

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou**



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Électrotechnique

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme

*DE MASTER ACADEMIQUE EN ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES*

*Thème*

**Etude et simulation d'un système de pompage  
D'eau par énergie photovoltaïque**

**Proposé par :**

**Mr. T.OTMANE CHERIF**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> .DJIOUA Chafiaa  
M<sup>elle</sup> .CHIOUT Tinhinane**

*Promotion 2013*

## **Remerciements**

*Au terme de ce modeste travail nous tenons à adresser nos plus sincères et vifs remerciements à notre promoteur Mr. T.OTMANE CHERIF pour les encouragements, son aide précieux et sa compréhension.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et notre vive reconnaissance à Mr A.KHALFOUNI et M K. MESBAH pour leurs aides et leurs conseils judicieux qui nous ont permis de bénéficier de leurs expériences et d'acquérir de nombreuses connaissances tout le long de ce travail.*

*Nous remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer tout au fond de nos cœur les reconnaissances à nos familles qui nous ont offert toujours leurs soutiens et leurs encouragements.*

*Nos plus vifs remerciements vont également à tous nos amis(es) pour le soutien qu'ils nous ont apporté durant toutes ces années d'études.*


*Nous remercions profondément les étudiants du groupe Master2 en ETH ainsi les fonctionnaires de la bibliothèque des thèses.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*



# *Dédicaces*

Je dédie cette thèse à ma merveilleuse famille  
qui m'a toujours soutenue, encouragée, aidée, aimée.  
A ma très chère mère.  
A mon très cher père.  
A mes tantes Malika, Tassadite .  
A mon très cher frère : Amar.  
A mes sœurs : Tidia et son marie Omar et katia  
A ma grand mère.  
A mes cousine : Nabila, Rosa , Kahina  
A mes cher amis et frères : Slimane, Merizak,,  
A mes cher amies et sœurs : Nouara, Lamia, Dihia  
A mon binôme Chafia et sa famille.





# *Dédicaces*

p

Je dédie cette thèse à ma merveilleuse famille  
qui m'a toujours soutenue, encouragée, aidée, aimée.

A la mémoire de mon père et grande mère ainsi  
grand père et Damokrane.

A ma très chère mère

A mes tantes Malha, Tassadite, Tasni.

A mes très chers frères : Rabah et sa femme Nabila,  
Ahmed, Hakim, Djamel.

A mes sœurs : Malika et son marie Boualem et  
sa petite ange Damia,,Hamida, Ouardouche,  
Fatiha, Sabiha anisi Lila et Hasni .

A ma grande mère Hasni et toute sa famille  
(Tantes et oncles et leurs enfants).

A tous mes amis(es) :Nouara,Samia,Sa3si,Kanza,Fazia,  
Nora,Mimi,Merizak ,Slimane

A mon binôme Tinhinane et sa famille.

---

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur le système de pompage photovoltaïque	
I. Introduction.....	3
I.1.Energie photovoltaïque.....	3
I.2.Historique.....	3
I.2.1. Dates importantes dans l’histoire du photovoltaïque.....	4
I.3.Les différentes panneaux solaires .....	5
I.3.1. Le panneau solaire photovoltaïque .....	5
I.3.2. Panneau solaire thermique et thermodynamique .....	5
a)Domestique (thermique) .....	5
b) Industrielle (thermodynamique) .....	5
I.4. Les différents types de générateurs photovoltaïques.....	5
I.4.1 Silicium monocristallin.....	5
• Avantage .....	5
• Inconvénients .....	6
I.4.2. Silicium poly cristallin (multi cristallin).....	6
• Avantage .....	6
• Inconvénients .....	6
I.4.3. Silicium amorphe.....	6
• Avantage .....	6
• Inconvénients .....	6
I.5. Les éléments d’un système de captage photovoltaïque.....	6
I.5.1. Le panneau solaire.....	6
I.5.2. Le module photovoltaïque.....	7
I.5.3. la cellule photovoltaïque.....	7
➤ Principe d’une cellule photovoltaïque.....	8
I.6. Groupements des cellules.....	8
I.6.1. Le groupement série .....	9
I.6.2. Le groupement en parallèle .....	9
I.7. Avantages et inconvénients de système photovoltaïque.....	9

•	Avantage.....	9
•	Inconvénients.....	10
<b>I-8</b>	<b>La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING) .....</b>	<b>10</b>
<b>I-9</b>	<b>Les convertisseurs .....</b>	<b>10</b>
<b>I-9-1</b>	<b>Hacheur (DC /DC) .....</b>	<b>10</b>
➤	Principe de fonctionnement .....	11
<b>I-9-2</b>	<b>Hacheur (série-abaisseur), type BUCK .....</b>	<b>11</b>
<b>I-9-3</b>	<b>Hacheur (parallèle-élevateur), type BOOST .....</b>	<b>11</b>
<b>I-9-4</b>	<b>Hacheur (série-parallèle), type BUCK-BOOST .....</b>	<b>11</b>
<b>I-10</b>	<b>Les convertisseurs DC/AC, les onduleurs .....</b>	<b>11</b>
<b>I-10-1</b>	<b>Définition .....</b>	<b>11</b>
<b>I-10-2</b>	<b>Onduleur (DC-AC) de tension triphasé .....</b>	<b>11</b>
<b>I-10-3</b>	<b>Onduleur de courant.....</b>	<b>12</b>
<b>I-11</b>	<b>Modulation de la longue d’impulsion (MLI).....</b>	<b>12</b>
<b>I-12</b>	<b>Machine Asynchrone.....</b>	<b>13</b>
<b>I.12 .1</b>	<b>Définition .....</b>	<b>13</b>
<b>I.12.2</b>	<b>Organisation de la machine .....</b>	<b>13</b>
➤	Le stator .....	14
➤	Le rotor.....	14
<b>a)</b>	<b>Rotor bobiné ( a bague).....</b>	<b>14</b>
<b>b)</b>	<b>Rotor a cage.....</b>	<b>14</b>
<b>C)</b>	<b>Principe de fonctionnement .....</b>	<b>14</b>
<b>I.13</b>	<b>La pompe .....</b>	<b>15</b>
<b>I.13.1</b>	<b>Types de pompes.....</b>	<b>15</b>
<b>a)</b>	<b>Aspiration .....</b>	<b>15</b>
<b>b)</b>	<b>Refoulement .....</b>	<b>15</b>
<b>I.13.2</b>	<b>Caractéristique .....</b>	<b>15</b>
➤	La cylindrée .....	15
➤	La hauteur d’aspiration .....	15
➤	Le débit refoulé .....	16
➤	Plage de vitesse .....	16
➤	Pression de pointe .....	16
➤	Pression d’utilisation.....	16
➤	Puissance d’entraînement .....	16
➤	Entrainement .....	16
➤	Le sens de rotation .....	16
<b>I-13-3</b>	<b>Différentes types de pompes .....</b>	<b>16</b>

---

a. Les pompes volumétriques.....	16
b. Les pompes centrifuges.....	16
I.13.4 Principe de fonctionnement.....	16
➤ Constitution.....	17
I.13.5 Principe de fonctionnement de la pompe volumétrique .....	17
Conclusion .....	17
<b>Chapitre II : étude et simulation d'un système de pompage solaire</b>	
<b>II. Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.1.Coordonnées géographiques .....</b>	<b>18</b>
a .Longitude (L) .....	18
b. Latitude( $\theta$ ) .....	18
c .Altitude ( $\varphi$ ) .....	18
<b>II.2. Application pompage photovoltaïque au fil du soleil.....</b>	<b>18</b>
a. La puissance hydraulique (Phyd) .....	18
b. L'énergie hydraulique ( $E_{hyd}$ ) .....	19
<b>II.3. présentation des logicielles .....</b>	<b>19</b>
II.3.1 logiciel Météonorm.....	19
II.3.2 Logiciel PVsyst .....	19
<b>II.4 . Le choix du site .....</b>	<b>19</b>
<b>II.5. Les paramètres d'un générateur photovoltaïque .....</b>	<b>20</b>
• Les caractéristiques de la cellule .....	20
• Les valeurs maximales .....	21
<b>II.6.Simulation avec le logiciel métronome .....</b>	<b>21</b>
➤ Etape 1 .....	21
➤ Etape 2 .....	22
➤ Etape 3 .....	23
➤ Etape 4 .....	24
➤ Etape 5 .....	24
➤ Etape 6 .....	25
<b>II.7.Les résultats .....</b>	<b>26</b>
➤ Rayonnement .....	26
➤ Rayonnement global journalier.....	26
➤ Température mensuelle.....	27
➤ Température journalière.....	27
➤ Durée d'insolation.....	28
➤ Tableau de données récapitulatives .....	28
<b>II.8.Simulation avec le logiciel PVsyst .....</b>	<b>29</b>

➤ Etape 1 .....	29
➤ Etape 2 .....	29
➤ Etape3 .....	29.
➤ Etape 4 .....	29
➤ Etape 5 .....	29
❖ <b>Projet</b> .....	30
❖ <b>Orientation</b> .....	30
❖ <b>Horizon</b> .....	30
❖ <b>Ombrage</b> .....	30
❖ <b>Système</b> .....	30
<b>II.9. Introduction des paramètres du système de pompage</b> .....	31
<b>II.10. Calcul de l'énergie hydraulique annuelle par PVSYST 4.1</b> .....	32
<b>II.11. Résultats de dimensionnement en utilisant PVSYST</b> .....	33
❖ <b>Simulation</b> .....	33
❖ <b>Résultat</b> .....	34
<b>Conclusion</b> .....	38
<b>Chapitre III : modélisation d'un système de pompage photovoltaïque</b>	
<b>III.1. Introduction</b> .....	39
<b>III.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque</b> .....	39
<b>III.3. Modélisation des convertisseurs</b> .....	41
<b>III.3.1. Modélisation d'un hacheur</b> .....	41
• <b>Modèle mathématique équivalent</b> .....	41
<b>III.3.2 Modélisation de l'onduleur</b> .....	42
• <b>Modèle de l'onduleur de tension</b> .....	42
<b>III.4. Modélisation de la machine asynchrone</b> .....	44
<b>III.4.1. Introduction</b> .....	44
<b>III.4.2 Hypothèses simplification</b> .....	44
<b>III.4.3. Convention de signe</b> .....	45
<b>III.4.4. Les équations électriques</b> .....	45
<b>III.4.5. Equations magnétiques</b> .....	46
<b>III.4.6. Equations mécaniques</b> .....	47
<b>III.4.7. Modèle de Park</b> .....	47
<b>III.4.8. Equations de la machine asynchrone triphasée dans les axes d et q</b> .....	48
<b>III.4.9. Les équations électriques</b> .....	48

---

III.4.10. Les équations magnétiques.....	49
II.4.11. Equation mécanique et couple électromagnétique.....	49
III.4.12. Choix du référentiel .....	49
III.4.13. Référentiel immobile lie au stator .....	49
III.4.14. Référentiel immobile lié au rotor .....	50
III.4.15. Référentiel immobile par apport au champ tournant .....	50
III.4.16. L'équation de la puissance mécanique et du couple mécanique .....	51
III .4.17. Simulation.....	51
III .4.18. Interprétation.....	53
III.5. Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone.....	53
III.5.1. Orientation du flux rotorique.....	53
III.5.2. Rappelons les équations utilisables pour la commande .....	54
a. Orientation du flux rotorique .....	54
b. Loi des mailles au rotor .....	54
III.5.3. Estimation de $\varphi_{dr}$ .....	54
III.5.4. Estimation de $w_s$ et de $\theta_s$ .....	55
III.5.5. Loi des mailles pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ .....	55
a. loi des mailles pour $V_{ds}$ .....	55
b. loi des mailles pour $V_{qs}$ .....	56
III.5.6. Représentation des lois de mailles.....	57
III.5.7. Elaboration des lois de commande pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ .....	58
III.5.8. Simulation .....	59
III.6. Modélisation de la pompe centrifuge .....	60
III.6.1. Caractéristique débit-vitesse .....	60
III.6.2. Caractéristique couple-vitesse .....	60
III.6.3. Caractéristique débit-hauteur .....	61
III.6.4. Caractéristique de la puissance .....	63
III.6.5. Rendement .....	64

---

**Chapitre IV : dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque**

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>65</b>
<b>IV.2. Evaluation des besoins en eau .....</b>	<b>65</b>
<b>IV.3. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.4. Détermination de l'énergie solaire disponible.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.5. Inclinaison du générateur photovoltaïque.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.6. Mois de dimensionnement.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7.1. Estimation de nombre de module en série .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7.2. Estimation du nombre de branche en parallèle .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7.3. Calcul de la surface totale du générateur.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.7.4. Estimation de la puissance.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.8. Dimensionnement du moteur.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.9. Dimensionnement de la pompe.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.10. Dimensionnement des tuyauteries.....</b>	<b>68</b>
<b>Chapitre V : Simulation d'un système de pompage photovoltaïque</b>	

<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>70</b>
<b>V .2. Résultat de simulation .....</b>	<b>70</b>
<b>V.3.Conclusion.....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>74</b>



### Introduction générale

La consommation d'énergie, durant le siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer.

En effet, à ce jour, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (charbon, gaz, pétrole, nucléaire) dont le délai d'épuisement est au mieux estimé. De plus, ce type de production d'énergie reste très polluant et contribue de manière significative à l'émission de gaz de serre dont la conséquence sur le réchauffement atmosphérique est l'impact le plus visible.

En contre partie, le développement des sources d'énergie renouvelables et non polluantes permet dès aujourd'hui une production de plus en plus significative et assez diversifiée.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible. La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme le prouve déjà, les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée. Car, il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Ajouter à cela, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à 12 %) sous un ensoleillement nominal de  $1000\text{w}/\text{m}^2$ . Ce rendement faible ainsi que le coût élevé des panneaux, a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur photovoltaïque. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement.

## Introduction générale

---

Le producteur d'énergie électrique doit dimensionner les systèmes de production, de transport et de distribution d'énergie électrique fiable, donc en l'occurrence observer une onde de tension sinusoïdale et continue, caractérisée par sa fréquence et sa tension nominale et sa phase. Façon à pouvoir livrer à chaque instant une qualité.

Notre objectif dans ce présent travail est l'étude et simulation d'un système de pompage d'eau par l'énergie photovoltaïque réalisé en cinq chapitres et une conclusion générale:

Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques et les éléments constituant le système de pompage photovoltaïque : le générateur photovoltaïque, l'hacheur, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge.

Le deuxième chapitre présente l'étude et simulation d'un système de pompage solaire

Le troisième chapitre traite de la modélisation d'un système de pompage Photovoltaïque

Le quatrième chapitre, concerne dimensionnement et simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

## **I. Introduction**

La consommation d'énergie, durant le siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

### **I.1.Énergie photovoltaïque :**

Un système photovoltaïque (PV) est destiné à satisfaire un besoin d'énergie électrique selon des conditions spécifiques d'exploitation. Il est généralement constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage, de source auxiliaire d'appoint (groupe diesel, aérogénérateur, réseau, etc.....), des systèmes d'interface (convertisseurs, réseau, etc..) d'un système de control et de commande (système de surveillance, armoires électriques, cartes électroniques..) et d'une utilisation courant un usage déterminé. Cet usage (éclairage, réfrigération, pompage, communication,...) est exploité dans divers secteurs (santé, éducation, agriculture, énergie...).

La topologie d'un système PV est déterminée selon d'une part la nature de l'utilisation (nombre de récepteurs, contrainte d'exploitation, sécurité énergétique,..) et d'autre part des considérations technico-économiques prenant en compte aussi bien le rendement énergétique que la taille de l'investissement.

La partie principale dans ces installations est le générateur photovoltaïque. Il est composé de divers modules formés par une association série\_ parallèles de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire (sous formes de rayonnement) en une énergie électrique. Une cellule peut produire 1.5w pour un ensoleillement de 100W/m<sup>2</sup> avec une tension de 0.6V. Un module de 36 cellules produit une puissance moyenne de 40 à 50W et occupe une surface de 0.5m<sup>2</sup> environ. Le rendement énergétique moyen est de l'ordre de 12 à 15% est atteint pour une phase de recherche 30%.

La durée de vie d'un tel générateur est estimée à plus de 20 ans [1]

### **I-2- Historique**

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du Monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans Soleil. [2]

### I.2.1 Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque

1839: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de L'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

**1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article Sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

**1954:** trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

**1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

**1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

**1983:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du Silicium pouvait être augmenté en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée Le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la Course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles Représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, Ainsi que dans tout site isolé. [2]

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20%. [4]

### I-3-Les différentes panneaux solaires :

#### I-3-1 Le panneau solaire photovoltaïque :

Le panneau solaire photovoltaïque est composé de modules interconnectés en série ou en parallèles pour une production d'énergie électrique. Le tout est porté sur un support métallique.

La meilleure inclinaison des panneaux solaire PV pour un usage à longueur d'année est celle de la latitude de l'endroit où son installé. Toutefois, ce sont souvent les dispositions constructives de l'habitation qui déterminent l'inclinaison. [5]

#### I-3-2 Panneau solaire thermique et thermodynamique :

##### a) Domestique (thermique) :

Le principe de ce système est d'utiliser un fluide caloporteur. Le fluide est chauffé dans des panneaux exposés au soleil. Ce fluide transmet sa chaleur à l'eau à usage domestique dans des échangeurs [6]

##### b) Industrielle (thermodynamique) :

On désigne par une centrale thermodynamique l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, l'eau chauffée par cette température est transformée en vapeur, envoyée dans une turbine. Un alternateur, lié à la turbine, produit alors de l'électricité [7]

### I.4 Les différents types de générateurs photovoltaïques :

#### I-4-1 Silicium monocristallin : [22]

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs Photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces Cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans.



- **Avantage :**

- Bon rendement de 12% à 18%
- Bon radiation  $Wc / m^2$  (environ  $150 Wc/m^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire
- Nombre de fabricants élevé

- **Inconvénients :**

- coût élevé
- rendement faible sous un faible éclairement.

#### 1-4-2) Silicium poly cristallin (multi cristallin) : [22]

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux.

La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs

Créés par les différents cristaux.



- **Avantage :**

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
- moins cher qu'une cellule monocristalline

- **Inconvénients :**

- moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
- ratio Wc/m<sup>2</sup> moins bon que pour le monocristallin (environ 100 Wc/m<sup>2</sup>)
- rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans

#### I-4-3) Silicium amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires

- **Avantage :**

- Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)
- un peu moins chère que les autres technologies
- intégration sur supports souples ou rigides.

- **Inconvénients :**

- rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m<sup>2</sup> plus faible, environ 60 Wc/m<sup>2</sup>)
- performances qui diminuent avec le temps (environ 7%). [22]

### I-5 Les éléments d'un système de captage photovoltaïque :

#### I-5-1 Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (générateur photovoltaïque) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le panneau solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [6].



**Figure (I-1) :** Panneau solaire [6].

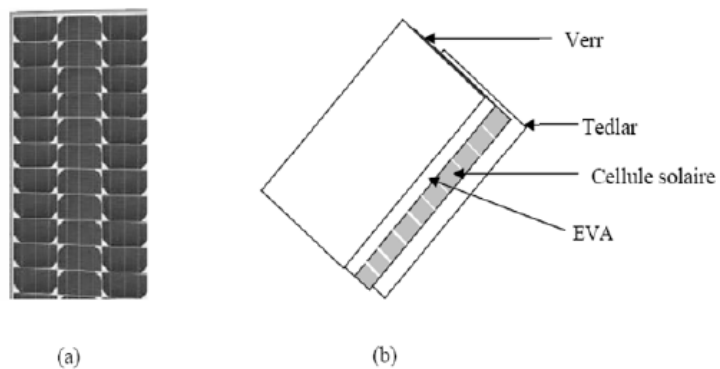
### **I-5-2 Le module photovoltaïque :**

Un module solaire photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement.

-La mise en série des cellules permet d'augmenter la tension sans variation de courant.

-La mise en parallèle des cellules permet aussi d'augmenter le courant sans changement de tension.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) figure (I-3-b) et protégé sur la face avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la face arrière d'une ou plusieurs couches de polyéthylène.



**Figure (I-2) :** Module photovoltaïque [6].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%.

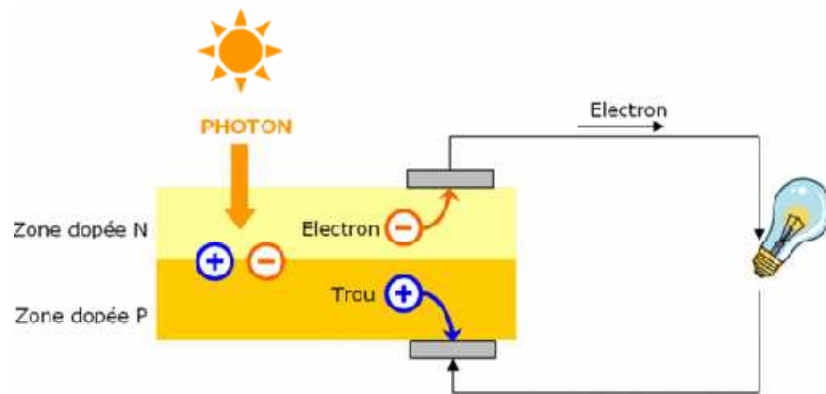
### **I-5-3 la cellule photovoltaïque :**

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ».

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. [3]

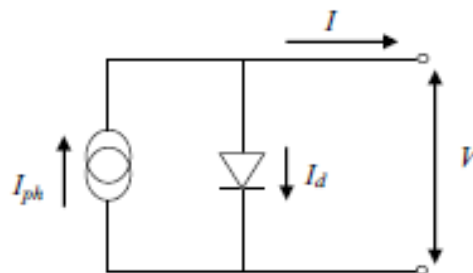
#### ➤ Principe d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +). La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.



**Figure (I-3) :** Principe d'une cellule photovoltaïque. [3]

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend un générateur de Courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN,



**Figure (I-4).** : Schéma équivalent d'une cellule PV [3]

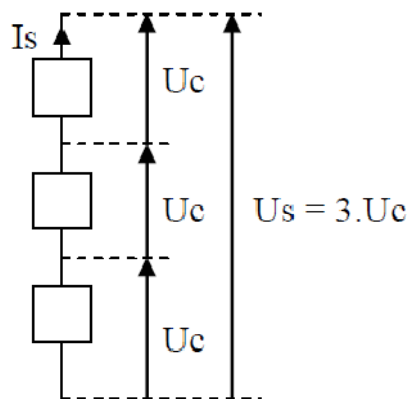
#### I-6 Groupements des cellules :

On peut grouper les cellules en série ou en parallèle.

**I-6-1 Le groupement série :**

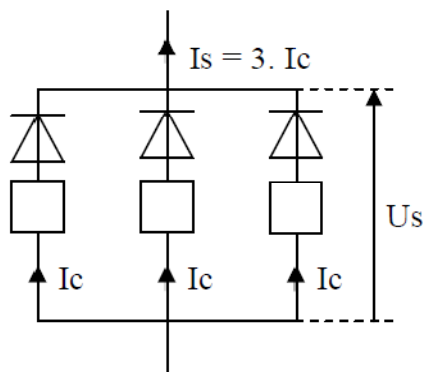
Permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de  $n$  cellules montées en série la tension de sortie  $U_s$  a pour expression générale :  $U_s = n \cdot U_c$  avec  $U_c$  : tension fournie par une cellule. Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules. [8]

Exemple : groupement e 3 cellules en série

**I-6-2 Le groupement en parallèle :**

Permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de  $n$  cellules montées en parallèle, le courant de sortie  $I_s$  a pour expression générale :  $I_s = n \cdot I_c$  avec  $I_c$  : courant fourni par une cellule. Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules.

Exemple : groupement de 3 cellules en parallèle [8]

**I-7 Avantages et inconvénients de système photovoltaïque :**

- **Avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.[8]

- **Inconvénients :**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [8]

### **I-8 La commande MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING) :[15]**

Dans ce régulateur, un circuit de mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance (MPPT, max power point tracking) cela permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quelque soit la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension.

PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance a travers un ordre de commande approprié.

### **I-9 Les convertisseurs :**

Les convertisseurs sont des appareils servant a transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter a des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différentes, soit en tension alternative[10].

#### **I-9-1 Hacheur (DC /DC) :**

Le hacheur est un convertisseur continu-continu statique utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnelles, des éléments passifs (inductances ; condensateurs), et des diodes.

L'hacheur possède deux propriétés essentielles :

-Il joue, en continu, le rôle qui jouait le transformateur, un rendement très élevé.

