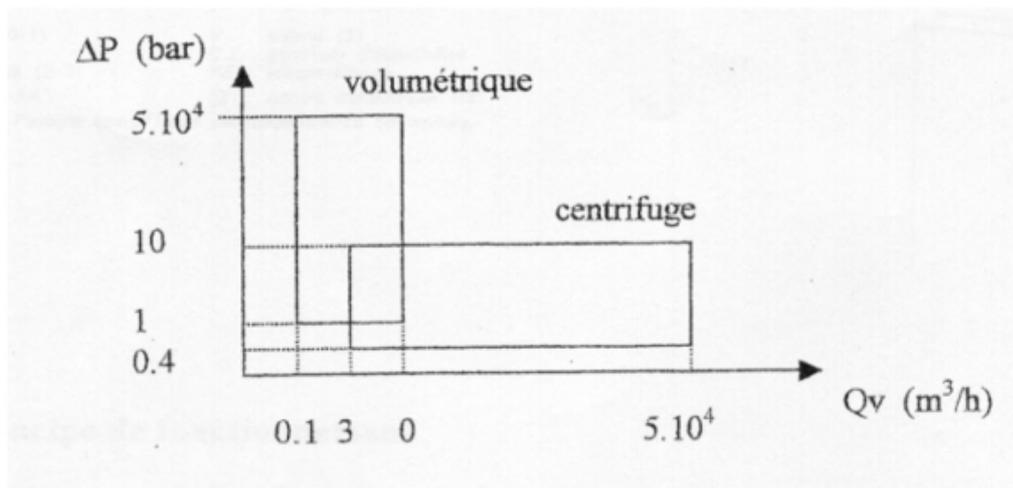
Ce chapitre est consacré au dimensionnement du système de pompage photovoltaïque et une prise de connaissance plus ample sur les différentes technologies des pompes utilisés dans le pompage d'eau ainsi que ses caractéristiques et critères de choix de la pompe adéquate pour le site étudié.

II.1 Technologies des pompes

Les caractéristiques hydrauliques du système de pompage ainsi que les caractéristiques physiques et chimiques du fluide sont celles qui déterminent quels types de pompes sont les plus adéquats pour l'application choisie. [42]

De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.

Les mécanismes de transfert d'énergie entre la pompe et le fluide sont différents, alors qu'il est impossible d'utiliser une seule théorie pour décrire ce procédé. C'est pour cette raison que les pompes sont divisées selon leur principe de fonctionnement en deux principales grandes catégories :



Figure(II.1) : plage de fonctionnement Pression-débit pour les pompes centrifuges et volumétriques.

II.1.1 Les pompes volumétriques

Ce sont des pompes les plus anciennes et les plus connues. Elles fonctionnent en deux temps : vidange d'un volume de liquide, d'où leur appellation. Leur fonctionnement ne met pas en jeu la vitesse de l'eau, ce sont donc des machines hydrostatiques [32].

Elles utilisent les variations de volume du fluide (ici eau) pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'eau est d'abord aspirée par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. [8]

La multitude des différents modes de fonctionnement les classes en deux catégories : les pompes alternatives et les pompes rotatives. Les pompes alternatives sont des pompes à piston, à diaphragme, à noyau plongeur etc. Tandis que les pompes rotatives sont des pompes à vis, à engrenages, à palettes, péristaltiques.... Lorsque le fluide véhiculé est un gaz, ces pompes sont appelées « compresseurs ».

Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage. [8].

➤ Les pompes à piston :

La plus connue des pompes alternatives est la pompe à piston. Elle comporte une soupape d'admission et une soupape d'échappement, le pompage se fait en deux temps : aspiration puis refoulement, et le débit se fait par à-coups. Quand le piston se déplace dans un sens, l'eau est comprimée avec ouverture du clapet de refoulement et fermeture du clapet d'admission. Le processus est inversé lors de l'aspiration du liquide dans la pompe [32].

Le principal défaut de cette pompe est de donner un débit pulsé et par suite des à-coups de pression, qu'on peut atténuer grâce à un pot anti-bélier sur la conduite de refoulement. On peut aussi concevoir une pompe mieux équilibrée par association de plusieurs pistons travaillant avec un déphasage judicieux.

➤ Les pompes à membrane :

Dans la pompe à membrane, le mouvement alternatif est transmis à une membrane qui comprime un liquide contenu entre la membrane et le corps, muni lui aussi de clapets d'aspiration et de refoulement. L'intérêt de ce type de pompe est de permettre l'isolement total du liquide à pomper [32].

➤ Les pompes à vis :

C'est la forme spécifique du rotor qui fait que le liquide remonte le long de la vis. Les principaux paramètres sont le diamètre extérieur, le pas des spires, le nombre de spires, l'angle d'inclinaison et la vitesse de rotation. [32]

➤ Les pompes à palette :

C'est le classique « pompe à vide ». Un rotor excentré tourne dans un cylindre fixe. Sur ce rotor, des palettes, libres de se mouvoir radialement, et poussées par des ressorts s'appliquent sur la face intérieure du cylindre fixe. Les espaces ainsi délimités varient au cours de la rotation et créent les dépressions nécessaires au fonctionnement d'une pompe volumétrique.

➤ Les pompes à engrenages :

Deux pignons tournent en sens inverse dans un carter. Le fluide situé entre les dents et la paroi du carter est contraint d'avancer au cours de la rotation, tandis qu'au centre, le contact permanent entre les deux pignons empêche le retour du fluide vers l'amont malgré la différence de pression et le déplacement des dents qui se fait en direction de l'entrée. Ces pompes peuvent fournir un débit de l'ordre de 80 à 100 m³/h et des pressions maximales de l'ordre de 10 à 15 bars. Le point faible de ces pompes est l'usure des dents qui se traduit par des fuites.

➤ Les pompes à cavité :

La pompe volumétrique à cavité progressive a été inventée en 1930 par René Moineau, qui a fondé en France la société PCM. C'est une pompe qui, à faible vitesse, est très adaptée aux liquides visqueux, abrasifs ou ne supporte pas le brassage que leur ferait subir une pompe centrifuge. La pompe Mono se compose de deux éléments principaux : un rotor et un stator. Le rotor a une forme d'engrenage hélicoïdal ou encore devis à larges filets arrondis souvent appelée « queue de cochon ». Le stator est un tube de forme intérieure complémentaire, mais avec deux filets dont les pas sont le double de celui du rotor. Cette géométrie particulière isole des cavités entre le rotor et le stator. Ces cavités sont repoussées, lorsque le rotor tourne, depuis l'aspiration vers le refoulement de la pompe (d'une extrémité à l'autre du stator).

Quelle que soit la position du rotor, il y a toujours une zone continue de contact entre rotor et stator qui isole les extrémités aspiration et refoulement. Le débit engendré est continu, sans pulsation. Le rotor est poli et chromé dur, et le stator est en caoutchouc pour assurer un bon contact d'étanchéité et un bon coefficient de frottement en présence du fluide pompé. Le stator est tenu dans un fourreau en acier inoxydable qui assure la rigidité de l'ensemble [32].

II.1.2 Les pompes centrifuges

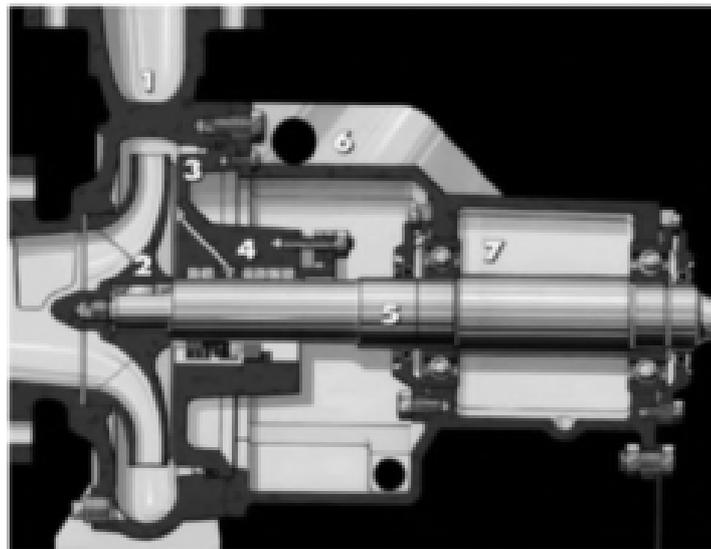
Les pompes centrifuges sont des machines utilisées pour transporter des liquides par l'augmentation d'un débit spécifique à une certaine pression. Les performances de la pompe à une vitesse donnée du rotor sont décrites par le débit délivré, la pression atteinte, la puissance absorbée au niveau du couplage, le rendement et le NPSH. Selon l'application, une large

variété de types de pompes est offerte sur le marché. Toutes présentent au moins une roue à aubes, et un collecteur où la majeure partie de l'énergie cinétique à la sortie de la pompe est transformée en énergie statique de pression. [43]

❖ Construction d'une pompe centrifuge

La pompe centrifuge a une construction simple figure (II.2), comprenant essentiellement une volute (1) et une roue (2). La roue est montée sur un arbre (5), qui est supporté par des paliers (7) montés dans un boîtier de palier (6). Un accouplement d'entraînement est monté sur l'extrémité libre de l'arbre. Le moteur principal, qui est généralement un moteur électrique, turbine à vapeur, ou un moteur à combustion interne, transmet le couple à travers l'accouplement.

La vitesse normale de fonctionnement des pompes est de 1500 tr/min, 1800, 3000 et 3600 tr/min. Toutefois, il existe certains modèles de pompes qui peuvent fonctionner à des vitesses de l'ordre de 5000-25 000 tr/min. [44]



Figure(II.2) : constitution générale d'une pompe centrifuge. [44]

❖ Mode de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes

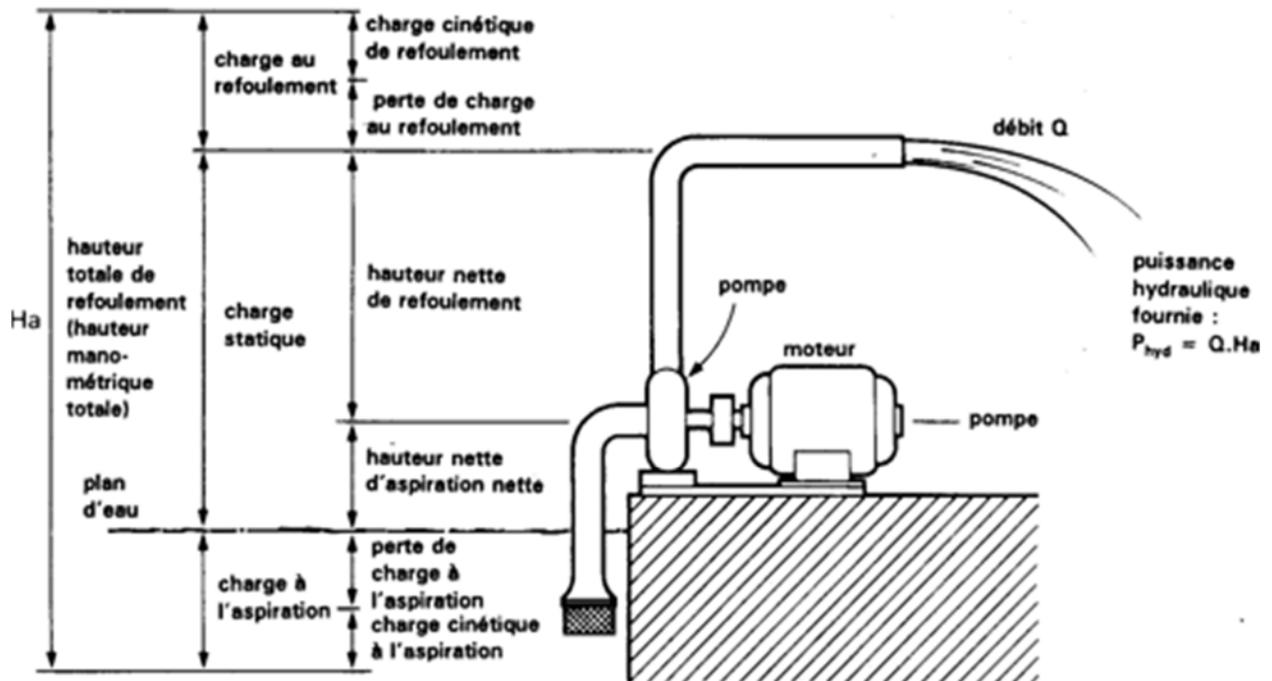
Aspiration :

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor. La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui

entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

Accélération (refoulement) :

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression.



Figure(II.3) : positionnement de la pompe vis-à-vis de l'aspiration et le refoulement.

Avantages et inconvénients des pompes :

Il est sans doute évident que la pompe centrifuge occupe un grand marché d'utilisation grâce à ses nombreux avantages mais elle a aussi certains inconvénients à noter :

Avantages

- Ces machines sont de construction simple et demande peu d'entretien ;
- Prix modérés et cout de maintenance faible ;
- Matériaux de construction très variés (fluide corrosif possible) ;
- Pompes compactes et peu encombrantes ;
- Bons rendements ;
- Le débit est continu ;

- En cas de dysfonctionnement du circuit de refoulement (colmatage), la pompe ne subit pas aucun dommage.

Inconvénients :

- Elle n'est pas auto-amorçant ;
- Elle ne fonctionne pas avec des fluides trop visqueux ;
- Elle nécessite des dispositifs d'équilibrage.

❖ **Différents types de pompes centrifuges :**

Il existe différentes formes de roues et d'aubes qui induisent une classification de ces machines.

- Des rotors fermés ou rotors ouverts ;
- On peut monter plusieurs roues sur le même arbre ce qui permet d'augmenter la pression de refoulement On les appelle pompes multicellulaires ou multi-étagées

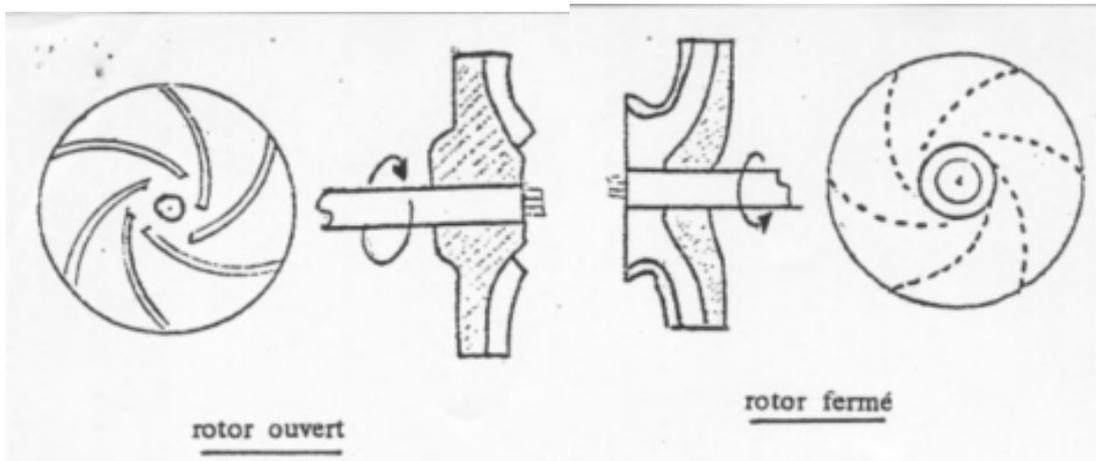


Figure (II.4) : pompe centrifuge à rotor ouvert et à rotor fermé.

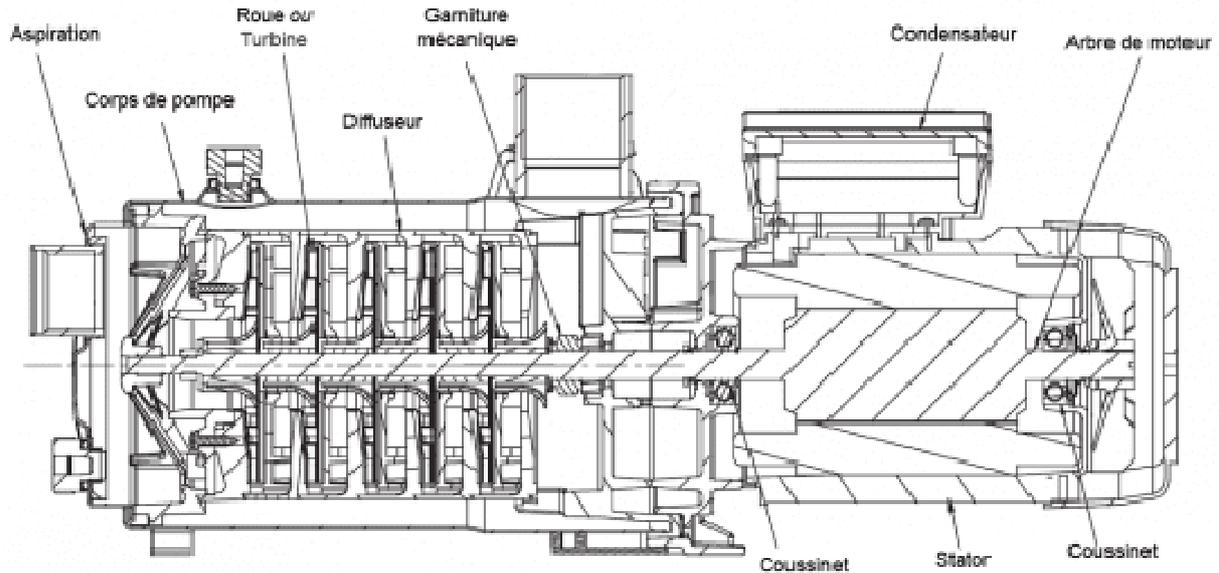


Figure (II.5) : pompe centrifuge multi-étagée.

