

20/03

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE ELECTRIQUE & INFORMATIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT
EN ELECTROTECHNIQUE

Thème

Etude et la Commande d'un Moteur Asynchrone Alimenté par un Système
Solaire
Application au Pompage Photovoltaïque

Proposé par : E.BERKOUK

Etudié par : B.RAMDANE
B.DABOUZ

Année Universitaire : 2002/2003



Dédicaces

A l'âme de ma très cher mère
A mon très cher Père
A mes frères et soeurs
A mes neveux et nièces
A toute ma famille
A mes ami(e)s

Votre Fidèle R. BRAHIM

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Dédicaces

A mes très chers parents
A mes frères et soeurs
A mes neveux et nièces
A toute ma famille
A mes ami(e)s

D. BRAHIM

Remerciement

Nous remercions Dr E. BERKOUK, maître de conférence, de nous avoir offert la possibilité d'effectuer l'étude de ce projet. Et surtout nos profondes et respectueuses reconnaissances pour l'intérêt et la bienveillance avec lesquels nous a dirigé, et de son aide et son soutien moral.

Nos remerciements vont également à Dr M. HADDADI, Maître de conférence, à Mr C. LARBES, PhD et chargé de cours, à Pr BOUCHRIT, pour avoir d'être parmi les membres de jury pour examiner ce mémoire.

Nos remerciements vont également aux collègues Mr I. HADJ MAHAMMED, Mr Y. BAKELLI, Mr K. TOUAFEK, chargés d'études au Unité de Recherches et de Développements des Energies Renouvelables de Ghardaïa pour leurs aides et leurs soutiens moraux.

Nos remerciements vont également à nos familles pour leurs soutiens moraux durant toute la durée de préparation du diplôme.

Nous remercions toutes les personnes qui ont apportées leurs soutiens moraux et leurs encouragements, pour l'accomplissement de ce travail.

يهدف هذا المشروع إلى دراسة و محاكاة نظام الضخ الذي يعمل بواسطة الطاقة الشمسية بدون بطاريات. ويتكون هذا النظام من مولد الطاقة الكهروضوئي، مرتبط بمحول تيار مستمر مستمر، يليه موج التيار ذو ثلاث أطوار، مرتبط بمحرك غير متزامن ذو ثلاث أطوار. ولقد اعتمدنا في دراستنا بتغيير شدة الإشعاع الضوئي وداسة تأثيرها على مختلف المعطيات.

مفتاح الكلمة

موج التيار. مولد الطاقة الكهروضوئي. محول تيار مستمر مستمر. محرك غير متزامن ذو ثلاث أطوار

Résumé :

Ce travail consiste à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque sans batterie. Ce système est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, un onduleur et enfin un moteur asynchrone triphasé. Dans cette étude nous avons faire varier l'ensoleillement et étudier son influence sur les paramètres.

Mots clés :

Générateur photovoltaïque, moteur asynchrone, hacheur, onduleur, MPPT

Abstract:

This project studies and simulates a water pumping system. This system contains Photovoltaic generator, DC-DC converter (BOOST), DC-AC inverter, and Asynchronous machine.

In this project we have studies the influence of the solar flux on the solar system (ratio of the boost, voltage output of solar panel, and the other parameters of the Asynchronous machine).

Key Word :

Photovoltaic generator, DC-DC converter (BOOST), DC-AC inverter, Asynchronous machine, MPPT

Sommaire

CHAPITRE I : Panneau Solaire Modélisation et Simulation

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction	3
I.2 Principe de fonctionnement	3
I.2.1 Gisement solaire.....	3
I.2.2 La cellule photovoltaïque.....	5
I.2.2.1 Modèle des bandes d'énergies	5
I.2.2.2 Conversion photovoltaïque.....	6
I.2.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	7
I.2.3.1 Courant de court-circuit.....	8
I.2.3.2 Tension de circuit ouvert.....	9
I.2.3.3 Adaptation d'impédance.....	10

I.2.4 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque	10
I.2.4.1 Influence de la résistance série.....	11
I.2.4.2. Influence de la résistance shunt.....	11
I.2.4.3 Influence du flux	12
I.2.4.4 Influence de la température.....	13
I.2.5 Modules photovoltaïques.....	14
I.2.5.1 Puissance crête.....	14
I.2.5.2 Rendement de conversion.....	15
I.3 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	15
I.3.1 Différents modèles du générateur photovoltaïque.....	15
I.3.2 Modèle à cinq paramètres	16
I.4 Simulation du générateur Photovoltaïque.....	17
I.4.1 Caractéristique $I = f(V)$	19
I.4.2 Influence des paramètres.....	19
I.4.2.1 Influence du flux.....	19
I.4.2.2 Influence de la température.....	20

I.5 Conclusion.....	21
---------------------	----

CHAPITRE II : Modélisation et simulation de l'association

Générateur photovoltaïque -hacheur

II Introduction.....	22
II.1 Hacheur survolteurs 'Boost converter'.....	22
II.2 Hacheur dévolteur 'Buck converter'.....	25
II.3 Choix entre les deux hacheurs pour les systèmes PV.....	27
II.4 Conception d'un hacheur Boost.....	27
II.5 Stratégie de recherche du point du fonctionnement optimal.....	28
II.5.1 la méthode de dérivé de puissance.....	28
II.5.2 la méthode comparaison de phase.....	29
II.5.3 la méthode utilisant la cellule pilote.....	30
II.5.4 La méthode dite perturber & observer.....	31
II.6 Simulation de l'association GPV et hacheur.....	32
II.6.1 Simulation d'un hacheur survolteur"Boost".....	32

II.6.2 Simulation du MPPT.....	34
II.6.3 Résultats de Simulation.....	35
II.7 Conclusion.....	37

CHAPITRE III : ETUDE DE L'ASSOCIATION ONDULEUR -MOTEUR **ASYNCHRONE**

III.1 Introduction.....	38
III.2 Modélisation de L'onduleur.....	38
III.2.2 La M.L.I (Modulation de Largeur D'Impulsion).....	40
III.3 Modélisation de la machine Asynchrone.....	42
III.3.1 Introduction.....	42
III.3.2 Hypothèses Simplificatrices	42
III.3.3 Convention.....	43
III.3.4 Modèle triphasé de la machine.....	43
III.3.4.1 Equation électriques de la MAS.....	43
III.3.4.2 Equation Mécanique.....	44
III.3.5 Transformation de PARK.....	45

III.3.5 Transformation de PARK.....	45
III.3.6 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK....	46
III.3.7 Choix du référentiel.....	47
III.3.8 Mise sous forme d'équation d'état	48
III.4 Conclusion.....	53

CHAPITRE IV: MODELISATION ET SIMULATION DU MODELE GLOBAL

IV.1 Introduction	54
IV.2 Condition pour un bon fonctionnement	54
IV.3 Simulations et résultats	55
IV.4 Conclusion	67
Conclusion Générale	68
Références Bibliographiques	70
Annexe	73



NOMENCLATURE

I_{ph} : courant photogénéré par le générateur sous éclairage (A).

I_D : courant qui traverse la diode (A).

I_{sat} : courant de saturation (A).

n_s : nombre des cellules en série.

n_p : nombre des cellules en parallèle.

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

I_0 : courant à l'obscurité (A).

I_{Rsh} : courant qui traverse R_{sh} (A).

R_s : résistance série du générateur (Ω).

R_{sh} : résistance shunt (parallèle) du générateur (Ω).

q : charge d'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ coulomb).

m : facteur d'idéalité.

K_1 : constante ($1.2 \text{ A/cm}^2\text{K}^3$).

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

T : Température absolue ($^{\circ}\text{K}$).

S : le rapport de l'ensoleillement en %.

E_c : énergie de la bande de conduction (eV).

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

E_v : énergie de la bande de valence (eV).

E : champ électrique (V/m).

A_0 : constante .

K_B : constante .

Φ : Flux solaire (W/m^2).

P_{max} : puissance maximale (w).

I_{max} : courant maximal (A).

V_{max} : tension maximale (V).

P_c : puissance crête (w).

P_{opt} : puissance optimale (w).

I_{opt} : courant optimal (A).

V_{opt} : tension optimale (V).

d : rapport cyclique.

I_i : courant d'entrée du hacheur (A).

V_i : tension d'entrée du hacheur (V).

I_o : courant de sortie du hacheur (A).

V_o : tension de sortie du hacheur (V).

L : inductance de la bobine du hacheur (H).

C : capacité du hacheur (F).

K_i : commutateur.

K'_i : commutateur.

t : temps (s).

T_{off} : temps d'ouverture de commutateur (s).

T_{on} : temps de fermeture de commutateur (s).

I_L : courant au borne de la bobine (A).

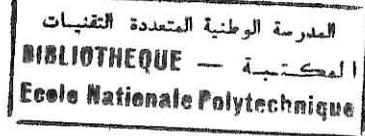
I_c : courant au borne de la capacité (A).

f : fréquence (Hz).

Q : charge résistive (Ω).

V_{ab} : tension composée du moteur (V).

V_{ac} : tension composée du moteur (V).



Msr : mutuelle stator-rotor (H).

I_r : courant rotorique (A).

L_{rr} : inductance rotorique (H).

Mrs : mutuelle rotor-stator (H).

J : moment d'inertie du moteur (kg.m^2).

C_e : couple électromagnétique du moteur (N.m).

C_r : couple résistant (N.m).

[P]: transformation de park.

n_1, n_2 : nombres fictif de spires.

K_0 : constante=1/2.

$[P]^{-1}$: transformation inverse de park.

P_e : la puissance instantanée (w).

ω_p : la vitesse angulaire (rad/sec).

ϕ_{qs} : flux statorique/ l'axe q (Weber).

ϕ_{ds} : flux statorique/ l'axe d (Weber).

ϕ_{qr} : flux rotorique/ l'axe q (Weber).

ϕ_{dr} : flux rotorique/ l'axe d (Weber).

ω_s : vitesse de synchronisme (rad/sec).

X : vecteur d'état.

Y : vecteur de sortie.

U : vecteur d'entrée.

T_r, T_s : constantes de temps rotorique et statorique .

σ : Coefficient de fuites totales.

D : Débit (m^3/h).

H : La hauteur totale d'élévation (m).

H_g : La hauteur géométrique (m).

H_a : hauteur d'aspiration (m)

H_r : hauteur de refoulement (m).

H_h : distance entre les prises des deux hauteurs précédentes (m).

H_p : la somme des pertes de charge.





V_{bc} : tension composée du moteur (V).

V_a : tension simple du moteur (V).

V_b : tension simple du moteur (V).

V_c : tension simple du moteur (V).

U_f : tension d'entre de l'onduleur (V).

I_a : courant statorique (A).

I_b : courant statorique (A).

I_c : courant statorique (A).

I_s : courant d'entrée de l'onduleur (A).

V_r : tension de référence (V).

U_p : porteuse (V).

m : indice de modulation.

f_p : fréquence de porteuse (Hz).

C_{rd} : Couple au démarrage (N.m).

r : coefficient de réglage en tension .

p : nombre de paire de pôles.

Ω_s : la vitesse du champ statorique (rad/sec).

ω_s : la pulsation du courant et de la tension statorique.

Ω : La vitesse mécanique du rotor (rad/sec).

g : est appelé glissement.

θ_p : angle électrique stator/référentiel (d,q). (rad).

R_s :résistance statorique (Ω).

R_r :résistance rotorique (Ω).

ϕ_s : flux statorique (Weber).

ϕ_r : flux rotorique (Weber).

L_{ss} : inductance statorique (H).

I_s : courant statorique (A).

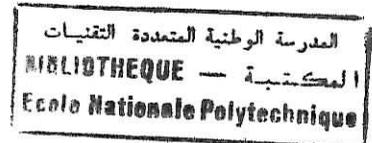
Pa : Pression (bar).

ϖ : La masse volumique du fluide(kg/m³).

D0 : le débit normal correspondant au cas où les pertes de charge dues aux chocs sont nulles (m³/h).

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE



Les crises successives du pétrole, et l'accroissement continu de la demande d'énergie dans tous les pays du monde, ont conduit les pays industrialisés à rechercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

Après la civilisation du «tout-charbon» (XIX^e s.) et du «tout-pétrole», nous nous acheminons vers celle du «tout-électrique». Dans ce contexte, parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque a de quoi séduire, surtout si on regarde son rendement de conversion énergétique (c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie primaire fournie, ici rayonnée par le Soleil), qui est plus de 20 % en laboratoire et à 15 % en production industrielle. Le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35 %, c'est-à-dire au niveau de ce qu'on sait faire en photovoltaïque avec la concentration du rayonnement solaire, de sorte qu'on peut raisonnablement penser que l'énergie électrique d'origine solaire pourra devenir rentable au XXI^e siècle. Ce fleuron des énergies renouvelables, avec son image de haute technologie, va-t-il réussir à s'imposer et, pourquoi pas, devenir l'énergie du III^e millénaire?

En 1839, Antoine Becquerel publie un Mémoire sur : les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant dès l'instant où elle est éclairée. En 1877, W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du Sélénium.

Depuis cette date, les recherches n'amenèrent pas de grands progrès, mais, en 1941, R. S. Ohl décrit, la première réalisation d'une jonction p-n dans le silicium, à effet photovoltaïque, mais il faut attendre 1955 pour que des chercheurs des Bell Telephone Laboratories (États-Unis), C. S. Fuller, G. L. Pearson et M. B. Prince, annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de la photopile solaire.

Actuellement, l'électricité photovoltaïque apparaît de plus en plus comme la solution la plus satisfaisante pour les petites quantités d'énergie. Les besoins des populations peuvent parfaitement être couverts par des photopiles pour alimenter des lampes, des pompes à eau, des téléviseurs et des réfrigérateurs. On compte un peu

plus de 3 000 pompes solaires installées et un millier de réfrigérateurs. C'est encore très peu par rapport aux besoins.

D'autres applications sont économiquement rentables dans le domaine public par exemple, l'équipement de refuges de montagne, de systèmes de communication ou des relais hertziens. Dans les zones isolées, et à titre expérimental, un certain nombre de maisons ont été équipées avec des panneaux photovoltaïques.

Dans ce travail, on étudie le pompage photovoltaïque sans batteries, c'est-à-dire, le stockage se fait sous forme d'eau dans le réservoir au lieu d'électricité dans les batteries (ce qui est plus chère).

Le premier chapitre, décrit le système à étudier en commençant par la modélisation et la simulation du panneau solaire . Le deuxième chapitre, étudie le hacheur, et décrit les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale, et simule l'association panneau solaire_hacheur en intégrant la MPPT choisie.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse à l'association onduleur_moteur qui entraîne la pompe à eau.

En fin, dans le quatrième chapitre on étudie la simulation du système global, à partir du panneau photovoltaïque jusqu'au moteur asynchrone.

CHAPITRE I

PANNEAU SOLAIRE : MODELISATION ET SIMULATION

CHAPITRE I

PANNEAU SOLAIRE : MODELISATION ET SIMULATION

I.1 Introduction

Le système photovoltaïque est un système énergétique qui utilise la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) par effet photovoltaïque en énergie électrique de type continu directement utilisable pour diverses applications.[9].

Un système photovoltaïque se compose essentiellement de deux parties principales comme le montre la figure I.1 :

- Le générateur photovoltaïque.
- Le système de stockage et de régulation d'énergie.

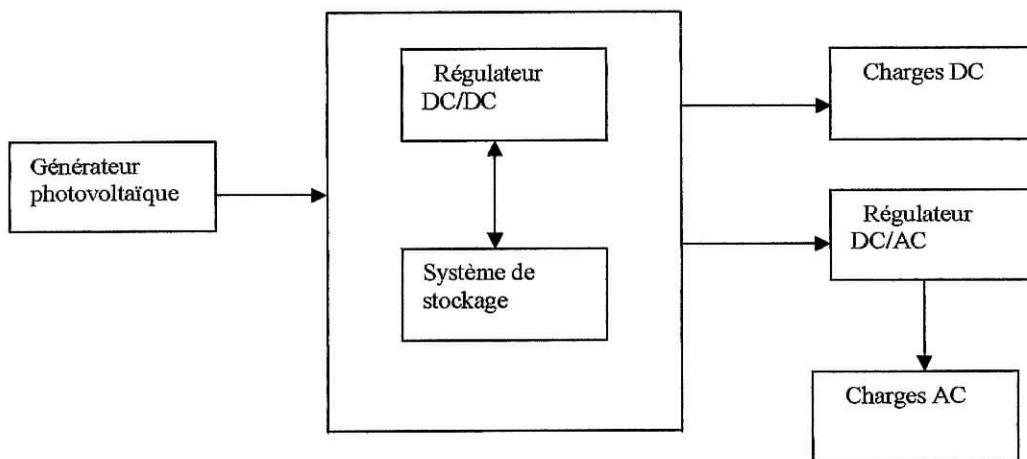


Fig. I.1: Synoptique d'un système photovoltaïque

I.2 Principe de fonctionnement

I.2.1 Gisement solaire

Le soleil est une « petite étoile » de 696 000 km de rayon, et de masse $1.99 \cdot 10^{30}$ kg. Sa température intérieure, supérieure à 10 millions de degrés, permet aux réactions

nucléaires de fusion de transformer à chaque seconde environ 6 millions de tonnes de sa masse en énergie rayonnée dans l'espace. En première approximation, le soleil rayonne globalement comme un corps noir de température $T = 5800 \text{ K}$.

Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la terre est d'environ 5.5 kWh/m^2 et par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes complexes d'absorption par les gaz, de diffusion par les molécules, et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'Ozone absorbe la majeure partie du rayonnement Ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement Infrarouge. Le flux énergétique reçu au sol dépend ainsi de nombreux facteurs et son maximum au sol ne dépasse guère 1000 W/m^2 , avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère.[10].

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans les conditions normales ($P = 1013 \text{ mbar}$, et $T = 0 \text{ °C}$), on a défini une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de 7.8 km prise pour référence unité et formée de couches planes et stratifiées composées par les divers gaz comme l'Azote (couches de 6150 m), l'Oxygène (1650 m), l'Argon (75 m), le gaz Carbonique (24 m), etc....

L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètre pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide.

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversé par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et se sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs photovoltaïques.

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient m appelé *nombre d'Air masse*.

Ce nombre d'air masse et la modélisation théorique des lois de l'absorption et de la diffusion ont permis de définir des modèles d'irradiance spectrale pour diverses conditions d'atmosphère.

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (1353 W/m^2 pour AM0, 833 W/m^2 pour AM1.5) ; d'autre part, il sert à définir un

spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques.

Ainsi, les conditions standard de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de 1000W/m^2 et une température de $25\text{ }^\circ\text{C}$; sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécification d'un dispositif photovoltaïque donné.

Signalons que outre l'influence de l'atmosphère, le flux solaire reçu sur une surface dépend :

- De l'orientation et de l'inclinaison de la surface.
- De la latitude du lieu et de son degré de pollution.
- De la période de l'année.
- De l'instant considéré dans la journée.
- De la nature des couches nuageuses.

1.2.2 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, La cellule la plus répandue est réalisée à base de Silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque est donc un dispositif transformant une partie de l'énergie lumineuse, issue du soleil en énergie électrique. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la conversion de cette cellule.[11].

Certaines cellules photovoltaïques utilisent d'autre type de matériaux semi-conducteur, comme le Silicium multicristallin et amorphe, l'Arséniure de Gallium ou un matériau en couches minces, qui produisent des porteurs de charge (électron-trou) en absorbant des photons .

1.2.2.1 Modèle des bandes d'énergies

A chaque électron sur une orbite correspond un niveau d'énergie bien défini. Pour passer du niveau d'énergie E_1 à un autre niveau E_2 , il faut fournir une énergie égale à la

différence des deux énergies ($E_1 - E_2$)

- Si les orbitales d'excitation contiennent des électrons, l'atome est dans un état excité.

- Si les orbitales d'excitation ne contiennent pas des électrons, l'atome est dans un état stable.

A 0°K , la conductivité est nulle car tous les états de la bande de valence sont remplis, et tous les états de conduction sont libres. La bande interdite est la différence d'énergie entre le point le plus bas de la bande de conduction (E_c) et le point le plus haut de la bande de valence (E_v). La largeur de la bande interdite (gap) est l'énergie d'ionisation (E_g). [11].

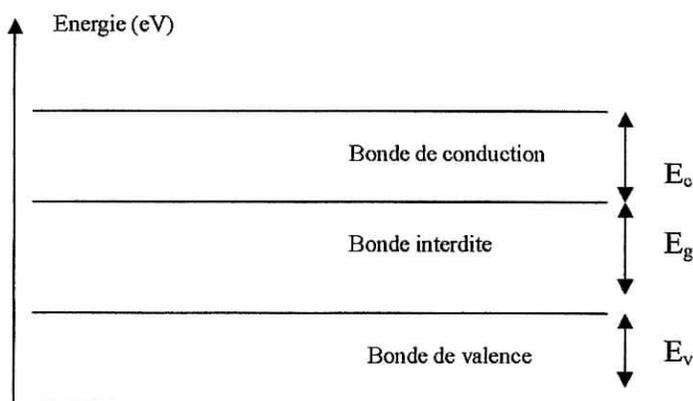


Fig. I.2: Diagramme de bande d'énergie d'un semi-conducteur.

1.2.2.2 Conversion photovoltaïque

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homo jonctions P-N), ou entre deux matériaux (hétéro structures). La moins épaisse (couche N) ou celle de largeur de bande interdite la plus grande est soumise au flux lumineux.

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui la constituent sont capables de transmettre leurs énergies aux électrons de valence du

semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre pour circuler dans le matériau. Le manque de l'électron dans la liaison rompue - qui s'appelle trou - peut aussi se déplacer à l'intérieur du matériau. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec charge positive égale à celle de l'électron. La figure [I.3] illustre le principe de conversion. [15].

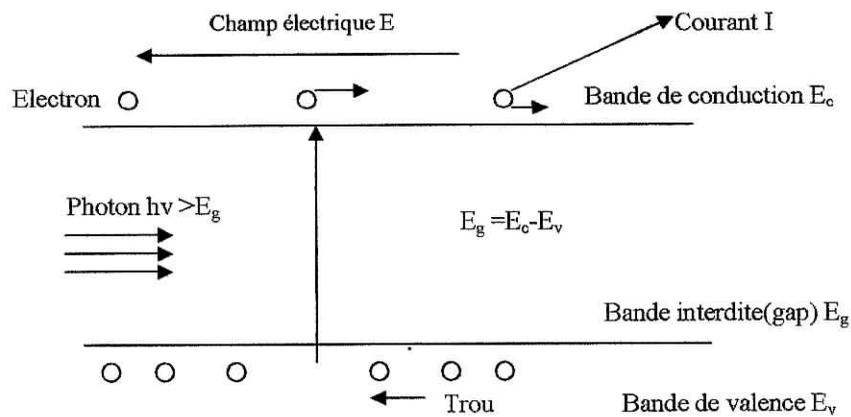


Fig I.3: Principe de conversion d'une cellule photovoltaïque

I.2.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure [I.4], décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par les trois points importants, à savoir :

- Le courant de court-circuit I_{cc} en M.
- La tension de circuit-ouvert V_{oc} en S.
- La puissance maximale en A.

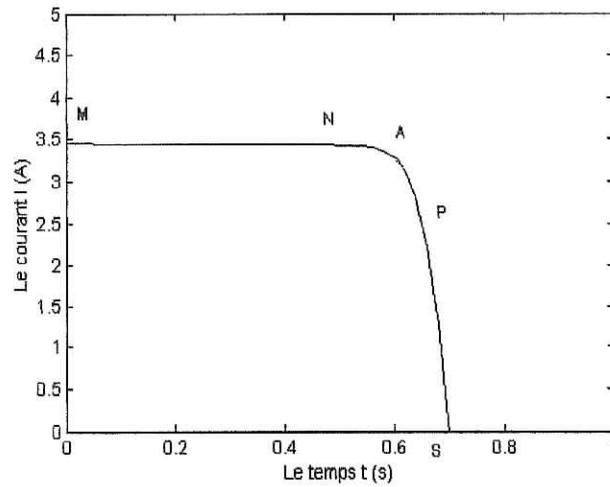


Fig.1.4: Caractéristique courant -tension d'une cellule photovoltaïque

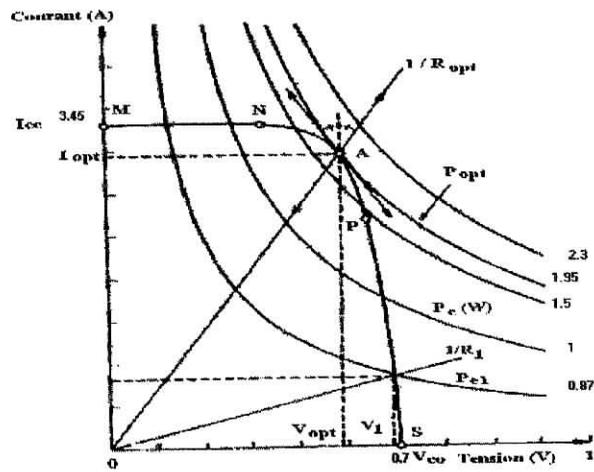


Fig.1.5 a : Courbe d'qui -puissance et droite de charge

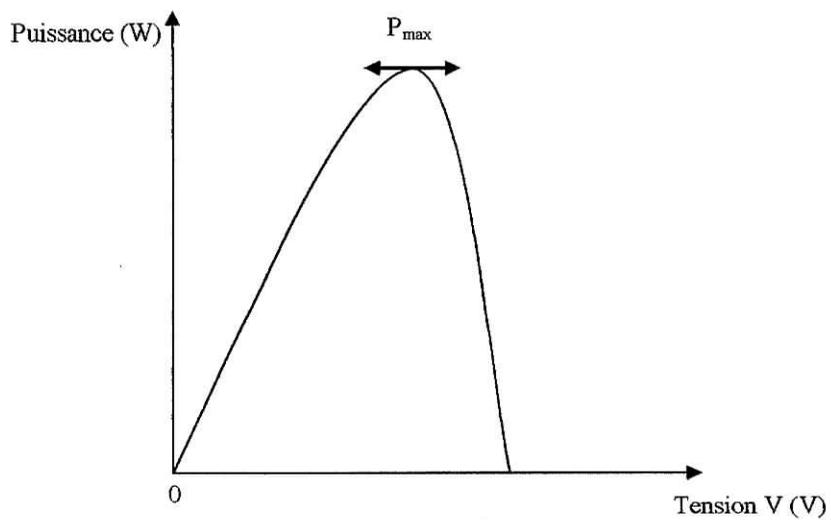


Fig. : 1.5 b: Courbe caractéristique $P=f(V)$

La figure I.4 montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne puisse être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension.).

