

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : GENIE ELECTRIQUE

Projet de fin d'étude pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
En Electrotechnique

Thème

**Développement d'un algorithme MPPT d'un système photovoltaïque onduleur-MAS.
Application au pompage photovoltaïque.**

Proposé par : Dr E. BERKOUK.

Etudié par : L. ACHOUL.
S. HAMIDI.

Promotion : juin 2004

E.N.P.10,Avenue Hassen Badi, EL HARRACH , ALGER



République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la recherche Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE ELECTRIQUE

**Projet de fin d'études pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
En Electrotechnique**

Thème

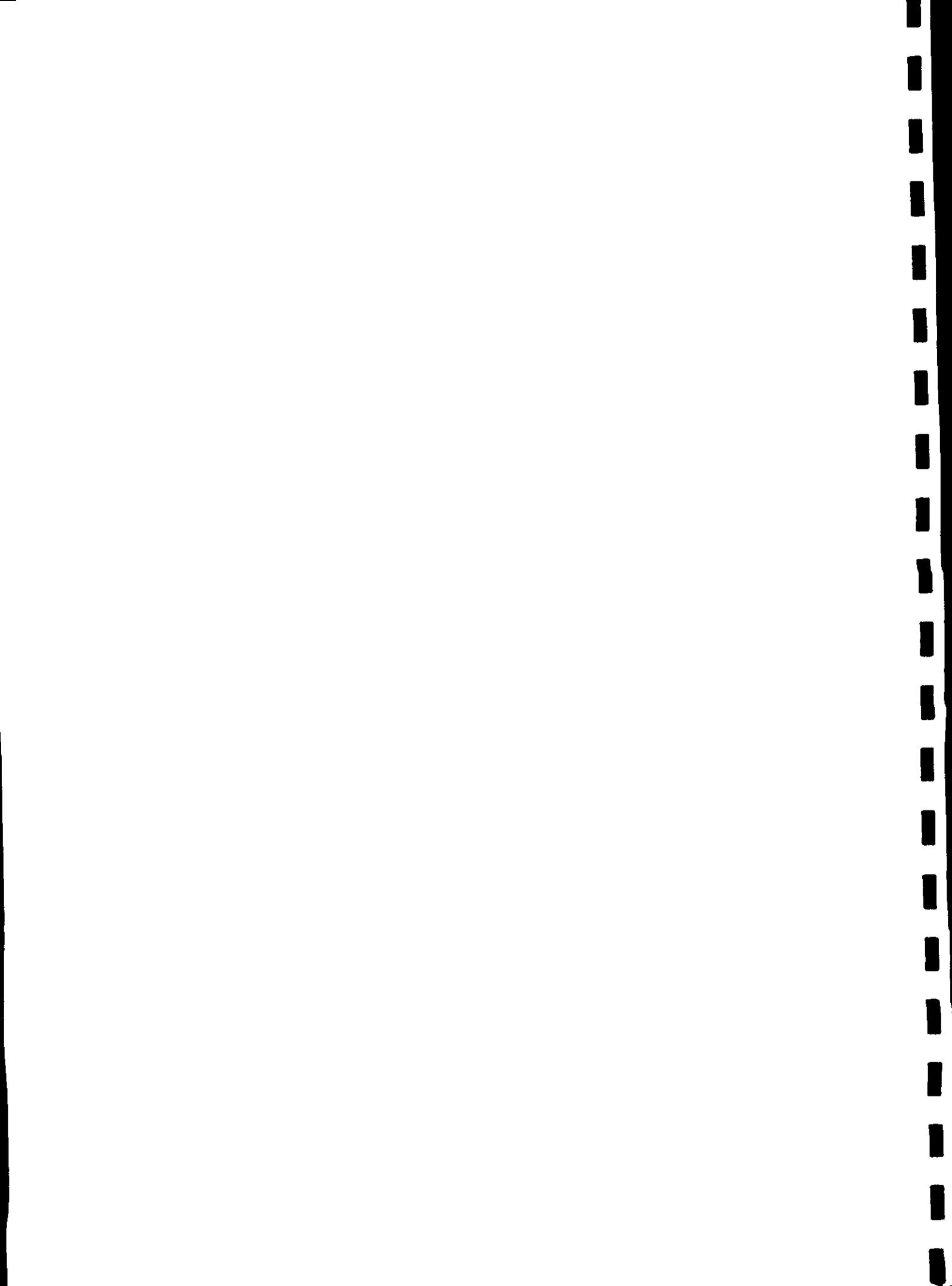
**Développement d'un algorithme MPPT d'un système photovoltaïque onduleur-MAS.
Application au pompage photovoltaïque.**

Proposé par : Dr E. BERKOUK.

**Etudié par : L. ACHOUL.
S. HAMIDI.**

Promotion : juin 2004

E.N.P.10,Avenue Hassen Badi, EL HARRACH , ALGER



Résumé:

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques, un mécanisme de tracking s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travaille avec une meilleure efficacité.

Le but de notre travail est de développer un algorithme de poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque - onduleur - moteur asynchrone et son application au pompage photovoltaïque.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Convertisseur DC/DC, MPPT, Convertisseur DC/AC Moteur asynchrone.

ملخص:

نعتبر الكهرباء الشمسية من أهم الطاقات المتجددة من الناحية البيئية، من خصائص الألواح الشمسية أنها لا تعطي استطاعتها العظمى إلا في نقطة عمل معينة، تلك النقطة غير ثابتة بل تتحرك مع الظروف الجوية من شدة الضوء و الحرارة، لذلك يجب استعمال نظام للاستغلال الأمثل للطاقة المتوفرة.

الهدف من الدراسة

التي سنقوم بها يتمثل في انجاز خوارزمية لمتابعة نقطة الاستطاعة العظمى لنظام كهروضوئي-مبدل مستمر متناوب ومحرك لامترامن و تطبيقها على الضخ الكهروضوئي .

كلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، مبدل مستمر-مستمر، متابعة نقطة الاستطاعة العظمى، مبدل مستمر - متناوب، محرك لامترامن.

Abstract:

Solar electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable source of power since the peak power point depends on the cell temperature and the insulation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency.

The aim of our work is to developing an algorithm for the maximum power point tracking of photovoltaic - inverter- asynchronous motor system, with application for Photovoltaic pumping system.

Keywords: Photovoltaic Generator, DC/DC converter, MPPT, DC/AC inverter, asynchronous motor.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Dédicace

*A la mémoire de monsieur Hamidi qui demeurera éternel
dans nos cœurs ..*

A mes chers parents ..

A mes chers grands parents ..

A mes frères, ma sœur et tous mes proches ..

A tous les jeunes de mon village ..

A mes ami(e)s ..

A tous ceux qui m'ont soutenu de loin ou de près

A Poumeya ...

Lyes ...

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail au grand homme qu'était mon père **Liess Hamidi**.

Je le dédie également à ma chère maman que j'aime plus que tout.

Je le dédie à mon neveu, le petit Liess.

Je le dédie à mes très chères sœurs, à mes beaux frères, à mes grands-mères, à mes tantes Houria et Zouina ainsi qu'à mes cousines Soraya et Amira.

Je le dédie aux amis de mes parents.

Je le dédie, enfin, à mes amis exceptionnels qui ont su me soutenir et être présents dans des moments de profonde détresse.

Soumeya



REMERCIEMENTS

Nous remercions notre promoteur Dr E.Berkouk de nous avoir guidé tout au long de notre travail ainsi que Mr Haddadi et Mr O.Amrouche de nous avoir fait l'honneur d'être les membres du jury.