II.2 Critères de choix d'une pompe

Les pompes peuvent également être classées en fonction du type de fluide pompé, nombre d'étages, la géométrie de la volute et ainsi de suite. Voici les bases les plus courantes pour les classifications supplémentaires des pompes :

- Forme de la volute de la pompe : simple volute, double volute ;
- Géométrie d'aspiration : seule aspiration, double aspiration entrée axiale ou latérale, etc.
- Disposition de l'arbre : l'arbre de pompe peut être horizontal, vertical ou incliné.
- Pression de refoulement ou de la consommation d'énergie : les pompes sont parfois classées comme basse pression, haute pression ou haute énergie.
- Nombre d'étages : dans les cas de radiale et des pompes centrifuges mixtes débit, ils peuvent être classés comme une seule étape, à double étage ou plusieurs étages.
- Type de moteur principal : dans la plupart des cas, les pompes sont entraînées par des moteurs électriques, mais dans certains cas, ils peuvent être entraînés par des moteurs diesel ou à vapeur ou des turbines à gaz.
- Condition de fonctionnement : comme la pompe submersible, pompe à moteur humide, pompe de secours, et la pompe auxiliaire. [42]

II.2 Dimensionnement de l'installation de pompage photovoltaïque

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée. Ce chapitre permet d'estimer de manière pratique les paramètres qui définiront le système de pompage. Tous les manufacturiers ont leur propre méthode pour bien dimensionner leurs produits. Nous nous limiterons ici à fournir une méthode générale qui permettra de dimensionner théoriquement les éléments d'un système de pompage afin de donner un ordre de grandeur de ces éléments et de comparer les coûts du point de vue réalisation pratique. Il y a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe solaire. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible.

Ces trois paramètres sont:

1. La quantité d'eau requise par jour,
2. La disponibilité de l'eau,
3. La ressource solaire.

La ressource solaire peut être estimée assez facilement avec un faible degré d'erreur. Par contre, l'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saison en saison et d'année en année. Les facteurs comme l'accroissement d'une population dans un village et un niveau dynamique variable du puits ou du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

II.2.1 Estimation des besoins en eau :

La boisson, la cuisine, la lessive et la toilette constituent les principaux usages de l'eau pour les besoins humains. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie.

La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie, quelle qu'en soit leur ampleur.

Besoin en eau	
Humains	
Survie	5 litre/jour
Minimum admissible	10 litre/jour
Conditions de vie normales en Afrique de l'ouest	30 litre/jour
Animaux	
Bœuf	40 litre/jour
Mouton, chèvre	5 litre/jour
Cheval	40 litre/jour
Ane	20 litre/jour
Chameau	20 litre/jour (réserve de 8 jours)
Irrigation	
Cultures à l'échelle du village	60 m ³ /j/ha
Riz	100 m ³ /j/ha
Graines	45 m ³ /j/ha
Canne à sucre	65 m ³ /j/ha
Coton	55 m ³ /j/ha

Tableau (II-1) : le tableau relatif au besoin en eau.

Dans l'optique de la réalisation du projet nous établissons une installation de simple ordre pour une population de 500 personnes en raison d'un besoin en eau de 50l par personne et par jour d'où le choix des dimensions suivantes pour cette installation. [39].

II.2.2 Dimensionnement du réservoir

À raison de 500 personnes et consommation individuelles de 50l/j (irrigation, bétail et humain incluse) nous devons avoir un réservoir capable d'assurer le volume nécessaire journalier ainsi qu'une certaine marge de sécurité et de confort sur la consommation. Nous jugeons donc nécessaire de prendre un réservoir de 40 m³. La sortie du réservoir découle sur une borne-fontaine

au niveau du sol ainsi que dans des conduites menant jusqu'aux maisons grâce à la hauteur élevée du réservoir la gravité assure une alimentation à tout temps et sans pompage.

II.2.3 *Dimensionnement des conduites de l'installation*

La nature du site relié au forage et au réservoir impose d'avoir une longueur totale de conduites de 75 mètres avec une hauteur géométrique de 60 mètre. Sur le long des conduites est placé deux vannes permettant d'assurer un contrôle d'arrêt d'urgence ou de maintenance à certains niveaux de l'installation.

II.2.4 *Dimensionnement du groupe motopompe*

▪ **Pompe :**

❖ Caractéristiques générales :

Pour caractériser une pompe, on s'appuie sur trois courbes caractéristiques. Dans le cadre des pompes et du pompage, il est d'usage, par convention et par commodité, d'exprimer la quantité transportée et la distance du déplacement au moyen de deux paramètres. [33]

Le débit (Q) :

Le débit fourni (Q) par une pompe (ou une station de pompage) est le volume d'eau qu'elle refoule par unité de temps. Il s'exprime en litres par minute (l/min) ou, plus pratiquement, en mètres cubes par heure (m³/h).

La hauteur manométrique (H_{MT}) :

On appelle Hauteur manométrique H_{MT} d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si H_{TA} est la charge totale du fluide à l'orifice d'aspiration et H_{TR} la charge totale du fluide à l'orifice de refoulement, la hauteur manométrique de la pompe est donnée par l'équation suivante :

$$H_{MT} = H_{TA} - H_{TR} \quad (II.1)$$

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique $H = f(Q)$ de la pompe considérée.

Cette hauteur qui tient compte des pertes de charge du circuit hydraulique ainsi que la différence entre le niveau d'aspiration et le niveau de refoulement. Ce paramètre est exprimé en mètres de fluide (mètres de colonne d'eau) et diminue généralement en fonction du débit pompé.

❖ **Caractéristique de la pompe :**

Selon l'équation de Bernoulli, on peut écrire :

$$P_{refoul} - P_{asp} = \rho g H_{MT} - \Delta P_{ch} \quad (II.2)$$

$$P_{refoul} - P_{asp} = \rho g H_{MT} \quad (II.3)$$

Donc la hauteur manométrique totale décroît avec le débit, du fait des pertes par frottements dans la pompe. La courbe donnant cette hauteur manométrique totale en fonction du débit est appelée « caractéristique de la pompe ».

$$H_{MT} = \Delta H_{pompe} = \frac{\Delta P_{pompe}}{\rho g} \quad (II.4)$$

Avec : ΔP_{pompe} : la pression différentielle de la pompe

$$H_{MT} = H_G + \Delta H \rightarrow \text{pompe en aspiration} \quad (II.5)$$

$$H_{MT} = H_G + \Delta H - H_C \rightarrow \text{pompe en charge} \quad (II.6)$$

ΔH : Pertes de charge

H_C : hauteur en aspiration pour une pompe montée en charge

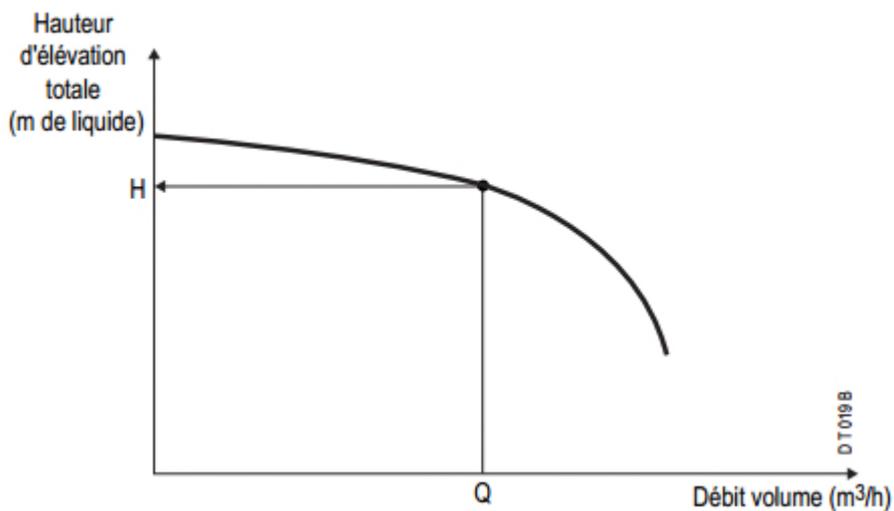


Figure (II.6) : caractéristique H-Q d'une pompe centrifuge.

Caractéristique du rendement :

Le rendement η_p d'une pompe est le rapport de la puissance utile P_{hydro} (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée P_m par la pompe (en bout

d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur). Si Q est le débit volume du fluide, ρ sa masse volumique et H_{MT} la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P_{hyd} et le rendement η_p sont donnés par :

$$\eta_p = \frac{P_{hyd}}{P_m} \quad (II.7)$$

P_{hydro} : Puissance fournie au fluide donné par :

$$P_{hyd} = \rho g H_{MT} Q = Q \Delta P_{pompe} \quad (II.8)$$

P_m : Puissance absorbé par la pompe.

Puisque la hauteur manométrique décroît avec le débit Q , la courbe (η_p, Q) présente un maximum, donc le rendement de la pompe varie avec le débit et passe par un maximum pour le débit nominal autour duquel la pompe doit être utilisée.

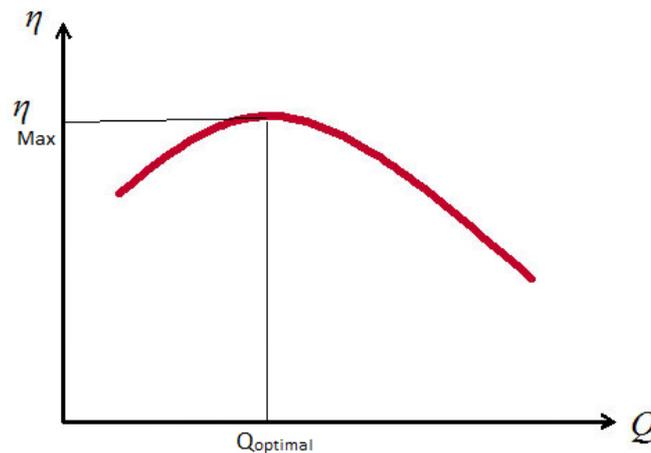


Figure (II.7) : caractéristique η_p - Q d'une pompe centrifuge.

Caractéristique du NPSH (« Net Positive Suction Head ») :

Si on appelle « s » la dépression locale maximale qui peut avoir lieu dans la pompe.

Pour éviter le phénomène de la cavitation, il faut que la pression à l'aspiration soit telle que :

$$P_{asp} - s > P_{vap} \quad (II.9)$$

P_{asp} : Pression à l'aspiration ;

P_{vap} : Pression de vapeur saturante à la température considérée.

La cavitation est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondant à sa température. Ce phénomène se produit à l'orifice d'aspiration de la pompe ; des bulles apparaissent dans les zones où la pression

est la plus faible (entrée des aubes de roue des pompes centrifuges) : elles sont transportées dans les zones de pressions plus fortes où se produit leur ré-condensation. Des implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très élevées (jusqu'à des centaines de bars) La cavitation est un phénomène à éviter absolument, car il entraîne de graves conséquences: érosion du matériau pouvant aller jusqu'au perçage des aubes de turbine des pompes centrifuges augmentation du bruit et des vibrations générés par la pompe chute des performances des pompes avec diminution importante de la hauteur manométrique totale, du débit et du rendement.



Figure (II.8) : usure due au phénomène de la cavitation.

En conclusion, on peut dresser une liste de conseils à respecter, si le procédé le permet, pour éviter la cavitation: préférer si possible les montages de pompes en charge. Eviter de transporter des liquides à des températures trop élevées. Eviter une alimentation à partir d'un réservoir sous pression réduite. Diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration. Si ces conseils ne peuvent être appliqués en raison des exigences du procédé, il ne reste plus qu'à trouver une pompe dont les caractéristiques montrent des valeurs de N.P.S.H requis suffisamment faibles.

Le critère qui sert à définir la pression nécessaire à l'aspiration pour obtenir un bon fonctionnement de la pompe, c'est à dire pour maintenir en tout point du fluide une pression supérieure à la pression de vapeur saturante, est le «NPSH » (sigle de l'abréviation anglo-saxonne de « Net Positive Suction Head » over vapour pressure).

Cette caractéristique, donnée par le constructeur est qualifiée de « NPSH requis ». Elle tient compte en particulier de la chute de pression que subit le fluide lors de son accélération à l'entrée de la roue. La pompe ne fonctionnera correctement que si la pression totale à l'entrée P_A est supérieure à la somme $P_0 + \text{NPSH requis}$. On appelle « NPSH disponible » la différence entre la pression totale à l'entrée et la pression de vapeur saturante :

$$NPSH_{disponible} = P_A - P_0 \quad (II.10)$$

Les conditions d'aspiration sont d'autant meilleures que la différence entre les deux est grande.

Pour qu'une pompe fonctionne normalement (sans cavitation), il faut que le NPSH disponible (calculé) soit supérieur au NPSH requis (indiqué par le constructeur).

$$\text{NPSH disponible} > \text{NPSH requis.}$$

On définit le NPSH comme suit :

$$\text{NPSH} = \frac{P_{asp}}{\rho g} = \frac{P_{vap}}{\rho g} \quad (II.11)$$

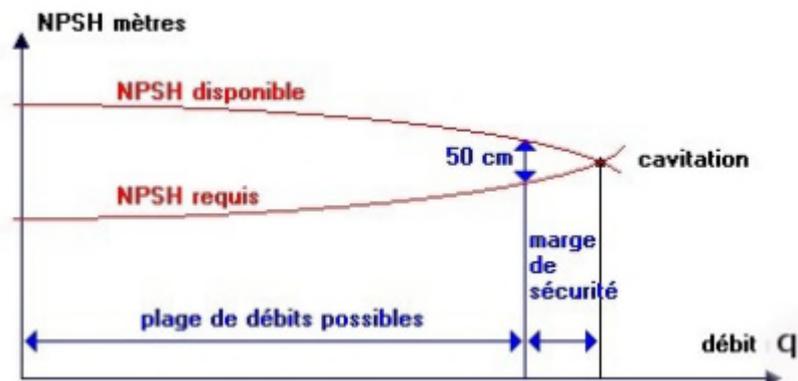


Figure (II.9) : caractéristique NPSH-Q d'une pompe centrifuge.

II.2.5 Le point de fonctionnement

Le point auquel la courbe de la pompe et celle du circuit se croisent est le point de fonctionnement actuel du circuit d'alimentation en eau. Cela signifie qu'à ce point, il y a équilibre entre la génération de puissance de la pompe et la consommation d'énergie requise pour surmonter la résistance dans le système de tuyaux. Cela génère le débit que la pompe peut produire. Il faut faire attention à ne pas dépasser une valeur de débit minimale. Sinon la pompe pourrait surchauffer et être endommagée. Les spécifications du fabricant doivent être respectées. Un point de fonctionnement situé en dehors de la courbe de pompe endommagera le moteur.

Le point de fonctionnement varie en permanence en raison des fluctuations de débit au cours du fonctionnement. Le Bureau d'études doit trouver un point de fonctionnement qui correspond aux contraintes maximales. Pour les pompes de circulation de chauffage, il s'agit de la charge de chauffage du bâtiment ; pour les systèmes de distribution ou surpression, il s'agit du débit maximum de tous les robinets. Tous les autres points de fonctionnement apparaissant en fonctionnement réel sont situés à gauche de ce point de fonctionnement prévu sur la courbe. Les deux illustrations à droite indiquent que le changement de point de fonctionnement provient du changement de résistance du réseau. Si le point de fonctionnement se décale vers la gauche du

point de sélection, la hauteur de refoulement de la pompe augmentera nécessairement. Cela provoque un bruit d'écoulement dans les robinets. L'installation de pompes à débit variable adapte la hauteur de refoulement et le débit à la charge requise. Elle réduit également les coûts de fonctionnement de manière importante.

