

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université HADJ LAKHDAR Batna  
Faculté de Technologie  
Département du Génie Electrique



## Mémoire de Magister

*Présenté par :*

**Hemza Sellamna**

**Etude et Réalisation d'un Système de Pompage Solaire à  
Base d'un Moteur Monophasé, Gouverné par un  
Microcontrôleur Pic, pour Utilisation Domestique.**

*Soutenue le 17/01/2015 devant le jury composé de :*

|                           |                                       |            |
|---------------------------|---------------------------------------|------------|
| <b>BENDAAS.Med Lokman</b> | Professeur, Université, Batna         | Président  |
| <b>ARROUF .Mohamed</b>    | Professeur, Université, Batna         | Rapporteur |
| <b>RAHAM Djamel</b>       | Professeur, Université, Oum El Bouagi | Examineur  |
| <b>BELKACEM Sebti</b>     | M.Conf.-A-, Université, Batna         | Examineur  |

# **Remerciement**

*Tout d'abord je voulais dire que grâce à dieu que je suis arrivé à réaliser ce projet, qui est un résultat d'un long travail.*

*Mon profond remerciement à mon promoteur monsieur Arrouf Mohammed, pour son suivi et conseils durant l'évolution de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury qui ont accepté de juger mon travail.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les enseignants de l'université de Batna qui ont contribué à notre formation, à mes collègues pour leurs encouragements pendant les années des études.*

*Un merci particulier à monsieur BENAGOUNE Laid.*

*A tous ce qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*A ma mère*  
*A mon père*  
*A ma fiancée Amira*  
*A mes frères et mes sœurs*  
*A Haroune, Kamel et Yacine*  
*A toute ma famille et mes amis*

*Sellamna Hemza*

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale .....  | 1  |
| <b>Chapitre I : pompage photovoltaïques</b>                                      |    |
| 1. Introduction : .....  | 3  |
| 2. Energie solaire .....   | 3  |
| 2.1. L'énergie photovoltaïque.....   | 6  |
| 2.2. Générateur photovoltaïque et ses performances : .....                       | 6  |
| 2.3. Caractéristique Courant-Tension et Puissance -Tension.....                  | 6  |
| 2.4. Usages courants de l'électricité photovoltaïque .....                       | 7  |
| 3. Fonctionnement et spécifications des systèmes de pompage photovoltaïque ..... | 8  |
| 3.1. Historique .....  | 8  |
| 3.2. Différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque.....             | 9  |
| 3.3. Principes généraux du pompage photovoltaïque .....                          | 10 |
| 3.4. Différents systèmes de pompage avec différent moteurs .....                 | 12 |
| 3.4.1. Systèmes de pompage avec moteur à courant continu .....                   | 12 |
| 3.4.2. Systèmes de pompage moteurs à commutation électronique .....              | 14 |
| 3.4.3. Systèmes de pompage avec moteur à courant alternatif triphasé .....       | 14 |
| 3.5. Couplage générateur PV – groupe de pompage .....                            | 15 |
| 3.5.1. Adaptateur de charge (moteur continu).....                                | 16 |
| 3.5.2. L'onduleur (moteur alternatif).....                                       | 17 |
| 3.6. Les pompes photovoltaïque .....   | 18 |
| 3.6.1. Les pompes centrifuges .....  | 18 |
| 3.6.2. Les pompes volumétriques.....   | 19 |
| 4. Conclusion : .....  | 19 |
| <b>Chapitre II : identification des paramètres du moteur monophasé</b>           |    |
| 1. Introduction .....  | 20 |
| 2. Machines électriques monophasées .....  | 20 |
| 2.1. Principe de fonctionnement .....  | 20 |
| 2.2. Champ pulsant.....  | 20 |
| 2.3. Schéma équivalent du moteur asynchrone triphasé .....                       | 21 |
| 2.4. Schéma équivalent de la machine asynchrone monophasée .....                 | 22 |
| 2.5. Différentes configurations des machines électriques monophasées .....       | 23 |
| 2.5.1. Moteur à induction à condensateur permanent .....                         | 24 |
| 2.5.2. Moteur à condensateur de démarrage.....                                   | 24 |
| 2.5.3. Moteur à induction sans condensateur .....                                | 25 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.5.4. | Moteur à phase de démarrage à haute résistance .....                | 25 |
| 2.5.5. | Moteur à enroulement de démarrage dit « bifilaire » .....           | 26 |
| 3.     | Identification des paramètres du moteur monophasé.....              | 26 |
| 3.1.   | Détermination théorique des paramètres du moteur .....              | 27 |
| 3.1.1. | Impédance d'entrée à vide .....                                     | 27 |
| 3.1.2. | Impédance d'entrée à rotor calé (en court-circuit) .....            | 28 |
| 3.2.   | Détermination pratique des paramètres du moteur d'étude .....       | 29 |
| 3.2.1. | Détermination des paramètres de l'enroulement principal .....       | 29 |
| 3.2.2. | Détermination des paramètres de l'enroulement auxiliaire.....       | 31 |
| 3.2.3. | Détermination des paramètres des paramètres mécaniques J et f ..... | 32 |
| 4.     | Conclusion.....   | 34 |

### Chapitre III : commande v/f du moteur monophasé

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Introduction : .....   | 35 |
| 2.     | Commande V/f de machine asynchrone monophasée.....                       | 35 |
| 2.1.   | Modélisation du la machine asynchrone monophasé en régime permanent..... | 35 |
| 2.1.1. | Hypothèses de travail .....  | 35 |
| 2.1.2. | Model en régime permanent on mode équilibré.....                         | 35 |
| 2.1.3. | Model en régime permanent on mode déséquilibré .....                     | 38 |
| 2.2.   | Principe de Contrôle en V/f de la machine asynchrone .....               | 39 |
| 3.     | Etude de l'alimentation de la machine asynchrone monophasé .....         | 41 |
| 3.1.   | Alimentation avec condensateur permanente .....                          | 41 |
| 3.2.   | Alimentation de la machine diphasée par onduleur.....                    | 42 |
| 3.2.1. | Machine diphasée alimentée par un onduleur triphasé .....                | 42 |
| 3.2.2. | Machine diphasé alimentée par onduleur à point milieu .....              | 43 |
| 3.2.3. | Machine diphasé alimentée par onduleur à pont complet.....               | 43 |
| 3.2.4. | Commande de l'onduleur par PWM Sinus-Triangle :.....                     | 44 |
| 4.     | Utilisation du PIC18F4431 pour la commande du moteur .....               | 45 |
| 4.1.   | Stratégies de Commande V / f en boucle ouverte .....                     | 46 |
| 4.2.   | Architecture de la carte de commande .....                               | 47 |
| 4.3.   | Programmation de la commande power contrôle PWM .....                    | 48 |
| 4.3.1. | Configuration du module PWM .....  | 48 |
| 4.3.2. | Configuration du module ADC(HSADC).....                                  | 49 |
| 4.4.   | Synthèse de programme de la Commande V / f en boucle ouverte .....       | 49 |
| 5.     | Conclusion.....  | 51 |

## Chapitre IV : réalisation de l'étage d'adaptation photovoltaïque

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction :                                     | 52 |
| 2. Schéma synoptique de l'étage d'adaptation PV       | 52 |
| 3. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC            | 53 |
| 3.1. Commande perturbation et observation             | 54 |
| 3.2. Description et fonctionnement du microcontrôleur | 56 |
| 4. Convertisseur survolteur (BOOST)                   | 57 |
| 4.1. Valeur moyenne de <b>Us</b> :                    | 58 |
| 4.2. Courant en sortie Iso                            | 59 |
| 4.3. Dimensionnement des composants                   | 61 |
| 4.3.1. Cellule de commutation                         | 61 |
| 4.3.2. Éléments réactifs                              | 63 |
| 4.4. Description générale                             | 63 |
| 4.4.1. Partie puissance                               | 64 |
| 4.4.2. Partie Mesure                                  | 65 |
| 4.4.3. Partie protection                              | 66 |
| 5. Conclusion   | 66 |

## Chapitre V : résultats de fonctionnement du système de pompage PV

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction   | 67 |
| 2. Synoptique du système de pompage photovoltaïque :        | 67 |
| 2.1. Description du système                                 | 69 |
| 2.2. Commande v/f en couple :                               | 71 |
| 2.2.1. Grandeurs de réglage du couple en régime permanent : | 71 |
| 3. Résultats et discussions                                 | 71 |
| 3.1. Résultats de teste de l'étage d'adaptation PV          | 71 |
| 3.2. Interprétation des résultats                           | 75 |
| 3.3. Résultats de teste commande v/f constant               | 75 |
| 3.4. Interprétation des résultats                           | 79 |
| 4. Conclusion :   | 80 |
| Conclusion générale   | 81 |
| Bibliographie   | 83 |

## Introduction générale

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les algériens peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité. Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période. Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que vous choisirez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie.

De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

Des milliers de systèmes PV sont utilisés au monde aujourd'hui dans diverses applications.

Les systèmes PV sont utilisés efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains. Étant donné que le besoin en eau est plus grand les jours chauds et ensoleillés, ces systèmes conviennent parfaitement aux applications de pompage. Ils fournissent également l'énergie de clôtures électriques dans les fermes.

Notre travail prend comme objectif l'étude et la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque pour les sites isolés économique, fiable et robuste à base d'un moteur monophasé sans batterie de stockage .ceci a travers la réalisation :

- ✓ Commande MPPT a base d'un hacheur BOOST
- ✓ Alimentation alternatif variable en fréquence et en amplitude
- ✓ Une commande scalaire a l'aide d'un microcontrôleur

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en 5 chapitres :

Dans le premier chapitre, on fait en premier lieu une généralité sur l'énergie solaire son utilisation et les caractéristiques principales du générateur photovoltaïque. En second lieu il expose en générale le fonctionnement et spécifications des systèmes de pompage photovoltaïque, les différents systèmes de pompages existants, sans stockage d'énergie électrique et avec batterie et rappelle les éléments qui constituent le système.

Le deuxième chapitre consiste à présenter, en premier lieu, le principe des machines à induction monophasées. En second lieu, il illustre une présentation brève des principales configurations des moteurs monophasés. A la fin de ce deuxième chapitre, on a consacré une bonne partie pour la détermination des différents paramètres de la machine à induction monophasée par la méthode de VEINOTT de notre étude.

Le Chapitre III se concentre sur l'étude du moteur asynchrone diphasé. La première partie présente les équations de fonctionnement de la machine, en insistant sur la relation entre le couple, et les conditions d'alimentation électrique de la machine : équilibrée, déséquilibrée. Plusieurs voies d'alimentation électrique adaptées à la machine asynchrone diphasé sont ensuite explorées a la deuxième partie. La mise en œuvre de la commande V/f constant du moteur par le microcontrôleur PIC18f4431 est présentée en détail dans la dernière partie.

La première partie du chapitre IV décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC basée sur contre réaction de puissance et la réalisation pratique de la méthode perturber et observer par le microcontrôleur PIC16F877a. La deuxième partie présente une étude théorique de convertisseur BOOST et son réalisation pratique pour des applications photovoltaïques.

Le dernier chapitre consiste à présenter en premier lieu une description générale de notre système de pompage photovoltaïque. En seconde lieu il présente les figures et les résultats pratiques et leurs interprétations de notre système de pompage photovoltaïque.



## 1. Introduction :

Originellement conçue pour répondre aux besoins en énergie des capsules spatiales, l'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage.

L'énergie solaire est disponible partout sur la planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable, au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible. Sa puissance maximale est de  $1\text{kW/m}^2$  et, même si elle est relativement diluée, son apport énergétique annuel pourrait répondre des milliers de fois à la consommation énergétique de la plupart des pays, à l'exception de ceux très industrialisés.

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles.

Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement dans les régions rurales des pays en développement et dans les zones hors-réseaux des pays plus industrialisés

## 2. Energie solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ). La figure (I-1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1,37$  kilowatt au mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci [1].

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1,2\text{kW/m}^2$  ( $1200\text{W/m}^2$ ). La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques

et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

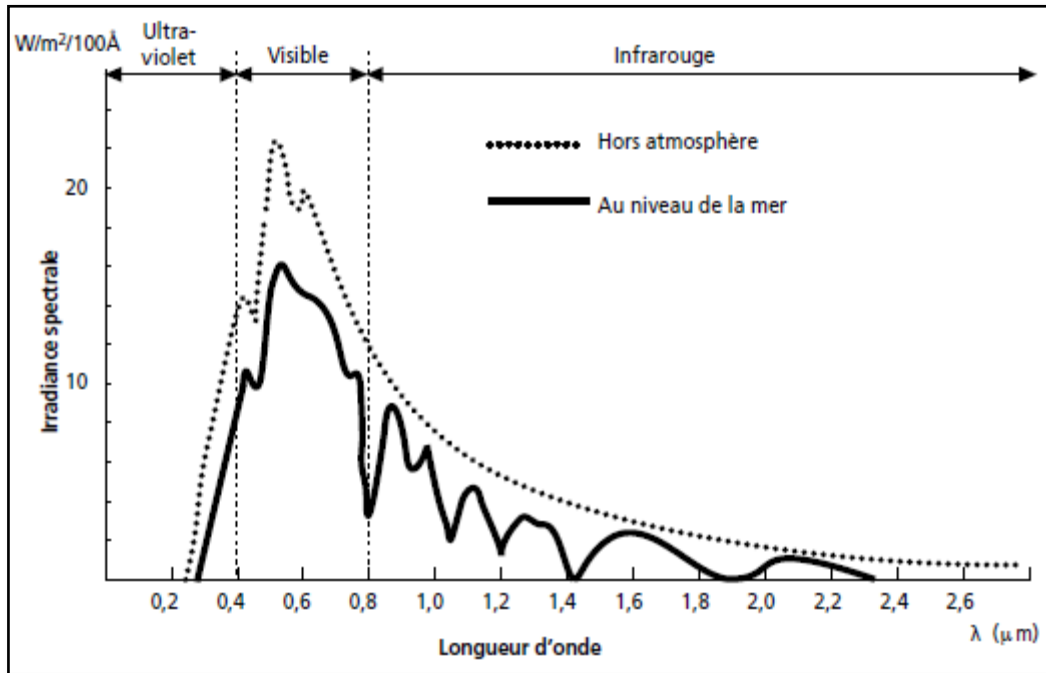


Figure (I-1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; en outre, on ne peut l'emmagasiner ni le transporter.

Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible [1] [2].

Il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la Terre sur le rayonnement solaire.

L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le Soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le Soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le « midi solaire », moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le Soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver.

La figure (I-2) illustre ce phénomène, en reproduisant la trajectoire du Soleil dans le ciel au cours des quatre saisons de l'année.

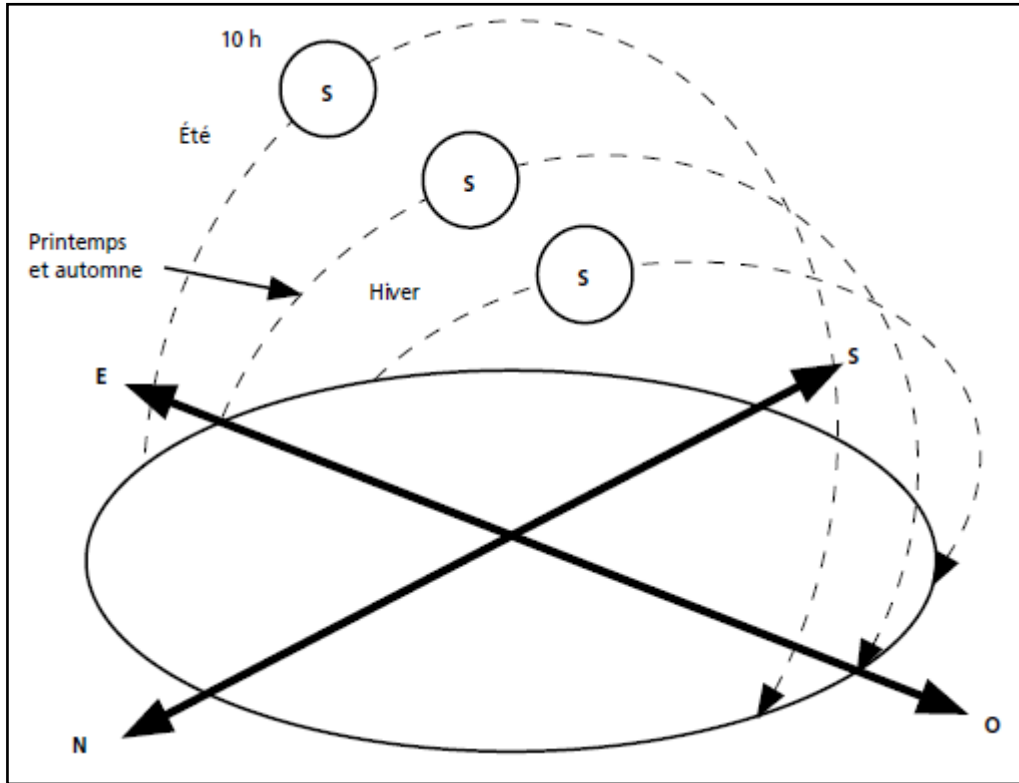


Figure (I-2) : Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le Soleil est plus bas au midi solaire.

Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire ( $G$ ) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude (figure (I-3)).

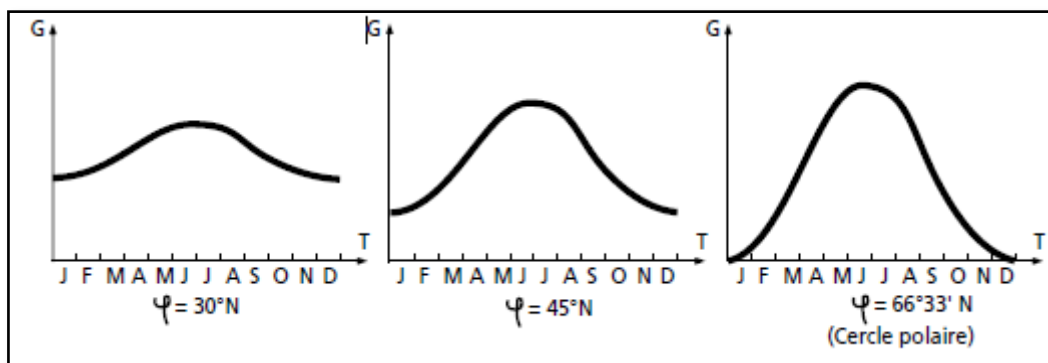


Figure (I-3) : Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes

## 2.1. L'énergie photovoltaïque

L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

## 2.2. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement [3].

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle à la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [4].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un  $I_{cc}$  et un  $V_{co}$  désirés [4].

## 2.3. Caractéristique Courant-Tension et Puissance -Tension

La figure (I.3) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ \text{C}$ .

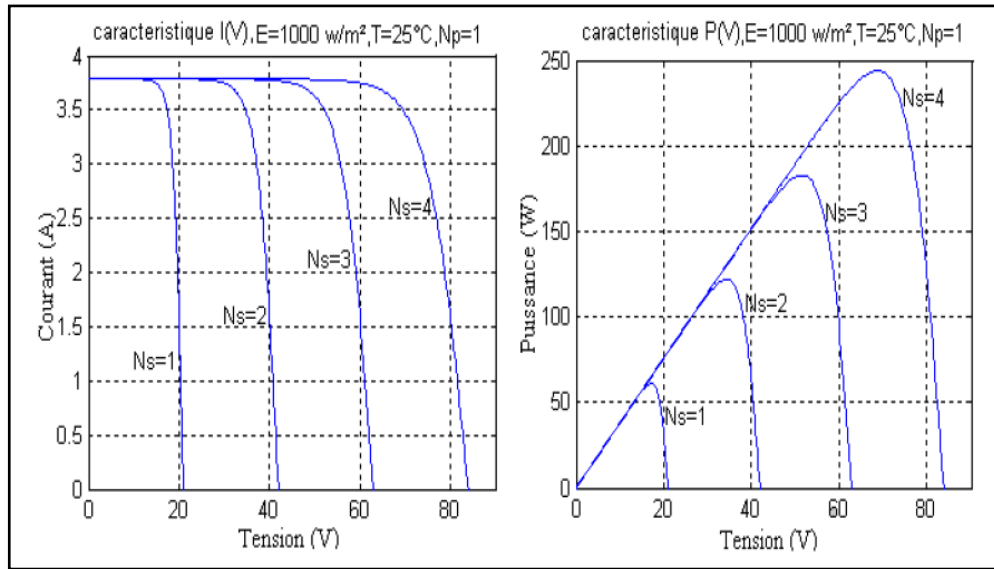


Figure (I-4) : caractéristiques courant-tension et puissance tension

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P$  [4].

#### 2.4. Usages courants de l'électricité photovoltaïque

L'électricité solaire est obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou transformation du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de modules photovoltaïques. Elle constitue une alternative bon marché aux groupes électrogènes au diesel, à l'électricité du secteur et même aux piles. La technologie s'est rapidement développée à la fois dans des applications autonomes (non raccordées) et dans des applications raccordées aux réseaux. Les systèmes photovoltaïques (PV) équipent aujourd'hui des millions d'habitations rurales, aussi bien dans les pays développés que dans les pays en voie de développement.

Les petites installations solaires photovoltaïques autonomes diffèrent des installations raccordées ou avec groupes électrogènes en ce sens que :

- ✓ Le courant généré est un courant continu très basse tension et non une courante alternative basse tension à 230 volts (voir glossaire),
- ✓ l'électricité est généralement stockée dans des batteries,

- ✓ l'électricité est produite sur place au moyen de modules photovoltaïques,
- ✓ leur rentabilité n'est garantie qu'au prix d'une utilisation efficace de l'électricité produite.

Le photovoltaïque se développe très rapidement et se répand dans le monde entier à mesure que les coûts des autres formes d'énergie augmentent. Avant 1990, la technologie était nouvelle et généralement confiée aux systèmes de communication hors réseau, à la signalisation routière, au pompage de l'eau et à l'approvisionnement électrique de centres de soins éloignés de tout.

Depuis le milieu des années 1990, la production mondiale de modules photovoltaïques augmente à un rythme soutenu sous l'effet de deux facteurs :

- ✓ l'augmentation de la demande liée à multiplication des installations raccordées en Europe, aux États-Unis et au Japon.
- ✓ la chute du prix du  $Wc$  (divisé par 25 entre 1974 et 2008).

La baisse des coûts a dopé la demande en milieu rural. Aujourd'hui, l'électricité photovoltaïque est souvent la meilleure source d'énergie, en termes économiques, pour quantité d'applications dans les zones rurales non électrifiées.

Les installations solaires photovoltaïques non raccordées et les installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau diffèrent considérablement, à la fois dans leurs composants et dans leur conception. Les installations non raccordées qui doivent garantir un approvisionnement adéquat pendant les longues périodes nuageuses, stockent généralement l'électricité dans des batteries, alors que les installations reliées au réseau n'utilisent pas de système de stockage car elles peuvent réinjecter sur le réseau l'électricité qu'elles ne consomment pas.

Le présent ouvrage est destiné aux concepteurs et installateurs de systèmes non raccordés d'une puissance inférieure à 1 kilowatt-crête qui devront bien entendu se conformer systématiquement et scrupuleusement aux spécifications des composants (présentées dans la documentation accompagnant ces composants), aux réglementations nationales, et aux codes locaux. Les installations de plus de 500  $Wc$  sont traitées au chapitre. L'installation doit toujours être réalisée (ou supervisée) par des techniciens qualifiés [5].

### 3. Fonctionnement et spécifications des systèmes de pompage photovoltaïque

#### 3.1. Historique

Pomper à l'aide du soleil est un vieux rêve. On rapporte une première tentative par Héron d'Alexandrie en l'an 100 après J.-C. consistant à utiliser la dilatation de l'air entre le jour et la nuit pour aspirer de l'eau. Les premières machines ont utilisé l'effet thermique du rayonnement solaire pour constituer la source chaude d'une machine thermodynamique. La

pompe de l'américain Schumann en 1911 près du Caire utilisait des capteurs à concentration et, dans les années 1970 en France, la pompe SOFRETES utilisait un capteur plan avec un fluide volatil (butane puis fréon).

Le rendement de ces machines, lié à celui du cycle de Carnot, était très faible, inférieur à 1 %.

L'arrivée des cellules photovoltaïques, ou photopiles, a fait l'effet d'une révolution, tant le procédé était simplifié. C'est aux établissements Pompes Guinard, basés en France, que l'on doit la première pompe solaire photovoltaïque, installée à titre expérimental à Propriano en Corse en 1975. Les résultats satisfaisants ont permis d'installer la première pompe à Koni, au Mali, deux ans après. Pour une puissance nominale de 1 kW, les 5 tonnes de matériel et le mois d'installation d'une pompe thermodynamique étaient remplacés par 850 kg d'équipements et deux jours d'installation pour la pompe ALTA X. Le prix était similaire: 200 000 FF (30 000 \$). Fin 1980, une pompe de près de 30 kW sera installée en démonstration à Montpellier.

À ce jour, 5 000 pompes solaires à usage communautaire ont été installées sur les cinq continents. La réduction des coûts, l'amélioration de la technologie et de la fiabilité ont permis de réduire le coût de l'eau pompée. Il oscille dans une fourchette de 0,05 à 0,5 \$/m<sup>3</sup> d'eau selon la puissance de la pompe, la hauteur de refoulement et l'ensoleillement.

### 3.2. Différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque

En général les systèmes de pompage sont constitués des composants suivants :

- ✓ Un générateur photovoltaïque composé à son tour, de modules interconnectés électriquement jusqu'à constituer une unité de production DC, et une structure de support mécanique
- ✓ Un conditionnement de la puissance, constitué d'un convertisseur DC/AC, capable de varier la fréquence et la tension de sortie, en fonction de la puissance disponible dans le générateur qui, à son tour, est fonction de l'irradiance incidente
- ✓ Un groupe motopompe immergé, constitué de l'association d'un moteur électrique d'induction et d'une pompe, centrifuge ou à déplacement positif
- ✓ Un câblage électrique à travers duquel circule l'énergie depuis le générateur jusqu'au moteur, et qui incorpore des fonctions de contrôle et de sécurité
- ✓ Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau depuis la source, normalement un puits, jusqu'aux points de distribution et qui, à son tour, est constitué par quatre éléments : la source d'eau, la conduction entre la source et l'entrée du réservoir de stockage, le réservoir, et la conduction entre le réservoir et les points de distribution. Dans cette définition, nous entendons par conduction l'ensemble des tuyaux, des dispositifs de mesure, et de l'interface avec l'utilisateur : robinets, sources, ...etc.
- ✓ Un système de potabilisation de l'eau, là où les conditions sanitaires le rendent nécessaire.

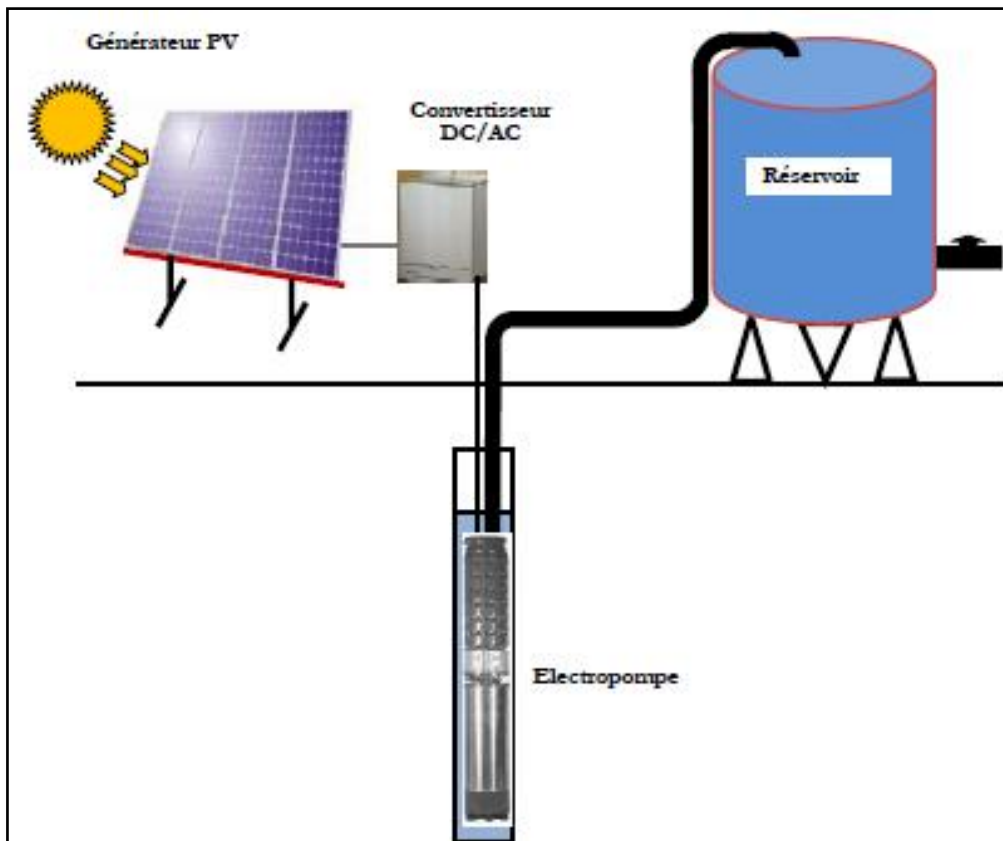


Figure (I-5) : Système de pompage photovoltaïque

### 3.3. Principes généraux du pompage photovoltaïque

La caractéristique de l'énergie solaire est d'être périodique (jour/nuit), continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée.

Aussi faut-il en général un stockage tampon afin de pouvoir utiliser des récepteurs, consommateurs d'électricité, quel que soit le moment souhaité. Le pompage solaire est une exception, il est en effet relativement facile de stocker l'énergie potentielle de l'eau dans un réservoir surélevé, alternative largement moins onéreuse et plus fiable qu'un stockage par accumulateurs électriques, car les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent un entretien rigoureux.

Par la variation de vitesse, et donc du débit, le pompage permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement : c'est ce que l'on appelle le pompage "au fil du soleil". Le débit maximum de la pompe, exprimé en m<sup>3</sup>/h, obtenu généralement à midi est environ le sixième du débit journalier[6]. Pour une pompe volumétrique, le couple est constant : la puissance absorbée sera proportionnelle à la vitesse de rotation (Puissance = couple x vitesses).