Nous tenons à remercier chaleureusement Mr M.Hadji, Mr L.Hamidi, Mme B.Hamidi, Melle I.Hamidi, Melle S.Hamidi, Mme A.Hamidi, Mr M.Sitouah, Mme N.Sitouah, Mr M.Ayadi, Mr Haddadi, Mr O.Amrouche, Mr Trabelsi, Mr Larbes, Mr Touhami, Mr H.Ouldkadi, Mr T.Kebaili et K.Chettouh de nous avoir aidés de tout leur possible.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I	
PANNEAU SOLAIRE MODELISATION ET SIMULATION	
I.1.Introduction.....	4
I.2.Rappel sur les semi conducteurs.....	4
I.2.1.Semi-conducteur intrinsèque.....	5
I.2.2.Semi-conducteur extrinsèque.....	5
I.2.3.Courant électrique dans un semi-conducteur.....	7
I.2.4.La jonction PN.....	7
I.3.Le gisement solaire.....	8
I.4.La cellule photovoltaïque.....	9
I.4.1.Effet photovoltaïque et jonction PN.....	10
I.4.2.Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.4.3.Courant de court-circuit.....	12
I.4.4.Tension de circuit ouvert	12
I.4.5.Adaptation d'impédance	13
I.4.6.Les paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	13
I.5.Modules photovoltaïques.....	17
I.6.Générateur photovoltaïque.....	18
I.6.1.Modélisation du générateur photovoltaïque.....	19
I.6.2.Simulation du générateur photovoltaïque.....	20
I.6.3.Caractéristique $I=f(V)$	21
I.6.4.Influence des paramètres.....	22
I.7.Conclusion.....	24
CHAPITRE II	
MODELISATION ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE-HACHEUR MPPT.	
II.1.Introduction.....	25
II.2.Hacheur survolteur 'Boost converter'.....	25
II.3.Conception d'un hacheur Boost.....	28
II.4.Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimal.....	28
II.5.Simulation de l'association générateur photovoltaïque hacheur.....	29
II.5.1.Simulation d'un hacheur survolteur 'Boost'.....	29
II.5.2.Simulation de la MPPT.....	30
II.5.3.Résultats de la simulation.....	32
II.6.Conclusion.....	34
CHAPITRE III	
ETUDE DE L'ASSOCIATION ONDULEUR-MOTEUR ASYNCHRONE	
III.1.Introduction.....	35
III.2.Modélisation et commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	35
III.2.1.Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	35
III.2.2.La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).....	36
III.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	38
III.3.1 Introduction.....	38
III.3.2 Hypothèses simplificatrices	38

III.3.3	Convention.....	39
III.3.4	Modèle de la machine asynchrone.....	39
III.3.4.1	Equations électriques de la machine asynchrone.....	39
III.3.4.2	Equation mécanique.....	40
III.3.5	Transformation de Park.....	41
III.3.6	Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK.....	42
III.3.7	Choix du référentiel.....	42
III.3.8	Mise sous forme d'équation d'état.....	43
III.4	Conclusion.....	49
CHAPITRE IV		
MODELISATION ET SIMULATION DU MODELE GLOBAL AVEC ET SANS HACHEUR		
IV.1	Introduction.....	50
IV.2	PARTIE 1 :	
	Simulation du panneau solaire-hacheur-onduleur-moteur asynchrone	50
IV.2.1	Conditions pour un bon fonctionnement.....	50
IV.3	PARTIE 2 : Simulation du panneau solaire-onduleur-moteur asynchrone.....	66
IV.3.1	Modifications nécessaires pour le passage du système de pompage avec hacheur au système sans hacheur.....	66
IV.3.2	Application de la MPPT à l'onduleur.....	66
IV.3.3	Résultats de la simulation.....	67
IV.4	Conclusion.....	79
	Conclusion générale.....	81
Bibliographie		
Annexe		

NOMENCLATURE

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

I_D : courant qui traverse la diode (A).

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

n_s : nombre de cellules en série.

n_p : nombre de cellules en parallèle.

GPV : générateur photovoltaïque.

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

I_0 : courant à l'obscurité (A).

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

R_s : résistance série du générateur (Ω).

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

q : charge de l'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 : rapport de l'ensoleillement (%).

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 du hacheur.

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 d'un commutateur (s).

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

I_L : courant aux bornes de la bobine (A).

I_c : courant aux bornes du condensateur (A).

f : fréquence (Hz).

Q : charge résistive (Ω).

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

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

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'entrée 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 la porteuse (Hz).
 C_{rd} : couple au démarrage (N.m).
 r : coefficient de réglage en tension.
 p : nombre de paire de pôles.
 Ω_s : vitesse du champ statorique (rd/s).
 ω_s : pulsation du courant et de la tension statorique.
 Ω : vitesse mécanique du rotor (rd/s).
 g : glissement.
 θ_p : angle électrique stator/référentiel (d,q) (rd).
 R_s : résistance statorique (Ω).
 R_r : résistance rotorique (Ω).
 Φ_s : flux statorique (Wb).
 Φ_r : flux rotorique (Wb).
 L_{ss} : inductance statorique (H).
 I_s : courant statorique (A).
 M_{sr} : mutuelle stator-rotor (H).
 I_r : courant rotorique (A).
 L_{rr} : inductance rotorique (H).
 M_{rs} : 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] : matrice de la transformation de Park.

n_1, n_2 : nombre fictif de spires.

K_0 : constante=1/2.

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

P_e : puissance instantanée (W).

ω_p : vitesse angulaire (rd/s).

Φ_{qs} : flux statorique/ l'axe q (Wb).

Φ_{ds} : flux statorique/ l'axe d (Wb).

Φ_{qr} : flux rotorique/ l'axe q (Wb).

Φ_{dr} : flux rotorique/ l'axe d (Wb).

ω_s : vitesse de synchronisme (rd/s).

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 : hauteur totale d'élévation (m).

H_g : 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 : somme des pertes de charge.

P_a : pression (bar).

ϖ : masse volumique du fluide (kg/m^3).

D_0 : débit normal correspondant au cas où les pertes de charge dues aux chocs sont nulles (m^3/h)

INTRODUCTION

Face à une industrialisation rapide des nations, à la modernisation de la société et à la croissance démographique continue des populations, la demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter [1], alors que les sources d'énergie conventionnelles tendent à s'épuiser par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité [2]. Cette extraction incontrôlée des énergies naturelles va certainement conduire notre système écologique à l'instabilité [2].

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel dans la production de l'électricité a un impact désastreux sur l'environnement (la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂) [3].

En 2003, le pétrole et le gaz et à un moindre degré le charbon, qui sont des ressources non renouvelables, ont représenté les trois quarts des ressources consommées dans le monde.

Sur les 75 millions de barils de pétrole produits quotidiennement (2003) dans le monde, l'Amérique en consomme 20 soit près du tiers [14].

Or 60% de cette consommation est importée et les spécialistes (J.A n° 2241 du 21/12/2003) s'interrogent sur la question de savoir s'il n'est pas plus économique de financer des recherches susceptibles d'ouvrir la voie à d'autres énergies plutôt que de continuer la débauche de dépenses civiles et militaires nécessaire pour mettre la main sur le pétrole là où il se trouve [14].

Pour ces raisons, trouver de nouvelles sources d'énergie est devenu un défi dans tous les domaines scientifiques et technologiques de part le monde, et spécialement dans le domaine de l'ingénierie électrique [2].

Ainsi, les énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, etc.) offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et de moins puiser dans les ressources naturelles.

L'énergie solaire est apparue comme une alternative importante à la consommation croissante de l'énergie dans la planète. Sa quantité journalière arrivant à la surface de la terre est dix fois plus grande que la totalité de l'énergie consommée par toutes les populations de la planète pendant une année entière [2]. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque est considérée comme une ressource primordiale, pour plusieurs pays situés dans des régions tropicales et tempérées, où la densité solaire directe peut dépasser 1 kW/m² [4].

Le physicien français Edmond Becquerel a, le premier, décrit l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en a expliqué les mécanismes en 1912, mais c'est resté une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'aux années 50 où les équipes de Bell Laboratories ont fabriqué la première cellule au silicium cristallin de rendement 4%. Les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier au début des années 80 qu'un intérêt véritable s'est rapidement manifesté à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres des photopiles induisant une baisse constante du prix de cette énergie [5].

Par effet photovoltaïque, l'énergie contenue dans le rayon solaire peut être directement transformée en énergie électrique. Cette méthode de conversion de l'énergie présente certains avantages comme :

- La simplicité ;
- L'inexistence de parties mécaniques mobiles ;
- Une large flexibilité dans le design et l'application offerte par sa caractéristique modulaire;
- Une installation et un fonctionnement rapides ;
- Une grande fiabilité, et une maintenance très simple ;
- Une source d'énergie électrique silencieuse, saine, non polluante et renouvelable [2] ;
- Un potentiel à fournir de l'électricité dans les zones non servies par le réseau conventionnel : les systèmes photovoltaïques et les systèmes hybrides ont été pendant plusieurs décennies une source idéale d'énergie pour les régions éloignées [6].

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement considérés comme une source d'énergie compétitive dans plusieurs applications comme les systèmes de pompage de l'eau, l'irrigation, les équipements de communication, les signaux lumineux et d'autres applications de faible puissance.