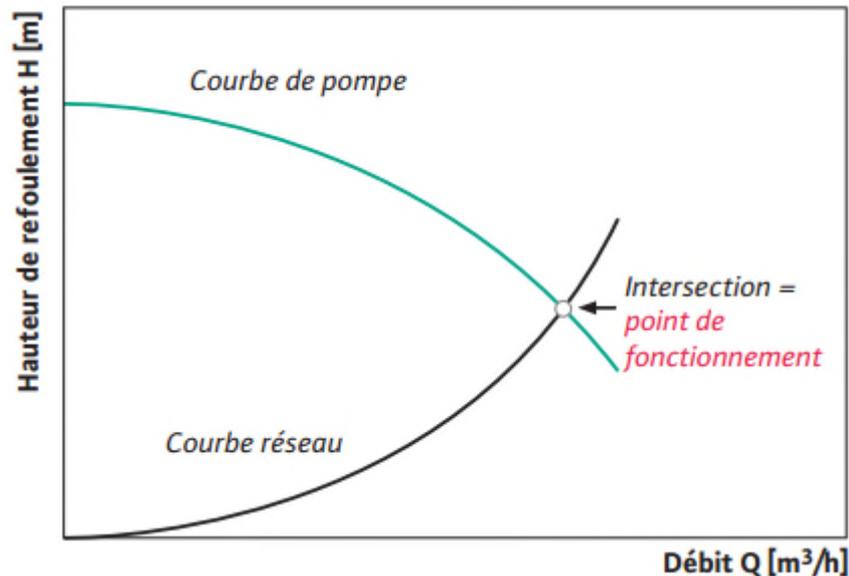


Figure (II.10) : caractéristique du point de fonctionnement d'une pompe centrifuge.

❖ **Equations caractéristiques de transport de liquide :**

Un peu plus haut dans le chapitre nous avons développé la formule de la hauteur manométrique incluant les pertes relatives à l'installation :

$$H_{MT} = H_G + \Delta H \quad (II.12)$$

Avec

$$\Delta H = \Delta H_{ref} + \Delta H_{asp} \quad (II.13)$$

$$\text{En prenant compte de la conservation des débits : } Q = V_r * S_r = V_a * S_a \quad (II.14)$$

$$\text{Et en remplaçant: } S = \pi * R^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (II.15)$$

On obtient comme formule globale de pertes :

$$\Delta H = \frac{8}{\pi^2 g} \left[\left(k_r + \frac{\lambda L_r}{d_r} \right) \frac{1}{d_r^4} + \left(k_a + \frac{\lambda L_a}{d_a} \right) \frac{1}{d_a^4} \right] Q^2 \quad (II.16)$$

$$H_{MT} = H_G + A Q^2 \quad (II.17)$$

$$\text{Avec } A = \frac{8}{\pi^2 g} \left[\left(k_r + \frac{\lambda L_r}{d_r} \right) \frac{1}{d_r^4} + \left(k_a + \frac{\lambda L_a}{d_a} \right) \frac{1}{d_a^4} \right] \quad (II.18)$$

K_r, K_a : Coefficient de pertes singulières au refoulement et aspiration ;

λ : Coefficient de pertes linéaires lié à la conduite utilisée ;

L_r, L_a : Longueur de refoulement et aspiration des conduites ;

d_r, d_a : Diamètres des conduites de refoulement et d'aspiration ;

A : une constante pour un circuit donné (caractéristique d'un circuit).

Dans notre cas d'étude le choix de la pompe immergé implique que la partie aspiration disparaisse ainsi les termes en aspiration sont nuls.

II.2.6 Critères de choix des pompes centrifuges

Une pompe centrifuge doit être choisie en fonction de l'installation dans laquelle elle sera placée et en tenant compte des éléments suivant :

❖ Critère 1 : Les propriétés du liquide

Elles sont indispensables pour le bon choix des matériaux utilisés pour la fabrication de la pompe qui sont en contact avec le liquide, dans notre cas le liquide étant l'eau nous avons une large panoplie de choix et ce critère donc ne pose pas d'obstacles.

❖ Critère 2 : Le débit souhaité Q_s

La pompe doit être capable d'assurer le débit Q_s , le débit souhaité Q doit être au voisinage et à droite du point maximal de la courbe de rendement, ainsi cette position de la valeur du débit par rapport au rendement assure une certaine stabilité dans le fonctionnement de la pompe et un régime plus constant.

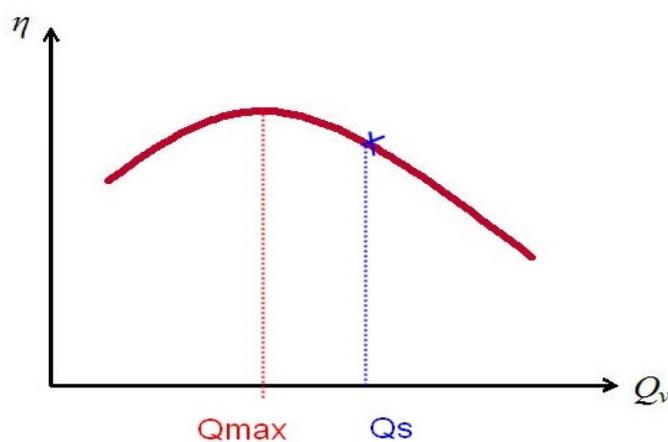


Figure (II.11) : choix graphique du débit souhaité.

❖ **Critère3 : La hauteur manométrique de la pompe à vide**

C'est une hauteur caractéristique de la pompe à vide H_{m0} elle doit être supérieure à la hauteur géométrique de l'installation de pompage H_G

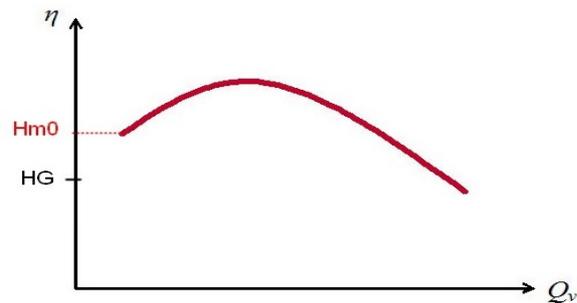


Figure (II.12) : détermination graphique du H à Q nul d'une pompe centrifuge.

❖ **Critère4 : La hauteur manométrique de la pompe à rendement maximal**

C'est une hauteur caractéristique de la pompe à rendement maximal H_{m1} qui doit être supérieure à la hauteur géométrique de l'installation de pompage H_G .

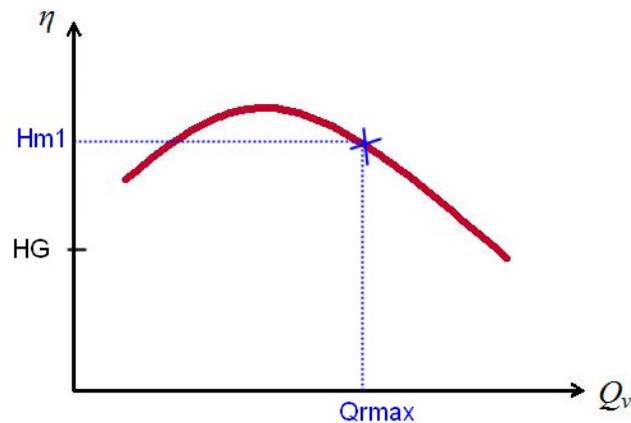


Figure (II.13) : détermination graphique du H à Q max d'une pompe centrifuge.

❖ **Critère5 : Le point de fonctionnement**

Afin d'assurer le fonctionnement dans des conditions nominales de la pompe le débit du point de fonctionnement doit se situer au voisinage et à droite du débit souhaité dans la courbe hauteur-débit.

❖ **Critère 6 : Le NPSH (critère 6) :**

La cavitation a toujours été une source d'usure et de panne, même si l'installation d'une pompe immergée peut atténuer le problème il faut toujours s'assurer avant l'achat de la pompe que pour un débit de fonctionnement Q^* il faut :

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{reçu} \quad (II.19)$$

Si maintenant les valeurs du NPSH sont difficiles à avoir on peut toujours vérifier que la pression absolue d'aspiration de la pompe au débit Q^* est supérieure à la pression absolue de vaporisation du liquide.

$$P_{asp}(Q^*) > P_{vap} \quad (II.20)$$

II.2.7 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Ayant défini le besoin en eau, la puissance du générateur qui doit être fournie est déterminée par la puissance en fonctionnement nominal du groupe motopompe qui est de 1.5kW ajouter à cela le rendement des convertisseurs, le générateur photovoltaïque sera constitué d'une association de panneaux en série

$$I_{GPV} = Np * I = 1 * 3.15 = 3.15 A \quad (II.21)$$

$$V_{GPV} = Ns * V = 14 * 35 = 490 V \quad (II.22)$$

$$P_{GPV} = I_{GPV} * V_{GPV} = 1543.5 W \quad (II.23)$$

- **Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue d'ensemble sur les différentes technologies et types de pompes ainsi que les critères de choix d'une pompe adéquate à notre installation. Le choix spécifique de chaque élément du système de pompage photovoltaïque étant fait, nous avons entamé le dimensionnement de tout le système afin de pouvoir le modéliser, ce qui fera l'objet du prochain chapitre de ce travail.

Chapitre III :

Modélisation du système de pompage photovoltaïque

- **Introduction :**

Ce chapitre comporte la modélisation de chaque élément du système de pompage photovoltaïque comprenant tous les paramètres qui influencent de manière directe sur le système (Ensoleillement, température, couple résistant etc.) afin de pouvoir simuler et obtenir des résultats concrets montrant l'efficacité du système.

III.1 Modélisation du panneau photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques existent dans la littérature, nous choisissons (avons choisis) un modèle simplifié à cinq paramètres (I_{SC} , V_{OC} , I_{MPP} , V_{MPP} , R_s) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

Le schéma ci-dessous est le schéma équivalent d'un module photovoltaïque qui comprend un générateur de courant modélisant l'éclairement, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN et des résistances en série et en parallèle qui tiennent en compte de l'effet résistif des parasites dus à la fabrication.

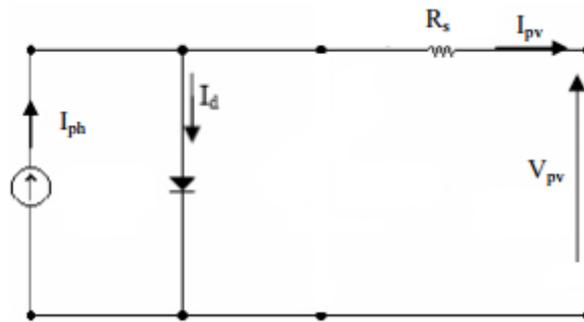


Figure (III.1) : schéma équivalent d'un module photovoltaïque.

A partir de ce schéma nous allons établir les équations utiles et nécessaires pour donner le modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab (Simulink).

L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (III. 1)$$

Ou
$$I_{pv} = I_{sc} \{1 - K_1 [\exp K_2 V_{pv}^m - 1]\} \quad (III. 2)$$

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par:

$$K_1 = 0.01175 \quad (III. 3)$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (III. 4)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad (III. 5)$$

$$K_4 = \frac{(1 + K_1)}{K_1} \quad (III. 6)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (III. 7)$$

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}) ;

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimum (V_{opt}) ;

I_{sc} : Courant en court-circuit ;

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

Ces paramètres sont donnés dans le tableau des caractéristiques du panneau photovoltaïque se trouvant dans l'annexe I.

Ces équations plus particulière celle du courant photovoltaïque ne sont applicable que dans les conditions standards de fonctionnement c'est-à-dire un niveau d'ensoleillement G et de température particuliers ($G_{stc}=1000W/m^2$, $T_{stc}=25^\circ C$).

Le modèle du PV étant établi, nous intégrons la variation de la température et de l'ensoleillement à partir des équations qui suivent :

$$\Delta T_C = T_C - T_{stc} \quad (III. 8)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_C + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc, stc} \quad (III. 9)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_C - R_s \Delta I_{pv} \quad (III. 10)$$

Avec : G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement (STC) et dans des conditions quelconques.

T_{stc} et T_C : Représentent respectivement, la température dans les conditions STC et dans des conditions quelconques.

ΔT_C : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
 α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions STC).
 β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions STC). Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad (III.11)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad (III.12)$$

III.2 Convertisseur statique DC/DC (hacheur survolteur):

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée. Son circuit de base est celui de la figure (II-15) si dessous.

$$\begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_{pv} \\ I = (1-\alpha) \cdot I_L \end{cases} \quad (III.13)$$

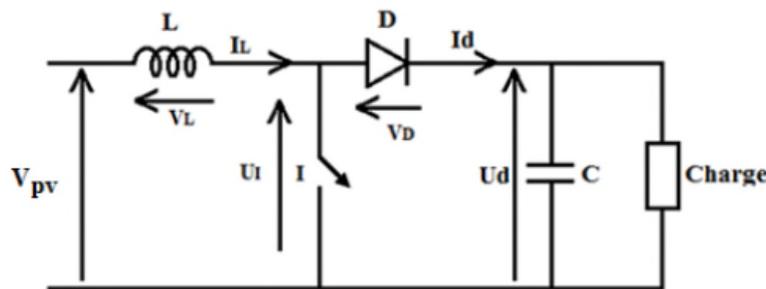


Figure (III.2) : schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster.

III.3 Optimisation du générateur photovoltaïque :

Pour l'optimisation du générateur nous avons utilisé une commande MPPT : une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un étage intermédiaire DC-DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température). [36]

▪ Perturbation et Observation (PO) :

Cet algorithme se base sur la recherche du point de fonctionnement optimal par la perturbation du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la

puissance débitée par le générateur photovoltaïque. Donc, l'algorithme de poursuite 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. [45]

Dans la figure ci-dessous nous déduisons que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , ce qui signifie donc que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point optimal. Si au contraire la puissance diminue, alors le système a dépassé le point optimal, on peut raisonner de façon similaire lorsque la tension diminue.

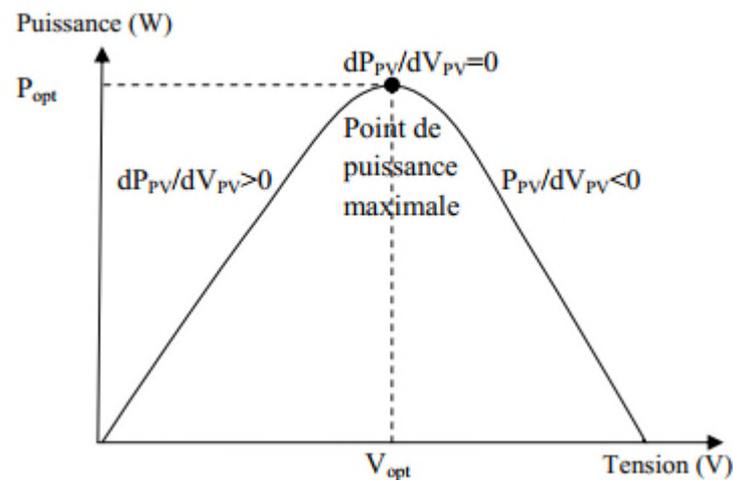


Figure (III.3) : détermination du PPM.

En résumé, si suite à une perturbation de tension la puissance augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau point de puissance maximale. La figure qui suit représente l'algorithme classique associé à une commande de type perturbation et observation, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs sont nécessaires pour déterminer la puissance de la source à chaque instant.

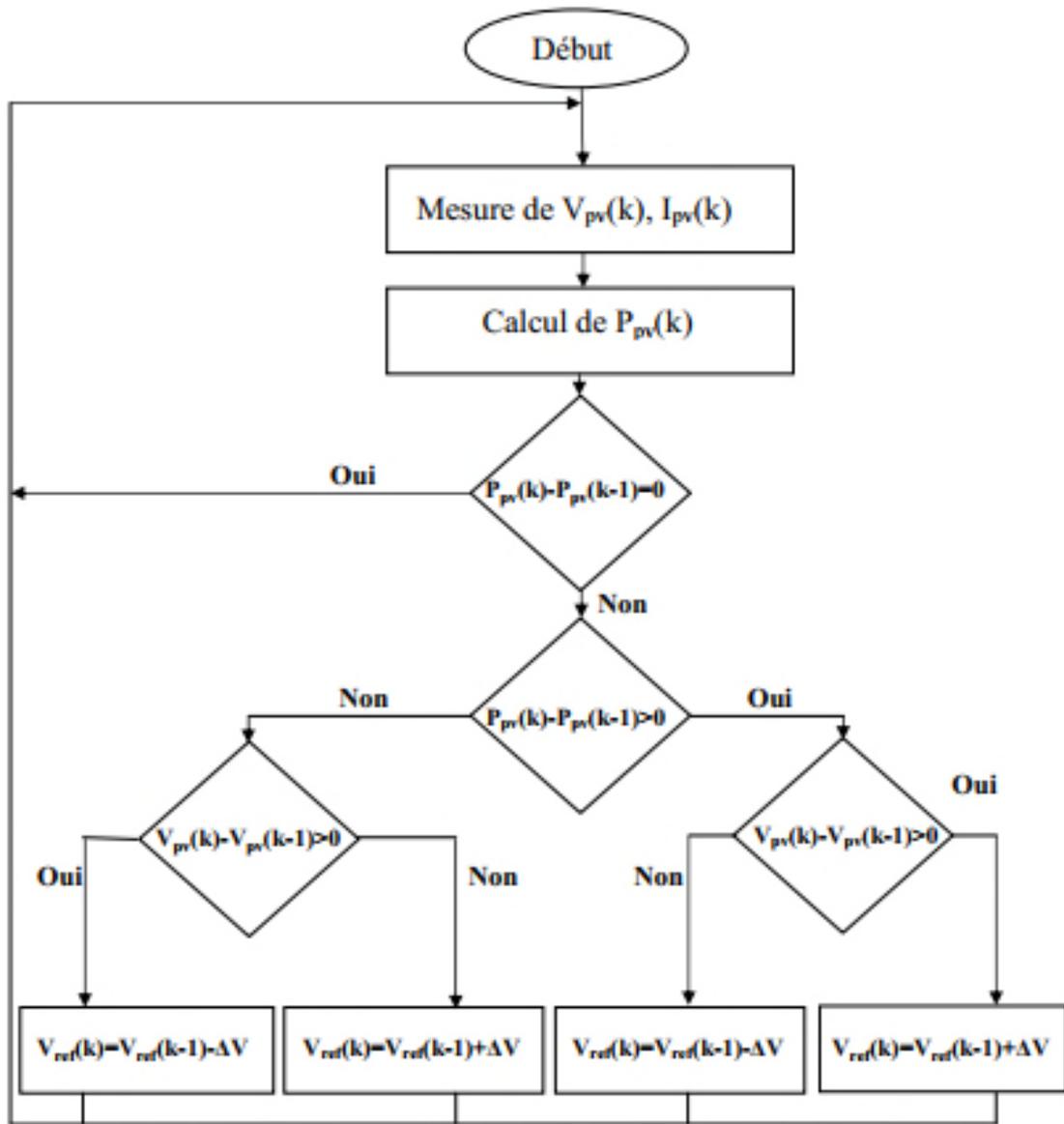


Figure (III.4) : organigramme de la méthode PO.