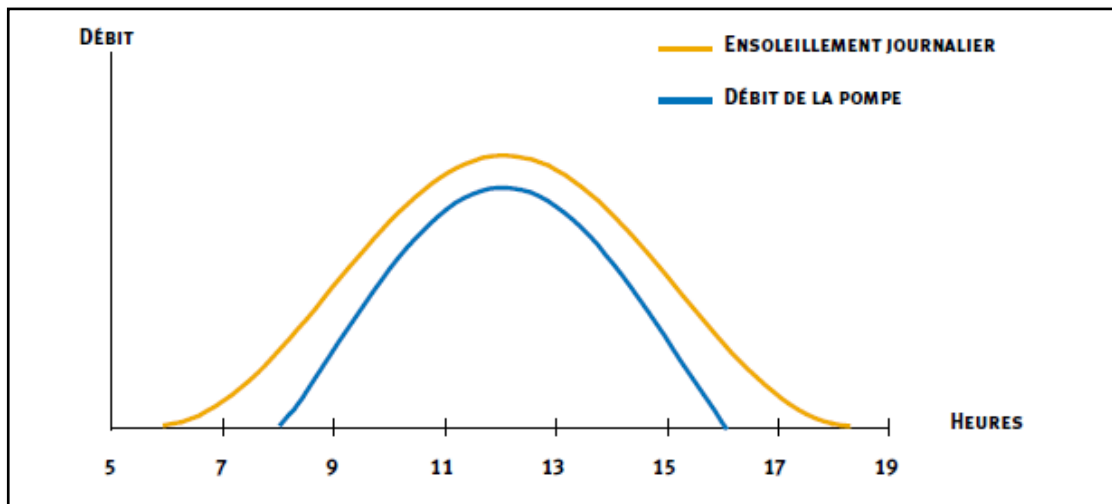


Figure (I-6): Pompage au fil du soleil (Fonctionnement automatique sur une journée)

Il existe des situations où cet atout ne peut être mis à profit. Elles nécessitent un stockage par banc de batteries. Tel est le cas par exemple des petites unités de pompage à usage domestique. Elles font souvent partie d'un système pourvu de différentes applications, éclairages, froid, équipements audiovisuels déjà doté d'un banc de batteries. C'est l'utilisateur qui déclenche la mise en route de la pompe qui fonctionne alors en régime fixe.

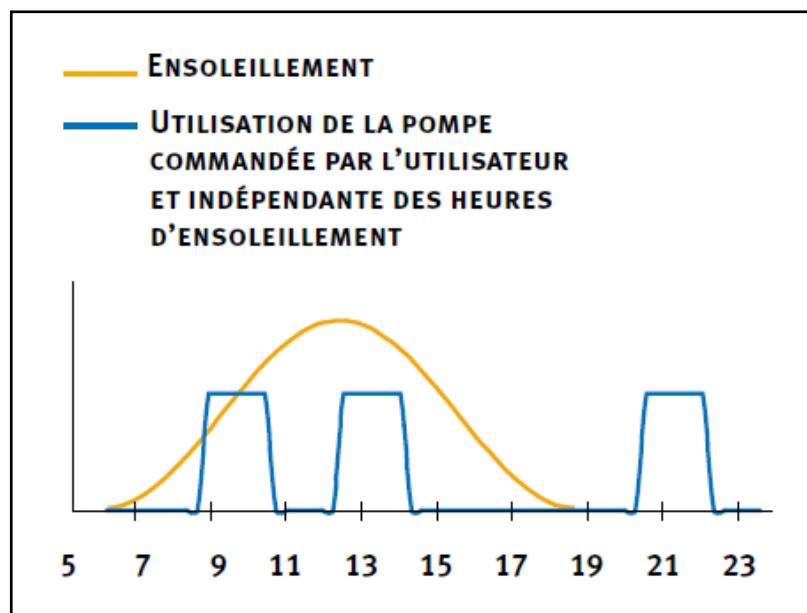


Figure (I-7) : Pompage sur batterie

### 3.4. Différents systèmes de pompage avec différents moteurs

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution de convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et, surtout, moins coûteux.

#### 3.4.1. Systèmes de pompage avec moteur à courant continu

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

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

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

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

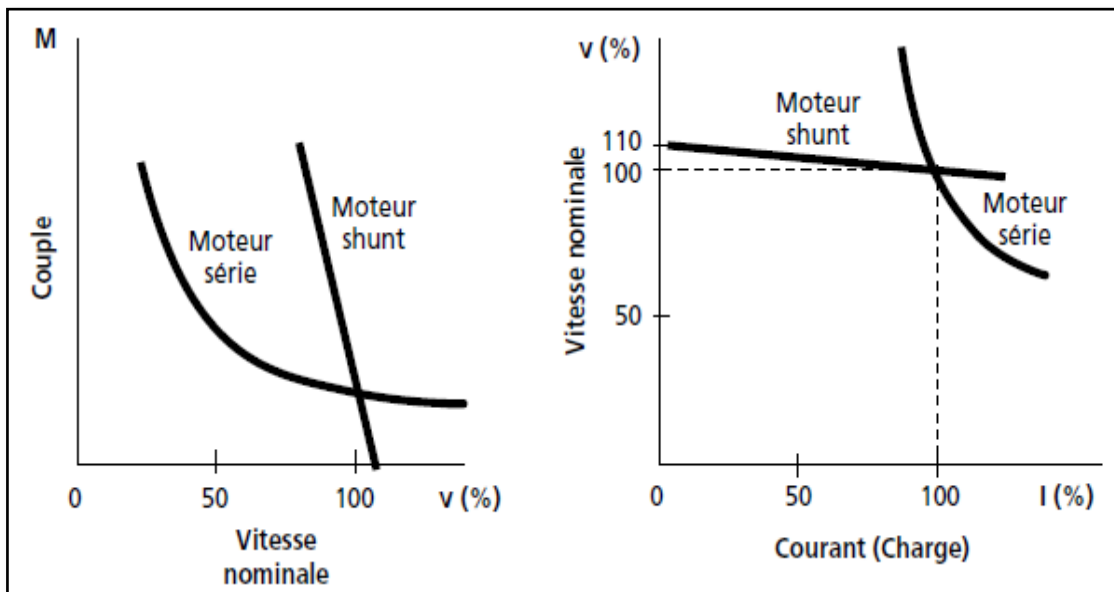
Le moteur série s'adapte particulièrement à la traction électrique parce que sa vitesse varie en fonction de la tension et son couple moteur est bien adapté au service demandé. Ainsi, en régime de démarrage, à faible vitesse, le couple moteur est important et permet de fournir l'énergie cinétique suffisante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

divers frottements. Ce type de moteur est donc bien adapté à un pompage variable au fil du soleil.

Dans un moteur shunt, les enroulements induits et les inducteurs sont alimentés, en dérivation, par la même source, sous tension constante. La vitesse d'un moteur shunt sera sensiblement constante, peu importe le couple résistant. Par ailleurs, à excitation constante, le couple moteur est proportionnel au courant absorbé ( $I$ ) ; la puissance demandée sera donc proportionnelle au couple résistant.

Le moteur shunt est utilisé surtout dans les machines-outils pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge.

Ce type de moteur est peu adapté au pompage où le couple de démarrage est important [6][7][10].



**Figure (I-8) : Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série**

Le moteur à excitation composée possède deux enroulements inducteurs ; un en série et l'autre en dérivation. Ce moteur possède des propriétés intermédiaires entre celles des deux types déjà mentionnés. Il ressemble à l'un plus qu'à l'autre suivant l'importance relative des enroulements. L'enroulement dérivation limite la vitesse à vide et les variations de vitesse avec la charge. L'enroulement série permet de vaincre un couple résistant très variable en absorbant un courant peu variable.

Ce type de moteur convient particulièrement à l'entraînement des appareils présentant un couple résistant croissant avec la vitesse, tels les ventilateurs et les pompes.

Parmi les moteurs à courant continu, seuls les moteurs à aimants permanents (3 HP et moins) et les moteurs série sont utilisés pour des applications de pompage solaire. Eux seuls

arrivent à avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable.

#### 3.4.2. Systèmes de pompage moteurs à commutation électronique

Le rendement des moteurs CC peut atteindre 75 à 85%, même à des puissances nominales faibles de l'ordre de 100- 200 watts, comme c'est le cas dans les plus petites installations de pompage à énergie solaire. La plupart des moteurs à courant continu sont munies d'un induit ou rotor à collecteurs/balais, tout comme le moteur universel. Or, il s'agit là d'un inconvénient majeur pour le pompage de l'eau avec des groupes motopompes immergés.

Toutefois, des moteurs à aimant permanent sans balais ont été récemment mis au point. Ces moteurs comportent des aimants fixés au rotor, tandis que les enroulements du stator sont traversés par un courant alternatif de fréquence variable, de manière à s'adapter à la vitesse de rotation. L'adaptation de la vitesse est assurée au moyen d'un capteur de position installé sur le rotor qui mesure la vitesse et détermine la position de l'arbre, ce capteur commande un circuit électronique à alimentation DC pour assurer la fonction de commutation. Ce type de moteurs a une qualité mécanique du même niveau que le moteur à induction, et ils peuvent, le cas échéant, être scellés en permanence à une pompe immergée. Cependant, ils sont toujours fabriqués en nombre limité, et ils doivent être munis d'un commutateur électronique sophistiqué d'un coût relativement élevé (à la date de la rédaction de cette publication). Avec l'utilisation de plus en plus croissante des pompes solaires, ces moteurs pourraient devenir d'un emploi plus courant et sans doute à un prix plus abordable.

#### 3.4.3. Systèmes de pompage avec moteur à courant alternatif triphasé

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants où le coût additionnel de l'onduleur est moins significatif.

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire.

Le moteur alternatif pour le pompage solaire est habituellement de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage). Celui-ci tourne autour de deux paliers lubrifiés par le liquide de refroidissement dont est rempli le moteur. Le stator est noyé dans une résine, qui lui assure une bonne tenue mécanique, une bonne dispersion calorique et une étanchéité parfaite. Ces moteurs sont conçus pour être immergés et utilisés dans une eau d'une température maximale d'environ 35 °C. Ils doivent nécessairement être alimentés par un onduleur qui convertira le courant continu des modules PV en courant alternatif [8][9].

Dans le cas d'un moteur bipolaire à un courant triphasé de fréquence  $w$ , la vitesse de rotation du moteur, dite vitesse de synchronisme, est de 2900 à 3 000 T/mn (fréquence de 50 à 60 Hz).

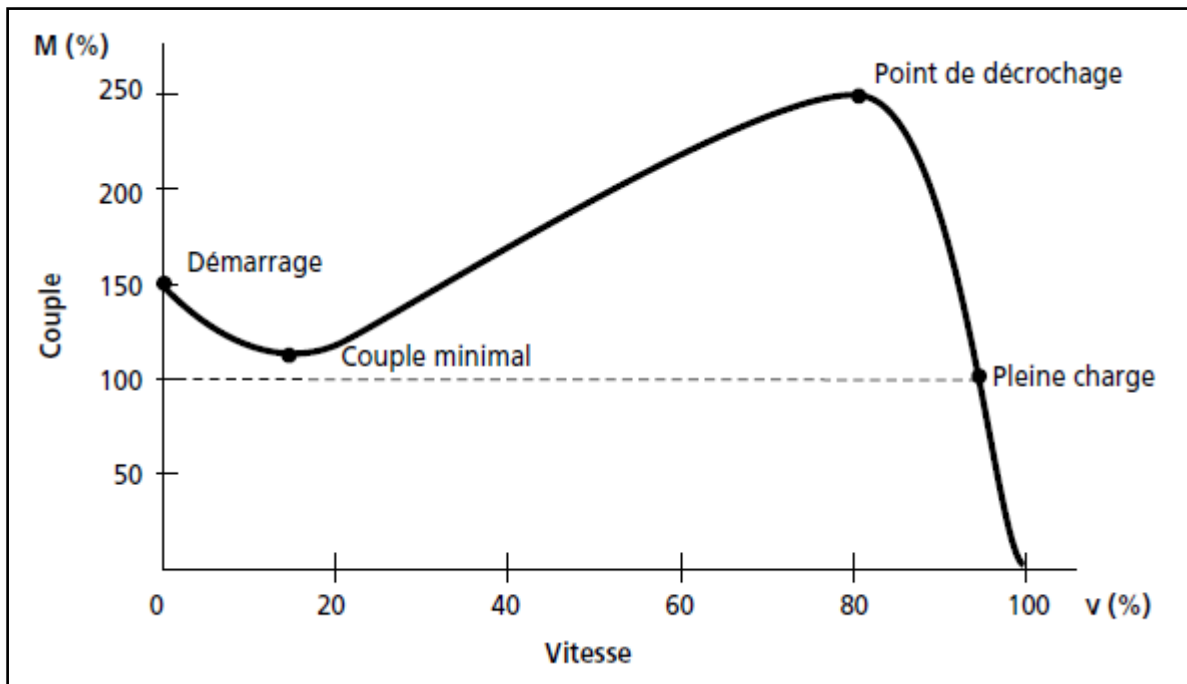


Figure (I-9) : Courbe du couple en fonction de la vitesse du moteur asynchrone bipolaire

Au démarrage, le moteur développe un couple d'environ 150% du couple nominal. En pleine charge, la vitesse du moteur reste relativement constante pour une grande variation du couple. Si la charge mécanique excède 250%, le moteur s'arrêtera (point de décrochage). Les moteurs de petite puissance (<10kW) atteignent leur couple maximal (point de décrochage) à environ 80 % de la vitesse synchrone. La vitesse nominale est d'environ 4% de la vitesse synchrone (glissement de 4%).

Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85 %. À ceci il faut ajouter le rendement de l'onduleur qui est de 90%-95% sur une plage de fonctionnement importante. Le rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80 % sur une plage de fonctionnement relativement importante.

De plus, ces onduleurs sont équipés pour suivre le point de puissance maximal du champ photovoltaïque permettant un pompage solaire au fil du soleil relativement efficace.

### 3.5. Couplage générateur PV – groupe de pompage

Parce qu'il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans les batteries, le moteur d'une pompe solaire fonctionnera habituellement « au fil du soleil », c'est-à-dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie.

Dans ce cas, il est important que la puissance fournie par le générateur PV soit utilisée le plus complètement possible au point de fonctionnement maximal du groupe motopompe sur la plage de fonctionnement la plus large possible. Nous avons vu que différents types de moteurs et de pompes engendrent des caractéristiques de fonctionnement différentes. Le choix d'un régulateur ou d'un onduleur dépendra étroitement de ces caractéristiques.

L'emploi d'une batterie fixe le point de fonctionnement du groupe motopompe sur une plus petite plage de fonctionnement. Ainsi, la pompe fonctionne à couple constant, donc à rendement constant dans le cas d'une pompe volumétrique. Le démarrage d'une pompe centrifuge sera également plus efficace, la puissance de démarrage, plus élevée, pouvant être fournie dès le départ. Néanmoins, l'emploi d'une batterie ne rend pas inutile l'utilisation d'un régulateur de charge. Les caractéristiques de sortie de l'électricité fournies par la batterie sont plus homogènes, mais une adaptation à la charge variable d'une pompe sera néanmoins nécessaire dans la plupart des cas.

### 3.5.1. Adaptateur de charge (moteur continu)

Nous allons voir que les courbes caractéristiques courant-tension du groupe motopompe et du générateur solaire peuvent être très variables. En fait, selon l'instant de la journée, le type de pompe utilisée et les conditions d'utilisation du forage, le moteur de la pompe ne fonctionnera pratiquement jamais au point maximal ( $P_m$ ) du générateur PV durant la journée. Nous allons voir au chapitre 4 que l'adaptateur de charge (maximum power point tracking ou MPPT) est un dispositif électronique permettant de varier le point de fonctionnement du champ (voir figure (I-10)). L'adaptateur de charge sera particulièrement nécessaire au démarrage d'une pompe volumétrique, en augmentant la tension de fonctionnement acceptable par le moteur. Il permettra également de meilleurs résultats du groupe motopompe lors d'ensoleillements faibles.

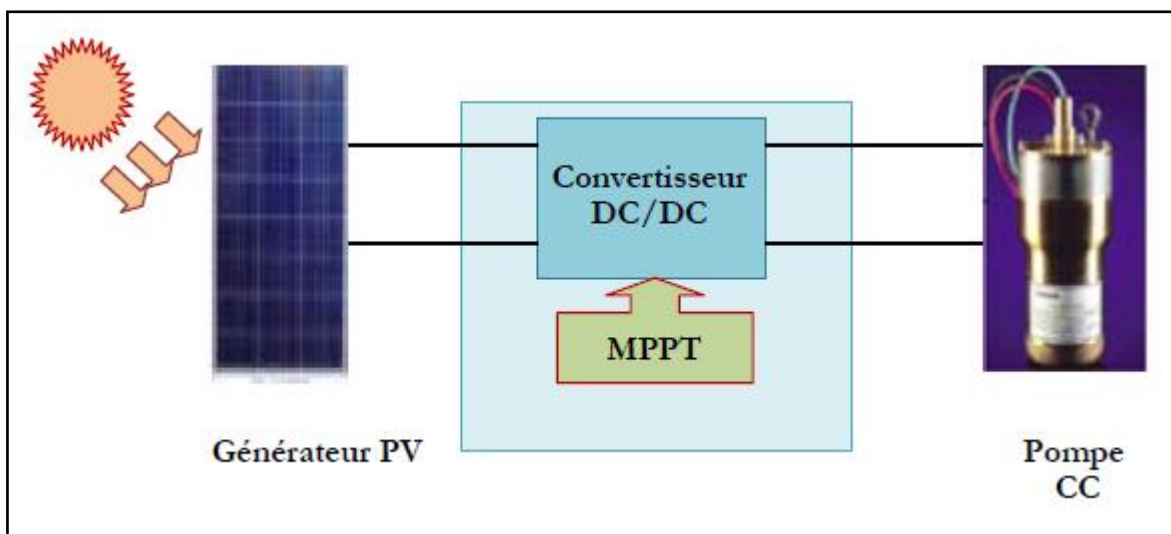


Figure (I-10) : couplage via convertisseur DC/DC

### 3.5.2. L'onduleur (moteur alternatif)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

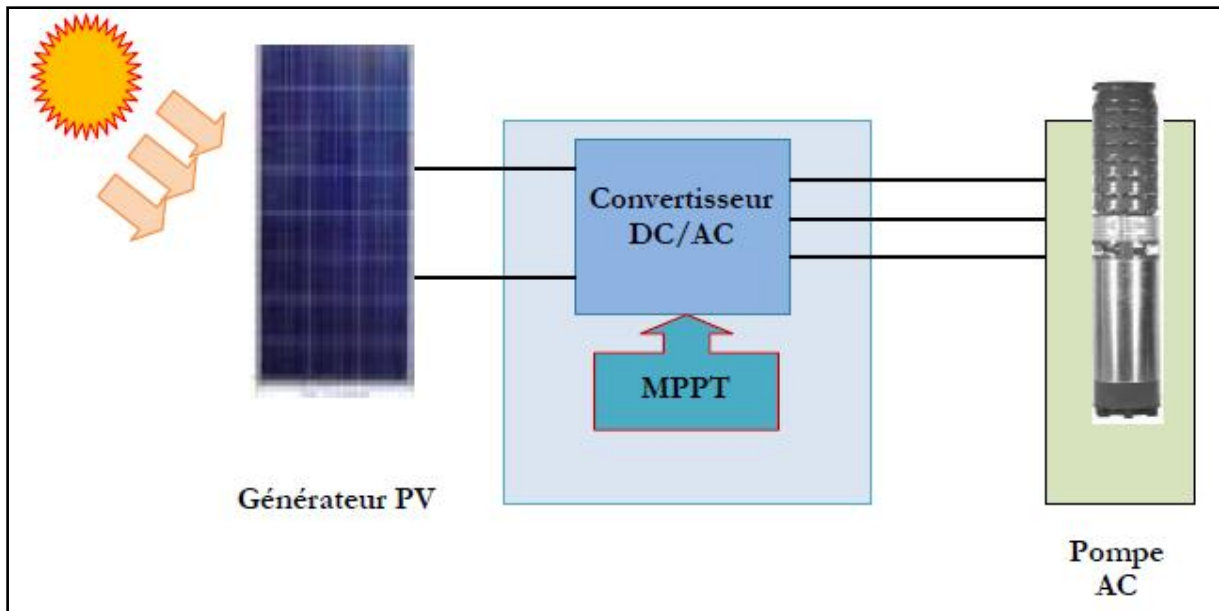


Figure (I-11) : couplage via convertisseur DC/AC

Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence ( $f$ ) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative ( $U$ ) sur la fréquence –  $U/f$  – est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement.

La tension nominale du courant alternatif peut être standard (220 ou 380 V) ou adaptée à un moteur spécifique d'une application photovoltaïque (80 V).

On distingue plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (PWM, *pulse-width modulation*).
- Onduleur à onde sinusoïdale.

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par



effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec de petits systèmes de pompage.

L'onduleur à modification de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif.

L'onduleur à onde sinusoïdale n'a pas la capacité de surcharge des précédents onduleurs et son coût est relativement élevé. Il est peu employé pour les systèmes de pompage.

### 3.6. Les pompes photovoltaïques

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.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau [7].

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

#### 3.6.1. Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique d'un moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va donner de l'énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont les suivantes.

- ✓ Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage ; cela est particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation de modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement.
- ✓ Grâce à son extrême simplicité, le système peut être couplé directement sur une machine tournante : moteur électrique, essence, diesel...



- ✓ Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration : elles doivent être amorcées pour fonctionner, de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto-amorçantes.
- ✓ Elles peuvent être aussi bien immergées que disposées en surface.
- ✓ Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

### 3.6.2. Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage.

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- ✓ elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/h) et aux grandes hauteurs.
- ✓ elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes.
- ✓ le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique  $I = f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

## 4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés des généralités sur l'énergie solaire et le pompage photovoltaïque. Nous avons brièvement décrit le rayonnement solaire ; l'état de l'énergie solaire en Algérie est mentionné. Les usages de l'énergie photovoltaïques sont cités.

Nous avons ensuite présentés un historique sur le pompage photovoltaïque, les éléments du système de pompage photovoltaïque et les principes généraux du pompage solaire.

En fin nous avons présentés les différents systèmes de pompage avec différent moteurs, à courant continu ou alternatif et les différentes pompes utilisées dans le domaine de pompage photovoltaïque.

## 1. Introduction

Les moteurs asynchrones monophasés sont utilisés là où l'alimentation triphasée est indisponible. Leur utilisation constitue une solution pour le fonctionnement des systèmes, mais certes avec un mauvais rendement [11, 12]. En effet, pour les mêmes dimensions, la puissance d'une machine triphasé est 3 fois plus grande que celle en monophasé. Malgré les inconvénients des machines à induction monophasées vis-à-vis aux machines triphasées demeurent utile pour des utilisations dans les domaines domestiques et agricoles.

Ce présent chapitre est structuré en trois parties. Dans la première partie, on présente le principe de fonctionnement des machines à induction (monophasées et triphasées), ainsi que leurs schémas équivalents ramenés au stator. Dans la seconde partie, on s'intéresse aux principales configurations de moteurs monophasés (sans et avec condensateur permanent). La dernière partie porte sur les essais effectués (à courant continu, à vides et en court-circuit) et la détermination des paramètres des machines à induction monophasée par la méthode de VEINOTT [11, 12].

## 2. Machines électriques monophasées

La machine asynchrone monophasée est constituée d'un rotor identique à celui de la machine asynchrone triphasée et un stator ayant deux enroulements au stator. Ces deux enroulements sont différents et sont placés en quadrature.

### 2.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des machines asynchrone est basé sur la production d'un champ tournant qui provoque la variation de la f.é.m., [13], induite produisant des courants induits dans les enroulements du rotor. Ces courants d'après la loi de *Lenz*, s'opposent par leurs effets à la cause qui lui a donné naissance par la création d'un couple électromagnétique entraînant la rotation du moteur à sa vitesse nominale.

### 2.2. Champ pulsant

*LEBLANC* démontre qu'un enroulement parcouru par un courant alternatif de la forme, crée un champ magnétique pulsant dans l'espace et dans le temps, décomposé en deux champs glissants de même amplitude maximale, de la même vitesse et de sens de rotation inverse [13], l'induction magnétique en un point de l'entrefer, figure (II-1) est donnée par l'expression (II.1).

Lorsque qu'un bobinage est soumis à un courant alternatif, il crée un champ magnétique pulsant. Ce champ est décomposable en deux champs magnétiques glissants direct et inverse de sens opposé, figure (1-2).

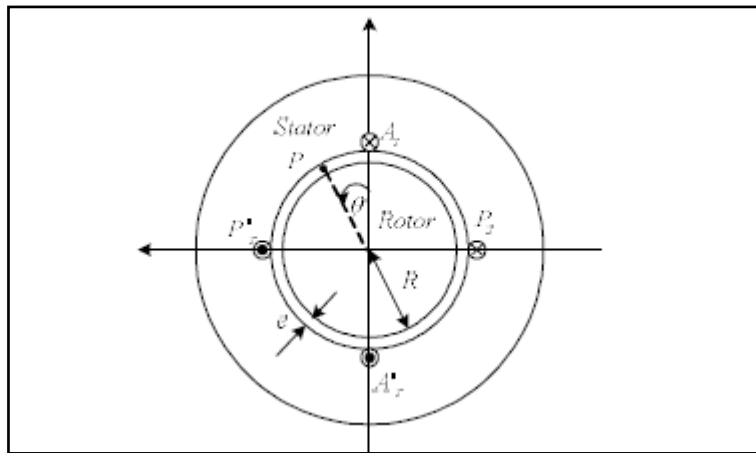


Figure (II-1) : Enroulements de la machine diphasée

$$B(P, t) = B_{Max}[\cos(\omega t + p\theta) + \cos(\omega t - p\theta)] \quad (II - 1)$$

$$B_{Max} = \frac{\mu_0 n I_{mas}}{2E} \quad (II - 2)$$

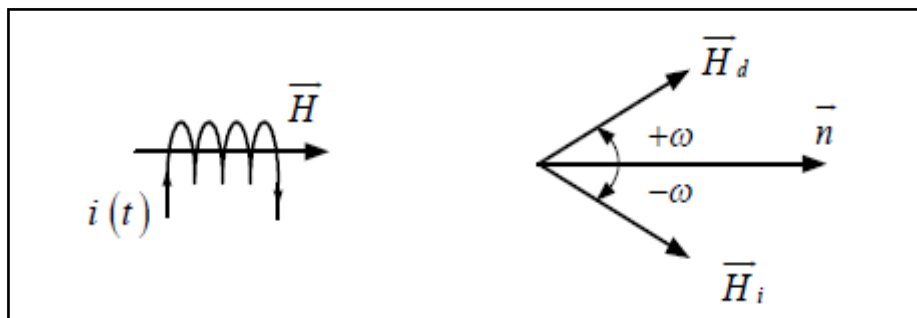


Figure (II-2) : Champs magnétiques créés par une seule bobine

### 2.3. Schéma équivalent du moteur asynchrone triphasé

Le schéma équivalent par phase d'une machine asynchrone triphasé est connu et donné par la figure (II-3), [13,14].

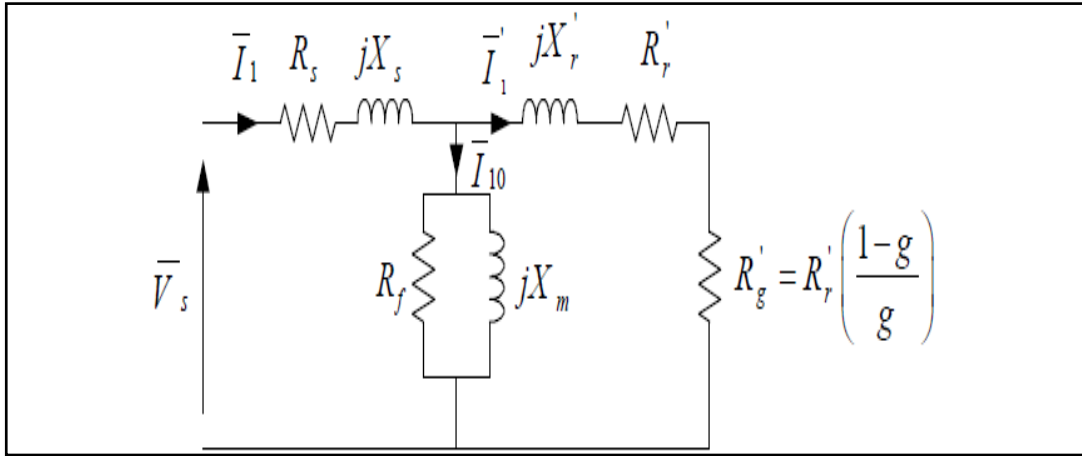


Figure (II-3) : Schéma équivalent du moteur asynchrone triphasé ramené au stator

#### 2.4. Schéma équivalent de la machine asynchrone monophasée

L'enroulement monophasé du stator crée un champ pulsant décomposable en deux champs tournants direct et inverse produisant un couple résultant, [13]. Le comportement du moteur asynchrone monophasé est le même que celui de deux machines asynchrones montées sur le même arbre et qui sont couplés en inverse comme il est indiqué par la figure (1-4).

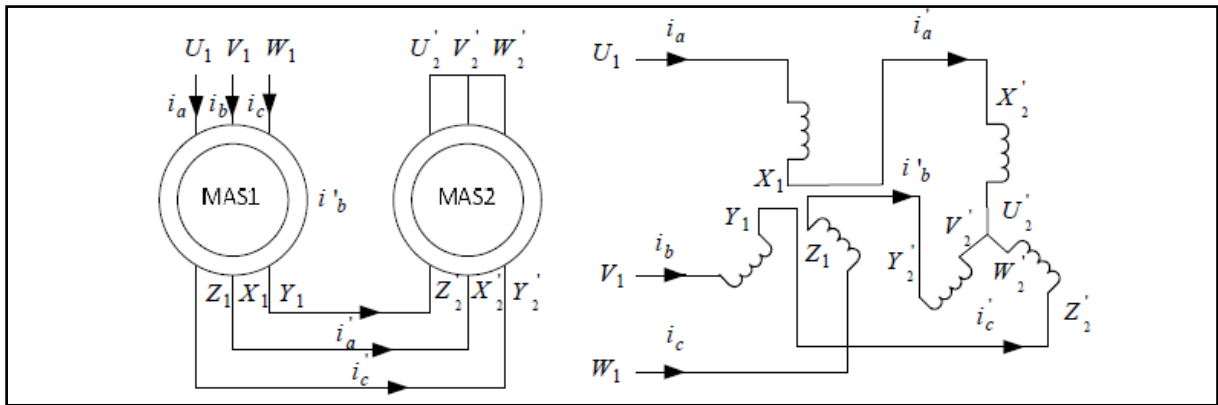


Figure (II-4) : Schéma équivalent d'un moteur asynchrone monophasé

Les machines asynchrones triphasées MAS1 et MAS2 sont identiques. Les enroulements du stator des deux machines sont montés en série de sorte que la première est alimentée par une source directe triphasée, alors que la seconde est en inverse.