➤ **Principe de fonctionnement :**

L'hacheur est un convertisseur à transistor, permettant d'obtenir une tension réglable à partir d'un générateur à courant continu de type  $S_v$  ou  $S_i$  (tension ou courant).

Ce convertisseur agit en hachant le courant de court-circuit charge, par la commutation (ouverture-fermeture), périodique interrupteur unidirectionnel [11].

**I-9-2 Hacheur (série-abaisseur), type BUCK :**

Le générateur impose une tension qui reste sensiblement constante  $V_e$ . L'interrupteur unidirectionnel l'essai passer le courant d'intensité  $i_T$  vers la charge, pendant la durée  $T_f$ , ensuite, il y a ouverture de l'interrupteur, et  $i_T=0$ , tandis que le courant continu circule dans la charge, à cause de l'inductance  $L$  et de la diode de roue libre  $D$  (continuité du courant dans  $L$ ).

**I-9-3 Hacheur (parallèle-élévateur), type BOOST :**

La tension de sortie peut être variée de la tension de la source d'alimentation jusqu'à plusieurs fois la valeur de celle-ci. La self  $L$  est utilisée pour lisser le courant d'entre.

L'interrupteur unidirectionnel  $T_p$ , met la source en court-circuit pendant la durée  $T_f$  ou le courant augmente, ainsi que le flux dans  $L$ , le courant circule dans la charge, bien  $V_s$  soit supérieur. Pendant la durée de fermeture suivante, la bobine récupère l'énergie magnétique qui avait été perdue pendant la circulation du courant dans la charge.

**I-9-4 Hacheur (série-parallèle), type BUCK-BOOST :**

Le hacheur série-parallèle est une combinaison de deux hacheurs série et parallèle. Leur combinaison nous permet d'obtenir la tension de sortie désirée en modifiant la tension d'entrée.

**I-10 Les convertisseurs DC/AC, les onduleurs :**

**I-10-1 Définition :**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de continue vers l'alternatif.

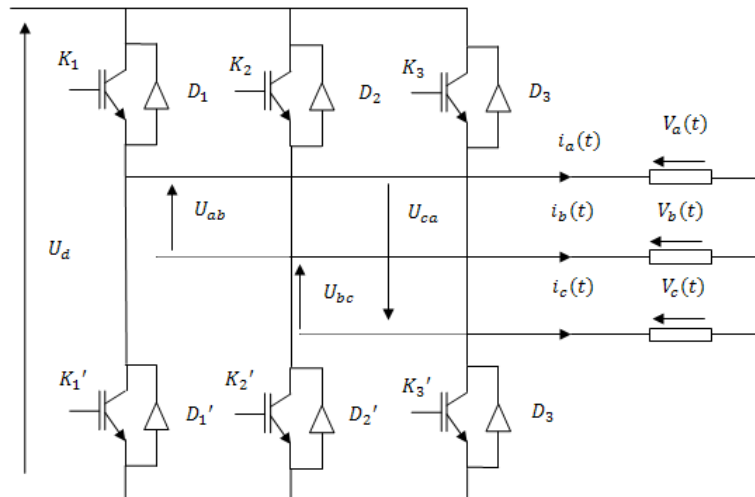
On distingue deux grands types d'onduleurs :

-Les onduleurs de tensions, alimentés par une source de tension continue.

-Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continue. [12]

**I-10-2 Onduleur (DC-AC) de tension triphasé :**

Un onduleur de tension triphasé, dont les composants semi-conducteurs contrôlables sont des transistors GTO, est le cœur de l'organe de commande du moteur asynchrone. Il peut être considéré comme un amplificateur de puissance, il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs, Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$ ,  $K_5$  et  $K_6$  doivent être contrôlés de manière complémentaire. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique alimentant le stator du moteur est illustré par la figure ( I-5) [12]



**Figure (I-5) :** Schéma d'un onduleur de tension alimentant le stator d'un moteur asynchrone

### I-10-2 Onduleur de courant :

L'onduleur de courant présente un grand inconvénient en raison de l'inductance du moteur asynchrone, car ce dernier lui fournit des créneaux de courant lors de la montée et de la descente rapide dans une phase, ce qui crée une surtension [13]

### I-11 Modulation de la largeur d'impulsion (MLI) :

La MLI permet de former chaque alternance de la sortie de plusieurs créneaux ; pour obtenir cela, on adopte certaine technique de commande des interrupteurs de l'onduleur.

Elle consiste de comparer les trois tensions de référence ( $V_a^*$ ,  $V_b^*$ ,  $V_c^*$ ) :

- Calculée pour une transformation inverse de PARK à un signal (porteuse) Triangulaire d'amplitude fixe est de pulsation nettement supérieure à celle des tensions de référence.

- La stratégie sinus-triangle est caractérisée par 2 paramètres qui sont :

- L'indice de modulation  $m$  [ $m = \text{fréquence de } V_p(t) / \text{fréquence de } V_{ref}(t)$ ] qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence.

- Le coefficient de réglage  $r$  ( $r = V_{ref} / V_p$ ) en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse.

La loi de commande a pour but de :

- Repousser les harmoniques à des fréquences élevées pour leur filtrage.

- Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.

Les instants de commutation sont obtenus par comparaison de trois tensions de référence correspondant aux tensions de sortie désirées de fréquence  $f$  à la fréquence  $f_p$  du signal triangulaire.

### I-12 Machine Asynchrone :

Le moteur asynchrone est le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

### I.12 .1 Définition :

On appelle machine asynchrone toute machine, qui ayant  $(2p)$  de pôles de fréquence  $f_s$  tourne pas exactement a la vitesse synchrone  $(60f_s/p)$ .

On parle généralement le moteur asynchrones car ses machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique a partir du l'énergie électrique.

Parmi les machines asynchrone, on peut distinguer deux types :

-Les machines à collecteurs.

-Les machines d'induction.

Le moteur d'induction est le plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction.



Figure (I-6) : Moteur asynchrone [15]

### I.12.2 Organisation de la machine :

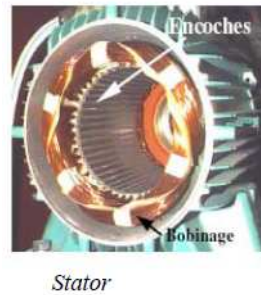
L'organisation d'une machine asynchrone est constituée des éléments principaux suivants :

-Le stator (partie fixe) constitué de disque en tôle magnétique portant l'enroulement chargés de magnétiser l'entrefer.

-Le rotor (partie tournante) constitué de disque en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou a cage d'écureuil [15]

#### ➤ Le stator :

Le stator est construit d'un enroulement triphasé bobiné reparti dans des encoches du circuit magnétique est constituer d'un empilage et tôles dans les quelles sont découpées des encoches parallèles a l'axe de la machine.



**Figure (I-7):** stator d'un moteur asynchrone triphasé [15]

➤ **Le rotor:**

**a) Rotor bobiné ( a bague):**

C'est un rotor qui comporte dans ses encoches un enroulement identique à celui du stator. Les extrémités de ses enroulements aboutissent à des bagues, dans le nombre est égale à nombre de phases entre lequel on peut intercaler selon le besoin un rhéostat de démarrage qu'on peut court-circuiter en marche normale de la machine [15]

**b) Rotor à cage :**

L'enroulement triphasé est remplacé par des barres conductrices en cuivre ou en aluminium réunies à leurs extrémités par des anneaux conducteurs forment ainsi une cage d'écureuil.

Les barres sont généralement inclinées d'un pas d'ampère pour améliorer les performances robustes comparées à un rotor bobiné. De plus sa construction est particulièrement économique, car la cage étant généralement réalisée à partir d'aluminium fondu que l'on coule dans les encoches.

**C) Principe de fonctionnement :**

Si l'on remplace le rotor d'une machine synchrone par un cylindre conducteur mobile autour de son axe, on constate qu'il se met en rotation à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme. Il tourne dans un sens lorsque le stator est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré direct, en sens inverse si on intervertit deux phases (système de tensions triphasé équilibré inverse). Les courants de Foucault et la loi de Lenz permettent d'interpréter ce phénomène. Le système des courants triphasés statoriques donne naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . Ce champ magnétique induit dans le cylindre rotatif des courants de Foucault dont l'effet, d'après la loi de Lenz, doit s'opposer à la rotation du champ d'origine statorique par rapport au rotor.

Le cylindre se met donc en rotation, sa vitesse tendant vers la vitesse de synchronisme sans jamais l'atteindre. En effet, s'il tourne à la vitesse de synchronisme il ne «voit» plus de variation de champ, donc il n'y a plus de courant induit. Plus de courants induits, plus de couple... et le rotor a tendance à ralentir, donc il voit à nouveau un champ variable qui crée des courants induits, donc un couple moteur, etc. Un équilibre dynamique s'établit et le rotor tourne à la vitesse  $\Omega < \Omega_s$ . De la même façon, si on l'entraîne à une vitesse supérieure à  $\Omega_s$ , le

stator tend à ramener sa vitesse à la vitesse de synchronisme, le rotor est donc freiné, c'est un fonctionnement en génératrice.

De telles machines, qui ne développent un couple que pour des vitesses différentes de la vitesse de synchronisme, sont dites machines asynchrones ou à induction [16].

### **I.13 La pompe :**

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement [17].

#### **I.13.1 Types de pompes :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [18].

##### **a)Aspiration :**

Est l'action mécanique qui crée un vide partiel à l'entrée de la pompe, permettant à la pression atmosphérique dans le réservoir, de forcer le liquide de réservoir vers la conduite d'aspiration ou d'alimentation.

##### **b) Refoulement :**

Le liquide pénétrant à l'intérieur de la pompe est transporté puis refoulé, soit par la réduction volume de la chambre le contenant, soit par addition forcée de volumes dans une chambre à capacité constante ou par centrifugation.

La pression relevée au refoulement d'une pompe n'est pas créée par la pompe cette pression s'établit en fonction de différentes résistances qui vont s'opposer au flux débité par la pompe. Elles ont pour origine le frottement du fluide sur les canalisations. Raccords et organes du circuit et la charge extérieure (charge utile et frottement mécanique) [19]

#### **I.13.2 Caractéristique :**

Sont données par le constructeur et permettant lors de l'élaboration d'un circuit de déterminer le choix de la pompe en fonction du travail :

- **La cylindrée :** Volume théorique de fluide pour un tour de pompe.
- **La hauteur d'aspiration :** Hauteur à laquelle une pompe se suffit à elle-même pour s'alimenter, elle est variable en fonction du type de pompe et du poids spécifique du liquide à aspirer.
- **Le débit refoulé :** C'est la quantité de fluide refoulée par unité de temps dans des conditions données. Un grand nombre de constructeurs donnent le débit de leurs pompes en litre par minute à différentes pressions et vitesses de rotation.
- **Plage de vitesse :** Ce sont les vitesses maximum et minimum entre lesquelles la pompe pourra être utilisée, elles s'expriment en tour par minute.

- **Pression de pointe** : C'est la pression maximum qu'il est possible d'atteindre avec une pompe. Cette pression ne peut pas être considérée comme la pression d'utilisation car la durée de vie d'entrainement serait écourtée.
- **Pression d'utilisation**: c'est la pression continue qui peut être maintenue à la sortie de la pompe lors de son utilisation dans le circuit. Elle assure une vie maximale à la pompe.
- **Puissance d'entraînement** : C'est la puissance qu'il est nécessaire de fournir à l'entraînement d'une pompe. Celle-ci est fonction du débit, de la pression désirée et du type de pompe utilisée.
- **Entraînement** : certains entraînements sont à proscrire (poulie, courroie). se référer aux recommandations du constructeur.
- **Le sens de rotation** : En générale, un seul sens de rotation est possible, dans la majorité des cas, il est gravé sur le corps de pompe afin d'éviter les erreurs de montage. [14]

### I-13-3 Différents types de pompes :

Il existe, en fait deux grands types : les pompes centrifuges et les pompes volumiques.

Ces dernières pour des faibles débits d'eau à des pressions élevées. [20]

#### a. Les pompes volumétriques :

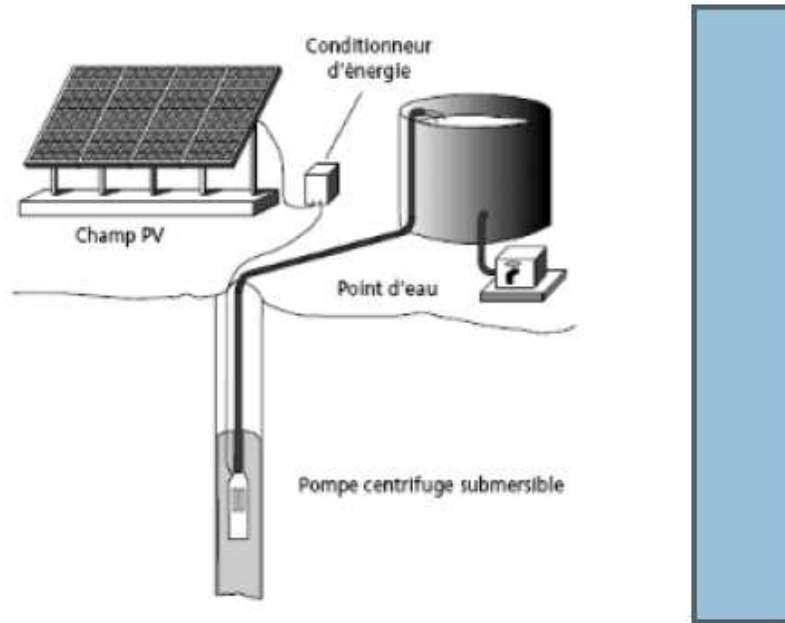
La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

#### b. Les pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe. Sur elles que se porte notre étude.

### I.13.4 Principe de fonctionnement :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge. La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).



**Figure (I-8) : Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [18]**

➤ **Constitution :**

Une pompe centrifuge est constituée par :

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

**I.13.5 Principe de fonctionnement de la pompe volumétrique :**

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos a l'intérieur duquel se place un élément mobile rigoureusement ajusté .leur fonctionnement repose sur le principe suivant :

Exécution d'un mouvement cylindrique.

Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment, ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.[18]

**Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les éléments constituant un système photovoltaïque qui permet le pompage de l'eau avec l'énergie solaire.

## II. Introduction

L'utilisation des systèmes solaires est soumise à certaines contraintes. La plus importante d'entre elles peut s'énoncer de la façon suivante : « il faut toujours respecter l'équilibre entre l'énergie produite par le générateur et l'énergie consommée par l'utilisateur ».

Il n'est pas possible de dimensionner les systèmes photovoltaïques en équilibrant les puissances, celle du générateur et celle des équipements utilisateurs, comme cela est pratiqué avec les groupes électrogènes. L'équilibre qui conditionne le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque doit être réalisé entre l'énergie produite et l'énergie consommée sur une période donnée, par jour en générale.

La présence de la batterie (ou d'un réservoir pour le pompage) permet de compenser un déficit accidentel entre l'énergie produite et l'énergie consommée, déficit qui peut être dû à un moindre ensoleillement d'un jour ou à une surconsommation exceptionnelle de la part des utilisateurs. Mais si cette surconsommation s'étale sur une plus grande période, soit les batteries se détérioreront (en cas d'absence d'un régulateur), soit le système s'arrêtera (coupure du régulateur).

### II.1. Coordonnées géographiques : [36]

Pour situer un site sur la terre, on a besoin de ses coordonnées terrestres :

#### a. Longitude (L) :

La longitude d'un lieu correspondant 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 est déterminé par le lieu envisagé, elle est comptée de 0° à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

#### b. Latitude ( $\theta$ ) :

Latitude donne la position d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0° et 90°, positivement vers le pôle nord et négativement vers le pôle sud.

#### c. Altitude ( $\varphi$ ) :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et le niveau moyen de la mer, elle est exprimée en mètre.

### II.2. Application pompage photovoltaïque au fil du soleil:

Pour cette application, on prend le cahier de charge qui est le suivant:  
les caractéristiques du puit sont :

- Niveau dynamique est de 20 mètre (niveau statique = 17 m et le rabattement = 3 m pour le débit moyen de 3.5 m<sup>3</sup>/h).
- Un réservoir sera installé à 2 mètre du sol, les pertes de charges sont données (12 % de la Hauteur du système) et le rendement de la motopompe utilisée est de 45 %.

#### a. La puissance hydraulique (Phyd) : [35]

La puissance hydraulique est la puissance nécessaire pour déplacer une certaine quantité d'eau d'une altitude à une autre. En réalité c'est la puissance réellement communiquée à l'eau par l'électropompe. Elle est donnée par la formule suivante :

$$p_{hyd} = \rho * g * Q_i * H$$

$p_{hyd}$  : Puissance hydraulique (W),

$Q_i$  : Débit instantané (m<sup>3</sup>/h),

$\rho$ : Masse volumique du liquide en [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_{eau} = 1000$  à 4°C (annexe C),

H = HMT (hauteur manométrique totale (m)).

Le rendement de la motopompe dépend des matériels utilisés lorsque l'optimisation est bonne, le rendement global pompe+moteur est de l'ordre de 30 à 40 %.

### **b. L'énergie hydraulique ( $E_{hyd}$ ) : [14]**

L'énergie hydraulique est l'énergie nécessaire pour déplacer une certaine quantité d'eau d'un niveau à un autre pendant une certaine durée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{hyd} = \rho * g * Q * H$$

$E_{hyd}$ : Énergie hydraulique consommée par jour (Wh),

Qq : débit quotidien (m<sup>3</sup>),

H : HMT (hauteur manométrique totale (m)).

### **II.3. présentation des logicielles :**

Le dimensionnement des générateurs solaire exige une analyse précise de différent facteur pouvant influencer sur le rendement du système photovoltaïque.

Notre simulation est basée sur le dimensionnement des installations dans le jour le plus défavorable de l'année, car une installation PV qui fonctionne dans le jour défavorable sera fonctionnelle dans les autres jours de l'année.

Ce logiciel permet spécialement de développer des applications avec stockage d'énergie comme l'éclairage photovoltaïque et des applications au fil du soleil tel que le pompage PV

#### **II.3.1 logiciel Météonorm :**

Métronome est un logiciel de la société METEOTEST à Bern en Suisse, sert pour les applications utilisant l'énergie solaire comme :

- Le photovoltaïque
- Le solaire thermique
- Le rafraichissement solaire
- Le conception de bâtiment bioclimatique

#### **II.3.2 Logiciel PVsyst :**

PVSYST est un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques qui a été réalisé par le CUEPE (University center for the Study of Energy Problems)- université de Genève- Suisse et qui a été financé par OFEN (Swiss Federal Office for Energy).

Ses débuts étaient en 1994 jusqu'à la dernière version 4.1 de 2007.

Ce logiciel dispose des bases de données très riches des panneaux, régulateurs, batteries, onduleurs, pompe solaire...etc., et une base de données météorologique très puissante qui couvre plus de 95 pays.

C'est pour cela qu'on a choisi ce logiciel pour comparer nos résultats de dimensionnement et voir s'ils sont proches de la réalité ou non.

#### II.4 . Le choix du site :

Pour l'étude de notre projet, nous avons choisi Makouda, c'est une [commune](#) de la [wilaya de Tizi Ouzou](#), en [Kabylie \(Algérie\)](#), située à 19 km au nord de [Tizi Ouzou](#) et à 21 km au sud de [Tigzirt](#) .

Le climat de Makouda est typiquement méditerranéen, chaud et sec en été et doux, humide et pluvieux en hiver, cependant à partir de 500 m d'altitude. Les précipitations annuelles varient de 800 mm à 1100

#### II.5. Les paramètres d'un générateur photovoltaïque :

Charge électrique d'un électron :  $q=1.6.10^{-19}\text{Cb}$

Energie de gap: énergie nécessaire pour un électron pour s'arracher :  $E_g=1,12.q \text{ Ev}$

Constante de Boltzmann :  $K= 1,38.10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

Résistance série d'une cellule PV :  $R_s=0.641\Omega$

Résistance shunt d'une cellule PV :  $R_{sh}=151.16 \Omega$

Nombre de cellules PV dans un module :  $n_c=72$

Nombre de modules en parallèle :  $n_p=7$

Nombre de modules en série :  $n_s=2$

- **Les caractéristiques de la cellule**

-Type ..... Silicium monocristallin.

-Dimensionnement de la cellule ..... 125\*125 cm

-Forma de la cellule ..... Quasi carré

-Nombre de la cellule par panneau ..... 72 en Serie

-Efficacité de rendement ..... 15%

-Les caractéristiques mécaniques :

-Longueur ..... 1580mm

-Largueur ..... 808mm

-Epaisseur ..... 46mm

-Entraxes de fixation longueur ..... 1176mm

-Entraxes de fixation largeur .....737mm

-Poids ..... 16K

-Epaisseur de la face avant ..... 3.2mm

- Surface d'une cellule ..... 152.3  $cm^2$
- Surface totale des cellules..... 1.097  $m^2$
- Surface du module .....1.277  $m^2$

- **Les valeurs maximales :**

- Température de fonctionnement .....-40°Cà+ 90°C
- Isolation.....1000VDCmax
- Resistance maximum u vent.....60m/s
- Diamètre maximum de la grêle à 80Km/h.....25mm
- Nombre de diode/module.....2

### **II.6.Simulation avec le logiciel métronome :**

Elle représentée étape par les schémas ci-dessous :

- ✓ **Etape 1 :**

Dans cette étape on introduit les informations géographiques qui définissent le site :

- Latitude (°) = 36.49
- Longitude (°) = 4.01
- Altitude (m) = 641
- Fuseau horaire (h) = 1
- Référence de horaire (h) = 60
- Situation = ouverte

**Information sur le site**

**Information générale**

Nom:

Catégorie:

Coordonnées:

°N Lat      °E Lon

Altitude:  m a.s.l.