Les principales restrictions à l'utilisation de l'énergie solaire sont :

- Le prix onéreux de l'installation initiale : Le générateur solaire représente la partie la plus chère de tout le système. Cependant, il y a une baisse continue de son prix, estimé dans les années 60 à 400\$ par Watt crête et actuellement à 3.5 – 4.5 \$ par Watt crête. Par ailleurs, la taille et le prix du générateur photovoltaïque diminuent si l'ensoleillement disponible est totalement utilisé et si le rendement des différents composants constituant le système photovoltaïque est suffisamment élevé [7].
- Le très faible rendement de la cellule photovoltaïque : Le rendement de la conversion photovoltaïque d'une cellule va de 12% jusqu'à un maximum de 29% pour des unités très chères.

En dépit de ces deux facteurs, on va vers une diminution des prix des systèmes d'électroniques de puissance et des cellules photovoltaïques, indiquant un futur prometteur pour les nouvelles installations [4].

Afin d'optimiser cette source d'énergie et d'amortir l'investissement initial, il est très important d'en extraire le maximum de puissance [4].

Dans ce travail, on étudie un système de pompage photovoltaïque sans batteries (au lieu de stocker l'électricité dans des batteries, on stocke l'eau dans des réservoirs ce qui est moins cher). Le but final étant la réduction du coût de production de l'énergie électrique fournie par un générateur photovoltaïque en extrayant le maximum de puissance et en optimisant le rendement de notre système de pompage.

Le premier chapitre décrit le système à étudier en commençant par la modélisation et la simulation du panneau solaire.

Le deuxième chapitre comporte une étude du hacheur ainsi que la description de l'algorithme de recherche du point de fonctionnement optimal MPPT par la méthode « perturber et observer », en plus de la modélisation et de la simulation de l'association panneau solaire-hacheur MPPT.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse à la modélisation et à la simulation de l'association onduleur-moteur asynchrone.

Le quatrième chapitre comporte deux parties. Dans la première partie on étudie la simulation du système global avec hacheur, c'est-à-dire panneau solaire-hacheur MPPT-onduleur-moteur asynchrone. Dans la deuxième partie, on propose le même système de pompage mais sans hacheur, c'est-à-dire générateur solaire-onduleur MPPT-moteur asynchrone.

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 [8].

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 [8].

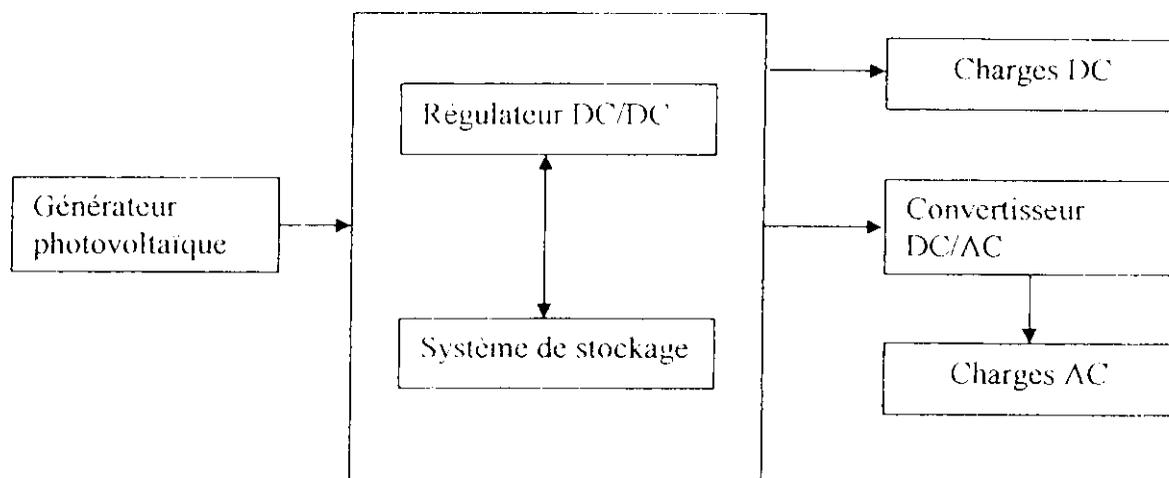


Figure I.1 : Synoptique d'un système photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique [3]. Il peut être obtenu dans tous les semi-conducteurs. Les isolants ne conviennent pas à cause de leur faible absorptivité de la lumière, quant aux métaux, leur concentration élevée en électrons dans l'obscurité empêche tout effet photovoltaïque. Ce sont les semi-conducteurs qui sont les mieux adaptés à la conversion photovoltaïque : ils donnent le produit courant-tension le plus élevé [9].

I.2.Rappels sur les semi-conducteurs

La conductivité électrique est due à la présence des électrons libres qui sont mis en mouvement par un champ électrique [10].

Un semi-conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique [11].

Quand la lumière du soleil frappe un semi-conducteur, les photons qui la constituent sont capables de transmettre leur énergie 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 de circuler dans le solide. Le manque de l'électron dans la liaison rompue s'appelle un trou. Ce dernier peut aussi se déplacer à l'intérieur du solide. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron [10].

1.2.1.Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs de charges [10].

Modèle des bandes d'énergie

A chaque électron sur une orbite correspond un niveau d'énergie bien défini. Pour passer d'un niveau d'énergie E_1 à un niveau d'énergie supérieur E_2 , il faut fournir à la particule une quantité d'énergie égale à la différence des deux énergies (E_2-E_1) [10].

Un atome est dans un état excité si les orbites d'excitation contiennent des électrons, sinon il est dans un état stable [10].

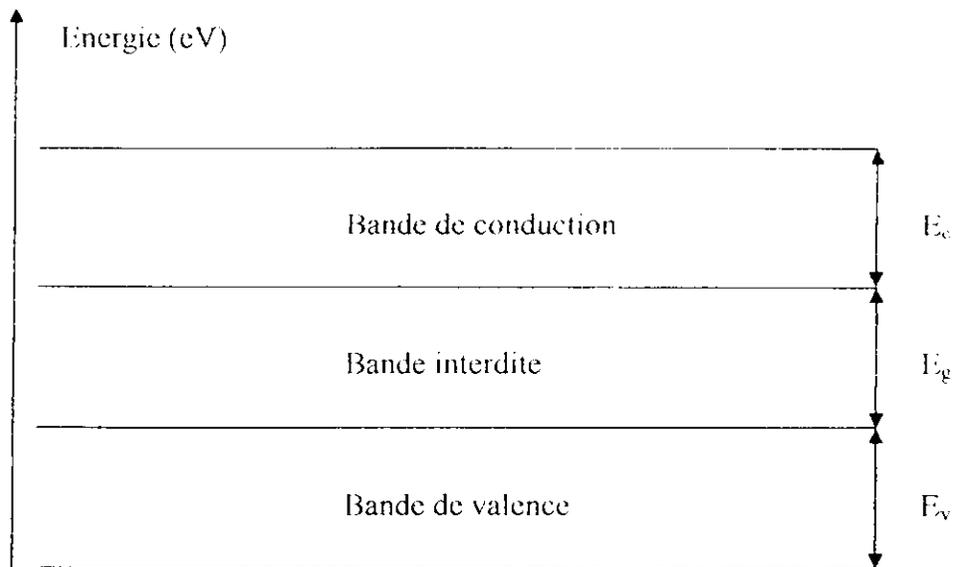


Figure I.2 : Diagramme de bandes d'énergie d'un semi-conducteur intrinsèque.

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) représente l'énergie d'ionisation (E_g), figure (I.2) [10].

1.2.2.Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur est dit extrinsèque lorsqu'il n'est pas pur, c'est-à-dire lorsqu'il contient des impuretés qui consistent en des atomes dont le nombre d'électrons de valence est différent (supérieur ou inférieur) de celui des atomes du cristal [10].

En lui incorporant une quantité infime d'impuretés, les électrons vont circuler plus facilement puisque la probabilité de recombinaison est très faible. Le semi-conducteur acquiert alors une conductibilité très élevée et devient donc un très bon conducteur : on dit qu'il est dopé [10].

Densité des porteurs libres

a – Semi-conducteur de type N

Un semi-conducteur est du type N (négatif) si on introduit dans son réseau cristallin des atomes, dits donneurs, de la colonne V du tableau périodique (phosphore, arsenic ou antimoine) [10].

En dopant le silicium au phosphore, par exemple, un des cinq électrons de valence du phosphore se libère alors que les quatre autres assurent les liaisons avec les quatre électrons de valence du silicium (figure I.3). Le semi-conducteur dopé du type N contient donc des électrons mobiles. Quant au donneur, il possède une charge positive qu'on appelle trou [10].