Pendant le fonctionnement normal, les moteurs tournent à des vitesses nominales qui dépendent du glissement  $g$ .

La vitesse mécanique  $\Omega_{s1}$  du moteur MAS1 est donnée par (II.3).

$$\Omega_{s1} = \frac{\omega_s}{p} \tag{II - 3}$$

Le glissement  $gd$  de la machine MAS1 est de la forme suivante :

$$g_d = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{w_s - w_r}{w_s} = g \quad (II - 4)$$

La machine MAS2 tourne à la vitesse  $\Omega_{s2}$ .

$$\Omega_{s2} = -\frac{w_s}{p} \quad (II - 5)$$

Le glissement  $g_i$  de la machine MAS2 est de la forme suivante :

$$g_i = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{-w_s - w_r}{-w_s} = \frac{-w_s - w_r + w_s - w_s}{-w_s} = 2 - g \quad (II - 6)$$

Le schéma équivalent de la figure (II-5) de la machine asynchrone monophasé est l'association de deux machines asynchrones triphasées parfaitement identiques qui sont montées en série. Ce schéma équivalent se ramène à celui de la figure (II-5) en remplaçant les impédances du stator par une seule impédance équivalente.

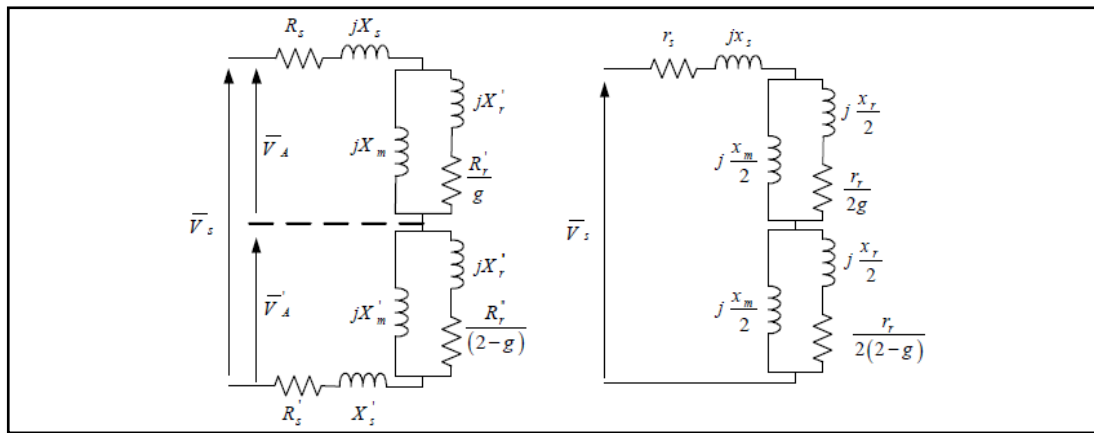


Figure (II-5) : Schéma équivalent du moteur asynchrone monophasé ramené au stator

Les paramètres du moteur à induction monophasé sont donnés par les relations suivantes, telles que :

$$\begin{cases} r_s = 2R_s \\ x_s = 2X_s \\ x_m = 2X_m \\ r_r = 2R_r \\ x_r = 2X_r \end{cases} \quad (II - 7)$$

## 2.5. Différentes configurations des machines électriques monophasées

Les machines asynchrones monophasées à un seul enroulement ne peuvent pas créer un champ tournant. Plusieurs techniques ont été adoptées et développées afin de remédier au problème de démarrage et favorisent un des deux champs pulsants. On présente ici quelques configurations de machines à inductions monophasées.

Trois principales structures sont industrialisées, les moteurs à condensateur permanent, les machines qui utilisent le condensateur seulement pendant la phase de démarrage et les moteurs sans condensateur qui sont très faiblement utilisés.

### 2.5.1. Moteur à induction à condensateur permanent

Ce type de moteur est composé de deux enroulements statoriques identiques figure (II-6), de même nombre de spires et de même section des fils [13,15]. Généralement, les enroulements principal et auxiliaire sont désignés respectivement par les lettres ( $U1, U2$ ) et ( $Z1, Z2$ ), et ils sont alimentés par une même source de tension alternative pour permettre un démarrage du moteur asynchrone, il faut placer un condensateur, dit condensateur de démarrage, qui sera monté en série avec l'enroulement secondaire afin que les courants qui le parcourent soient en quadrature de phase, figure (II-6). Le fait d'avoir deux enroulements parcourus par des courants alternatifs génèrent un champ magnétique tournant produisant la rotation du moteur dans un premier sens de rotation l'inversion du sens s'obtient par une simple permutation de l'alimentation aux bornes des enroulements statoriques.

Les moteurs asynchrones à condensateur permanent sont exploités pour des utilisations de faibles puissances avec une consommation identique pour les deux sens de rotation de la machine.

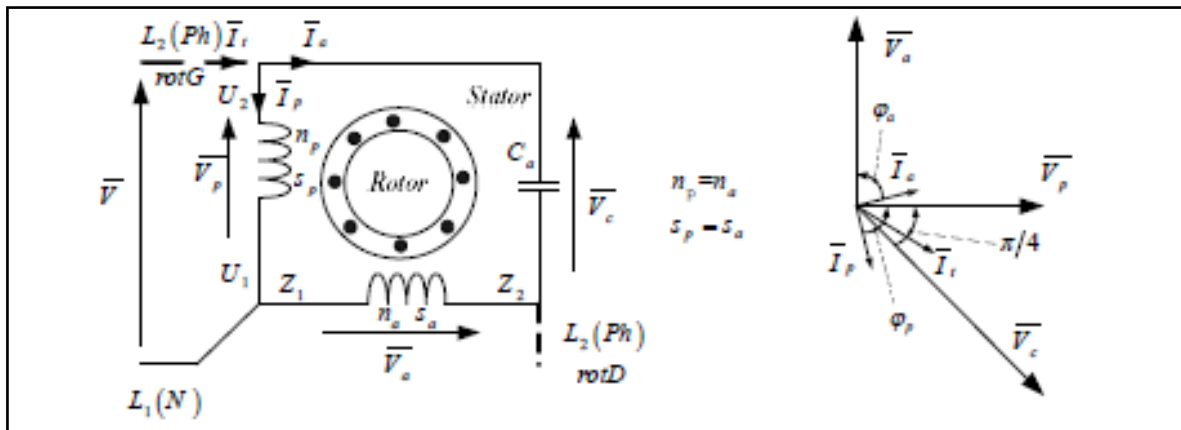


Figure (II-6) : Schéma de principe d'un moteur asynchrone à condensateur permanent

Pour avoir un champ magnétique tournant à  $\omega_s$  il faut que les deux courants, principal et auxiliaire, soient en quadrature. L'induction magnétique résultante générée par les deux enroulements du stator est définie par la relation (II.5).

### 2.5.2. Moteur à condensateur de démarrage

Les machines à induction à condensateur de démarrage comportent deux phases. Le schéma synoptique est donné par la figure (II-7) à savoir, une phase de marche dit principal et une phase de démarrage dit auxiliaire [13et 15].

- ✓ L'enroulement principal occupe le deux tiers des encoches du stator. La section des fils de l'enroulement de marche est plus importante que celui de l'enroulement auxiliaire qui est conçu juste pour la phase de démarrage. Puisque la résistance est

inversement proportionnelle à la section, la résistance ohmique de l'enroulement principal demeure très faible.

- ✓ L'enroulement auxiliaire occupe le reste des encoches. Il est caractérisé par une faible section de fil et de valeur ohmique plus importante que celui de la phase de marche.

Le repérage des enroulements, principal et auxiliaire, sont similaires à ce lui du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanente.

Le démarrage de ce type de moteurs est assuré par une alimentation simultanée des enroulements principal et auxiliaire, une fois la machine asynchrone monophasée fonctionne et commencera à tourner au voisinage de sa vitesse nominale, un contact centrifuge placé électriquement en série avec le condensateur et mécaniquement entre la partie tournante appelé arbre du moteur et la partie fixe dite stator. Dès que la vitesse atteint sa valeur nominale le contacte s'ouvre en assurant une interruption du courant auxiliaire, par conséquent le moteur rentre dans sa phase de fonctionnement normal sans condensateur.

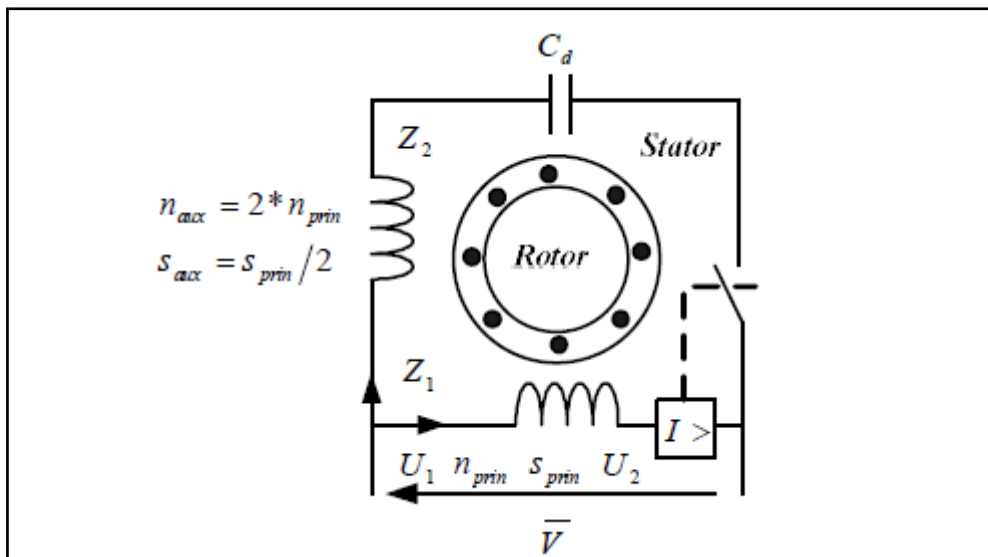


Figure (II-7) : Schéma de principe d'un moteur à condensateur de démarrage

### 2.5.3. Moteur à induction sans condensateur

Il existe plusieurs types de machines à induction sans condensateur. Les moteurs les plus répandus sont les moteurs à phase de démarrage à haute résistance et les moteurs à enroulement de démarrage, de ce fait les courants principal et auxiliaire sont en quadrature de phase assurant la création d'un champ magnétique glissant [13,15].

### 2.5.4. Moteur à phase de démarrage à haute résistance

Les moteurs à phase de démarrage à haute résistance sont reconnus sous le nom de "Split-Phase"[13]. Ce sont des machines asynchrones d'ancienne génération où la technologie des condensateurs n'est pas bien avancée. Elles sont constituées de deux enroulements, le premier dit principal branché directement sous la tension du réseau, alors que le second dit auxiliaire est placé en série avec une résistance de grande valeur ohmique. Généralement,

cette résistance est intégrée dans l'enroulement auxiliaire. Un contact centrifuge est placé en série avec l'enroulement auxiliaire s'ouvre dès que la vitesse du moteur atteint sa valeur nominale.

Ce type de machine est, généralement, fragile vu que la phase auxiliaire présente une très faible section de fil qui peut être grillée suite à un blocage du relai centrifuge. Pour vaincre ces problèmes, il faut procéder le démarrage progressif des machines alternatives, par conséquent, les courants de décollage débouchent vers des valeurs qui tournent au tour des valeurs limites. Cette solution s'avère techniquement efficace, par contre, elle présente défaut vis-à-vis des utilisations massives à usage industriel.

#### 2.5.5. Moteur à enroulement de démarrage dit « bifilaire »

Les moteurs "Split-Phase" [13,15] présentent un inconvénient majeur qui réside dans la fragilité de son enroulement auxiliaire. Pour cette raison, une nouvelle génération de moteur dite moteur à enroulement de démarrage « bifilaire » est apparue. Ce type de moteur est composé de deux phases asymétriques, une phase principale dotée de 1/3 du nombre de spires, alors que l'enroulement auxiliaire est composé de 2/3 des spires. Ce dernier est appelé phase de démarrage dont 70% des spires sont montés dans un sens alors que le reste (30%) sont enroulés dans un sens inverse afin d'augmenter sa valeur ohmique. Le principe du fonctionnement est similaire à celui des moteurs présentés auparavant. On obtient des moteurs économiques ayant un petit couple de démarrage, néanmoins supérieur à ce qu'on obtiendrait avec un moteur à condensateur permanent

### 3. Identification des paramètres du moteur monophasé

Pour identifier les paramètres de la machine asynchrone monophasée, on a fait recours à la méthode de VEINOTT, [13,12 et16]. A partir des essais (à courant continu, à vide et en court circuit), on déterminera les différents paramètres de notre machine d'étude. Ce moteur est caractérisé par une puissance nominale de 750 W, une tension nominale de 220V, un courant nominal de 3.7A et de facteur de puissance de valeur 0,86.

La figure (II-8) représente le schéma équivalent d'une phase de la machine asynchrone biphasée en tenant compte des pertes dans le fer. Ces pertes sont représentées par une résistance fictive  $R_f$ .



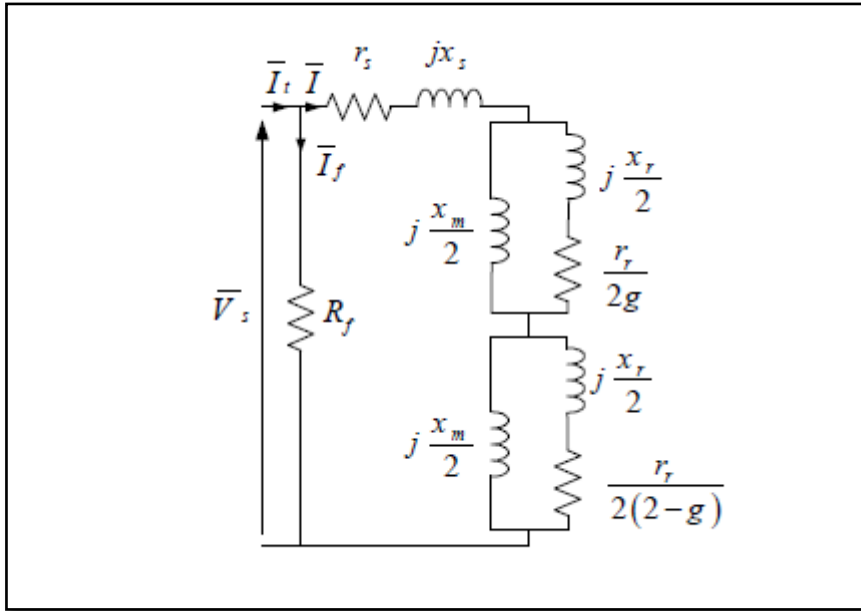


Figure (II-8) : Schéma équivalent d'une phase du stator d'un moteur asynchrone biphasé ramené au stator

### 3.1. Détermination théorique des paramètres du moteur

Pour déterminer les paramètres d'un enroulement statorique, on a transformé le schéma équivalent de la figure (II.8) à celui de la figure (II.9). On note respectivement  $R_0$  et  $X_0$ , la résistance et la réactance équivalentes à vide, et  $R_{cc}$  et  $X_{cc}$ , la résistance et la réactance équivalentes en court circuit.

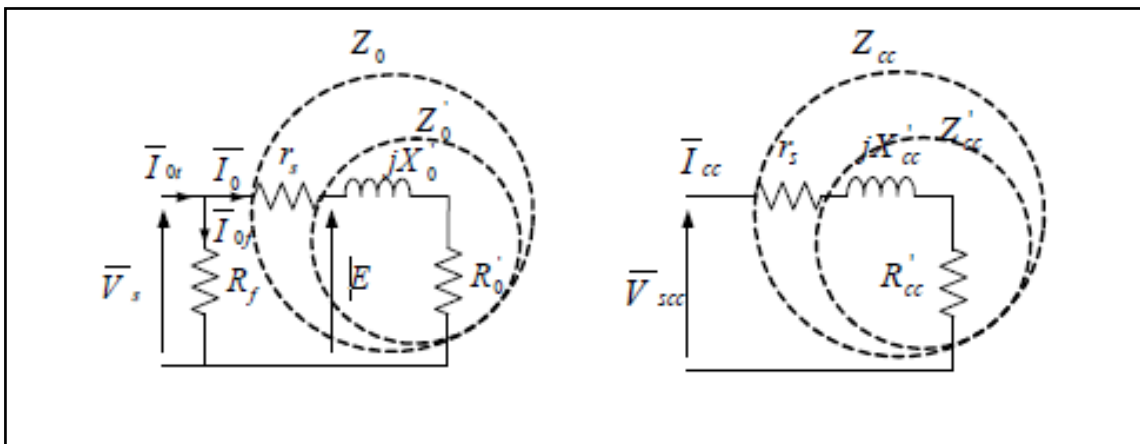


Figure (II-9) : Schéma équivalent à vide (a) et à rotor bloqué (b) d'une phase du stator

#### 3.1.1. Impédance d'entrée à vide

Pendant l'essai à vide les pertes fer ne sont pas négligeables qui seront représentées par une résistance  $R_f$ . mise en parallèle avec l'impédance d'entrée du moteur. La figure (II-9-a) représente le schéma équivalent simplifié d'une phase ramenée au stator. Pendant l'essai à

vide, le moteur tourne au voisinage de la vitesse synchronisme et le glissement tendra vers une valeur proche de zéro. De ce fait, un développement des équations de la figure (II.8) et un changement de variable [(II.10), (II.11) Et (II.12)] ont été établis afin d'aboutir à des équations simple à résoudre [(II.8) et (II.9)].

$$R_0 = r_s + R'_0 = r_s + \frac{(x_a - x_b)r_r}{4x_a \left[ 1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2 \right]} \quad (II - 8)$$

$$X_0 = X'_0 = 0.5 \left[ x_a + \frac{x_b + \frac{r_r^2}{4x_a}}{1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2} \right] \quad (II - 9)$$

Avec :

$$x_a = x_r + x_m \quad (II - 10)$$

$$x_1 = x_s = x_r \quad (II - 11)$$

$$x_b = x_1 + \frac{x_1 x_m}{x_1 + x_m} \quad (II - 12)$$

L'impédance totale du circuit est  $Z = R_f // Z_0$

### 3.1.2. Impédance d'entrée à rotor calé (en court-circuit)

Les pertes fer pendant l'essai à rotor bloqué sont considérées négligeables puisque, d'une part les pertes sont proportionnelles au carré de la tension de l'alimentation du moteur et d'autre part, que la tension appliquée à l'enroulement du stator pour un essai en court-circuit est réduite. La figure (II-9-b) représente le schéma équivalent d'un enroulement du stator lors d'un essai à rotor calé où la vitesse du moteur est nulle et que le glissement vaut 1.

Suite à un développement des équations d'une phase de stator où la résistance  $R_f$  est négligeable, l'impédance d'entrée pendant l'essai en court-circuit est donnée par :

$$Z_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} \quad (II - 13)$$

Telles que :

$$R_{CC} = r_s + R'_{CC} = r_s + \frac{(x_a - x_b)r_r}{4x_a \left[ 1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2 \right]} \quad (II - 14)$$

$$X_{CC} = X'_{CC} = x_s + \frac{x_b + \frac{r_r^2}{4x_a}}{1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2} \quad (II - 15)$$

D'après les schémas équivalents du moteur à induction monophasé par phase concernant les essais réalisés (essai à vide et en court-circuit), on peut déduire les grandeurs physiques et analytiques des variables  $X'_0, R'_{cc}$  et  $X'_{cc}$ .

$$X'_0 = 0.5 \left[ x_a + \frac{x_b + \frac{r_r^2}{4x_a}}{1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2} \right] \quad (II - 16)$$

$$R'_{cc} = R_{cc} - r_s = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - r_s \Rightarrow R'_{cc} = \frac{(x_a - x_b)r_r}{4x_a \left[ 1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2 \right]} \quad (II - 17)$$

$$X'_{cc} = X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{I_{cc}^2} \Rightarrow X'_{cc} = \frac{x_b + \frac{r_r^2}{4x_a}}{1 + \left[ \frac{r_r}{2x_a} \right]^2} \quad (II - 18)$$

On peut déterminer les résistances  $R_{sp}$  et  $R_{sa}$  respectivement de l'enroulement principal et de l'enroulement auxiliaire du stator par la méthode volt ampère métrique, la résistance  $R'_0$  et la réactance  $X'_0$  par l'essai à vide, alors que la résistance  $R'_{cc}$  et  $X'_{cc}$  sont déterminées à partir de l'essai à rotor calé. Les équations [(II.16), (II.17) et (II.18)] présentent un système d'équations non linéaires de trois équations à trois inconnues [ $X_a, X_b$  et  $r_r$ ], les équations seront résolues analytiquement par un logiciel de mathématique appelé Mxima.

### 3.2. Détermination pratique des paramètres du moteur d'étude

On procède à la détermination des paramètres de l'enroulement principal et auxiliaire de la machine monophasée par les essais à courant continu, à vide et en court circuit.

#### 3.2.1. Détermination des paramètres de l'enroulement principal

A l'aide d'un multimètre, on détermine la résistance de l'enroulement principal  $p$ .

En outre,  $R'_0$  et  $X'_0$  seront déterminées à partir de l'essai à vide, par contre les coefficients  $R'_{cc}$  et  $X'_{cc}$  seront établies à partir de l'essai à rotor calé.

La résistance de l'enroulement principale est mesurée en chaud et sa valeur est de  $8.9\Omega$

##### 3.2.1.1. Détermination de $R'_0$ et $X'_0$ par l'essai à vide

Le moteur étant alimenté par une source de tension alternative variable de fréquence constante de 50hertz.

Les valeurs des différentes grandeurs mesurées sont les suivants :

| Tension | Courant | Puissance active | Puissance réactive |
|---------|---------|------------------|--------------------|
| 220V    | 2.3A    | 120W             | 480VAR             |

**Tableau (II-1) : essai à vide pour l'enroulement principal**

Pour une tension d'alimentation nominale, les valeurs de la résistance et de la réactance de l'enroulement principal sont données par :

$$R'_0 = 22.63\Omega \text{ Et } X'_0 = 90.73$$

### 3.2.1.2. Détermination $R'_{cc}$ et $X'_{cc}$ par l'essai à rotor calé

On alimente l'enroulement principal par des tensions réduites pour que le courant de court circuit ne dépasse pas sa valeur nominale qui est de l'ordre de 4A.

| Tension | Courant | Puissance active | Puissance réactive |
|---------|---------|------------------|--------------------|
| 100V    | 3.85A   | 340W             | 210VAR             |

**Tableau (II-2) : essai à rotor cale pour l'enroulement principal**

D'après les relations [(II.18) et (II.19)] et les valeurs dégagées par le tableau (II-2), on peut établir les écritures suivantes :

$$R'_{cc} = 22.93\Omega \text{ Et } X'_{cc} = 14.16\Omega$$

Pour déterminer les paramètres du moteur ( $x_a$ ,  $x_b$  et  $r_r$ ), un logiciel de résolution mathématique appelé MAXIMA a été établi pour faire résoudre un système d'équation à trois inconnues. Le programme de résolution est présenté dans l'annexe A.

On rejette toutes les solutions complexes et les solutions qui présentent un terme négatif, il reste trois solutions. Pour qu'on puisse choisir la solution correcte.

$$(X_a = 168\Omega, X_b = 12.81\Omega \text{ et } r_r = 15.21\Omega).$$

Suite aux équations [(II.11) et (II.12)], les paramètres ( $X_m$  et  $x_1$ ) peuvent être déterminés à partir de deux équations à deux inconnues. Le programme de la résolution est présente dans l'annexe B.

| Paramètres | Rsp  | Rr     | Lsd    | Lr     | Msrd   | xm      |
|------------|------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur     | 8.9Ω | 15.21Ω | 0.297H | 0.276H | 0.256H | 161.46Ω |

**Tableau (II-3) : valeurs des paramètres de l'enroulement principal**

### 3.2.2. Détermination des paramètres de l'enroulement auxiliaire

On refait les mêmes essais pour le second enroulement. La valeur moyenne de la résistance  $R_{sa}$  de l'enroulement auxiliaire est  $21.3 \Omega$ .

#### 3.2.2.1. Détermination de la résistance $R'_{0sa}$ et de la réactance $X'_{0sa}$ par l'essai à vide

On démarre le moteur sous une tension nominale avec la présence du condensateur de démarrage. Une fois la vitesse du moteur atteint la vitesse nominale, on élimine le condensateur et on interrompt l'alimentation de l'enroulement principal. Un tableau de mesure à été établi pour deux séries de points de mesures.

| Tension | Courant | Puissance active | Puissance réactive |
|---------|---------|------------------|--------------------|
| 220V    | 4.1A    | 350W             | 800VAR             |

**Tableau (I-4) : essai à vide pour l'enroulement auxiliaire**

La résistance  $R'_{0sa}$  et la réactance  $X'_{0sa}$  à vide sont déterminées de la même manière de ceux lui des éléments de l'enroulement principal.

$$R_0 = 20.82 \text{ Et } X_0 = 47.59$$

#### 3.2.2.2. Détermination de la résistance $R'_{cc}$ et de la réactance $X'_{cc}$ par l'essai à rotor calé

On cale le rotor du moteur et on alimente l'enroulement auxiliaire par une tension réduite alternative, ensuite on prélève un tableau de mesures pour différentes valeurs de tension comme c'est présenté au tableau (II.4).

| Tension | Courant | Puissance active | Puissance réactive |
|---------|---------|------------------|--------------------|
| 100V    | 1.9A    | 160W             | 100VAR             |

**Tableau (II-5) : essai à rotor cale pour l'enroulement auxiliaire**

Les mêmes démarches ont été prises pour déterminer la résistance et la réactance de court-circuit de l'enroulement auxiliaire, telles que :

$$R_0 = 44.32 \text{ Et } X_0 = 27.70$$

| Paramètres | Rsa   | Rr     | Lsq    | Lr     | Msrđ    | xm    |
|------------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|
| Valeur     | 21.1Ω | 30.57Ω | 0.351H | 0.176H | 0.0014H | 0.90Ω |

Tableau (II-6) : paramètres de l'enroulement auxiliaire

### 3.2.3. Détermination des paramètres des paramètres mécaniques J et f

L'équation fondamentale de la dynamique est une équation différentielle du premier ordre. La solution se décompose en deux termes, un terme forcé et un terme libre qui dépend de la constante du temps mécanique [14]. L'équation fondamentale de la dynamique est donnée par (II.20).

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (II - 20)$$

Pour déterminer la constante du temps mécanique, il suffit d'entraîner le moteur à sa vitesse nominale à vide puis on coupe l'alimentation du moteur et on mesure la pente descendante en vitesse par rapport au temps comme le montre la figure (II-10).

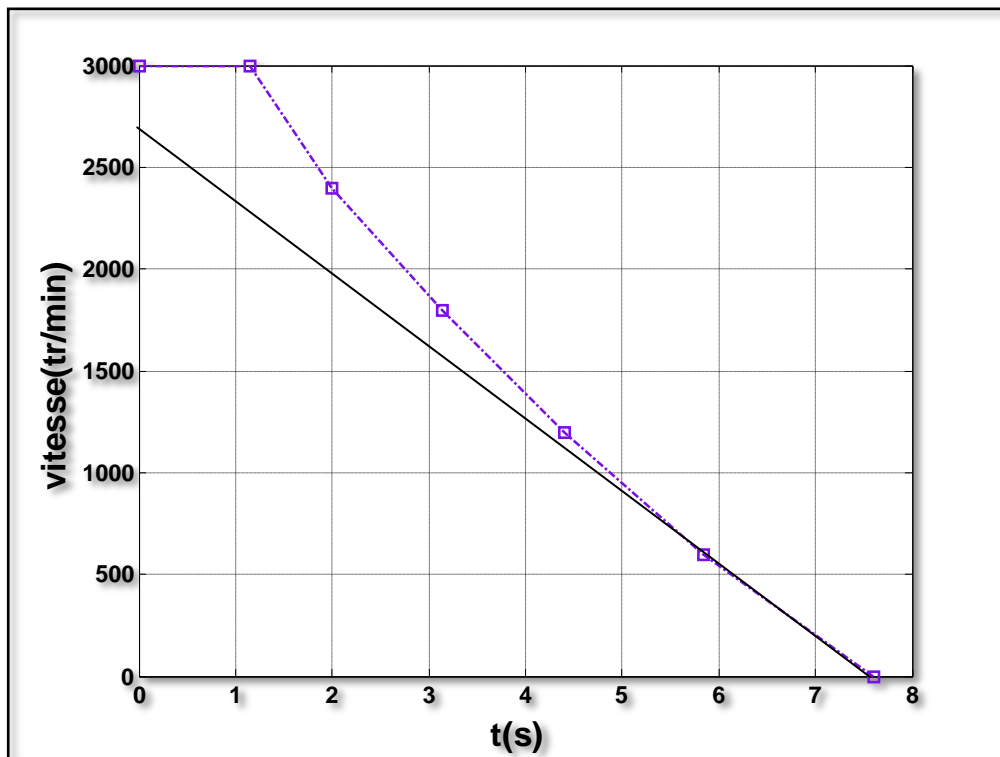


Figure (II-10) : Allure de la vitesse pour un essai de ralentissement

Lors d'un essai de ralentissement en vitesse, le couple électromagnétique et le couple résistant devront être éliminés et la solution de l'équation différentielle sans second membre devient :

$$\Omega = \Omega_0 e^{-\frac{t}{\zeta}} \quad (II - 21)$$

Avec  $\zeta = \frac{J}{f}$  : représente la constante du temps mécanique du moteur asynchrone monophasé.

$\Omega_0$ : désigne la vitesse initiale à l'instant  $t_0$

D'après l'allure de la figure (II-10), la constante du temps mécanique est de 6.4 s :  $\zeta = 6.4s$

La séparation des pertes magnétiques (les pertes dues aux effets par hystérésis et aux pertes parcourant de Foucault) permet de déterminer les pertes mécaniques qui sont proportionnelles au carré de la pulsation du rotor [14,17]. Elles sont obtenues par l'extrapolation de la courbe représentée par la figure (II-11).