Fuseau horaire:  TUC

Référence de temps:  min

Situation:

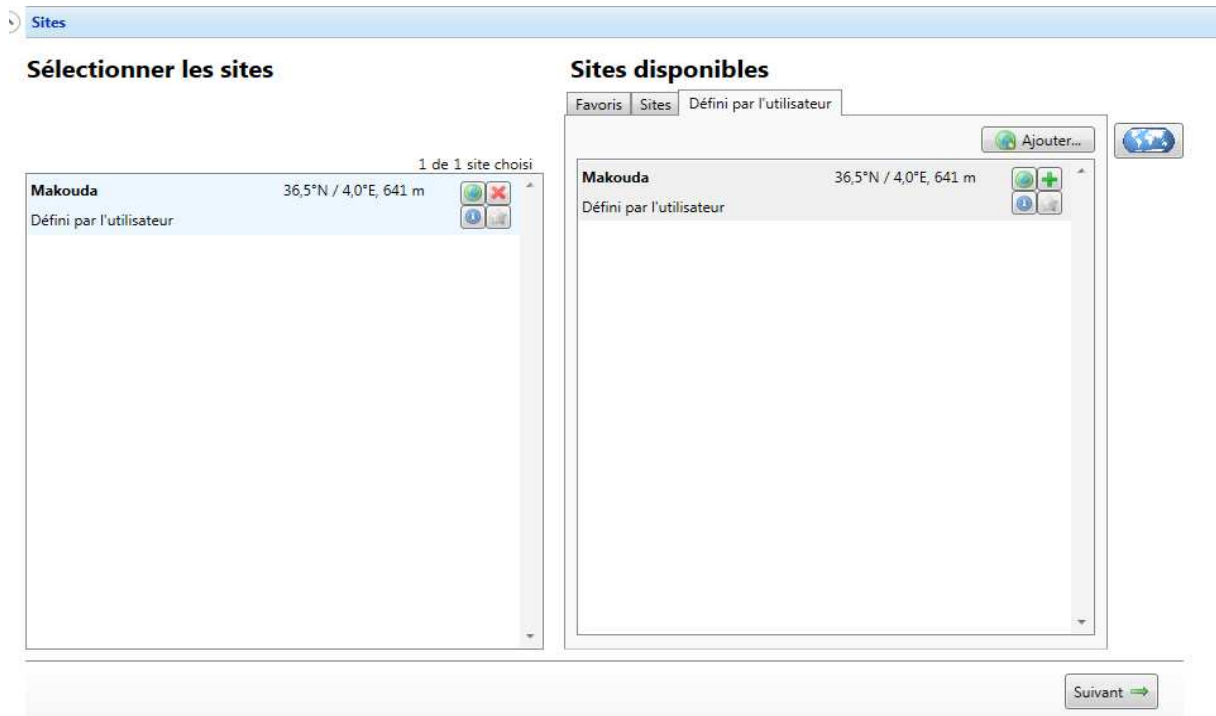
© OpenStreetMap - Map data ©2013 OpenStri

**Détails**

Ceci est un site défini par l'utilisateur

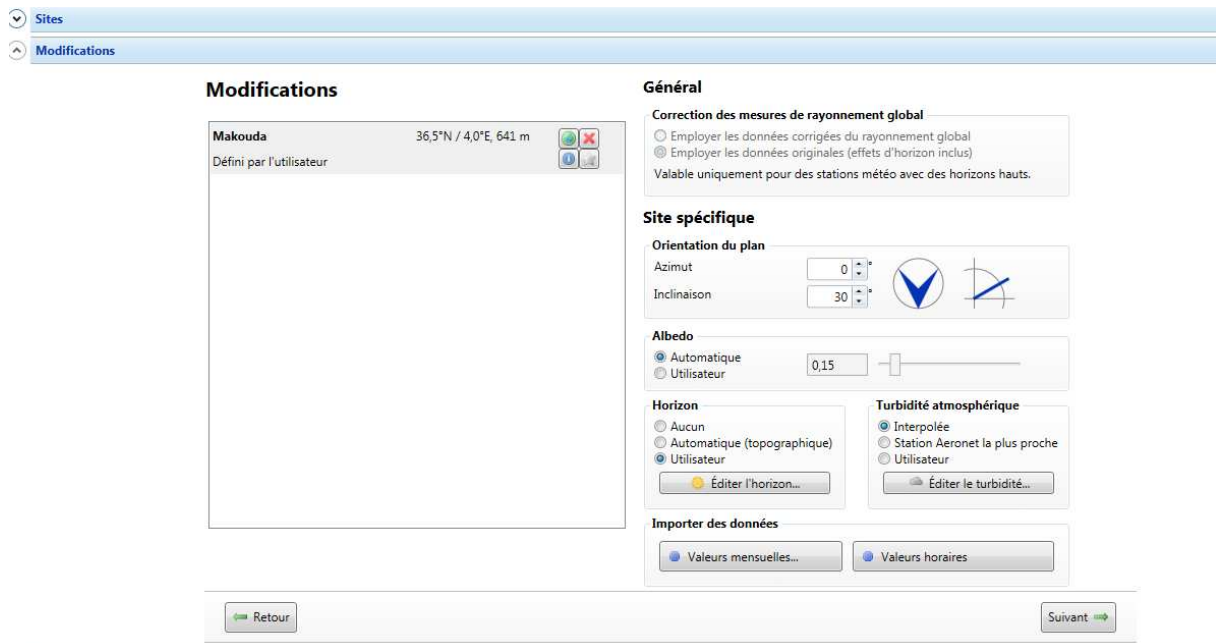
✓ **Etape 2 :**

Après avoir introduit l'information concernant le site dans l'étape précédente, on choisit le site définie par l'utilisateur.



✓ Etape 3 :

Après plusieurs calculs, on a constaté que l'angle d'inclinaison idéal pour notre système est inclus entre  $25^\circ$  et  $35^\circ$  est une orientation plein sud (Azimut  $0^\circ$ ) pour avoir le maximum d'irradiation possible.



✓ **Etape 4 :**

On choisi de valider les données introduites par l'utilisateur pour que le logiciel les prenant en considération.

**Données**

**Série de données**

Employer les données climatiques

Employer les données importées

**Période de température**

2000-2009

1961-1990

Futur

**IPCC scénario pour les périodes futur**

B1

A1B

A2

2010

**Période de rayonnement**

1986-2005

1981-1990

Futur

Retour Paramètres avancés Remise à zéro Suivant

✓ **Etape 5 :**

On doit choisir le type de système auquel on introduit les résultats finaux dans notre cas, on va exportés vers PVsystem.

- ▼ Sites
- ▼ Modifications
- ▼ Données
- ▲ Format

**Format de sortie**

<p><b>Meteonorm</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Standard</li> <li><input type="radio"/> Meteo</li> <li><input type="radio"/> Standard minute</li> <li><input type="radio"/> Humidity</li> <li><input type="radio"/> Science</li> <li><input type="radio"/> Spectral / UV</li> <li><input type="radio"/> Standard opt.</li> </ul>	<p><b>Simulation bâtiment</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> TRNSYS</li> <li><input type="radio"/> CH Meteo</li> <li><input type="radio"/> HELIOS-PC</li> <li><input type="radio"/> DOE</li> <li><input type="radio"/> Suncode</li> <li><input type="radio"/> Match</li> <li><input type="radio"/> sia 380/1</li> <li><input type="radio"/> LESOSAI</li> <li><input type="radio"/> EnergyPlus (.epw)</li> <li><input type="radio"/> DYNBIL</li> <li><input type="radio"/> PHPP/WaVE</li> <li><input type="radio"/> Pleiades/Comfie</li> <li><input type="radio"/> sia 2028</li> <li><input type="radio"/> WUFI / WAC</li> <li><input type="radio"/> PHLuft</li> <li><input type="radio"/> IDA ICE</li> <li><input type="radio"/> IBK-CCM</li> </ul>	<p><b>PV</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> PVSOL</li> <li><input checked="" type="radio"/> PVSyst</li> <li><input type="radio"/> PVS</li> <li><input type="radio"/> Meteo matrix (TISO)</li> <li><input type="radio"/> PVScout</li> <li><input type="radio"/> Solinvest</li> </ul>	<p><b>Energie solaire thermique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Polysun</li> <li><input type="radio"/> TSOL</li> <li><input type="radio"/> Solar-Ripp</li> </ul>
<p><b>Diverse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> TMY2</li> <li><input type="radio"/> TRY (DWD)</li> <li><input type="radio"/> TMY3</li> </ul>	<p><b>Utilisateur</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Défini par l'utilisateur</li> <li><input type="text" value=""/></li> <li><input type="button" value="Modifier données"/></li> <li><input type="button" value="+ Nouveau"/></li> </ul>		

✓ **Etape 6 :**

Dans cette étape le logiciel simule les données introduites précédemment pour obtenir les différentes informations recherchées (rayonnement, températures,.....).

⌵ Sites

⌵ Modifications

⌵ Données

⌵ Format

⌵ Output

**Output** ██████████

**Makouda** 36,5°N / 4,0°E, 641 m

Défini par l'utilisateur

**Makouda**

☀️ Durée d'insolation
★ Rayonnement global journalier

🌡️ Température journalière
📄 Tableau de données

🟡 Rayonnement
🌡️ Température
☁️ Précipitations

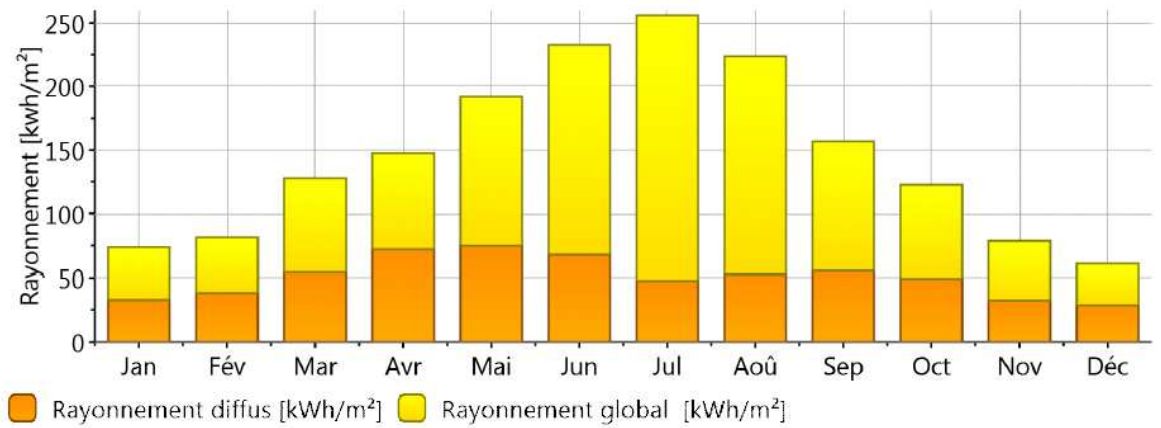
Rayonnement [kWh/m<sup>2</sup>]

Informations du résultat

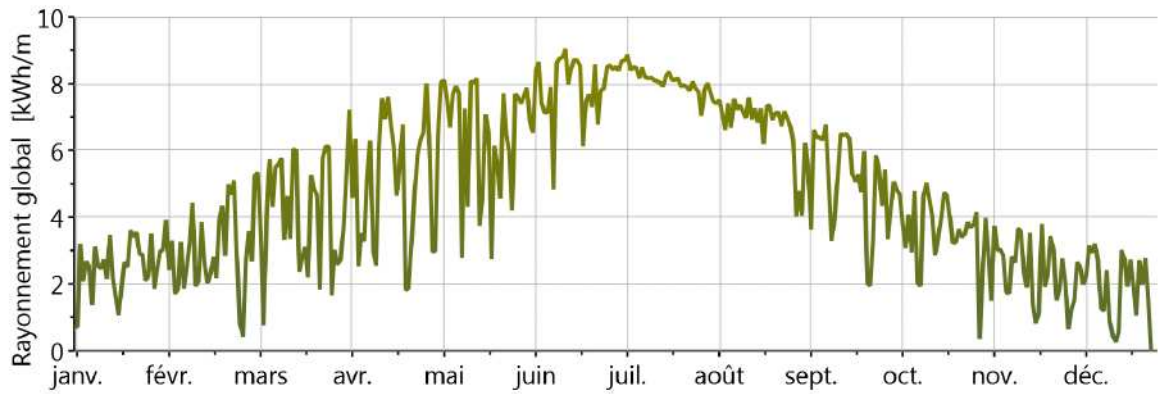
**II.7. Les résultats :**

➤ **Rayonnement :**

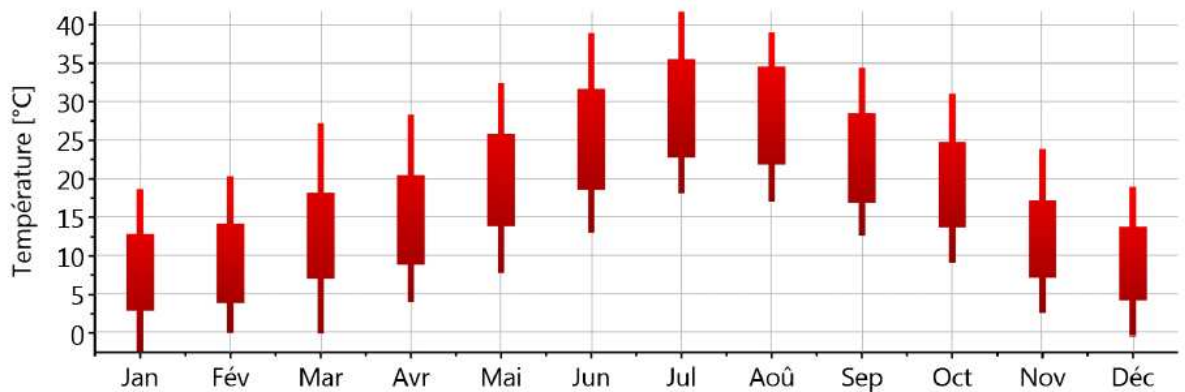
**Rayonnement mensuel**



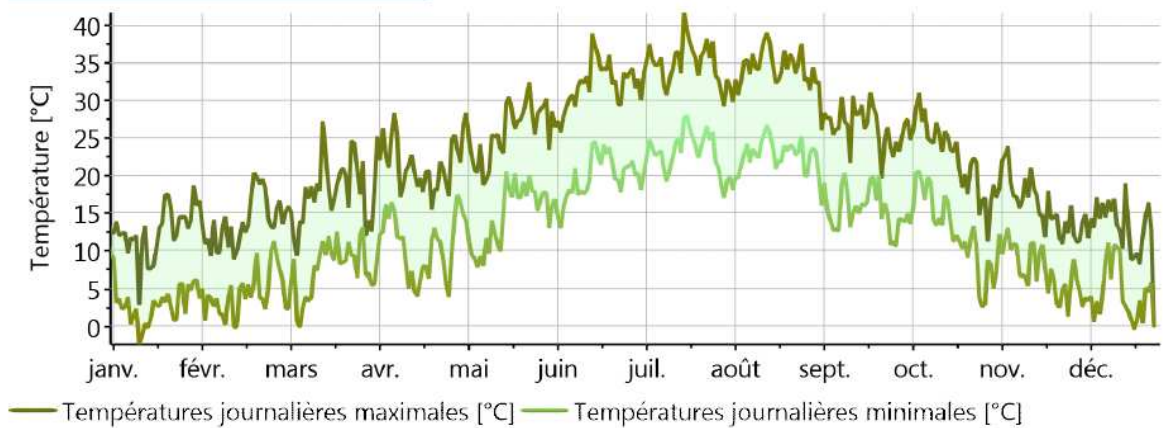
➤ **Rayonnement global journalier :**



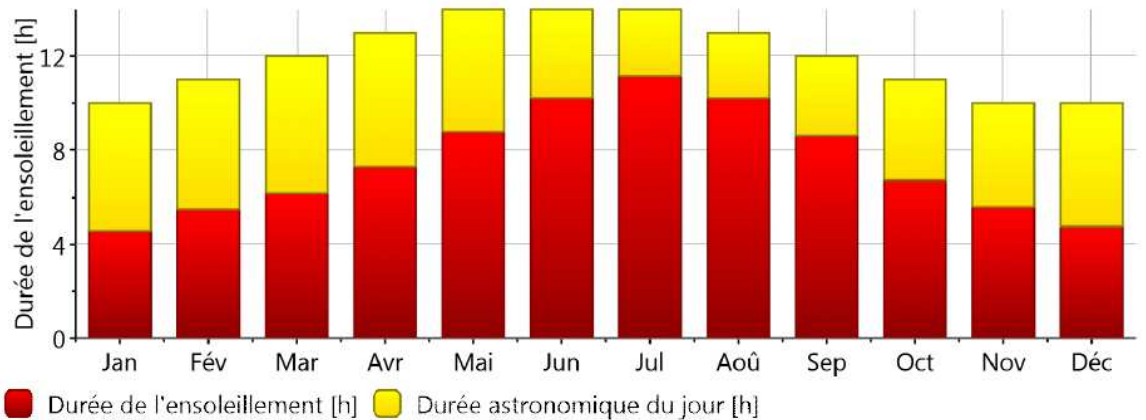
➤ **Température mensuelle**



➤ **Température journalière**



**Durée d'insolation**



**Tableau de données récapitulatives :**

**Makouda**

	Rayonnement		Température		Précipitations		
	Durée d'insolation		Rayonnement global journalier				
	Température journalière		Tableau de données				
	Gh kWh/m <sup>2</sup>	Gk hor kWh/m <sup>2</sup>	Dh kWh/m <sup>2</sup>	Bn kWh/m <sup>2</sup>	Ta °C	Td °C	FF m/s
Janvier	74	112	33	101	7,7	3,2	2,4
Février	81	108	38	87	8,8	3,1	2,6
Mars	128	153	54	130	12,5	4,8	2,9
Avril	147	155	72	115	14,8	6,2	3,1
Mai	192	187	75	171	19,9	9,3	3
Juin	233	217	68	233	25,7	11,2	2,9
Juillet	256	243	48	289	29,2	12,4	2,8
Août	224	233	53	251	28,2	12,9	2,7
Septembre	157	180	56	165	22,9	12,5	2,6
Octobre	123	161	49	138	19	10,4	2,3
Novembre	78	116	32	107	12,1	6,5	2,4
Décembre	61	94	28	83	8,7	4,5	2,4
Année	1748	1960	605	1868	17,5	8,1	2,7

**Informations du résultat**

Incertitude des valeurs annuelles: Gh = 5%, Bn = 9%, Gk = 6%, Ta = 1,1 °C  
 Tendence de Gh / décennie: 1,7% Variabilité de Gh / an 4,2%  
 Sites d'interpolation du rayonnement Valeurs importées  
 Stations de l'interpolation de température: Valeurs importées

**(Tableau 1) de données récapitulatives**

Ta: Température de l'air

FF: Vitesse du vent

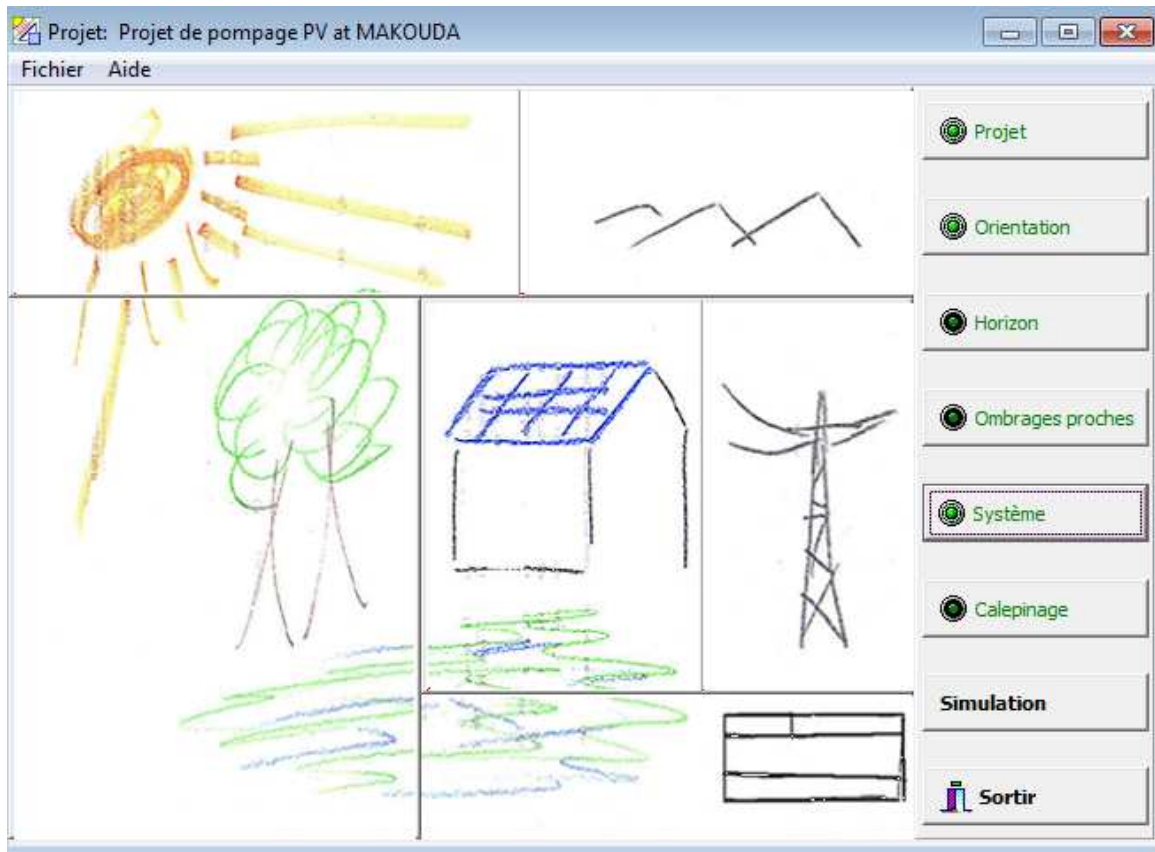
G\_Gh: Irradiance moy. du ray. global horiz.

G\_Dh: Irradiance du rayonnement diffus horizontal

### **II.8.Simulation avec le logiciel PVsyst :**

Avec ce logiciel on exploite les résultats obtenu par météoNorm on suivant les étapes :

- **Etape 1** : on clique sur <<outils>> dans la fenêtre principale qui nous donne différentes possibilités ,puis on choisi sites géométrique pour importer les informations de météoNorm.
- **Etape 2** : Notre site n'existe pas dans la base de donnée du logiciel sauf Alger et Tamanrasset existant pour l'Algérie, il faut donc cliquer sur nouveau pour la crée.
- **Etape3** : on introduit les résultats de météoNorm ainsi que les coordonnées géographiques afin de compléter les tableaux ,puis valider cette étape.
- **Etape 4** : On revient à la fenêtre principale et on choisi <<conception du projet>> et <<Pompage>>
- **Etape 5** : Cette figure nous donne accès pour configurer toutes les caractéristiques technique de notre projet, où nous allons procéder étape par étape.



#### ❖ **Projet :**

On valide les données météorologiques et géographiques de notre site, pour cela on doit passer par les étapes ci-dessous :

- Désigner le projet on lui donnant un nom, puis cliquer sur **site et météo** pour procéder à l'étape suivante.
- On accède à la base de données du logiciel pour charger le site créé << Tizi-ouzou\_Makouda >>
- Valider les données et le site.

#### ❖ **Orientation :**

On fixe notre système à  $30^\circ$  d'inclinaison et  $0^\circ$  d'azimut

On choisit une irradiation annuelle pour une production annuelle.

#### ❖ **Horizon :**

Après traitement des données on obtient les lignes d'horizon tracées sur la trajectoire du soleil

#### ❖ **Ombrage :**

Notre système est implanté dans une situation ouverte qui est sans ombrage on choisit donc << **sans ombrage** >> dans cette étape.

#### ❖ **Système :**

On choisit en haut de cette fenêtre un système Puits vers réservoir (alimentant un réservoir ouvert par le haut).

Dans cette fenêtre, on va remplir trois grands champs séparés.

Le premier champ est réservé aux caractéristiques du réservoir, le deuxième pour les caractéristiques du puit et le troisième pour le circuit hydraulique. En remplissant les données de ces trois champs, et on doit avoir la même hauteur manométrique totale que celle trouvé avant avec le logiciel MATLAB

### II.9. Introduction des paramètres du système de pompage

**Pumping System Type** Puits vers réservoir

**Well characteristics**

Static depth	17.0	m
Max. pumping depth	25.0	m
Pump depth	30.0	m
Borehole diameter	0.0	cm
Spec. drawdown	0.00	m³/h

**Storage Tank**

Volume	22.0	m³
Diameter	2.65	m
Water full height	4.00	m
Feeding altitude	60.00	m
Bottom alimentation	<input type="checkbox"/>	

**Hydraulic Circuit**

Pipe choice	PE40 (1 1/2)	
Piping length	35	m
Number of elbows	4	
Other friction losses	0.00	

The pipe length should be at least as long as the level difference !

Graph: Head [mCE] vs Flowrate [m³/h]. Legend: Total with friction loss (green line), Diff. altitude OUT-IN (blue line).

Buttons: Back, Cancel, Water needs

Après avoir remplir cette fiche, on va cliquer sur **Water needs** pour définir les besoins en eau journalier. Sur cette fiche on définit les besoins en eau (**20 m<sup>3</sup>** valeur moyenne annuelle) et on fixe le niveau statique du puit à 17 m. Le logiciel PVSYST4.1 va afficher directement l'énergie hydraulique nécessaire durant toute l'année qui égale à **4595 kWh** et donne une large estimation de l'énergie annuelle fournie par le générateur photovoltaïque.