A température ambiante, la presque totalité des atomes donneurs cèdent un électron ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) [10].

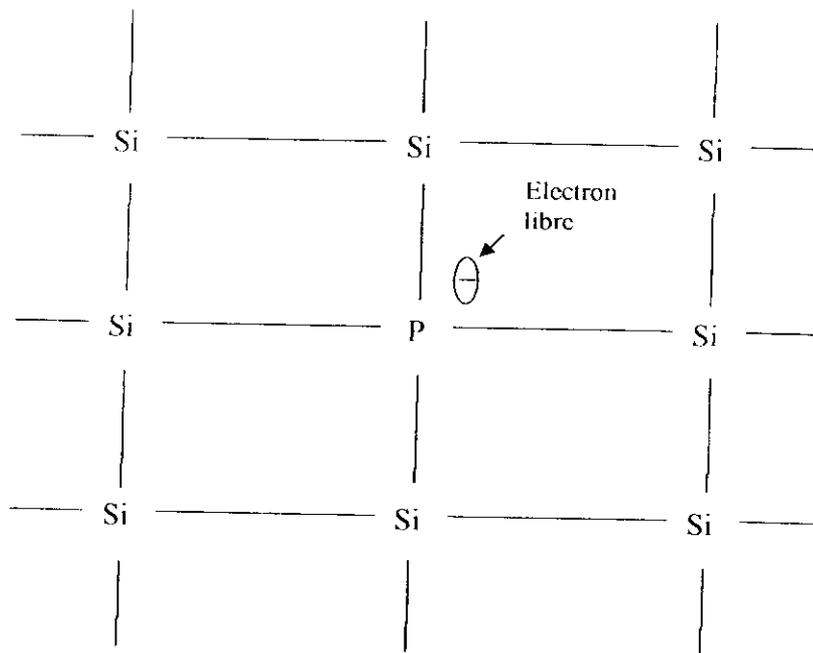


Figure I.3 : Exemple de dopage du type N :

silicium (Si) dopé au phosphore (P).

b -Semi-conducteur de type P

L'introduction d'atomes de la ligne III du tableau de Mendeleiev, dits accepteurs, confère le type P (positif) au semi-conducteur intrinsèque [10].

Par exemple, on dope le silicium au bore, (figure I.4). La bande de valence du bore ne contenant que trois électrons, pour assurer ses liaisons avec le silicium, il s'ionise négativement en captant un électron qui provient de la bande de valence du silicium. La capture de cet électron va créer un trou positif mobile dans la bande de valence du silicium [10].

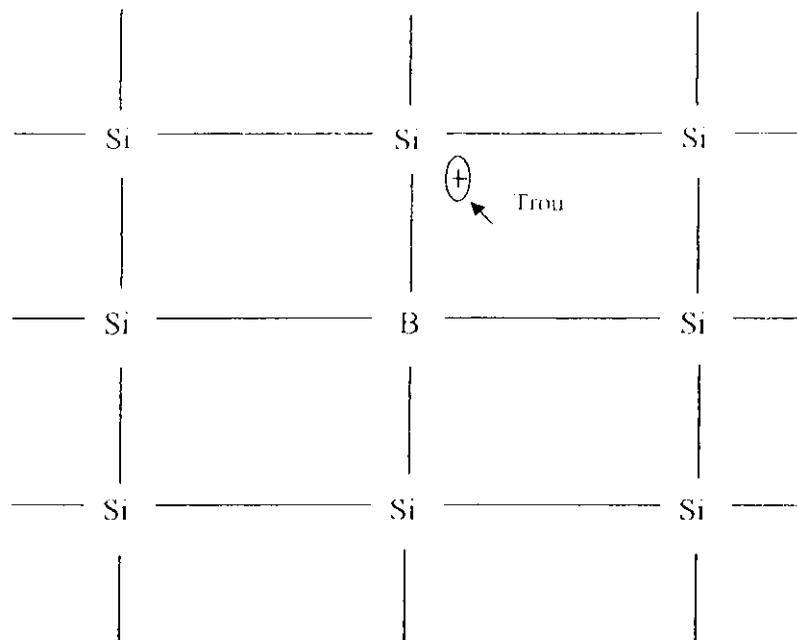


Figure I.4 : Exemple de dopage du type P : silicium (Si) dopé au bore (B).

1.2.3. Courant électrique dans un semi-conducteur

Les deux phénomènes qui engendrent un courant électrique sont la conduction et la diffusion [10].

a-Conduction

Sous l'action d'un champ électrique E , les électrons et les trous peuvent se déplacer avec une vitesse V [10].

b-Diffusion

En présence d'un gradient de concentration, les porteurs libres diffusent donnant lieu à un courant [10].

1.2.4. La jonction PN

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux parties de types différents P et N d'un même monocristal de semi-conducteur [10].

Lorsque l'on assemble les deux parties, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre figure (1.5) [10].

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives [10].

Il apparaît ainsi, au niveau de la jonction, une zone contenant des charges fixes négatives et positives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion

des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. Ce champ provoque une différence de potentiel entre la région P et la région N : on l'appelle barrière de potentiel [10].

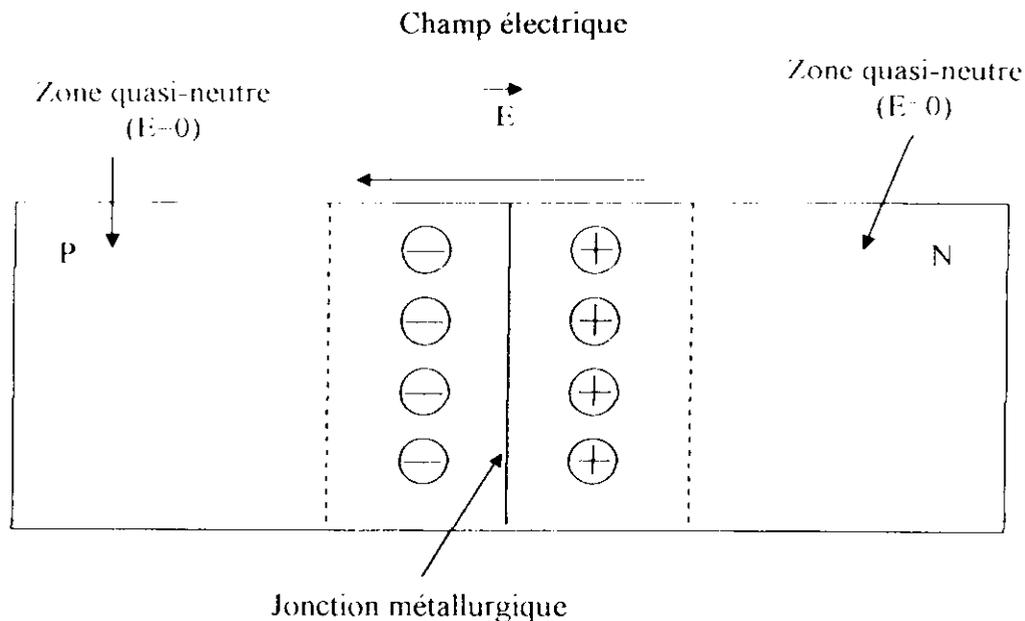


Figure I.5 : Schéma synoptique d'une jonction PN [10].

I.3. Le 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 $T = 5800$ K [12].

Hors atmosphère, l'énergie moyenne 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, alors 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 pas 1000 W/m^2 , avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère [12].

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans les conditions normales ($P=1013 \text{ mbar}$ et $T = 0^\circ\text{C}$), 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 divers gaz comme l'azote (couche de 6150 m), l'oxygène (1650m), l'argon (75m), le gaz carbonique (24m), etc. [12].

L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètres pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide [12].

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs photovoltaïques [12].



Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur de l'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 [12].

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 [12].

Ainsi, les conditions standard de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de 1000 W/m^2 et une température de 25°C ; sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et les spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné [12].

Signalons qu'en dehors de l'influence de l'atmosphère, le flux solaire reçu sur une surface dépend de :

- L'orientation et l'inclinaison de la surface ;
- La latitude du lieu et son degré de pollution ;
- La période de l'année ;
- L'instant considéré dans la journée ;
- La nature des couches nuageuse [12].

1.4. 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 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 [8].

Certaines cellules photovoltaïques utilisent d'autres types de matériaux semi-conducteurs comme : le silicium multi cristallin et amorphe, l'arséniure de Gallium ou un matériau de couches minces qui produisent des porteurs de charge (électron, trou) en absorbant des photons [8].