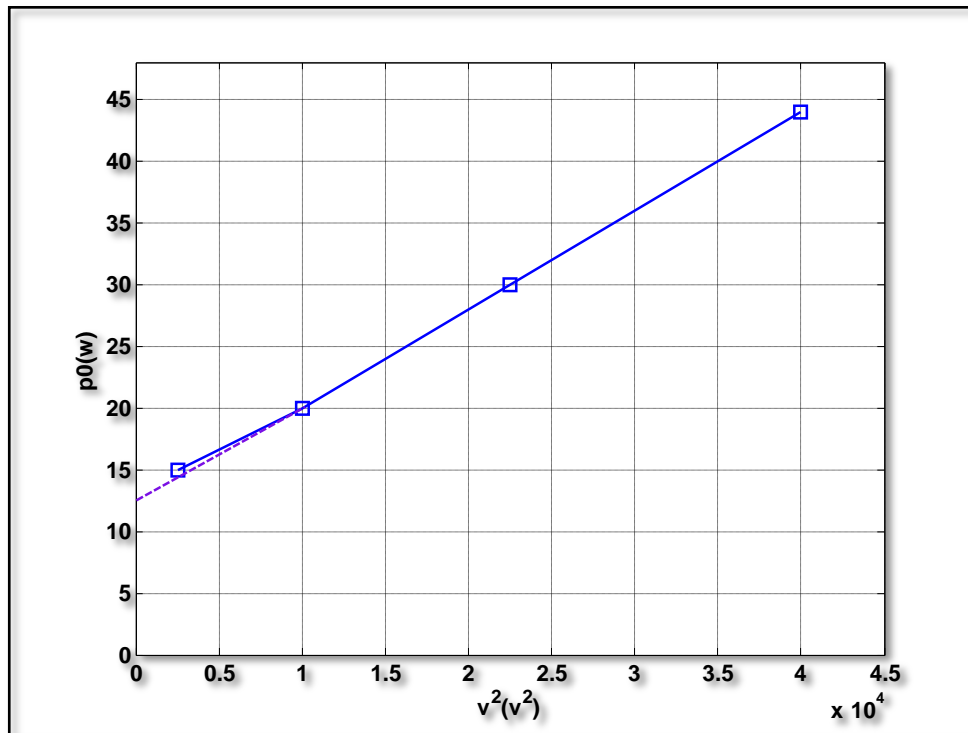


Figure (II-11) : Variation de la puissance à vide en fonction du carré de la tension du stator

La puissance à vide est donnée par la relation suivante :

$$P_0 = P_{mag} + P_{mec} \quad (II - 22)$$

Avec

$$P_{mag} = \frac{V_s^2}{R_f} \quad \text{Et} \quad P_{mec} = f\Omega^2 = 12.5w \quad (II - 23)$$

La puissance à vide représente tout simplement les pertes mécaniques, telles :

$$P_0 = P_{mec} \quad (II - 24)$$

Dans ces conditions, on peut facilement déterminer le coefficient de frottement visqueux  $f$  pour une vitesse nominale de 3000 *Tr /mn* tel que :

$$f = \frac{P_{mec}}{\Omega^2} = 2.4 \times 10^{-6} \text{ Nm / rad s}^{-1} \quad (II - 25)$$

Où  $\Omega$  représente la vitesse mécanique du rotor en [rd/s]

Le moment d'inertie  $J$  peut être déterminé selon la relation  $J = \zeta \cdot f$  d'où  $J = 15 \times 10^{-6}$

Le tableau de l'annexe E représente des différents paramètres du moteur à induction monophasé d'étude.

#### 4. Conclusion

La dissymétrie des enroulements de la machine monophasée rend la détermination de ces paramètres délicate. Pour cela, on a fait recours à plusieurs essais (essai à courant continu, à vide et en court-circuit).

Dans ce chapitre, on a présenté, en premier lieu, le principe de fonctionnement des machines à induction monophasées, par la suite une étude topologique des moteurs asynchrones monophasés a été présentée concernant les machines électriques les plus industrialisées. Enfin, une méthode de détermination des paramètres de la machine asynchrone monophasée a été établie pour paramétrer notre machine d'étude. Cette méthode est une méthode ancienne mais efficacement validée par Mr C. G. VIENOT.



## 1. Introduction :

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement en cours est un modèle "régime permanent". C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée avec sous un système de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable (vecteurs de Fresnel). Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle. Le contrôle de vitesse le plus simple, dit en "V sur f", permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage. C'est un contrôle scalaire. Les équations de la machine qui permettent de calculer le couple et de prévoir les points de fonctionnement sont basés sur le modèle "régime permanent" de la machine. Il est cependant facile à implanter puisqu'il ne requiert plus de puissance de calcul en temps réel de la part de l'organe de commande (micro- contrôleur, DSP Digital Signal Processor) du variateur [33].

## 2. Commande V/f de machine asynchrone monophasée

### 2.1. Modélisation de la machine asynchrone monophasée en régime permanent

#### 2.1.1. Hypothèses de travail

- ✓ Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- ✓ Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.
- ✓ Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que : les flux sont additifs, les inductances propres sont constantes, il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [27][33].

#### 2.1.2. Model en régime permanent on mode équilibré

Si les tensions d'alimentation biphasée, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_p = V_s \cos(\omega_s t) \\ v_{aux} = V_s \cos(\omega_s t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Choisissons de fixer le repère dq au champ tournant. Notons  $\omega_s = \dot{\theta}_s$  la pulsation statorique (on est bien en régime permanent sinusoïdal). De même, nous noterons  $\omega_r = \dot{\theta}_r$  la pulsation rotorique et  $w = \omega_s - \omega_r = \dot{\theta} = P\Omega$  la pulsation mécanique.

$$\begin{cases} v_{sd} = V_S \cos(\omega_S t + \theta) \\ v_{sq} = V_S \cos(\omega_S t - \theta) \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

$$\begin{cases} v_{sd} = V_S \\ v_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

On peut réécrire tout le système d'équation en introduisant la notation complexe :

$$\bar{X} = x_{sd} + jx_{sq} \quad (\text{III-4})$$

$$\bar{V}_S = v_{sd} + jv_{sq} = R_S(i_{sd} + ji_{qs}) + \frac{d}{dt}(\varphi_{sd} + \varphi_{sq}) - \omega_S j(\varphi_{sq} - \varphi_{sd}) \quad (\text{III-5})$$

D'où :

$$\bar{V}_S = R_S I_S + \frac{d}{dt} \varphi_S + j\omega_S \varphi_S \text{ Mais comme on est en régime permanent}$$

Et :

$$\bar{V}_S = R_S I_S + j\omega_S \varphi_S \quad (\text{III-6})$$

$$\bar{V}_r = 0 = R_r I_r + j\omega_r \varphi_r \quad (\text{III-7})$$

$$\begin{cases} \bar{V}_S = R_S I_S + j\omega_S \varphi_S \\ 0 = R_r I_r + j\omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Or

$$\begin{cases} \varphi_S = L_S I_S + M I_r \\ \varphi_r = L_r I_r + M I_S \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_S &= R_S I_S + j\omega_S L_S I_S + j\omega_S M I_r \\ 0 &= \frac{R_r}{g} I_r + j\omega_S L_r I_r + j\omega_S M I_S \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

On peut ramener ce schéma au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor (Figure 6). Pour ce faire, on pose :

$$N_S = L_r \sigma = L_r - \frac{M^2}{L_S} \quad (\text{III-11})$$

$$\begin{cases} N_r' = N_r \left(\frac{L_S}{M}\right)^2 \\ R_r' = R_r \left(\frac{L_S}{M}\right)^2 \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

$$I_r' = I_r \left(\frac{M}{L_S}\right) \quad (\text{III-13})$$

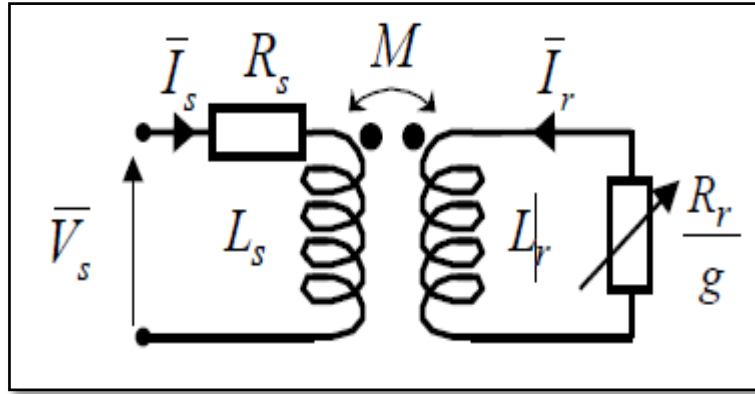


Figure (III-1) : schéma modèle du moteur monophasé en régime permanent

Alors, en partant des équations du schéma par phase de la Figure 5, on peut écrire :

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r' + jW_s N_r' I_r' + jW_s L_s (I_s - I_r')$$

On obtient donc les équations du schéma de la Figure 6 :

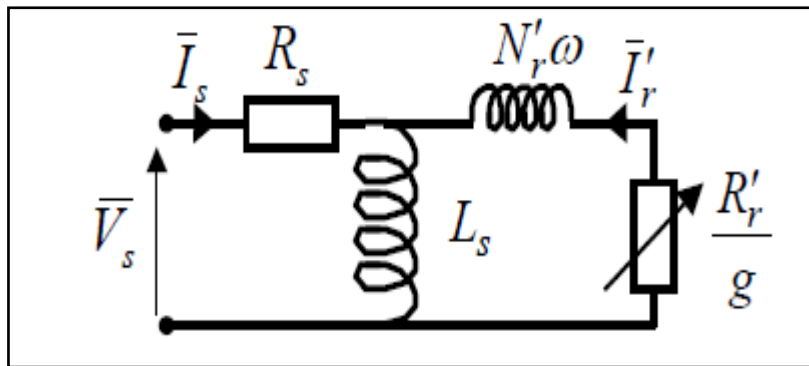


Figure (III-2) : schéma du moteur monophasé en régime permanent ramené au stator

Si l'on écrit le couple en régime permanent de la machine asynchrone, on a :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P}{w_s} \frac{R_r'}{g} I_r'^2 \quad (III-14)$$

$$I_r' = \frac{V_s - R_s I_s}{\left(\frac{R_r'}{g}\right) + j(N_r' w_s)} \quad (III-15)$$

Si l'on néglige la résistance statorique on a :

$$I_r'^2 = \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r' w_s)^2} \quad (III-16)$$

$$C_e = 2 \frac{p}{w_s} V_s^2 \frac{\frac{R_r'}{g}}{\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 + (N_r' w_s)^2} \quad (III-17)$$

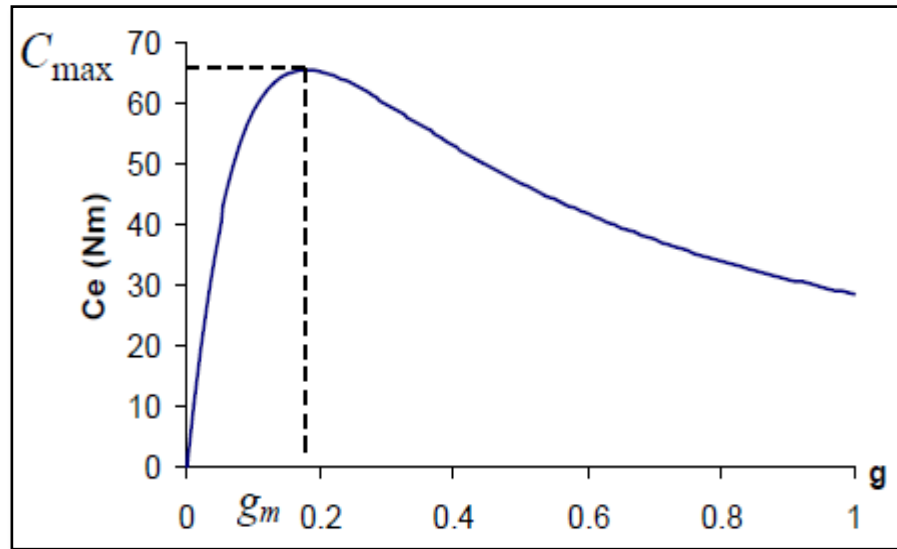


Figure (III-3) : caractéristique du couple d'un moteur monophasé

Pour un glissement faible on a d'ailleurs :

$$C_e = 2 \frac{P}{w_s} V_s^2 \frac{g}{R_r} \quad ; \text{ Une variation quasi linéaire du couple en fonction du glissement} \\ [27][30][33].$$

Le couple maximum correspond à  $\left(\frac{R_r'}{g}\right)^2 = (N_r' w_s)^2$ , c'est-à-dire quand  $g = g_m = \frac{R_r'}{N_r' w_s}$

On a alors :

$$C_{\max} = \frac{2P}{N_r'} \left(\frac{V_s}{w_s}\right)^2 \quad \text{(III-18)}$$

Ce résultat nous sera utile pour expliquer le principe des commandes scalaires en tension.

### 2.1.3. Model en régime permanent on mode déséquilibré

$\omega$  est constant et les 2 tensions stator sont sinusoïdales de même fréquence, de même amplitude mais les enroulements statoriques sont d'impédances différentes. Dans ce cas le système est dite déséquilibré. Pour ce la on intervienne le schéma de la figure Les tensions réelles et leurs transformées complexes de Fresnel sont :

$$\begin{cases} v_p = V_s \cos(\omega_s t) \\ v_a = V_s \cos(\omega_s t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \text{(III-19)}$$

19)

L'alimentation est alors décomposable en une somme de 2 systèmes équilibrés :

$$\overline{v_p} = \overline{v_1^+} + \overline{v_1^-} \quad \text{(III-20)}$$

$$\overline{v_a} = \overline{v_2^+} + \overline{v_2^-} \quad \text{(III-21)}$$

Avec :

$$\overline{v_2^+} = j\overline{v_1^+} \quad \text{et} \quad \overline{v_2^-} = j\overline{v_1^-} \quad (\text{III-22})$$

On s'intéresse aux équations de flux et de couple. Pour un faible glissement on peut négliger les chutes ohmiques dans les résistances du stator. On peut écrire donc :

$$\overline{\phi_s} = \overline{\phi^+} + \overline{\phi^{-*}} = \frac{\overline{v_1^+}}{jw_s} + \frac{\overline{v_1^{-*}}}{jw_s} = \frac{\overline{v_1}}{jw_s} \quad (\text{III-23})$$

$$\|\overline{\phi_s}\| = \frac{\|\overline{v_1}\|}{w_s} \quad (\text{III-24})$$

Pour le couple :

$$C_{em} = \text{Re}(j\overline{\phi_s} \cdot \overline{I_s^*}) \quad (\text{III-25})$$

$$\text{Avec : } \overline{I_s} = \overline{I^+} + \overline{I^{-*}}$$

$$C_{em} = \frac{1}{w} \text{Re}(\overline{v_1^+} \cdot \overline{I^{+*}} - \overline{v_1^{-*}} \cdot \overline{I^-}) + \frac{1}{w} (\overline{v_1^+} \cdot \overline{I^{+*}} - \overline{v_1^{-*}} \cdot \overline{I^{-*}}) \quad (\text{III-26})$$

- ✓ le temps  $t$  n'apparaît plus dans l'argument du 1er terme de  $C_{em}(t)$ , c'est la composante continue moyenne du couple.
- ✓ le 2ième terme est la composante alternative pulsatoire du couple, dont l'argument comporte un terme en  $(2.t)$

Ce résultat nous sera utile pour expliquer le principe des commandes scalaires en tension.

## 2.2.Principe de Contrôle en V/f de la machine asynchrone

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en V/f (V sur f) qui est la plus utilisée. Son principe est de maintenir  $V/f=\text{Constant}$  ce qui signifie garder le flux constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement. En effet, d'après le modèle établi en régime permanent, le couple maximum s'écrit [31][32][33]:

$$C_{max} = \frac{2P}{N_r} \left( \frac{V_s}{W_s} \right)^2 \quad (\text{III-27})$$

On voit bien que le couple est directement proportionnel au carré du rapport de la tension sur la fréquence statorique. En maintenant ce rapport constant et en jouant sur la fréquence statorique, on déplace la courbe du couple électromagnétique (en régime quasi-statique) de la machine asynchrone

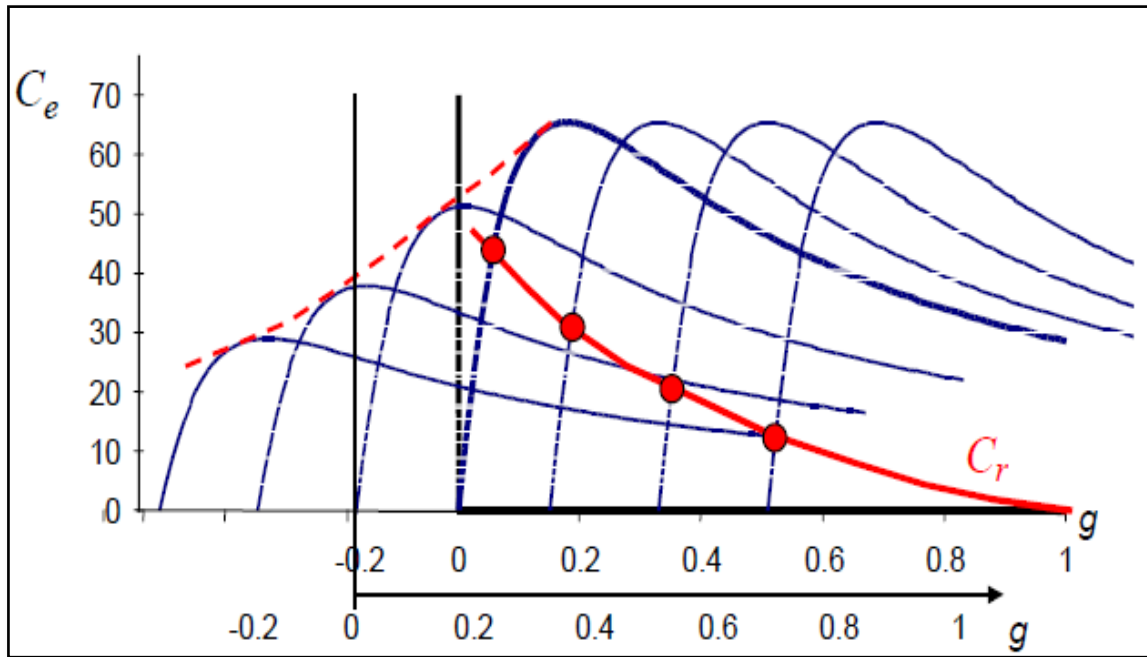


Figure (III-4) : caractéristique du couple d'un moteur monophasé

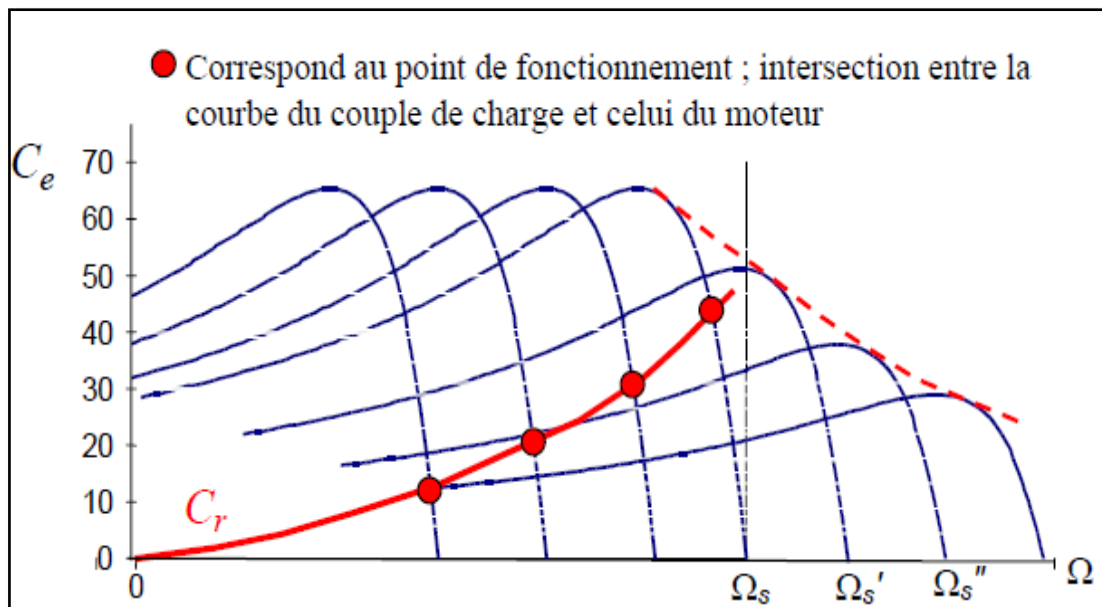


Figure (III-5) : caractéristique du couple d'un moteur monophasé

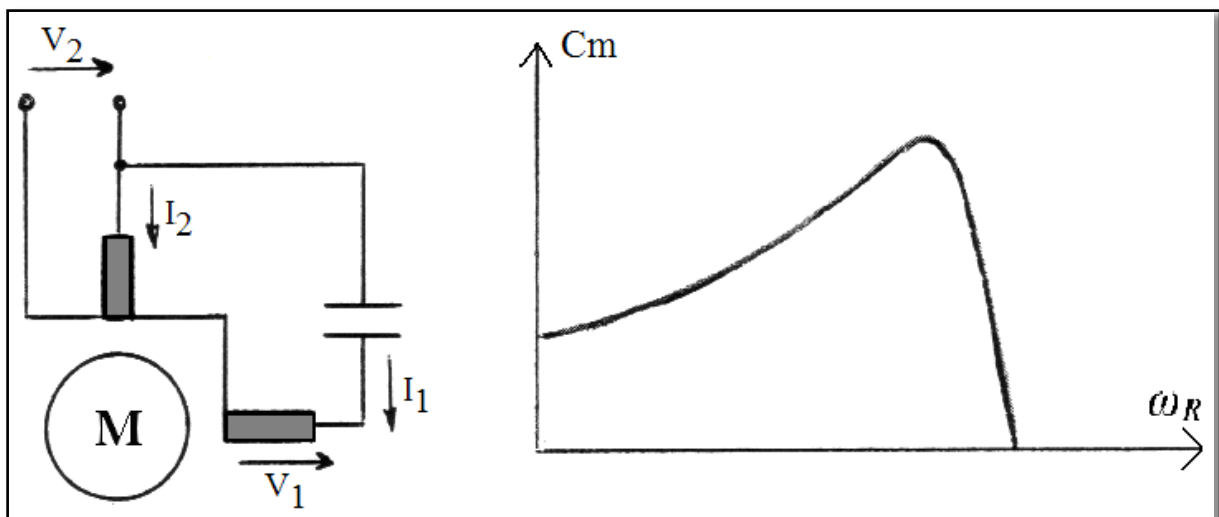
En fait, garder le rapport constant revient à garder le flux constant. Quand la tension atteint sa valeur maximale, on commence alors à décroître ce rapport ce qui provoque une diminution du couple que peut produire la machine. On est en régime de "défluxage". Ce régime permet de dépasser la vitesse nominale de la machine, on l'appelle donc aussi régime de survitesse (partie  $\Omega > \Omega_s$  de la Figure 8).

### 3. Etude de l'alimentation de la machine asynchrone monophasé

#### 3.1. Alimentation avec condensateur permanente

Dès que les puissances dépassent quelques dizaines de watts, les applications motorisées de la vie courante mettent en œuvre souvent des moteurs asynchrones diphasés (ou 'biphasés') à alimentation monophasée et à condensateurs de déphasage.

La phase principale est alimentée directement par onduleur et la phase auxiliaire l'est via un condensateur permettant de déphaser au plus près de  $\pi/2$  son courant par rapport à celui de la première (Figure III-6), afin de restituer un champ tournant circulaire dans le stator.



**Figure (III-6) : Machine asynchrone diphasée à condensateur permanent de déphasage, et caractéristique couple-vitesse.**

La Figure (III-6) illustre une structure à condensateur de déphasage qui reste en permanence connecté à la phase auxiliaire (en anglais : 'Capacitor-run single-phase induction motor', ou 'Split capacitor induction motor'). C'est la structure utilisée pour les moteurs de volets roulants et de pompage. La caractéristique couple-vitesse dépend des paramètres du moteur, mais aussi la valeur de la capacité.

Dans l'immense majorité des cas l'impédance de déphasage est un condensateur. Elle peut être également une association d'un condensateur en série avec une résistance, et très rarement d'une résistance uniquement ou même d'une inductance. Dans ce dernier cas le courant de la phase auxiliaire est en retard sur celui de la phase principale, et non en avance.

Avec une impédance de déphasage constante, la condition de quadrature des courants au stator ne peut être réalisée, si elle l'est, que pour un unique point de fonctionnement, car l'impédance du moteur varie en fonction de sa vitesse de rotation. L'alimentation est dite équilibrée. Dans ce cas le champ tournant est circulaire, et les performances sont optimales.

Pour les autres points de fonctionnement, le champ tournant comporte une composante inverse non nulle, qui lui donne une trajectoire elliptique dans l'entrefer. Pour que le champ soit circulaire sur toute une plage de fonctionnement, il faudrait que l'impédance de déphasage soit variable.

Selon le type d'application et la nature du moteur utilisé, le condensateur peut être calculé pour optimiser le rendement, le facteur de puissance ou le couple au fonctionnement nominal, ou sinon le couple de démarrage [34], [35]. Des compromis sont à réaliser : sur certains moteurs à faible résistance rotor, une valeur importante de capacité élèvera le couple de démarrage, mais au détriment du couple et des caractéristiques nominales (glissement, rendement, facteur de puissance), où des déséquilibres importants de l'alimentation risquent d'apparaître. A l'inverse, un condensateur assurant de bonnes caractéristiques nominales, peut conduire à un couple de démarrage beaucoup trop faible.

### 3.2. Alimentation de la machine diphasée par onduleur

Par rapport à une alimentation avec condensateur de déphasage, les onduleurs offrent plus de souplesse pour la commande du moteur, et néanmoins, de nos jours, à un coût modéré. Ils sont commercialement envisageables pour les volets roulants, si les fonctionnalités qu'ils apportent constituent une réelle plus-value. Ces fonctionnalités supplémentaires peuvent être :

- ✓ Une alimentation diphasée directe  $\bar{V}_1 = -j\bar{V}_2$ , donc notamment absence de couple pulsatoire et réduction du ronronnement du moteur,
- ✓ Une limitation du couple à une valeur maximale, commandée par des impératifs de sécurité, du matériel et des personnes,
- ✓ Une variation de la fréquence d'alimentation, donc de la vitesse, afin de produire un effet de souplesse à l'arrivée en butée, esthétique auprès de l'utilisateur,

Les onduleurs pour la machine asynchrone diphasée sont principalement de 3 types : diphasé à 2 ponts complets, diphasé à point milieu, ou triphasé.

#### 3.2.1. Machine diphasée alimentée par un onduleur triphasé

Pour remédier au problème du point milieu, l'onduleur triphasé (alimentant un moteur diphasé), est une structure permettant de réaliser un point milieu par des moyens électroniques actifs, à savoir un troisième bras de pont, [36].

La figure (III-7) représente le schéma de principe d'un ensemble onduleur associé à un moteur asynchrone monophasé. L'onduleur est alimenté par une source de tension continue VDC. Les interrupteurs d'un même bras de l'onduleur sont toujours complémentaires. Chaque interrupteur de puissance est en réalité réalisé par un transistor en antiparallèle avec une diode.





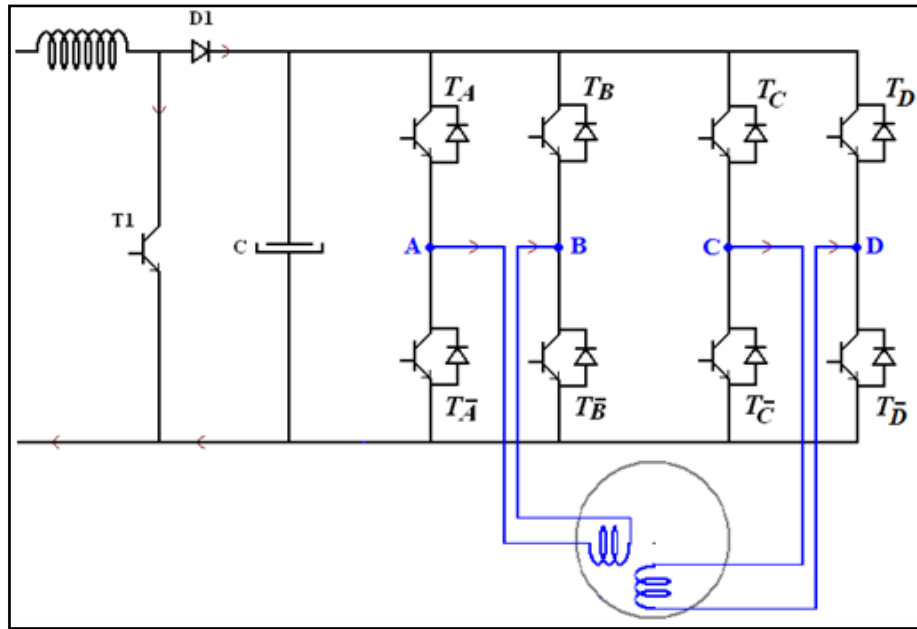


Figure (III-9) : Onduleur diphasé à 2 ponts complets (en H), et alimentation DC

Sur la figure, l'onduleur 4 bras est alimenté en tension continue par un redresseur à absorption sinusoïdale de courant ('*active power factor correction*'). Différentes structures d'étage de [tension secteur AC \_ tension DC] existent. Bien que le dimensionnement de cet étage ne relève pas du cadre de notre étude, la Figure (III-9) présente une structure simple, afin de mettre en évidence que :

- ✓ Les semi-conducteurs requis sont standards, le plus souvent intégrés, et bons marché de nos jours : pont de diode redresseur, transistor T1 et diode D1. Les composants les plus coûteux, à choisir attentivement, sont le circuit intégré « Driver » du transistor T1 de l'alimentation (parfois ce circuit intégré inclut le transistor MOS T1), l'inductance et surtout le condensateur électrochimique.
- ✓ Le besoin d'un filtre pour le respect des normes CEM est réduit, si le courant prélevé sur le réseau est plutôt sinusoïdal.
- ✓ La taille de la capacité de stockage C sera d'autant plus importante que de la puissance active absorbée par le moteur est élevée, mais d'autant plus petite que l'alimentation à découpage sera de qualité.