On peut la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique, et comme une source de courant dans la partie horizontale de cette caractéristique.

I.2.3.1 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$).

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(R_s I_{cc})}{AK_B T}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

A un niveau d'éclairement standard (égale à 1 kW/m^2), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure [I.4]). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photocourant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement Φ (figure I.5 a) :

$$I_{cc} = I_{ph} = K\Phi \quad (1.2)$$

Où K est une constante et Φ est exprimé en W/m^2 .

I.2.3.2 Tension de circuit-ouvert

Dans le cas du circuit-ouvert (point S de la figure I.4), la tension de circuit-ouvert peut être exprimée analytiquement suivant la formule :

$$V_{co} = \frac{AK_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_{sat}}{I_{sat}}\right) \quad (1.3)$$

Si la résistance série est nulle et la résistance shunt est infinie, l'expression devient :

$$V_{oc} = \frac{AK_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad (1.4)$$

La tension de circuit-ouvert V_{oc} correspond en fait, à la chute de tension dans la jonction P-N, lorsqu'elle est traversée par le photocourant I_{ph} .

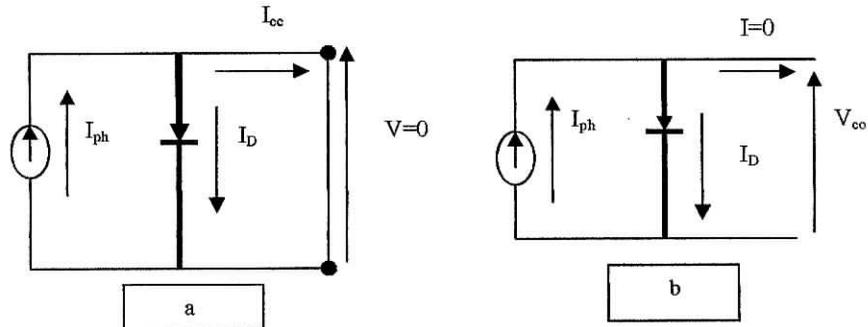


Fig.1.5: Schéma de la cellule photovoltaïque

- a. Dans le cas du court-circuit.
- b. Dans le cas du circuit-ouvert.

1.2.3.3 Adaptation d'impédance

Si on considère la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque pour un niveau de flux solaire Φ et à une température T fixes, et si l'on place une charge variable R aux bornes de cette cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule et celle de la charge.

La caractéristique d'une charge résistive est une droite de pente égal à $\frac{1}{R}$ (sachant que $\frac{I}{V} = \frac{1}{R}$).

La puissance délivrée à cette charge ne dépendra que de la valeur de la résistance R . La puissance maximal est obtenue pour $R=R_{opt}$.

$$P_{max} = V_{max} I_{max} \quad (1.5)$$

- Si la valeur de la charge R est petite, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région MN de la courbe représentée dans la figure 1.4. C'est la région où la cellule se comporte comme une source de courant presque égal au courant de court-circuit.

- Si la valeur de la charge R est élevée, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région PS de la courbe, dans laquelle la cellule se comporte comme un générateur à tension constante presque égale à la tension de circuit-ouvert.

1.2.4 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule, où d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont les suivants :

- La résistance série R_s .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le courant de saturation I_{sat} .
- Le flux Φ .
- La température T .

Pour un flux Φ égal à 1 KW/m^2 , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation I_{sat} qui dépend directement de la température T de la cellule.

1.2.4.1 Influence de la résistance série

D'une valeur en général très petite, la résistance série agit donc sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension (Fig 1.6). Elle ne modifie pas la tension de circuit-ouvert.

Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit.

La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille de collectrice.

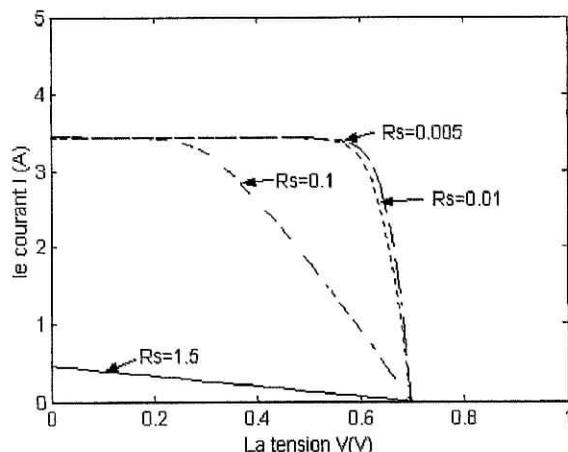


Fig.1.6: Influence de la résistance série sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

1.2.4.2 Influence de la résistance shunt

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photocourant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée.

La résistance shunt est en général très élevée. On peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit (Fig.7).

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit-ouvert de la cellule ; en outre, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

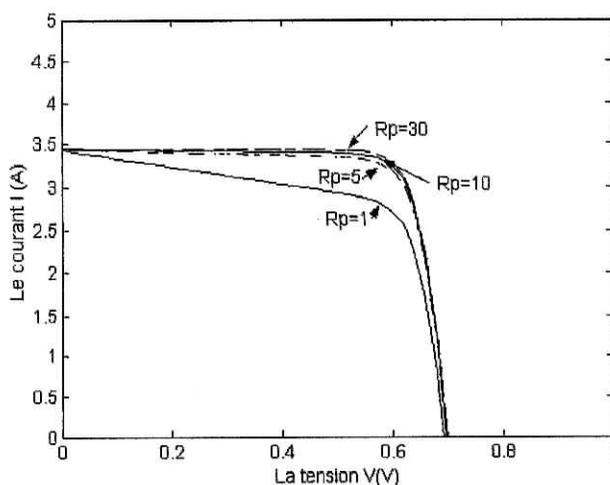


Fig.1.7: Influence de la résistance shunt sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

I.2.4.3 Influence du flux

Les fabricant des cellules solaires fournissent en général quelques courbes (I-V) qui correspondent d'une part, à la variation de la caractéristique I-V en fonction du flux avec une température fixe, et d'autre part, ils fournissent les mêmes caractéristiques avec une température variable, à éclairement constant.

La figure I.8 représente la caractéristique $I=f(V)=I_{ph}-I_D$, tracée pour différents valeurs du flux solaire :

- A un faible niveau d'éclairement, le courant de court-circuit I_{cc} est proportionnel à l'éclairement solaire (la résistance série étant négligée). Il est de l'ordre de 30 mA/cm² pour une cellule réalisée en silicium monocristallin sous un flux égal à 1 KW/m² et à la température égal à 25°C.
- La tension de circuit-ouvert augmente lentement avec l'augmentation du flux. Elle ne dépend pas de la surface éclairée mais du matériau utilisé seulement. Sa valeur est de l'ordre de 700 mV sous un flux égal à 1 KW/m² et une température égale à 25°C pour une cellule en silicium monocristallin.
- La puissance optimale du module photovoltaïque est proportionnelle au flux.

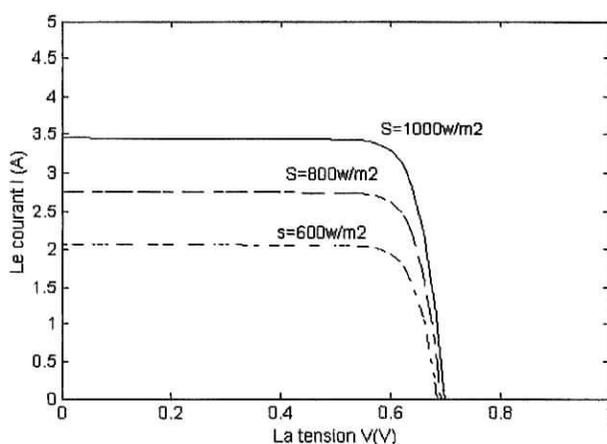


Fig.I.8: Influence de l'éclairement sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

1.2.4.4 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques. Ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à flux de 1 KW/m^2 n'en transforme en électricité que 12% au plus, le reste étant réfléchi (6 à 8%) ou dissipé en chaleur (80 à 82 %).

Ainsi, si la cellule photovoltaïque n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et les performances électriques peuvent se dégrader.

La figure 1.9 montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule.

On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite E_g . Cette augmentation est de l'ordre de $25 \mu\text{A/cm}^2 \text{ K}$, soit une variation de +0.1% par K.

En même temps, on assiste à une augmentation notable du courant de saturation de diode puisque :

$$I_{sat} = A_0 T^3 \exp\left(\frac{E_g}{K_B T}\right). \quad (1.6)$$

Cette augmentation entraîne une diminution nette de la tension de circuit-ouvert (environ -2.2mV par K, soit une variation relative de -0.4% par K.).

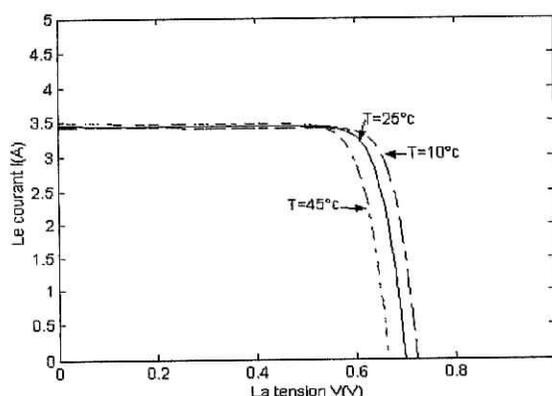


Fig.1.9: Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

I.2.5 Modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est un ensemble des cellules connectées en série, parallèle, ou en séries parallèles. Les propriétés particulières des modules photovoltaïques requièrent un certain nombre de grandeurs caractéristiques suivants :

I.2.5.1 Puissance crête

C'est la puissance électrique qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumise à irradiance de 1000W/m^2 , alors que la température des cellules est de 25°C . Elle s'exprime en Watt-crête (Wc).

I.2.5.2 Rendement de conversion

Le rendement de conversion est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{opt}}{S \Phi} \quad (1.7)$$

Sachant que la puissance électrique optimale délivrée par le module photovoltaïque est exprimée en watt, Φ est le flux reçu en W/m^2 , et la surface effective de la cellule S en m^2 .

Le rendement d'une cellule photovoltaïque fabriquée en silicium monocristallin varie entre (12 à 14%), et 11 % pour une cellule en silicium polycristallin.

I.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

I.3.1 Différents modèles du générateur photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles des générateurs photovoltaïques, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension (I-V) pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension.

On distingue à titre d'exemple :

- modèle à deux paramètres.
- modèle à cinq paramètres.
- modèle d'Appelbaum.
- modèle d'Akbaba.
- modèle à deux exponentielles.
- modèle à quatre paramètres.

Dans notre étude, on s'intéresse au modèle à *cinq paramètres*.

I.3.2 Modèle à cinq paramètres

Dans ce modèle, la cellule photovoltaïque est modélisée comme étant un générateur de courant égal à I_{cc} shunté par une diode qui a les caractéristiques de la cellule à l'obscurité, avec une résistance série R_s .

En effet, l'effet de la résistance shunt R_{sh} n'est pas négligeable, et le circuit équivalent est représenté par la figure (I.10).

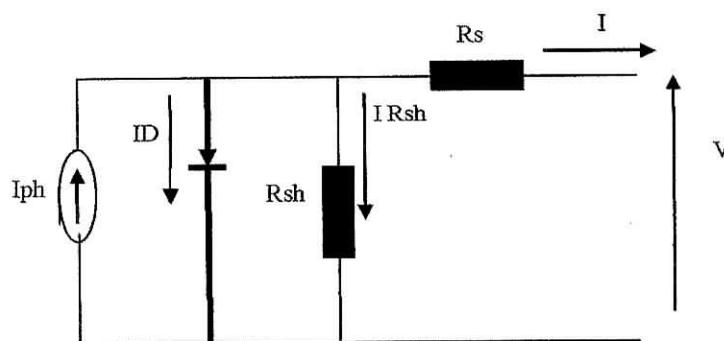


Fig.I.10 : Circuit Equivalent d'une cellule photovoltaïque
Selon Le Modèle à Cinq Paramètres

La loi de Kirchoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rsh} \quad (I.8)$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(q(V + I_n R_s) \frac{1}{mkn_s T} \right) - 1 \right]. \quad (1.9)$$

Avec :

$$I_0 = K_1 T^3 \exp \left(\frac{-E_g}{KT} \right) \quad (1.10)$$

Le courant qui passe dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{Rsh} = \frac{V + I_n R_s}{n_s R_{sh}}. \quad (1.11)$$

Donc l'expression de la caractéristique I-V est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I_n R_s)}{mKn_s T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I_n R_s}{n_s R_{sh}}. \quad (1.12)$$

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(298K) \left[1 + (T - 298)(5 * 10^{-4}) \right]. \quad (1.13)$$

$$I_{ph}(298K) = SI_{ph} \max. \quad (1.14)$$

1.4 Simulation du générateur Photovoltaïque

La simulation est faite sur le logiciel *MATLAB (version 6.1)*. Pour construire le modèle global du panneau solaire, on subdivise le modèle sous forme des blocs (sousystème), représentant les différents éléments du circuit équivalent.

Par exemple, le courant passant par la résistance shunt (qui est donné

par $I_{Rsh} = \frac{V + IR_s}{n_s R_{sh}}$) Est réalisé comme suit :

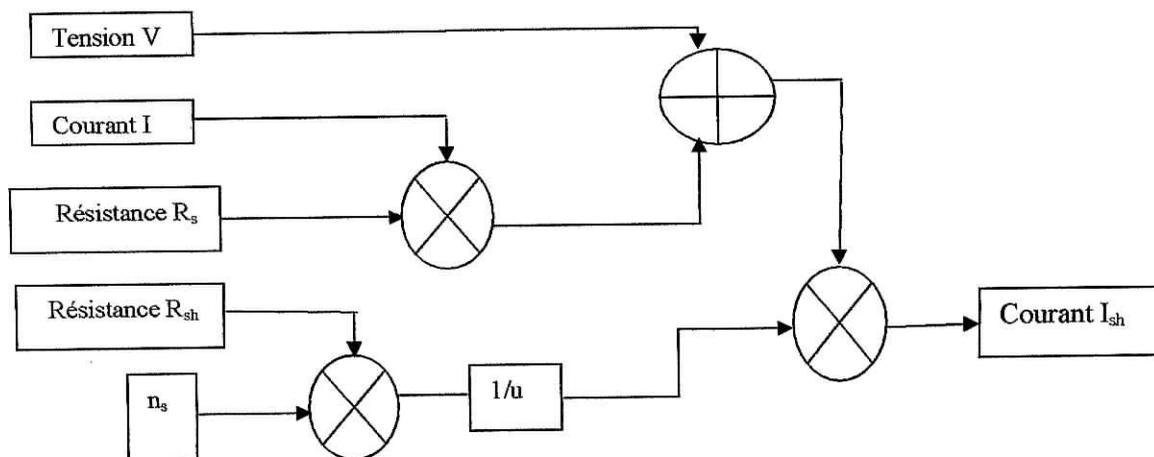


Fig.I.11 : Modèle de simulation du courant passant par la résistance

Après la création des différents blocs, l'interconnecte entre ces subsystemes produits le modèle final du générateur photovoltaïque. La figure I.12 illustre le modèle global. La température T et le flux solaire Φ , le nombre des cellules séries n_s et parallèle n_p sont considérés des variables d'entrées de notre modèle de simulation.

I.4.1 Caractéristique $I = f(V)$

Nous avons connecté plusieurs modules en série et parallèle afin d'augmenter en puissance, La courbe caractéristique $I = f(V)$ de plusieurs générateurs photovoltaïques ont été obtenue en effectuant la simulation selon le modèle mathématique établie précédemment, est représentée sur la figure I.13.

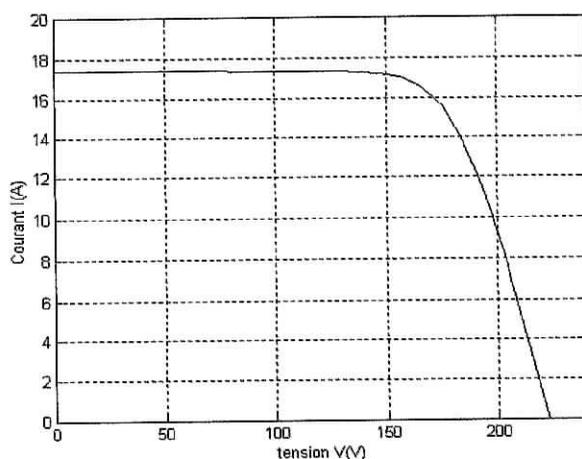


Fig. I.13 : Caractéristique $I = f(V)$, $T = 25^\circ\text{C}$, $\Phi = 1000\text{w/m}^2$

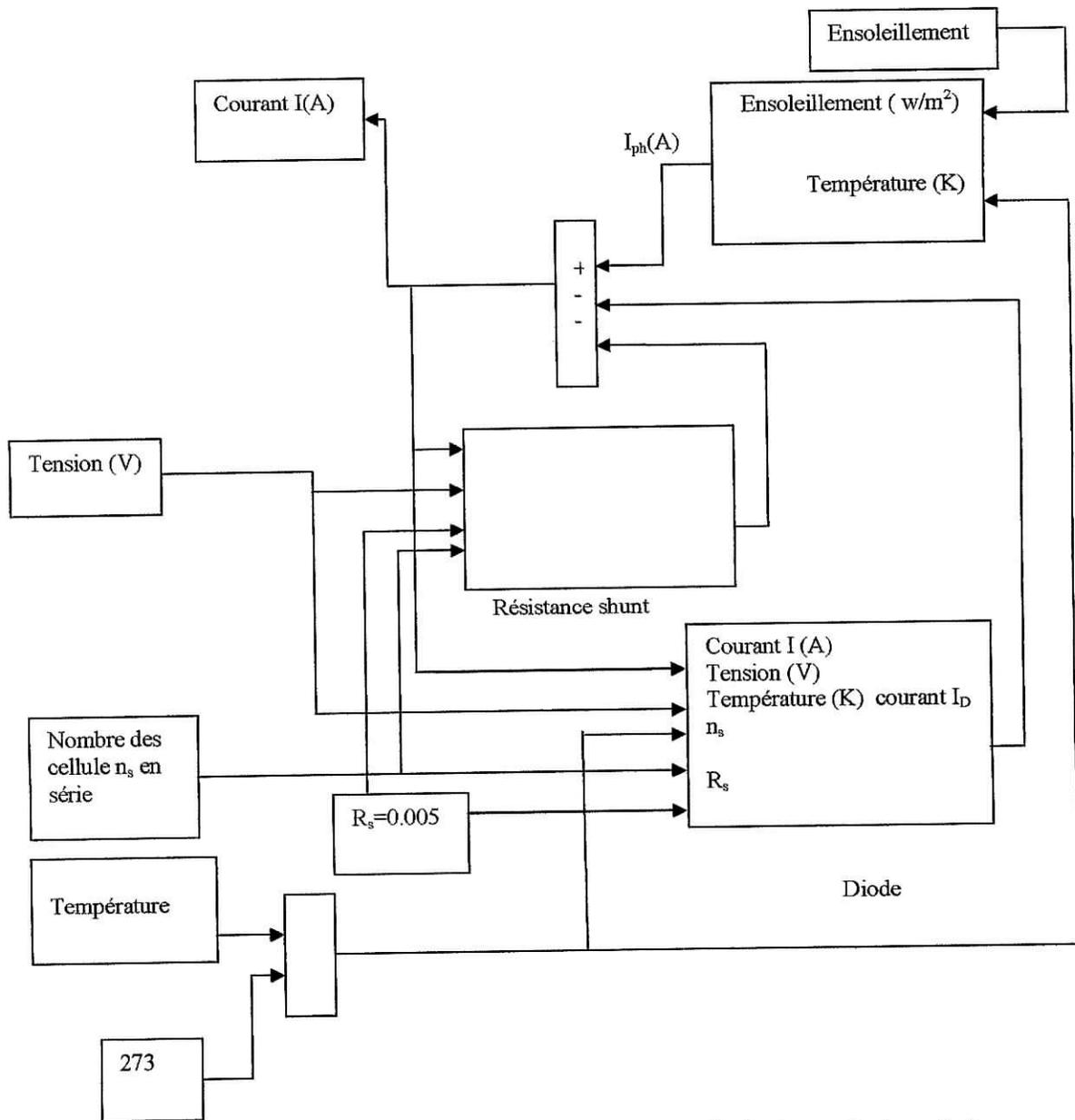


Fig.I.12 : Simulation du modèle globale du générateur photovoltaïque.

1.4.2 Influence des paramètres

1.4.2.1 Influence du flux

En faisant varier le paramètre flux solaire Φ entre 100 et 1000 W/m^2 . Nous obtenons a cet effet la caractéristique $I = f(V)$ comme représenté dans la figure 1.14 .

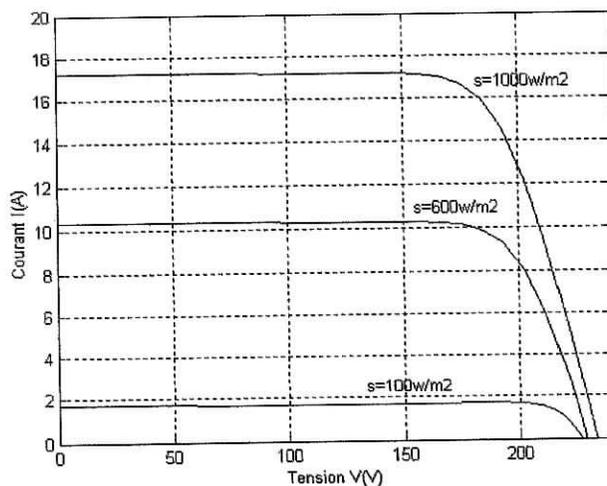


Fig.I.14 : Influence du flux solaire Φ , avec $T=25^{\circ}\text{C}$.

D'après les résultats obtenus, nous constatant que lorsque le flux diminue, le courant de court-circuit diminue ; et la tension de circuit-ouvert demeure constante. Et le point de puissance maximal diminue.

I.4.2.2 Influence de la température

En faisant varier le paramètre température entre 0 et 60°C. Nous obtenons à cet effet la caractéristique $I = f(V)$ comme représenté dans la figure I.15.

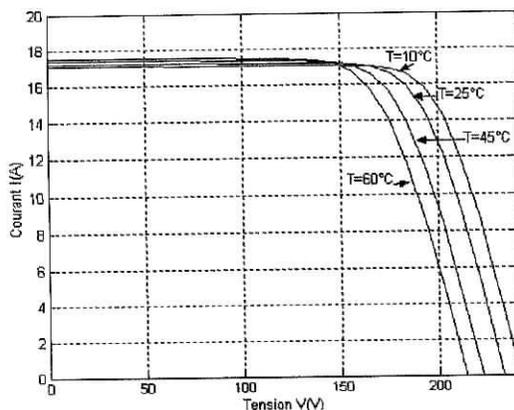


Fig.I.15 : Influence de la température T avec $\Phi=1000\text{w/m}^2$

D'après les résultats de simulation, nous remarquons que lorsque la température T augmente, la tension de circuit-ouvert diminue ; et le courant de court-circuit demeure

pratiquement constant. Le point de puissance maximal s'abaisse par conséquent.

I.4.2.3 Influence de la résistance shunt

En faisant varier la résistance R_{sh} de 1 jusqu'à 30, on constate que la puissance au point de fonctionnement optimal diminue lorsque la résistance R_{sh} .