1.4.1. Effet photovoltaïque et jonction PN

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homo jonctions PN), ou de deux matériaux différents (hétéro structure) [8].

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui le 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 et un trou libres de circuler dans le matériau [8]. Sous l'effet du champ électrique, l'électron va du côté N et le trou du côté P [11]. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron. La figure (1.6) illustre le principe de conversion [8].

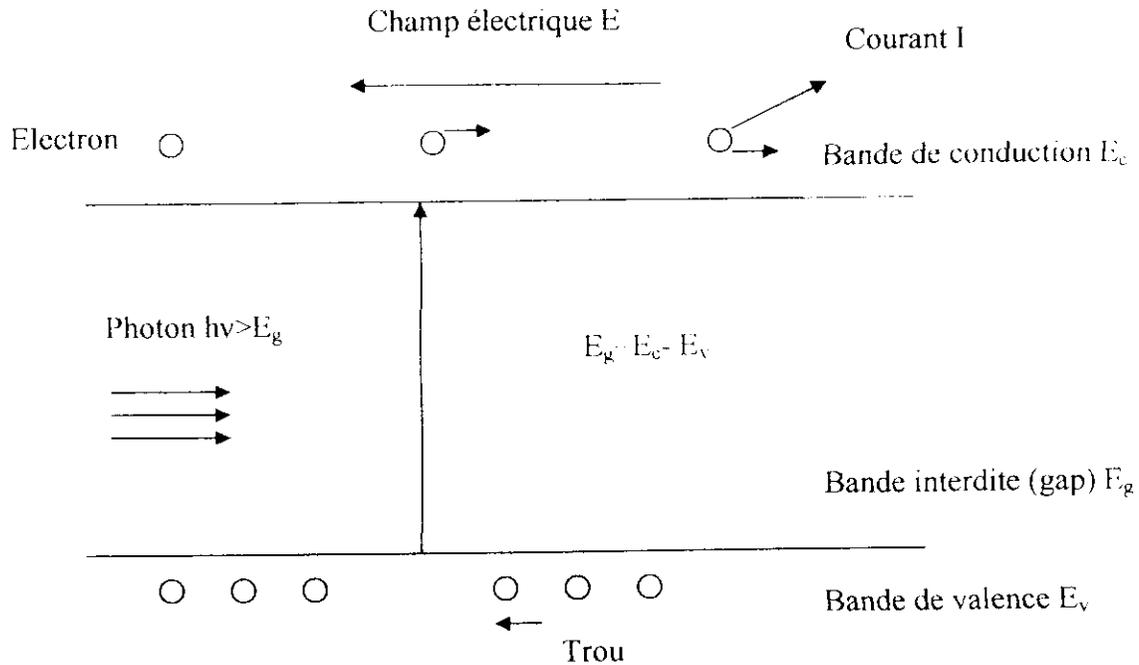


Figure I.6 : Principe de conversion d'une cellule photovoltaïque.

1.4.2. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (1.7), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairage et température ambiants).

La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points importants qui sont :

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

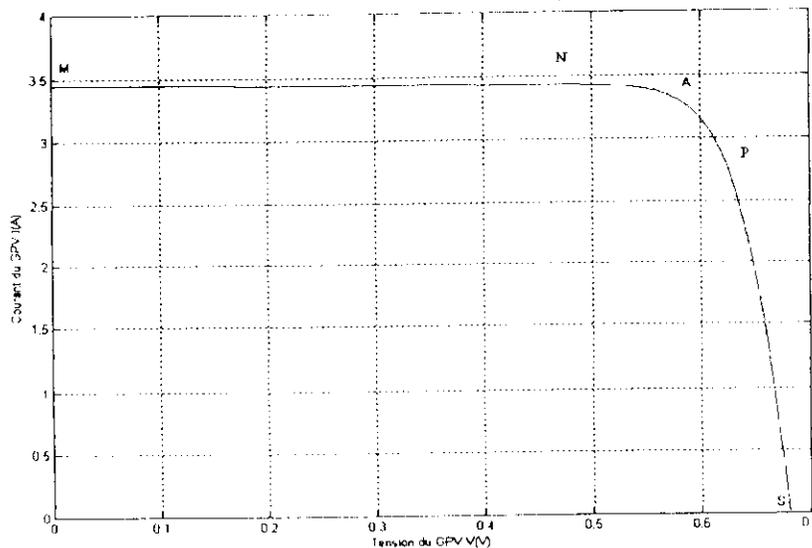


Figure I.7 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

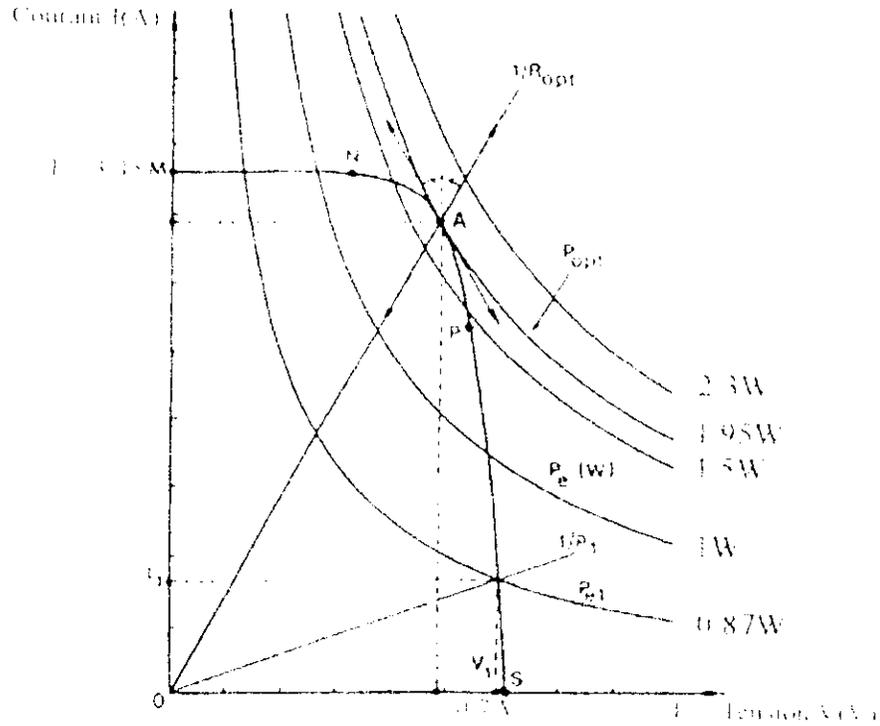


Figure 1.8 a : Courbe d'équipuissance et droite de charge.

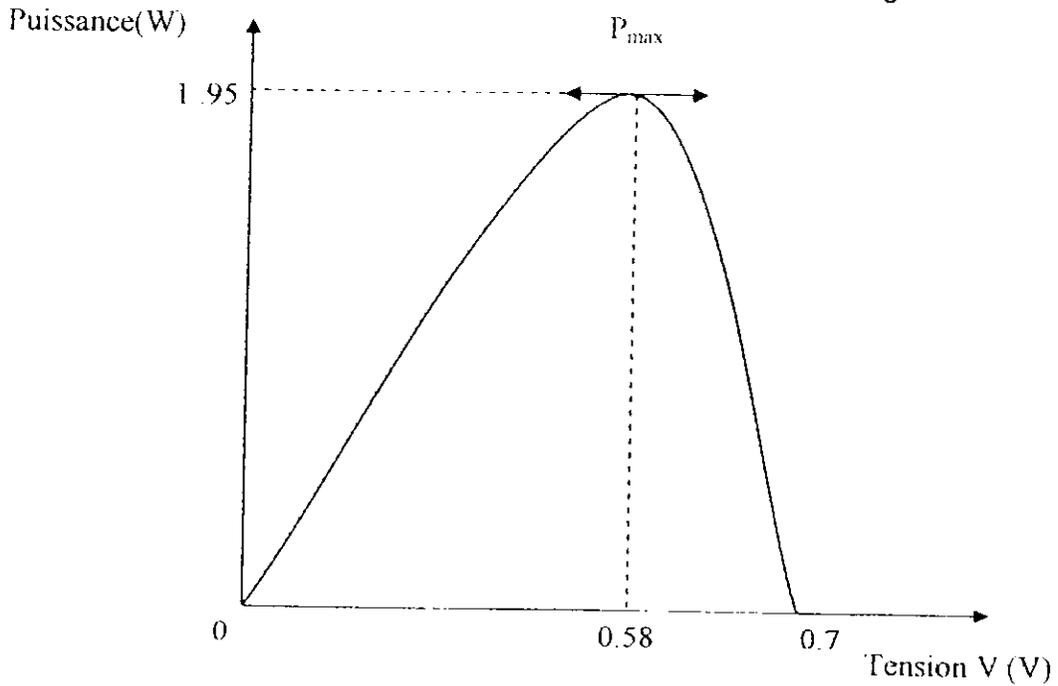


Figure 1.8 b : Courbe caractéristique $P=f(V)$.