Cet algorithme de recherche de PPM peut être établi sur Simulink en se basant sur les principes fondamentaux de la logique booléenne et nous donnons ci-dessous sa constitution :

III.4 Association de la Commande MPPT , le hacheur BOOST et la régulation

Nous effectuons la liaison entre les blocs (panneau PV, hacheur, commande MPPT et régulation) sur la figure ci-dessous.

La régulation du bloc convertisseur+MPPT se réalise en utilisant des régulateurs PI. Les grandeurs à réguler sont la tension V_{opt} et le courant I_L ainsi le rapport cyclique optimal est généré et injecté dans le hacheur. Une fois ces composants modélisés nous pouvons associer le générateur photovoltaïque avec le hacheur contrôlé par MPPT et régulé pour obtenir le système ci-dessous

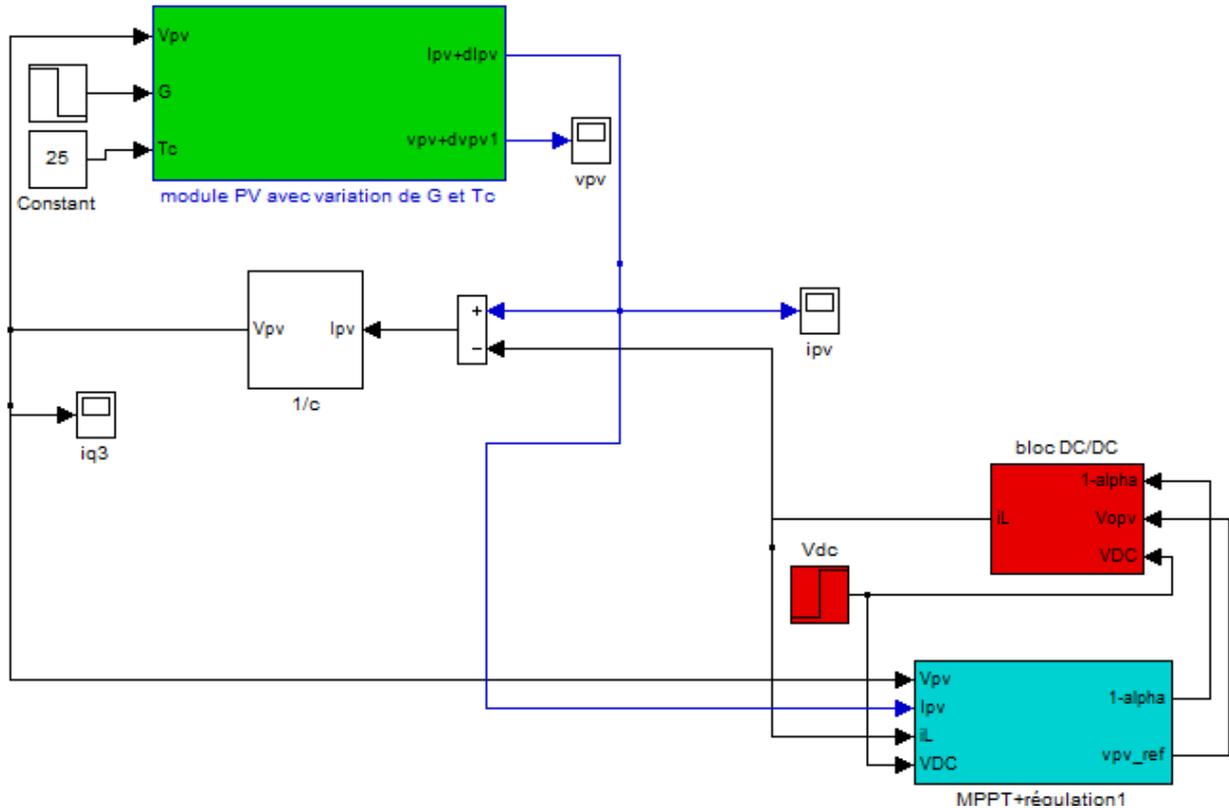


Figure (III.5) : module PV avec variation et commande MPPT.

III.5 Convertisseur statique DC/AC (Onduleur MLI) :

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i=a,b,c$):

$S_i = 1$: le cas où l'interrupteur est fermé

$S_i = 0$: le cas où l'interrupteur est ouvert

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions de phases $U_{ina,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_i :

$$U_{ina,b,c} = S_i U_c - \frac{U_c}{2} \quad (III.14)$$

Les trois tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « O ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (III.15)$$

Soit « n » le point neutre du coté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (III.16)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (III.17)$$

La substitution nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (III.18)$$

En remplaçant (III.18) dans (III.16) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (III.19)$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (S_a , S_b , S_c) permettent de générer huit vecteurs tensions dont deux correspondent au vecteur nul. L'utilisation de l'expression (1-3) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

- **Commande par Hystérésis :**

La réalisation de cette technique, régulation par tout ou rien, consiste à accomplir les deux étapes suivantes :

- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis;

- Fixer une bande dans laquelle le courant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre.

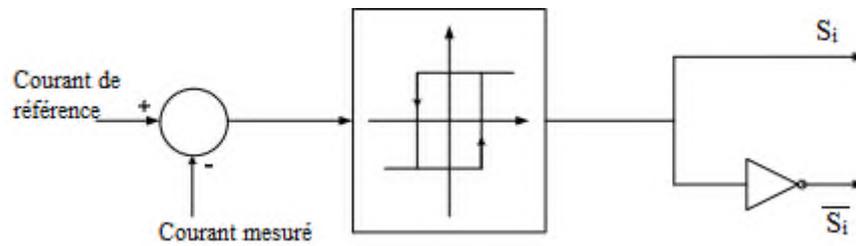


Figure (III.6) : principe de commande par hystérésis.

III.6 Mise en équation de la MAS en vue de la commande :

Le schéma équivalent suivant représente une phase statorique de la MAS :

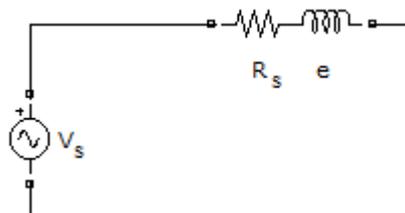


Figure (III.7): schéma d'un circuit RL.

La loi de maille aux bornes de ce schéma nous donne la relation suivante :

$$V_s = R_s \cdot I_s - e = R_s \cdot I_s + \frac{d}{dt}(\Phi_s) \quad (III.21)$$

$$\text{Avec} \quad e = -\frac{d}{dt}(\Phi_s) \quad (III.22)$$

Ainsi pour les trois phases on a les équations suivantes :

$$V_{S1} = R_{S1} \cdot i_{S1} + \frac{d}{dt}(\Phi_{S1}) \quad (III.23)$$

$$V_{S2} = R_{S2} \cdot i_{S2} + \frac{d}{dt}(\Phi_{S2}) \quad (III.24)$$

$$V_{S3} = R_{S3} \cdot i_{S3} + \frac{d}{dt}(\Phi_{S3}) \quad (III.25)$$

Sachant que $R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = R_S$ on peut écrire le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{S1} \\ i_{S2} \\ i_{S3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \emptyset_{S1} \\ \emptyset_{S2} \\ \emptyset_{S3} \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

Ce qui se traduit sous forme condensée par l'équation suivante :

$$[V_S] = [R_S] \cdot [I_S] + \frac{d}{dt} [\emptyset_S] \quad (III.27)$$

En substituant les chiffres (1, 2, 3) par les lettres (a, b, c) pour chacune des trois phases statoriques on a la forme suivante :

$$[V_{abc}]_S = [R_S] \cdot [I_{abc}]_S + \frac{d}{dt} [\emptyset_{abc}]_S \quad (III.28)$$

La commande vectorielle étant une commande qui nécessite la modélisation de la MAS dans la base de Park (d, q,0) on fait appel à la formule de changement de base suivante :

$$[V_{dq0}]_S = [P(\theta_S)] \cdot [V_{abc}]_S \text{ et par consequence } [V_{abc}]_S = [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [V_{dq0}]_S \quad (III.29)$$

En multipliant cette équation par $[P(\theta_S)]$ il vient :

$$[P(\theta_S)]^{-1} \cdot [V_{dq0}]_S = [R_S] \cdot [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [I_S] + \frac{d}{dt} \left([P(\theta_S)]^{-1} \cdot [\emptyset_{dq0}]_S \right) \quad (III.30)$$

$$[P(\theta_S)]^{-1} \cdot [V_{dq0}]_S = [R_S] \cdot [I_{dq0}]_S + \frac{d}{dt} [\emptyset_{dq0}]_S + [P(\theta_S)] \frac{d}{dt} ([P(\theta_S)]^{-1}) \cdot [\emptyset_{dq0}]_S \quad (III.31)$$

L'évaluation du premier terme de cette équation nous donne :

$$\frac{d}{dt} [P(\theta_S)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \emptyset_{Sd} \\ \emptyset_{Sq} \\ \emptyset_{S0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\theta_S}{dt} \cdot \begin{bmatrix} -\sin\theta_S & -\cos\theta_S & 0 \\ -\sin(\theta_S - 2\pi/3) & -\cos(\theta_S - 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\theta_S - 4\pi/3) & -\cos(\theta_S - 4\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \emptyset_{Sd} \\ \emptyset_{Sq} \\ \emptyset_{S0} \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

On pose $\frac{d\theta_S}{dt} = \omega_S$ et d'où le résultat final :

$$(V_{Sdq}) = [R_S] \cdot [I_{Sdq}] + \frac{d}{dt} \cdot (\emptyset_{Sdq}) + \omega_S \cdot \begin{bmatrix} -\emptyset_{Sq} \\ \emptyset_{Sd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

Ou encore en développant les composantes de PARK pour le stator :

$$V_{Sd} = R_S \cdot I_{Sd} + \frac{d}{dt} \cdot \emptyset_{Sd} - \omega_S \cdot \emptyset_{Sq} \quad (III.34)$$

$$V_{Sq} = R_S \cdot I_{Sq} + \frac{d}{dt} \cdot \emptyset_{Sq} + \omega_S \cdot \emptyset_{Sd} \quad (III.35)$$

$$V_{S0} = R_S \cdot I_{S0} + \frac{d}{dt} \cdot \emptyset_{S0} \quad (III.36)$$

On notera le couplage de V_{Sd} avec \emptyset_{Sq} et V_{Sq} avec \emptyset_{Sd} .

On aura les mêmes équations au niveau du rotor en changeant partout l'indice « S » en « R » et en annulant les tensions puisque le rotor est court-circuité.

▪ **Equations du flux :**

$$[P(\theta_S)]^{-1} \cdot (\Psi_{SP}) = [L_S] \cdot [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [I_{SP}] + [M_{SR}] \cdot [P(\theta_R)]^{-1} \cdot [I_{RP}] \quad (III.37)$$

On remarque ici que l'angle θ_S est celui du stator et l'angle θ_R celui du rotor.

En multipliant à gauche par $[P(\theta_S)]$ il vient que :

$$(\Psi_{SP}) = [P(\theta_S)] \cdot [L_S] \cdot [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [I_{SP}] + [P(\theta_S)] \cdot [M_{SR}] \cdot [P(\theta_R)]^{-1} \cdot [I_{RP}] \quad (III.38)$$

La matrice $[P(\theta_S)] \cdot [L_S] \cdot [P(\theta_S)]^{-1}$ ne pose pas problème compte tenu de la formule de changement de base pour les matrices :

$[M]_{NB} = [P(\theta_S)] \cdot [M]_{AB} \cdot [P(\theta_S)]^{-1}$, il ne peut s'agir que de la matrice diagonale suivante :

$$\begin{bmatrix} L_S - m_S & 0 & 0 \\ 0 & L_S - m_S & 0 \\ 0 & 0 & L_S + 2m_S \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

$[P(\theta_S)] \cdot [M_{SR}] \cdot [P(\theta_R)]^{-1}$ Est moins simple à obtenir à cause des deux angles θ_S pour le stator et l'angle θ_R pour le rotor qui interviennent.

En faisant coïncider les axes directs rotor et stator le calcul se simplifie.

On pose : $\theta_S = \theta_R + \alpha$

$$[M_{SR}] \cdot [P(\theta_R)]^{-1} = m_{SR} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos(\alpha - 4\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos\alpha & \cos(\alpha - 4\pi/3) \\ \cos(\alpha - 4\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

▪ **Expression du couple instantané :**

Pour obtenir l'expression du couple, exprimons l'expression de la puissance instantanée dans la base de PARK tout en tenant compte du fait que le terme homopolaire sera nul.

$$P_E = (V_S)^T \cdot (I_S) = v_{s1} \cdot i_{s1} + v_{s2} \cdot i_{s2} + v_{s3} \cdot i_{s3} = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \quad (III.41)$$

$$P_E = \left| R_S \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \cdot \emptyset_{Sd} - \omega_S \cdot \emptyset_{Sq} \right| \cdot I_{sd} + \left| R_S \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \cdot \emptyset_{Sq} + \omega_S \cdot \emptyset_{Sd} \right| \cdot I_{sq} \quad (III.42)$$

Le premier terme représente les pertes Joule, le second terme la puissance électromagnétique stockée et le troisième terme qui représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

Cette puissance peut se mettre sous la forme :

$$P_m = T_{em} \cdot \Omega_S = \omega_S (\emptyset_{Sd} \cdot I_{Sq} - \emptyset_{Sq} \cdot I_{Sd}) \quad (III.43)$$

$$T_{em} = \frac{\omega_S (\emptyset_{Sd} \cdot I_{Sq} - \emptyset_{Sq} \cdot I_{Sd})}{\Omega_S} \quad (III.44)$$

$$T_{em} = p \cdot (\emptyset_{Sd} \cdot I_{Sq} - \emptyset_{Sq} \cdot I_{Sd}) \quad (III.45)$$

Ici p désigne le nombre de pair de pôle.

Finalement nous avons :

$$\begin{cases} T_{em} = p \cdot (\Psi_{Sd} \cdot I_{Sq} - \Psi_{Sq} \cdot I_{Sd}) \\ T_{em} = p M_{SR} (I_{Sd} \cdot I_{Sq} - I_{Rd} \cdot I_{Sd}) \\ T_{em} = p \cdot \frac{M_{SR}}{L_R} (\Psi_{Sd} \cdot I_{Sq} - \Psi_{Sq} \cdot I_{Sd}) \end{cases} \quad (III.46)$$

▪ La commande vectorielle de la MAS :

Le principe de la commande vectorielle a été découvert par Félix Blaschke en 1972, elle a pour objectif le découplage du flux et du couple dans les machines à courant alternatif. En fait, nous cherchons de nous rapprocher de la commande d'une machine à courant continu, en éliminant tous les problèmes causés par le moteur à courant continu (coût, entretien lourd, puissance massique inférieure...).

Le contrôle du flux statorique ou du flux d'entrefer n'assure pas un découplage total entre le couple et celui du flux. Nous nous limitons à étudier le principe de la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique, car elle présente de meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

▪ Orientation du flux rotorique :

Plusieurs stratégies sont envisageables, on va décrire ici une commande à flux rotorique orienté.

Rappelons l'expression du couple électromagnétique (III.46) faisant intervenir le flux rotorique :

$$T_{em} = p \cdot \frac{M_{SR}}{L_R} (\emptyset_{rd} \cdot I_{Sq} - \emptyset_{rq} \cdot I_{Sd})$$

Avoir comme objectif d'orienter le flux signifie qu'on souhaite qu'il n'y ait qu'une composante sur l'axe directe d.

On aura donc comme objectif d'annuler \varnothing_{sq} . C'est bien le rôle de commande à concevoir.