## II.10. Calcul de l'énergie hydraulique annuelle par PVSYST :

Water Needs and Hydraulic Pressure / Head, Variant "Nouveau Besoins de l'utilisateur"

Comment : Nouveau Besoins de l'utilisateur

**Water needs**

Yearly average  
 Seasonally value  
 Monthly values

Whole Year needs : 20.0 m³/jour

**Water units**

Flow : m³/jour  
 Pressure : mCE

**Yearly summary**

Water needs average	60.0 m³/jour
Yearly water needs	21900 m³
Yearly Head average	77.0 mCE
Hydraulic energy	4595 kWh
PV needs (very roughly)	15519 kWh

**Well static depth variations**

Yearly constant  
 Seasonal values  
 Monthly values

Whole Year: 17.0 mCE

**Model File**

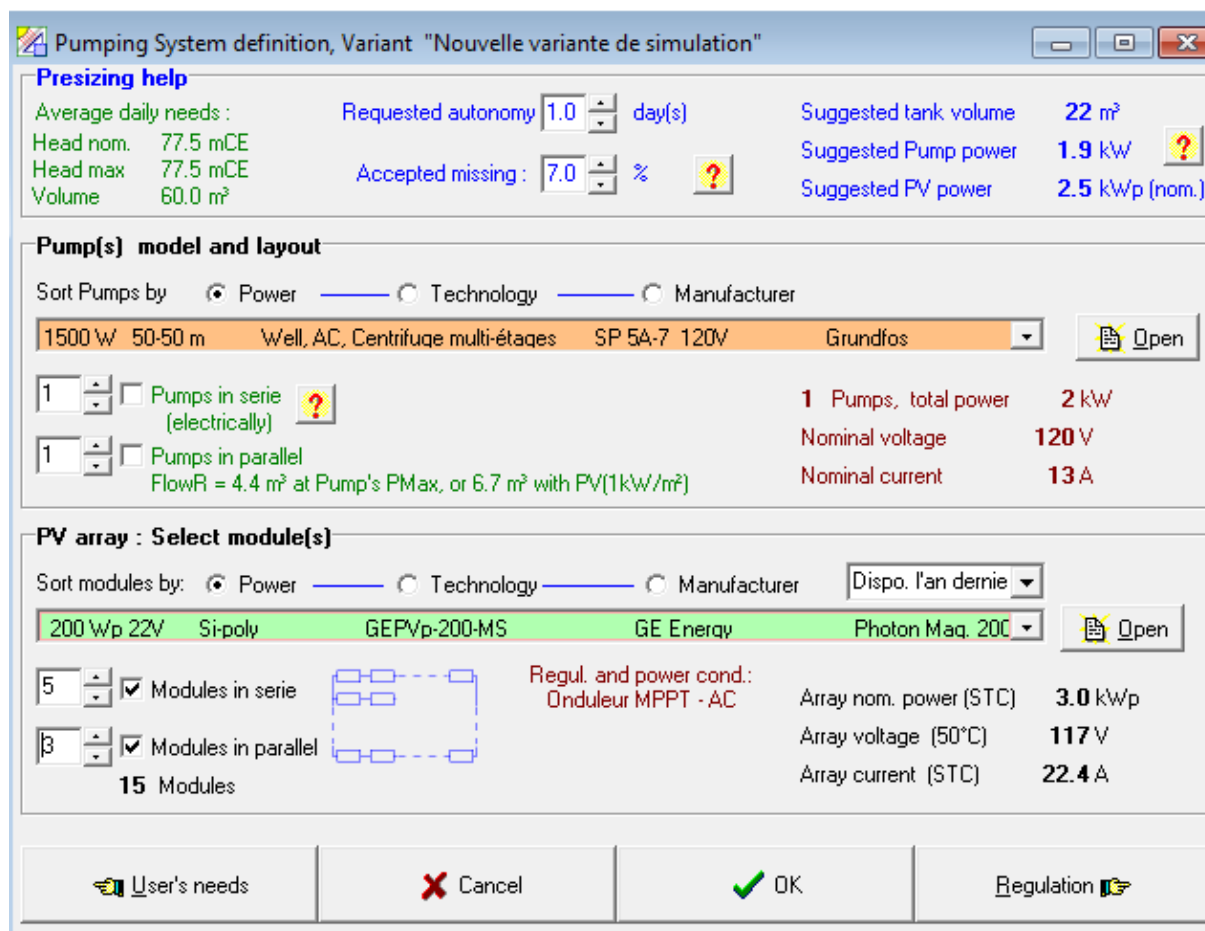
Load Save

Hydraulic configuration Cancel System definition

En suite, on clique sur **System définition** pour pouvoir mieux définir notre système de pompage. La figure II va être affichée Sur cette fiche :

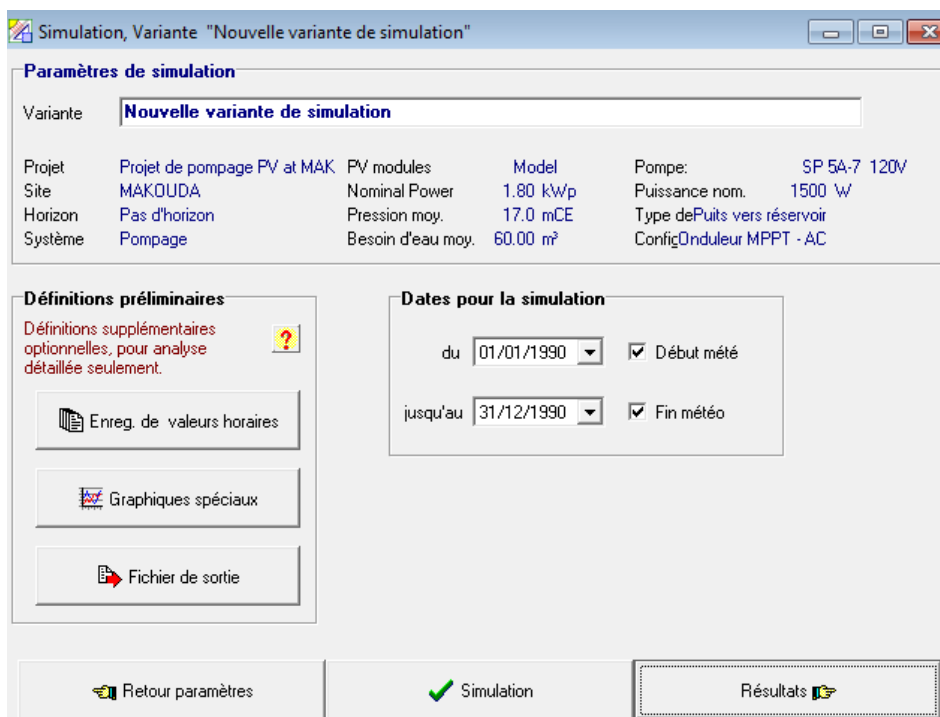
1. On fixe le nombre de jour d'autonomie à 1 (puisque on utilise un stockage d'eau et pas un stockage d'énergie électrique dans des batteries),
2. On choisit comme type de pompe la pompe Palettes rotatives de 1200 W, 5-51m DC,
3. On choisit comme module tandem de 164 Wpet de 120 V de la base de données des modules, Le logiciel donne le nombre de modules en série et en parallèle ainsi que le nombre de pompes pour assurer le flux d'eau total.

II.11. Résultats de dimensionnement en utilisant PVSYST :

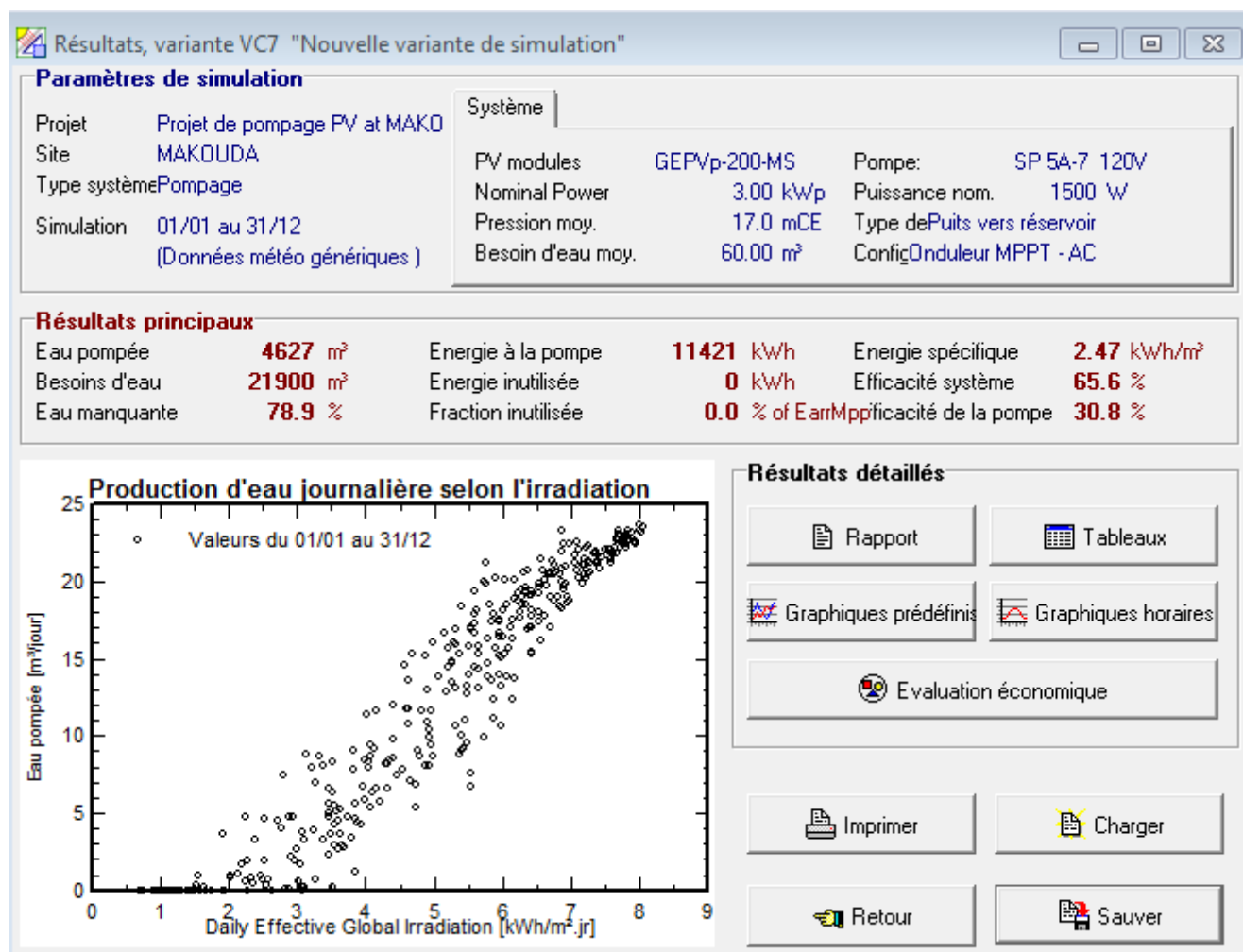


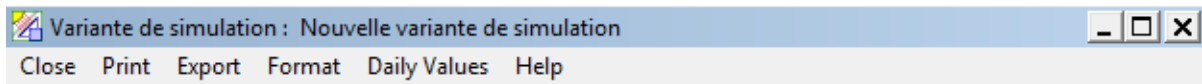
❖ **Simulation :**

La dernière étape pour avoir les résultats finaux

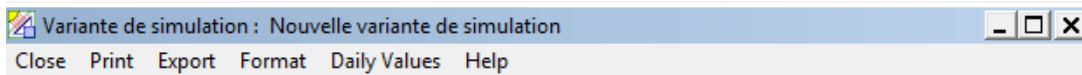
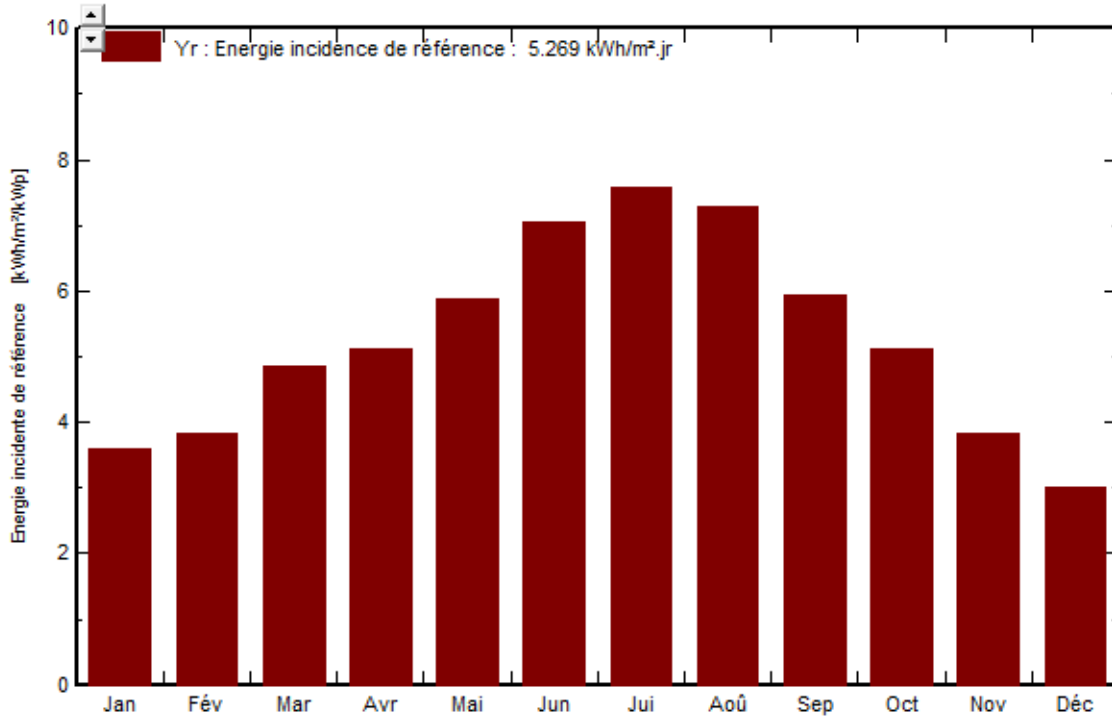


❖ Résultat :

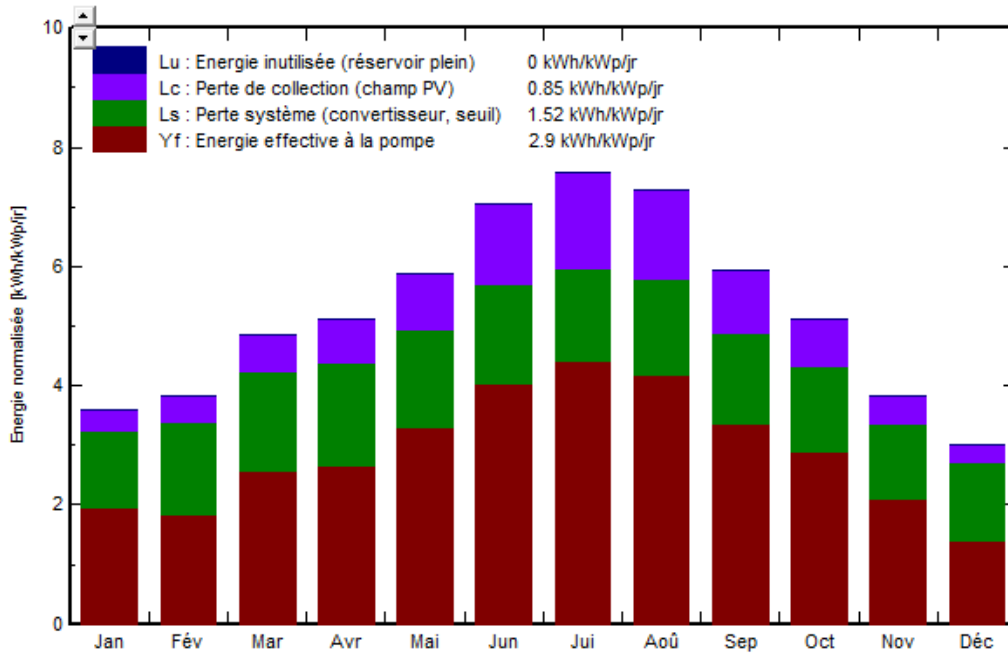


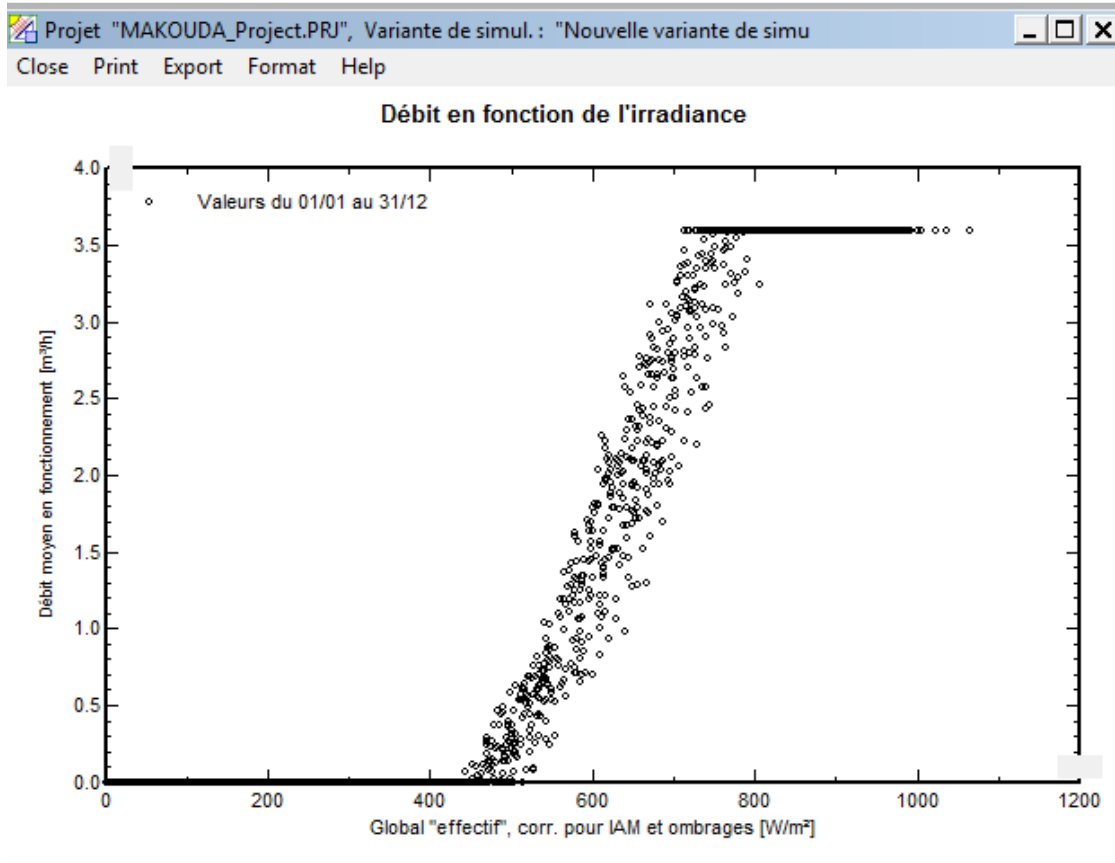
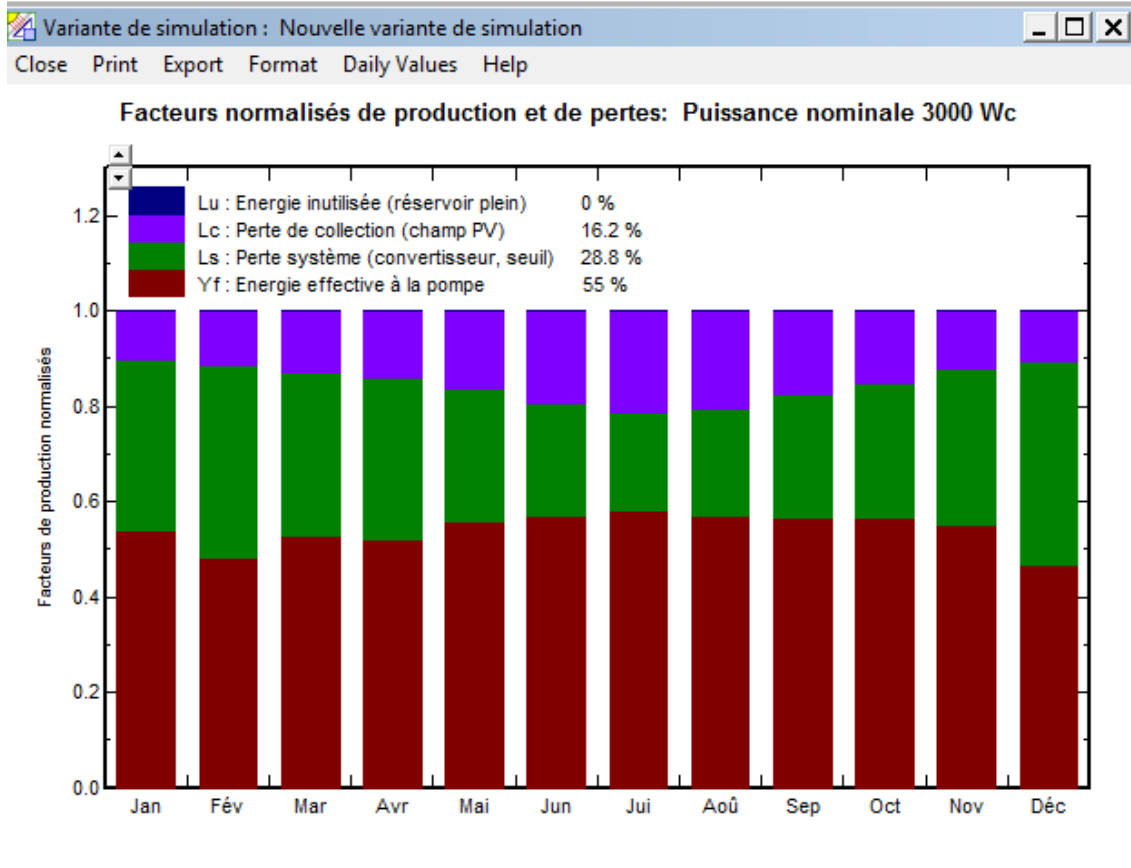


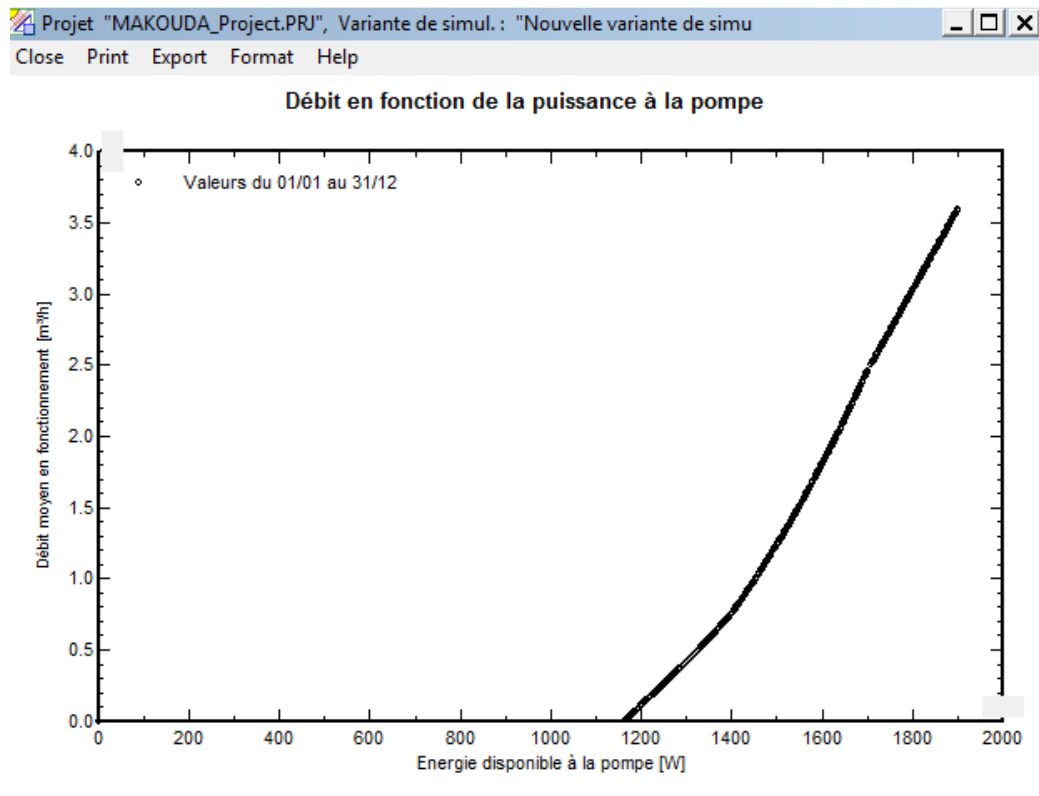
Energie incidente de référence dans le plan capteurs

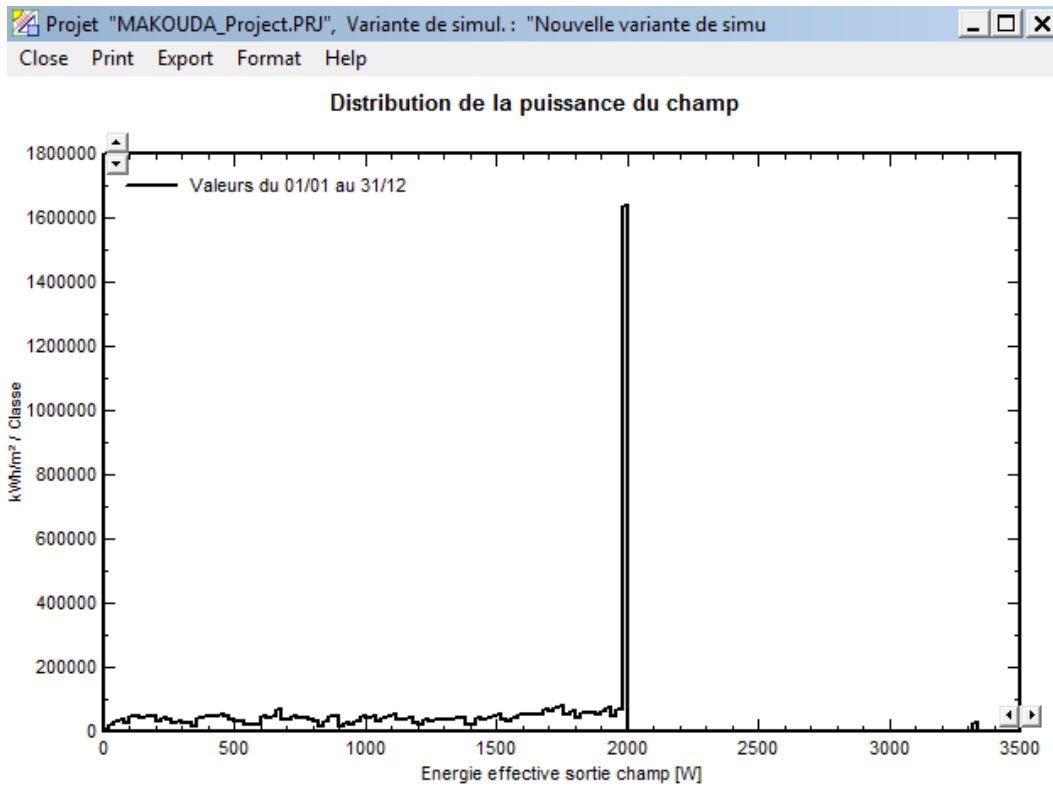


Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 3000 Wc









**Conclusion :**

Le but de ce chapitre réside au niveau de la mise en œuvre d'une solution technique permettant de calculer la quantité d'énergie produite pendant un an par un panneau photovoltaïque fixe ou suiveurs de soleil afin de bien dimensionner le système pour répondre aux exigences du client avec un investissement raisonnable c'est-à-dire avoir la même quantité d'énergie pour un cout plus possible.