Notons que sur un moteur moins puissant, 10 / 20Nm, le composant C ne change pas, l'ondulation de la tension continue sera simplement plus faible. L'unicité du montage permet de réaliser des gains de production.

#### 3.2.4. Commande de l'onduleur par PWM Sinus-Triangle :

La commande par Modulation par Largeur d'Impulsion (PWM) est une commande classique, consiste à faire varier la valeur efficace de la tension à la sortie de l'onduleur par la largeur d'impulsion [36]. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à des signaux modulants dont les fondamentaux

représentent la fréquence des courants statoriques. Les résultats de cette comparaison sont les signaux MLI qui sont utilisés comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs de l'onduleur.

Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque transistor.

#### 4. Utilisation du PIC18F4431 pour la commande du moteur

On va décrire comment le PIC18F4431 peut être utilisé pour contrôler un moteur monophasé utilisant la commande à boucle fermée V / f constante. Le code de l'application est construit progressivement. Le PIC18F4431 intègre un ensemble de périphériques, spécialement conçus pour le contrôle des moteurs.

Avant d'entrer dans les applications de contrôle réel, nous devrions comprendre ce qui distingue le PIC18F4431 d'autres dispositifs de Microchip utilisés pour le contrôle de moteur. Le noyau est un ensemble de périphériques uniques qui simplifient les exigences matérielles externes et aussi permettent des niveaux plus élevés de capacité de commande de moteur que les PIC18F452 ou PIC16F7X7 [31,32].

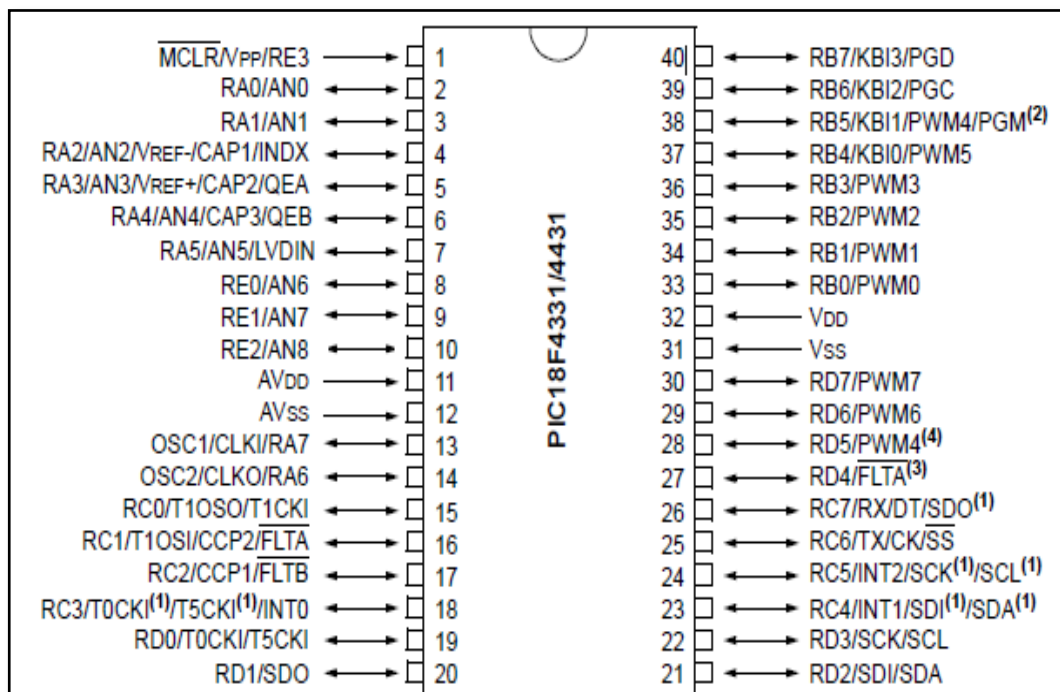


Figure (III-10) : les broches E/S du microcontrôleur PIC18F4431

Les trois périphériques et leurs caractéristiques sont les suivantes:

- a) Module de contrôle de puissance PWM (PCPWM). :
  - ✓ Jusqu'à 8 canaux de sortie
  - ✓ Entrées de protection de défaut de matériel
  - ✓ PWM résolution jusqu'à 14 bits

- ✓ Bord - alignés ou opération de centre – alignés
- ✓ temps mort flexible
- ✓ Mise à jour simultanée de rapport cyclique et de la période
- b) Module du retour mouvement (MFM), composé d'une interface codeur en quadrature (QEI) et une Entrée de capture (IC).
- c) Convertisseur analogique- numérique haute vitesse(HSADC) :
  - ✓ deux circuits échantillonneurs -bloqueurs indépendants
  - ✓ Simple ou la sélection multi-canal
  - ✓ Conversion en modes séquentielle ou simultanée
  - ✓ Quatre - mot résultat FIFO tampon

Comme nous allons voir, chacune de ces caractéristiques fournit un net avantage dans la commande de moteur.

En pratique, le contrôle d'un moteur nécessite de PWM pour le contrôle des huit interrupteurs de deux onduleurs monophasés reliés aux enroulements du stator du moteur Figure (III-11) .Les huit commutateurs forment quatre paires de "demi- pont", qui peuvent être utilisés pour se connecter la jambe d'un enroulement à la borne positive ou négative haute tension bus DC.

Comme indiqué sur la figure, de deux commutateurs sur la même "Demi- pont" ne doit jamais être simultanément amorcé, sinon les bus positifs et négatifs seront court-circuités ensemble. Si un commutateur est activé, alors l'autre doit être éteint; ainsi, ils sont entraînés en tant que des paires complémentaires. Il convient également de noter que l' des dispositifs utilisés dans le demi - pont de commutation (dans ce cas, IGBT) ont souvent besoin de plus de temps pour éteindre. Pour cette raison, un temps mort minimum doit être inséré entre le off et le temps on de deux canaux complémentaires [23, 24,25].

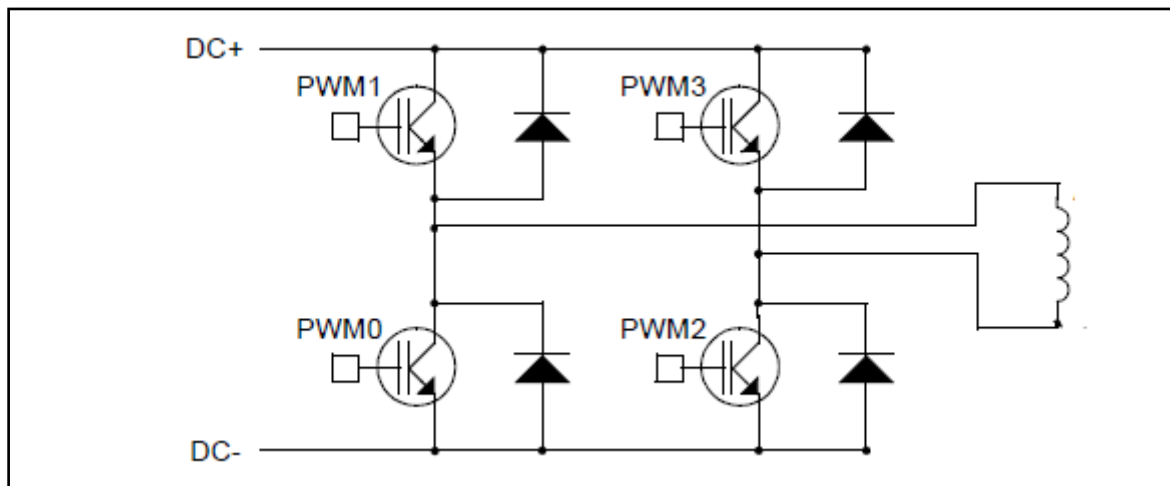


Figure (III-11) : schéma d'un onduleur monophasé

#### 4.1. Stratégies de Commande V / f en boucle ouverte

Les moteurs à courant alternatif sont souvent exploités en boucle ouverte sans retour de la vitesse ou de la position. Le rapport V / f est maintenu constant pour fournir un couple max

sur la plage de fonctionnement. Cette forme de contrôle est relativement peu coûteuse et facile à mettre en œuvre [31,33]

Pour conduire un moteur monophasé, les deux onduleurs sont entraînés par les sorties PWM d'un microcontrôleur, comme représenté sur la Figure (III-12). En changeant le rapport cyclique d'une manière régulière, les sorties MLI sont modulés pour synthétiser des signaux sinusoïdaux dans les deux enroulements (principale et auxiliaire) du moteur.

La tension appliquée aux deux enroulements du stator comme deux courants sinusoïdaux égaux en amplitude et en fréquence, mais décalées l'une de l'autre de 90 degrés.

Le fonctionnement d'un de la commande en boucle ouverte est régi par deux principes:

- ✚ La Vitesse à vide est directement proportionnelle à l' fréquence du courant alternatif appliqué au stator et le nombre de pôles du moteur.
- ✚ Le Couple est directement proportionnel au rapport de la tension appliquée et la fréquence du Courant alternatif.

Par conséquent, la vitesse peut être contrôlée en faisant varier l'entrée fréquence du courant alternatif appliqué et le couple peut être maintenu constant en faisant varier l'amplitude de la tension linéairement à la fréquence [31,26]. Ce sont les deux objectifs fondamentaux du contrôle en boucle ouverte V / f constant.

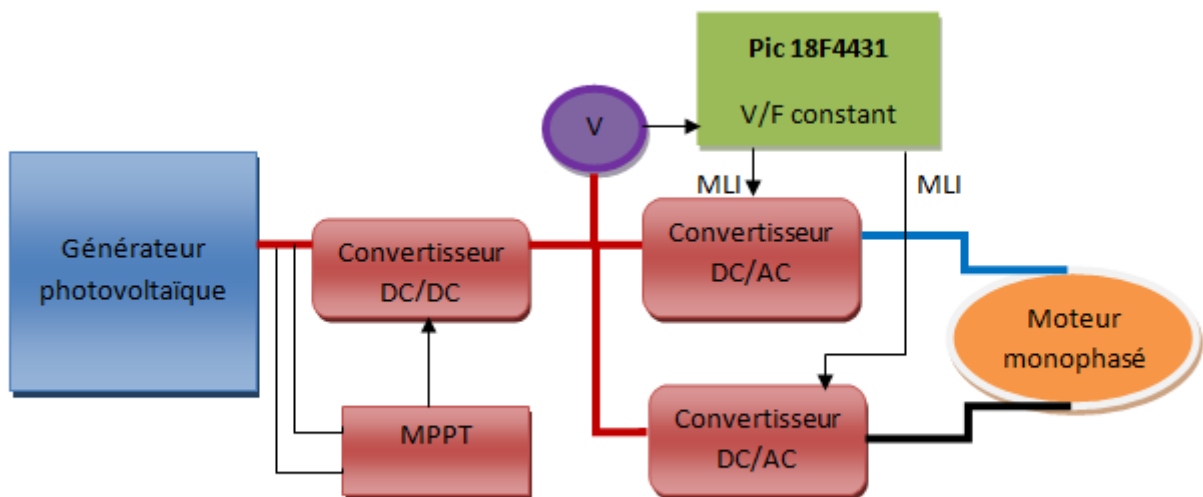


Figure (III-12) : schéma du contrôle en boucle ouverte

#### 4.2. Architecture de la carte de commande

Pour développer notre application, nous avons réalisé une carte électronique. Cette carte est un support avec lequel on peut expérimenter et utiliser le microcontrôleur PIC18F4431 figure (III-13), pour l'application de la commande V/f en boucle ouverte.

La carte comporte

- ✓ Un redresseur en pont pour assurer une alimentation de 5v DC
- ✓ Un microcontrôleur PIC18F4431
- ✓ Des entrées de mesure et des sorties PWM



Figure (III-13) : schéma de la carte de commande

### 4.3. Programmation de la commande power contrôle PWM

La routine développée en langage C est implantée sur un PIC18F4431 en utilisant le logiciel MIKRO C FOR PIC version 3.0.

#### 4.3.1. Configuration du module PWM

Le module Power Control PWM simplifie la tâche de la commande de deux pont onduleurs en fournissant 4 paires des sorties PWM complémentaires, avec temps mort insérées entre les canaux.

Pour initialiser le module de PCPWM:

- ✓ La valeur de post cale de la base de temps de PWM est 1: 1.
- ✓ La valeur de pré-échelonnage de la base de temps PWM et de 1: 1 (FOSC /4).
- ✓ La base de temps PWM et en mode course libre.
- ✓ On charge le paire de registre PTPERH: PTPERL à obtenir une fréquence de découpage de 20 kHz.
- ✓ Tous les canaux PWM (PWM0 .....PWM8) en sortie.
- ✓ Chaque paire de canaux (PWM 0 / 1, 2/3 et 4/5,6/7) est complémentaire.
- ✓ Les mises à jour des registres du rapport cyclique et de la période sont activées.
- ✓ Configurez le temps mort PCPWM:

- ✓ Le diviseur du temps mort et en  $FOSC / 2$ .
- ✓ On charge le registre DTCON pour atteindre une valeur de temps morts de 2 us temps mort.
- ✓ On efface tout les registre paires du rapport cyclique (PDCxH: PDCxL) pour régler les rapports cyclique à 0.
- ✓ La base de temps de PWM est activée.

Les valeurs des registres du module PWM et leurs configurations sont montrées à l'annexe

#### 4.3.2. Configuration du module ADC(HSADC)

Une valeur analogique est mesurée dans cette application, par la broche AN0 (la tension de référence)

L'ADC haute vitesse comporte plusieurs caractéristiques, telles que le mode Auto-conversion

Pour initialiser le module HSADC:

- ✓ Fonctionnement 1. Configurer ADC:
- ✓ Le mode de boucle continue est actif.
- ✓ Le mode Multi-Channel active.
- ✓ VREF+ et Vref- à AVDD et AVSS, respectivement.
- ✓ Le format justifié à gauche du résultat est actif.
- ✓ La période d'acquisition A/ D à 12 TAD (le temps nécessaire pour la conversion séquentielle).
- ✓ L'horloge de conversion A / D est  $FOSC / 32$ .
- ✓ L'ADC est allumé.
- ✓ AN0 est au groupe A.
- ✓ RA0 est une entrée analogique.
- ✓ RA0 est une entrée.

#### 4.4. Synthèse de programme de la Commande V / f en boucle ouverte

La référence de vitesse est fournie par l'utilisateur, dans ce cas par un diviseur de tension (mesure de la tension d'entrée de l'onduleur ou hacheur) connecté à un canal ADC.

Le microcontrôleur utilise la mesure de l'ADC pour calculer la vitesse de référence.

L'utilisation des fonctions trigonométriques sur PIC18F4431 nécessite un temps de calcul important. Pour ce fait on utilise la méthode dite Look up Table qui est basée sur la détermination des valeurs de l'une des fonctions sinus ou cosinus. Les valeurs déterminées sont illustrées dans un tableau et initialiser au début du programme. Le tableau TabSin[360] présente la fonction sinus sur 60 [Annexe F].

La forme d'onde sinusoïdale est créée par le changement du rapport cyclique PWM pour chaque sortie. La fréquence d'entraînement du moteur détermine la fréquence MLI. Le taux de mise à jour de rapport cyclique est réglé en modifiant la Valeur de rechargement



Timer0. Ceci détermine l'intervalle jusqu'à le prochain débordement Timer0. Les registres du rapport cyclique (PDC) sont modifiés comme suit:

- Quand une interruption Timer0 se produit, une mise à jour de la fréquence d'entraînement est déterminée soit par Equation
- La valeur de sinus pour chaque phase est lue à partir de la table de sinus, pointé par la valeur de décalage pour chaque phase.
- Le rapport cyclique pour une phase particulière est calculé en multipliant la valeur du sinus par la fréquence d'entraînement du moteur. Le Produit de 16 bits est stocké dans le registre de PDC de cette phase. Les étapes 2 et 3 sont répétées pour chaque phase.
- Les valeurs de décalage sont mises à jour.
- La valeur de rechargement Timer0 est calculée sur la base la mise à jour de fréquence d'entraînement de moteur (équation 3), où  $f$  est la fréquence d'entraînement. le nombre de table de sinus entrés est fixé à 20. La valeur de rechargement détermine la valeur pour laquelle le rapport cyclique PWM est mis à jour.
- Les nouvelles valeurs de rapport cyclique PWM prennent effet au le début de la prochaine période PWM.

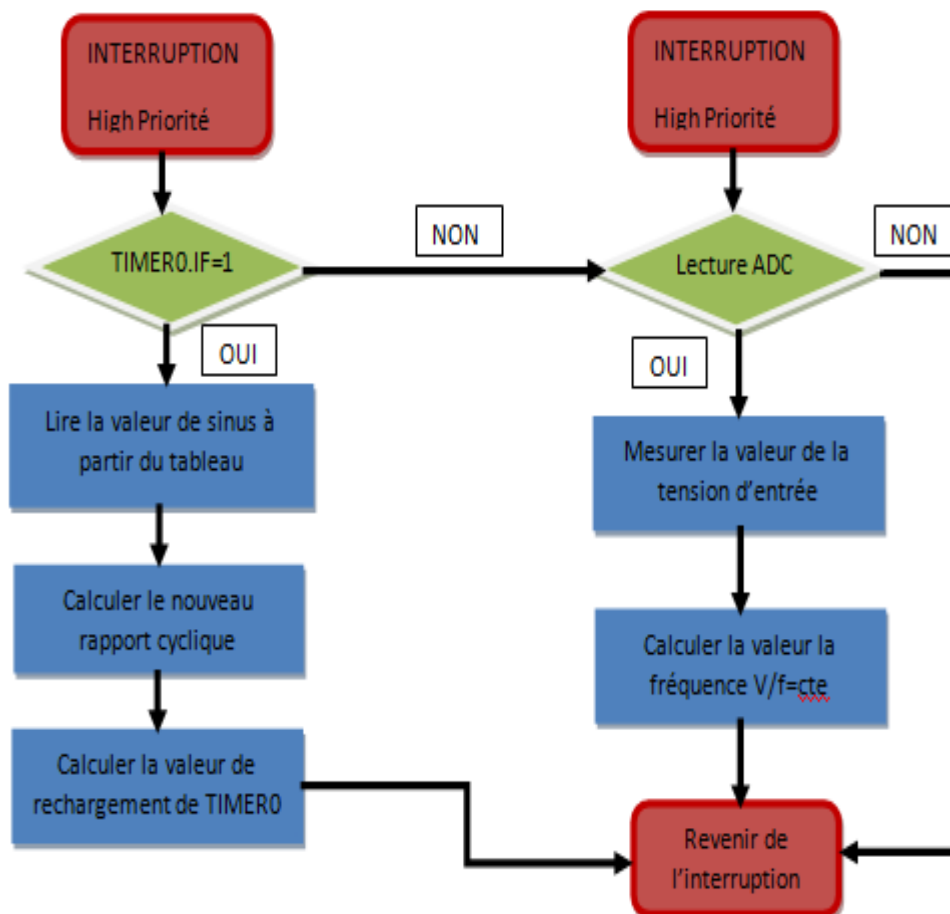


Figure (III-14) : algorithme de la commande



## 5. Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons présenté le modèle de moteur monophasé en régime permanent. Le contexte nous a permis de citer les hypothèses de travail, les équations modélisant le moteur et la relation entre le couple et la vitesse.

Le principe de la commande v/f est présenté dans la deuxième partie soit en boucle fermée ou en boucle ouverte.

La troisième partie est consacré à l'étatisation du microcontrôleur pour le control du moteur monophasé en V/f constant en passant par : citation des modules de microcontrôleur 18F4431 utilisées et leurs avantages pour la commande, la stratégie de la commande en boucle ouverte et en boucle fermée et le principe du capteur de vitesse.

## 1. Introduction :

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur.

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance (DC/DC)). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survoltrice ou dévoltrice [19]. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir la structure la plus adéquate. Pour ce la nous avons choisis le convertisseur boost pour notre système dans ce chapitre nous allons voir l'étude théorique et la réalisation pratique de notre convertisseur.

## 2. Schéma synoptique de l'étage d'adaptation PV

La figure 1 représente le schéma synoptique du système PV qui comprend les blocs suivants:

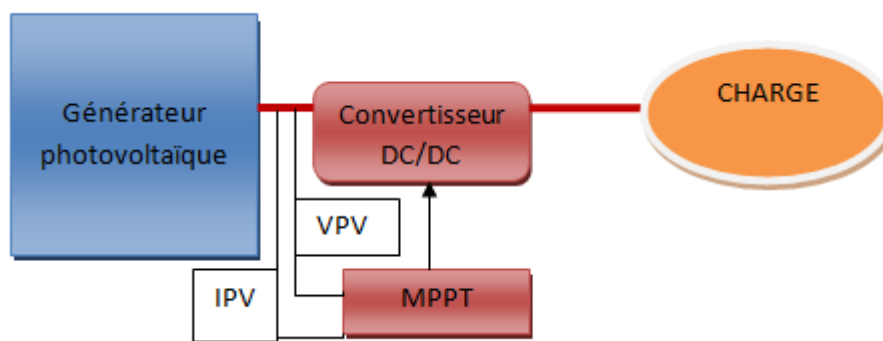


Figure (IV-1) : schéma synoptique de l'étage d'adaptation PV

- ✓ Un module photovoltaïque, constitué de cellules, délivrant dans la condition standard de test 'CST', une puissance de 1KW, un courant de 4 A sous une tension optimale de [20].
- ✓ Un quadripôle d'adaptation, qui est un convertisseur d'énergie DC-DC de type 'boost' pour des applications nécessitant des tensions supérieures à celle optimales (Figure IV-1) [20]. Les éléments constituant ce quadripôle (Inductance L, capacités Ce et Cs, diode de roue libre Dl, transistor IGBT) sont dimensionnés pour que le convertisseur fonctionne à une fréquence de hachage de 20 kHz [23 ,21].

- ✓ Une commande MPPT numérique permettant de suivre le PPM du panneau PV, par variation automatique du rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur (signal PWM).

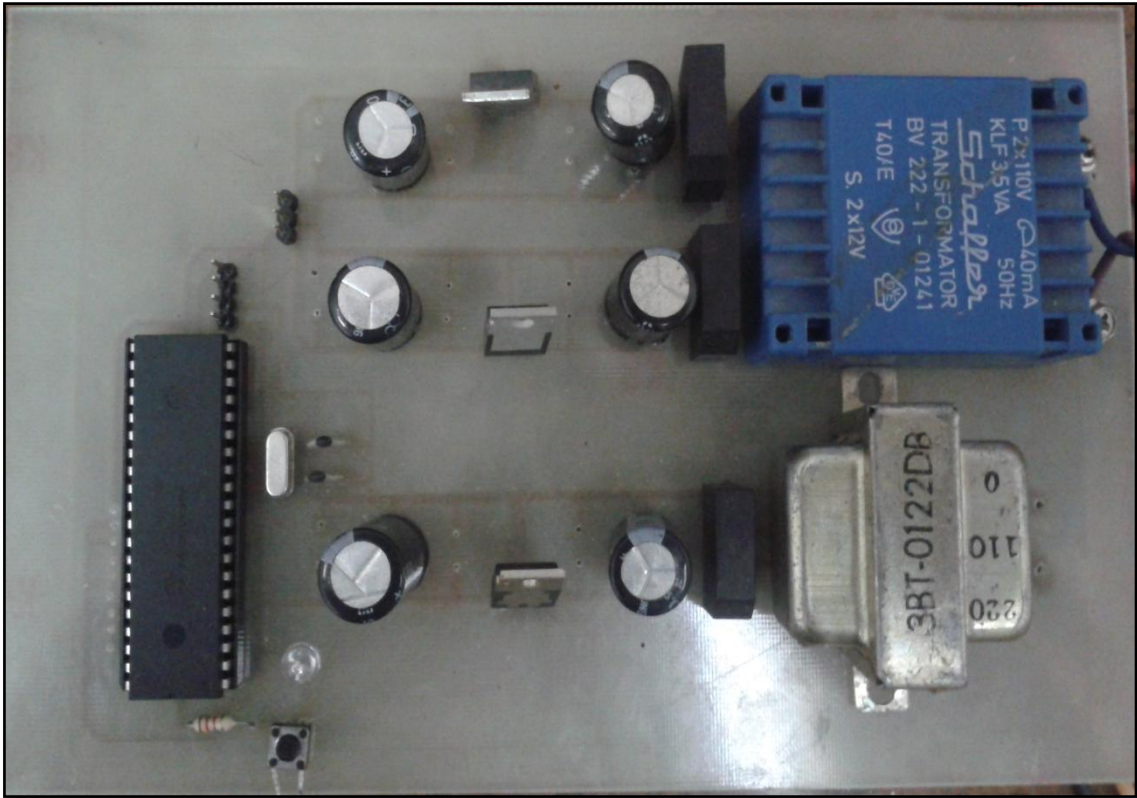


Figure (IV-2) : circuit de la commande MPPT numérique réalisé

### 3. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

La commande (MPPT) est nécessaire pour optimiser la quantité d'énergie obtenue à partir du générateur photovoltaïque à la tension d'alimentation.

La sortie d'un module solaire est caractérisé par un courbe de performance de la tension en fonction du courant, appelé la courbe IV. Voir Figure (IV-2). Le point de puissance maximale d'un solaire module est le point de la courbe IV qui correspond à la puissance de sortie maximale possible pour le module. Cette valeur peut être déterminée en trouvant sous la surface maximale la courbe du courant en fonction de la tension.

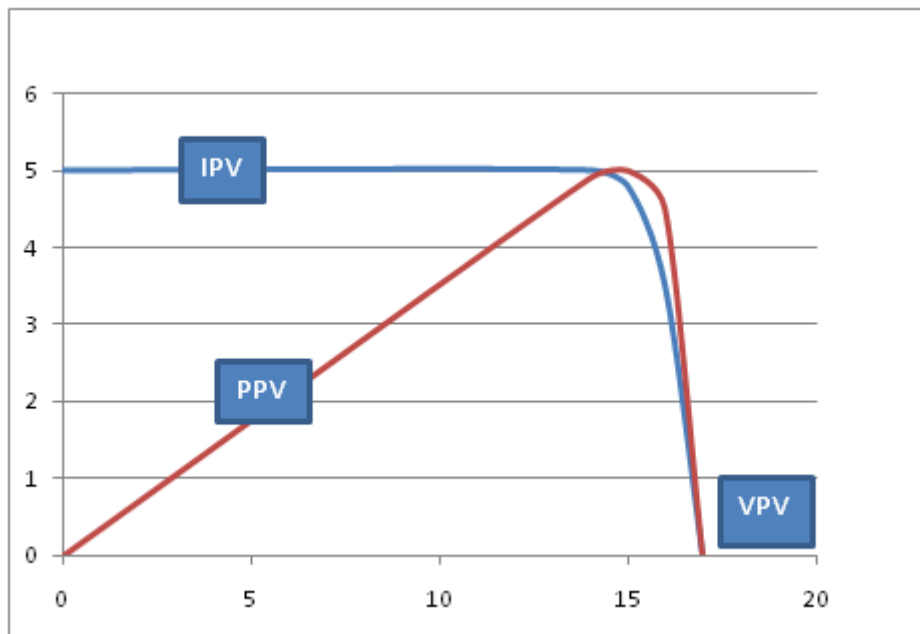


Figure (IV-3) : caractéristique IV d'un module

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [4,28 ,29].

Pour qu'un module photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV [1-3]. Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant  $I$  et de tension  $V$  du module et la multiplication de ces deux grandeurs  $P_{PV} = I_{PV} * V_{pv}$ . Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée [2,8].

### 3.1. Commande perturbation et observation

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant L'impact sur la puissance à la sortie du GPV.

- ✓ Si  $dP/dV > 0$ , la tension est augmentée, cela induit une augmentation du rapport cyclique  $D(k) = D(k - 1) + C$ . C étant une constante d'accrémentition
- ✓ Si  $dP/dV < 0$ , la tension est réduite cela ce traduit par une diminution du rapport cyclique  $D(k) = D(k - 1) - C$

Dans le système PV muni de la commande MPPT numérique, la régulation de la puissance fournie par le panneau est effectuée par le microcontrôleur (PIC).

L'évolution du système PV, vers les conditions du circuit-ouvert ou fermé, est réalisé par l'algorithme MPPT (Figure IV-3) qui se base sur la dérivée de la variation de la puissance P calculé par le PIC.