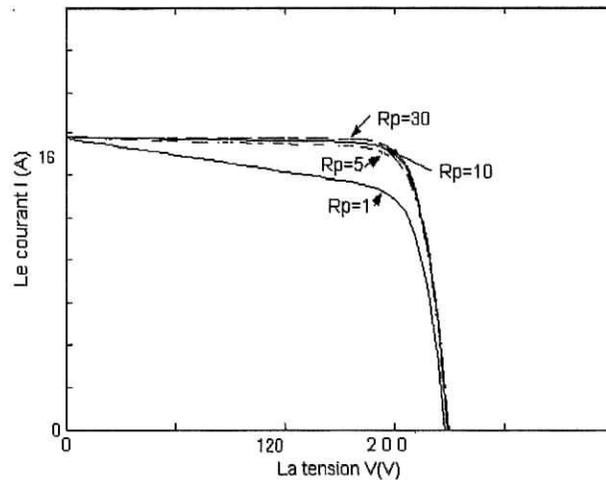


Fig.I.16: Influence de la résistance shunt sur la caractéristique GPV

I.4.2.4 Influence de la résistance série

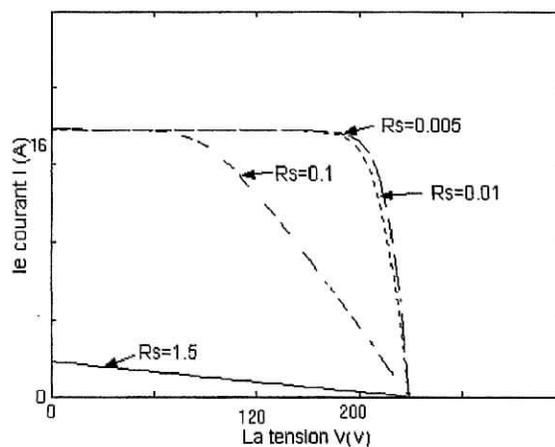


Fig.I.17: Influence de la résistance série sur la caractéristique GPV

Après cette simulation, on remarque que la résistance séries influe directement sur la

puissance du point de fonctionnement optimal.

I.5 Conclusion

La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, et l'étude de l'influence des paramètres température T et flux Φ sur la courbe $I = f(V)$ permettent de connaître son comportement pour un meilleur suivi de la poursuite de point de puissance maximal et pour une meilleure simulation d'un système photovoltaïque.

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION GENERATUR PHOTOVOLTAIQUE- HACHEUR

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE-HACHEUR

II Introduction

Pour convertir l'énergie solaire avec un meilleur rendement, il est indispensable de travailler avec un point de fonctionnement à puissance maximale. Le générateur photovoltaïque fournit sa pleine puissance en un point de fonctionnement bien déterminé dans la caractéristique $I=f(V)$. En effet, il serait judicieux de se positionner en ce point précis, mais malheureusement il fluctue dans de larges proportions à cause des variations de températures et de l'éclairement. Pour pallier à ce problème et augmenter le rendement énergétique du système, un dispositif électronique basé sur un convertisseur DC-DC, est intercalé entre le générateur photovoltaïque et la charge, le maintien de ce point de fonctionnement au point de puissance maximale est assuré par le contrôle continu du rapport cyclique de ce convertisseur de puissance. Néanmoins, ce dispositif nécessite beaucoup d'attention que se soit sur l'aspect dimensionnement et sur du lui du contrôle et asservissement afin d'éviter l'instabilité du système.

Les convertisseurs DC-DC étudiés sont :

Hacheur parallèle 'survolteur'.

Hacheur série 'dévolteur'.

II.1 Hacheur survolteurs 'Boost converter'

Le hacheur parallèle commande le débit d'un générateur de courant dans un récepteur de tension. On appelle ce hacheur « survolteur » car la tension de sortie est supérieure à la valeur moyenne de la tension d'entrée, la self est mise en série avec la source pour empêcher les courts-circuits quand l'interrupteur K est fermé d'un part, et pour limiter les ondulations de courant d'autre part.[1]. Le schéma équivalent du convertisseur est représenté dans la figure ci-dessous :

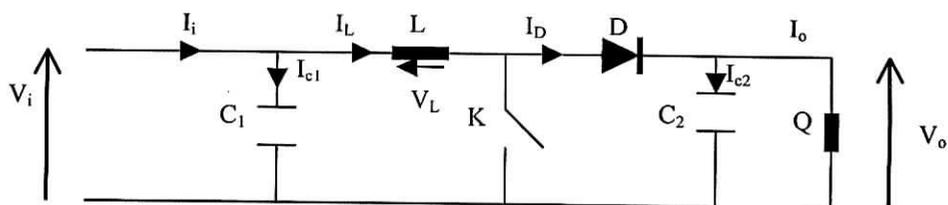


Fig.II.1. schéma équivalent d'un hacheur survolteur 'boost'

- Pendant la fermeture de l'interrupteur K entre $[0, dT]$, le courant traverse l'inductance L et la diode reste bloqué, donc le courant qui traverse la charge Q à partir du générateur est nul.
- Pendant l'ouverture de l'interrupteur K entre $[dT, T]$, le courant traverse l'inductance L et la diode pour alimenter la charge Q. [29].

Par application de la loi de kirchoff :

- $t \in [0, dT]$ on a les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{d(t)} = I_i(t) - I_L(t).$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{d(t)} = -I_o(t). \quad (II.1)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{d(t)} = V_i(t).$$

La figure.II.2 illustre le fonctionnement du hacheur pendant la fermeture de l'interrupteur K c'est-à-dire entre $[0, dT]$.

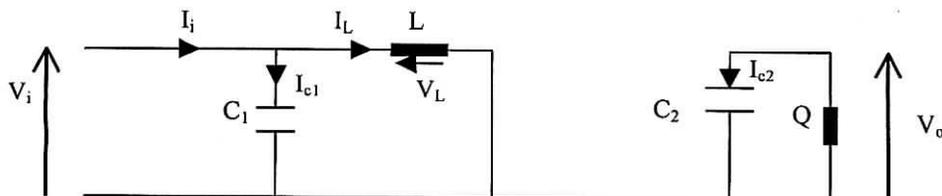


Fig.II.2. schéma équivalent de hacheur pendant la fermeture de l'interrupteur K

- $t \in [dT, T]$ on a les équations suivants :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{d(t)} = I_i(t) - I_L(t).$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{d(t)} = I_L(t) - I_o(t). \quad (II.2)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{d(t)} = V_i(t) - V_o(t).$$

La figure.II.3 représente le principe de fonctionnement de hacheur pendant l'ouverture de l'interrupteur K.

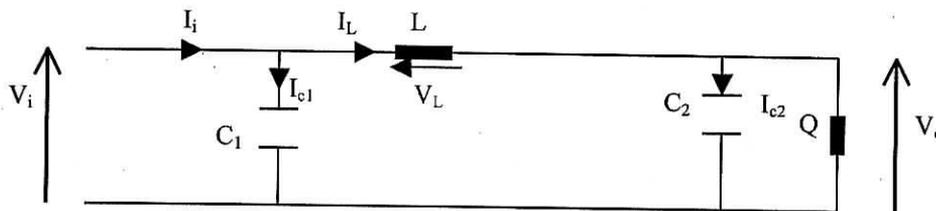


Fig.II.3. schéma équivalent de hacheur pendant l'ouverture de K

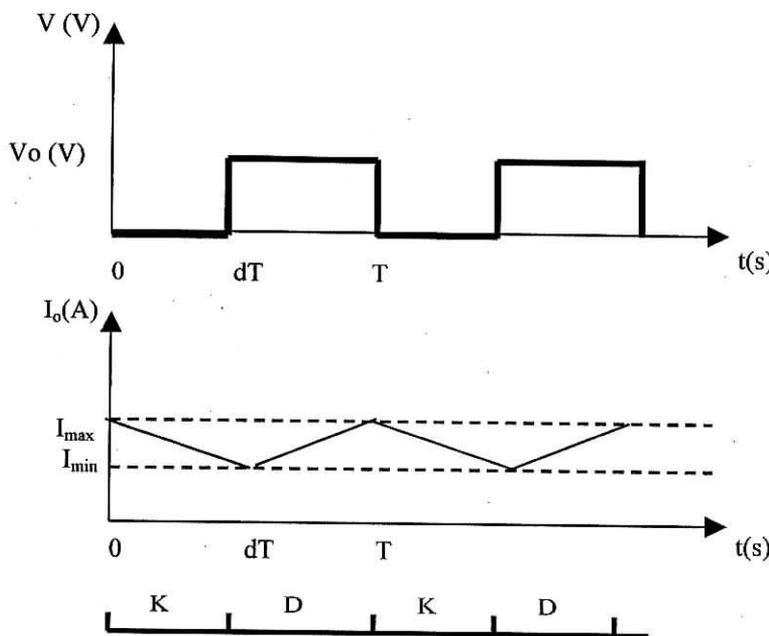


Fig. II.4. Les formes d'ondes de tension et de courant de sortie.

La tension et le courant moyens de sortie de ce hacheur ont pour valeur, [1]:

$$\bar{V}_o = \frac{V_i}{(1-d)}. \quad \bar{I}_o = I_i(1-d). \quad (II.3)$$

II.2 Hacheur dévolteur 'Buck converter'

Le hacheur série commande le débit d'un générateur de tension dans un récepteur de courant, On l'appelle hacheur dévolteur car la tension de sortie a une valeur moyenne inférieure à la tension d'entrée. La DRL permet de libérer l'énergie emmagasiner au niveau de la self quand l'interrupteur K est ouvert. Le schéma équivalent du convertisseur est représenté dans la figure ci-dessous.

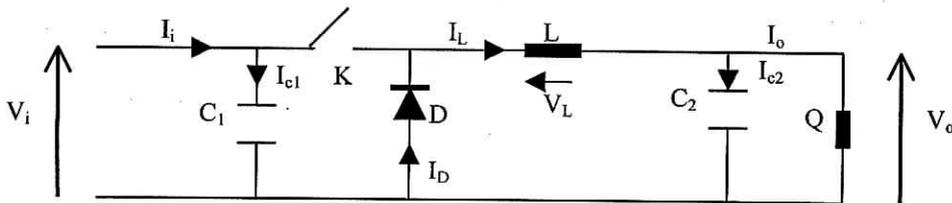


Fig.II.5. schéma équivalent d'un hacheur dévolteur 'buck'

- Pendant la fermeture de l'interrupteur K entre $[0, dT]$, le courant traverse l'inductance L et la diode reste bloquée, mais il existe un courant qui traverse la charge Q.
- Pendant l'ouverture de l'interrupteur K entre $[dT, T]$, le courant emmagasiné dans l'inductance L pendant la première conduction il se circule dans la charge Q à travers la diode qui joue le rôle d'une diode à roue libre pour alimenter la charge Q.[29].

Par application la loi de kirchoff :

- $t \in [0, dT]$ on a les équations suivants :

$$\begin{aligned}
 I_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{d(t)} = I_i(t) - I_L(t). \\
 I_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{d(t)} = I_L(t) - I_o(t). \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{d(t)} = V_i(t) - V_o(t).
 \end{aligned}
 \quad (II.4)$$

La figure II.6 montre le fonctionnement de hacheur lorsque K est fermé, entre $[0, dT]$.

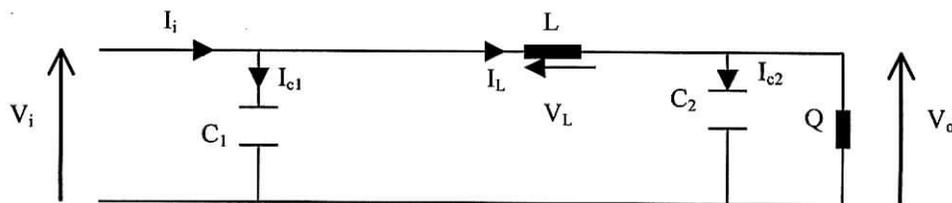


Fig.II.6. schéma équivalent de hacheur pendant la fermeture de K.

- $t \in [dT, T]$ on a les équations suivants :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{d(t)} = I_i(t).$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{d(t)} = I_L(t) - I_o(t). \quad (II.5)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{d(t)} = -V_o(t).$$

La figure II.7 illustre le fonctionnement de hacheur pendant l'ouverture de l'interrupteur K.

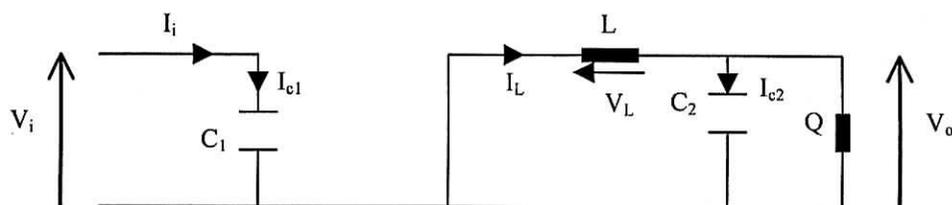


Fig.II.7. schéma équivalent de hacheur pendant l'ouverture de K.

Le schéma ci-dessous représente les formes d'ondes de courant et de tension de sortie.

La valeur moyenne de la tension de sortie est égal à ,[1] :

$$V_o = dV_i. \quad I_o = \frac{I_i}{d}. \quad (II.6)$$

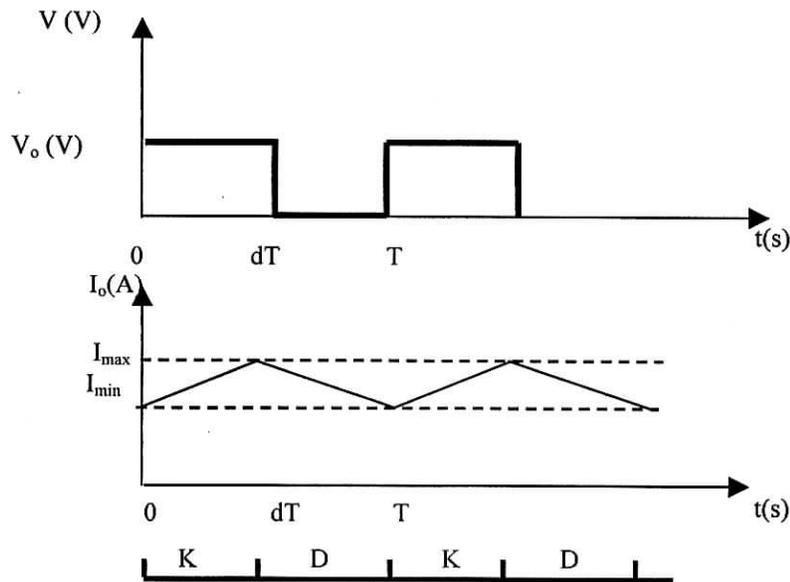


Fig. II.8. Les formes d'ondes du courant et de tension de sortie.

II.3 Choix entre les deux hacheurs pour les systèmes PV

L'étude comparative entre les convertisseurs DC-DC BOOST et BUCK pour le système photovoltaïque est basée sur le rendement énergétique.

Il est montré que la poursuite de point optimal est basée sur la configuration de convertisseur de type BOOST a pour conséquence un meilleur rendement en puissance et une utilisation efficace des modules solaires.

II.4 Conception d'un hacheur Boost

Pour la conception et le calcul des éléments du convertisseur (c'est à dire la capacité C et la bobine L); on se base sur l'équation suivante :

$$L = \frac{VdT}{\Delta I} \quad (II.7) \quad [5].$$

Une solution adoptée pour rendre le courant débité par le générateur sensiblement constant. C'est l'utilisation d'un filtre, il faut réaliser un filtre de telle façon que : $LC\omega_2 \geq 1$.

Donc $C = \frac{1}{L\omega_2}$. (II.8) [5].

II.5 Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimal

Plusieurs algorithmes de commande de poursuite du point de puissance maximal (Maximal Power Point Tracking MPPT) ont été développés afin d'assurer le contrôle continu du rapport cyclique 'd' du hacheur, pour maintenir le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque au point de puissance maximal (MPP).

Les méthodes les plus importantes sont présentées ci-après.[9].

- La méthode de la dérivée de la puissance.
- La méthode de comparaison de phase.
- La méthode de la cellule pilote.
- La méthode dite "perturber et observer".

II.5.1 la méthode de dérivé de puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P=f(V)$ obtenue directement de la caractéristique du générateur photovoltaïque $I=f(V)$.

Le point de puissance maximal est obtenue lorsque la dérivée $\frac{dP}{dV} = 0$.

Deux cas sont à distinguer :

- $\frac{dP}{dV} > 0$. dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche "MPP"; alors il faudrait augmenter la tension pour s'approcher du "MPP".le rapport cyclique 'd' est diminué pour atteindre le point de puissance maximal.
- $\frac{dP}{dV} < 0$. alors, le point de fonctionnement se trouve à droite du "MPP"; dans ce cas il faudrait diminuer la tension pour s'approcher du "MPP".le rapport cyclique 'd' est augmenté pour atteindre le point de puissance maximal.

Le principal inconvénient de cette méthode est l'instabilité du système qui est dû principalement à la mesure de la dérivée de la puissance. [9].

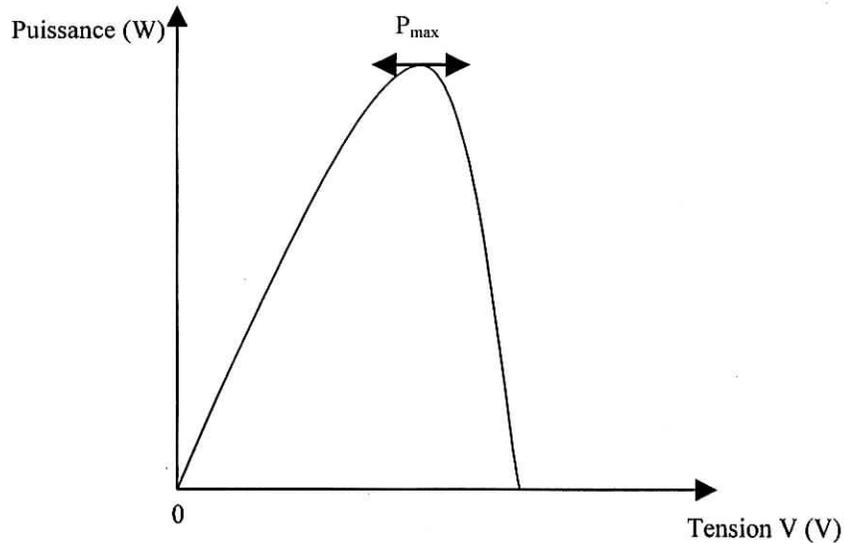


Fig. : II.9 Courbe caractéristique $P=f(V)$

II.5.2 la méthode comparaison de phase

Cette méthode consiste à imposer une tension continue V_0 , à laquelle sera superposée une petite variation ΔV de forme sinusoïdal ou triangulaire. La fréquence de cette variation est de 0,2.....1Hz. par conséquent, la puissance continue P_0 présente aussi une variation ΔP .

Lorsqu'on se trouve à gauche du point de fonctionnement optimal, le produit $\Delta P * \Delta V > 0$, il faut donc augmenter la tension continue V_0 pour s'approcher du (MPP). Si par contre, on se trouve à droite de ce dernier, on a $\Delta P * \Delta V < 0$ et la tension V_0 doit être réduite. Enfin, au point de fonctionnement optimal, on a $\Delta P * \Delta V \cong 0$ et la tension continue V_0 doit être maintenue.

Cette stratégie convient particulièrement, si les circuits de réglage et de commande sont réalisés analogiquement [2].

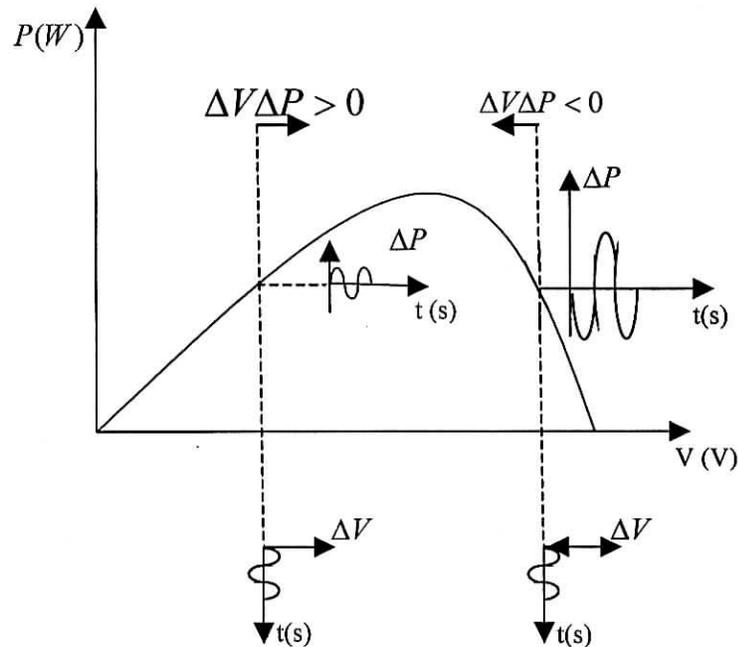


Fig.II.10.Schéma de principe de la technique de la comparaison de phase

II.5.3 la méthode utilisant la cellule pilote

Le point de fonctionnement optimal du générateur est atteint lorsqu'on asservit le courant de sortie I_{opt} produit par les modules par rapport au courant de court-circuit I_{cc} de la cellule pilote, ou lorsqu'on asservit la tension de sortie V_{opt} à la tension du circuit ouvert V_{oc} de la cellule pilote .

Les valeurs de la tension et du courant fournis par le générateur photovoltaïque sont alors respectivement des multiples de la tension de circuit ouvert V_{co} et du courant de court-circuit

Le rapport $\frac{V_{opt}}{V_{oc}}$ varie entre 0.75 et 0.78 pour une variation de température de 60°C,

tandis que pour le courant, le rapport $\frac{I_{opt}}{I_{cc}}$ varie entre 0.80 et 0.82.

Il a été démontré que le rendement est plus élevé dans le cas où l'asservissement est pris par rapport à la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit de la

cellule pilote entraîne son échauffement, et par conséquent sa température diffère de la température du générateur photovoltaïque. [9].

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de la mise en œuvre et de son fonctionnement pour la connaissance des grandeurs caractéristiques optimales du générateur.

Néanmoins, la difficulté réside dans la manière de faire travailler cette cellule de référence dans les mêmes conditions climatologiques que le générateur, ce qui limite grandement ses performances et son rendement énergétique.

II.5.4 La méthode dite perturber & observer

Cette méthode consiste à déplacer périodiquement le point de fonctionnement vers le point de puissance maximal soit en augmentant, ou soit en diminuant la tension du générateur.

La variable à maximiser qui est la puissance du générateur, peut également servir de référence. Dans ce cas-ci, la tension de fonctionnement est changée et la puissance est mesurée. Si la valeur mesurée de la puissance excède la mesure précédente, l'étape suivante consiste à varier la tension dans le même sens. Si la variable contrôlée diminue, cela consiste à faire varier la tension dans le sens opposé.

L'organigramme de contrôle du système de poursuite du point de puissance maximale montré à la figure II.11 illustre les détails des procédés de décision. Si une perturbation donnée mène à une augmentation, ou à une diminution de la puissance de sortie du générateur, la prochaine perturbation est réalisée dans le même sens (rajout d'une tension additionnelle c) ou dans le sens opposé (diminution d'une valeur c). De cette façon, le système de poursuite du point de puissance maximale cherche continuellement le point de puissance maximum. [7].

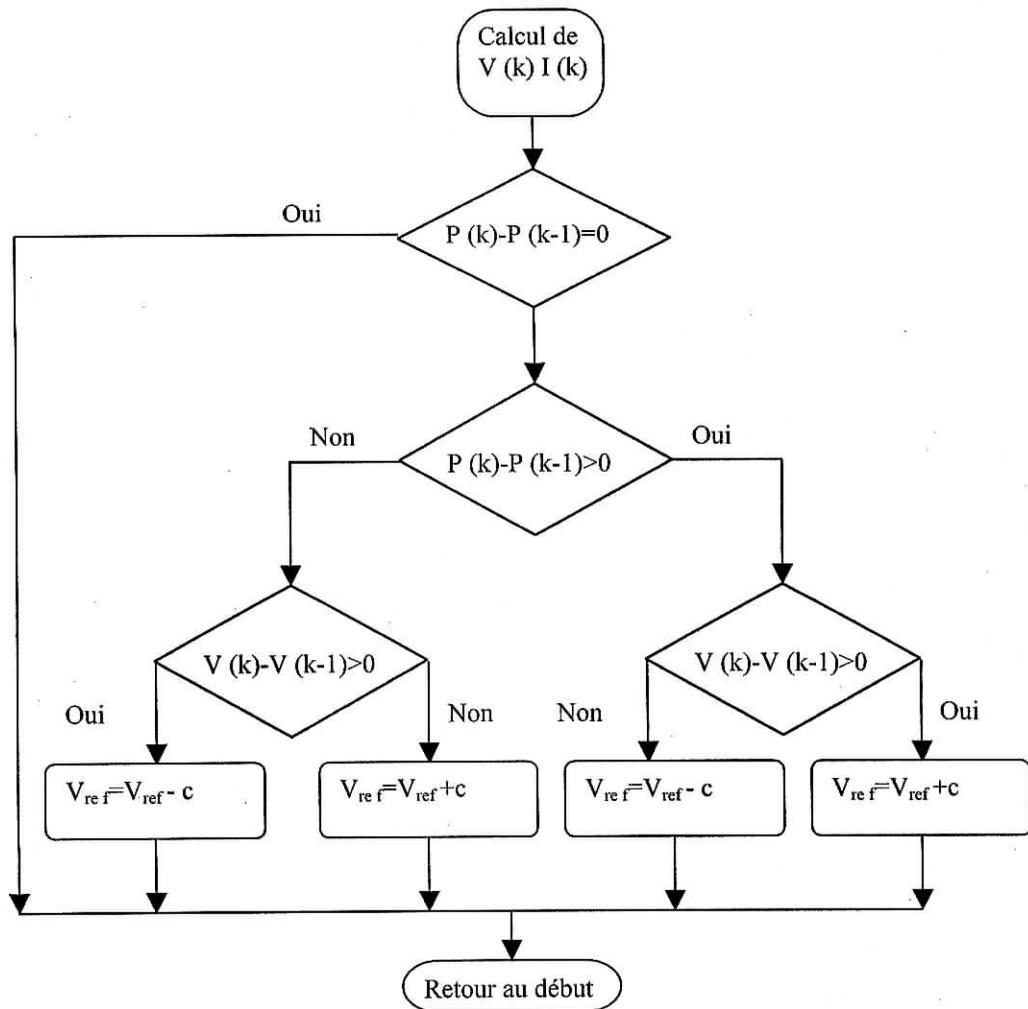


Fig.II.11. L'algorithme de la méthode perturber & observer

II.6 Simulation de l'association GPV et hacheur

Dans cette simulation on a fait un assemblage plusieurs modules connecter en séries et parallèles. Le système MPPT simulé commande directement le rapport cyclique d du hacheur

II.6.1 Simulation d'un hacheur survolteur "Boost"

Pour construire le modèle de cet hacheur on subdivise le hacheur sous forme des blocs.