## Système de pompage PV: Paramètres de simulation de base

**Projet :** **Projet de pompage PV at MAKOUDA**

**Site géographique** **MAKOUDA** **Pays** **Algeria**

**Situation** Latitude 36.5°N Longitude 4.0°E  
 Temps défini comme Temps légal Fus. horaire TU+1 Altitude 641 m  
 Albédo 0.20

**Données météo :** MAKOUDA, Données horaires synthétiques

**Variante de simulation :** **Nouvelle variante de simulation**

Date de la simulation 28/06/13 à 15h02

### Paramètres de simulation

<b>Paramètres système de pompage</b>	Type de système	<b>Puits vers réservoir</b>		
Caractér. du puits (Diamètre 0 cm)	Prof. du niveau statique	17.0 m	Baisse de niveau spéc.	0.00 m / m <sup>3</sup> /h
	Prof. de la pompe	30.0 m	Prof. maxi de pompage	25.0 m
Réservoir	Volume	22.0 m <sup>3</sup>	Diamètre	2.7 m
Alimentation par le haut	Altitude d'injection	60.0 m	Hauteur (niveau plein)	4.0 m
Circuit hydraulique	Longueur de tuyaux	35 m	Tuyaux PE40 (1"1/2)	Dint = 41 mm
	Nombre de coudes	4		
<b>Besoins d'eau</b>	Constant sur l'année:	60.16 m <sup>3</sup> /jour		
<b>Pompe</b>	Modèle	<b>SP 5A-7 120V</b>		
	Fabricant	Grundfos		
Technologie de la pompe	Centrifuge multi-étages	Pompe immergée (puits)	Moteur	Moteur AC triphasé
Convertisseur associé ou intégré	Type	MPPT	Plage de tension	100 - 140 V
Conditions de fonctionnement		<b>Pression min.</b>	<b>Pression nom.</b>	<b>Pression max.</b>
		5.0	30.0	50.0 mWater
Débit maximum correspondant		9.90	7.10	4.40 m <sup>3</sup>
Puissance requise		1500	1500	1500 W
<b>Orientation plan capteurs</b>	Inclinaison	30°	Azimut	0°

### Caractéristiques du champ de capteurs

<b>Module PV</b>	Si-poly	Modèle	<b>GEPVp-200-MS</b>	
		Fabricant	GE Energy	
Nombre de modules PV		En série	5 modules	En parallèle 3 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	15	Puissance unitaire 200 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	<b>3000 Wc</b>	Aux cond. de fonct. 2624 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	117 V	I mpp 22 A
Surface totale		Surface modules	<b>21.9 m<sup>2</sup></b>	

<b>Appareil de contrôle</b>	Modèle	Appareil générique (optimisé selon ce système)
	Configuration du système	<b>Onduleur MPPT - AC</b>

## Système de pompage PV: Paramètres de simulation détaillés

**Projet :**                                    **Projet de pompage PV at MAKOUDA**

**Variante de simulation :** **Nouvelle variante de simulation**

<b>Principaux paramètres système</b>		Type de système	<b>Puits vers réservoir</b>	
Besoins du système		Pression de base	77.0 mCE	Besoins d'eau 60.2 m³/jour
Pompe		Modèle / Fabricant	SP 5A-7 120V / Grundfos	
Champ PV		Modèle / Fabricant	GEPVp-200-MS / GE Energy	
		Nombre de modules	5 S x 3 P	Puissance du champ 3000 Wc
Configuration du système		Stratégie de régulation	<b>Onduleur MPPT - AC</b>	

**Contrôle de fonctionnement du système** (Appareil générique, param. ajustés selon le système)

**Convertisseur de puissance** Onduleur MPPT - AC

Conditions de fonctionnement	Tension MPP minimale	100 V	puissance nominale	1901 W
	Tension MPP maximale	140 V	Puissance seuil	95 W
	Tension champ max.	140 V	Efficacité maxi	97.0 %
	Courant d'entrée maxi	15.0 A	Efficacité EURO	95.5 %

### Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	40.0 W/m²K	Uv (vent)	0.0 W/m²K / m/s
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m², Tamb=20°C, Vent=1m/s.)			NOCT	38 °C
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	90 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	2.5 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	2.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Paramètre bo	0.05

## Système de pompage PV: Résultats principaux

**Projet :** **Projet de pompage PV at MAKOUA**

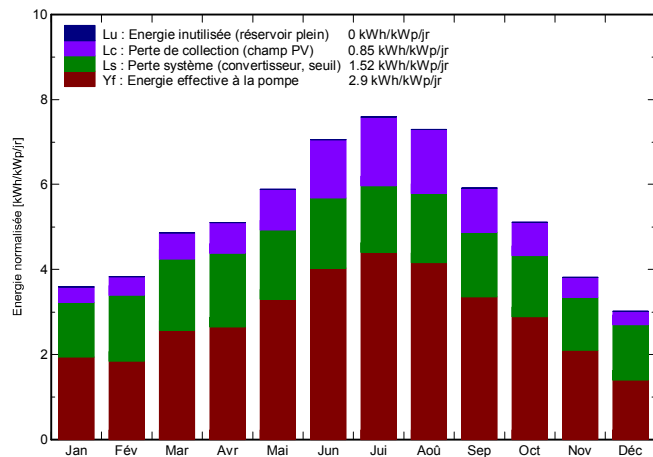
**Variante de simulation :** **Nouvelle variante de simulation**

<b>Principaux paramètres système</b>	Type de système	<b>Puits vers réservoir</b>	
Besoins du système	Pression de base	77.0 mCE	Besoins d'eau 60.2 m³/jour
Pompe	Modèle / Fabricant	SP 5A-7 120V / Grundfos	
Champ PV	Modèle / Fabricant	GEPVp-200-MS / GE Energy	
Configuration du système	Nombre de modules	5 S x 3 P	Puissance du champ 3000 Wc
	Stratégie de régulation	<b>Onduleur MPPT - AC</b>	

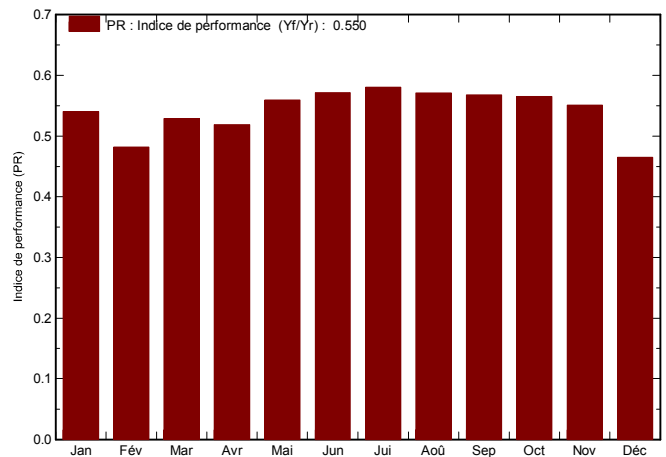
**Principaux résultats de la simulation**

Production du système	<b>Eau pompée</b>	<b>4627 m³</b>	Spécifique	203 m³/kWp/bar
	Besoins d'eau	21960 m³	Eau manquante	78.9%
	Energie à la pompe	3172 kWh	Spécifique	0.69 kWh/m³
	Energie PV inutilisée (réservoir plein)	0 kWh	Fraction inutilisée	0.0 %
	Efficacité système	65.6 %	Efficacité de la pompe	30.8 %

**Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 3000 Wc**



**Indice de performance (PR)**



**Nouvelle variante de simulation**

**Bilans et résultats principaux**

	<b>GlobEff</b> kWh/m²	<b>EArrMPP</b> kWh	<b>E PmpOp</b> kWh	<b>ETkFull</b> kWh	<b>H Pump</b> mCE	<b>WPumped</b> m³	<b>W Used</b> m³	<b>W Miss</b> m³
<b>Janvier</b>	108.3	300.3	180.7	0.000	77.25	223.8	234.8	1625
<b>Février</b>	104.3	285.4	155.2	0.000	77.31	215.3	215.3	1465
<b>Mars</b>	146.6	394.7	239.3	0.000	77.34	349.2	349.2	1511
<b>Avril</b>	148.3	394.2	238.3	0.000	77.33	340.6	340.6	1459
<b>Mai</b>	176.9	458.9	306.6	0.000	77.30	422.1	422.1	1438
<b>Juin</b>	205.2	512.1	363.1	0.000	77.35	539.7	539.7	1260
<b>Juillet</b>	228.1	555.3	410.0	0.000	77.38	637.0	637.0	1223
<b>Août</b>	219.8	538.6	387.5	0.000	77.40	615.7	615.7	1244
<b>Septembre</b>	172.6	439.5	302.6	0.000	77.35	445.8	445.8	1354
<b>Octobre</b>	154.2	402.9	269.1	0.000	77.36	407.1	407.1	1453
<b>Novembre</b>	111.4	301.2	189.3	0.000	77.30	256.3	256.3	1544
<b>Décembre</b>	90.9	251.4	130.6	0.000	77.28	174.2	174.2	1686
<b>Année</b>	1866.6	4834.6	3172.4	0.000	77.34	4626.8	4637.8	17262

Légendes: GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages H Pump Pression totale moyenne à la pompe  
 EArrMPP Energie champ, virtuelle au MPP WPumped Eau pompée  
 E PmpOp Energie de fonctionnement pompe W Used Eau consommée  
 ETkFull Energie inutilisée (réservoir plein) W Miss Eau manquante

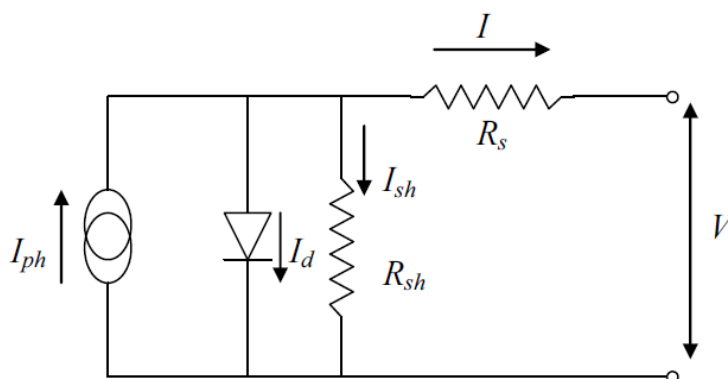


### III.1. Introduction :

La modélisation est une étape fondamentale dans l'analyse d'un dispositif, elle consiste à décrire mathématiquement un processus technique d'un système à étudier.

### III.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Lorsque les résistances de contact et les pertes ohmique ne peuvent être considérées comme non négligeables par rapport à la résistance de charge, on doit associer au schéma équivalent une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance shunt ( $R_{sh}$ ).



**Figure (III.1)** schéma équivalent d'une cellule PV à une diode 1

Appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III.1})$$

Le courant débité par la cellule est la somme de trois courants :

$I_{ph}$  : Courant généré par les photons ou photon-génère.

$I_d$  : Courant de la diode

$I_{sh}$  : Courant traversant  $R_{sh}$ . Si  $R_{sh}$  est très grande, il devient très faible et est indépendant de la tension [23].

Le courant  $I_{ph}$  dépend directement du rayonnement solaire  $E_s$  et de la température de la cellule  $T_j$ , il est donné par la relation suivante [24]:

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] \quad (\text{III.2})$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{III.3})$$

Où :

$T_a$ : Température ambiante.

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

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j}} - 1 \right) \quad (III.4)$$

A : facteur d'idéalité.

Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température ; il est donné par l'expression suivante :

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{K \cdot T_j}} \quad (III.5)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_S \cdot I}{R_{sh}} \quad (III.6)$$

Car :

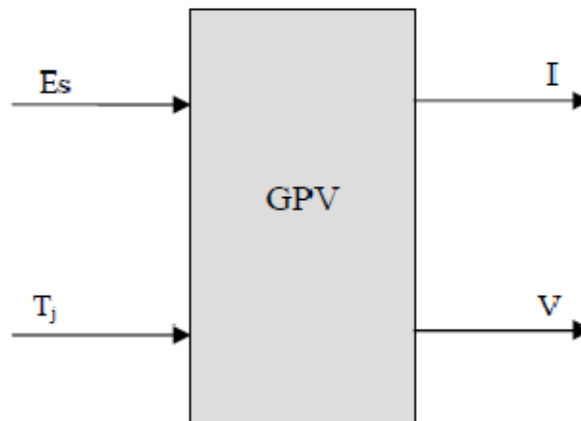
$$V_d = R_{sh} \cdot I_{sh} = V + R_S \cdot I \quad (III.7)$$

Le courant du module I est donné par :

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] - [I_{sat} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j}} - 1 \right)] - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{sh}} \quad (III.8)$$

Le schéma bloc du générateur photovoltaïque est présenté sur la **Figure(III.2)**, avec :

- Les deux variables d'entrées sont :
  - $E_s$  Ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m<sup>2</sup>)
  - $T_j$  Température de jonction des cellules (°C).
- Les deux variables de sortie sont :
  - I courant fourni par le GPV (A)
  - V tension aux bornes du GPV (V).



**Figure(III.2)** schéma bloc de générateur photovoltaïque

III.3. Modélisation des convertisseurs :

III.3.1. Modélisation d'un hacheur :

• Modèle mathématique équivalent :

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (S fermé, et S ouvert), ensuite donner son modèle approximé [25]

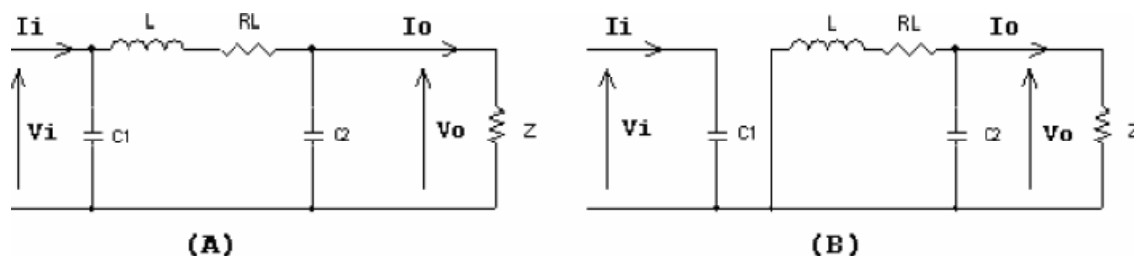


Figure (III -3) : Circuits équivalents du convertisseur Boost, (A) : S fermé, (B) : S ouvert [4].

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits précédents, on obtient les systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $\alpha T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_l - i_o \\ v_l = L \frac{di_l}{dt} = v_i - v_o - R_L i_l \end{cases} \quad (III.9)$$

Pour la deuxième période  $(1-\alpha)T_s$

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_l = L \frac{di_l}{dt} = v_i - R_L i_l \end{cases} \quad (III.10)$$

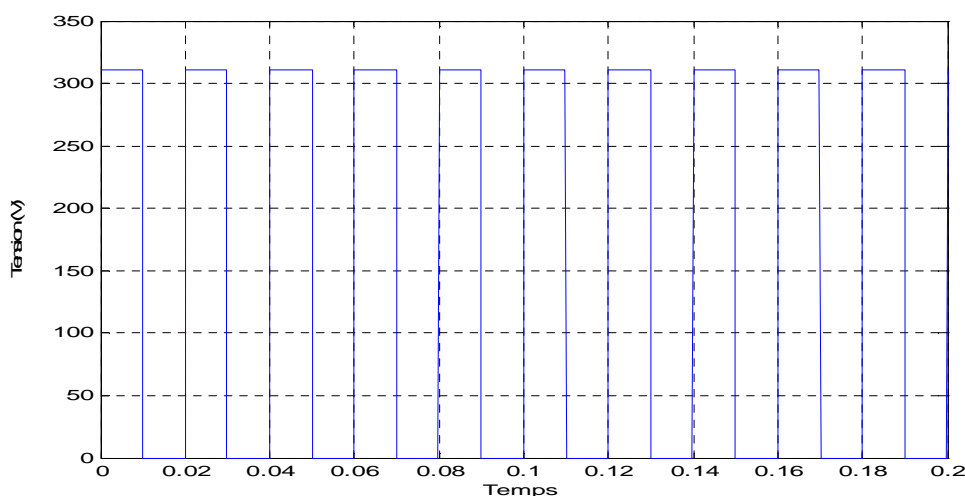


Figure (III -6) : La tension à la sortie du hacheur

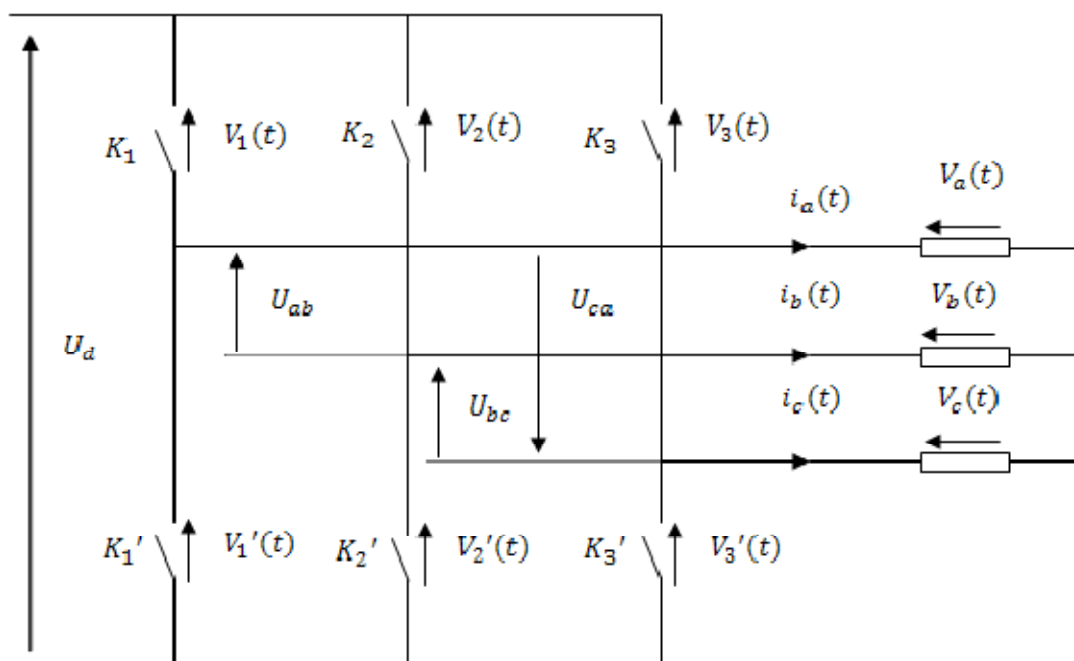
### III.3.2 Modélisation de l'onduleur :

- **Modèle de l'onduleur de tension :**

Pour simplifier l'étude, on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé .
- Les interrupteurs sont totalement commandables.
- Pour éviter le court-circuit d'un bras et éviter l'ouverture d'une phase d'une charge inductive ( $F_1 = 1 - F_1'$ ) [26].

En s'appuyant sur ces hypothèses, on aboutit au schéma simplifié de la **Figure (III -7)** :



**Figure (III -7) :** Modèle simplifié de l'onduleur triphasé.

$v_a(t), v_b(t), v_c(t)$  : les tensions simples délivrées par l'onduleur.

$U_{ab}(t), U_{bc}(t), U_{ca}(t)$  : les tension composée délivrées par l'onduleur.

Les équations des tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

D'autre part, on a les relations entre les tensions simples et les tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ v_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ v_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

L'hypothèse d'un système de tension équilibré implique :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{III.13})$$

Les interrupteurs  $K_j, \check{K}_j (j=1, 2, 3)$  sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

On associe à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion  $F_j (j = 1, 2, 3)$

Correspondant aux signaux de commande des interrupteurs.

$F_j (j = 1, 2, 3)$  est définie comme suit :

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_j \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } K_j \text{ ouvert} \end{cases} \quad (j=1,2,3) \quad (\text{III.14})$$

$$\text{si } \begin{cases} F_1 = 1 \Rightarrow V_1 = 0 \\ F_1 = 0 \Rightarrow V_1 = U_f \end{cases} \quad V_1 = -(F_1 - 1) U_f \quad (\text{III.15})$$

$$\text{si } \begin{cases} F_2 = 1 \Rightarrow V_2 = 0 \\ F_2 = 0 \Rightarrow V_2 = U_f \end{cases} \Rightarrow V_2 = -(F_2 - 1) U_f \quad (\text{III.16})$$

$$\text{si } \begin{cases} F_3 = 1 \Rightarrow V_3 = 0 \\ F_3 = 0 \Rightarrow V_3 = U_f \end{cases} \Rightarrow V_3 = -(F_3 - 1) U_f \quad (\text{III.17})$$

Exprimons les tensions composées en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_2 - V_1 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2)U_f \\ U_{bc} = V_3 - V_2 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3)U_f \\ U_{ca} = V_1 - V_3 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1)U_f \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Ce qui donne la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

L'expression (III.12) sous forme matricielle s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

En remplaçant (III.19) dans (III.20), on aura le système matriciel (II-21) comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

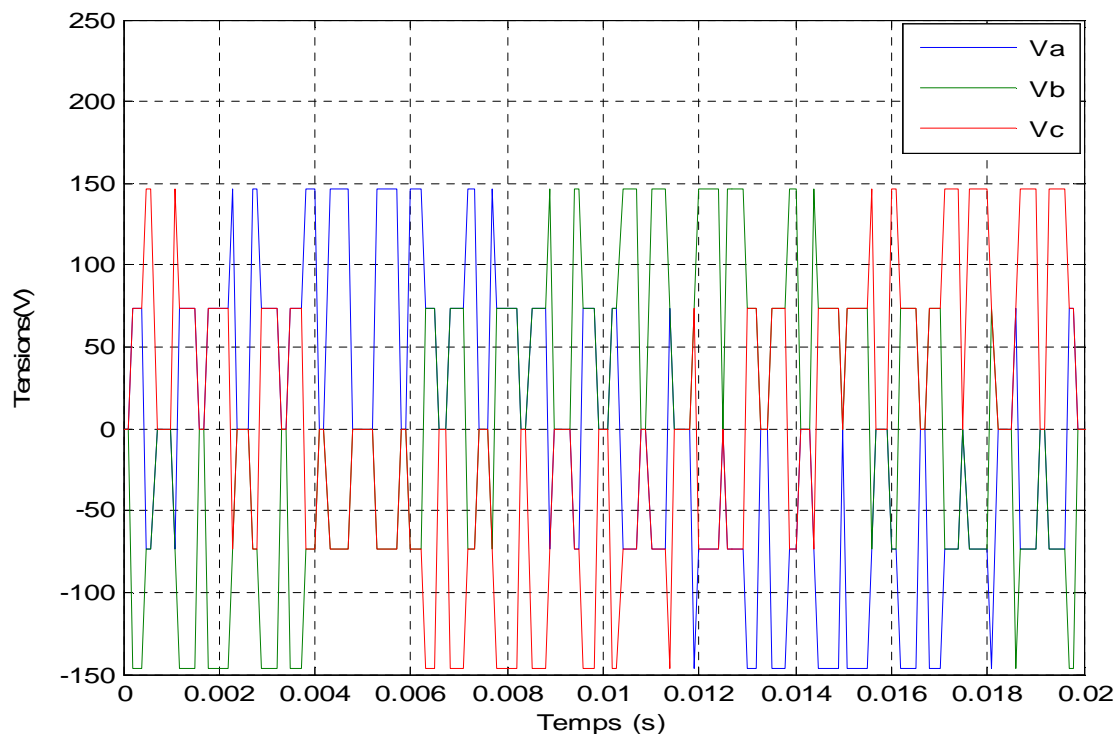


Figure (III -8) : La tension à la sortie de l'onduleur.