Le couple se réduira alors à $T_{em} = p \cdot \frac{M_{SR}}{L_R} (\varnothing_r \cdot I_{sq})$

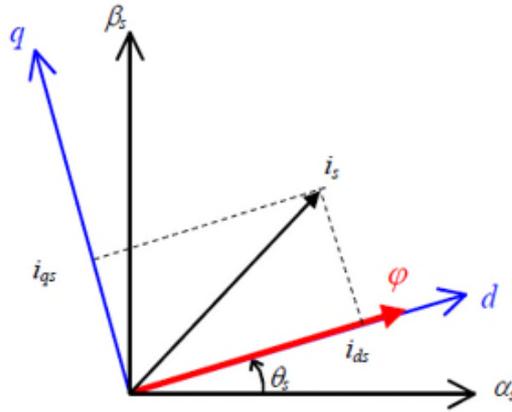


Figure (II-21) : orientation des repères

▪ **Estimation de \varnothing_{Rd} :**

A partir de,

$$\varnothing_{Rd} = L_R I_{Rd} + M_{SR} I_{Sd} \text{ et } R_R I_{Rd} + \frac{d}{dt} \varnothing_{Rd} = 0 \quad (III.47)$$

$$\text{On obtient } \varnothing_{Rd} = \frac{-L_R}{R_R} \frac{d}{dt} \varnothing_{Rd} + M_{SR} I_{Sd} \quad (III.48)$$

Qui peut être écrite en utilisant la notation de la Laplace

$$\ll S \gg = \frac{d}{dt} \text{ Et en posant } \frac{L_R}{R_R} = T_R ; \varnothing_{Rd} (1 + T_R S) = M_{SR} I_{Sd} \quad (III.49)$$

$$\varnothing_{Rd-est} = \frac{M_{SR}}{1 + T_R \cdot S} I_{Sd} \quad (III.50)$$

▪ **Estimation de ω_s et θ_s**

A partir de $R_R I_{Rq} + \omega_R \varnothing_{Rd} = 0$ et de $L_R I_{Rq} + M_{SR} I_{Sq} = 0$ on tire

$$\omega_R = \frac{-R_R}{\varnothing_{Rd}} I_{Rq} \quad (III.51)$$

$$\omega_R = \frac{M_{SR}}{\varnothing_{Rd-est}} \cdot \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} \quad (III.52)$$

$$\theta_{R-est} = \int \frac{M_{SR}}{\emptyset_{Rd-est}} \cdot \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} \cdot dt + \theta_{R0} \quad (III.53)$$

$$\text{Et } \theta_{S-est} = \theta_{R-est} + \alpha \quad (III.54)$$

Pour des raisons de commodité, on a choisi la loi de l'autopilotage suivante :

$$\omega_S = \omega_R + p \cdot \Omega = p \cdot \Omega + \frac{L_m}{T_R} \cdot \frac{I_{Sq}}{I_{Sd}} \quad \text{avec } \omega_R = \frac{L_m}{T_R} \cdot \frac{I_{Sq}}{I_{Sd}} \quad (III.55)$$

III.7 Pompe centrifuge

▪ Caractéristique « Hauteur-Débit » :

Les constructeurs fournissent les courbes $Q(H_{MT})$ maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue. Si la charge est une pompe monocellulaire à roue radiale, elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la charge hydraulique appliquée sur le fluide par la roue à aubes H_{MT} [mètre] en fonction du débit Q [m^3/s]. La hauteur H_{MT} créée par la pompe en fonction du débit Q se déduit de la caractéristique théorique H_{TH} en lui retranchant les pertes de charge. Ces pertes ΔH se produisent par frottement contre les parois des canaux d'aspiration et de refoulement. [63]

$$H_{MT} = H_G + \Delta H \quad (III.56)$$

Avec :

$$H_G = \frac{(wr_2)^2}{g} - \frac{Qw}{2\pi b_2 g} \cotg \beta_2 \quad (III.57)$$

$$\Delta H = A Q^2 \quad (III.58)$$

A : c'est la constante des pertes de charge.

r_2, b_2 et β_2 : sont des constantes données par le constructeur relatives à la forme et angles d'inclinaisons des aubes de la pompe centrifuge

La modification de la caractéristique $H_{MT}(Q)$ pour d'autres vitesses d'entraînement s'effectue par l'utilisation des lois de similitude ci-après. [64]

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (III.59)$$

$$\frac{H_{MT}}{H_{MT_n}} = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \quad (III.60)$$

Avec :

ω et ω_n : sont respectivement la vitesse réelle et la vitesse nominale de rotation de la pompe.

Q et Q_n : sont respectivement le débit réel et le débit nominal de la pompe.

H_{MT} et H_{MT_n} : sont respectivement la hauteur manométrique réelle et la hauteur manométrique nominale de la pompe.

On obtient le modèle de PELEIDER-PETERMAN qui caractérise des courbes ayant comme paramètre la vitesse ω , et identifiées par l'expression suivante :

$$H_{MT} = C_1 Q^2 + C_2 \omega Q + C_3 \omega^2 \quad (III.61)$$

Les coefficients C_1 , $2 C_2$ et C_3 étant des fonctions des caractéristiques de la pompe (forme et dimensions des aubes et du diffuseur).

ω : vitesse de rotation [rad/s],

H_{MT} : hauteur manométrique totale [m].

Q : débit [m^3/s].

- **Caractéristique « Couple-Vitesse »**

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de la vitesse. La hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. Le moteur devra, donc, être très rapide pour assurer un bon débit.

- **Caractéristique « Débit – Vitesse »**

Le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois, il faut une vitesse minimale à une H_{mt} donnée pour obtenir un débit

Puisque, le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus importante qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une H_{mt} donnée, pour obtenir un débit de départ non nul. Donc, la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r , avec C_s représentant le couple

statique, très petit et K_r le coefficient de proportionnalité $[(Nm/rad.s^{-1})^2]$ tel que BRAUNSTEIN et KORNFELD l'ont introduit en 1981[12].

$$\begin{cases} C_r = K_r \omega^2 + C_s \\ P_{mec} = K_r \omega^3 \end{cases} \quad (III.62)$$

C'est donc avec ces expressions données ci-dessus, ainsi qu'en tenant comptes des constantes du constructeur et du rendement donné dans l'annexe que nous pouvons modéliser un bloc permettant de simuler le débit résultant ainsi que la hauteur manométrique obtenue.

- **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons vu avec certains détails toutes les étapes nécessaires au dimensionnement et à la modélisation de notre système de pompage photovoltaïque, à l'aide de Simulink la modélisation des éléments (panneau PV, hacheur boost, régulations+MPPT, onduleur MLI vectorielle, moteur asynchrone et pompe centrifuge) est réalisée en prenant compte des paramètres réels envisageables (le besoin en eau, la disposition du site sur le terrain, les contraintes en termes de puissance, les paramètres constructeur etc.) ce qui nous permet de simuler un fonctionnement dans des conditions réelles très précises (Température, ensoleillement, couple résistant etc.) Le but étant de maximiser les rendements et réaliser un système qui supporte les différentes variations à l'aide de régulations (MPPT, vectorielle, régulations etc.)

Chapitre IV :

Simulation du système de pompage photovoltaïque.

- **Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons simuler notre système de pompage photovoltaïque constitué du générateur photovoltaïque, convertisseurs, régulateurs, moteur asynchrone et pompe centrifuge. Pour cela nous allons nous baser sur deux essais de simulation : le premier essai sera effectué dans les conditions STC ($G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$) tandis que le deuxième essai est effectué en introduisant une variation d'ensoleillement et de température dans l'optique d'obtenir des résultats montrant la réponse du système de pompage et l'efficacité de sa régulation.

IV.1 Simulation du système global :

Le but est d'obtenir certains résultats sur des grandeurs qui résultent des éléments du système de pompage photovoltaïque tel que la puissance à la sortie du générateur photovoltaïque, la tension de sortie du bus-continu, les courants et flux du moteur asynchrone, le couple électromagnétique et résistant, la hauteur manométrique de la pompe et du circuit, débit réel rendements etc. Ces résultats vont nous permettre de montrer la fiabilité de ce système dans des conditions météorologiques variables.

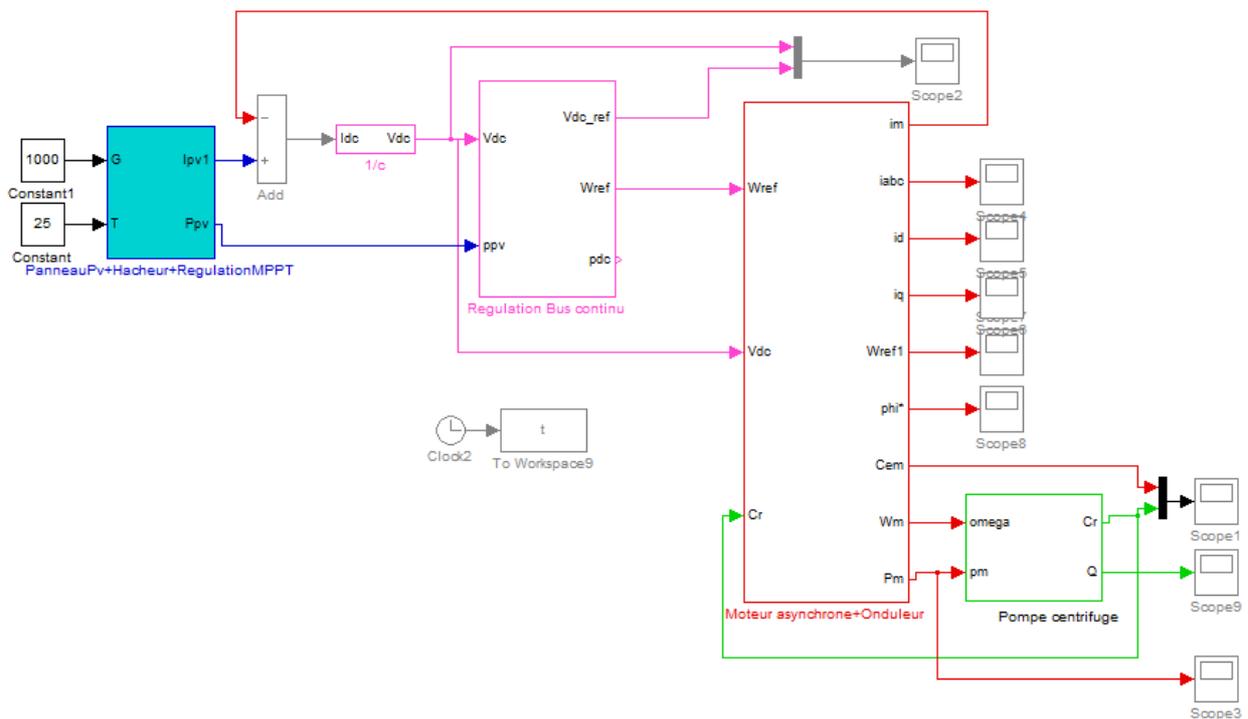


Figure (IV.1) : Système de pompage PV

IV.1.1 Premier essai :

Simulation du système de pompage photovoltaïque dans les conditions STC ($G=1000\text{W/m}^2$; $T=25^\circ\text{C}$)

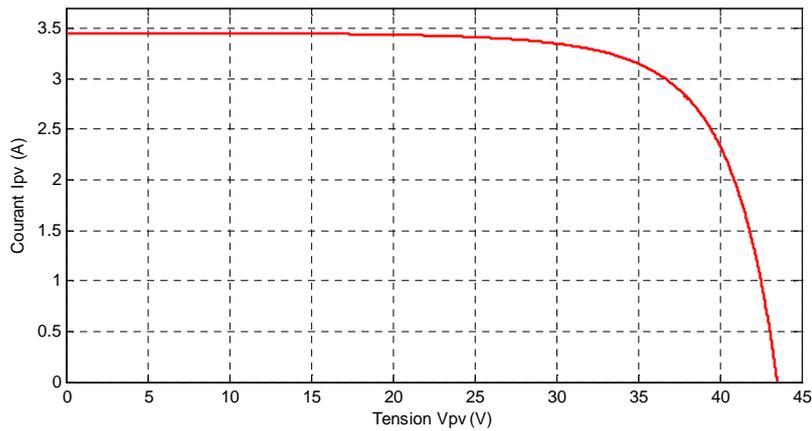
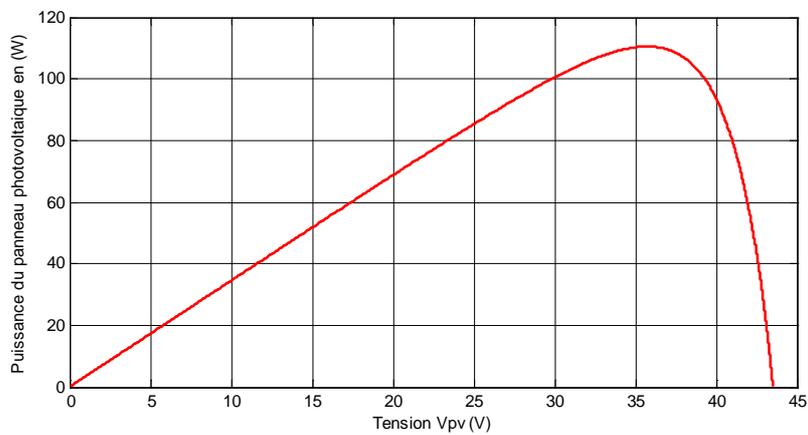


Figure (IV.2) : caractéristiques courant-tension du panneau photovoltaïque



Figure(IV.3) : caractéristiques puissance-tension du panneau photovoltaïque

Le modèle mathématique du panneau photovoltaïque choisi dans les conditions STC nous a permis d'obtenir en sortie ces caractéristiques ($I_{pv}-V_{pv}$) et ($P_{pv}-V_{pv}$) qui montre clairement une variation du courant et de la puissance en fonction de la tension dans les limites intrinsèques du panneau photovoltaïque, comme montré ci-dessus sur les figures (IV-2) et (IV-3) toutes les valeurs de la tension ne donnent pas le point de puissance maximum (PPM) c'est pour cela qu'on a recours à la commande MPPT de type perturbation et observation (PO) qui nous permet d'assurer à n'importe quelle condition météorologique une valeur maximum de la puissance. Les résultats de l'application de cette commande nous donnent les caractéristiques des figures (IV-4) et (IV-5):

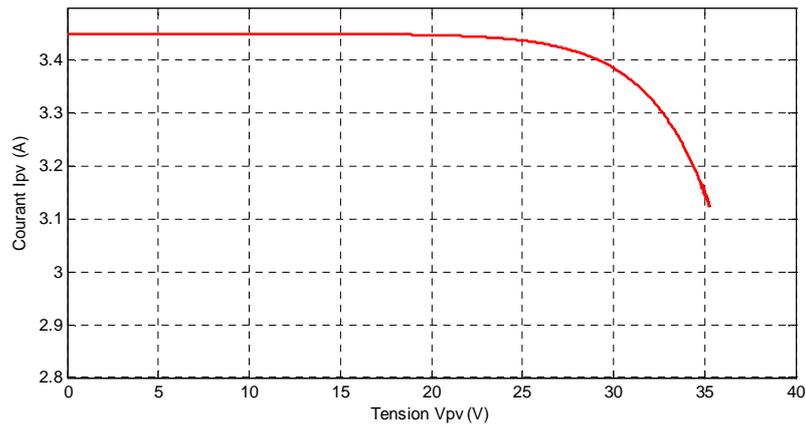
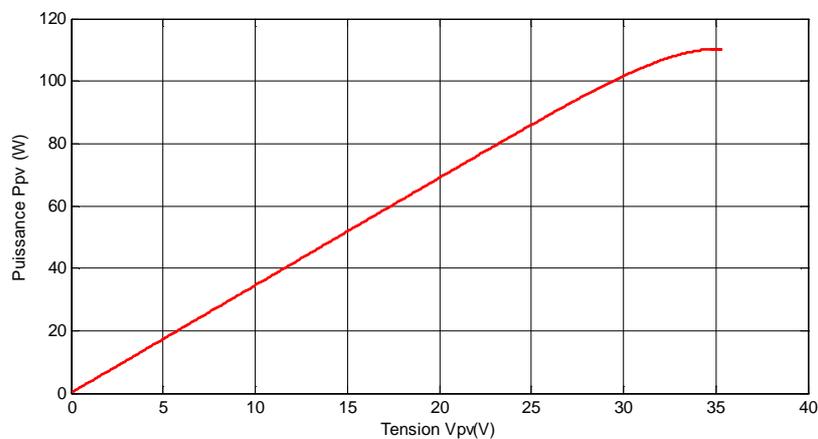


Figure (IV.4) : caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque avec MPPT



Figure(IV.5) : caractéristique puissance-tension du panneau photovoltaïque avec MPPT

Dans notre cas le point de puissance maximum (PPM) s'obtient à une tension optimale $V_{opt}=35V$ qui correspond dans les conditions STC à une puissance $P_{max}=110$ W et un courant $I_{pv}=3.15$ A.

Le Générateur photovoltaïque est dimensionné de façon à avoir une puissance à sa sortie suffisante pour alimenter toute la chaîne du système de pompage photovoltaïque c'est ainsi que l'association en série de 14 panneaux est réalisée. On obtient une puissance $P_{pv}= 1540$ W.