Représentant les différents éléments du circuit équivalent .la figure ci-dessous illustre le modèle globale.

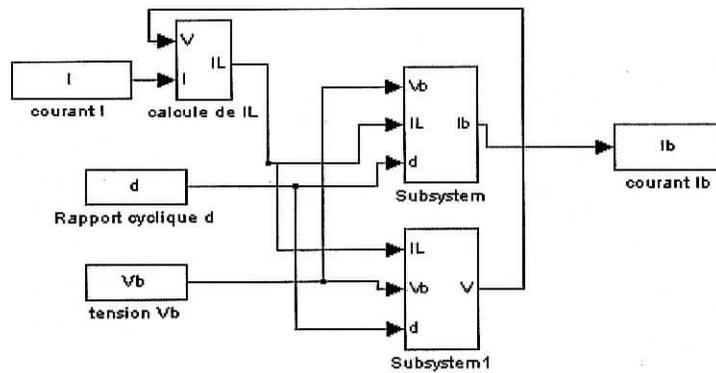


Fig. : II.12. Schéma global de simulation du hacheur

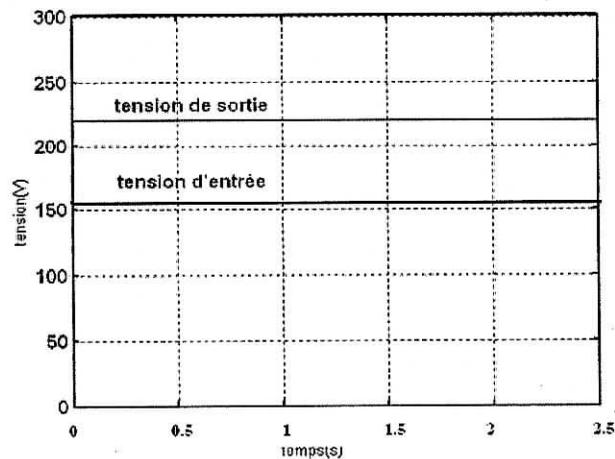


Fig.II.13. tension de sortie et d'entrée d'un hacheur Boost avec d=0.3

II.6.2 Simulation du MPPT

La méthode perturber & observer est représentée sur MATLAB (SIMULINK) sous forme des blocs. la figure ci-dessous illustre le modèle global :

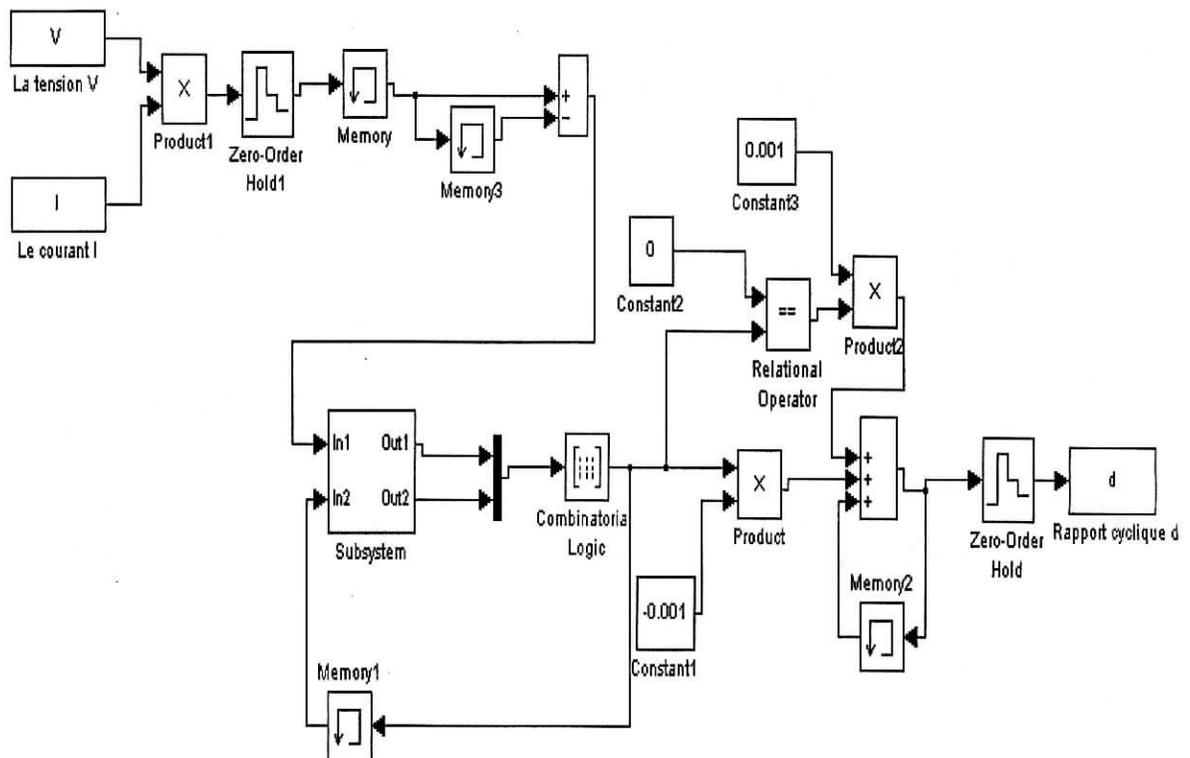


Fig.II.13. Schéma global du MPPT

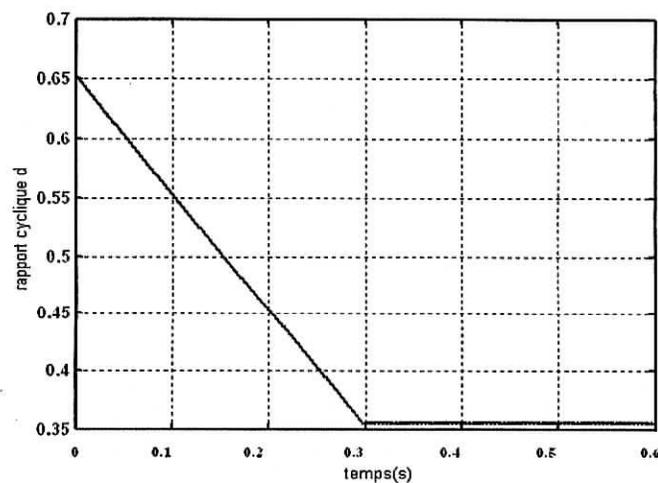


Fig.II.14. Variation du rapport cyclique en fonction du temps

II.6.3 Résultats de Simulation

Après la simulation de l'ensemble GPV et hacheur, nous avons obtenus les résultats suivants :

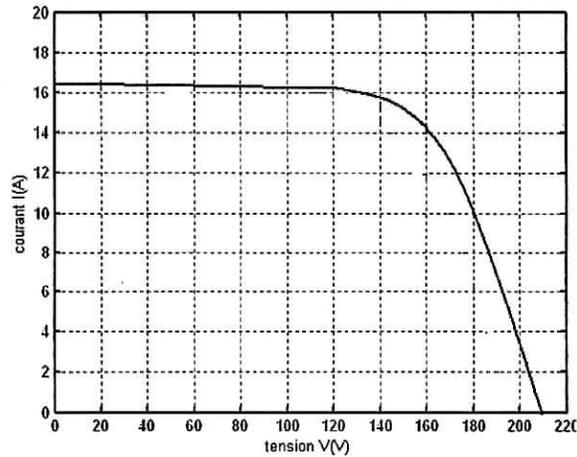


Fig.II.15. La caractéristique $I=f(V)$, $\Phi=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}C$

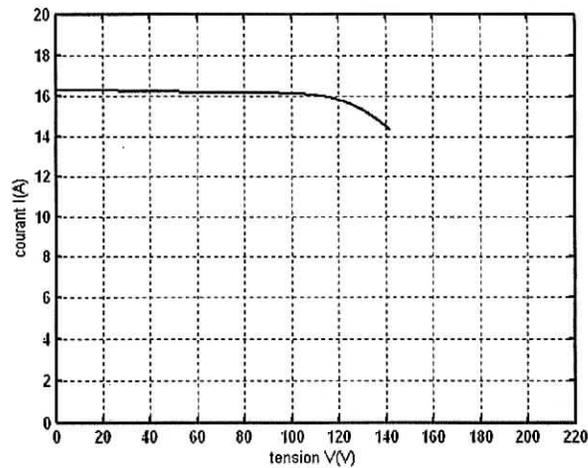


Fig.II.16. La caractéristique $I=f(V)$ après l'intégration du MPPT

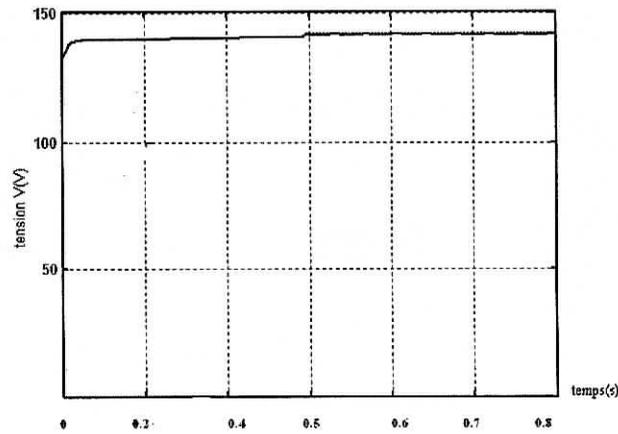


Fig.II.17. Tension optimale du GPV $\Phi = 500W/m^2$, $T=25^\circ C$

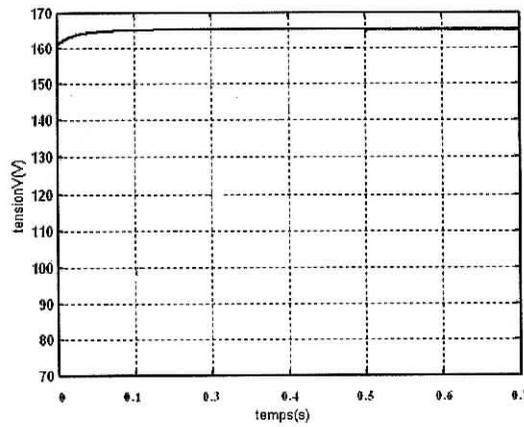


Fig.II.18. Tension optimale du GPV $\Phi = 1000W/m^2$, $T=25^\circ C$

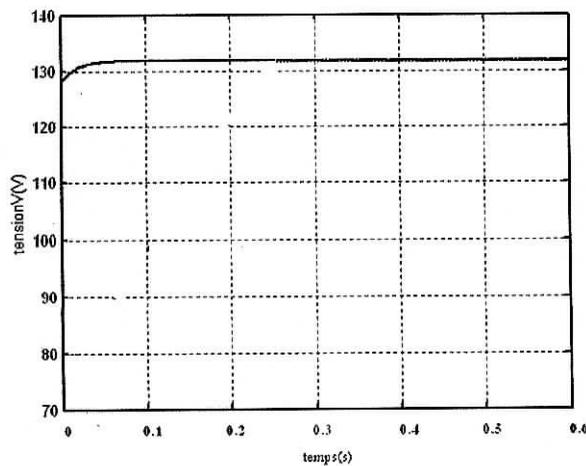


Fig.II.19. Tension optimale du GPV $\Phi = 500W/m^2$, $T=45^\circ C$

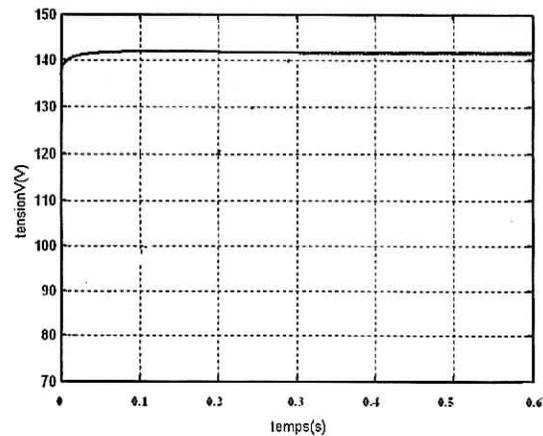


Fig.II.20 .Tension optimale du GPV $\Phi = 1000\text{W/m}^2$, $T=45^\circ\text{C}$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre. Nous avons étudié les principales caractéristiques des convertisseurs Buck et Boost, ainsi qu'une comparaison de leur performances dans les systèmes PV. Par ailleurs, un design d'un convertisseur Boost et sa réalisation ont été effectués, suivi d'une simulation de GPV intégrant le convertisseur Boost, pour la détermination de la tension optimale en tenant compte des variations du flux solaires et de la température ; montre qu'un contrôle continu du rapport cyclique est indispensable.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'ASSOCIATION ONDULEUR- MOTEUR ASYNCHRONE

CHAPITRE III

ETUDE DE L'ASSOCIATION ONDULEUR - MOTEUR ASYNCHRONE

III.1 Introduction

La conception et l'exploitation des convertisseurs de puissance alimentant des moteurs asynchrones, représentent un domaine de recherche et d'application très vaste, parmi ces domaines, on note le pompage photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on étudie en premier lieu la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux, puis la modélisation dans le repaire de Park de la machine asynchrone.

On a également abordé une modélisation de l'association moteur-onduleur où nous utilisons la stratégie de modulation à largeur d'impulsion.

Ces formulations sont suivies d'une simulation sur le logiciel de simulation MATLAB (*SIMULINK*).

III.2 Modélisation de L'onduleur

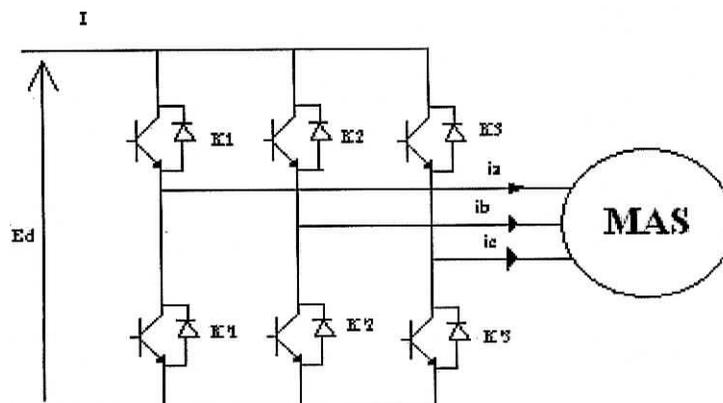


Fig III.1 Onduleur de Tension Triphasé

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

L'onduleur utilisé dans notre cas est un onduleur à trois bras, chaque bras est constitué par deux interrupteurs bidirectionnels. Un interrupteur est composé par un transistor T_i et d'une diode d'anti-retour D_i .

La commande des transistors est complémentaire, d'où nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions (K_i) comme indiqué sur la figure ci-dessous :

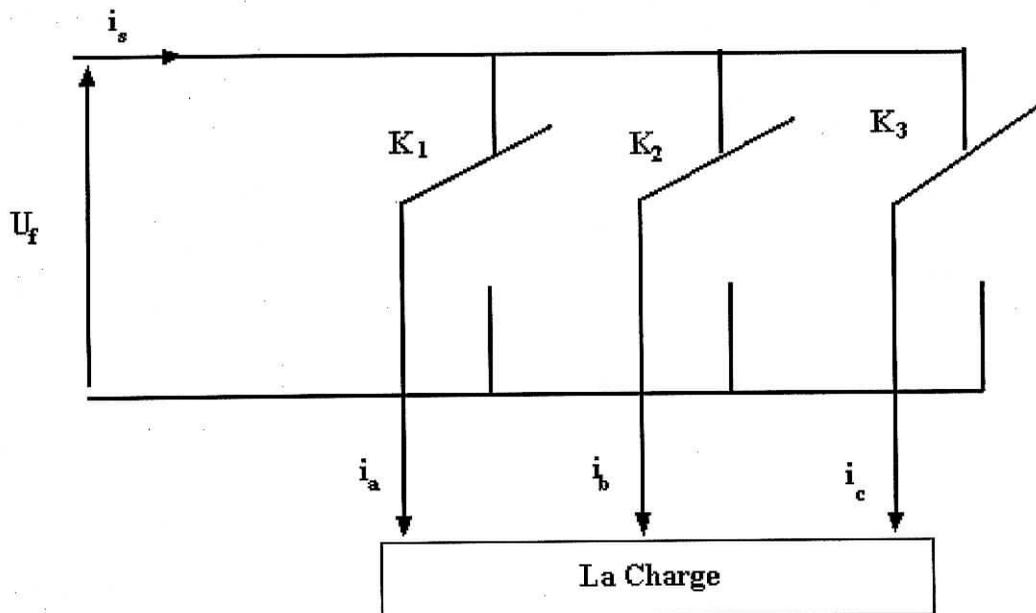


Fig III.2 Représentation des transistors par des interrupteurs

On définit les fonctions logiques de connexion par ($i=1,2,3$) :

$$K_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = U_f (K_1 - K_2) \\ V_{bc} = U_f (K_2 - K_3) \\ V_{ca} = U_f (K_3 - K_1) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Par conséquent, les tensions simples sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_f}{3} (2K_1 - K_2 - K_3) \\ V_b = \frac{U_f}{3} (-K_1 + 2K_2 - K_3) \\ V_c = \frac{U_f}{3} (-K_1 - K_2 + 2K_3) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Le courant i_s à l'entrée de l'onduleur sera donné par la relation suivante :

$$i_s = K_1 i_a + K_2 i_b + K_3 i_c \quad (\text{III.4})$$

III.2.2 La M.L.I (Modulation de Largeur D'Impulsion)

La M.L.I (ou PWM : Pulse Width Modulation) permet l'obtention des alternances de la tension de sortie qui est formée de plusieurs créneaux.

La multiplication des nombres des « impulsions » formant chaque alternance présente deux avantages :

- elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

La M.L.I est faite en adoptant des de commande des interrupteurs, il en existe plusieurs, à savoir la stratégie triangulo- sinusoïdale, la stratégie hystérésis.

Dans ce travail, nous intéressons à la première technique.

Cette stratégie dont le principe est basée sur la variation de l'amplitude de la référence « V_r », et la fixation de celle de la porteuse « U_p », qui est représentée par un signal triangulaire.

L'onde de sortie, est alors obtenue par une simple comparaison des deux ondes, donnant ainsi l'ordre d'allumage ou d'extinction aux composants constituant l'onduleur.

Dans cette technique, il faut définir deux paramètres qui sont :

- 1 L'indice de modulation « m » qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse « f_p » à la fréquence de la référence « f » désirée.
- 2 Le coefficient de réglage en tension « r » qui représente le rapport entre l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de l'onde porteuse.

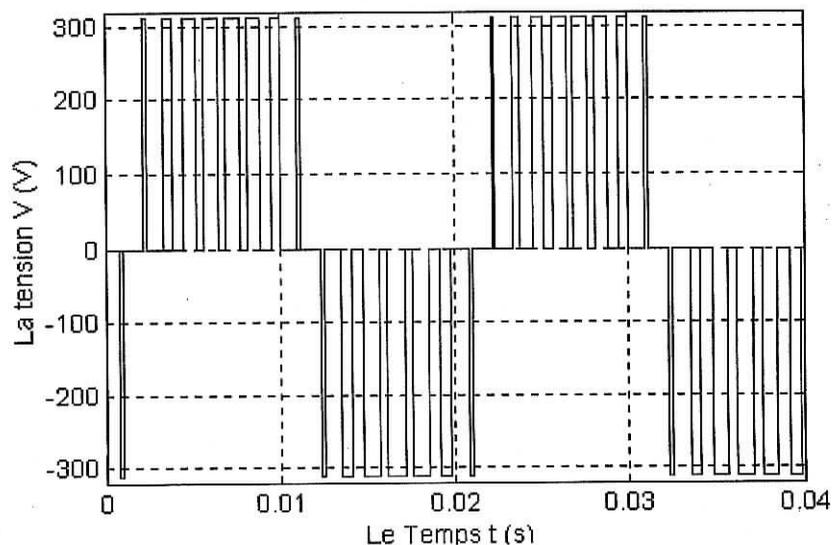
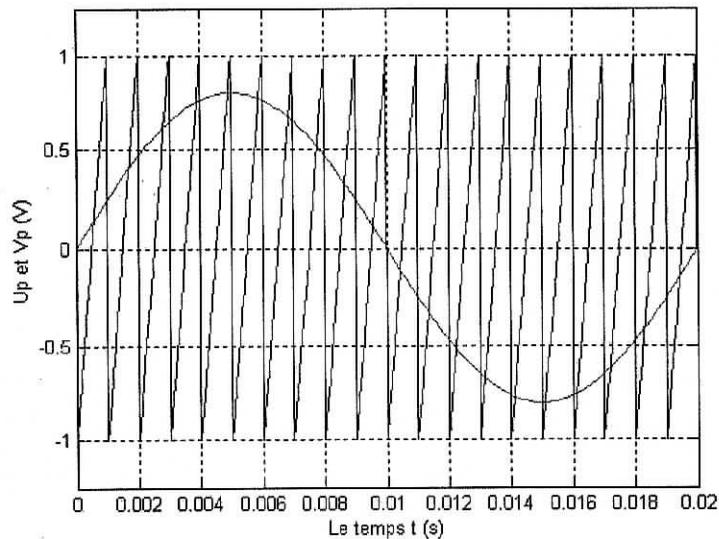


fig. III.3 principe de la technique MLI ($m=21$, $r=0.8$)

III.3 Modélisation de la machine Asynchrone

III.3.1 Introduction

la machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine .

Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques à P paire de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$.

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables .

- Soit par un système d'enroulements triphasés (rotor bobiné), raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents .
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétique (rotor à cage).

Le champ statorique tourne à la vitesse $\Omega_s = \omega_s/P$, ω_s étant la pulsation du courant et de la tension statorique, et P le nombre de paires de pôles. La vitesse mécanique du rotor est noté Ω . Le rapport $g = (\Omega_s - \Omega)/\Omega_s$, est appelé glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator. Dans le repère rotorique, toutes les grandeurs électriques ont une pulsation $(g.\omega_s)$.

III.3.2 Hypothèses Simplificatrices

La machine asynchrone , avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons de soulevé (dans 1-1), il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices .

- On suppose que les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires. L'effet de peau est négligé.

- On ne tient compte que de la première harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer étant

constant, les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

III.3.3 Convention

La machine est représentée par trois phases statoriques **as**, **bs**, **cs** et trois phases rotoriques **ar**, **br**, **cr**

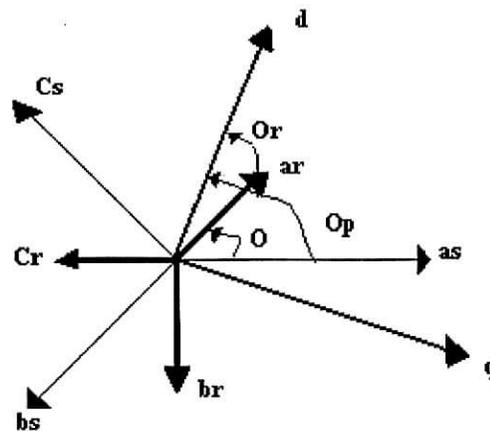


fig. III.4 Représentation des axes de la machine

θ_p : angle électrique stator/référentiel (d,q).

$$\theta_r = \theta_p - \theta \quad (III.5)$$

$$\omega = P\Omega = d\theta/dt$$

III.3.4 Modèle triphasé de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations qui décrivent le fonctionnement de la machine sont :

III.3.4.1 Equation électriques de la MAS

Les équations des tensions des trois phases statoriques, et rotoriques s'écrivent :

$$(V_s) = R_s (I_s) + d(\phi_s)/dt$$

$$(0) = R_r (I_r) + d(\phi_r)/dt \quad (\text{III.6})$$

Les flux sont donnés par :

$$\phi_s = (L_{ss})(I_s) + (M_{sr})(I_r) \quad (\text{III.7})$$

$$\phi_r = (L_{rr})(I_r) + (M_{rs})(I_s)$$

$$(V_s) = \begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix}; \quad (I_s) = \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix}; \quad (I_r) = \begin{pmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{pmatrix}; \quad (\text{III.8})$$

$$(L_{ss}) = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix}; \quad (L_{rr}) = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix} \quad (\text{III.9})$$

l'inductance mutuelle (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$(M_{sr}) = L_m \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$(M_{rs}) = (M_{sr})^T$$

En remplaçant (1-2) dans (1-1) on obtient :

$$(V_s) = R_s (I_s) + \frac{d}{dt}((L_{ss})(I_s)) + \frac{d}{dt}((M_{sr})(I_r)) \quad (\text{III.11})$$

$$(0) = R_r (I_r) + \frac{d}{dt}((L_{rr})(I_r)) + \frac{d}{dt}((M_{rs})(I_s))$$

III.3.4.2 Equation Mécanique

Le couple électromagnétique développé s'écrit :

$$C_e = p(I_s)^T \frac{d}{d\theta} (M_{sr})(I_r) \quad (\text{III.12})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \Omega \quad (\text{III.13})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile, car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

III.3.5 Transformation de PARK

La transformation de PARK consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques enroulements orthogonaux équivalents. Ce passage est rendu possible pour la transformation des grandeurs physiques par la matrice de PARK $P(\theta)$.

$$P(\theta) = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.14})$$

avec : n_1, n_2 : nombres fictif de spires.