### III.4. Modélisation de la machine asynchrone :

#### III.4.1. Introduction :

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelque watt à plusieurs megawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone, c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînement à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

#### III.4.2. Hypothèses simplification :

- Le modèle de la machine asynchrone que nous adopterons repose sur les hypothèses suivantes :
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.

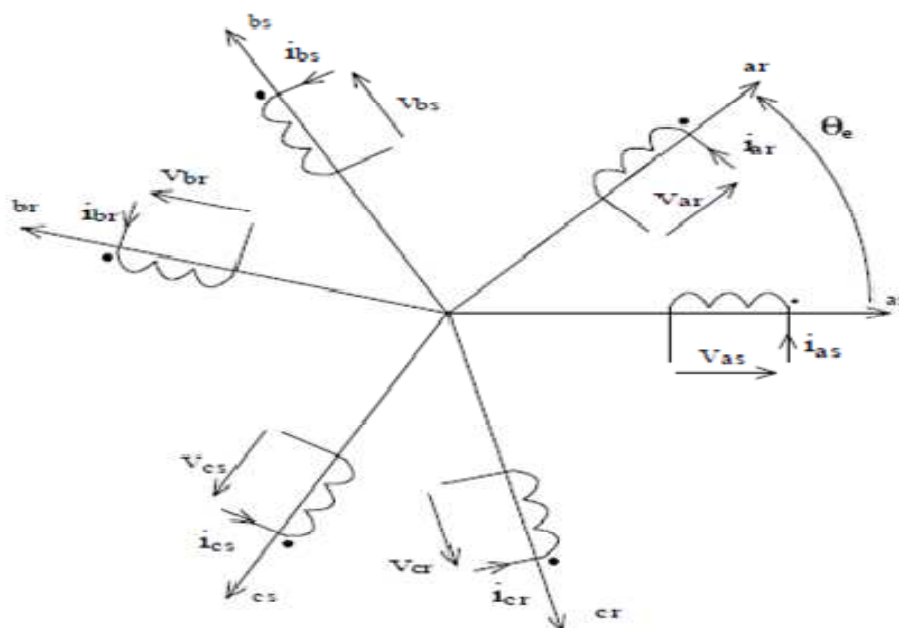
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).

- La force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor est à distribution spatiale (le long de l'entrefer) sinusoïdale (on ne considère que le premier harmonique), les inductances propres sont, par conséquent, constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques ; l'effet dû à la présence d'encoches est négligé [27].

### III.4.3. Convention de signe :

La machine asynchrone est majoritairement utilisée en moteur.

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Les f.e.m positif fait circuler un courant positif.
- Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.
- Le stator est considéré comme générateur et le rotor et comme récepteur [27].



**Figure (III -9) :** Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée

### III.4.4. Les équations électriques :

Les équations électriques sont données sous les formes matricielles suivantes :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{III.22})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{III.23})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

$[V_r], [V_s]$  le vecteur des tensions rotoriques et statoriques .

$[I_r], [I_s]$  Le vecteur des courants rotoriques et statoriques.

$[\varphi_s], [\varphi_r]$  Le vecteur des flux rotorique et statoriques.

$R_r, R_s$  la résistance rotoriques et statoriques.

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

### III.4.5. Equations magnétiques :

Des hypothèses présidentes on obtient les relations entre les flux et les courants :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{III.27})$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{III.28})$$

On appliquant la transformation de LAPLACE et on remplaçant (III.27) et (III.28) dans (III.22)

et (III.23) on obtient :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + P([L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r]) \quad (\text{III.29})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + P([L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s]) \quad (\text{III.30})$$

P: Opérateur de LAPLACE.

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{sa} & M_{sa} \\ M_{sa} & L_{sa} & M_{sa} \\ M_{sa} & M_{sa} & L_{sa} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

$L_s$ : Inductance propre d'une phase de l'enroulement statorique.

$M_{sa}$ : Inductance mutuelle entre deux phases de l'enroulement statorique.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ra} & M_{ra} & M_{ra} \\ M_{ra} & L_{ra} & M_{ra} \\ M_{ra} & M_{ra} & L_{ra} \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

$L_r$ : Inductance propre d'une phase de l'enroulement rotorique.

$M_{ar}$ : Inductance mutuelle maximale entre deux phases de l'enroulement rotorique.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$[M_s]$ ,  $[M_r]$ : Inductance mutuelle maximale entre deux phases statorique et rotorique.

$[M_{sr}]$ ,  $[M_{rs}]$ : Matrice des inductances mutuelle.

$\theta$ : est l'écart angulaire entre deux phases, statorique et rotoriques correspondantes :  $\theta = \omega t$ .

#### III.4.6. Equations mécaniques :

Le fonctionnement d'une charge mécanique en rotation est régi par l'équation fondamentale suivante :

$$C_{em} = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega + C_r \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$\omega$ : Pulsation électrique du rotor.

$C_r$ : Couple résistant

$J$ : l'inertie totale du rotor.

$F$ : coefficient du frottement.

Le couple électromagnétique est la dérivée partielle de la coénergie magnétique par rapport à la position. Sachant que les inductances propres sont de dérivées nulles, il ne reste que le terme relatif aux dérivées des inductances mutuelles. Son expression est donnée par :

$$c_{em} = \frac{1}{2} P [i_{sabc}] [i_{sabc}]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{III.35})$$

#### III.4.7. Modèle de Park :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tension et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q.

L'angle  $\theta_s$  intervient pour les grandeurs du stator et l'angle  $\theta_r$  pour les grandeurs du rotor

La matrice de Park transforme un système de grandeurs triphasées équilibrées en un système de grandeurs diphasées équivalentes d'axe (d, q).

Les composantes relatives et réelles sont liées par l'équation :

$$[X_{dq0}] = [P_\theta] [X_{abc}] \quad (\text{III.36})$$

Ou ; d, q, 0 sont respectivement des composantes directe, quadratique et homopolaire.

La matrice de Park est donnee par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

Ou  $\theta$  est l'angle de transformation, il dépend du choix du référentiel ainsi que des grandeurs statorique et rotorique.

La matrice inverse de Park est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

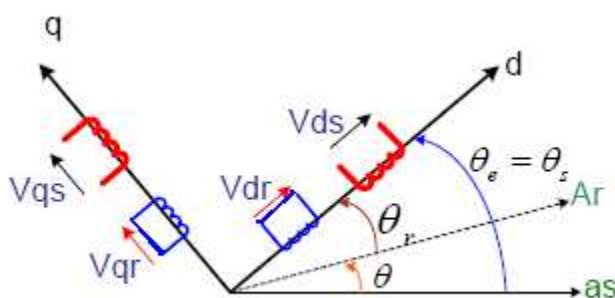
Le changement de variable relative aux courant, tensions et flux est donnée par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} ; \text{ Alors ; } \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

X : représente soit le courant, la tension ou le flux.

### III.4.8. Equations de la machine asynchrone triphasée dans les axes d et q :

La représentation de la machine dans les axes d et q est donnée par la **Figure(III.10)** :



**Figure(III.10)** Modèle biphasé de Park de la machine asynchrone.

### III.4.9. Les équations électriques :

En appliquant la transformée de Park aux équations électriques (III.29) et (III.30) citées précédemment on aura :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right) \phi_{ds} \quad (\text{III.40})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)\phi_{qs} \quad (\text{III.41})$$

$$V_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \left(\frac{d\theta_r}{dt}\right)\phi_{dr} \quad (\text{III.42})$$

$$V_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \left(\frac{d\theta_r}{dt}\right)\phi_{qr} \quad (\text{III.43})$$

#### III.4.10. Equation magnétique

En appliquant la transformation de Park aux équations donnant le flux. On obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-44})$$

Le système matriciel peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \phi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases}$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$ : Inductance propre cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$ : Inductance propre cyclique du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$ : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

#### III.4.11. Equation mécanique et couple électromagnétique :

L'équation mécanique reste inchangée dans le repère (d,q). Par contre, le couple électromagnétique est concerné par la transformation. En dérivant les inductances mutuelles et en appliquant la transformée de Park pour l'expression (III.35), on aura l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{III.45})$$

#### III.4.12. Choix du référentiel :

Le référentiel est un système associé à la vitesse de rotation choisie selon ses variations. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique, le choix se fait en fonction du problème étudié.

#### III.4.13. Référentiel immobile lié au stator :

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt}=0, \frac{d\theta_r}{dt}=-\omega_r \quad (\text{III.46})$$

D'où les équations électromagnétiques :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.47})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

Ce référentiel est choisi de préférence en vue d'étudier des variations importantes de la vitesse de rotation associée ou non avec de la fréquence d'alimentation.

#### III.4.14. Référentiel immobile lié au rotor :

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt}=\omega_r, \frac{d\theta_r}{dt}=0 \quad (\text{III.49})$$

D'où les équations électromagnétiques :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.50})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.51})$$

Ce référentiel est choisi de préférence dans les problèmes de régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

Le choix se fait en fonction du problème à étudier. Notre étude se base sur le référentiel lié au champ tournant

#### III.4.15. Référentiel immobile par rapport au champ tournant :

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt}=\omega_s, \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{III.52})$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = p\Omega \quad (\text{III.53})$$

D'où les équations électromagnétiques :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.54})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.55})$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formule des équations électriques ce référentiel est utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrone à fréquence variable.

#### III.4.16. L'équation de la puissance mécanique et du couple mécanique :

$$P_m = (\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\left(\frac{d\theta_s}{dt}\right) + (\varphi_{dr}i_{qr} - \varphi_{qr}i_{dr})\left(\frac{d\theta_r}{dt}\right) \quad (\text{III.56})$$

$$P_m = (\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} \quad (\text{III.57})$$

$$P_m = c_e \Omega = c_e \frac{\omega}{p} \quad (\text{III.58})$$

On tire l'expression scalaire du couple :

$$c_e = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{III.59})$$

Dans le système d'axe d,q on définit les vecteurs flux statorique  $\vec{\varphi}_{ds}$  et courant statorique  $\vec{I}_s$  de composantes :

$$\vec{\varphi}_s \left( \varphi_{ds}\sqrt{\frac{2}{3}}, \varphi_{sq}\sqrt{\frac{2}{3}} \right), \vec{I}_s \left( i_{sd}\sqrt{\frac{2}{3}}, i_{sq}\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \quad (\text{III.60})$$

Donc le couple électromagnétique  $\vec{c}_e$  égale a un produit vectoriel :

$$\vec{c}_e = \frac{3}{2}p(\vec{\varphi}_s \wedge \vec{I}_s) \quad (\text{III.61})$$

Différentes manipulation de l'équation fondamentale  $c_e$ , procédant d'un choix d'élimination de certains variables des équations des flux VDR, peuvent conduit a d'autres expression du couple [30].pour notre simulation on choisi l'expression suivante :

$$c_e = p \left( \frac{M}{L_r} \right) (\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \rightarrow c_e = \frac{3}{2}p \left( \frac{M}{L_r} \right) [\vec{\varphi}_s \wedge \vec{I}_s] \quad (\text{III.62})$$

#### III .4.17. simulation :

Simulation les résultats de la simulation sont donnée par les **figures(III.11)** suivantes :

Figure I

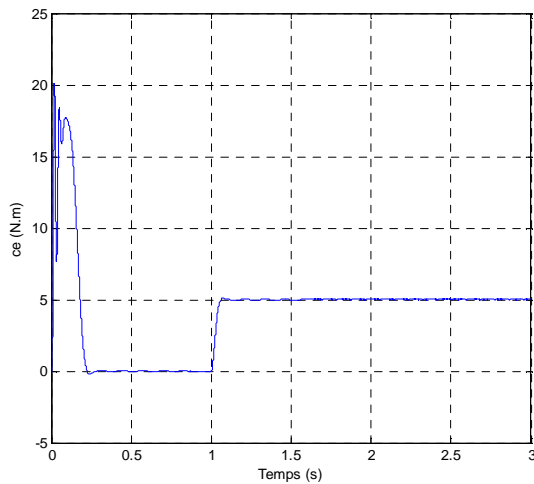


Figure II

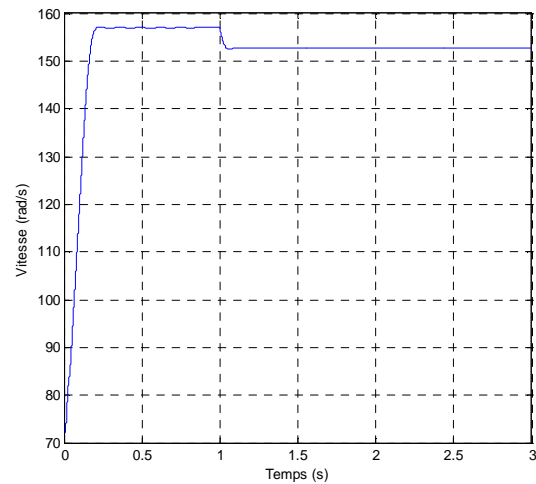


Figure III

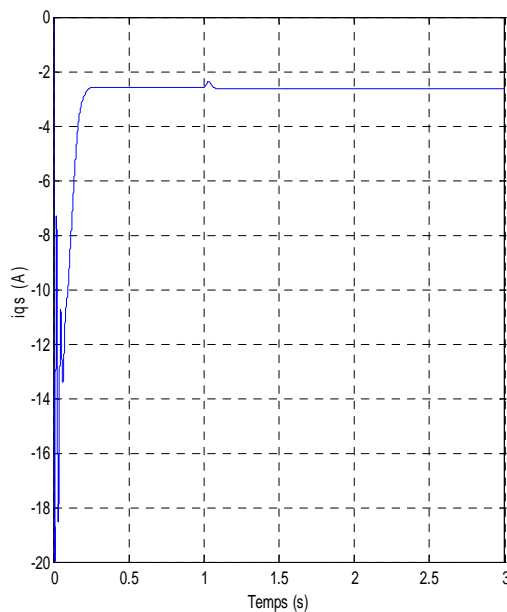
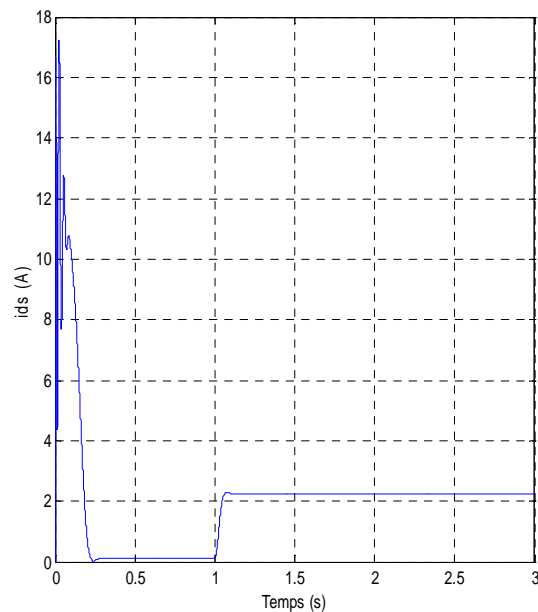


Figure IV



### III .4.18. Interprétations

La **figure I** et **II** représentent la variation de la vitesse de rotation et le couple électromagnétique

En observant ces courbes, on constate que la vitesse de rotation et le couple électromagnétique passent par trois phases:

-phase transitoire (démarrage) : durant laquelle le couple atteint une valeur maximale et la vitesse augmente rapidement.

-régime permanent : l'équation du mouvement en régime permanent va devenir

$W_r = (C_{em} - C_r)/f$  avec  $C_r = 0$  cela représente le fonctionnement à vide d'où le moteur tourne presque à la vitesse de synchronisme, donc la vitesse et le couple se stabilise et reste constantes.

-application de couple résistant : en applique le couple résistant a  $t=1s$  on observe que le couple électromagnétique tend à augmenter afin de compenser le couple résistant par contre la vitesse de rotation diminue et son équation va devenir  $W_r = (C_{em} - C_r)/f$ .

### III.5. Commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone :

La principale difficulté qu'on rencontre dans la commande de la machine asynchrone réside dans l'absence totale du découplage entre le flux et le couple. Ces deux grandeurs dépendent toutes du courant statorique. Pour ce faire, ce découplage entre le couple et le flux, la commande classique sert à contrôler : le couple par le glissement et le flux par le rapport tension/fréquence  $\frac{U}{f}$  (constant). Mais, et à cause du manque d'information sur le rapport  $\frac{U}{f}$ , ce type de commande a montré ses limites en matière de qualité de ses performances. En ce temps, le principe de découplage n'a pas été encore développé, l'apparition d'une nouvelle technique dite 'commande vectorielle' ou 'commande par flux orienté' a rendu la commande de la machine à courant continu [19].

#### III.5.1. Orientation du flux rotorique :

Plusieurs stratégies sont envisageables. On va décrire ici une commande à flux rotorique orienté [28].

Reprenons l'expression du couple électromagnétique faisant intervenir les flux rotorique

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{III.64})$$

Avoir comme objectif d'orienter le flux signifie qu'on souhaite qu'il n'ait qu'une Composante sur l'axe d par exemple.

On aura donc comme objectif d'annuler  $\varphi_{qr}$ . C'est bien sûr le rôle de la commande à concevoir.

Le couple se réduira alors à :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{III.65})$$

La stratégie consistera donc à contrôler de façon indépendante le terme de flux et le terme de Courant pour imposer un couple.

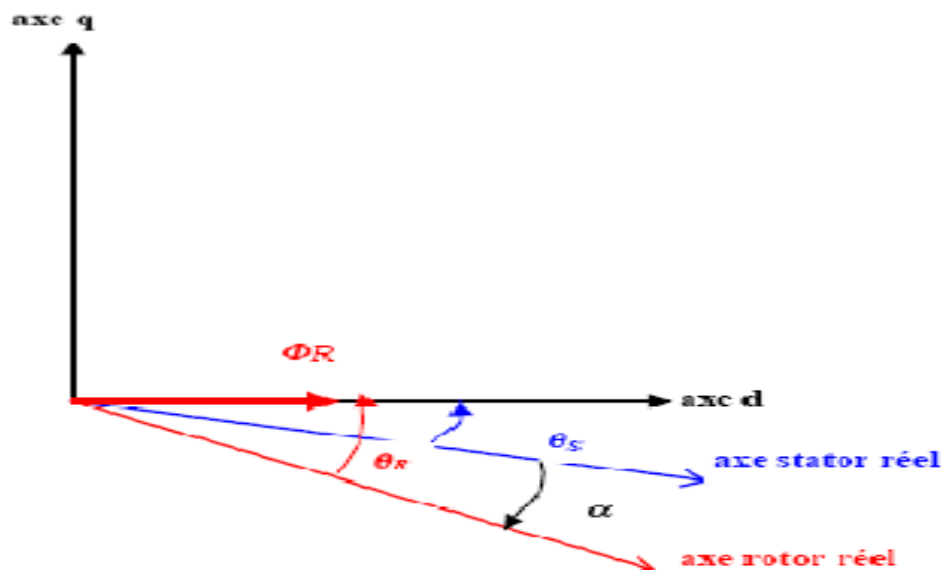


Figure (III -12) : Orientation du flux rotorique sur l'axe 'd' [28].

Cela suppose donc de maîtriser également l'angle  $\theta_s$ . L'angle  $\alpha$  sera lui, donné par un capteur de position (codeur incrémental).

### III.5.2. Rappelons les équations utilisables pour la commande :

#### a. Orientation du flux rotorique :

$$\varphi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{III.66})$$

$$0 = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{III.67})$$

#### b. Loi des mailles au rotor :

$$0 = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (\text{III.68})$$

$$0 = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \quad (\text{III.69})$$

$$\text{Car : } \varphi_{qr} = 0$$

### III.5.3. Estimation de $\varphi_{dr}$ :

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles, ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques.

A partir de :

$$\varphi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{III.70})$$

et 
$$0 = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - L_r \cdot i_{dr} \quad (\text{III.71})$$

On obtient :

$$\varphi_{dr} = M \cdot i_{ds} - \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (\text{III.72})$$

Soit 
$$\varphi_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = M \cdot i_{ds} \quad (\text{III.73})$$

L'équation (III.69) peut être réécrite en utilisant la notation de Laplace :  $\varepsilon = \frac{d}{dt}$

$$\varphi_{dr} \left( 1 + \frac{L_r}{R_r} \varepsilon \right) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{III.74})$$

Ou encore en posant :

$$\frac{L_r}{R_r} = \tau_r, \varphi_{dr} (1 + \tau_r \varepsilon) = M \cdot i_{ds} \quad (\text{III.75})$$

$$\varphi_{dr-est} = \frac{M}{(1 + \tau_r \varepsilon)} i_{ds} \quad (\text{III.76})$$

Le flux  $\varphi_{dr}$  peut être estimé  $\varphi_{dr-est}$  à partir du courant  $i_{ds}$  grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques sous réserve de la réalisation de la transformation de Park.

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (\text{III.77})$$

#### III.5.4. Estimation de $\omega_s$ et de $\theta_s$ :

L'estimation du flux sera réalisable sous réserve que l'on puisse faire la transformation de Park, ce qui suppose la connaissance de l'angle  $\theta_s$ .

A partir de :  $0 = \omega_r \cdot \varphi_{dr} + R_r \cdot i_{qr}$  (III.78)

et

$$0 = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{III.79})$$

on tire :  $\omega_r = - \frac{R_r \cdot i_{qr}}{\varphi_{dr}}$  (III.80)

$$\omega_{r-est} = \frac{M}{\varphi_{dr-est}} \frac{R_r}{L_r} i_{qs}, \theta_{r-est} = \int \frac{M}{\varphi_{dr-est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{qs} dt + \theta_{r0} \text{ et } \theta_{r-est} = \theta_{r-est} + \alpha \quad (\text{III.81})$$

$\theta_s$  sera donc estimé  $\theta_{r-est}$  à partir de la mesure de  $\alpha$  (codeur incrémental), et du courant  $i_{qs}$  grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques.

#### III.5.5. Loi des mailles pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ :

##### a. loi des mailles pour $V_{ds}$ :

Reprenons la loi des mailles statoriques :

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{III.82})$$

Nous allons exprimer cette tension en fonction des deux grandeurs utiles à la maîtrise du Couple :

$$\varphi_{dr} \cdot i_{ds} = \frac{(1 + \tau_r \cdot s)}{M} \quad (\text{III.83})$$

et

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (\text{III.84})$$

$$\text{A partir de } \varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (\text{III.85})$$

$$\text{On tire } i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - M \cdot i_{ds}) \quad (\text{III.86})$$

Soit :

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} - M \cdot i_{ds}) = \left( L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \quad (\text{III.87})$$

$$\varphi_{ds} = L_s \left( 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \right) i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \quad (\text{III.88})$$

$$\varphi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \quad (\text{III.89})$$

Où :  $\sigma$  est le coefficient de dispersion de BLONDEL.