La figure (1.7) montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

En effet, sa caractéristique se divise en trois parties :

- la zone MN où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement ;
- la zone PS où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ;
- la zone NP où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

1.4.3. 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 ($V=0$) [8].

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

Où : I_{cc} : courant de court-circuit.

I_{ph} : courant photogénéré par le générateur solaire sous éclairement.

I_{sat} : courant de saturation.

R_s : résistance série du générateur solaire.

R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire.

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 (1.7)). 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 :

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

Où : C: constante.

Φ : flux solaire.

1.4.4. Tension de circuit-ouvert

Dans le cas du circuit-ouvert (point S de la figure (1.7)), 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 :

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

La tension de circuit-ouvert V_{co} correspond, en fait, à la chute de tension dans la jonction PN, lorsqu'elle est traversée par le photocourant I_{ph} [11].

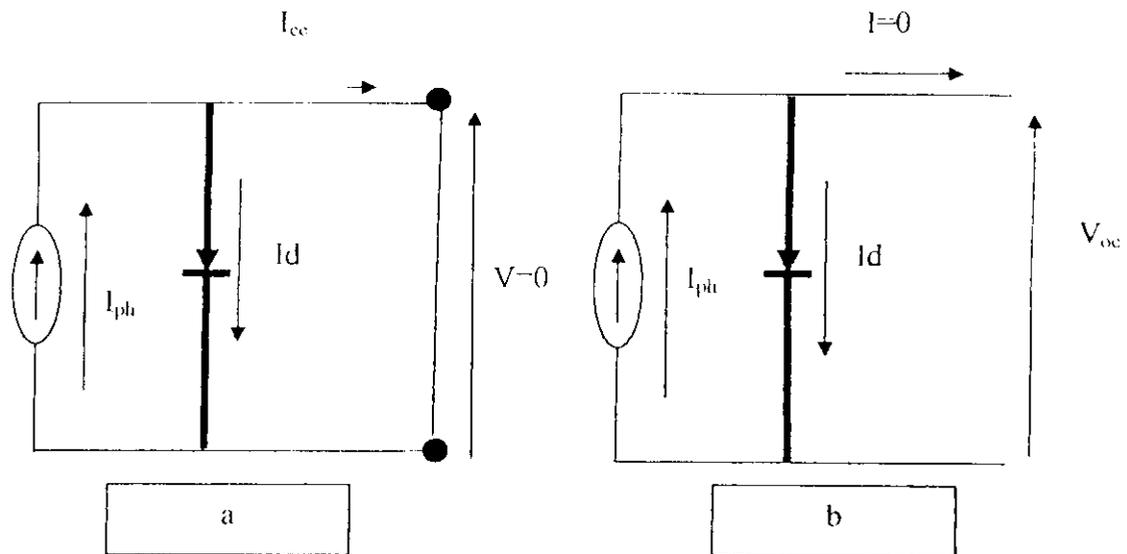


Figure 1.9 : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque
 a. dans le cas du court-circuit.
 b. dans le cas du circuit-ouvert.

1.4.5. 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 de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec celle de la charge (figure 1.8.a) [8].

La caractéristique d'une charge résistive est une droite de pente égale 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 maximale 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 (1.7). C'est la région où la cellule se comporte comme une source de courant presque égale au courant de court-circuit [8].

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 [8].

1.4.6. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- La résistance série R_s ;
- La résistance shunt R_{sh} ;

- Le courant de saturation I_{sat} ;
- Le flux Φ ;
- La température T [8].

Pour un flux Φ égale 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 [8].

a-Influence de la résistance série

D'une valeur généralement très petite, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension (figure (I.10)). Elle ne modifie pas la tension de circuit-ouvert [8].

Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit [8].

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 collectrice [8].

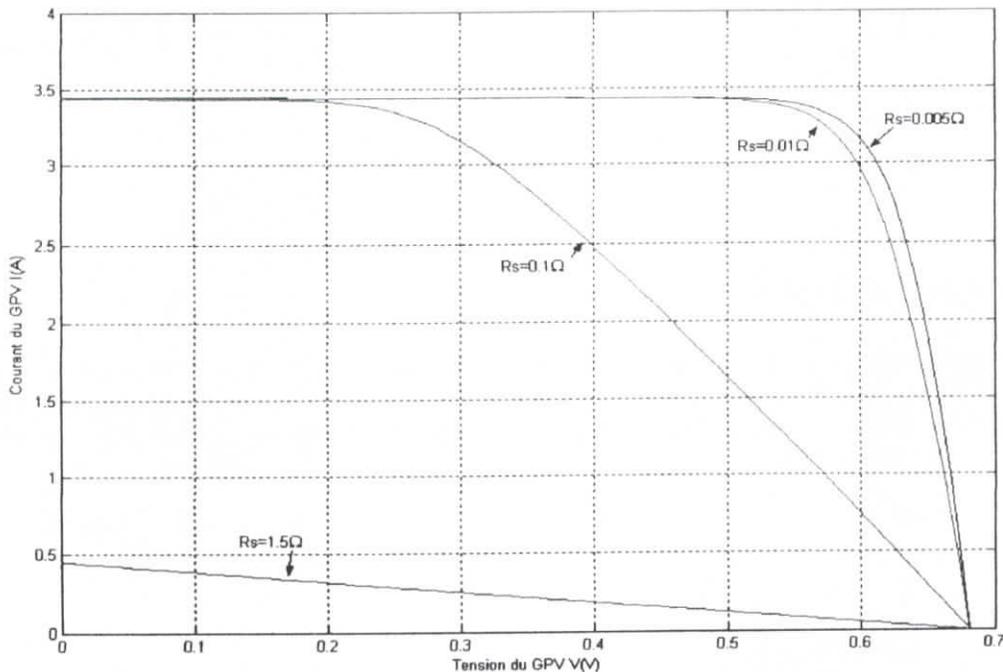


Figure I.10 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

b-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 la diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée [8].

La résistance shunt est en général très élevée. Si elle diminue on remarque une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule photovoltaïque (figure (I.11)) [8].

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit-ouvert de la cellule : en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement [8].

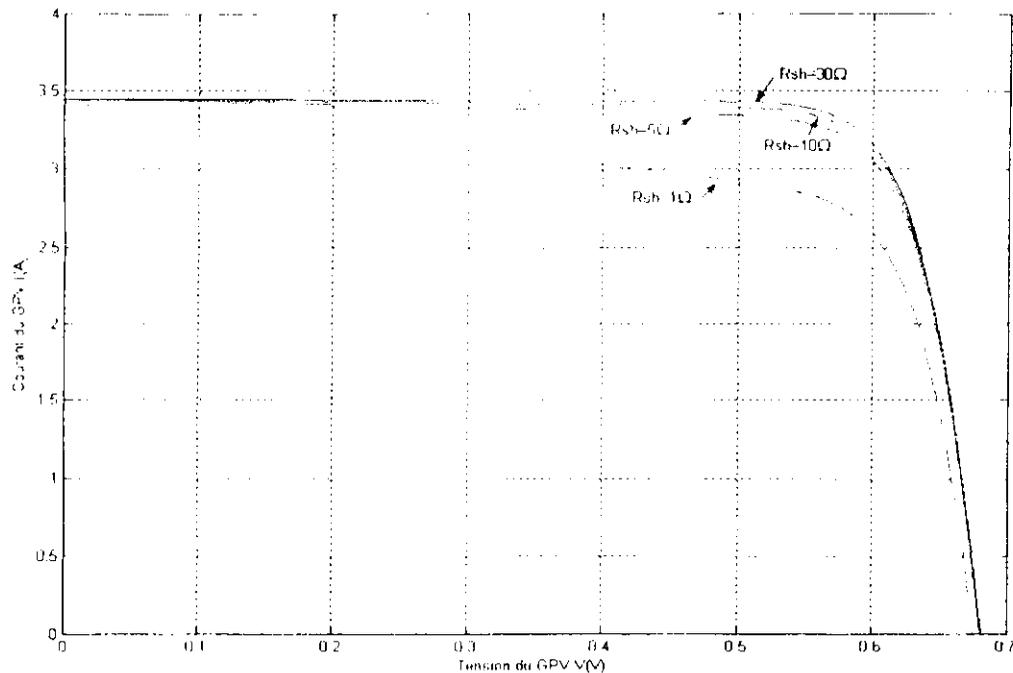


Figure I.11 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

c-Influence du flux

Les fabricants 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, à la variation de la même caractéristique en fonction de la température à éclairement constant [8].