Dans une première détermination des coefficients n_1/n_2 et K_0 , I_0 est identifié à la composante homopolaire lorsque les courants $i_{a,b,c}$ sont sinusoïdaux :

$$I_0 = \frac{(i_a + i_b + i_c)}{3} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) K_0 (i_a + i_b + i_c) \quad (\text{III.15})$$

lorsque les courants sinusoïdaux triphasés sont équilibrés, $i_{a,b,c}$ et $I_{d,q}$ sont les projections sur les axes des phases du même vecteur tournant I de module I .

$$i_a = I \cos(\omega t) ; \quad i_b = I \cos(\omega t - 2\pi/3) ; \quad i_c = I \cos(\omega t + 2\pi/3) ; \quad (\text{III.16})$$

$$I_d = I \cos(\omega t - \theta) ; \quad I_q = I \sin(\omega t - \theta) ;$$

Par la transformation triphasée/diphassée on tire :

$$\text{Par identification on déduit : } I_d = \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \left(\frac{3}{2} \right) I \cos(\omega t - \theta) ;$$

$$\text{Et à la fin on trouve : } \left(\frac{n_1}{n_2} \right) = \frac{2}{3} ; \quad K_0 = 1/2 .$$

$$P(\theta) = \left(\frac{2}{3} \right) \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.17})$$

La seconde détermination des coefficients repose sur l'invariance de la puissance instantanée P_e dans les deux systèmes de représentation, ce qui, de toute évidence, conduit à leur équivalence physique.

$$P_e = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_d i_d + V_q i_q$$

$$P_e = (V_{abc})^t (i_{abc}) = (V_{dqo})^t (i_{dqo})$$

A partir de cette relation on démontre que la matrice de passage [P] doit être orthogonale $[P]^t = [P]^{-1}$.

Tel que [P] s'écrit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$P^{-1}(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

III.3.6 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK

Dans le repère de PARK (d,q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = d\theta_p/dt$, les équations (1-1) et (1-2) s'écrivent :

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_p \Phi_{qs} \quad \text{avec :} \quad \omega_p = \frac{d}{dt} \theta_p$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_p \Phi_{ds}$$

$$0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_p - \omega) \Phi_{qr} \quad (\text{III.20})$$

$$0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_p - \omega) \Phi_{dr}$$

avec aussi :

$$\begin{aligned}\Phi_{ds} &= L_s I_{ds} + L_m I_{dr} & \Phi_{dr} &= L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qs} &= L_s I_{qs} + L_m I_{qr} & \Phi_{qr} &= L_r I_{qr} + L_m I_{qs}\end{aligned}\quad (III.21)$$

III.3.7 Choix du référentiel

- *Référentiel lié au stator* : est le mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées :

$$\frac{d}{dt}(\theta_p) = 0 \qquad \frac{d}{dt}(\theta_r) = -\frac{d}{dt}(\theta) = -\omega .$$

- *Référentiel lié au rotor* : Dans ce repère $\theta_p = \theta$, donc :

$$\frac{d}{dt}\theta_r = 0 \qquad \frac{d}{dt}\theta_p = \omega$$

- *référentiel lié au champ tournant* :

Dans ce cas la vitesse ω_p est la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme ω_s), les équations relatives au modèle de la machine asynchrone dans ce repère sont données par:

$$\begin{aligned}V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr}\end{aligned}\quad (III.22)$$

avec :

$$\begin{aligned}\Phi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Phi_{dm} &= L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \Phi_{qm} &= L_m (i_{qs} + i_{qr})\end{aligned}\quad (III.22)$$

III.3.8 mise sous forme d'équation d'état

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone sous forme d'équation d'état électrique (I-9) et (I-10), on aboutit à la forme d'équation suivante :

$$X = F(X, U, t)$$

$$Y = F(X, U, t)$$

avec

X : vecteur d'état.

Y : vecteur de sortie.

U : vecteur d'entrée.

On peut choisir indifféremment les composantes du vecteur d'état 'X'.

Avec : $X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{ds}, i_{qs}, \Omega)^t$ on a le système suivant.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = AX_1 + BU \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{j}(C_e - C_r - K_f \Omega) \end{array} \right\} \quad (III.23)$$

$$\text{avec } \Omega = \frac{\omega}{p}$$

$X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{ds}, i_{qs}, \Omega)^t$, on a le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X}_1 = AX_1 + BU \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_e - C_r - K_f \Omega) \end{array} \right\} \quad (III.24)$$

$$X_1 = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{ds}, i_{qs})$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \omega_s & -R_s & 0 \\ -\omega_s & 0 & 0 & -R_s \\ \frac{1}{\sigma T_r L_s} & \frac{\omega}{\sigma L_s} & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) & (\omega_s - \omega) \\ -\frac{\omega}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma T_r L_s} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) \end{pmatrix} \quad (III.25)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{pmatrix} \quad (III.26)$$

avec : $T_r = L_r / R_r$; $T_s = L_s / R_s$: constantes de temps rotorique et statorique .

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$: Coefficient de fuites totales.

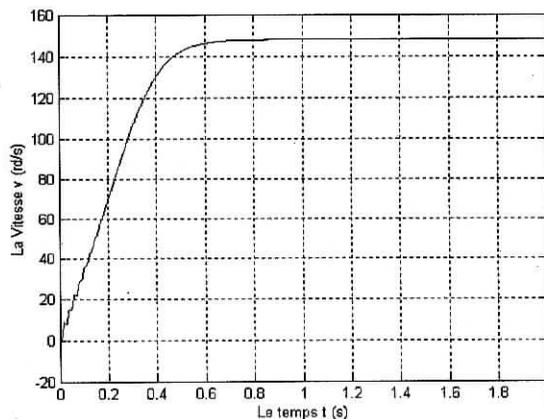


fig.III.6 la vitesse du moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé par MLI (m=21,r=0.8)s
Avec introduction d'une charge de 10 N.m

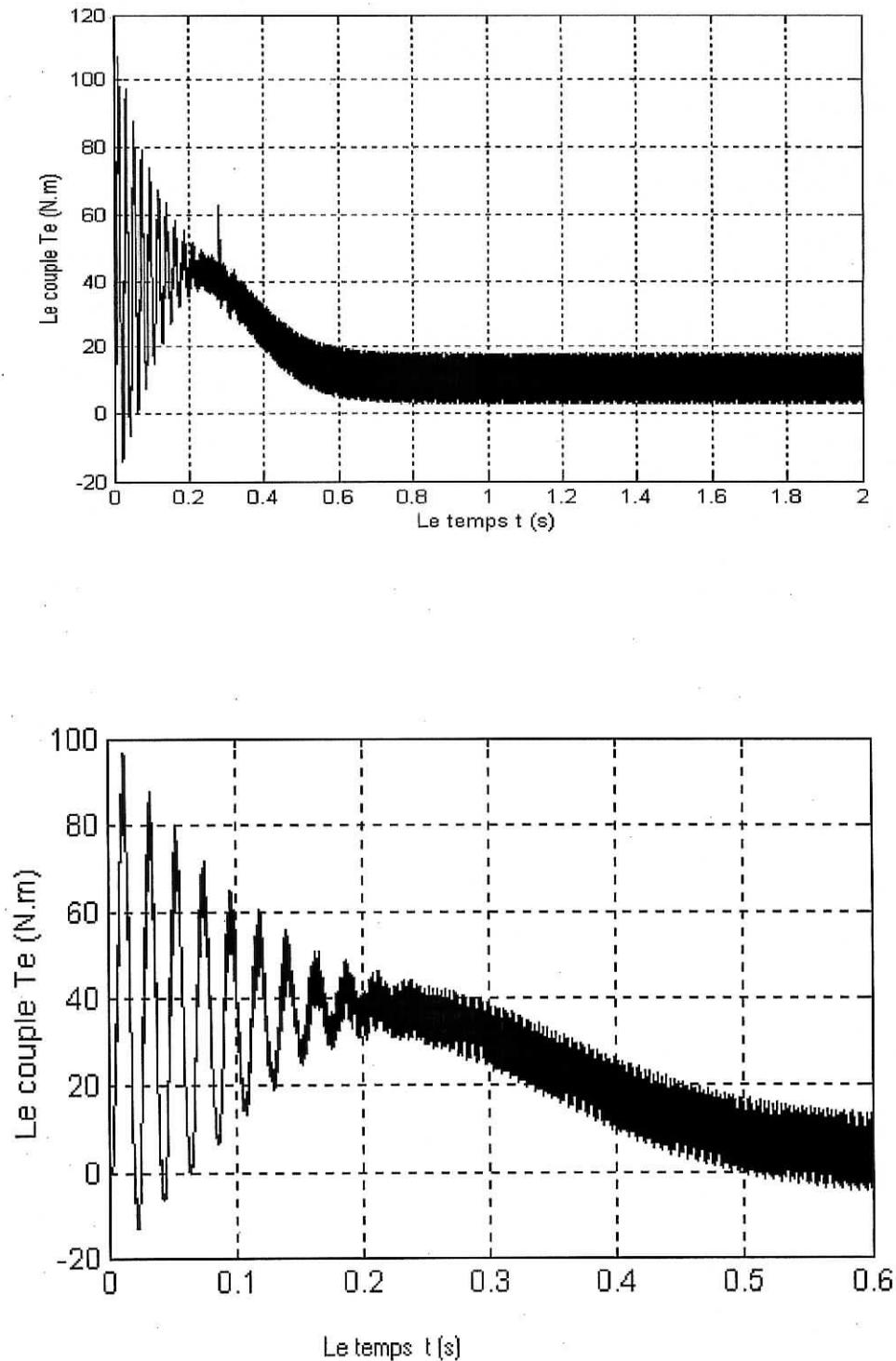


fig.III.5 Couple du moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé par MLI

($m=21, r=0.8$)s

Avec introduction d'une charge de 10 N.m

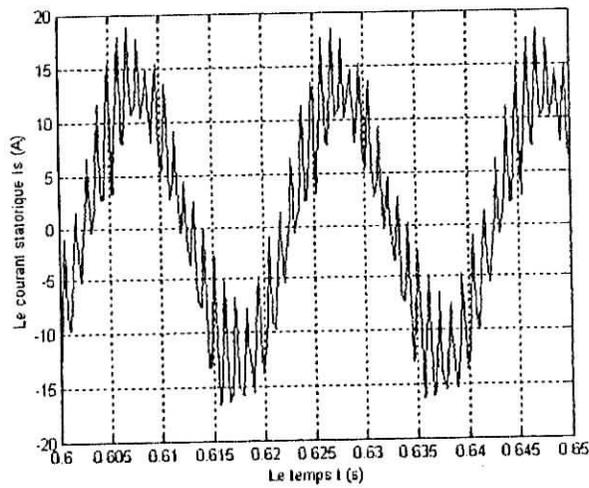
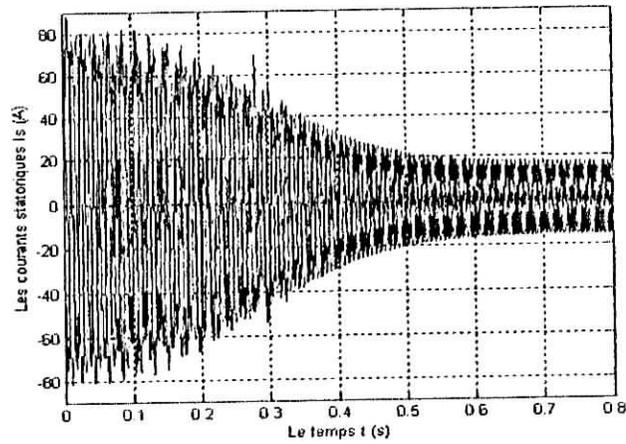


fig.III.7 Les courants statoriques du moteur asynchrone

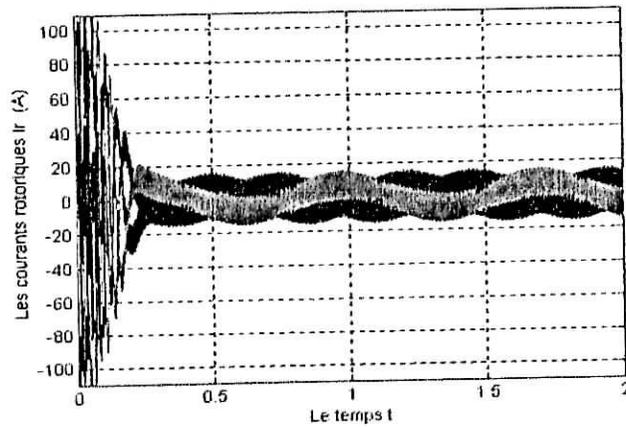
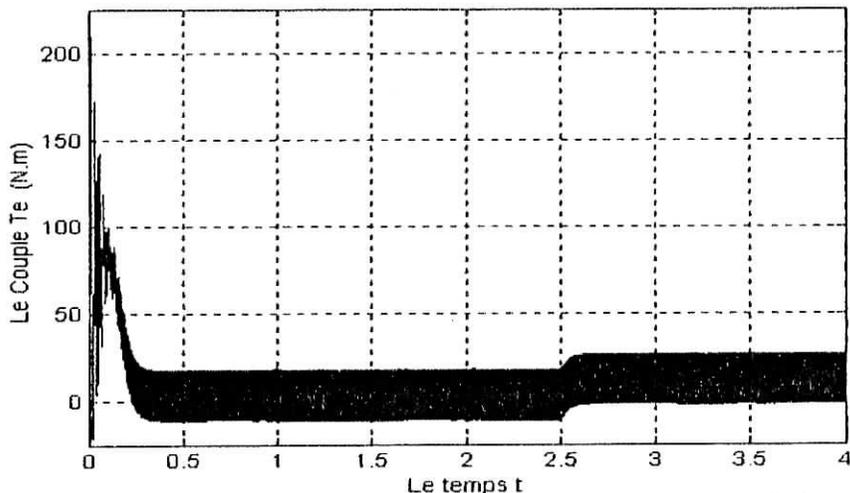
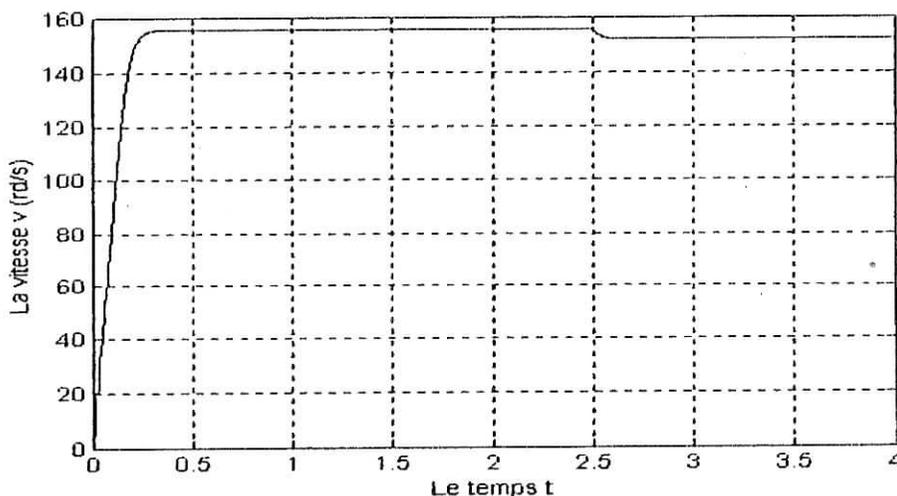


fig.III.8 Les courants rotoriques du moteur asynchrone



FigIII.9 Le couple du moteur asynchrone avec une variation de charge de 3 N.m à 12 N.m à t=2.5 s



FigIII.10 la vitesse du moteur asynchrone avec une variation de charge de 3 N.m à 12 N.m à t=2.5 s

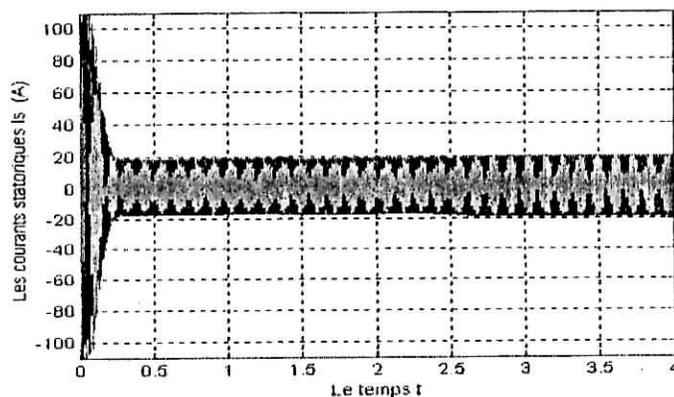


Fig.III.11 Les courants statoriques du moteur asynchrone avec une variation de charge de 3 N.m à 12 N.m à t= 2.5 s

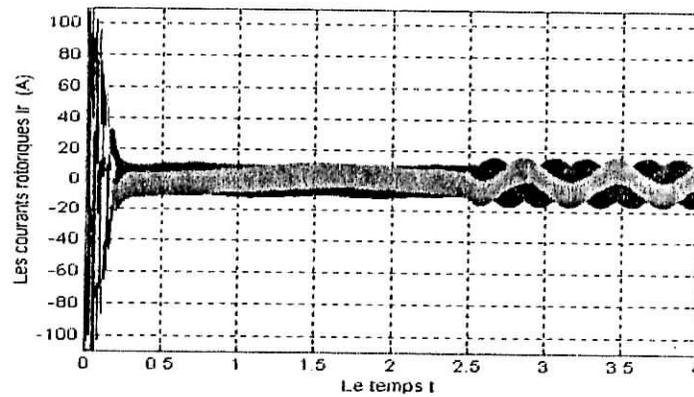


Fig.III.12 Les courants rotoriques du moteur asynchrone avec une variation de charge de 3 N.m à 12 N.m à $t=2.5$ s

III.4 Conclusion

Le développement de la technique de modulation à largeur d'impulsion a contribué efficacement dans la nouvelle ère de la machine asynchrone. Effectivement, cette stratégie assure un fonctionnement optimal de la machine, en garantissant un faible taux d'harmonique de tension et de courant avec une minimisation des fluctuations du couple.

CHAPITRE IV

MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME GLOBAL

CHAPITRE IV

MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME GLOBAL

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons modélisé et simulé chaque partie de notre système ; nous avons commencé par le panneau solaire en choisissant le modèle à cinq paramètres ; et puis, le convertisseur statique (le hacheur) de type BOOST avec intégration de la méthode de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) qui convient.

Ensuite, nous avons étudié l'onduleur et le moteur asynchrone ainsi que leur modélisation, et la simulation de l'association entre eux, en utilisant la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Enfin, on abouti maintenant au système global c.à.d : la simulation du système panneau solaire, hacheur, onduleur, moteur asynchrone ; en intégrant la MPPT dans le hacheur et une stratégie de commande adéquate pour moteur afin d'assurer le bon fonctionnement du moteur asynchrone.

IV.2 Conditions Pour un bon Fonctionnement

Le système qu'on a, fonctionne sous éclairement seulement, puisque il est sans batteries, qui servent à assurer l'approvisionnement en électricité en absence du soleil.

L'absence des batteries impose quelques conditions pour que le système fonctionne correctement :

1. Lors du dimensionnement des composantes du système, il faut choisir la puissance du moteur asynchrone supérieure ou égale à la puissance crête du panneau solaire $P_{\text{moteur}} \geq P_{\text{crête}}$; parce que, si on choisit la puissance crête supérieure à la puissance du moteur, l'excès de l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque sera perdu (on n'a pas la possibilité de stocker l'énergie dans les batteries.), d'où la diminution du rendement global du système.

2. Le moteur fonctionne normalement sous une tension d'entrée constante, donc : il faut avoir un condensateur qui ^a comme rôle de stabiliser la tension de sortie du hacheur.

Dans notre système, nous avons choisi la capacité, pour obtenir un coefficient de réglage de tension r autour de 0.8 .

3. Afin d'assurer que le système fonctionne au fil du soleil, et que le couple développé par le moteur correspond à la puissance fournie par le panneau solaire (pas de décharge du condensateur sur le moteur par exemple) ; on doit adapter le couple de la charge au couple développé par le moteur, c. à. d, ajouter un régulateur qui donne à chaque valeur de la puissance transmise au moteur, la valeur du couple de la charge correspondant. les équations suivantes déterminent la relation entre le couple de la charge et la puissance fournie en fonction de la vitesse Ω du rotor du moteur :

$$C_e \approx (3 \cdot V_s^2 (\Omega - \Omega_s)) / (\Omega_s^2 \cdot a^2 \cdot R_r) \quad (IV.1)$$

$$P_u = \eta \cdot P = C_u \cdot \Omega \quad (IV.2)$$

Avec : a : coefficient d'équivalence

$$a = L_s / L_m \quad [28].$$

IV.3 Simulations et Résultats

Pour notre système, l'indice de modulation de l'onduleur est $m = 21$.

Le coefficient de réglage de tension r est autour de 0.8.

La fréquence de commutation du hacheur est égale à 1kHz.

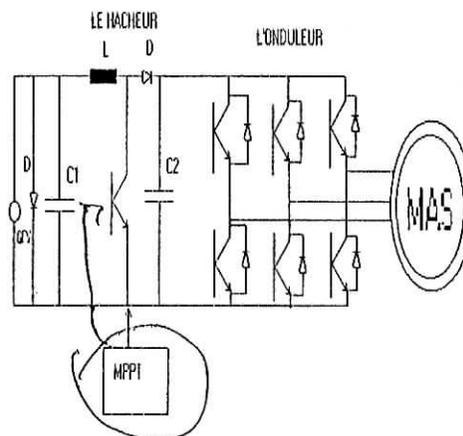


Fig IV.1 schéma du système global

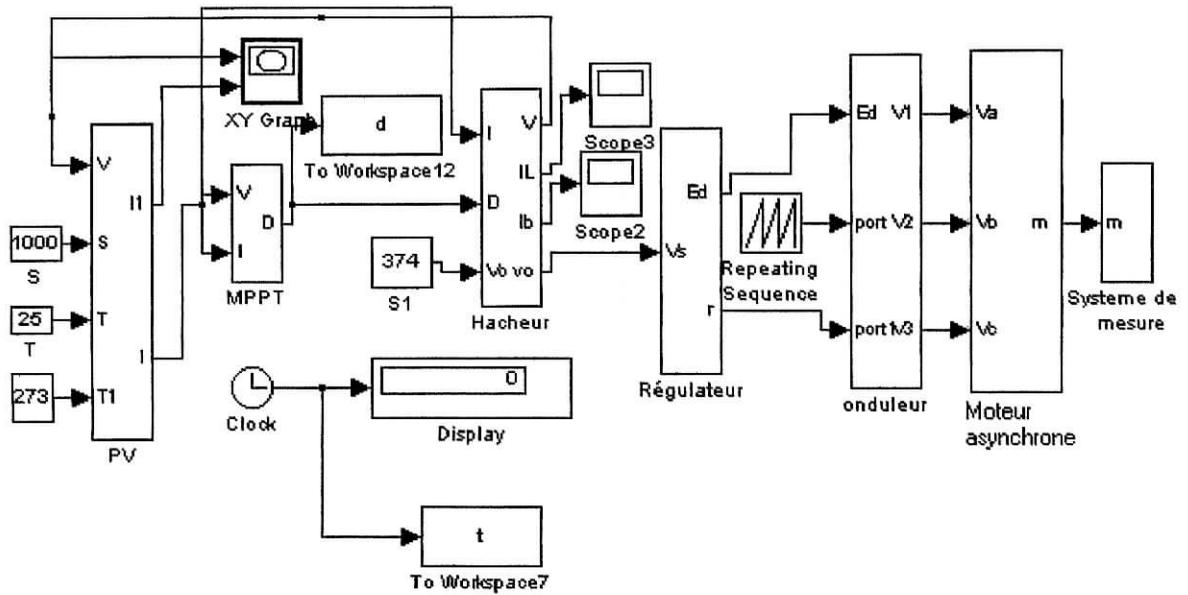


Fig IV.2 Schéma bloc du système simulé avec SIMULINK

- La simulation du modèle global est faite en premier lieu pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les résultats de simulation sont représentés dans les courbes suivantes :