De la même façon, il faut exprimer  $\varphi_{qr}$  :

De la même manière du flux ce qui donne :

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qs} \quad (\text{III.90})$$

$$\varphi_{qs} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} = 0 \quad (\text{III.91})$$

Avec l'orientation du flux ce qui donne :

$$i_{qs} = -\frac{M}{L_r} i_{qs} \quad (\text{III.92})$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} - \frac{M^2}{L_r} \cdot i_{qs} = \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.93})$$

Il est donc possible maintenant d'écrire :

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \left( \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \right) - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{III.94})$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot i_{ds} \cdot \varepsilon + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \cdot \varepsilon - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.95})$$

$$V_{ds} = (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot \varepsilon) \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \cdot \varepsilon - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{qs} =$$

$$(R_s + \sigma \cdot L_s \cdot \varepsilon) \frac{(1+\tau_r s)}{M} \varphi_{dr} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \cdot s - \omega_s \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.96})$$

$$V_{ds} = \left[ (R_s + \sigma \cdot L_s \cdot \varepsilon) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \varphi_{dr} - \omega_s \sigma L_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.97})$$

Cette relation exprime la loi des mailles interne à la machine sur l'axe d en fonction des deux grandeurs que nous avons choisi pour exprimer le couple. On y remarque le couplage entre l'axe d et l'axe q.

**b. loi des mailles pour  $V_{qs}$  :**

Reprenons la loi des mailles statoriques :

$$V_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.98})$$

que l'on peut exprimer comme suit compte tenu des expressions du paragraphe précédent :

$$V_{qs} = \frac{d}{dt}(\sigma L_s \cdot i_{qs}) + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.99})$$

Avec :

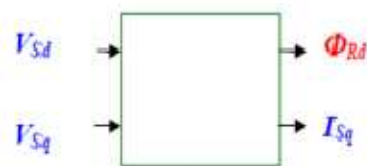
$$\varphi_{ds} = \sigma L_s \cdot i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} = \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr} \quad (\text{III.100})$$

$$\varphi_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) \cdot i_{qs} + \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr} \quad (\text{III.101})$$

Cette relation exprime la loi des mailles sur l'axe q en fonction des deux grandeurs que nous avons choisi pour exprimer le couple. On y remarque le couplage entre l'axe d et l'axe q.

### III.5.6. Représentation des lois de mailles :

La machine reçoit une alimentation en tension ( $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ ) et donne à la sortie les grandeurs  $\varphi_{dr}$  et  $i_{sq}$  choisies pour la régulation du couple.



**Figure(III.13)** Schéma de la machine asynchrone dans la base de Park[28]

En réécrivant les lois des mailles pour  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ , on peut établir un schéma fonctionnel interne à la machine.

Pour  $V_{ds}$  on a :

$$V_{ds} = \left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right] \varphi_{dr} - \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs} \quad (\text{III.102})$$

Ce que donne :

$$\varphi_{dr} = \frac{V_{ds} + \omega_s \sigma L_s \cdot i_{qs}}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} = \frac{1}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} (V_{ds} + \sigma L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs}) \quad (\text{III.103})$$

$$\varphi_{dr} = A \cdot (V_{ds} + B \cdot i_{qs}) \quad (\text{III.104})$$

$$A = \frac{1}{\left[ (R_s + \sigma L_s \cdot s) \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot s \right]} \quad (\text{III.105})$$

$$B = \sigma L_s \cdot \omega_s \quad (\text{III.106})$$

Pour  $V_{ds}$  on a :

$$V_{qs} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) i_{qs} + \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr} \quad (III.107)$$

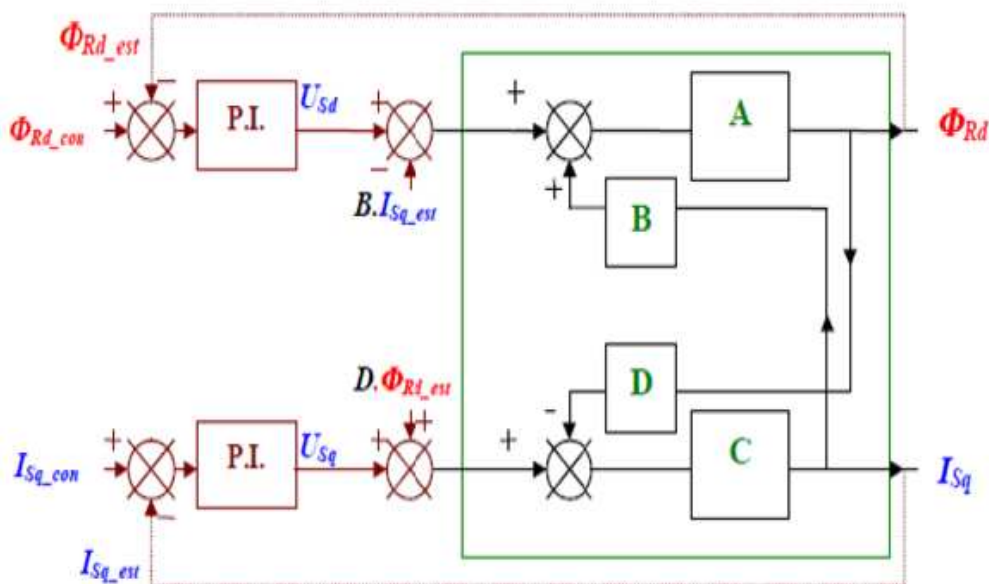
Ce qui donne :

$$i_{qs} = \frac{V_{qs} - \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr}}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} [V_{qs} - \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \varphi_{dr}] \quad (III.08)$$

$$C = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} \quad (III.109)$$

$$D = \omega_s \left( \sigma L_s \frac{(1+\tau_r s)}{M} + \frac{M}{L_r} \right) \quad (III.110)$$

### III.5.7. Elaboration des lois de commande pour $V_{ds}$ et $V_{qs}$ :



**Figure (III -14) :** Schéma de commande des grandeurs de réglage du couple [28].

Les mesures de  $\varphi_{dr}$  et  $i_{ds}$  (appelées  $\varphi_{dr-est}$  et  $i_{ds-est}$ ) sont comparées aux consignes un correcteur PI (Proportionnel et Intégral) sur chaque entrée permet la correction de l'erreur.

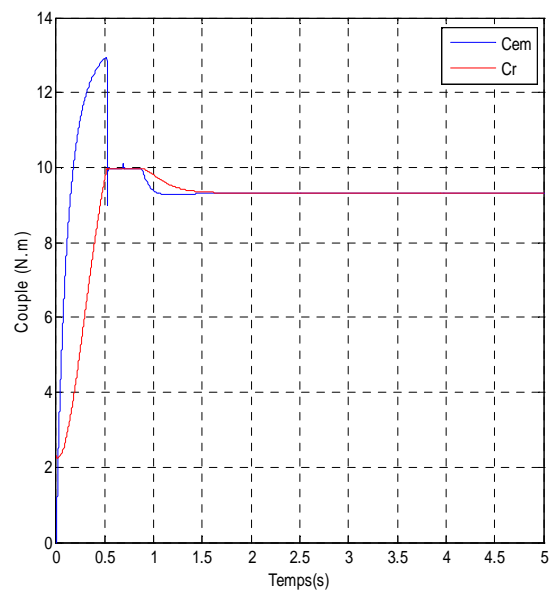
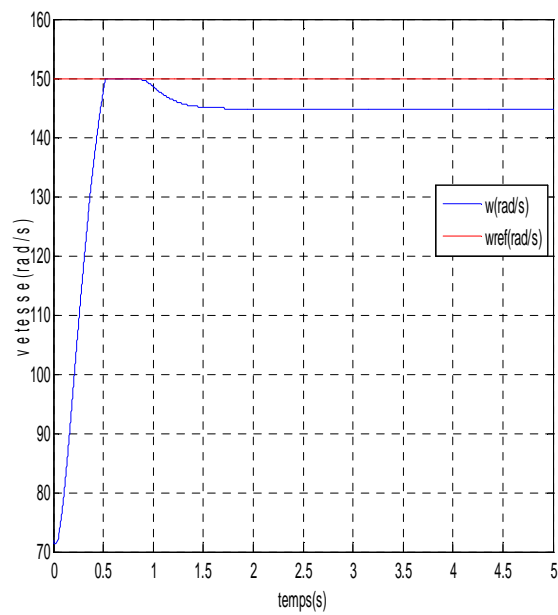
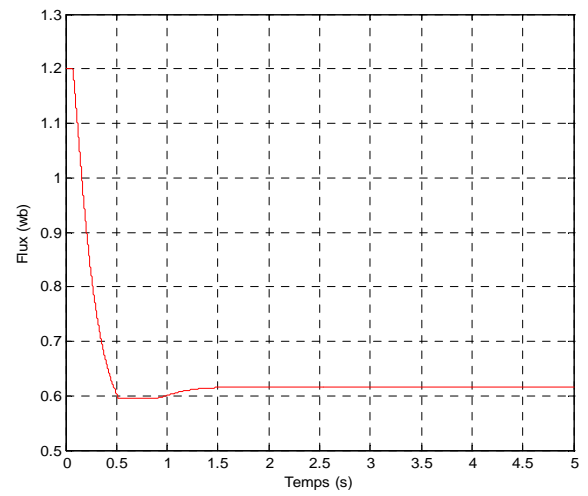
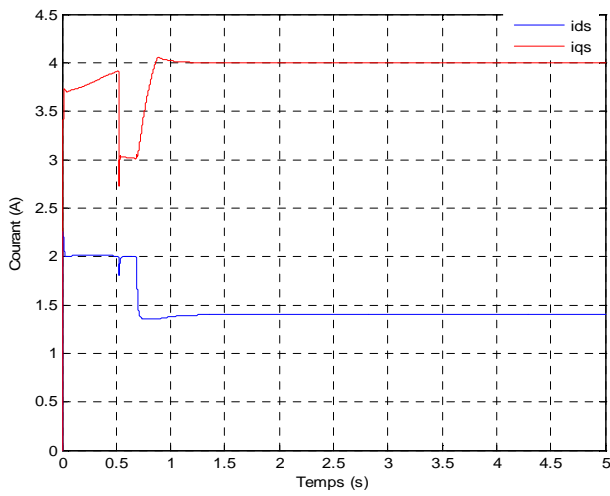
On aura donc :

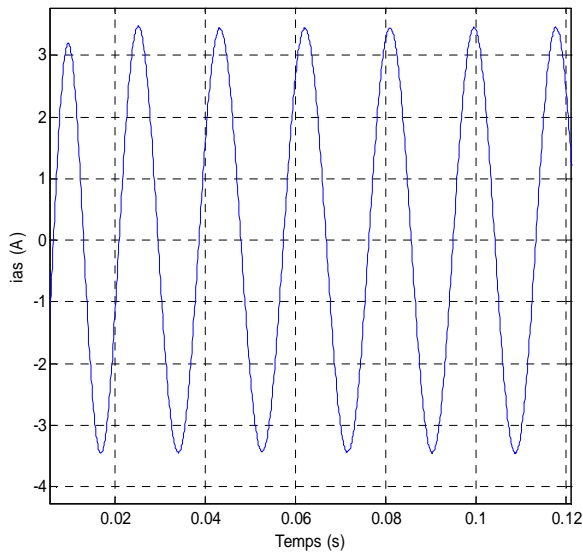
$$\varphi_{dr} = A. (U_{qs} - B. \varphi_{dr-est} + B. i_{qs}) = C. U_{ds} \quad (III.111)$$

$$i_{qs} = C. (U_{qs} + B. \varphi_{dr-est} - B. i_{qs}) = C. U_{ds} \quad (III.112)$$

III.5.8. Simulation :

Les résultats de simulation de la commande vectorielle sont représentés sur les figures(III .15) suivantes

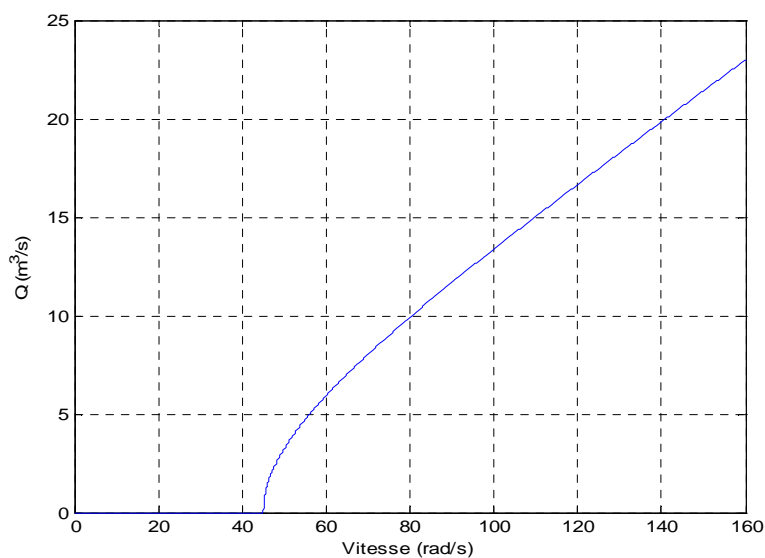




### III.6. Modélisation de la pompe centrifuge :

#### III.6.1. Caractéristique débit-vitesse :

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une  $H_m$  donnée pour obtenir un débit [29].



**Figure (III -16) :** La caractéristique débit- vitesse d'une pompe centrifuge

#### III.6.2. Caractéristique couple-vitesse :

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur De refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur Devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une  $H_m$  donnée pour obtenir un débit de départ non nul [18].

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = K_r W^2 + C_s \quad (\text{III.136})$$

Avec :

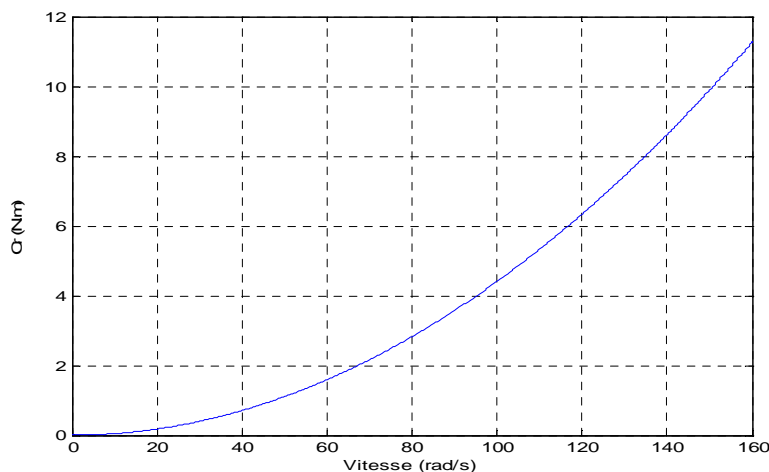
$K_r$  : Coefficient de proportionnalité [ $(N_m / \text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ ]

$C_s$  : Couple statique, très petit [ $N_m$ ].

$W$  : vitesse de rotation [rd/s]

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{méc} = K_p W^3 \quad (\text{III.138})$$



**Figure (III -17) :** Caractéristique couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

### III.6.3. Caractéristique débit-hauteur :

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

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client la courbe  $Q(H_m)$  correspondante aux diamètres, maximal et minimal possibles de la roue si la charge du moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale  $H_m$  en fonction du débit  $Q$ . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de « PELEIDER-PETERMAN »

$$H_m = C_1 W^2 - C_2 W Q - C_3 Q^2 \quad (\text{III.138})$$

Avec :

$H_m$  : La hauteur manométrique[m].

$C_1, C_2$  et  $C_3$  : Des constantes propres de la pompe données par le constructeur.

$Q$  : le débit [ $m^3/s$ ].

- Lorsque la quantité d'eau est nulle, cela se manifeste par le phénomène de ' barbotage' qui se traduit par la hauteur de barbotage  $H_m$ , et l'équation précédente devient comme suit :

$$H_m = C_1 W^2 \quad (\text{III.139})$$

Alors la caractéristique Q-H peut être tracé et la caractéristique résistante Q-H de la canalisation est ensuite déterminée, cette dernière se met sous la forme suivante :

$$H_m = H_g + \Delta H \quad (\text{III.140})$$

Avec :

$H_g$ : Hauteur géométrique, égale à la différence des hauteurs entre les niveaux libres du liquide côté d'aspiration et côté de refoulement.

$\Delta H$  : désigne la somme de toutes les pertes de charges dues au frottement du fluide contre les parois et divers changements de sections.

$$\Delta H = k_h Q^2 \quad (\text{III.141})$$

$k_h$  : Constante donnée de la pompe.

La courbe  $Q(H_m)$  comme indiquée sur la figure ? est une parabole. Le point de rencontre de la courbe  $Q(H_m)$  avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul, on l'appelle Point à vanne fermée ou encore point de barbotage [30].

Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes, de la pompe et de la canalisation.

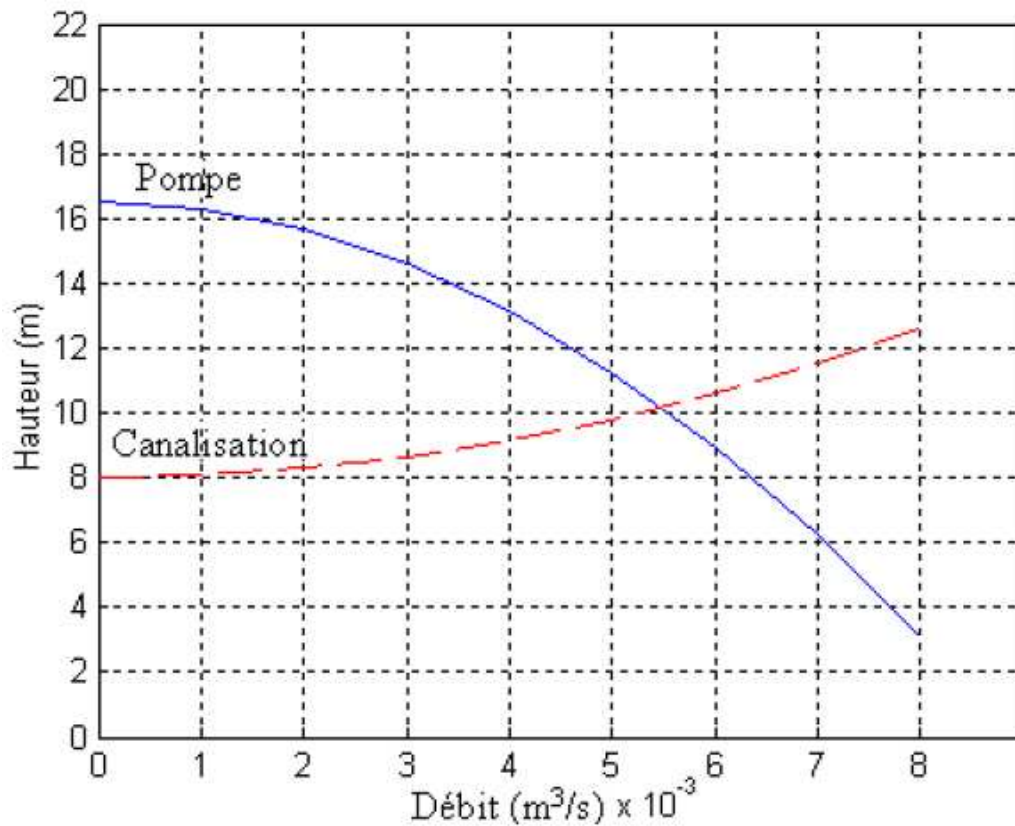


Figure (III -18) : Caractéristiques de la pompe  $H_m(Q)$  et de la canalisation [30]

#### III.6.4. Caractéristique de la puissance :

Une pompe est une machine qui forme de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre, l'expression générale de la puissance hydraulique en watt est donné comme suit [31].

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m \quad (\text{III.142})$$

$\rho$  : la masse volumique de l'eau étant de  $1000 \text{Kg/m}^3$ .

$g$  : Accélération de la pesanteur  $g=9.81 \text{m/s}^2$ .

$Q$  : Débit d'eau [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

$H_m$ :Hauteur manométrique[m].

L'autre expression à considérer est celle de la puissance en watt absorber par une pompe, c'est-à-dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique qui est exprimé par :

$$P_a = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m / \eta_p \quad (\text{III.143})$$

$\eta_p$ :Le rendement de la pompe.

**III.6.5. Rendement :**

Comme toute machine entraînée, une pompe consomme une puissance supérieure à celle qu'elle le rendement d'une telle machine est le rapport de la puissance hydraulique acquise à celle disponible sur l'arbre [32] :

$$\eta_p = P_{hydraulique} / P_{arbre} \quad (\text{III.144})$$

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%.

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va dimensionner un système de pompage photovoltaïque, avec un degré de précision acceptable. Les facteurs les plus importants de cette approche devront être estimés soigneusement afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant.

### IV.2. Evaluation des besoins en eau :

L'utilisation des pompes à motricité humaine, dites pompes à main est largement diffusée pour équiper les forages et les puits, permettant de disposer d'un point d'eau propre au niveau du village.

Des modèles de pompes à main plus résistantes ont été développés pour mieux répondre aux contraintes rencontrées sur le terrain, ou elles sont souvent soumises à une utilisation intensive.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail par jour [33].

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalière et l'autonomie requise du système.

### IV.3. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

Une fois définies les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière nécessaire à partir de la relation :

$$E_h = g \rho_a V_a h / 3600 \quad (\text{IV.1})$$

Où

$E_h$ : Énergie hydraulique ( $W_h/\text{jour}$ ).

$h$ : hauteur totale(m).

$V_a$  : Volume d'eau ( $m^3/\text{jour}$ ).

$\rho_a$ : Densité de l'eau ( $1000 \text{ Kg}/m^3$ ).

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m}/s^2$ ).

Durant le processus de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits tend à baisser, jusqu'à ce que la vitesse avec laquelle la régénération du puits arrive à équilibrer la quantité pour que l'on puisse pomper l'eau de nouveau. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits dépend d'un certain nombre de facteurs, comme le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère. La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad (\text{IV.2})$$

Dans le cas de puits qui présente des variations importantes du niveau d'eau en fonction du Débit, on peut ajouter un terme correctif et cette équation devient :

$$h = h_s + h_d + \left(\frac{h_d + h_s}{Q_p}\right)Q_A \quad (\text{IV. 3})$$

Où

$h_s$ : Niveau statique (m).

$h_d$  : Niveau dynamique (m).

$Q_A$ : Débit apparent ( $m^3/h$ ).

$Q_p$ : Débit d'essai ( $m^3/h$ ).

La hauteur statique  $h_s$  est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au Point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

La hauteur dynamique  $h_d$  représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach [34] permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$h_d = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{IV.4})$$

Où

$f$ : Coefficient de friction des parois de la tuyauterie.

$V$ : vitesse moyenne du fluide ( $m/s^2$ ).

$L$  : Longueur de la tuyauterie (m).

$D$ : Diamètre de la tuyauterie (m).

$g$ : Accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).

Dans le cas où le système de tuyauterie aurait un autre type d'accessoires (vannes, coudes, Tés, jonctions, ...), nous pouvons calculer les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

$$h_d = K_{ac} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{IV.5})$$

Où

$K_{ac}$ : est un coefficient dépendant du type d'accessoire.

Une autre méthode pour tenir compte des accessoires du circuit est d'ajouter à la longueur Réelle de la tuyauterie (seulement pour effet de calcul) des longueurs de tubes de même diamètre que le conducteur en étude, capables de causer les mêmes pertes de charge occasionnées par les pièces qu'elles substituent. De cette façon, n'importe quel accessoire peut être substitué par une longueur fictive [34]. En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

#### IV.4. Détermination de l'énergie solaire disponible :

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes Journalières de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

**IV.5. Inclinaison du générateur photovoltaïque :**

L'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

**IV.6. Mois de dimensionnement :**

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison  $\beta$ , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire  $E_m(\beta)$  et l'énergie hydraulique nécessaire  $E_h$  correspondantes à ce mois serviront pour le choix composants du système.

**IV.7. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :****IV.7.1. Estimation de nombre de module en série :**

Le nombre de module en série est :

$$N_s = \frac{U}{U_n} \quad (\text{IV.6})$$

$U$  : Tension d'installation en V.

$U_n$  : Tension nominale d'un module en V

**IV.7.2. Estimation du nombre de branche en parallèle :**

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{IV.7})$$

$N_p$  : Nombre de module en parallèle.

$N$  : Nombre de module.

**IV.7.3. Calcul de la surface totale du générateur :**

La surface totale occupée par le champ sur le sol ou toit est :

$$S = N * S_m \quad (\text{IV.8})$$

$S_m$  : C'est la surface d'un module en  $m^2$ .