L'algorithme perturb and observ pour MPPT photovoltaïque implimenter dans un microcontroleur 16f887 permer de generer des signaux MLI pour attaquer la gachette de l'IGBT .les notion de base sur le microcontroleur se trouve dans l annex

L'algorithme suivant résume la procédure de la méthode :

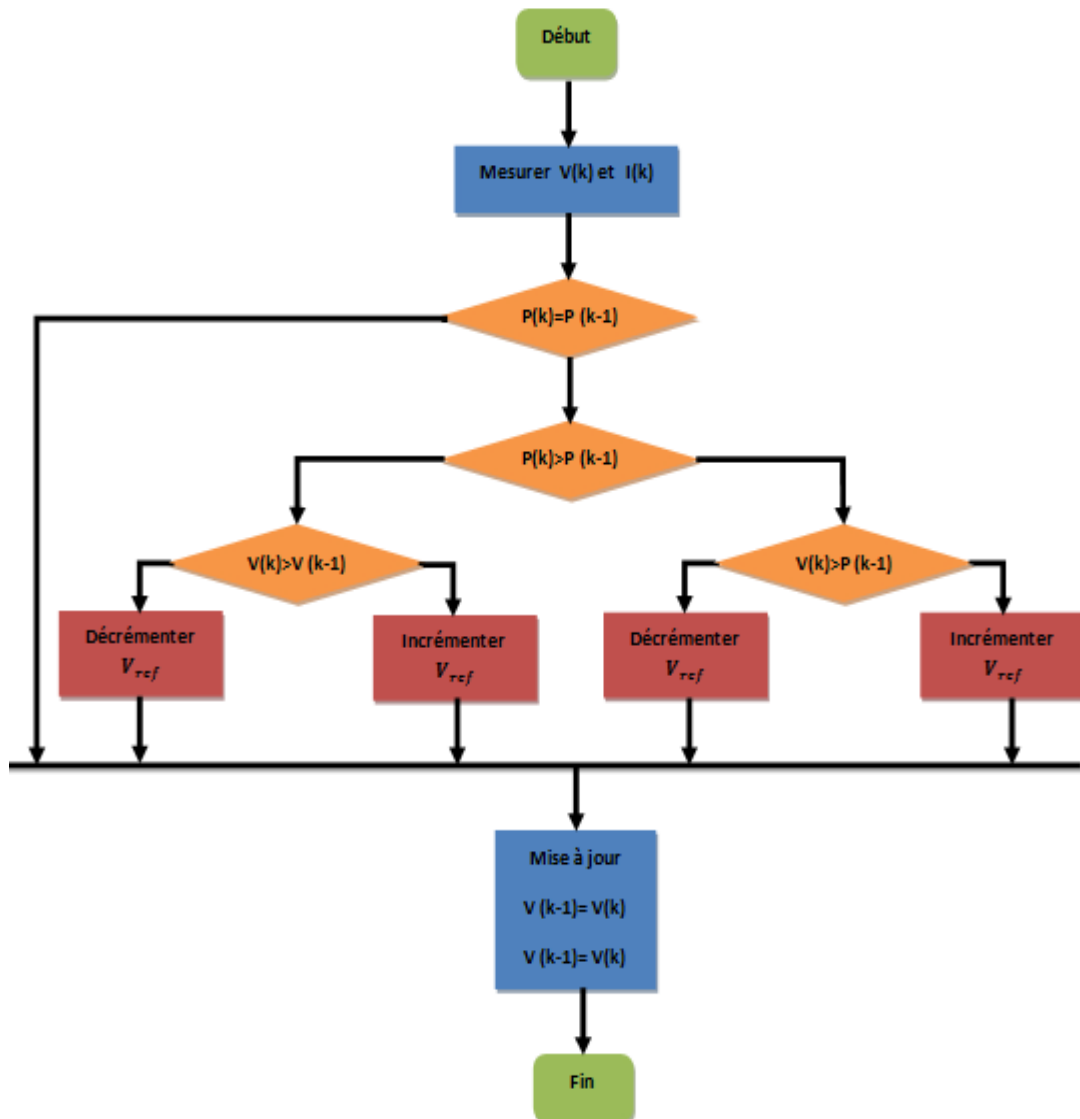


Figure (IV-4) : Organigramme de la méthode P&O

### 3.2. Description et fonctionnement du microcontrôleur

Dans ce paragraphe, nous décrivons la structure et le fonctionnement du microcontrôleur qui constitue la commande MPPT numérique. Celui-ci commande l'interrupteur de puissance du convertisseur DC-DC. Ceci permettra de s'assurer d'une part du bon fonctionnement du convertisseur DC-DC et d'autre part de la recherche du point de puissance maximale par le microcontrôleur.

Le schéma synoptique du microcontrôleur (PIC) qui a fait l'objet de notre étude est représenté sur la figure 6. Les différents modules du PIC utilisés pour cette étude sont:

- Le module CAN, permettant la conversion de 8 entrées analogiques en numérique avec une résolution de 10 bits.
- Le module PWM, servant à générer un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique ( $\alpha$ ) est modifiable par le programme du PIC.

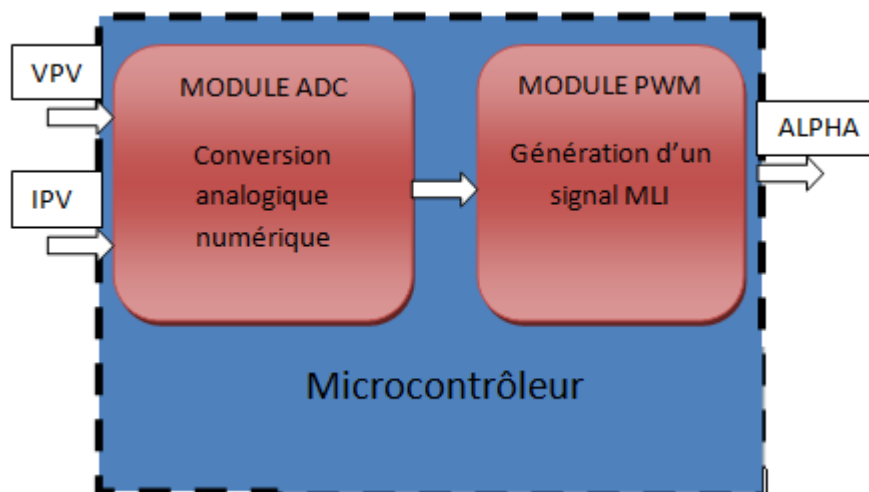


Figure (IV-5) : schéma de fonctionnement du microcontrôleur

La commande manuelle numérique conçue au cours de ce travail a pour rôle la génération d'un signal PWM du PIC, commandant le convertisseur DC-DC, à partir d'une tension de référence contrôlée par un potentiomètre (Figure IV-4). Les principaux blocs qui constituent cette commande ainsi que le système PV sont :

- ✓ Un variateur de tension de référence (potentiomètre). Il fournit une tension de référence qui va être exploitée par le microcontrôleur comme paramètre d'entrée.
- ✓ Un microcontrôleur PIC qui va exécuter un programme dont l'algorithme est le suivant:
  - L'acquisition de des tensions de référence par le Port A.
  - La conversion de la valeur de la tension en une valeur numérique par le module CAN du microcontrôleur.
  - La génération d'un signal PWM, dont le rapport cyclique varie en fonction de la tension fournie par le potentiomètre, par le Port C.

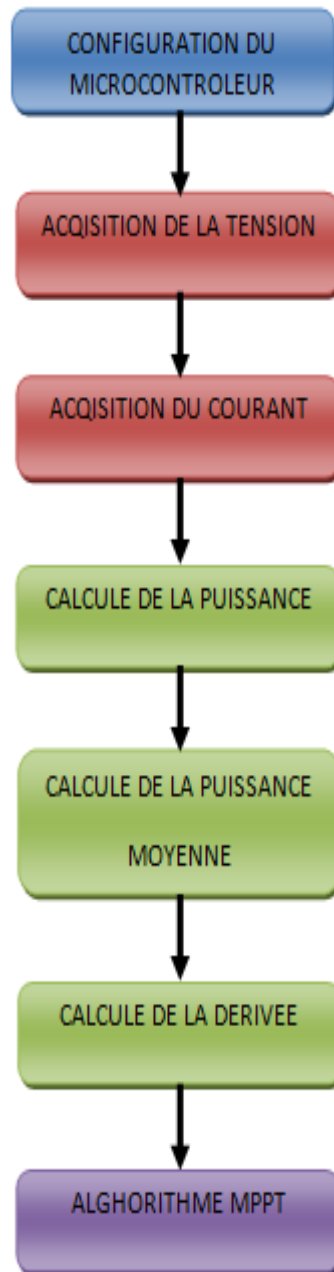


Figure (II-6) : procédure d'exécution du programme de MPPT

#### 4. Convertisseur survolteur (BOOST)

Un convertisseur BOOST, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP

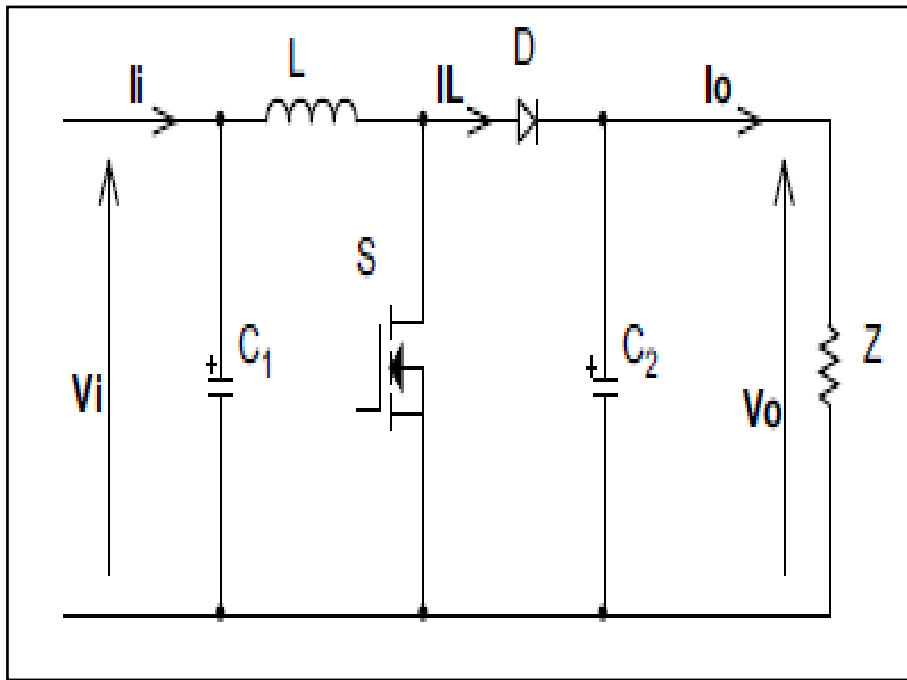


Figure (IV-7) : schéma d'un hacheur élévateur

#### 4.1. Valeur moyenne de $U_s$ :

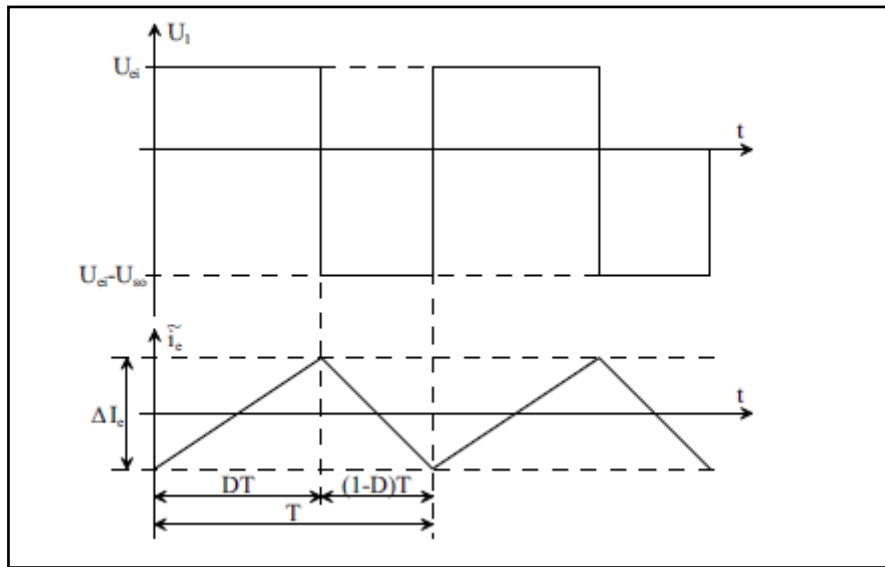
Afin de déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur élévateur, nous nous référons au schéma Figure (IV-7).

Nous avons représenté la tension  $U_l$  aux bornes de l'inductance, ainsi que les variations du courant  $I_e$  qui la traverse. On définit  $D$  le rapport cyclique, comme le rapport entre la durée d'amorçage du transistor et la période de commutation du convertisseur  $T$ . La tension  $U_l$  dépend de la phase de fonctionnement du convertisseur considérée :

- ✓ pendant  $DT$  :  $U_l = U_{ei}$ ,
- ✓ pendant  $(1 - D)T$  :  $U_l = U_{ei} - U_{s0}$

On peut ainsi calculer l'expression  $\langle U_l \rangle$  de la valeur moyenne de  $U_l$  :




 Figure (IV-8) : Tension  $U_1$  aux bornes de l'inductance  $L_e$ 

$$\langle U_1 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) dt \quad (IV - 1)$$

$$\langle U_1 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{DT} U_{ei} dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^T (U_{ei} - U_{s0}) dt \quad (IV - 2)$$

$$\langle U_1 \rangle = U_{ei} \cdot D + (U_{ei} - U_{s0}) \cdot (1 - D) \quad (IV - 3)$$

En régime permanent, la tension moyenne aux bornes de l'inductance  $L_e$  est nulle. Par conséquent :

$$\langle U_1 \rangle = 0 \Rightarrow U_{s0} = U_{ei} \frac{1}{1 - D} \quad (IV - 4)$$

Une telle relation illustre la nature «élevateur» du convertisseur considéré. Le rapport Cyclique pouvant varier de 0 à 1, la tension  $U_{s0}$  en sortie peut varier de  $U_{ei}$ ... à l'infini. Il est bien entendu que ce dernier cas peut s'avérer «problématique» pour le dimensionnement du convertisseur : il faudrait trouver la diode et le transistor capables de tenir une tension infinie [19].

Malgré cette restriction (qui peut rendre un tel convertisseur difficile à commander), le hacheur élévateur permet donc, grâce à la valeur du rapport cyclique  $D$  d'obtenir en sortie une tension nettement plus élevée que celle appliquée en son entrée.

## 4.2. Courant en sortie Iso

Les courants en sortie du convertisseur  $I_s$  et  $I_{s0}$  sont représentées Figure (IV-8)

On distingue deux phases bien distinctes :

- ✓ Transistor T amorcé : pendant une durée  $DT$ , la diode D est bloquée. Le courant  $I_s$  est donc nul.

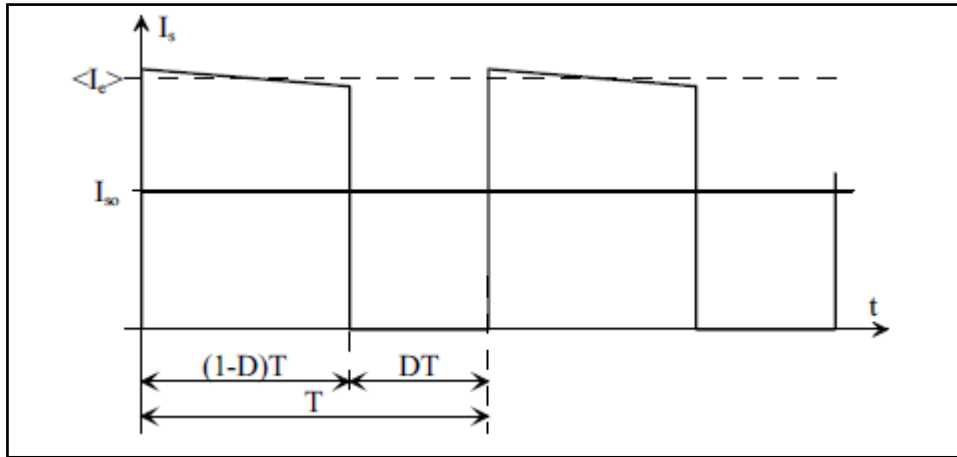


Figure (IV-9) : Les courants en sortie du convertisseur

- ✓ Transistor T bloqué : pendant une durée  $(1 - D)T$ , la diode D est enclenchée afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance  $L_e$ . Par voie de conséquence :

$$I_e = I_s \quad (IV - 5)$$

En négligeant l'ondulation du courant  $I_e$  devant les valeurs moyennes considérées, on peut écrire :

$$I_{s0} = \langle I_{s0} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_s(t) dt \quad (IV - 6)$$

$$I_{s0} = \langle I_{s0} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{(1-D)T} I_e dt \quad (IV - 7)$$

$$\Rightarrow I_{s0} = I_e (1 - D) \quad (IV - 8)$$

Ou encore 
$$\frac{I_{s0}}{I_e} = (1 - D)$$

On notera que cette relation est duale à celle définissant la tension moyenne en sortie du convertisseur.

Si le convertisseur [19,20 et 21] *Boost* est élévateur de tension, il est également abaisseur de courant. A l'instar du convertisseur *Buck*, la comparaison avec un transformateur est également totalement justifiée : le rapport de transformation serait dans le cas présent  $k = (1 - D)$ .

On démontre de même que, compte tenu des hypothèses de travail pratiquées (rendement de la cellule de commutation unitaire), la puissance en sortie  $U_{s0} \cdot I_{s0}$  est identique à la puissance injectée en entrée  $U_{ei} \cdot \langle I_e \rangle$ .

### 4.3. Dimensionnement des composants

Les spécifications minimales pour pouvoir réaliser un hacheur boost, avec la méthode de dimensionnement exposée dans ce document, sont les suivantes :

- Tension d'entrée variant entre VEMIN et VEMAX
- Tension de sortie VS avec une ondulation relative  $\frac{\Delta V_s}{V_s} = 5 \%$
- Puissance nécessaire à la charge 1kw
- Fréquence de hachage  $f = 20 \text{ kHz}$

A partir de ces spécifications, on peut établir :

$$\alpha_{MIN} = \frac{V_s - V_{EMAX}}{V_s} \quad (IV - 17)$$

$$\alpha_{MAX} = \frac{V_s - V_{EMIN}}{V_s} \quad (IV - 18)$$

#### 4.3.1. Cellule de commutation

La cellule de commutation est composée de deux interrupteurs :

- ✓ l'interrupteur  $D$  doit supporter une tension inverse et doit pouvoir conduire un courant positif. Son amorçage et son blocage peuvent être spontanés [23]. Cet interrupteur sera donc une diode.
- ✓ l'interrupteur  $T$  doit supporter une tension positive et doit pouvoir conduire un courant positif. Les commutations de cet interrupteur doivent être commandées. Cet interrupteur pourra être de type transistor

##### a) Choix de la diode D

Les diodes Schottky sont bien adaptées à ce type de convertisseur. En effet, elles ont une faible tension de seuil (pertes en conduction minimisée) et un pouvoir de commuter rapidement de l'état passant à l'état bloqué (temps de recouvrement inverse  $t_{rr}$  très faible) [24].

Toutefois, elles présentent deux inconvénients : la tenue en tension inverse est faible et leur capacité parasite est importante.

Les principaux critères de choix pour une diode sont les suivants :

- ✓ Courant moyen  $IF(AV)$
- ✓ Courant crête  $IFSM$
- ✓ Tension inverse  $VRRM$

*b) Choix de l'interrupteur T*

Le tableau, présenté à la Figure (IV-8), permet de choisir le type de technologie à utiliser en fonction de la puissance nominale et la fréquence de découpage auxquelles est soumis le composant.

Cette figure nous montre que le transistor IGBT est bien adapté pour les hacheurs boost basse/moyenne puissances fonctionnant avec une grande fréquence de commutation. C'est pourquoi, dans la suite de ce document, nous considérerons que l'interrupteur T est un transistor IGBT.

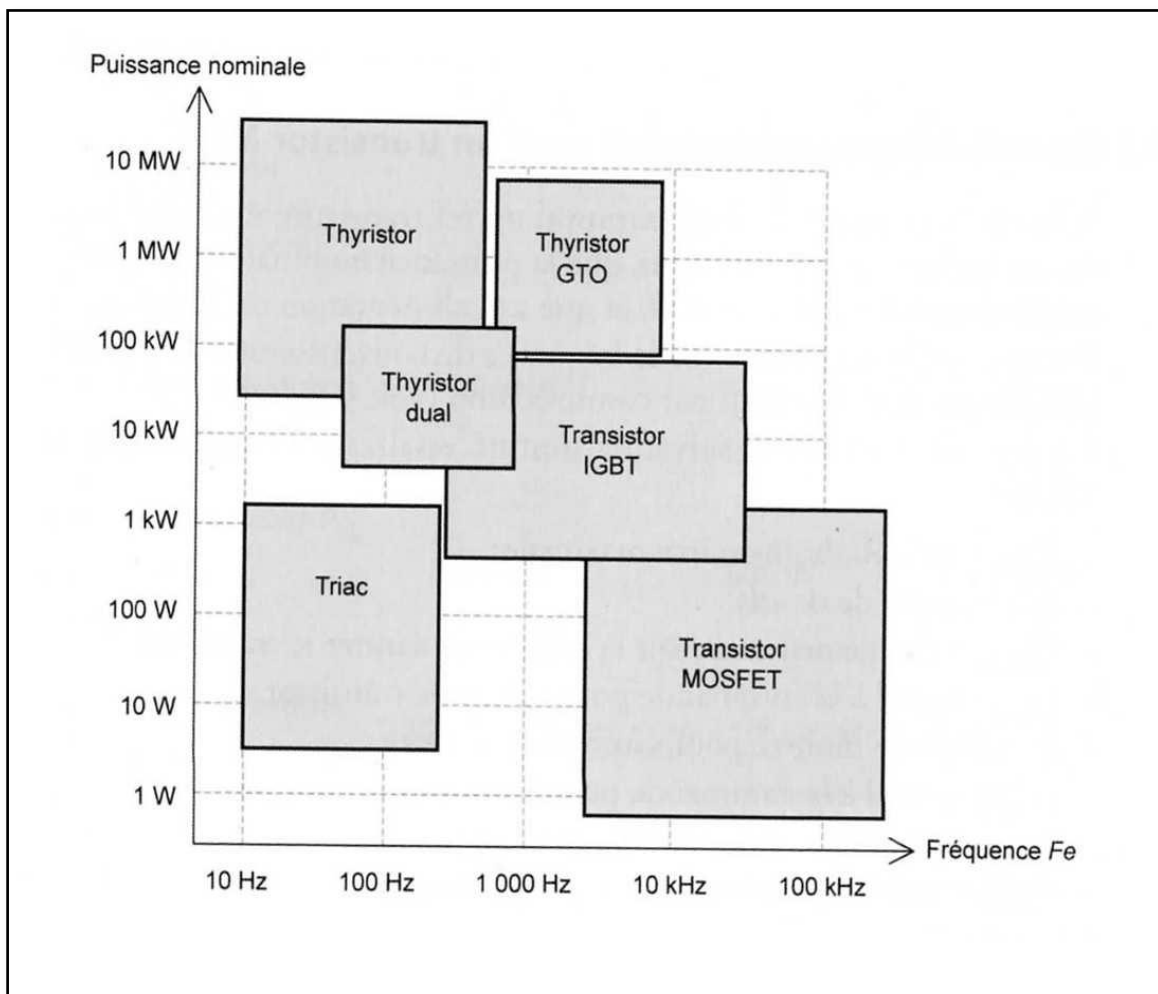


Figure (IV-10) : Diagramme puissance-fréquence des composants

### 4.3.2. Éléments réactifs

#### a) Inductance L

Pour dimensionner une inductance, on fixe  $\Delta I_L = 5\%$ . Le calcul de L et  $I_{LMAX}$  à l'aide des relations suivantes:

$$L = \frac{V_s}{4f\Delta I_L} \quad \text{et} \quad I_{LMAX} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (IV - 19)$$

#### b) Condensateur C

Le rôle de ce condensateur est de diminuer l'ondulation de la tension de sortie du convertisseur.

En général, pour des applications de filtrage en tension basse fréquence, on utilise des condensateurs électrolytiques. Ces condensateurs sont polarisés, il faut donc faire attention à leur sens de connexion [19 ; 26,27]. Il est possible de réaliser des associations série-parallèle pour obtenir des puissances importantes.

Les critères de choix d'un condensateur sont les suivants :

- ✓ la capacité nominale et sa tolérance
- ✓ la tension admissible à ses bornes
- ✓ la tenue aux courants impulsionnels

La capacité du condensateur est calculée à partir de l'expression suivante :

$$C \geq \frac{a_{MAX}V_s}{RfDV_s} \quad (IV - 22)$$

## 4.4. Description générale

Nous avons construit un hacheur boost pour étatisation photovoltaïque, ce dernier est constitué de quatre parties :

- ✓ La partie puissance qui regroupe:
  - ✚ Le convertisseur interrupteurs inductance et condensateurs.
  - ✚ Les circuits de pilotages et de protection des interrupteurs.
- ✓ La partie mesure, constituée des capteurs de tension (pour mesurer la tension d'entrée et la tension de sortie de le hacheur) et d'un capteur de courant pour mesurer le délivrer par le générateur photovoltaïque.
- ✓ La partie commande, constituée d'une alimentation 5v, 12v,-12v et un microcontrôleur pic 16f877 qui génère des signaux MLI.
- ✓ La partie protection constituée d'un photo-coupleur pour isoler la partie commande de la partie puissance.



Figure (IV-11) : schéma du circuit du hacheur BOOST réalisé

#### 4.4.1. Partie puissance

##### a) Interrupteurs de puissance

Les interrupteurs de puissance utilisés dans le convertisseur réalisé sont des modules IGBT et diodes de référence BY229 ces modules supportent une tension 1000V et permettent de passer un courant de 20A. Les interrupteurs de puissance sont montés sur un circuit imprimé afin de minimiser les inductances de câblage.

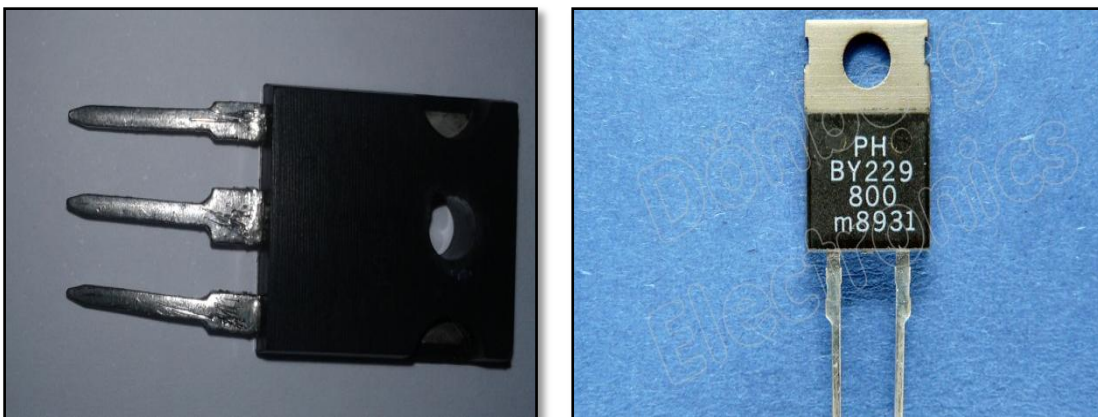


Figure (IV-12) : les interrupteurs de puissance

### b) Capacités et inductances

Les condensateurs sont également choisis pour une ondulation de tension de 5% et peut supporter une tension de 600v (420 $\mu$ f pour la sortie et 65  $\mu$ f pour l'entrée). L'inductance est dimensionnée pour une ondulation du courant de 5% et un courant max de 10A (8mh).

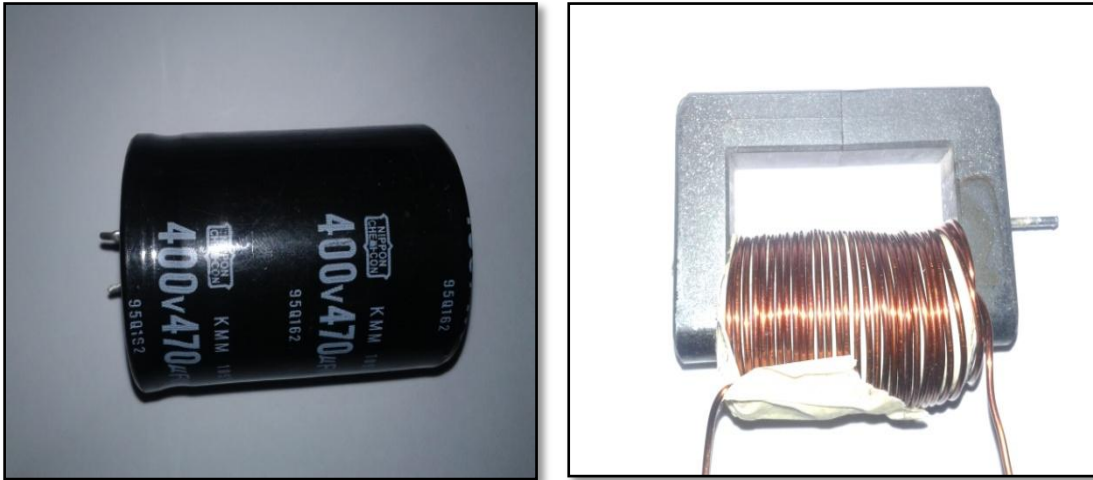


Figure (IV-13) : élément de puissance réactive

### c) Rôle du condensateur d'entrée

- ✓ Tous les circuits présentés disposent en entrée d'un condensateur référencé C1 de forte capacité, qui a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable.

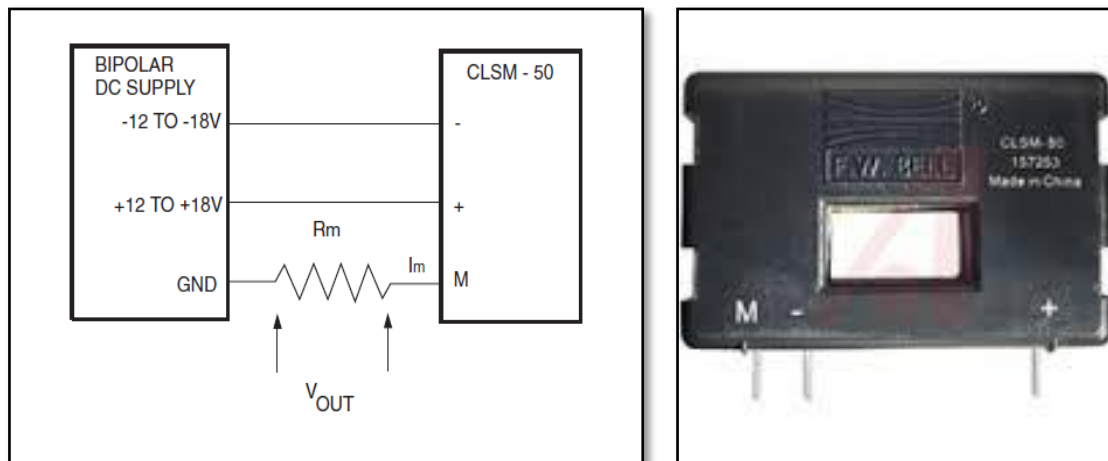
Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

- ✓ Les condensateurs électrolytiques (électrochimiques) aluminium (figure 9) sont utilisés dans des applications en courant continu ou à très basses fréquences et sont ceux généralement rencontrés dans les systèmes PV. Ils présentent des valeurs de capacités importantes et une faible résistance série.

#### 4.4.2. Partie Mesure

Le courant est mesuré grâce à un capteur à effet Hall (LEM LA-55P), dont les caractéristiques se trouvent dans l'annexe. Ce capteur a une bande passante de 200 KHZ et un rapport de conversion de 1/1000. La résistance de mesure  $R_M$ , est dimensionnée pour un courant secondaire de 50 mA. La figure IV.13 présente la mise en œuvre de la mesure.





Figure(II-14) :capteur du courant CLSM-50

Les tensions sont mesurées grâce à un diviseur de tension bien dimensionné pour que l'image de la tension mesurée ne dépasse pas 5v la tension de fonctionnement du microcontrôleur.