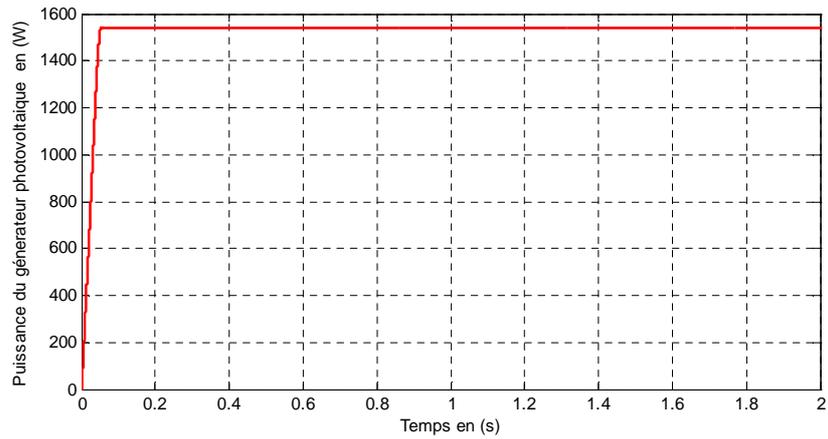
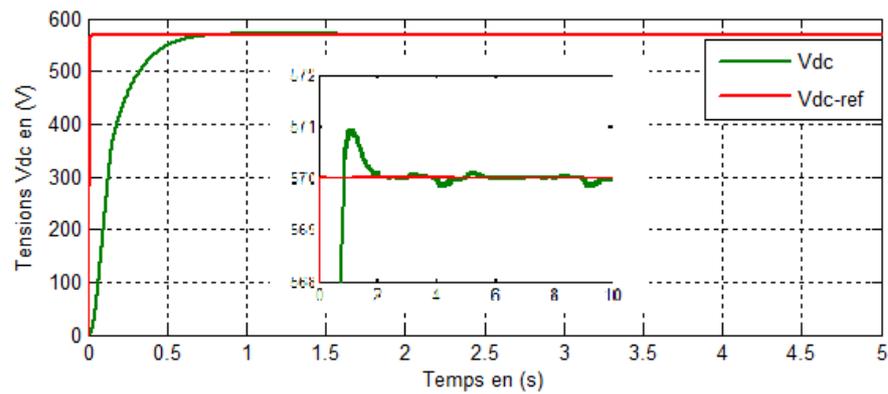


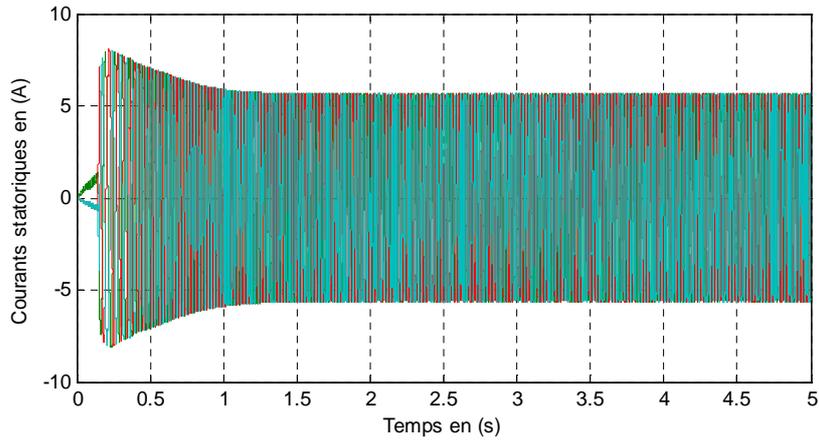
Figure (IV.6) : puissance totale à la sortie du générateur photovoltaïque

Les grandeurs électriques (courant-tension) sont appliquées à un étage d'adaptation DC-DC ainsi qu'une régulation avec MPPT qui nous permettra d'obtenir une tension V_{dc} à la sortie du bus continu suffisante pour alimenter l'onduleur MLI.

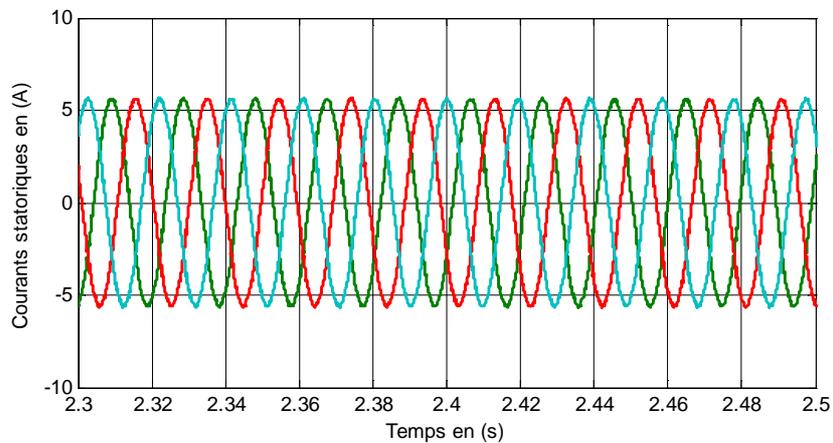


Figure(IV.7) : Tension V_{dc} à la sortie du bus-continu

La régulation de la tension du bus-continu V_{dc} se fait de manière satisfaisante avec un temps de réponse court et une stabilité du système suffisante et requise pour supporter les différentes variations que l'on étudie dans la partie suivante de ce chapitre.

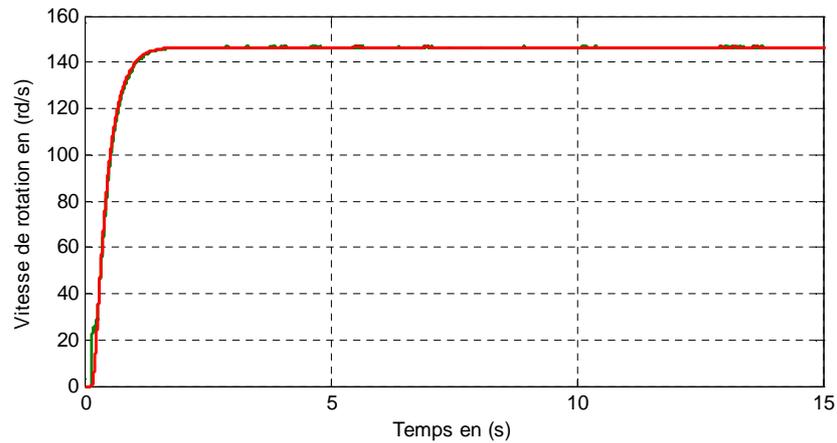


Figure(IV.8.a) : Courants statoriques du moteur asynchrone



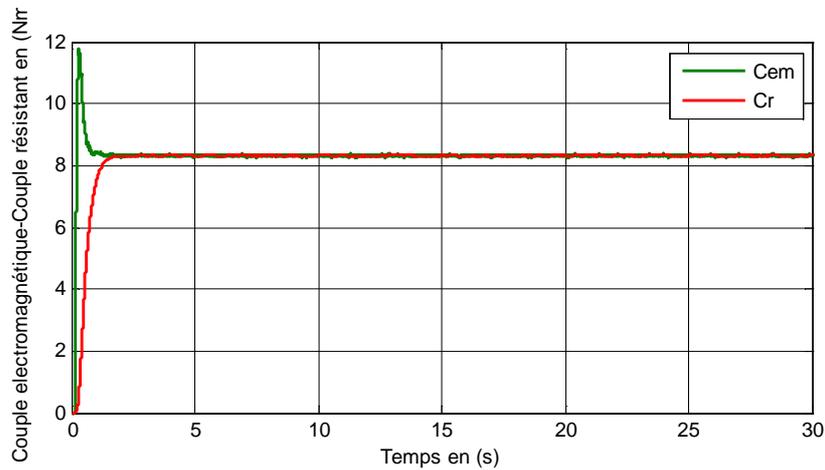
Figure(IV.8.b) : zoom sur les Courants statoriques du moteur asynchrone

On remarque qu'il y a un régime transitoire où les courants statoriques de démarrage sont relativement plus grands que les courants statoriques en régime normal ce qui est tout à fait normal étant donné le couple résistant au démarrage (C_r) inversement proportionnel à la vitesse de rotation du rotor.



Figure(IV.9) : Vitesse de rotation du rotor en rd/s

La vitesse de rotation du rotor est aux environs de la vitesse nominale $V_r=153$ rd/s qui suit au mieux la vitesse de référence souhaitée.



Figure(IV.10) : Couple électromagnétique comparé au couple résistant.

Le couple électromagnétique résultant est suffisant pour supporter le couple résistant régit par l'équation étudiée précédemment (II.38) c'est-à-dire que le moteur est dans son point de fonctionnement nominal, on note un dépassement légèrement admissible des environs de 20% du couple nominal C_{em} relatif au démarrage du moteur asynchrone.

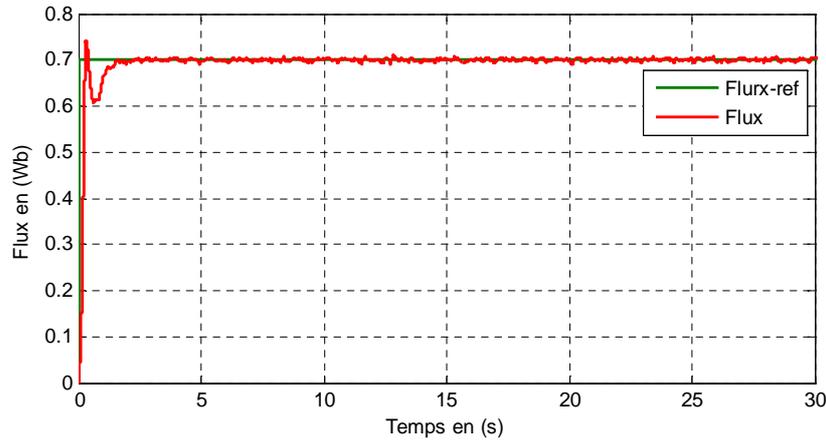


Figure (IV.11) : Flux à la sortie du moteur comparé au flux de référence

En résultat de la régulation des courants statoriques I_d et I_q le flux statorique du moteur suit sa référence qui a une valeur de $\Phi=0.7$ Wb

Ayant dimensionné et estimé les pertes de tous genres au niveau de la pompe (pertes volumétriques, mécaniques hydrauliques etc...) et en tenant compte du débit théorique, la puissance mécanique du moteur transmise à la pompe permet d'atteindre une pression suffisante pour assurer le transport de l'eau jusqu'à la hauteur géométrique du réservoir tout en assurant les pertes de charge.

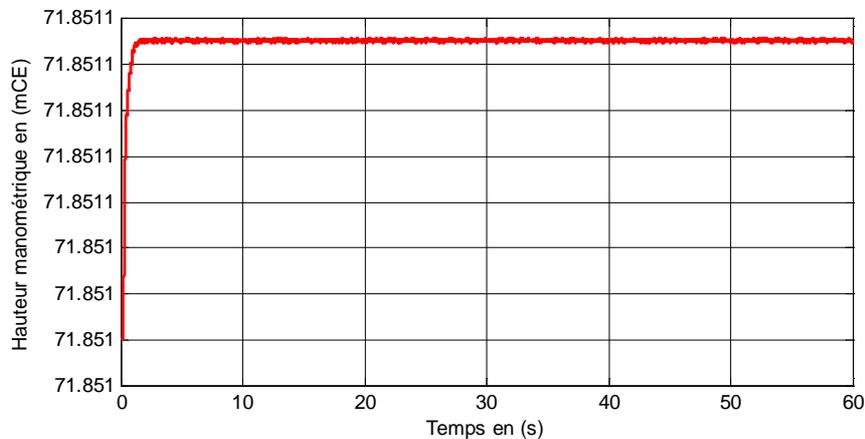
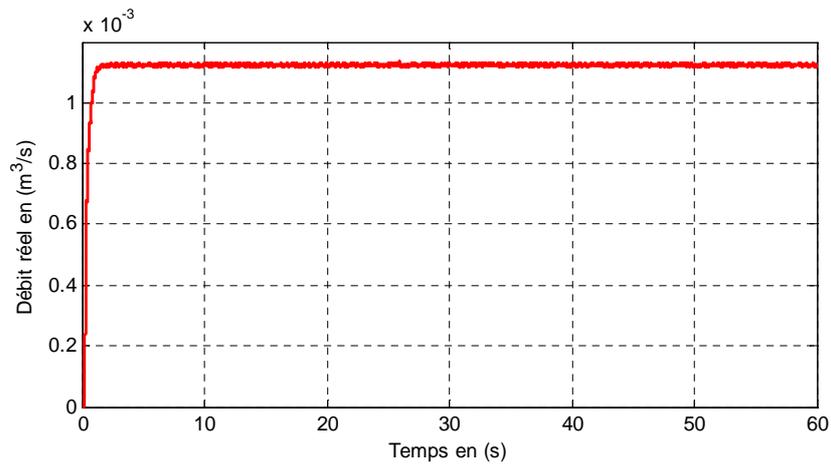


Figure (IV.12) : La hauteur manométrique totale résultante.

Il en va de même pour le débit, en prenant compte de tous les paramètres (pertes, diamètres, hauteur manométrique) On obtient un débit réel avoisinant les $Q=1.1$ L/s comme illustré dans la figure (IV.13) ci-dessous :



Figure(IV.13) : Le débit réel à la sortie de la pompe

On remarque un certain retard dans l'allure de la croissance du débit, relative au régime transitoire du système de pompage photovoltaïque et en grande partie au phénomène d'amorçage de la pompe lorsqu'elle est en aspiration, c'est une période où la pompe n'est pas encore complètement submergée par le liquide. En revanche une pompe en charge ne subit pas ce retard.

IV.1.2 Deuxième essai

Simulation du système de pompage photovoltaïque avec variation de l'ensoleillement et de la température :

Après un premier essai dans les conditions météorologique STC nous introduisons dans la simulation les profils d'ensoleillement et de température variable qui sont représentés sur la figure ci-dessous :

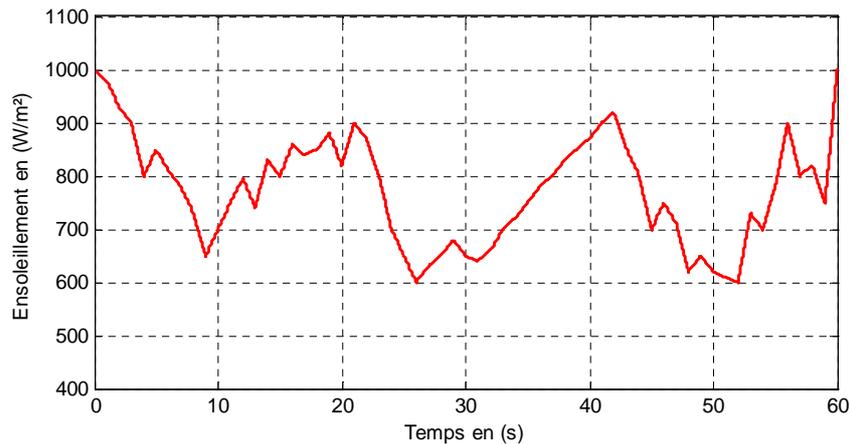
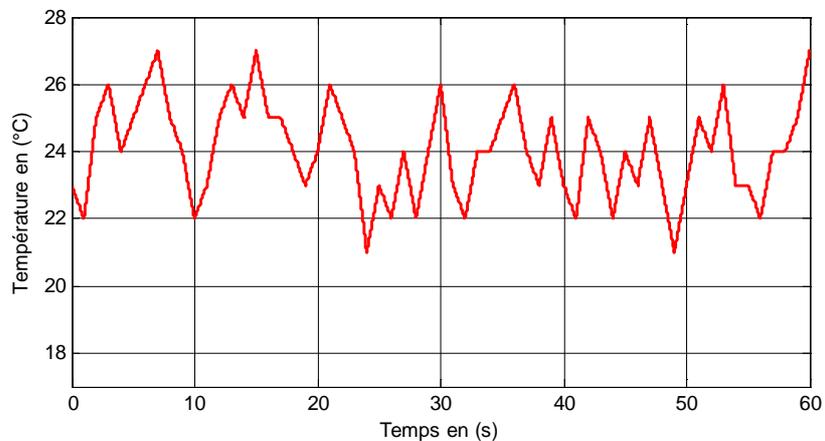


Figure (IV.14.a) : Variation de l'ensoleillement.