La figure (I.12) représente la caractéristique $I = f(V)$ tracée pour différentes 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/cm^2 pour une cellule réalisée en silicium monocristallin sous un flux égal à 1 kW/m^2 et à une température de 25°C .
- La tension de circuit-ouvert augmente lentement avec l'augmentation du flux. Elle ne dépend pas de la surface éclairée mais seulement du matériau utilisé. Sa valeur est de l'ordre de 700 mV sous un flux d' 1 kW/m^2 et une température de 25°C pour une cellule en silicium monocristallin.
- La puissance optimale du module photovoltaïque est proportionnelle au flux [8].

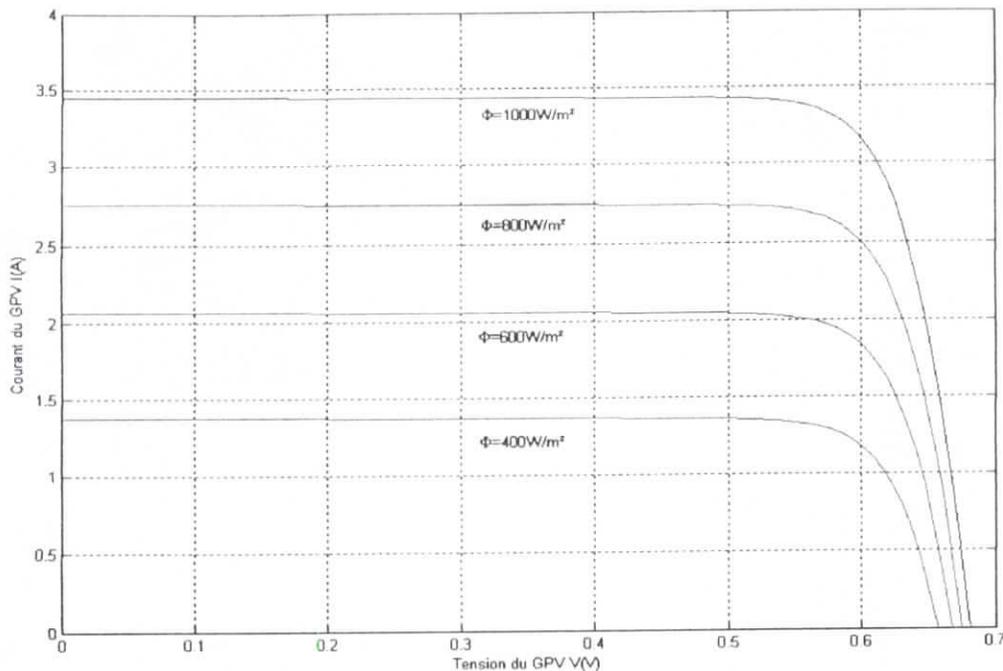


Figure I.12: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

d- 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 un flux d'1 kW/m² n'en transforme en électricité que 12% au plus, le reste étant réfléchi (6 à 8%) ou dissipé en chaleur (80 à 82%) [8].

Si la cellule photovoltaïque n'est pas correctement ventilée, sa température peut monter très haut et ses performances électriques peuvent, par conséquent, se dégrader [8]. La figure (I.13) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [8].

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 $\mu\text{A}/\text{cm}^2\text{K}$, soit une variation de + 0.1% par K [8].

En même temps, on constate une augmentation notable du courant de saturation de la diode puisque :

$$I_{sat} = A_0 T^3 e^{\frac{E_g}{k_B T}} \quad (1.6) \quad [8]$$

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) [8].

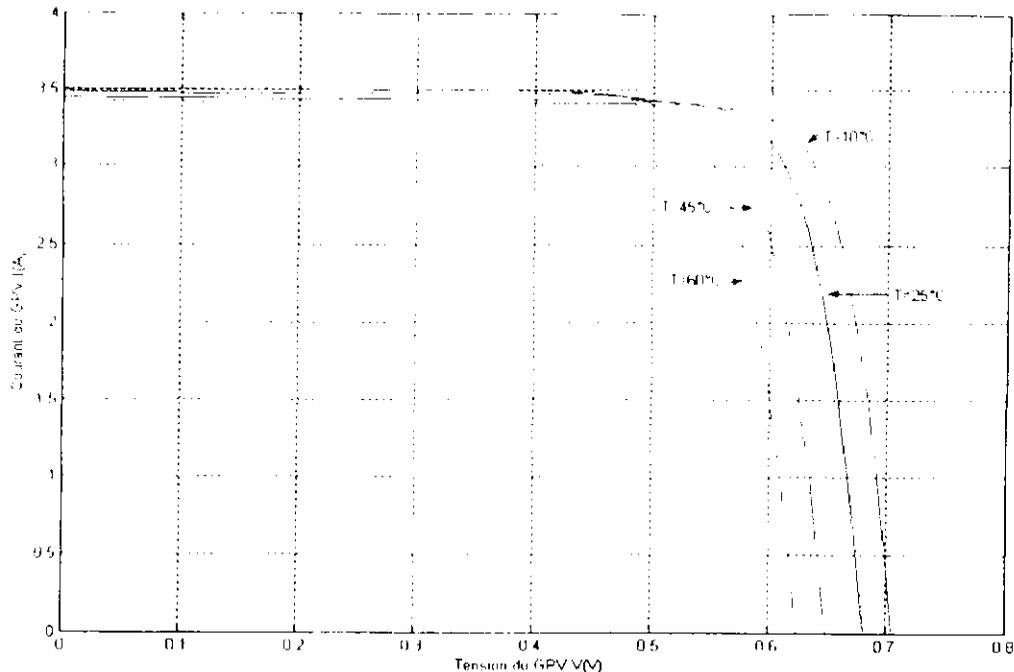


Figure I.13 : Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

1.5. Modules photovoltaïques

La tension générée par une cellule étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer en série plusieurs cellules [10]. Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module [10].

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux rôles principaux [10] :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière, etc.).
- Contrôle de la température des cellules permettant une bonne dissipation de l'énergie incidente qui est transformée en chaleur et non en énergie électrique.

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. Les propriétés des modules photovoltaïques englobent deux grandeurs caractéristiques qui sont [8] :

a- La puissance de crête

C'est la puissance électrique qu'il peut fournir si sa charge est optimale et s'il est soumis à une irradiance de 1000W/m^2 , alors que la température des cellules est de 25°C . Elle s'exprime en Watt-crête (Wc) [8].

b- Le rendement de la conversion

Le rendement de la 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, le flux reçu Φ en W/m^2 , et la surface effective de la cellule S en m^2 [8].

Le rendement réel d'une cellule photovoltaïque fabriquée en silicium monocristallin varie entre (12 à 14%), et 11% pour une cellule en silicium polycristallin [8].

1.6. Générateur photovoltaïque

Actuellement, la valeur de la puissance d'un module va de quelques Watt crêtes à quelques dizaines de Watt crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle des modules formant ainsi le générateur ou panneau photovoltaïque [10].

Un générateur photovoltaïque est donc constitué de cellules associées électriquement entre elles. En général, ces cellules ne sont pas identiques (connaître la caractéristique de chaque cellule individuellement peut s'avérer être un problème de calcul très complexe), mais pour la détermination de la caractéristique (I-V) de l'ensemble, on considère que toutes les cellules, d'un même générateur, sont identiques et travaillent dans les mêmes conditions de température et d'éclairement [10].

Les chutes de tension dans les conducteurs qui assurent l'interconnexion des cellules sont négligeables [10].

En se basant sur ces suppositions, la caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur est obtenue directement de celle des cellules en considérant que [10] :

$$I_G = n_p I$$

$$V_G = n_s V$$

Où :

I_G et V_G sont le courant et la tension du générateur ;

n_p et n_s sont le nombre de cellules associées en parallèle et en série.