#### 4.4.3. Partie protection

##### a) Photo coupleur

Afin d'assurer l'isolation galvanique entre la commande et la puissance, nous avons ajouté un Photo coupleur en amont du transistor. Il s'agit du 6N138 de chez.

##### b) Protection par fusible :

Afin de protéger les composants et la carte, nous avons placé un fusible, dimensionné selon le courant circulant à l'entrée et le courant à ne pas dépasser dans les composants. Pour notre carte, il s'agit d'un fusible 20A.

##### c) Circuit d'aide à la commutation :

Afin d'aider le transistor à la commutation et de protéger contre les surtensions à l'ouverture, il est possible d'ajouter un circuit d'aide à la commutation, composé d'une diode en série avec une capacité et d'une résistance en parallèle.

## 5. Conclusion

Le chapitre IV est consacré à l'étude et la réalisation de l'étage d'adaptation photovoltaïque composé d'une commande MPPT numérique et un convertisseur BOOST.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC dans les applications photovoltaïques, exposé le schéma synoptique d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT et en fin nous avons présentés la commande perturber et observer et comment la réaliser à l'aide d'un microcontrôleur PIC16F877a.

Dans la deuxième partie nous avons étudiés le fonctionnement du convertisseur BOOST, la méthode de dimensionnement de ses composants et son réalisation pratique.



## 1. Introduction

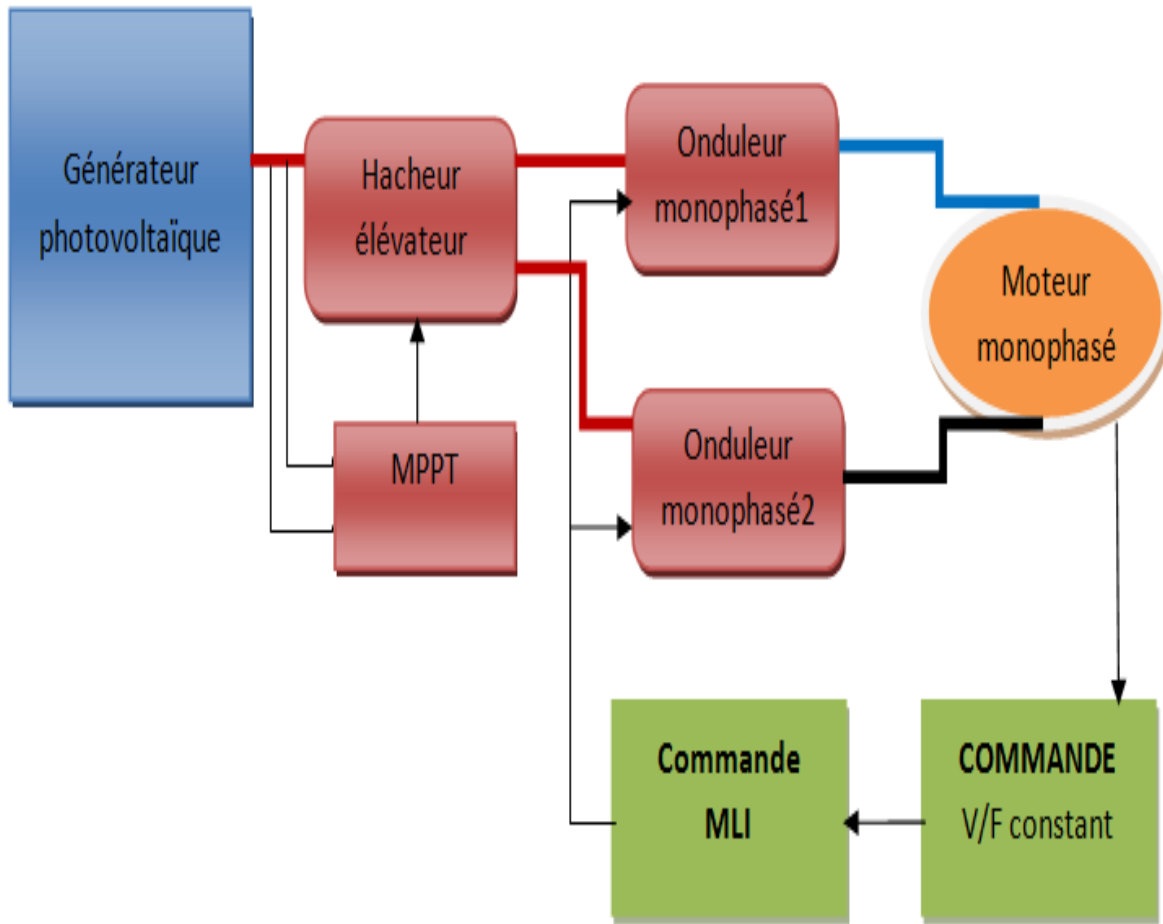
Dès leurs apparitions, les moteurs asynchrones sont devenus très utilisés dans l'industrie grâce à leurs simplicités de fabrication et de maintenance. Actuellement, de nombreuses applications industrielles nécessitent un contrôle de vitesse, de position et de couple [17 et 39]. L'alimentation directe des machines électriques limite leurs performances électriques et dynamiques, c'est pour cette raison que les recherches ont été développées pour concevoir des modules de variateurs de vitesse et de couple qui seront placés entre l'alimentation et la machine électrique. Ces modules sont appelés convertisseurs statiques, ils permettent de varier les grandeurs tensions et fréquence en fonction de consigne en vitesse ou en couple. Plusieurs techniques sont étudiées pour que l'ensemble convertisseur moteur asynchrone fonctionne dans des conditions optimales.

Dans ce chapitre nous allons représenter notre système de pompage solaire, et les résultats obtenus pour une commande v/f du moteur.

## 2. Synoptique du système de pompage photovoltaïque :

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur, un sous-système de pompage (moteur - pompe).

La tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau. Pour les systèmes de pompes photovoltaïques fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation [7][8]. La Figure (V-1) représente le schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées



**Figure (V-1) : Synoptique de système du pompage global.**

La méthode de contrôle classique pour un fonctionnement à vitesse variable du moteur à induction monophasé est montrée dans la figure (V-2) [36]. Cette méthode conventionnelle de contrôle du vitesse, dont le moteur fonctionne à tension constant et fréquence variable, la variation de vitesse est obtenue en faisant varier la fréquence d'alimentation, cette opération résulte un échauffement dans la machine ainsi les oscillation autour du couple[33]. Le problème pourrait être discerné de deux façons :

- Pour des fréquences élevés, la réactance de condensateur est diminuée, cela provoque une augmentation très important dans le courant de stator.
- saturation de circuit magnétique.

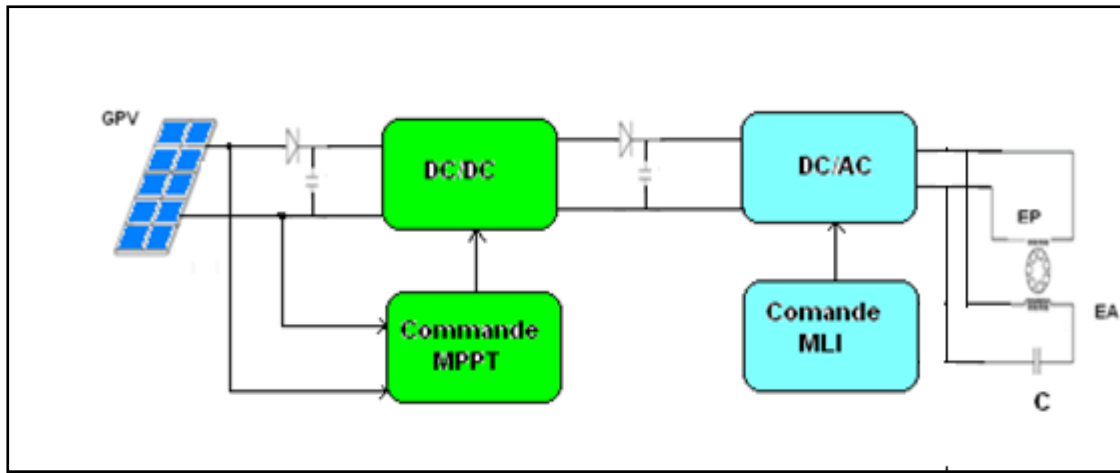


Figure (V-2) : La Méthode conventionnelle de contrôle.

Pour résoudre les effets mentionnés ci-dessus une méthode de contrôle proposé est composée par deux nouveaux onduleurs raccordés en parallèle. Le schéma de la méthode proposée avec la charge du moteur est indiqué dans la Figure (V-3), Les onduleurs utilisés sont connectés en parallèle et ils contrôlent les principaux et auxiliaires d'enroulement de manière indépendante [33].

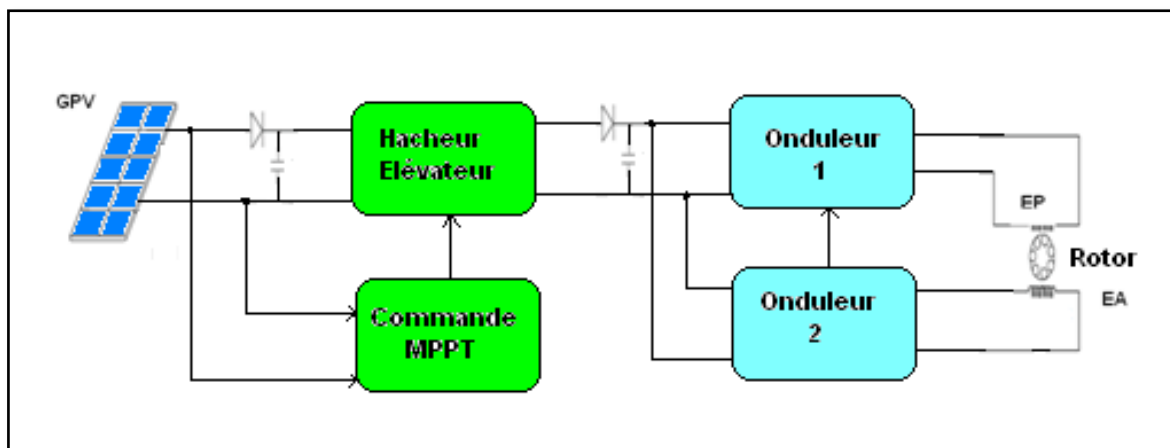


Figure (V-3) La Méthode de contrôle proposé.

## 2.1. Description du système

Notre système de pompage photovoltaïque se compose de 3 étages principales ;

- ✓ un moteur monophasé de puissance 0.75 kW
- ✓ un étage d'adaptation photovoltaïque composée d'une commande MPPT numérique et d'un hacheur boost
- ✓ l'étage de la commande du moteur composée d'une boîte de commande (PIC18F4431) et deux onduleur monophasées déjà existes et un capteur de vitesse.

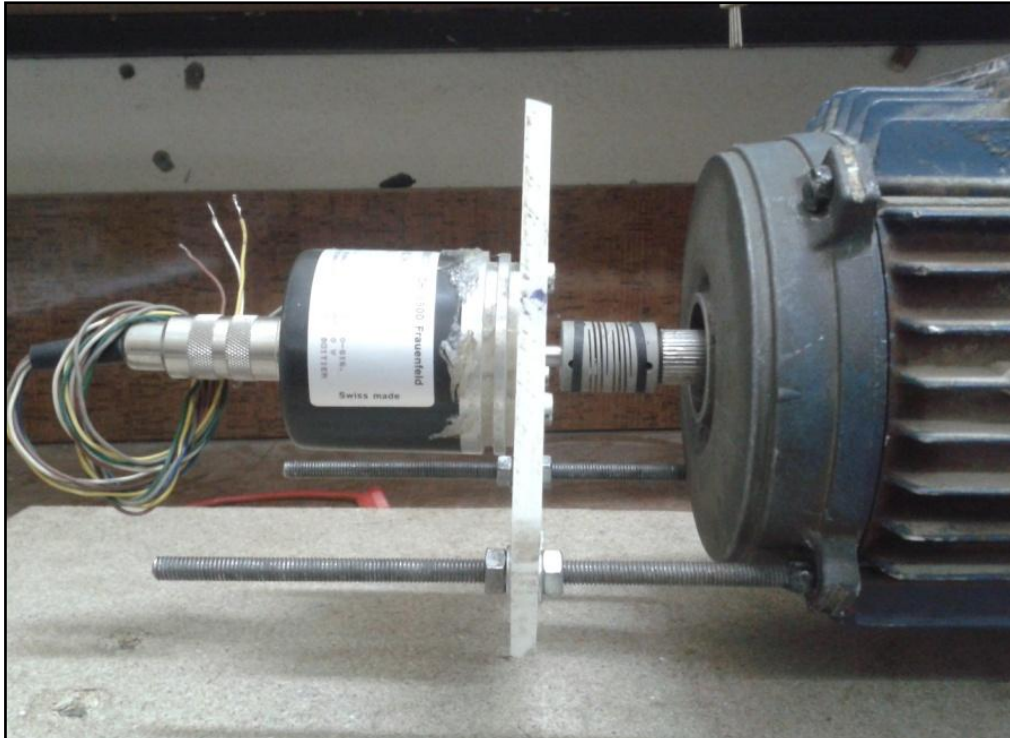


Figure (V-4) Association moteur-capteur de vitesse

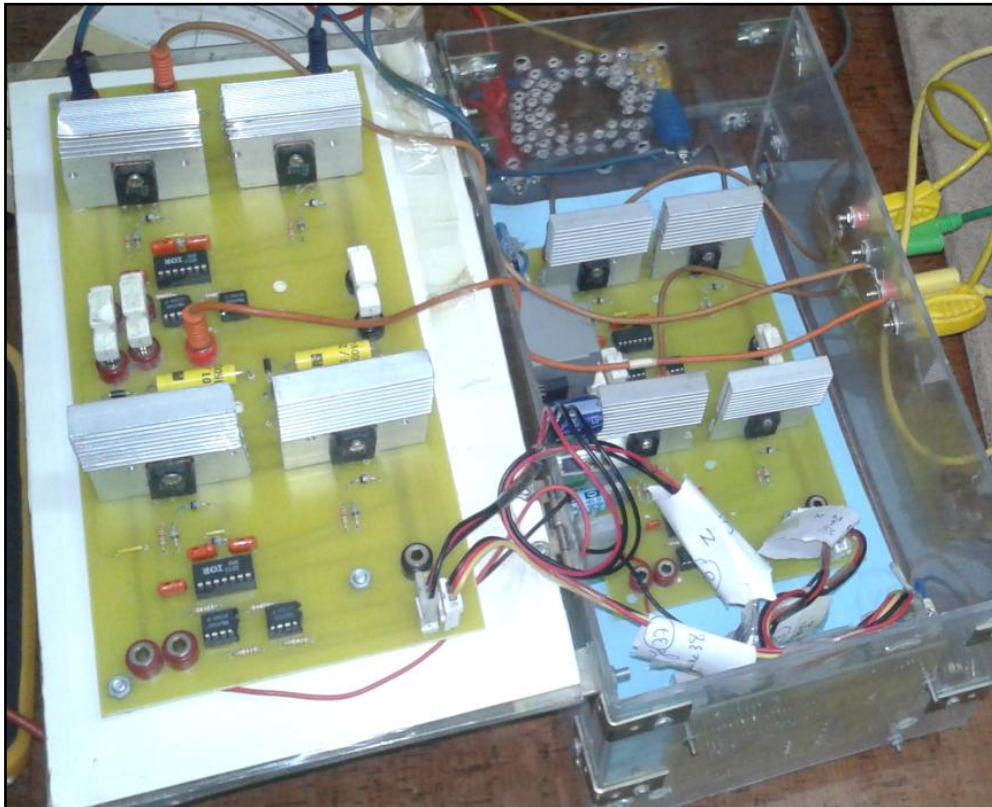


Figure (V-5) : les deux onduleurs monophasés alimentant le moteur monophasé

## 2.2. Commande v/f en couple :

Une commande scalaire permet de contrôler le couple en régime permanent, il ne faudra pas prétendre à des grandes performances dynamiques.

En boucle fermée la connaissance des paramètres électriques est mécanique est nécessaire. Pour ce la on a fait une identification des paramètres du moteur dans le chapitre II. Mais avec le manque du matériel de mesure on a testé seulement la commande V/f en boucle ouverte.

### 2.2.1. Grandeurs de réglage du couple en régime permanent :

En régime permanent le couple est donné par les relations (4.18), des deux expressions précédentes, il en résulte que les grandeurs de réglages du couple sont [33] :

- La pulsation rotorique  $\omega_r$ .
- Le flux totalisé  $\Psi_s$  ou  $\Psi_r$ .

Il nous reste à résoudre les deux problèmes suivants :

- ✚ Comment imposer la pulsation rotorique  $\omega_r$  sachant qu'en règle générale, le rotor est inaccessible ? Pour cela, on utilisera la relation naturelle d'autopilotage des machines d'induction à savoir :

$$\omega_r = \omega_s - P \cdot \Omega \quad (4.20)$$

Avec :

- $\Omega$  : Grandeur mesurable.
- $\omega_s$  : Grandeur imposable.

- ✚ Comment imposer les flux totalisés  $\Psi_s$  ou  $\Psi_r$  et à quelle valeur ? Pour cela Les flux seront contrôlés en boucle ouverte à partir des grandeurs électriques statorique courants ou tensions. Les stratégies de commande couramment utilisées seront [39] :
  - D'une vitesse nulle à la vitesse nominale, on maintiendra le flux constant à sa valeur maximale pour minimiser les pertes. Pour cette plage de fonctionnement, on disposera du couple nominal de la machine.
  - Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale, on diminuera le flux dans la machine. Pour cette plage de fonctionnement, on disposera de la puissance apparente nominale de la machine.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Résultats de teste de l'étage d'adaptation PV

Pour assurer le fonctionnement de l'étage d'adaptation photovoltaïque (convertisseur Boost et commande MPPT), on mettra le convertisseur boosté sous un teste.



On alimente le hacheur par une tension continue. On fait varier la charge et la tension d'entrée pour simuler la variation des grandeurs électriques d'un générateur PV.

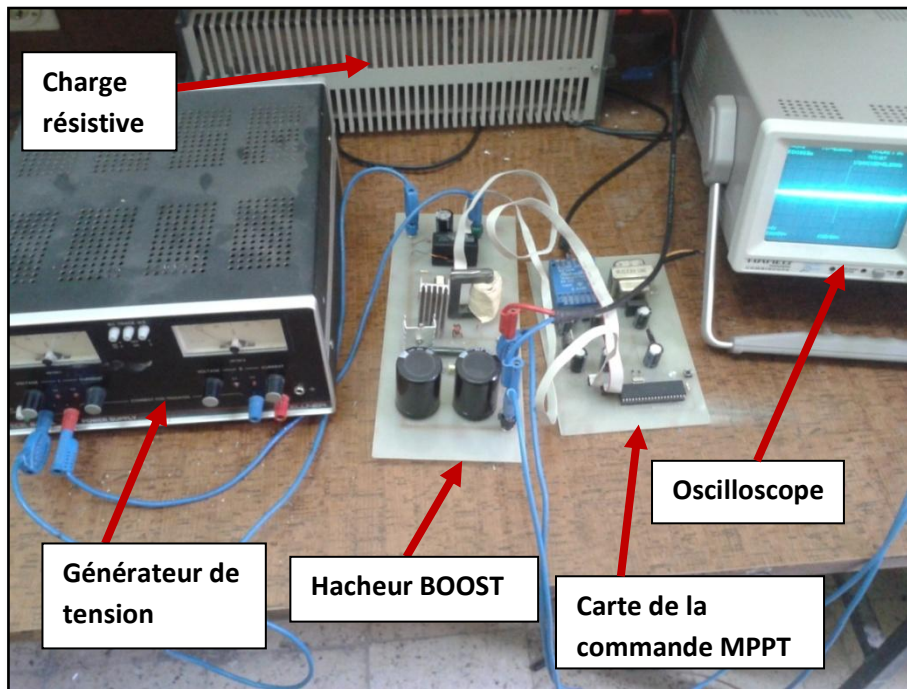
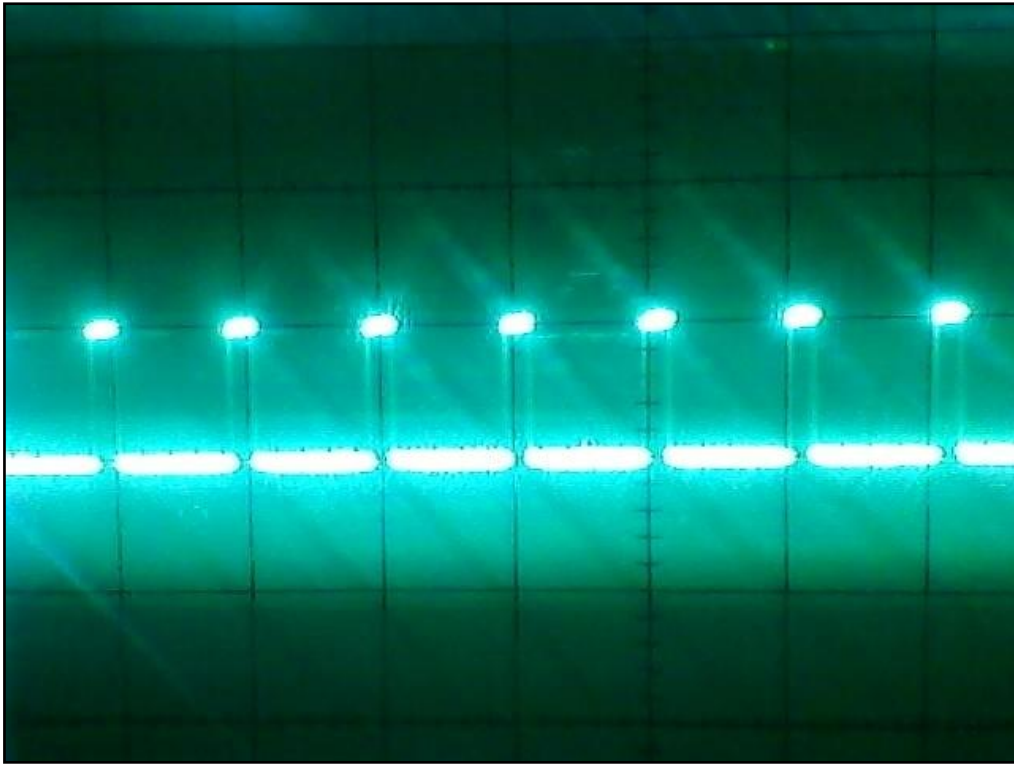


Figure (V-6) : banc d'essai de la commande MPPT

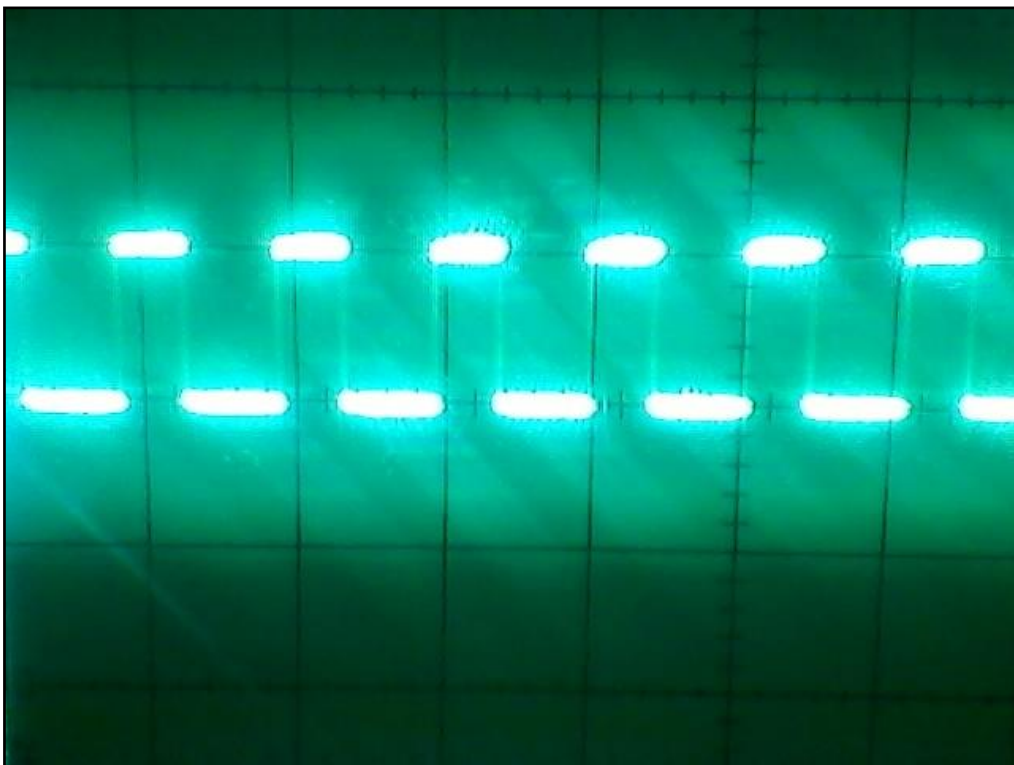
Les différents blocs de l'essai sont:

- Bloc numérique (PIC) qui est formé par:
  - ✓ l'acquisition et la conversion de la tension et du courant du module PV en valeur numérique pour obtenir une information sur la puissance réelle extraite du module PV.
  - ✓ la multiplication de ces deux paramètres afin d'obtenir une image de la puissance fournie par le panneau PV.
  - ✓ le calcul de la puissance moyenne à partir de huit mesures de puissance afin d'obtenir une valeur plus précise et sans l'effet des bruits de la commutation du transistor MOSFET.
  - ✓ le calcul de la dérivée de la puissance par rapport au temps à partir de la puissance moyenne. Ceci permettra de connaître les variations de la puissance du panneau PV.
  - ✓ Ainsi, nous pouvons déduire avec exactitude l'évolution du système PV (diminution ou augmentation de la puissance du panneau PV) et en particulier le PPM.
  - ✓ la détermination du sens de la recherche du PPM
- Bloc de puissance
  - ✓ Convertisseur DC/DC de type Boost capable de supporter une tension de 600v et un courant de 15A.
  - ✓ Générateur de tension variable
- Bloc de mesure qui est constituée du capteur de courant et de tension et un oscilloscope.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes :



**Figure (V-7-a) : variation la sortie de microcontrôleur**



**Figure (V-7-b) : variation la sortie de microcontrôleur**

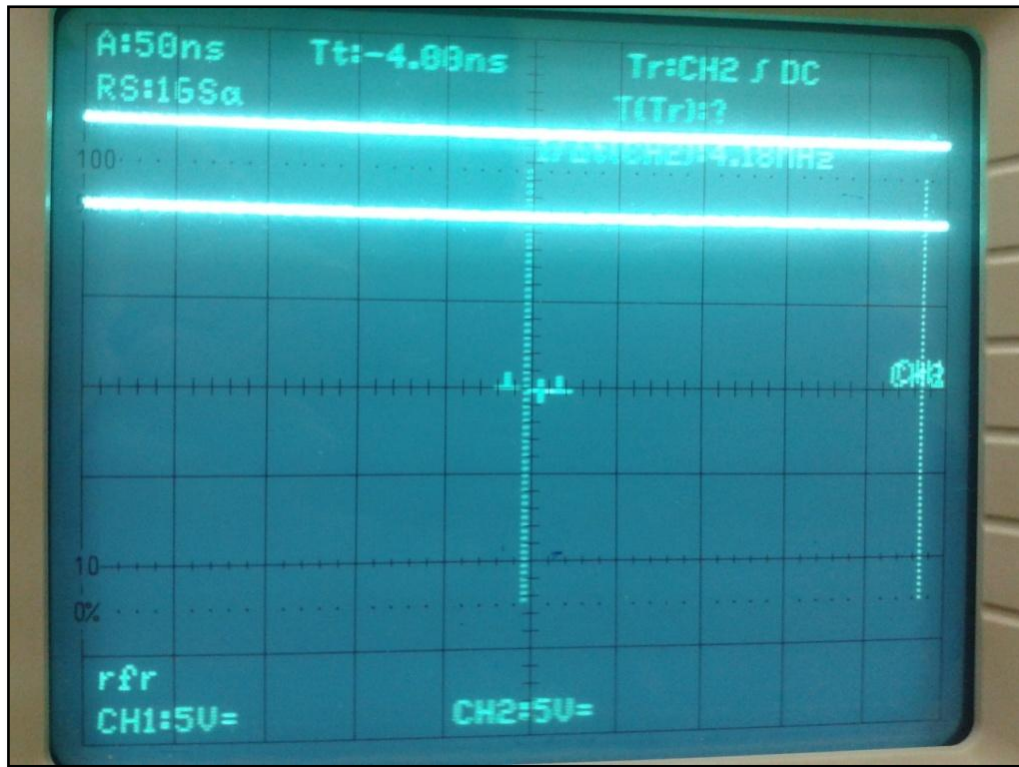


Figure (V-8) : allures des tensions de sortie et d'entrée du hacheur BOOST

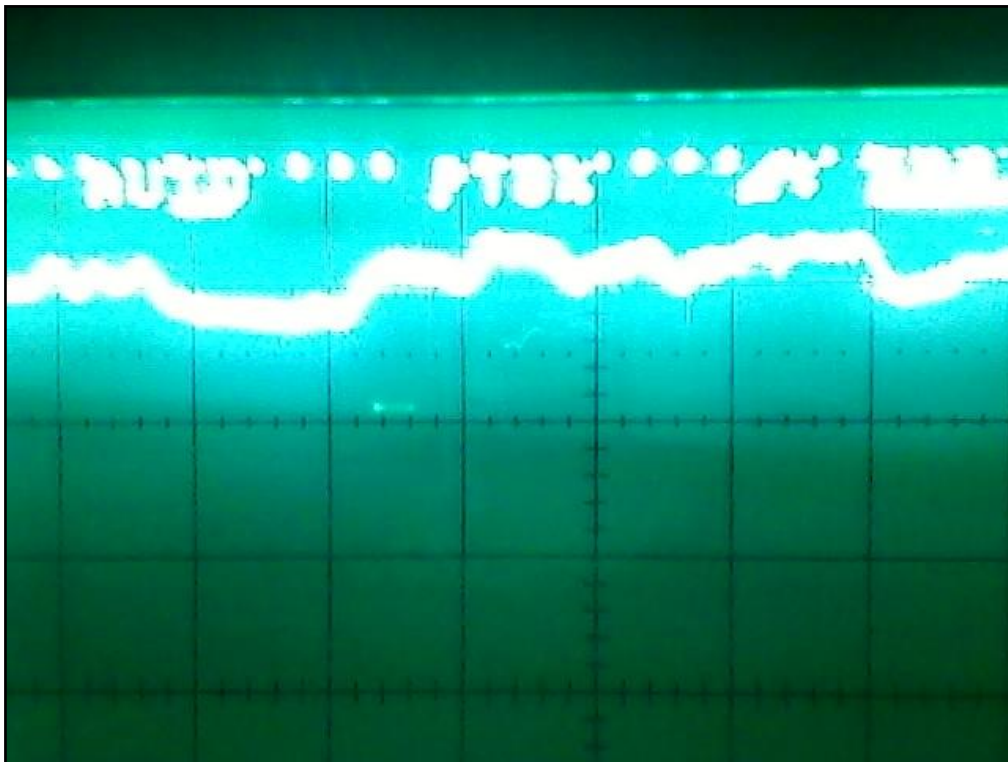


Figure (V-9) : variation de la tension de sortie du hacheur BOOST



### 3.2. Interprétation des résultats

Il apparaît un signal PWM (sortie microcontrôleur) d'amplitude 5 V, de fréquence 20 kHz et de rapport cyclique variable.