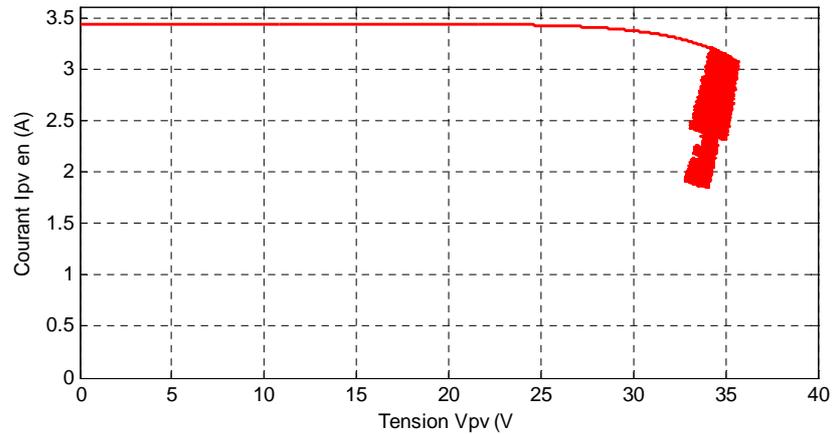


Figure(IV.14.b) : Variation de la température

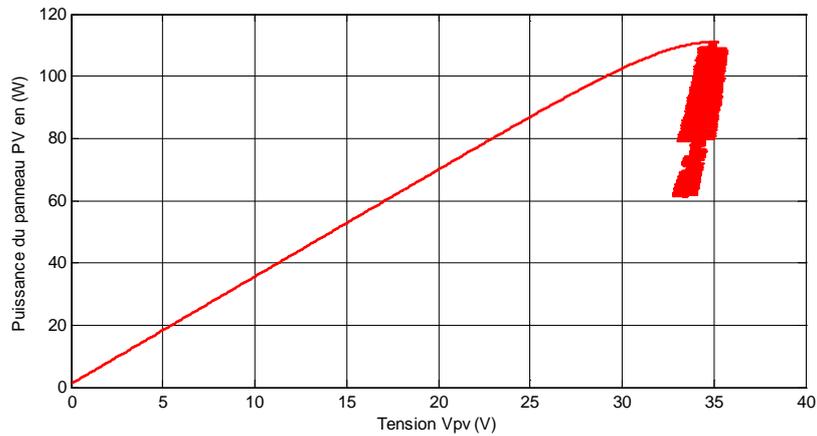
La variation de l'ensoleillement et la température ont été prises pour une période de temps avec des valeurs allant d'un minimum de 600 W/m^2 à un maximum de 1000 W/m^2 aléatoirement pour l'ensoleillement et allant d'un minimum de 22 $^{\circ}C$ à un maximum de 27 $^{\circ}C$ aléatoirement pour la température.

Le but est de montrer que le système de pompage photovoltaïque suit et s'adapte aux différentes variations des conditions météorologiques (ensoleillement et

température) pouvant se produire durant la journée, nous obtenons les résultats représentés sur les figures suivantes :

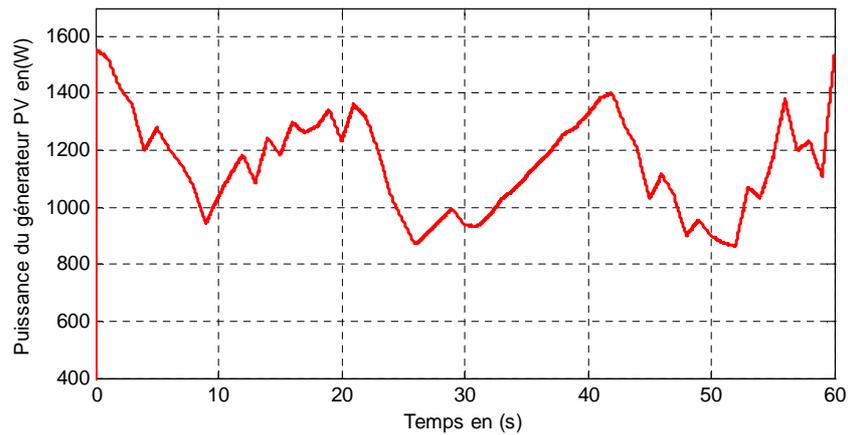


Figure(IV.15.a) : Caractéristique Ipv-Vpv du panneau PV



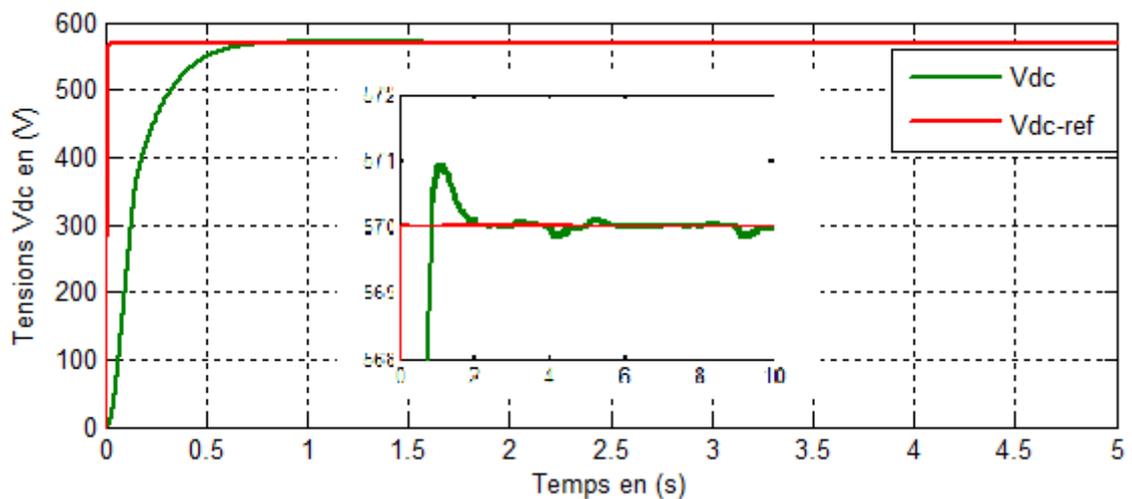
Figure(IV.15.b) : Caractéristique Ppv-Vpv du panneau PV

L'influence des variations de l'ensoleillement et de la température implique au niveau des caractéristiques (P_{pv} - V_{pv}) et (I_{pv} - V_{pv}) un changement du point de puissance maximal (PPM), d'où l'utilité de la méthode de commande MPPT (PO) qui est capable d'extraire le Maximum de puissance PV quelques soient les conditions de température et ensoleillement.



Figure(IV.16) : Puissance totale à la sortie du générateur photovoltaïque.

La variation des conditions d'ensoleillement et de température impliquent sur la puissance une allure de variation similaire qui se retrouve entre une valeur optimale de 1540W et une valeur minimale de 850W



Figure(IV.17) : Tension de sortie du bus continu.

En dépit des variations d'ensoleillement et de température, la tension du bus continu V_{dc} suit sa référence qui elle est de tension 570V continu grâce au régulateur PI.

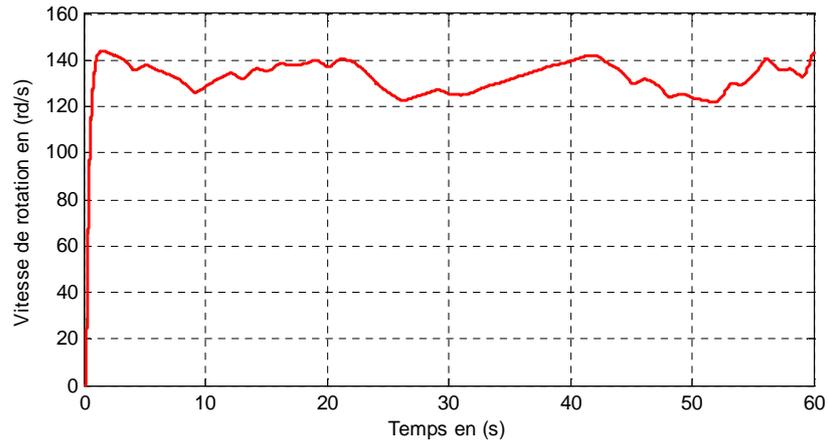


Figure (IV.18) : Vitesse de rotation du moteur avec à la vitesse de référence.

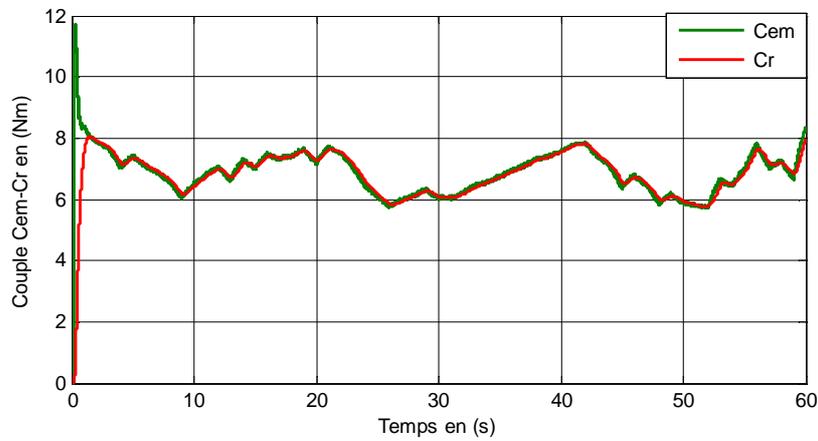


Figure (IV.19) : Couple électromécanique avec le couple résistant du moteur.

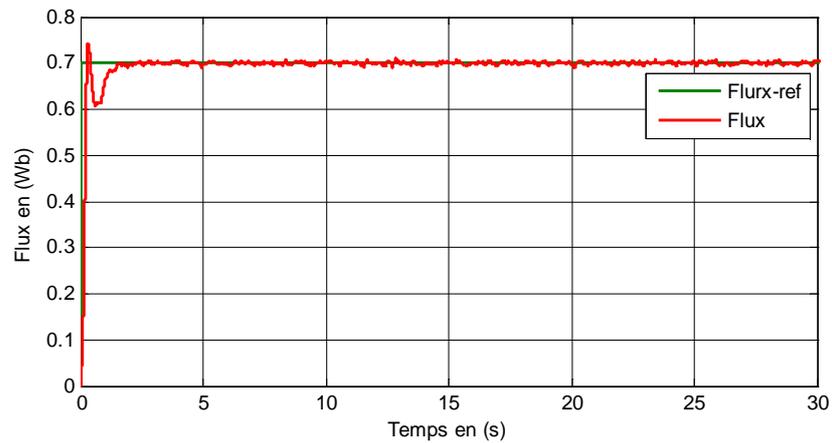


Figure (IV.20) : Le flux du moteur et flux de référence.

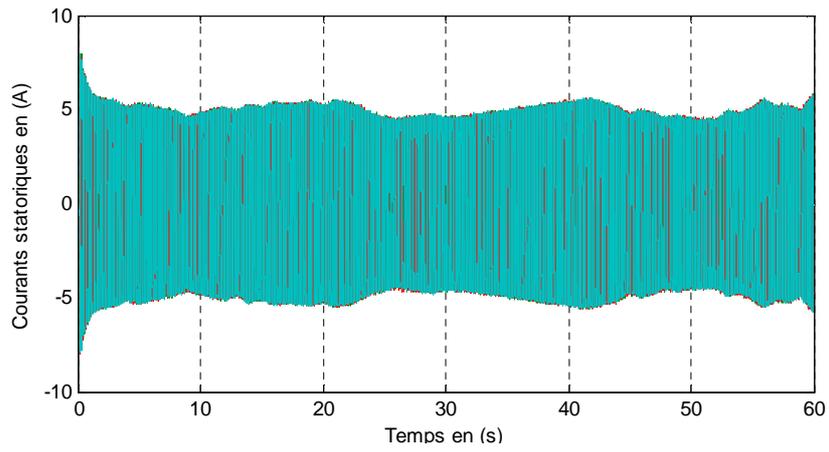
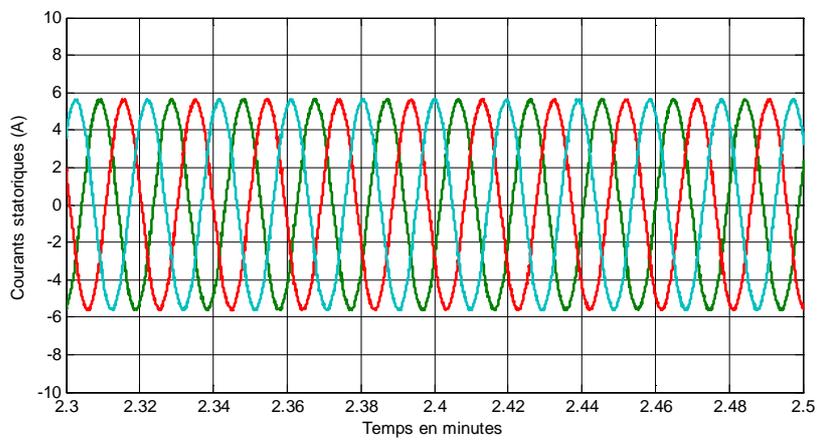
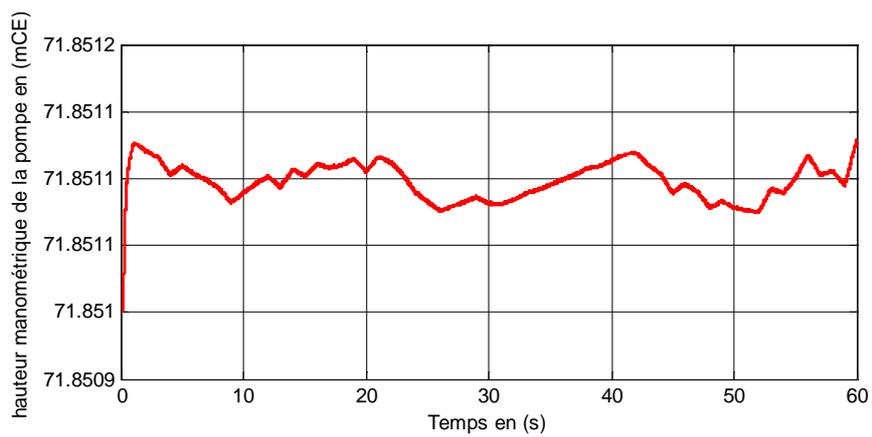


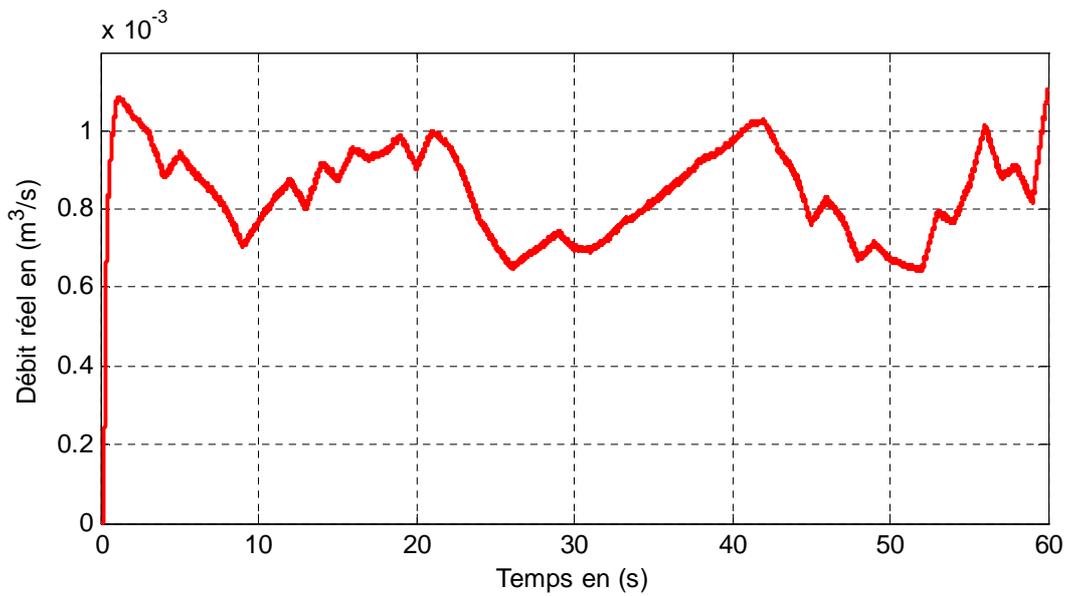
Figure (IV-21.a) : Courants statoriques du moteur asynchrone



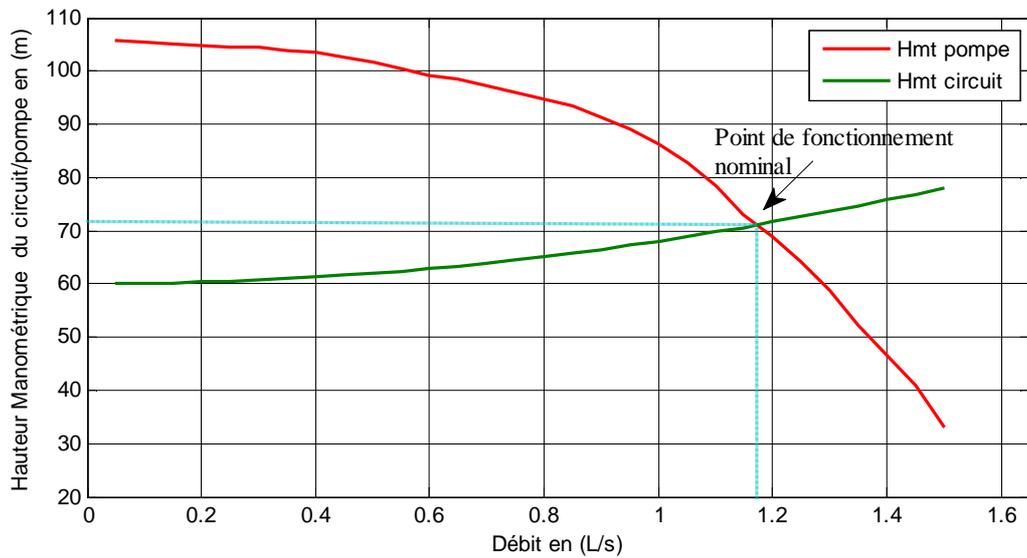
Figure(IV.21.b) : zoom sur les Courants statoriques du moteur asynchrone



Figure(IV.22) : Hauteur manométrique totale résultante de la pompe.