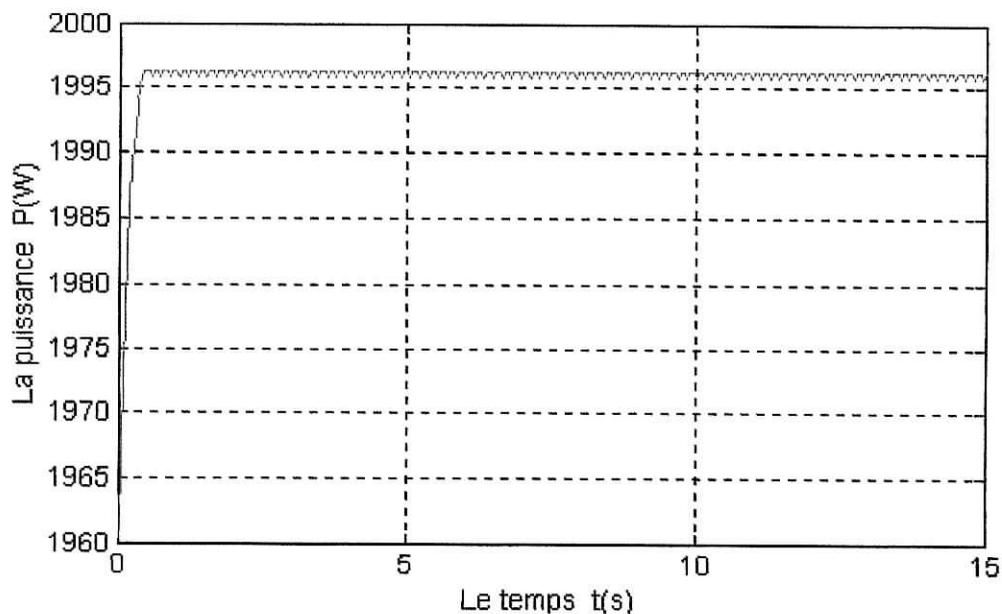


Fig IV.3 La puissance du panneau en fonction temps pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 et température $T = 25^\circ\text{C}$

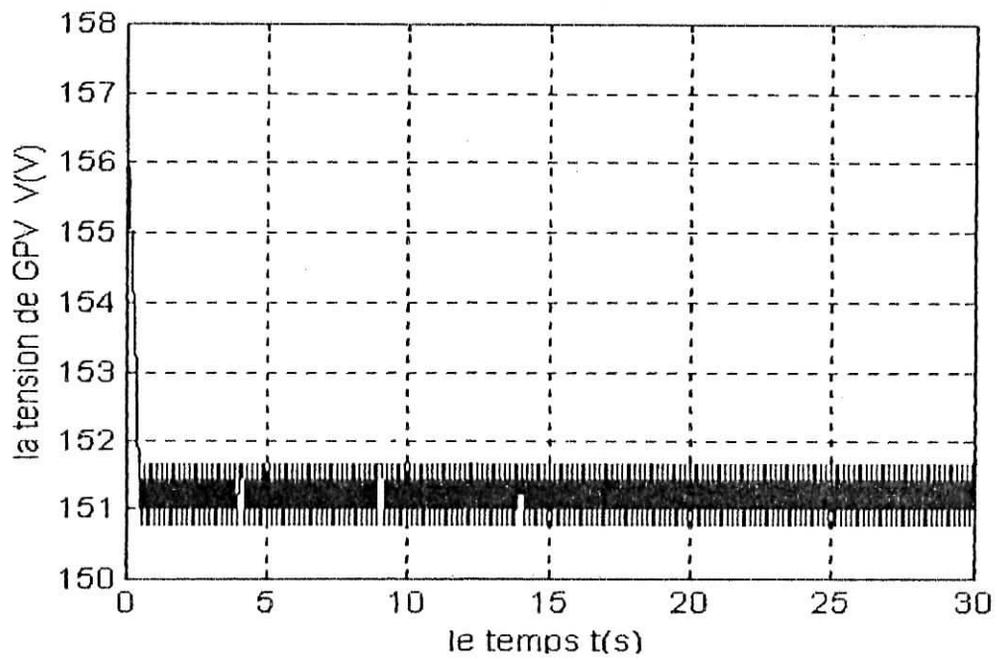


Fig IV. 4 La tension du générateur photovoltaïque en fonction du temps

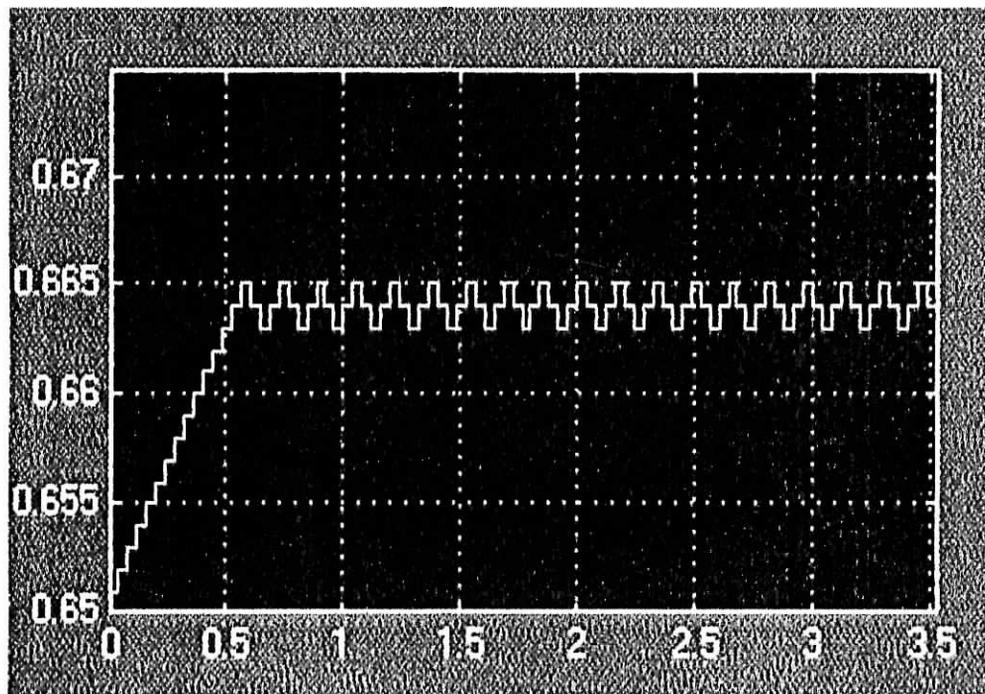


Fig IV.5 Le rapport cyclique du hacheur d en fonction du temps

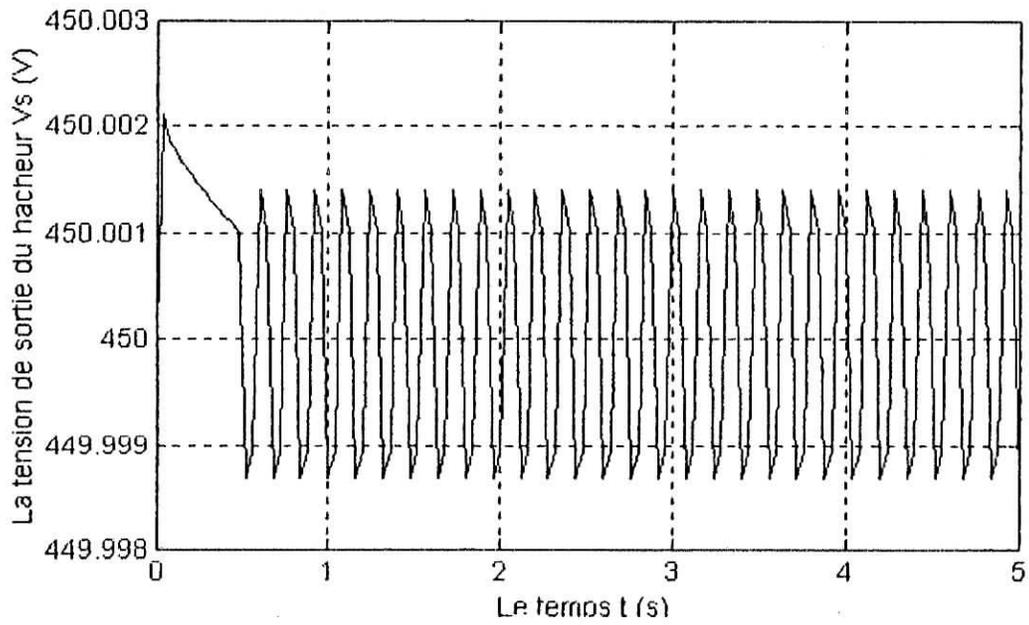


Fig IV.7 La tension de sortie du hacheur en fonction du temps

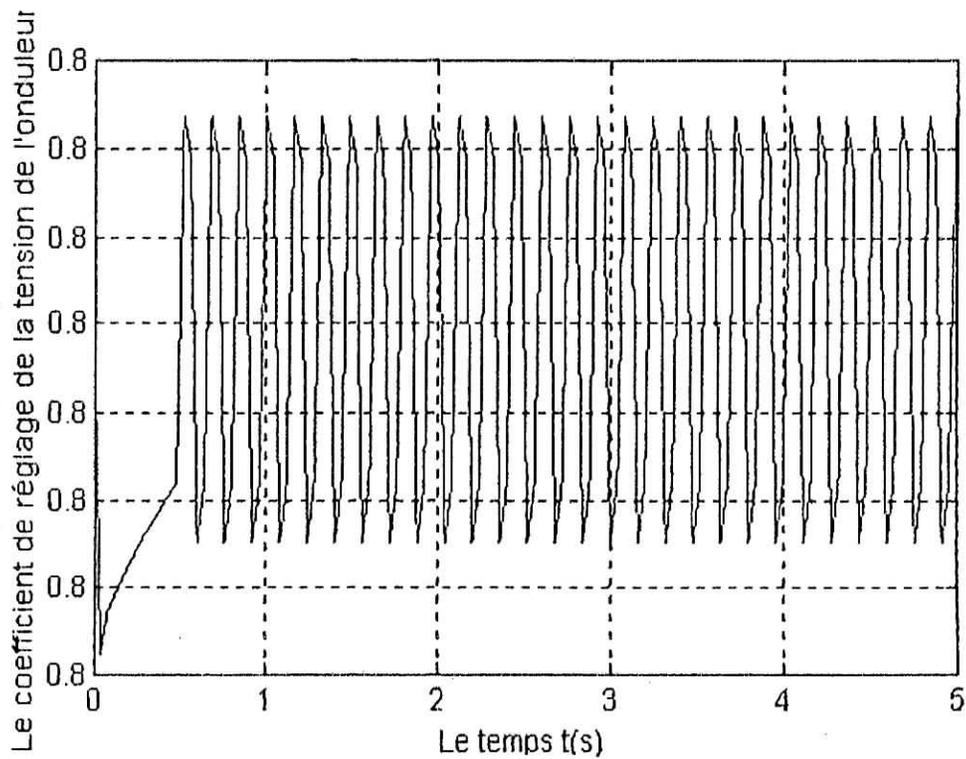


Fig IV.8 Le coefficient de réglage r en fonction du temps t

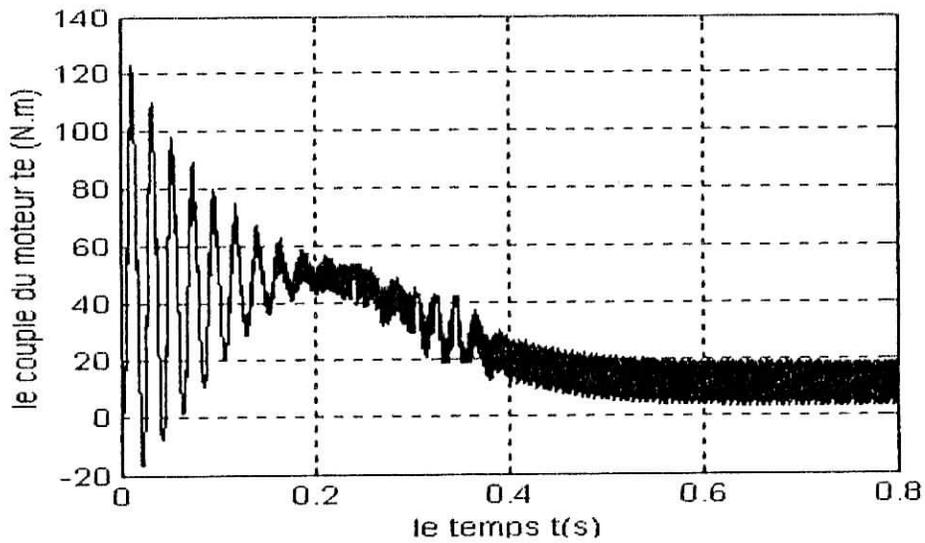


Fig IV.9 Le couple du moteur en fonction du temps t

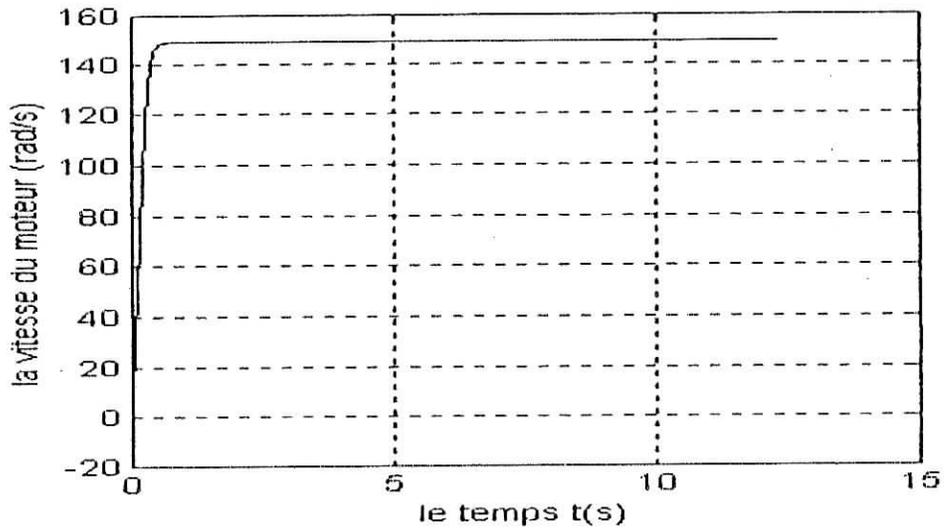


Fig IV.10 La vitesse du moteur en fonction du temps t

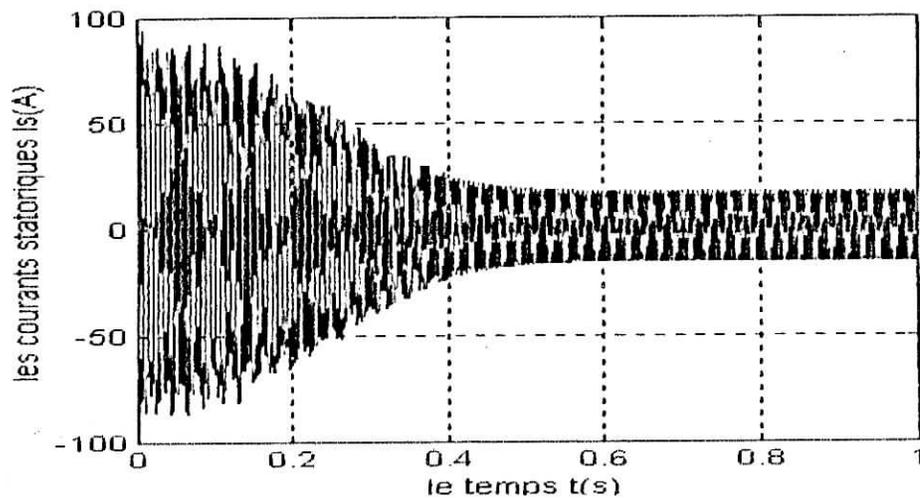
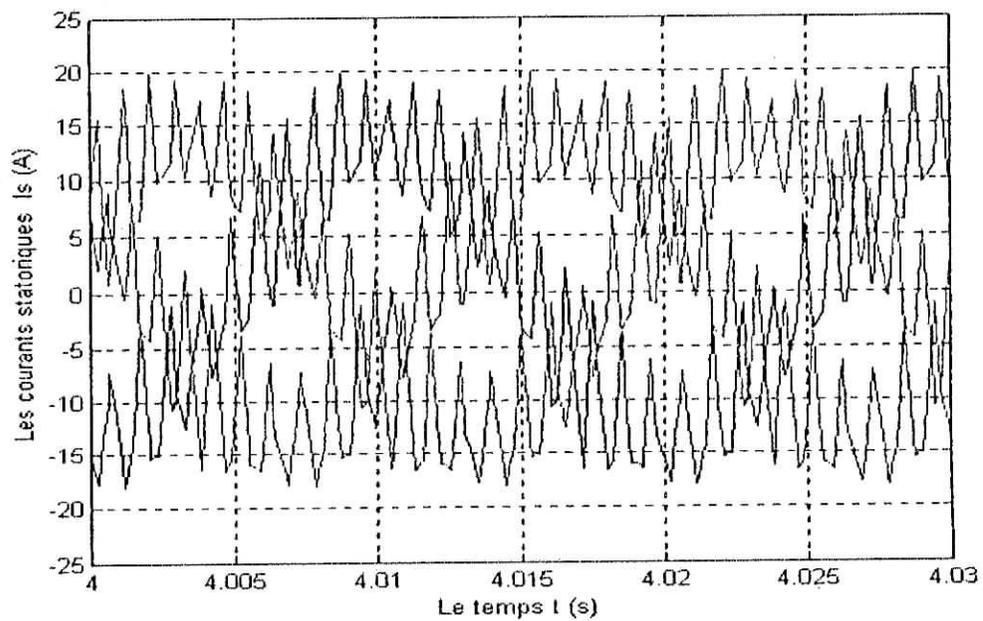
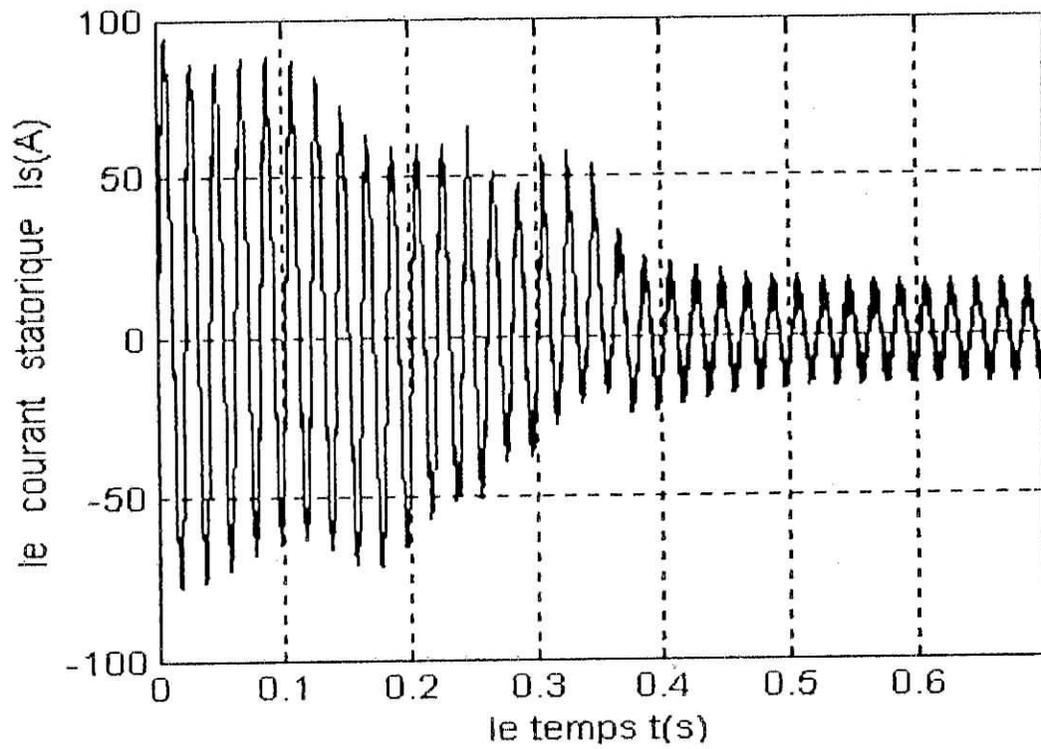


Fig IV.11 Les courants statoriques du moteur en fonction du temps t

Fig IV.12 Le courant de la phase statorique I_s (A)

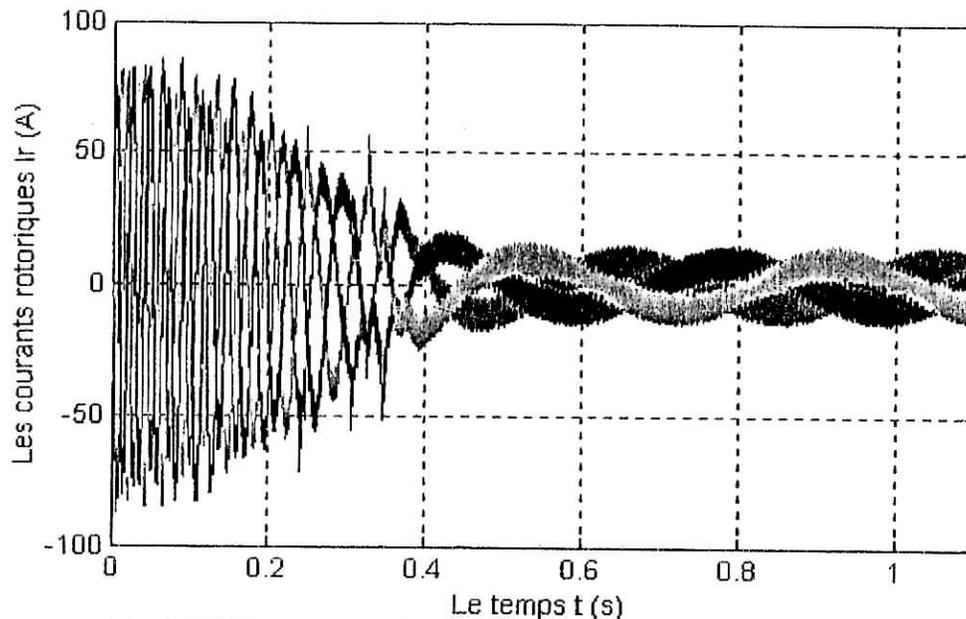


Fig IV.12 Les courants rotoriques en fonction du temps t

Après La simulation du système global, nous avons obtenu les caractéristiques suivantes :

Pour le panneau, nous avons visualisé l'évolution de la tension et de la puissance du panneau.

Pour le hacheur, nous avons visualisé le rapport cyclique du hacheur, et la tension de sortie.

Pour l'onduleur, nous avons visualisé les tensions de sorties.

Pour le moteur, nous avons visualisé l'évolution des courants statoriques et rotoriques ainsi que le couple utile et la vitesse de rotation de l'arbre.

la tension de sortie du panneau solaire oscille autour du point de puissance maximale. le rapport cyclique du hacheur d se stabilise , et oscille aussi autour de la valeur correspondante à l'obtention de la tension optimale du générateur ; cette valeur est obtenue à l'aide de l'algorithme MPPT(méthode Perturber et Observer).

En effet, le rapport d dépend de la puissance crête fournie par le générateur photovoltaïque, qui elle même dépend des conditions climatiques (l'ensoleillement et la température).

La puissance fournie est transférée au moteur asynchrone par l'intermédiaire d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Les schémas ci-dessus illustrent toutes les caractéristiques mécanique et électrique du moteur asynchrone.

Caractéristique mécanique :

Le fonctionnement normal d'un moteur asynchrone (à induction) apparaît sur la courbe couple - vitesse. Le démarrage se produit, si le couple de démarrage T_d est supérieur au couple résistant T_r (la charge).

Le moteur accélère ensuite en développant un couple de plus en plus grand, puis son couple décroît et il se fixe à une vitesse correspondant à sa charge T_r .

Le couple développé varie ensuite pratiquement linéairement en fonction du glissement.

Pour les courants statoriques nous remarquons qu'au démarrage, ils atteignent des valeurs maximales ; ensuite, ils se stabilisent à des valeurs correspondant aux valeurs du couple de la charge.

Les courants rotoriques subissent aux mêmes variations que les courants statoriques car les courants rotoriques sont directement engendrés par les courants statoriques.

- La deuxième simulation est faite pour différents ensoleillements (l'entrée de l'ensoleillement est une step varie de 1000W/m^2 jusqu'à 600W/m^2).