$N$  : Nombre de module.

**IV.7.4. Estimation de la puissance :**

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage  $E_s = 1000 \text{ w/m}^2$  et température de cellule  $T_{jref} = 25^\circ\text{C}$ )

$$P_p = \eta_g A E_g \quad (\text{IV.9})$$

Ou

$P_p$  : Puissance de sortie sous CSM (W).

$\eta_g$  : Rendement du générateur à la température de référence ( $25^\circ\text{C}$ ).

$A$  : surface active du générateur ( $m^2$ ).

$E_g$  : Éclairement dans les CSM ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

L'énergie électrique journalière  $E_l$  est donnée par :

$$E_l = \eta_{pv} A E_m(\beta) \quad (\text{IV.10})$$

Ou  $\eta_{pv}$  : Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$E_m(\beta)$  : Irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison  $\beta$  ( $\text{KWh} / m^2 / \text{jour}$ ).

Le rendement  $\eta_{pv}$  peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{pv} = F_m [1 - Y(T_j - T_{jref})] \eta_g \quad (IV.11)$$

Où

$F_m$ : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

$\gamma$ : coefficient de température des cellules.  $\gamma$  prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 / °C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

$T_j$ : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement

L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (IV.12)$$

Où

$E_h$ : Énergie hydraulique moyenne mensuelle (KWh).

$\eta_{MB}$  : Rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations (IV -10), (IV-11) et (IV-12) dans (III-9), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_p = \frac{E_s}{F_m [1 - Y(T_j - T_{jref})] E_m(\beta) \eta_{MB}} \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (IV.13)$$

#### IV.8. Dimensionnement du moteur :

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

#### IV.9. Dimensionnement de la pompe :

Le débit crête  $Q$  ( $m^3/h$ ) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6 P_h}{gh} \quad (IV.14)$$

Où

$P_h$  : Puissance hydraulique nécessaire (W).

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 m/s^2$ )

$h$ : hauteur manométrique totale (m).

La puissance hydraulique crête  $P_h$  nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque ( $P_l$ ) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (IV.15)$$

Où

$\eta_{MB}$ : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.

#### IV.10. Dimensionnement des tuyauteries :

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie.

En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique  $h_d$  pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre  $D$  de la tuyauterie  $h_d$ , diminue. Economiquement parlant, une augmentation de  $D$  suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie.

Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements [34]. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approximent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse :

$$D = K\sqrt{Q} \quad (\text{IV.16})$$

$D$  : diamètre de la tuyauterie (m).

$K$  : coefficient qui varie de 0.75 à 1.4.

$Q$ : débit crête de la pompe ( $m^3/s$ ).

L'équation de continuité est :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (\text{IV.17})$$

Choisir la valeur  $K$  équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide ( $v$ ). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de  $Q$  prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$v = \frac{4}{\pi K^2} \quad (\text{IV.18})$$

Quelle que soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus proche et d'ajouter les calculs en conséquence.

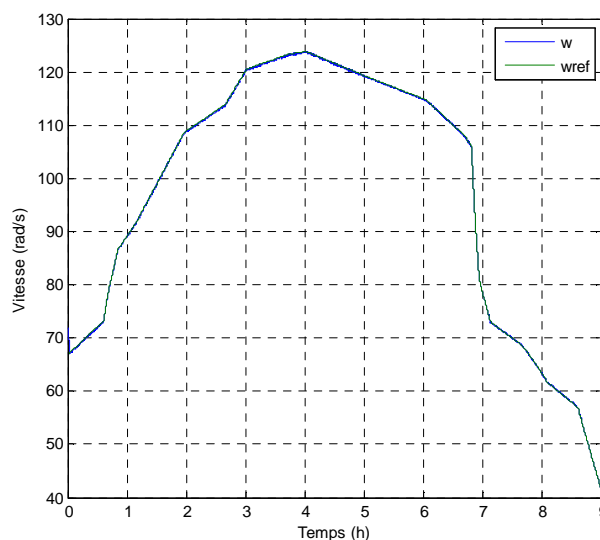
### V.1. Introduction :

La modélisation et simulation est très important pour l'analyse et conception des systèmes et depuis quelques années le développement des calculateurs a rendu la simulation du fonctionnement et le comportement d'un système quelque possible .ceci a permis un gain du temps énorme dans la vérification et la mise en épreuve d'une conception d'une part l'évaluation des performances et la limites d'une réalisation d'autre part.

Le logiciel utilise est le MATLAB SIMULINK parce qu'il permet la représentation facile, par des blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminé, des systèmes dynamique.

MATLAB est un logiciel de calcul numerique,de visualisation et de programmation très raffinée et conviviale, développé la société(Mathworks).il permet a l'utilisateur d'élaborer ses propre fonctions de véritables programmes, ainsi , des interface graphique très performantes.

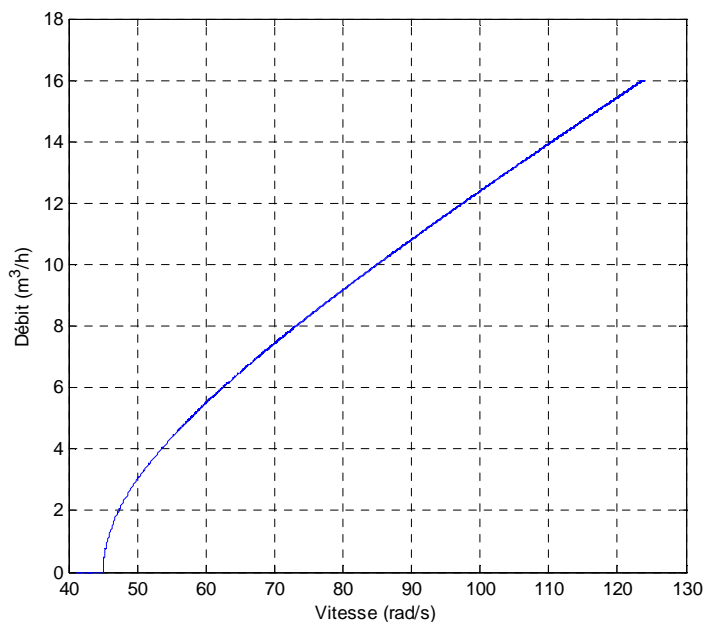
### V .2. Résultat de simulation



**Figure (V.1) :** L'évolution de la vitesse de rotation et de la vitesse de référence en fonction du temps.

#### Interprétation :

Cette figure représente la variation de la vitesse de rotation du moteur en fonction du temps. La caractéristique de la vitesse suit l'allure de l'éclairage pendant la journée, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son seuil au milieu de la journée, puis elle diminue pour s'annuler la soirée



Figure(V.II) : l'évolution du débit en fonction du vitesse

**Interprétation :** L'allure du débit en fonction de la vitesse augmente lentement pour des valeurs de vitesse d'ordre 50 rad/s . A partir d'une vitesse 55 rad/s, la courbe évolue d'une manière linéaire

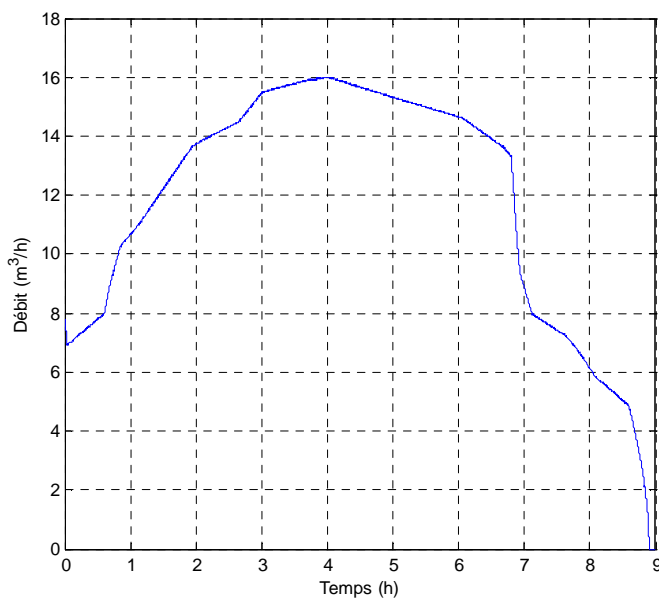


Figure (IV-5) : L'évolution du débit en fonction du temps .

**Interprétation :**

On voit que la courbe de débit suit la courbe de vitesse du moteur ce qui est donnée en théorie ( $Q=w.s$ ).

Q : Débit, W= La vitesse : S= La section

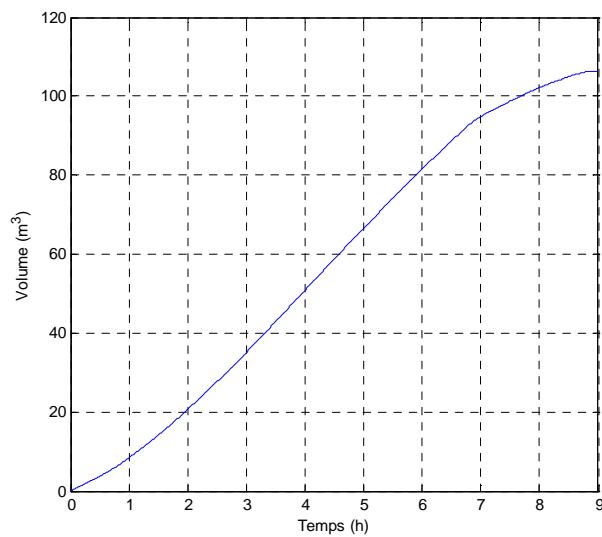


Figure (IV-6) : L'évolution du volume d'eau en fonction du temps.

### Interprétation :

La courbe du volume augmente progressivement en fonction du temps

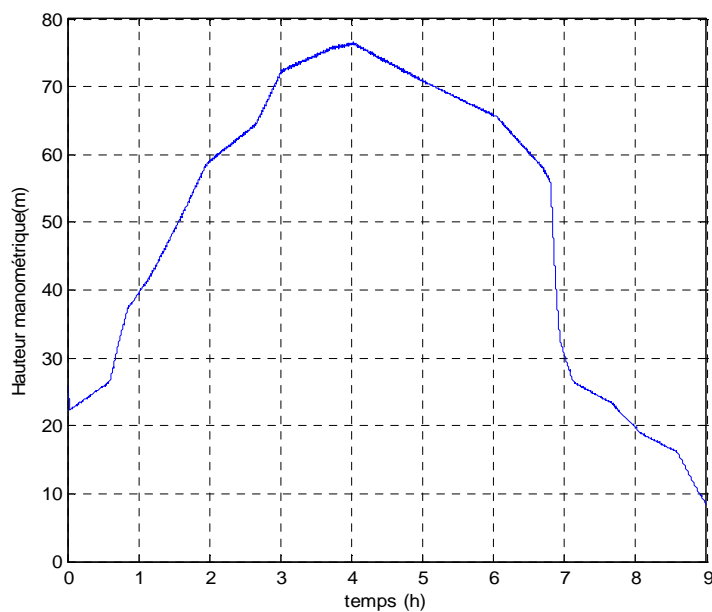
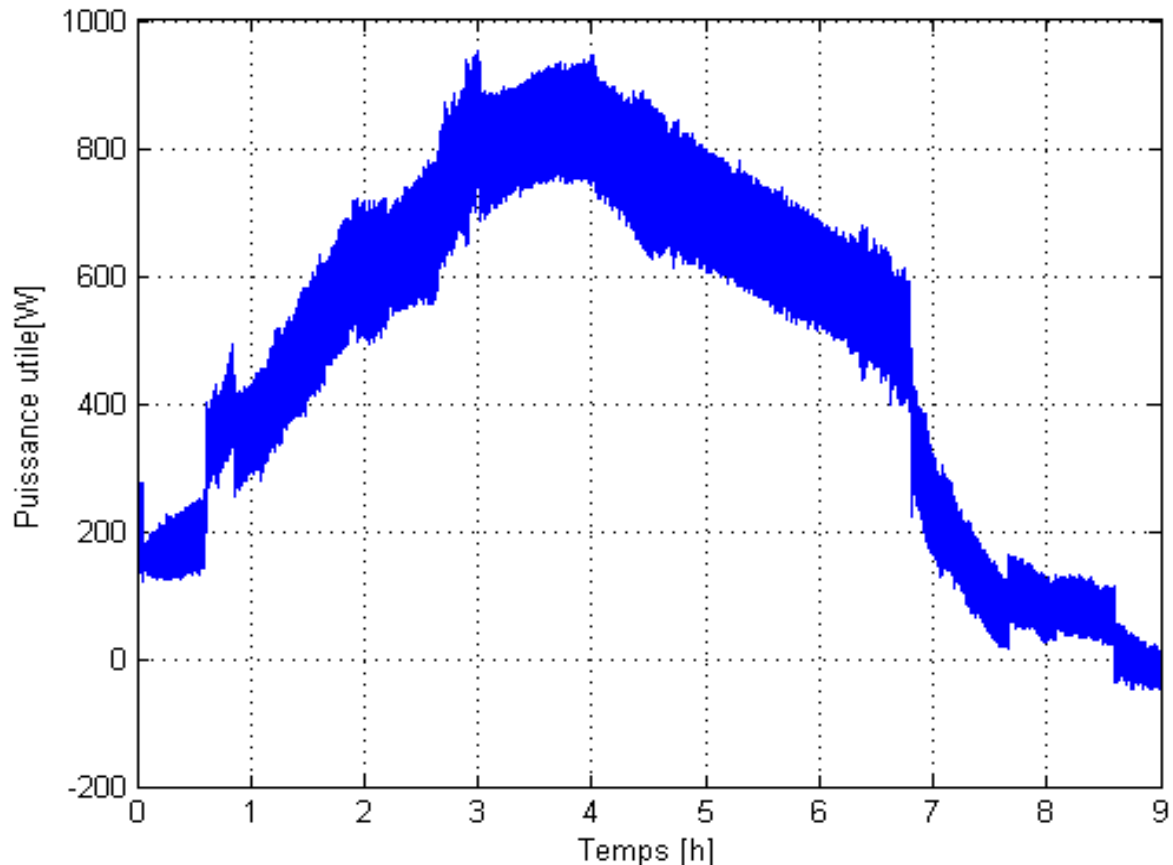


Figure (IV-7) : L'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps.

**Interprétation :**

On voit que l'allure suit la caractéristique de la vitesse. Elle démarre par une hauteur de valeur 23m pour atteindre une valeur maximale de 76m au milieu de journée, puis elle diminue pour s'annuler à la sortie



**Figure (IV-8):** L'évolution de la puissance utile en fonction du temps.

**V.3. Conclusion**

Les résultats des simulations qui sont présentés précédemment montrent l'avantage de la commande en puissance d'un système de pompage photovoltaïque. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque dépend de l'éclairement au niveau de la surface du panneau solaire et de la vitesse de rotation du moteur asynchrone qui entraîne la pompe à une vitesse désirée.

- [1] : (www.l'énergie renouvelable .com)
- [2] : Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [3] : H CHENOUFI, 'Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion'. Mémoire de Magistère, Université de Batna-2005
- [4] : (<http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/historique.html>)
- [5] : **Belhadji Mohamed** :<<modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome>> Mémoire de magister : micro électrique ;carte université de béchar institut des sciences exactes 2008.
- [6] : technique de l'ingénieur, traité génie électrique D33603.
- [7]: **I.O.Herwig** :<<photovoltaic technology advanced,industry progress, a market promise>> Proc. Of the1989 annual conference American solar energy society 1989.
- [8] : (Etudes des Cellules Photovoltaïques, Olympiades de la Physique 2004)
- [9]: **M.FILALI,A.SI Abdelhadi**:<< Etude et réalisation d'une station solaire autonome destinée à recharger les batteries des véhicules électriques>>. Mémoire d'ingénieur EMP, 2011.
- [10] :**Anne labouret, Michel villos** :<< énergie solaire photovoltaïque >>. 3eme Edition DANOD, 2007.
- [11] :T.FOMHERZ, F.PADINGER.D.GEBEYEHUR, GEBEYEHUR, C.BRABEC, J.C.Himmelen, saniciftei: << comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives>> Solar energy materials and solar cells,vol.63,ISS.1,pp.61-68,2000.
- [12]: **GUY Seguer,Francis Labrique**:<< les convertisseurs de l'électronique de puissance>>. Volume4. la conversion continu-alternatif. 1989.
- [13] : **M<sup>elle</sup>H.Alleg,M<sup>elle</sup>N. chaouche**:<< Identification des paramètres et commande vectorielle d'une machine asynchrone>>. Diplôme d'ingénieur électrotechnique,2005.
- [14] : **Calos D.A.M** :<< Contrôle direct du couple d'une machine alimentée par convertisseur multi niveaux à fréquence imposée>>. Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse, 15 décembre 2000.
- [15] [www.WEAKEPDIRA.com](http://www.WEAKEPDIRA.com)
- [16] : **Dominique Barielle, Jean-Pierre Daunis** : « Electrotechnique : Transformateurs et machines tournantes », DUNOD, Paris 2006

- [17] : **ALIMARINA B, AOUA Z** : « Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif-application à un groupe électropompe d'une station de pompage d'eau potable ». Mémoire DEUA en Electrotechnique, UMMTO 2006.
- [18] : **Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy**: « Le Pompage Photovoltaïque ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Sous la direction d'Eric Schiller.
- [19] : **N. BENYAHIA, K. SRAIRI, S. M. MIMOUNE** : « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique ». Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.147-150.
- [20] : **J-P Caron, J-P. Hatier** : «<< Modélisation et commande de la machine asynchrone>>». Edition technique 1995.
- [21] Document CDER « calcul du rayonnement solaire ».
- [22] Colloque national sur l'énergie solaire CNESOL 2006.
- [23] : **T. Fogelman** : «<< système photovoltaïque pour les pays en développement >>. manuel d'installation et d'utilisation, Agence française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [24] : **O. AMRANI, D. REKIOUA** : « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Université de Bejaïa.
- [25] : **SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH** : « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique Décembre 2007.
- [26] : **Jacques Laroche** : « Electronique de puissance ; convertisseurs » ; Edition DUNOD, 2005
- [27] : **Philippe Barret** : « Régimes transitoires des machines électriques », Edition EYROLLES, 1987.
- [28] : **Patrick BRUNET** : « Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrone ». PDF.
- [29] : **BOUDEN Abdelmalek** : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister en Electronique, Option : Instrumentation- Composants Electroniques et Systèmes -, 2008.
- [30] : **A. Saadi** : « Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque ». Mémoire De Magister en Electrotechnique, Université Mohammed Khider, Biskra, 2001.
- [31] : **Makhlouf messaoud** : «<< etude et optimisation d'un modele de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage >> thèse de magister , universite de montreal fevrier 1999.

[32] : **Maouedji Rachid** : <<application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzarea >>memoir de magister ,université de Tlemcen

[33]: **M.G. Thomas**: « Water Pumping- The Solar Alternative, Photovoltaic Design Assistance ».Center, Sandia National Laboratories, NM 8718 5, Albuquerque, 1987.

[34] : **A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi** : « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ». Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26.

[35] : **W.bouhebbal**. « Simulation et contrôle des stations de pompage photovoltaïque»Septembre 1999.

[36] : **S.M. Ait cheikh** << étude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués au système photovoltaïque >>. Ecole Nationale polytechnique. Soutenue en 2007.

$\varphi$  Flux.

$\omega_r$  Vitesse de rotation électrique du rotor.

$\omega_s$  Pulsation statorique.

$\omega_{sl}$  Pulsation de glissement.

$L_s, L_r$  Inductance cycliques statorique et rotorique.

$M$  Inductances mutuelles maximale entre une phase statorique et rotorique.

$R_s, R_r$  Résistances statorique et rotorique.

$T_s$  Constante de temps statorique

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

$T_r$  Constante de temps rotorique.

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

$\Omega$  Vitesse de rotation mécanique du rotor.

$C_r$  Couple résistant.

$C_{em}$  Couple électromagnétique.

$P$  Nombre de paire de pôles.

$\sigma$  Coefficient de dispersion ( $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ )

$J$  Moment d'inertie.

$f$  Coefficient de frottement visqueux.

$g$  Glissement ( $g = \frac{\omega_s + \omega_r}{\omega_s}$ ).

$U$  Tension.

$I$  Courant.

$F$  Fréquence.

$\theta_s$  Angle de déplacement du vecteur flux statorique.

$n_s$  nombre de cellules en série.

$n_p$  nombre de cellules en parallèle.

GPV

générateur photovoltaïque.

$I_{cc}$  courant de court-circuit (A).

$I_0$  courant à l'obscurité (A).

$n_s$  nombre de cellules en série.

$K$  constantes de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

$K_1$  constante ( $1.2$  A/cm<sup>2</sup>K<sup>3</sup>).

$E_g$  énergie de la bande de gap (eV).

$S$  la surface effective du générateur photovoltaïque en (m<sup>2</sup>).

$P_{max}$  puissance maximale (W).

$I_{max}$  courant maximal (A).

$V_{max}$  tension maximale (V).

$P_c$  puissance crête (W).

$P_{opt}$  puissance optimale (W).

$\delta$  La déclinaison du soleil.

$h$  La hauteur angulaire .

$L$  La latitude du site,

$\beta$  L'angle d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontal.

$\omega$  Angle horaire.

$\theta$  Angle d'incidence du rayon solaire sur un plan du capteur . $G$  le rayonnement global sur un plan incliné (kWh/m<sup>2</sup>).

$R_b$  le facteur d'inclinaison du rayonnement direct.

$d_i$  L'irradiation diffuse sur un plan incliné (kWh/m<sup>2</sup>).

$d_{ri}$  l'irradiation réfléchie sur un plan incline (kWh/m<sup>2</sup>).

$S_h$  Rayonnement direct (kWh/m<sup>2</sup>).

$D_h$  rayonnement diffus(kWh/m<sup>2</sup>).

IRGM l'irradiation journalière moyenne (kWh/m<sup>2</sup>).

$\eta_0$  rendement du générateur PV dans les conditions standards (1000W/m<sup>2</sup> et 25 °C).

$\gamma$  Coefficient de température du module.

$T_c$  température de la cellule (°C).

$T_a$  température ambiante de la cellule (°C).

NOCT la température nominale d'opération de la cellule (°C).

NMS Nombre de module en série.

NMP Nombre de module en parallèle.

$S_{cel}$  Surface de la cellule (m<sup>2</sup>).

Les paramètres des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque étudié sont les suivants :

➤ **Le générateur photovoltaïque**

Charge électrique d'un électron :  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$

Energie de gap: énergie nécessaire pour un électron pour s'arracher :  $E_G = 1,12 \text{ eV}$

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

Résistance série d'une cellule PV :  $R_s = 0.614 \ \Omega$

Résistance shunt d'une cellule PV :  $R_{sh} = 151.16 \ \Omega$

Nombre de cellules PV dans un module :  $n_c = 72$

Nombre de modules en parallèle :  $n_p = 7$

Nombre de modules en série :  $n_s = 2$

Coefficients donnés par le constructeur :

$$P_1 = 0.0036$$

$$P_2 = 0.0001$$

$$P_3 = -0.0005$$

$$P_4 = 70.874$$

➤ **L'onduleur MLI**

Tension d'alimentation de l'onduleur délivrée par le hacheur élévateur :  $E = 600 \text{ V}$

➤ **La machine asynchrone**

Puissance nominale :  $P_n = 1.5 \text{ KW}$

Vitesse de rotation nominale :  $W_n = 1420 \text{ tr/mm}$

Courant nominal :  $I_n = 3 \text{ A}$

Inductance mutuelle :  $M = 0.44 \text{ tr/mm}$

Inductance rotorique :  $L_r = 0.4662 \text{ H}$

Inductance statorique :  $L_s = 0.4662 \text{ H}$

Résistance rotorique :  $R_r = 4.2 \ \Omega$

Résistance statorique :  $R_s = 5.75 \ \Omega$

Nombre de paires de pôles :  $p = 2$

Flux de référence :  $\varphi_{ref} = 1.2 \text{ Wb}$

Moment d'inertie :  $J = 0.03 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

➤ **La pompe centrifuge**

Constantes propres de la pompe :

$$C_1 = 4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

$$C_2 = 1.5826 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

$$C_3 = -18144 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Hauteur géométrique :  $H_g = 10 \text{ m}$

Diamètre :  $d = 0.06 \text{ m}$

Accélération de la pesanteur :  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Densité d'eau :  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Longueur :  $l = 7.4$