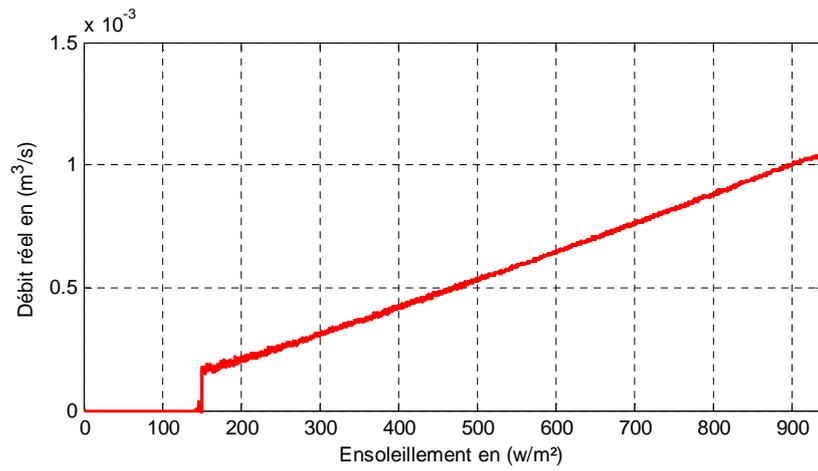


Figure(IV.23) : débit à la sortie de la pompe.

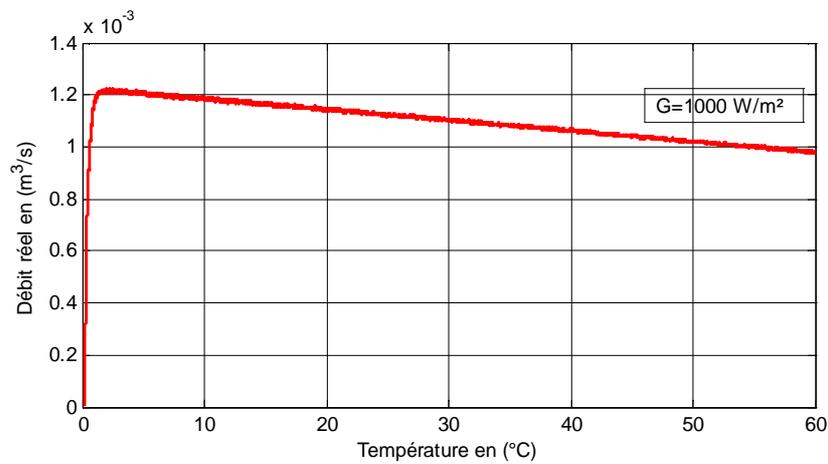


Figure(IV.24) : Courbes caractéristiques du circuit hydraulique et de la pompe

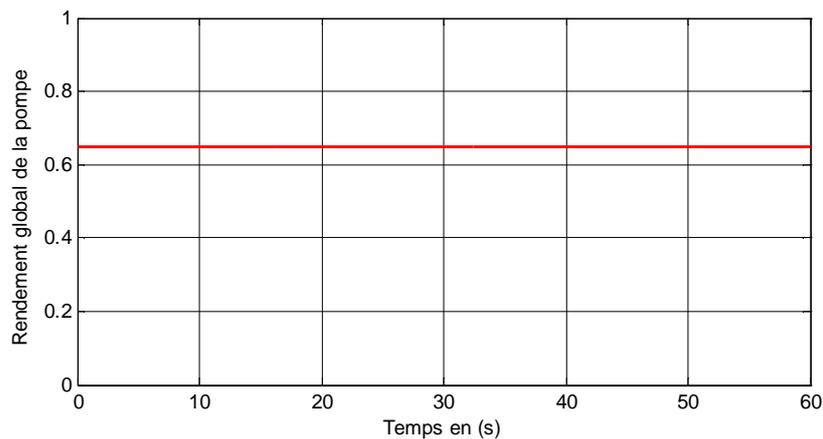
La hauteur manométrique de la pompe est obtenue à partir des constantes que le constructeur nous fournit qui dépendent de (la qualité du matériau, formes des aubes, inclinaisons, puissance etc.) Tandis que la courbe du circuit hydraulique est représentée par l'équation étudiée précédemment dans ce travail (II.32). L'intersection des deux courbes représente le point de fonctionnement nominal et expectative de la pompe dans ce circuit hydraulique.



Figure(IV.25) : Variation du Débit réel en fonction de l'ensoleillement



Figure(IV.26) : Variation du débit réel en fonction de la température



Figure(IV.27) : Rendement de la pompe centrifuge durant le temps de fonctionnement

• IV.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation, nous constatons que les tensions d'alimentation aux bornes de la motopompe suivent la tension délivrée par le

générateur photovoltaïque de façon proportionnelle et directe. La puissance, la vitesse du rotor et le débit délivré par la pompe dépend de l'ensoleillement, cela veut dire que pour des valeur d'éclairement élevé le moteur s'accélère et le volume d'eau pompé augmente, dans le cas contraire une diminution d'éclairement engendre une diminution de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque qui va être ressenti par le moteur qui ralenti en provoquant une diminution du volume d'eau pompé.

La variation de la température agit de manière inverse sur le système de pompage photovoltaïque comparé à l'ensoleillement, de sorte que si la température augmente, les performances du système (débit, hauteur manométrique, vitesse de rotation etc.) diminuent et ce à cause des caractéristiques des cellules photovoltaïques perdant de la puissance lorsque les températures sont hautes.

- **Conclusion :**

Les résultats obtenus dans ce chapitre, montrent que notre système répond à tous les critères (performances, temps de réponse et régulation) et s'adapte aux conditions météorologiques les plus basses en période d'hiver. La simulation de chaque partie de la chaine du système de pompage a permis d'obtenir le dimensionnement le plus adéquat (vis-à-vis du site et du besoin en eau) ainsi que le choix des équipements les plus adaptés afin d'obtenir un système de pompage photovoltaïque des plus économiques et rentables.

Pour résumer, notre système de pompage photovoltaïque composé d'une association de 14 panneaux produisant une puissance totale de 1500W permet d'avoir un débit de pompage instantané de $Q=1.1L/s$, qui équivaut à $4 m^3 /h$ et au environ de $31.7 m^3 /jour$ d'été d'ensoleillement.

Conclusion générale

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt d'une importance capitale. Les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont : un rendement faible et un coût élevé. Cela se vérifie sur la caractéristique $I-V$ sous l'influence de différentes températures. Le présent travail a porté sur la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque, qui se caractérise par un moteur asynchrone à cage d'écureuil couplé à une pompe centrifuge hélicoïdale immergée, installé sur site expérimental, avec une hauteur géométrique et des pertes de charges (linéaires et singulières) bien définies.

Le moteur d'entraînement est couplé au générateur photovoltaïque via un (bus-continu plus convertisseur DC/AC) et où le stockage d'énergie dans les accumulateurs est remplacé par le stockage d'eau dans les réservoirs pour éviter un coût supplémentaire d'exploitation. L'étude du générateur photovoltaïque a permis la compréhension du comportement de ce dernier, en fonction de l'éclairement et de la température, et de son effet sur les caractéristiques électriques $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$, et par conséquent sur leur rendement.

Pour pallier à ces contraintes on a abordé la problématique d'optimiser le système par la présentation de la modélisation de chaque élément constituant la chaîne photovoltaïque, ainsi qu'un dimensionnement du générateur et de la motopompe. Le choix du moteur couplé avec la pompe est un moteur asynchrone à cage d'écureuil pour sa robustesse, son entretien minimum et son efficacité avec une commande vectorielle par orientation du flux rotorique.

Pour optimiser le système proposé nous avons utilisé la méthode MPPT « Perturbations et Observation ». Les résultats, présentés dans le présent mémoire, montrent que l'utilisation de cette commande permet d'améliorer le rendement de l'installation de pompage photovoltaïque.

Toujours dans le but d'optimiser notre système, nous nous sommes penchés sur l'étude et le dimensionnement de la pompe sur ses aspects énergétiques, et ceci en la dimensionnant en fonction des caractéristiques du site comme présenté dans le chapitre II.

Enfin, Les systèmes de pompage photovoltaïques restent des réalisations très intéressantes du fait de leur autonomie, de l'absence de pollution et de leur efficacité dans les sites isolés du réseau électrique. Mais afin d'utiliser pleinement l'énergie résultante de la chaîne de pompage photovoltaïque, il est nécessaire de prendre en considération les facteurs influents tels que (L'implantation du GPV, Les pertes de charge du circuit hydraulique, les rendements et qualités de l'équipement, la commande de puissance du panneau photovoltaïque, le choix judicieux du type de pompe etc.), sans cela une perte d'énergie est inévitable.

LISTE DES REFERNCES

- [1]. K. Töpfer. “Decarbonisation of energy supply—central challenge for mankind. Clean Power from Deserts”, *The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security, WhiteBook*, 2009.
- [2]. D. Rekioua, A. Achour, and T. Rekioua, “Tracking power photovoltaic system with sliding mode control strategy”, *Energy Procedia*, Vol 36, pp. 219–230, 2013.
- [3]. A. M. Razali, M. Rahman, G. George, N. Rahim et al. “Analysis and design of new switching lookup table for virtual flux direct power control of grid connected three-phase pwm ac–dc converter”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 2, pp.1189–1200, 2015
- [4]. A. Mehdaoui*, M. Sadok, S.A. Chikhi et A. Mammeri « *Gain énergétique entre deux configurations de système de pompage d’eau photovoltaïque Application au site d’Adrar* » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°4 (2010) 571 – 582
- [5]. F. Messai, S. Mouellef« *Etude d’optimisation et d’adaptation d’un système de recharge de batteries à travers le générateur photovoltaïque*» *Mémoire de fin d’étude en électrotechnique, Université de Constantine, 2005*
- [6]. C. Alonso: « *contribution à l’optimisation, la gestion et le traitement de l’énergie*», *mémoire en vue de l’obtention de l’habilitation à diriger les recherches université PAUL SABATIER – TOULOUSE III, 2003.*
- [7]. L.Kemmouche, « *Module de fonctionnement d’une station solaire photovoltaïque, en prevision de panne* », *mémoire de magistère, université de Constantine, année 2002*
- [8]. Jean-Loup PRENSIER- Christophe DAUX « *La chaine d’énergie du pompage de l’eau* » Article édité le 17/05/2006
- [16]. J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy, “Le Pompage Photovoltaïque”, Éditions MultiMondes, 1998
- [19] S. Makhloufi : « Contribution à l’optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes ». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.
- [20] E. Lorenz et al: « Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems. », report of the Universidad Politécnica de Madrid., 2000.
- [21] A.Saliha« *Modélisation et commande d’un système de pompage photovoltaïque* » Mémoire de magister université Ferhat Abbas Setif-1 8/09/2014
- [22] M.Rezkallah A.Hamadi A.Chandra B.Singh« *Un système photovoltaïque autonome ne produisant pas d’excès de puissance!* » *Article de recherche* 22 FÉV 2017
- [23] .D. Y. Goswami: « Principles of Solar Engineering »; Taylor and Francis, second ed., 2000.
- [26] B. de Chargerés, “Pompes volumétriques pour liquides”, *Techniques de l’Ingénieur*, Réf : B4320, 1991.
- [28] Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman : « A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems », *Solar Energy*, Volume 64, Issues 1–3, September 1998, Pages 33–40

- [29] R. Maouedj et B. Benyoucef Article- Unité de recherche des matériaux et énergies renouvelables (URMER), Faculté des Sciences, Université Abou BekrBelkaïd,
- [30] A.Labouret M .Villoz« *Energies solaires photovoltaïque* » 3eme édition LE MONITEUR Dunod
- [31] A.Mohammedi« *Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque* » *Thèse de doctorat Université Abderrahmane Mira Bejaia 10/05/2015*
- [32]M.H.Rashid, « *Power electronics handbook* » academic press, USA, 2007
- [33] J. Poulain, “Installations de Pompage ”, Techniques de l’Ingénieur. Réf : J2910, 2004.
- [34] S. Bennis, “Hydraulique et Hydrologie ”, Presses de l’Université du Québec, 2007.
- [35] A.Daoud « *Contrôle de la Puissance d’un GénérateurPhotovoltaïque pour le Pompage Solaire* »
- [36] POLYCOPE COURS BELAID
- [37] DTC
- [38] A.Mohammedi « *contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque* » Thèse de doctorat soutenu le 10 octobre 2015
- [39] « *pompage photovoltaïque* » manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy
Sous la direction de Eric Schiller
- [40] A.Saliha «*Modélisation et commande d’un système depompage photovoltaïque* » Mémoire de magister université Ferhat Abbas Setif-1 8/09/2014
- [41] .B.Gaddouri « *Modélisation et simulation d’un système de pompagephotovoltaïque optimisé* » mémoire de fin d’études en Master Automatique UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA. 2016 / 2017
- [42] A .Hachemi « *Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système hybride dédié au pompage* » thèse de doctorat en Hydraulique soutenu le 18 février 2017
- [43] Gülich, Johann Friedrich."Centrifugal pumps". Berlin: Springer, 2008.
- [44] Robert REY, Jean POULAIN « *Pompes rotodynamiques-Présentation. Description* » Article issu de « *Mécanique | Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques* » Réf. : *BM4300 VI* Date de publication : *10 janvier 2011*
- [45]

Rendements de l'installation

Rendements	Valeurs
Rendement mécanique de la motopompe (η_{mec})	1
Rendement Volumétrique de la pompe (η_v)	0.74
Rendement hydraulique de la pompe (η_H)	0.88
Rendement Global de la motopompe (η_G)	0.65
Rendements des convertisseurs de puissance (η_c)	0.97
Rendement du moteur asynchrone (η_m)	0.79
Rendement de l'installation (η_{inst})	0.49

Choix du diamètre des conduits :

Vitesse maximale à ne pas dépasser : est une vitesse qui, au dessus de cette valeur le régime de l'écoulement devient turbulent et les phénomènes de corrosions deviennent très importants.

$$V_{max-admissible} = 4m/s$$

$$Q_{théorique} = \frac{P_{hydro}}{\rho g H_{mano}} = 1.4 \cdot 10^{-3} m^3/s$$

Avec $P_{hydro} = 975W$ et $H_{mano} = 1.1H_g = 1.1 * 60 = 66m$

Calcul du diamètre minimum :

$$\rightarrow S = \frac{Q_{théorique}}{V_{max-admissible}} = 3.5 \cdot 10^{-4} m^2 \text{ soit } D_{min} = 21mm$$

Choix du diamètre selon la norme : selon la normalisation des tuyauteries :

$D_{min} = 21mm$ pour un $V_{max} = 4m/s$. Pour ne pas dépasser cette vitesse on prend :

$D_N (1'')$ soit $D_N = 26/34$ (26 pour diamètre intérieur et 34 pour diamètre extérieur).

Ce qui nous donne : $V = 2.63m/s$.

$$\Delta H = \frac{8}{\pi^2 g} \left[\left(k_r + \frac{\lambda L_r}{d_r} \right) \frac{1}{d_r^4} + \left(k_a + \frac{\lambda L_a}{d_a} \right) \frac{1}{d_a^4} \right] Q^2 \quad (II.16)$$

$$H_{mano} = H_G + A Q^2 \quad (II.17)$$

$$A = \frac{8}{\pi^2 g} \left[\left(k_r + \frac{\lambda L_r}{d_r} \right) \frac{1}{d_r^4} + \left(k_a + \frac{\lambda L_a}{d_a} \right) \frac{1}{d_a^4} \right] \quad (II.18)$$

Avec $\lambda = 0.013$; $k_r = 3.1$; $k_a = L_a = d_a = 0$ $L_r = 75m$ $d_r = 26mm$

$$A = 2015689 s^2/m^5$$

Pour un débit nominal de $1.1 * 10^{-3} m^3/s$ on a : $\Delta H = 2.44 m$

Caractéristiques du groupe motopompe

Model du Moteur ST-1321 :

Constantes	valeurs
J	0.031
P	2
Ls	0.274
Lr	0.274
M	0.254
Rs	4.85
Rr	3.805
F	0.002

Model de la Pompe centrifuge « Pfeleider-Peterman »:

Constantes	Valeurs
A0	71.851
A1	0.1051
A3	-0.0109

Caractéristiques du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110 :

Caractéristiques	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc} (α_{sc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc}	-152 mV/°C