Nous avons obtenu les résultats suivants :

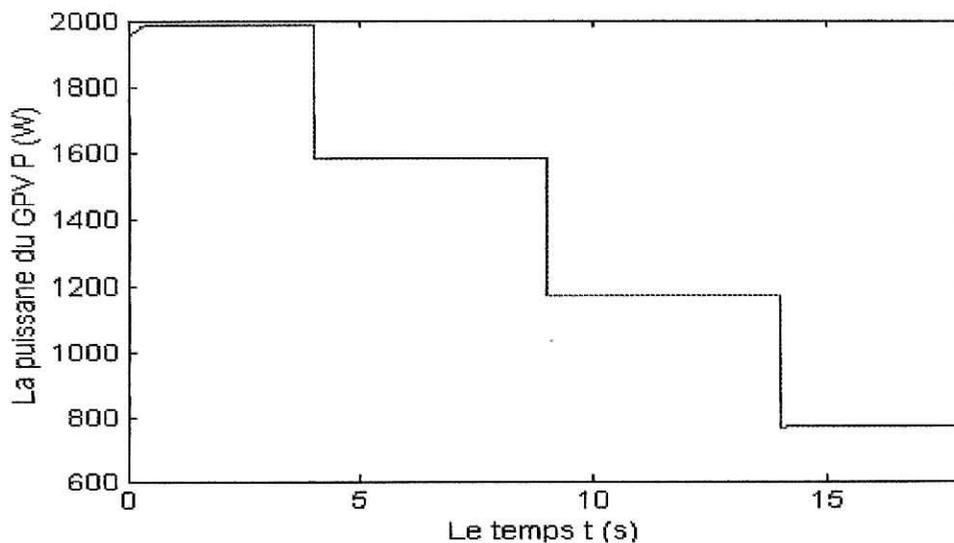


Fig IV.14 La puissance du panneau pour une variation d'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200W/m^2 à $T = 25^\circ\text{C}$

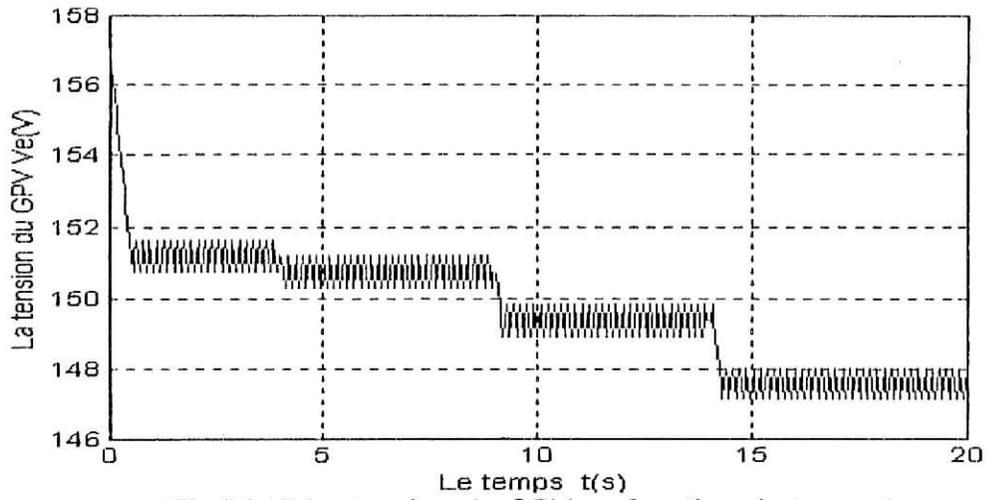


Fig IV.15 La tension du GPV en fonction du temps t

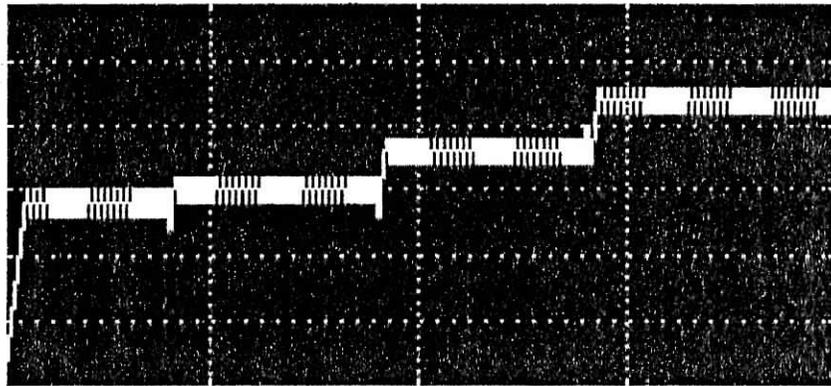


Fig IV.16 Le rapport cyclique du hacheur d en fonction du temps

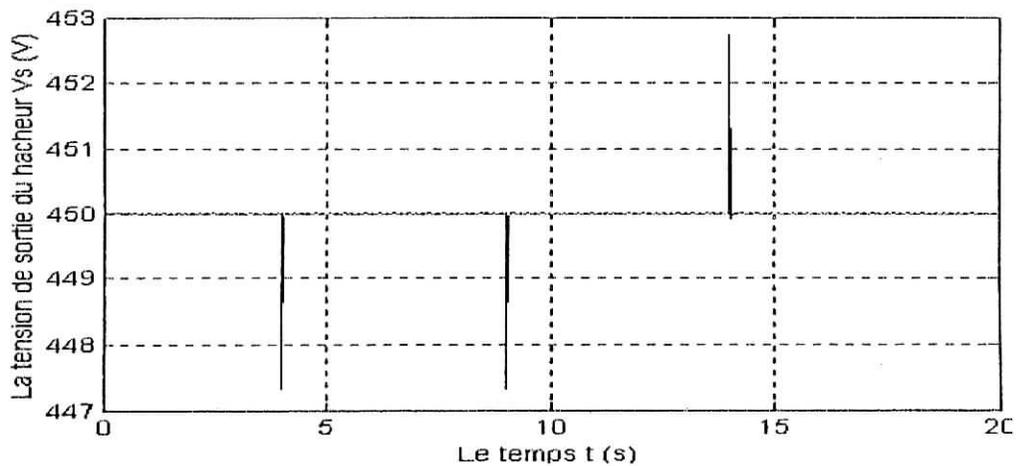


Fig IV.17 La tension de sortie du hacheur V_s en fonction du temps t

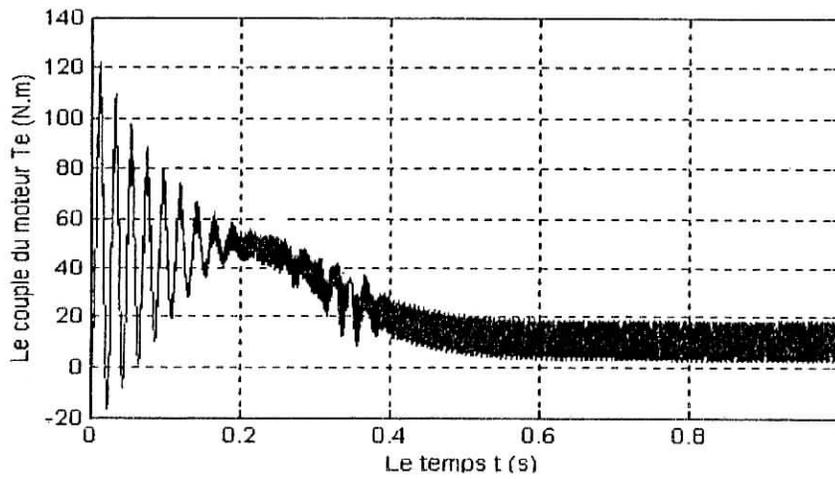
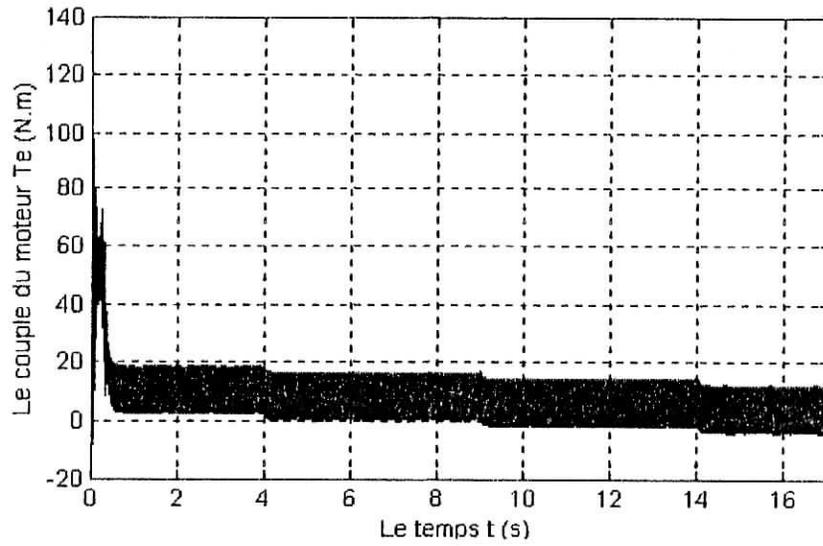


Fig IV.18 Le couple du moteur en fonction du temps t

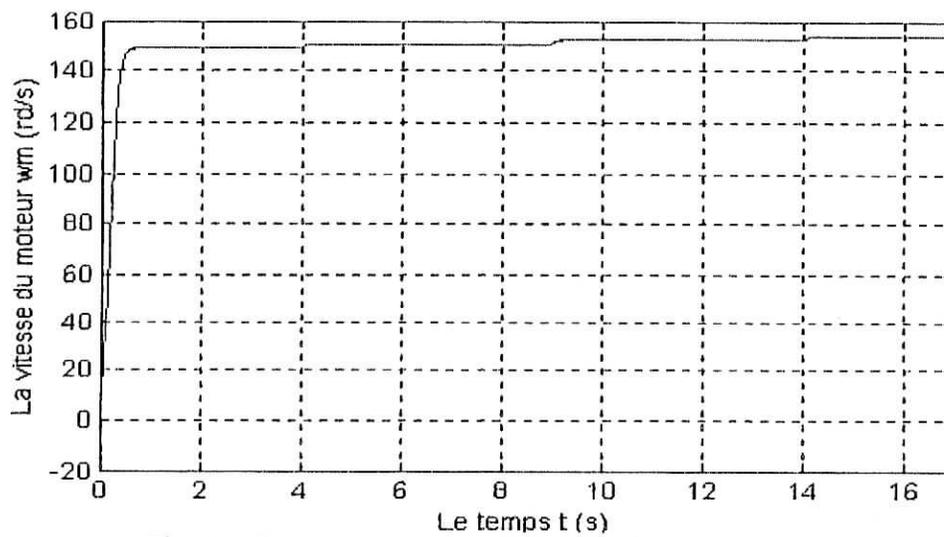


Fig IV.19 La vitesse du moteur en fonction du temps t

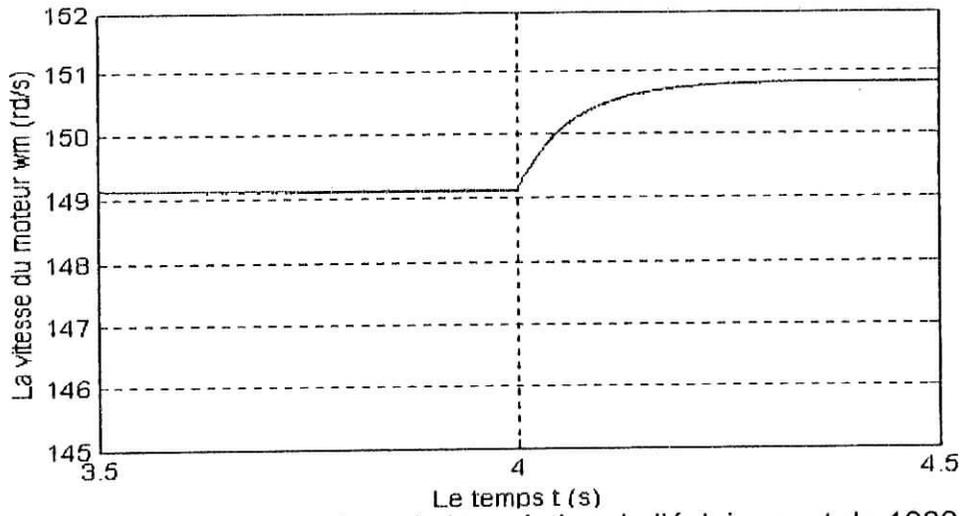


Fig IV.20 la vitesse du moteur lors de la variation de l'éclairement de 1000 W/m^2 à 800 W/m^2 en fonction du temps t

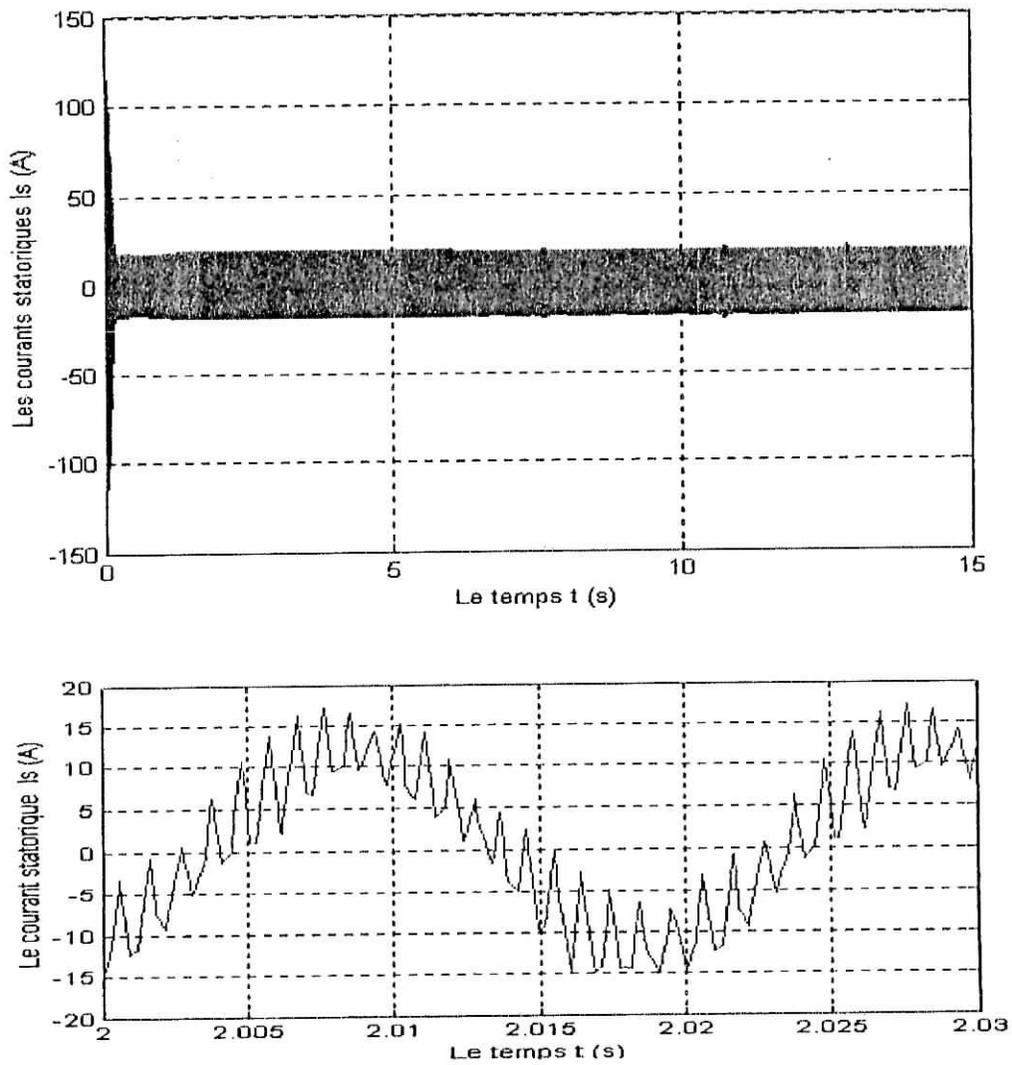
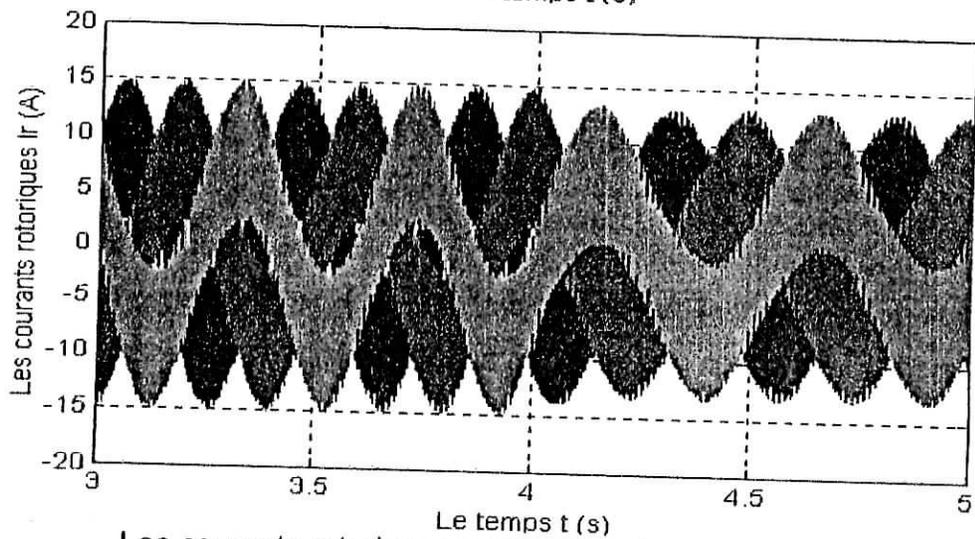
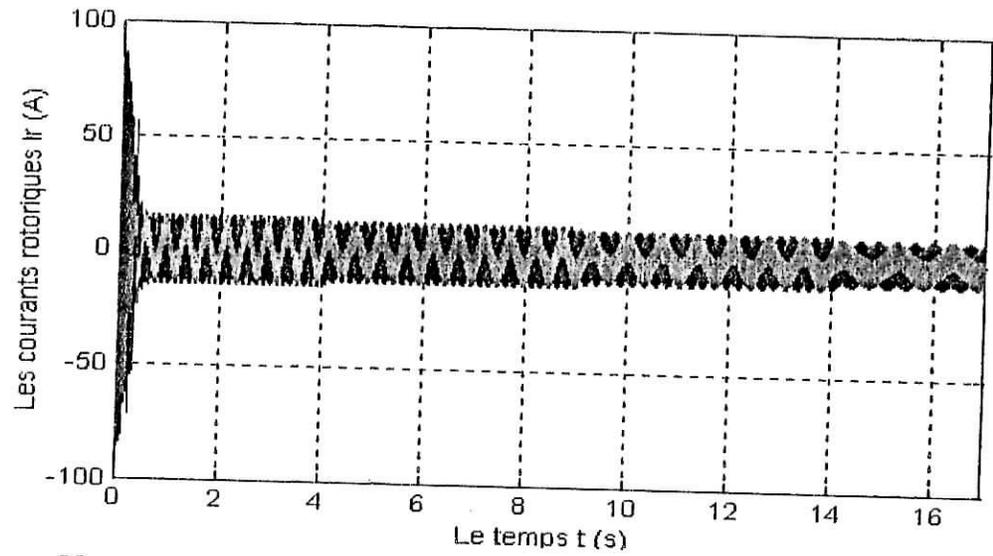


Fig IV.21 Les courants statoriques du moteur en fonction du temps



Les courants rotoriques en fonction du temps t

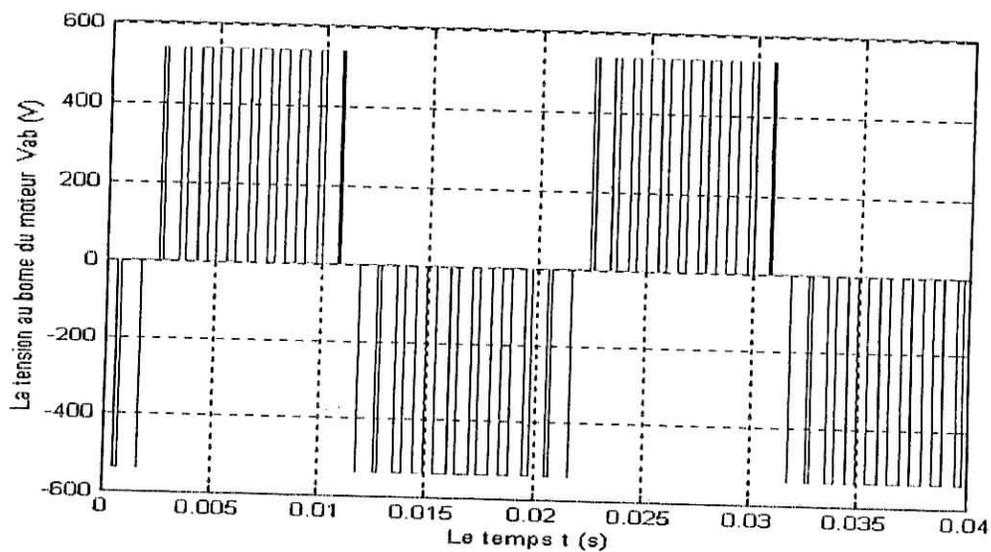


Fig IV.23 La tension composée aux bornes du moteur V_{ab} (V)

Nous observons que la variation de l'ensoleillement, influe sur tout le système y compris le moteur; En effet, pour la tension du GPV, nous constatons une variation de la tension, mais elle oscille toujours autour du point de puissance maximale . Cette variation de la tension influe sur le rapport cyclique d du hacheur , le dernier change pour avoir la nouvelle tension optimale, de même la puissance du panneau diminue .

quand la l'ensoleillement diminue à 800 W/m^2 , la puissance fournie au moteur asynchrone diminue ce qui entraîne une baisse du couple développé par le moteur, d'où la vitesse de rotation du rotor w_m augmente pour assurer la conservation de puissance, la relation suivante indique la relation entre la vitesse et le couple:

$$P_u = \Gamma_u * \Omega$$

IV.4 Conclusion

Le modèle global simule un système de pompage photovoltaïque (la pompe exclue de la simulation) sans batteries. Les résultats obtenus de la modélisation et de la simulation du système sont satisfaisants. La régulation du couple de la charge en fonction de la puissance fournie au moteur asynchrone a été nécessaire pour le bon fonctionnement du système.

Les courbes simulées présentent clairement l'influence des conditions climatologiques (l'ensoleillement et la température), sur le système.

CONCLUSION GENERALE

Le pompage solaire représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. Il utilise la conversion du rayonnement solaire en électricité (effet photovoltaïque) pour alimenter le moteur asynchrone qui entraîne la pompe.

ce travail s'est inscrit dans l'objectif d'étudier les performances et les propriétés d'une installation photovoltaïque .

Dans ce travail, nous avons étudié un système de pompage photovoltaïque sans batteries (Le système est destinés à remplir un réservoir pendant la journée, car c'est souvent économiquement plus rentable, que l'emploi de systèmes à accumulateurs.), qui comporte les éléments suivants: panneau solaire, hacheur, MPPT, onduleur, moteur asynchrone qui entraîne une pompe (nous ne somme pas intéressés à la pompe)

Nous avons vu les caractéristiques de chaque partie et de l'association du système global , cette association nous a permis de visualiser les différents paramètres du système ($I = f(V)$ du panneau; le rapport cyclique du hacheur d ; le couple et la vitesse du moteur).

En ce qui concerne le moteur asynchrone qui alimente la pompe, nous avons vu l'influence de la variation du gisement solaire (l'ensoleillement et la température) sur le couple et sur la vitesse.

Dans les systèmes à entraînement direct, il est important que la puissance de sortie des panneaux solaires corresponde à la puissance nécessaire au fonctionnement de la pompe, ce qui maximise l'efficacité énergétique.

Le pompage photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées.

Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances différentes.

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

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

Le système de pompage photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

Le coût du panneau solaire est élevé ; et le rendement réel de conversion d'un panneau est faible .

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

En effet, ce travail étudie le comportement du moteur dans le cas d'un système en présence du hacheur mais sans batteries, comme étant une introduction pour l'étude du système de pompage photovoltaïque direct sans hacheur et sans batteries (au fil du soleil) .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: F.LABRIQUE et G.SEGUIER '*les convertisseur de l'électronique de puissance*' Tome 3, la conversion continu-continu, ed. Lavoisier 1989.
- [2]: BUHLER '*convertisseur statique*', ed. Dunod.
- [3]: VORPERIAN '*simplified analyse of PWM converter using model of PWM switch part 1 continuous condition mode*' IEEE transaction of aerospace and electronics system, Vol 26, N°3 pp 490,496, May 1990.
- [4]: J.N.AVARITSIOTIS '*the efficient exploitation of photovoltaïque electricity*' solar celles, Vol 14, N°3 pp 261,279, July 1985.
- [5]: F.LUCAS et P.CHARRUAULT '*l'électronique de l'électricien*'
- [6]: YUGO '*solar engineering*', Tome 2, ed. Dunod .
- [7]: CHICHIANG HVA et JONGRONGLIN. '*implimentation of DSP controlled photovoltaïque systeme with peak power tracking*' IEEE Vol 45, N 1 february 98.
- [8]: GRUNDFOS '*système de pompage solaire*' 92.
- [9]: L. HASSAINE '*modélisation et simulation d'un système de conditionnement de puissance pour la poursuite du point maximale dans les systèmes photovoltaïque*'. Magister en électronique juin 2002.
- [10]: M.ORGHERET '*Les piles solaires, le composant et ces applications*' Masson (1985).
- [11]: I. HADJ MAHAMMED '*Modélisation du Générateur Photovoltaïque*' Thèse de Magister en Electronique à l'Ecole Nationale Polytechnique (Janvier 2003).
- [12]: J.P.SIX , P . VANDEPLANQUE '*Exercices et Problèmes d'Electrotechnique Industrielle*' Lavoisier TEC et DOC.
- [13]: M.HADDADI '*Conception et Optimisation de Générateur à conversion photovoltaïque*' Thèse de Doctorat d'état en Electronique à l'Ecole Nationale Polytechnique.