Les résultats obtenus montrent que: le PIC lire la mesure du courants et la tension et génère un signal rectangulaire de fréquence de l'ordre de 20 kHz et de rapport cyclique  $\alpha$  de variable avec la variation des grandeurs mesurées.

Les tensions de sortie ou de la charge se stabilisent aux valeurs. Ceci vérifie bien la relation régissant le fonctionnement du convertisseur Boost:

$$Vs = Vp (1 - \alpha)$$

Les ondulations de la tension de sortie sont très petites ; on peut conclure que le filtre est bien dimensionné (capacité de sortie).

L'ensemble des résultats obtenus montre bien le bon fonctionnement du système PV réalisé. Le PIC et l'algorithme utilisés assurent bien un fonctionnement optimal indépendamment des variations des conditions climatiques.

### 3.3. Résultats de teste commande v/f constant

La manipulation, Figures I, est constituée :

- ✓ D'un moteur monophasé de 0.75kw (voire annexe)
- ✓ de deux onduleurs monophasés à, pouvant commuter 800V (mini) sous quelques dizaines d'ampères.
- ✓ d'un générateur de tension continue variable pour remplacer l'alimentation photovoltaïque
- ✓ d'une boîte de commandes de transistors a base du microcontrôleur pic18F4431 qui génère des signaux MLI.
- ✓ Une sonde de courant, qui mesure et donne l'allure des courants au stator sur oscilloscope.
- ✓ Des équipements de mesures (oscilloscope, ampèremètre et voltmètre)

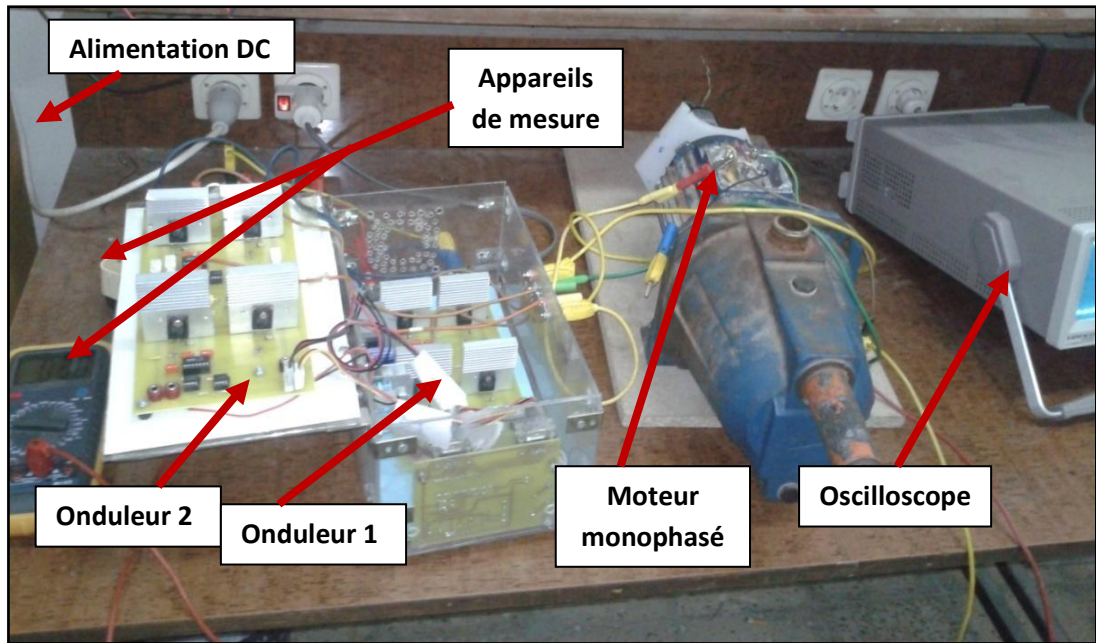


Figure (V-10) : le banc d'essai de la commande V/F

Les résultats obtenus sont montrés sur les figures suivantes :

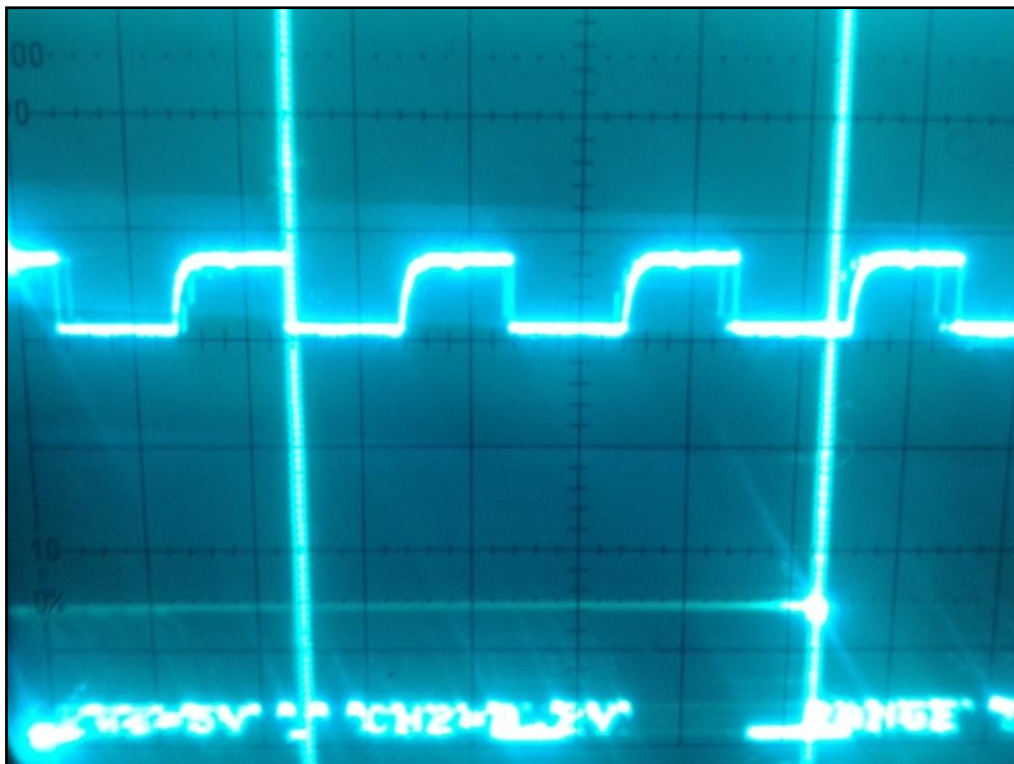


Figure (V-11) : signal de sortie de capteur de vitesse

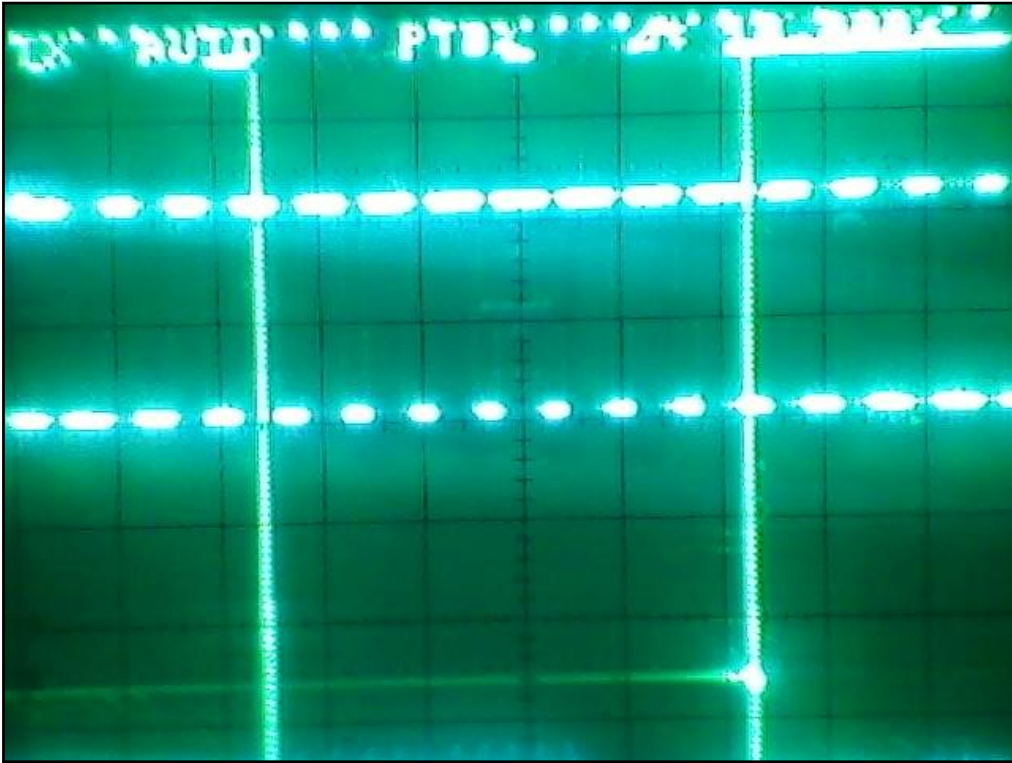


Figure (V-12) : zoom du signal MLI a du microcontrôleur

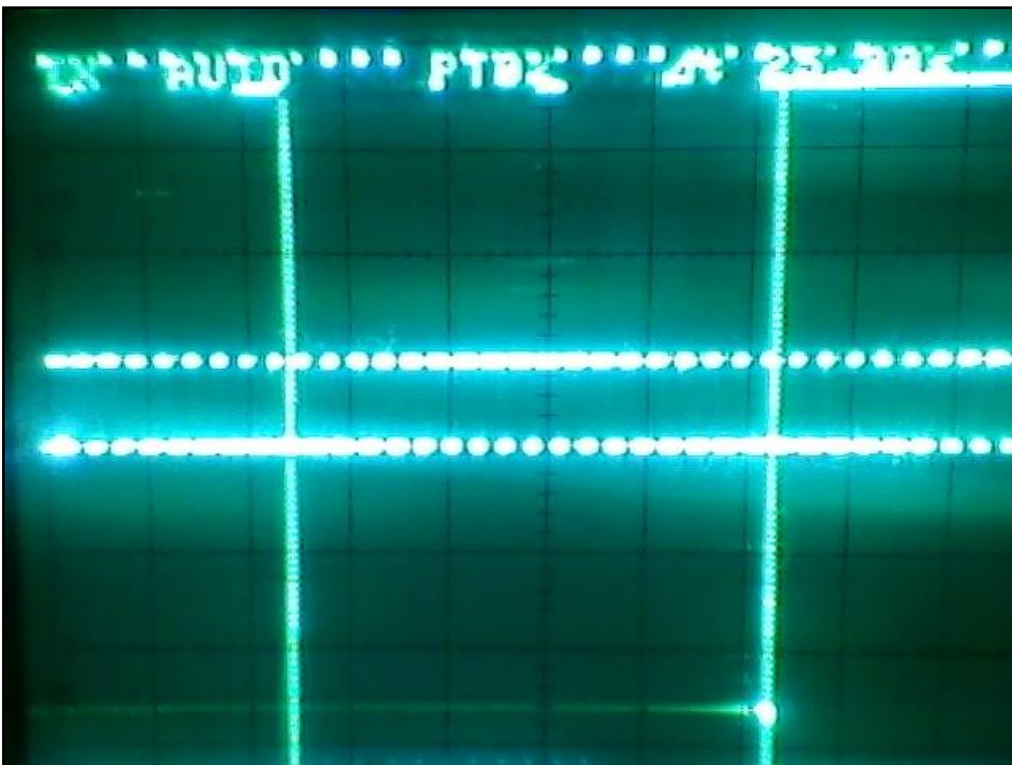


Figure (V-13) : signal MLI a du microcontrôleur (tension de référence 2.5v)



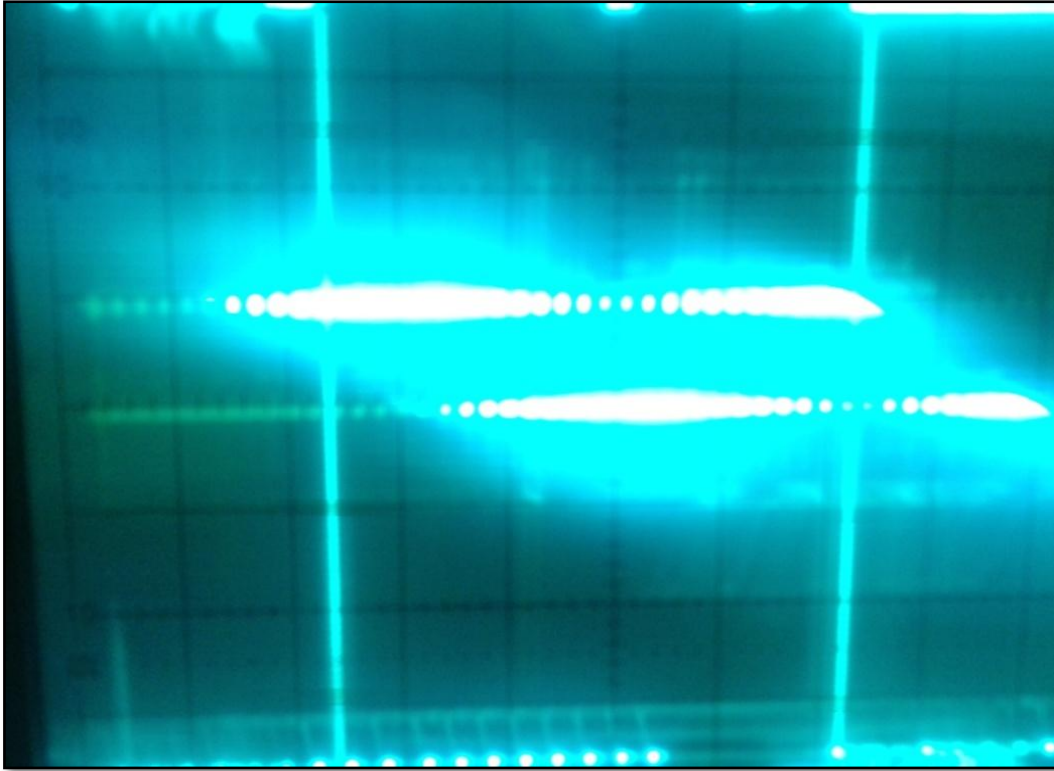


Figure (V-13) : signal MLI a du microcontrôleur (tension de référence 5v)

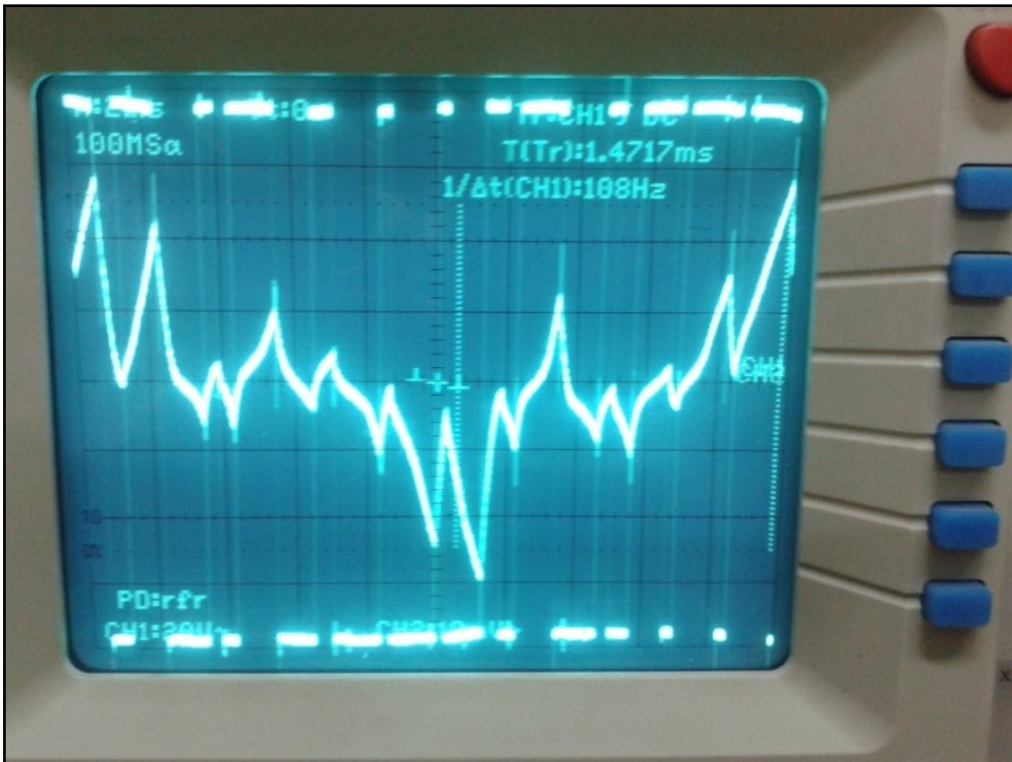


Figure (V-14) : les allures de la tension et du courant pour l'enroulement auxiliaire

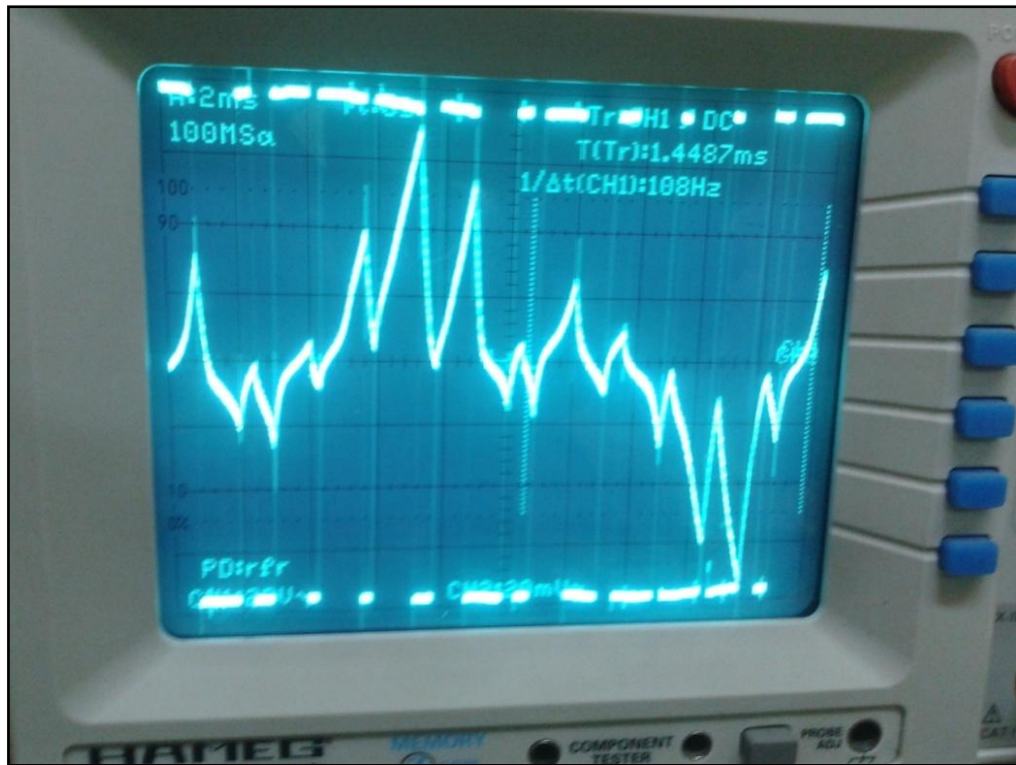


Figure (VII-15) : les allures de la tension et du courant pour l'enroulement principal

### 3.4. Interprétation des résultats

Le signal de la *Figure (V-11)* représente le signal de sortie du capteur de vitesse lorsque le moteur tourne à vide. La période du signal est de  $10\mu\text{s}$  ce qui donne une vitesse de 3000tr/min (la vitesse de synchronisme).

Pour les figures On remarque que la variation de la tension d'entrée de l'onduleur provoque une variation de la fréquence du signal MLI ainsi la largeur des impulsions, cette variation est linéaire. C'est le principe de la commande V/f en boucle ouverte.

Les courbes des figures montrent les chronogrammes des tensions du convertisseur continu – alternatif. Ces chronogrammes sont rigoureusement identiques à ceux prévus en théorie. Non seulement ils sont conformes à la théorie, mais surtout d'une grande stabilité.

Le rôle de LMI se montre clairement dans les allures du courant ou la forme des courants sont proche d'une sinusoïde puisque les enroulements du moteur peuvent assimiler à un filtre de courant ou on remarque la disparition du hachage apparu dans les allures de la tension.

Pour améliorer sur forme de des courants il faut augmenter la fréquence de la MLI, le taux d'harmonique diminue avec l'augmentation de la fréquence de la porteuse ou l'augmentation du nombre de la commutation des transistors ce qui conduit à l'augmentation des pertes de commutation. On peut dire que le choix de la fréquence de commutation ou de

hachage est un dilemme entre la réduction du taux d'harmoniques et la réduction des pertes par commutation.

D'après les allures des courants sont parfaitement en quadrature. Dans ce cas on peut dire que le principe de fonctionnement d'un moteur monophasé asynchrone avec condensateur alimenté par une seule source monophasé est équivalent à celui d'un moteur asynchrone monophasé sans condensateur alimenté par deux sources de tensions en quadrature de phase, ce de fait, on peut faire recours à un onduleur de tension à deux bras ou à trois bras pour obtenir deux tensions en quadrature et de fréquence variable.

L'amplitude du courant de la phase auxiliaire est différent au courant de principale ce la dues à l'asymétrie des enroulements statoriques de la machine asynchrone monophasée. Ce phénomène produit un couple oscillatoire c'est le ca d'une alimentation déséquilibrée.

Dans le cas ou L'alimentation est équilibrée. Le champ tournant est circulaire, et les performances sont optimales. C'est le cas d'une symétrie des enroulements statoriques. .

#### 4. Conclusion :

Dans La première partie de ce chapitre nous avons représentés le système de pompage solaire étudié dans les chapitres précédents.

La deuxième partie de ce chapitre et consacre aux teste exercer sur l'étage d'adaptation photovoltaïque, on particulier le teste de fonctionnement de hacheur boost et le teste de fonctionnement de la commande MPPT.

Dans la troisième partie on présente les résultats de fonctionnement de chaque élément constituant l'étage de commande du moteur ; la sortie de capteur de vitesse, le signal MLI de microcontrôleur pic 18f4431 et les allures de tension et de courant a la sortie des deux onduleurs alimentant le moteur.

## Conclusion générale

Les recherches présentées dans ce travail concernent l'étude et la réalisation d'une unité de pompage alimentée par une source photovoltaïque. Différents thèmes ont été abordés, à savoir l'alimentation de l'unité de pompage, la conversion de l'énergie électrique, la commande des convertisseurs statiques et la motorisation des machines à induction. Ces études nous ont permis en premier lieu, de confronter un certain nombre de problèmes, ensuite de mettre en œuvre des lois de commande adaptées aux convertisseurs statiques.

Pour récupérer cette énergie nous avons décrit l'énergie solaire et la nécessité d'étudier la caractéristique du générateur photovoltaïque. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$ . Nous avons exposé en générale le fonctionnement et spécifications des systèmes de pompage photovoltaïque, les différents systèmes de pompes existants, et nous avons rappelés les éléments qui constituent le système.

On a abordé le principe de fonctionnement des machines à induction monophasées et leurs différentes technologies. Les machines monophasées possèdent un certain nombre de problèmes liés principalement à la dissymétrie des enroulements statoriques. Cette dissymétrie rend l'application des commandes classiques limitées dans le temps en vue de la variation progressive des paramètres de la machine. En outre, les paramètres s'avèrent délicatement déterminés. VEINOTT a détaillé une méthode approchée pour la détermination des paramètres des machines monophasées. Cette détermination n'aura lieu qu'avec des applications mathématiques poussées permettant une détermination efficace des paramètres, dans ce sens le logiciel MAXIMA a été adopté dans notre recherche pour caractériser notre moteur d'étude.

L'onduleur monophasé représente un sous-ensemble important pour entraîner le moteur asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque. Plusieurs techniques des commandes de l'onduleur existent dans la littérature pour la commande d'onduleur. Pour l'optimisation de l'onduleur conçu et réalisé, une technique de commande  $V/f$  est adoptée puisqu'elle n'est pas difficile à mettre en application.

L'optimisation idéale de l'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque la technique de maximisation ou poursuite de puissance maximale MPPT de type perturbation et observation est utilisée. Mais cette technique ou commande nécessite un convertisseur DC/DC pour ce la on a étudié et réalisé d'un convertisseur de type booste.

Les résultats de fonctionnement obtenus ont permis de montrer un bon comportement énergétique du système complet. Enfin Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- Implantation de système sur sites réels.

- Amélioration du système par d'autres techniques de commande ou autres types de moteur.
- Utilisation d'autres sources d'énergie non polluantes pour éviter l'arrêt du système en cas de la nuit ou l'ombre.



## Bibliographie

- [1] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant MarineAcademy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [2] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [3] L. Narvarte, E. Lorenzo, M. Aandam, Consumo de agua en medios rurales, VI Congreso Ibero-Americano de Energía Solar, Vilamoura, Portugal, 2002.
- [4] A. Hadj Arab 1, M. Benghanem 2 et A. Gharbi 1Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005)
- [5] D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.
- [6] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", JohnWiley & Sons Ltd, 2003
- [7] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [8] Bonneviot H., Courrillon M., Maigne Y., 2004, Technologies européennes du pompage solaire photovoltaïque, Fondation Energies pour le Monde ;
- [9] Mark Hankins Stand-Alone Solar Electric Systems: The Earth scan Expert Handbook for Planning, Design and Installation 2010 by Earth sca
- [10] G. A. CAPOLINO, "Contribution à la modélisation et à la simulation des machines asynchrones à condensateurs", Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 1987.
- [11] M. BOUSSAK, "Modélisation d'un moteur asynchrone monophasé à condensateurs : Optimisation, réduction de l'ordre et observateur de flux", Mémoire de DEA ENSET, 1985.
- [12]abdsmd modelisatin et simulation des machine electriques edition technosup 2012.
- [13] W. MICHAEL, "Etude théorique du moteur d'induction monophasé sans et avec phase auxiliaire", RGE, Février 1950.
- [14] J. L. DALMASSO, "Cours d'électrotechnique 1. Machines tournantes à courants alternatifs", Edition Berlin, 1984.
- [15] Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.) Cours d'électricité de puissance 2012.
- [16] A. Meroufel Contrôle de la machine asynchrone 2008.
- [17] A. Rufer P. Barrade Cours d'electronique de puissance Conversion DC/DC ecole plytechnique de laussane
- [18] Christophe PASQUIER Dimensionnement d'un hacheur survolteur polytech clernant-ferrand 2010
- [19] Nordine MAHERZI etude, conception et realisation d'un convertisseur d'energie dc/dc associe a des supercondensateurs conservatoire national des arts et metiers LYON 2010
- [20]T ARIK. OUAHIDI conception et simulation d'une sourced'alimentation constituée d'un prérégulateur et d'unonduleur monophasé de puissance ikva.école de technologie supérieure unnersité du QUÉBEC 2010
- [21] DANG Bang Viet Conception d'une interface d'électronique de puisannce Vietpour Pile à CombustibleUniversité Joseph Fourier 2006
- [22] Ferroxcube, Soft Ferrites and Accessories 2005 p. 691
- [23] Würth Elektronik, Electronic Interconnect & Electromechanical Solutions SIC-SAFCO : Condensateurs Electrolytiques Aluminium 2008 p. 34

- [24] SOFIANE AÏT CHABANE ROMAIN GIRARD Dimensionnement des composants passifs d'un convertisseur Buck univercite joseph fourier 2010
- [25] M. Angel Cid Pastor CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES ELECTRONIQUES ECOLE DOCTORALE : GEET 2007
- [26] Bower, W, and Whitaker, C.: "Certification of photovoltaic inverters: The initial step toward PV system certification", Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, May 19-24, 2002, pp. 1406 –1409
- [27] abdsamad modelisatin et simulation des machine electriques edition technosup 2012
- [28] Par M. Angel Cid Pastor CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES ELECTRONIQUES ECOLE DOCTORALE : GEET 2007
- [29] Bower, W, and Whitaker, C.: "Certification of photovoltaic inverters: The initial step toward PV system certification", Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE , May 19-24, 2002, pp. 1406 –1409
- [30] W. MICHAEL, "Etude théorique du moteur d'induction monophasé sans et avec phase auxiliaire", RGE, Février 1950.
- [31] J. L. DALMASSO, "Cours d'électrotechnique 1. Machines tournantes à courants alternatifs", Edition Berlin, 1984.
- [32] Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.) Cours d'électricité de puissance 2012
- [33] A. Meroufel Contrôle de la machine asynchrone 2008
- [34] Bernard MULTON, Hamid BEN AHMED, Nicolas BERNARD, Pierre-Emmanuel CAVAREC Les moteurs électriques pour applications de grande série Revue 3EI, Juin 2000
- [35] A. VANDENPUT, E. FUCHS, J.HÖLL, J.WHITE, W. GEYSEN Run capacitor optimization in single-phase induction motors Proceedings of Conference record on the 1986 IEEE-IAS Annual Meeting – p. 824-830
- [36] L.C. TOMASELLI, T.B LAZZARIN, D.C. MARTINS, I.BARBI Application of the vector modulation in the symmetrical two-phase induction machine drive Power Electronics Specialists, 2005 IEEE 36th Conference on, June 12, 2005 p.1253 - 1258.