- [14] : F. LABRIQUE et G. SEGUIER '*Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance*' Tome 4, La conversion Continue_Alternative, TEC & DOC, Lavoisier, 1989.
- [15] : W. PALZ '*Electricité solaire*' ED. DUNOD-UNESCO, 1983.
- [16] : W.B.LAWRANCE AND R.TROSTER '*Dynamic Simulation of a Solar Pumping System*' , Renewable Energy, Vol.2,N°6,pp.591-596, 1992.
- [17] : R.E.KATAN, V.G. AGELIDIS and C.V. NAYAR, '*Performance Analysis of a Solar Water Pumping System*', Renewable Energy, Vol.2,N°6, pp.81-87,199.
- [18] : T. FOLGELMAN, '*Systèmes photovoltaïques pour les pays en Developpement*' , Edition . Systèmes AMI, 1982 .
- [19] : F. LASNIER and T.G. ANG '*photovoltaic Engineering Handbook*' Edition Adam Hilger, 1990.
- [20] : M. BARLAUD , B.DE FORNEL et, J.P.REQUIER '*Commande Optimale d'un Générateur photovoltaïque – Convertisseur statique – Recepteur*' Revue de Physique Appliquée, N°19, pp. 905 – 915, Octobre 1984.
- [21] : T. FOLGELMAN '*Installations photovoltaïques dans l'Habitat Isolé*' , Edition Edisud, France, 1983.
- [22] : I. GLASNER and J. APPELBAUM '*Advantage of BOOST Vs BUCK Topology for Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Systems*' IEEE Transactions on Energy Conversion, pp 355-358, 1996.
- [23] : J.L.DALMASSO '*Electronique de Puissance*' , Ed . Belin.
- [24] : H. FLOCH et B. COLL '*Hacheurs continus-continus*' , Technique de l'Ingénieur, D3160,1990.
- [25] : HIDEHIKO SUGIMOTO et HUIAN DONG '*A New Scheme For Maximum Power Tracking Control*' IEEE.
- [26] : A. RICAUD '*Photopiles Solaires de la physique de la conversion PV aux filières, matériaux et procédés*' Presses Polytechniques et Universitaires Romande, Lausanne, 1997.
- [27] : B. SAINT –JEAN '*Electrotechnique et Machines Electriques*' Edition EYROLLES,1977.
- [28] : M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI '*Machines Electriques*' T 2 , Edition MIR, MOSCOU 1979.

ANNEXE

ANNEXE

I. Caractéristique du panneau solaire :

Nombre de cellules en série : 36.

$$P_{\max}=55\text{W.}$$

$$P_{\min}=50\text{W.}$$

$$V_{\text{oc}}=21.7\text{V.}$$

$$I_{\text{cc}}=3.45\text{A.}$$

$$V_{\text{ch}}=17.4\text{V.}$$

$$I_{\text{ch}}=3.15\text{A.}$$

$$R_s=0.005\ \Omega .$$

$$R_{\text{sh}}=30\ \Omega .$$

Type de cellule monocristalline.

II. Caractéristique du hacheur :

$$C=4217.15\ \mu\text{F.}$$

$$L=600\ \mu\text{H.}$$

$$f=1\text{Khz.}$$

$$\Delta I=1\%.$$

III. caractéristique du moteur asynchrone

$$P=2Kw.$$

$$2 \cdot p = 4.$$

Phase : 3.

$$V=220/380V.$$

$$I=9.20 \text{ A} / 5.30 \text{ A}.$$

$$C_n = 14.8 \text{ N.m.}$$

$$\Omega_n = 1440 \text{ tr/mn.}$$

$$\cos \varphi = 0.80.$$

$$R_s = 0.435 \Omega.$$

$$R_r = 0.816 \Omega.$$

$$L_m = 39.61 \text{ mH.}$$

$$L_s = 2.2 \text{ mH.}$$

$$L_r = 2 \text{ mH.}$$

$$\eta = 85\%.$$

IV Les pompes :

IV.1 Choix du type de pompe :

Le choix du type de pompe lors de la conception d'un système de pompage d'eau est important et est lié aux exigences du service envisagé.

Deux conditions doivent être satisfaites :

La première est liée aux besoins de l'utilisateur.

Les facteurs les plus importants à déterminer sont la hauteur totale d'élévation H et le débit D . Par exemple ; dans le cas d'une station de pompage solaire destinée à être installée au sud du pays ; les hauteurs d'élévation exigées sont assez élevées (supérieures à 20 mètres) pour des débits moyens (de $2\text{m}^3/\text{h}$ à $40\text{m}^3/\text{h}$). Trois types de pompe peuvent être ainsi utilisés, ce sont :

- La pompe alternative qui est bien adaptée aux débits faibles (inférieurs à $2\text{m}^3/\text{h}$) ou moyens et pouvant refouler à pression élevée (supérieure à $40\text{kg}/\text{m}^2$).
- La pompe relative qui est généralement une pompe à pression moyenne (2 à $50\text{kg}/\text{m}^2$) et de débit allant des très faibles valeurs jusqu'à des valeurs moyennes. (inférieur à $40\text{m}^3/\text{h}$).
- La pompe centrifuge convenant pour tout débit, à l'exception des très faibles débits, avec une hauteur de refoulement relativement faible pour les débits élevés mais pouvant atteindre des hauteurs élevées pour des débits moyens.

La deuxième condition est liée au type de moteur d'entraînement utilisé; en particulier, au démarrage et la stabilité de la vitesse en régime de fonctionnement normal.

En effet, le couple au démarrage du moteur C_d doit vaincre le couple de décollage C_{rd} de la pompe; d'où la nécessité d'avoir C_{rd} le plus faible possible.

Le groupe moteur pompe est appelé à fonctionner, dans le cas de couplage directe, à diverses vitesses de rotation ou divers régimes. Il est donc important d'atteindre rapidement, une vitesse de régime stable, ce qui conduit à une variation ascendante du couple résistant C_r de la pompe en fonction de la vitesse; la variation du couple moteur C_m en fonction de N étant décroissante.

En générale, le couple au démarrage C_{rd} d'une pompe centrifuge est faible et peut être aisément vaincu. La courbe couple vitesse figure 1 d'une telle pompe est une parabole du second degré.

Les pompes volumétriques (alternative ou rotative) ont une variation du couple C_r en fonction de la vitesse légèrement croissante figure 1, ce qui induit une variation lente en vitesse de rotation. Le courant exigé par le groupe moteur pompe sera ainsi, pratiquement constant. De plus, le couple au démarrage C_{rd} est élevé.

En outre, les pompes volumétriques utilisent des systèmes à clapets qui peuvent, à la longue, s'encrasser par le tartre et le sable d'où une moindre fiabilité des pompes volumétriques vis à vis des pompes centrifuges.

IV.2 Constitution et principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe consiste en ce qu'elle transforme l'énergie mécanique fournie par le moteur, en énergie hydraulique. Cette énergie permet au liquide de s'élever jusqu'à une certaine hauteur en surmontant les pertes d'énergie spécifique. Appelées pertes de charge due au frottement du liquide, à la rugosité des parois et au frottement mécanique.

Les éléments principaux constituant la pompe sont les suivants :

- Une roue mobile ou impulseur qui transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie hydrodynamique (énergie de pression et énergie cinétique).
- Un distributeur fixe, le plus souvent réduit à une simple tubulure convergente, qui donne au fluide une vitesse de grandeur et de direction convenables pour entrer dans la roue.
- Un diffuseur fixé qui transforme l'énergie cinétique du fluide à la sortie de la roue en énergie de pression.

Ces machines ne comportent ni pistons, elles sont donc simples et robustes. Elles ne s'amorcent pas seules à moins d'être dotées d'un dispositif spécial d'amorçage.

IV.3 Relations fondamentales et tracées des caractéristiques :

IV.3.1 Hauteur manométrique :

Si on considère le cas d'une pompe aspirant dans un réservoir fermé dans lequel règne la pression P_a et refoulant dans un autre réservoir sous la pression P_r ; la distance entre les niveaux dans les deux réservoirs étant la hauteur géométrique H_g .

La hauteur totale de refoulement ou hauteur manométrique H se compose de la somme algébrique des hauteurs statiques :

H_a (hauteur d'aspiration)

H_r (hauteur de refoulement)

H_h (distance entre les prises des deux hauteurs précédentes)

$(\frac{P_r}{\varpi} - \frac{P_a}{\varpi})$ (Différence des hauteurs de fluide; ϖ étant la masse volumique du fluide).

Et h_p la somme des pertes de charge à l'aspiration et au refoulement, correspondant ainsi à la hauteur dynamique.

$$H = H_a + H_r + H_h + \frac{P_r}{\varpi} - \frac{P_a}{\varpi} + h_p$$

Si les réservoirs sont à l'air libre, $P_r = P_a$, la hauteur serait donc :

$$H = H_a + H_r + H_h + h_p$$

Les pertes de charge h_p dans une pompe, se composent de deux parties :

Les pertes de charge dues aux frottements et, en partie, aux tourbillons qui naissent à l'intérieur de la pompe.

Les pertes de charge dues aux chocs à l'entrée du liquide dans la roue et dans le diffuseur.

IV.3.2 Débit, puissance utile et rendement.

On appelle débit D , le volume de liquide qui passe à travers la section d'écoulement pendant l'unité de temps.

La puissance utile ou la puissance fournie par une pompe est l'énergie qui est transmise en une seconde au liquide par cette pompe.

$$P_u = \varpi * \frac{D * H}{75}$$

Comme toute machine entraînée, une pompe consomme une puissance supérieure à celle qu'elle fournit. La puissance consommée, disponible sur l'arbre de la pompe, est notée P_m . Le rendement de la pompe η s'exprime de la sorte :

$$\eta = \frac{P_u}{P_m}$$

$$\text{D'où, } P_u = \frac{D * \varpi * H}{75 * \eta}$$

Le rendement η tient compte de trois types de pertes de charges se produisant dans une pompe :

- Les pertes hydrauliques
- Les pertes volumétriques

- Les pertes mécaniques.

IV.4 tracé des courbes caractéristiques.

Dans un système de coordonnées (H,D), on trace sous forme d'une droite inclinée , la caractéristique de la pompe représentant la variation de la hauteur géométrique ou statique HG(figure)en fonction du débit. Ensuite, au dessous de l'axe des abscisses, on trace la courbe de variation des pertes de charges h_p en fonction du débit D .Cette variation est supposée être une fonction du carré du débit.

$$h_p = C_1.D^2 + C_2.(D-D_0)^2.$$

Où D_0 est le débit normal correspondant au cas où les pertes de charge dues aux chocs sont nulles.

Ensuite en soustrayant h_p à H_g , on obtient la courbe $H=F (D)$ qui est la caractéristique réelle de la pompe pour une vitesse de rotation donnée.

Cette manière de tracer la courbe caractéristique d'une pompe n'est pas précise en raison des difficultés que représente l'évaluation des constantes de proportionnalité C_1 et C_2 . Il est donc préférable d'obtenir la caractéristique, expérimentalement. Pour ce faire, on fait installer un dispositif de fermeture quelconque, robinet ou vanne, à la sortie de la pompe. Au cours de l'expérimentation, on fait varier graduellement le degré d'ouverture du dispositif et simultanément, on mesure le débit D et la hauteur manométrique H en maintenant constante la vitesse de rotation N.

A partir d'une courbe caractéristique correspondant à une vitesse de rotation donnée N_1 , on peut tracer la caractéristique d'une pompe à une autre vitesse de rotation N_2 ceci, en utilisant les formules de similitude.

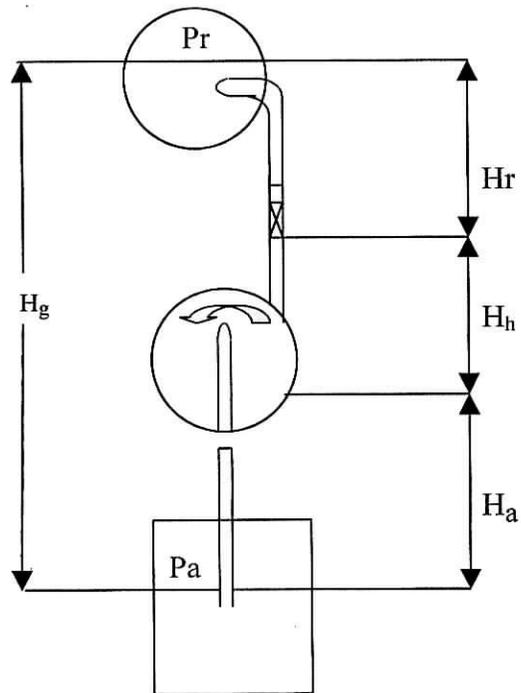


Fig.1 Mesure de la hauteur créée par une pompe

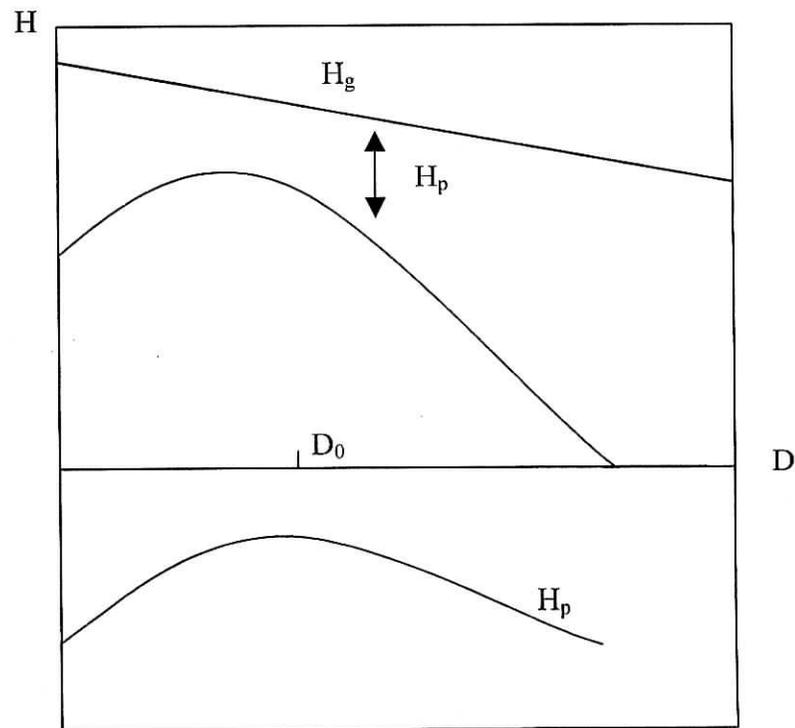


Fig.1 Tracé de la caractéristique calculée

V Les étapes d'installation d'un Système de pompage solaire

Etape 1

Valeur du rayonnement solaire

Le tableau ci-dessous donne les valeurs du rayonnement solaire pour quelque nombre de localités à travers le monde.

Pour tous les mois de l'année, l'ensoleillement moyen sur une surface horizontale (en cal/cm²jour) correspondant à une journée type est donnée mois par mois. De plus, la valeur moyenne annuelle du rayonnement solaire est donnée pour la plupart des localités.

Les localités sont classées par ordre alphabétique, d'abord par pays, et ensuite par ville. La longitude et la latitude sont aussi indiquées.

Etape 2

Quantités d'eau à pomper et hauteur manométrique totale

Si vous ne possédez pas d'informations suffisantes sur la quantité d'eau à pomper par jour, vous pouvez établir une estimation en fonction des besoins approximatifs en eau pour les personnes, les animaux et les cultures dans les régions tropicales.

Etape 3

Sélection de l'angle d'inclinaison optimum

Les valeurs du rayonnement solaire obtenues à l'étape 1 s'appliquent à une surface horizontale.

L'angle d'inclinaison (formé avec l'horizontale) du panneau solaire sera d'une importance capitale pour la quantité de luminosité frappant le panneau solaire, et par conséquent, pour la puissance et la quantité d'énergie qui peuvent être produites.

Le panneau solaire est disponible avec des différentes longueurs de jambes support correspondant aux angles d'inclinaison de 15° à 50°.

Il est décrit ci-après comment obtenir l'angle d'inclinaisons optimum.

La position du soleil dans le ciel dépend de la date. Au printemps et automne, le soleil forme un angle avec l'horizontale de telle façon que l'angle d'inclinaison optimum est presque égal à la latitude de la localité considérée.

Il est possible de changer l'angle d'inclinaison selon le mouvement du soleil dans le ciel pendant l'année et par là augmenter la quantité d'énergie solaire reçue sur le panneau, et ainsi la puissance produite.

Cependant, les mesures effectuées montrent que la quantité de puissance additionnelle obtenue est tellement petite qu'elle ne rentabilise pas l'investissement d'un système de changement automatique de l'angle d'inclinaison.

Il se trouve qu'un angle d'inclinaison fixe entre la latitude -15° et la latitude $+15^\circ$ causera que de petites variations de la puissance maximum produite pendant l'année.

Pour cette raison, il convient de choisir l'angle d'inclinaison standard le plus près de la latitude considérée. C'est le cas si le besoin en eau doit être réparti d'une façon presque régulière sur toute l'année, éventuellement avec une plus grande quantité au printemps et/ou en automne.

Si le besoin en eau est plus fort en été, il est recommandé de sélectionner un angle d'inclinaison près de la latitude -15° , et si le besoin en eau est le plus fort en hiver, un angle d'inclinaison près de la latitude $+15^\circ$ doit être sélectionné.

Quelques angles d'inclinaison optimaux en fonction de la quantité d'eau requise et de la latitude sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Besoins en eau	latitude	Angle d'inclinaison standard
Les plus forts au printemps	$-22^\circ 29'$	15°
Les forts en été (lat. -15°)	$-37^\circ 29'$	30°
Les forts en hiver (lat. $+15^\circ$)	$+39^\circ 99'$	50°

+ : Latitude nord.

- : Latitude sud.

Etape 4

Ensoleillement sur la surface inclinée

La valeur de cet ensoleillement est obtenue de la manière suivant:

Energie solaire reçue sur la surface inclinée:

H_T (kWh/m² jour).

Energie solaire reçue sur le plan horizontal:

H_H (cal/cm² jour).

$H_T = H_H * 1/86 * F_T$ (kWh/m² jour).

(1/86 est le facteur de conversion qui permet d'obtenir du kwh/m² jour à partir de cal/cm² jour).

Les valeurs d'ensoleillement sur la surface inclinée sont calculées mois par mois et mentionnées sur la feuille de spécifications techniques.

Station	Lat	Long	Elev m	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Aden																
Aden	12 50'N	45 01'E	4	415	481	541	591	573	530	503	535	541	544	500	444	516
Algeria																
Adrar	27 52'N	00 17'W	258	380	450	560	620	660	700	690	650	580	460	380	330	537
Ain Sefra	32 45'N	00 36'W	1072	320	400	500	600	650	690	680	630	550	430	340	290	510
Aoulef	26 58'N	01 05'E	290	380	440	540	610	650	650	660	620	570	470	380	320	524
Beni Abbas	30 08'N	02 11'W	498	350	420	300	600	630	640	640	600	530	420	330	300	497
Biskra	34 51'N	05 44'E	124	260	340	430	500	560	600	610	570	460	360	270	230	432
Chottech Cherqui	34 00'N	01 00'E	-	224	323	479	530	579	628	613	594	454	450	318	234	452
Colomb-Bechar	31 36'N	02 13'W	-	320	400	500	580	640	640	640	600	510	420	330	280	488
Djanet	24 33'N	09 29'E	-	390	540	570	620	630	670	680	640	550	480	380	370	545
Djelfa	34 41'N	03 15'E	160	240	320	400	470	570	600	600	560	480	350	270	220	423
El Golea	30 35'N	02 53'E	397	340	420	520	590	650	670	680	640	550	440	340	310	512
El Oued	33 22'N	06 53'E	70	347	449	477	698	744	662	700	606	622	457	356	332	537
Fort Flatters	28 06'N	06 49'E	381	360	440	520	590	640	650	680	640	560	470	380	320	521
Fort de Polignac	26 30'N	08 29'E	566	370	450	540	600	630	660	670	640	570	480	390	330	527
Gerryville	33 41'N	01 01'E	1305	250	340	420	500	580	610	600	560	490	370	270	230	435
Ghardaia	32 29'N	03 40'E	527	330	410	510	600	660	680	680	640	530	440	340	300	510
Laghouat	33 48'N	02 53'E	767	270	340	420	500	570	590	600	550	470	360	280	240	432
Quallen	24 36'N	01 14'E	347	410	550	570	620	640	650	650	620	570	500	430	350	547
Quargla	31 57'N	05 20'E	138	320	400	500	580	620	620	680	620	520	420	330	280	490
Tamanrasset	22 42'N	05 30'E	1376	430	498	583	633	647	625	647	595	515	477	416	389	538
Timimoun	29 15'N	00 14'E	284	360	440	540	610	660	680	680	630	560	450	330	310	521
Tougourt	33 07'N	06 04'E	69	300	400	480	520	640	640	680	630	540	410	310	270	485
Angola																
Dundo	07 04'S	20 08'E	745	431	435	434	452	448	418	383	379	423	461	448	429	429
Luanda	08 49'S	13 13'E	42	495	517	473	437	420	385	304	327	397	433	471	513	431
Luso	11 08'S	19 09'E	1328	439	504	455	523	503	495	514	581	514	501	498	477	500
Malange	09 33'S	16 22'E	1151	456	505	462	422	459	466	436	429	441	467	452	468	455
Mocamedes	15 02'S	12 02'E	44	560	554	522	460	406	290	292	328	391	470	562	558	449
Argentina																
Argentine Is	65 15'S	64 16'W	10	452	332	154	77	20	6	12	59	161	339	444	578	219
Bariloche	41 09'S	71 01'W	826	607	457	407	214	138	104	114	209	326	440	558	654	352
Buenos Aires Obs.	34 35'S	58 29'W	25	640	556	434	324	235	182	203	278	379	482	564	643	410
Castelar	34 36'S	58 40'W	16	617	512	428	316	213	156	206	287	388	504	573	606	400
Comodoro Rivadavia	45 47'S	67 30'W	61	-	569	-	219	-	-	82	161	299	386	603	636	-
Concordia	31 23'S	58 02'W	37	648	594	468	-	222	145	200	281	385	526	622	633	-
Cordoba	31 19'S	64 13'W	484	-	-	-	-	251	181	170	260	463	447	536	570	-
Corrientes	27 28'S	58 49'W	52	600	550	470	370	290	250	260	330	420	500	580	590	433
Huinca Renánco	34 50'S	64 22'W	182	630	580	470	330	210	190	210	270	380	500	600	640	417
La Quiaca	22 06'S	65 36'W	3458	-	-	640	597	482	434	455	554	688	784	814	802	-
Laboulaye	34 08'S	63 24'W	-	640	542	454	369	433	-	333	417	548	615	655	-	
Las Lomitas	24 42'S	60 35'W	130	-	-	-	-	259	184	242	294	350	419	472	547	-
Loreto	27 21'S	55 30'W	163	585	517	484	344	249	205	223	266	345	464	575	572	402
Mar Del Plata	37 56'S	57 35'W	19	642	550	423	275	-	-	130	247	342	424	-	-	-
	38 02'S	57 33'W	14	610	520	420	300	200	160	180	250	330	440	560	610	382
Mazaruca	33 35'S	59 24'W	4	676	551	444	294	224	154	197	263	431	519	602	662	418
Mendoza	32 53'S	68 52'W	827	720	647	550	336	245	216	231	302	457	592	674	675	445
Neuquen	38 57'S	68 09'W	270	616	491	352	242	161	100	99	250	391	403	506	575	349
Orcadas	60 44'S	44 44'W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	226	290	278	-	
Paso De Los Libres	29 43'S	57 06'W	66	630	560	450	370	280	230	260	330	390	500	570	540	425
Patagones	40 48'S	62 59'W	34	600	530	410	290	190	150	150	240	340	440	550	610	374
Pilar	31 40'S	63 53'W	338	632	543	433	348	237	184	230	315	420	534	580	606	422
Posadas	27 22'S	55 56'W	117	560	540	470	360	280	230	260	310	380	480	550	560	415
Puelches	38 08'S	65 55'W	160	-	669	-	-	180	126	116	214	330	508	631	719	-
Puerto Madryn	42 46'S	65 02'W	8	590	510	390	270	180	170	160	220	330	450	530	400	-
Rafaele	31 15'S	61 30'W	130	440	412	312	212	177	113	192	201	270	344	421	448	277
Resistencia	27 28'S	58 29'W	49	547	444	383	234	186	194	206	272	354	466	514	530	361
Rosario	32 56'S	60 42'W	222	610	550	450	330	240	200	210	280	390	480	560	560	405
San Juan	31 36'S	68 33'W	630	554	496	432	326	272	286	284	304	450	528	550	520	417
			-	690	640	540	430	320	280	300	380	480	590	670	700	501
San Luiz	33 16'S	66 21'W	716	-	-	-	321	204	173	190	258	454	568	633	766	-
San Miguel	34 33'S	58 42'W	27	554	478	356	232	183	130	153	217	328	421	477	535	339
Santiago Del Estero	27 47'S	64 18'W	-	570	520	450	350	270	230	270	340	410	520	570	580	423
Trelew	43 14'S	63 18'W	39	692	542	404	250	134	87	98	198	336	424	534	543	353
Tres Cruces	23 05'S	65 44'W	4580	805	537	611	670	544	482	493	-	733	772	764	762	-
Tucuman	26 50'S	65 12'W	421	371	541	434	322	237	202	274	333	425	489	540	524	391
Australia																
Alice Springs	23 48'S	133 53'E	546	646	620	556	466	369	337	361	460	551	592	623	641	518
Aspendale	38 02'S	145 06'E	-	682	547	382	314	190	156	176	230	302	428	479	596	373
Box Hill	37 48'S	145 08'E	100	564	496	401	259	172	141	159	223	319	421	496	570	352
Brisbane	27 28'S	153 02'E	-	560	520	450	370	300	260	280	340	420	500	550	570	427
Darwin	12 26'S	130 52'E	27	442	458	481	440	451	436	458	529	550	557	531	484	485
Dry Creek, S.A.	34 50'S	138 35'E	4	691	601	487	426	233	197	209	286	397	479	600	662	439
Guildford	31 56'S	115 57'E	15	665	611	505	352	255	219	237	318	424	531	625	687	452
Garbutt	19 15'S	146 46'E	4	505	492	483	448	374	363	386	457	554	598	623	619	492
Melbourne	37 49'S	144 58'E	35	643	542	315	290	215	176	190	240	336	434	468	536	365
Mount Stromlo	35 21'S	149 10'E	-	628	554	450	349	268	208	231	308	432	512	603	646	432
Sydney	33 52'S															