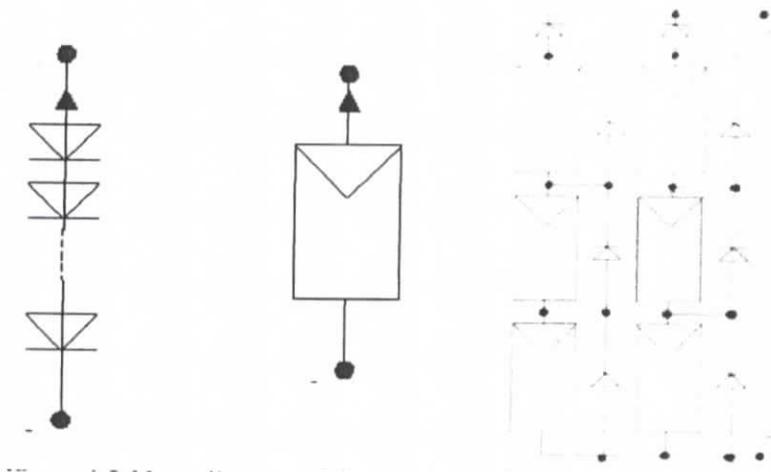


Figure I.14 : cellule, module et panneau photovoltaïque.

Dans ce travail, on a associé en série 36 cellules photovoltaïques de 0.68V obtenant ainsi un module d'une tension de 24.48V. On a associé par la suite 9 modules en série et 4 en parallèle pour avoir un panneau solaire de 220 V.

I.6.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

a- Différents modèles du générateur photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles du générateur photovoltaïque, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension (I-V) pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques [8].

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

On distingue, à titre d'exemple, les modèles suivants :

- Modèle à deux paramètres,
- Modèle à cinq paramètres,
- Modèle d'Appelbaum,
- Modèle d'Akbaba,
- Modèle à deux exponentielles,
- Modèle à quatre paramètres [8].

Ces différents modèles du générateur photovoltaïque ont été comparés. Leur validité a été étudiée pour différents éclairagements et températures en concluant que le modèle à cinq paramètres est le plus précis. Suite à cette étude (Magister ENP 2003 [13]), on a choisi pour notre travail le modèle à cinq paramètres.

b- 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 représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [12]. Le modèle inclut également une résistance shunt R_{sh} qui caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction [12]. Le circuit équivalent est représenté dans la figure (I.15).

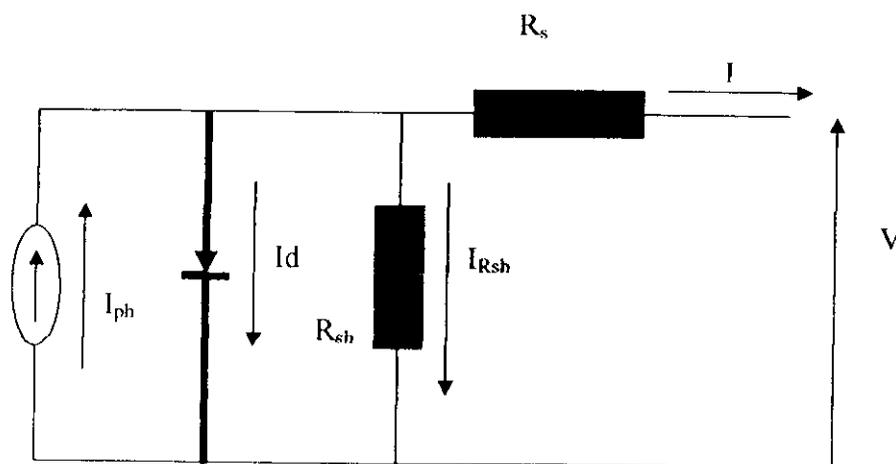


Figure I.15 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque selon le modèle à cinq paramètres.

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

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rsh} \quad (1.8)$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+n_s I R_s)}{m k n_s T}} - 1 \right] \quad (1.9)$$

Avec:

$$I_0 = K_1 T^3 e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (1.10)$$

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

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

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

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+n_s I R_s)}{m k n_s T}} - 1 \right] - \frac{V + I n_s R_s}{n_s R_{sh}} \quad (1.12)$$

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

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

1.6.2. Simulation du générateur photovoltaïque

Nous avons simulé le modèle à cinq paramètres du générateur photovoltaïque avec le logiciel SIMULINK (MATLAB 6.5).

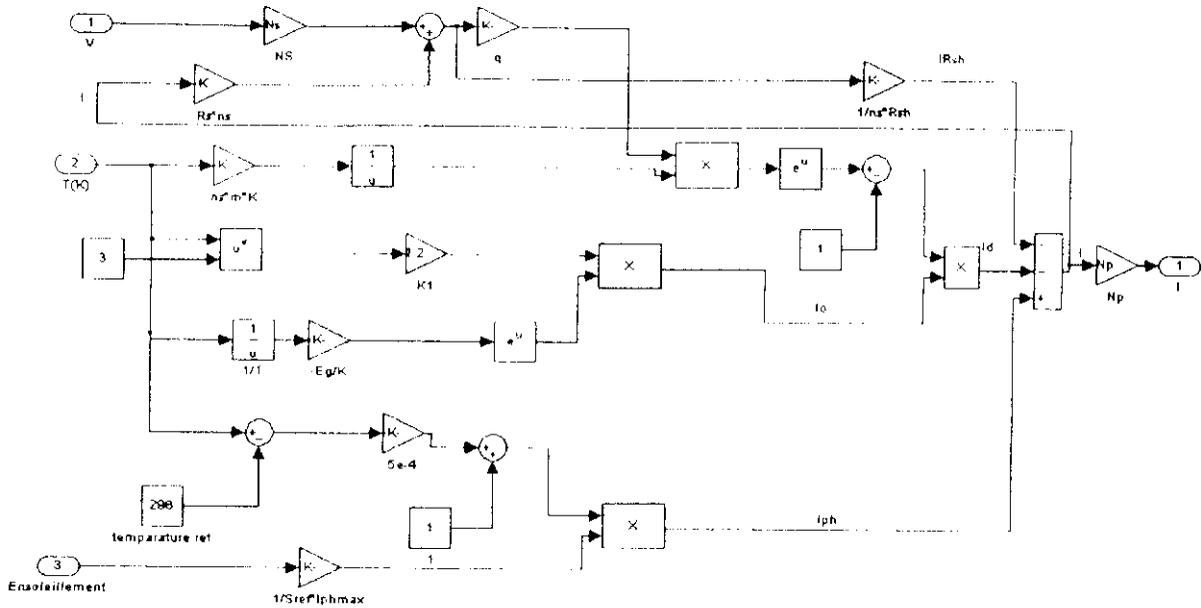


Figure I.16 : Schéma de simulation du générateur photovoltaïque.

I.6.3. Caractéristique I=f (V)

Nous avons connecté plusieurs modules en série et en parallèle afin d'augmenter la puissance. La courbe caractéristique I=f (V) du générateur photovoltaïque a été obtenue en effectuant la simulation selon le modèle mathématique établi précédemment. Elle est représentée par la figure (I.17) [8].

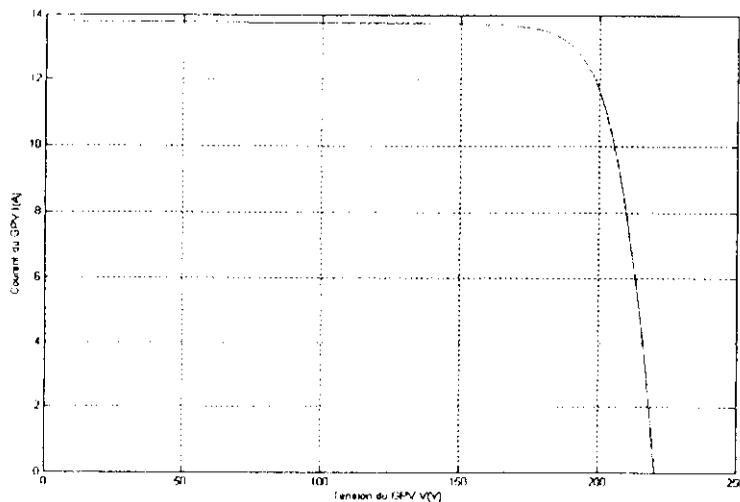


Figure I.17 : Caractéristique I=f (V) du générateur Photovoltaïque à T=25°C et Φ=1000W/m².

I.6.4. Influence des paramètres

a- Influence du flux

En faisant varier le paramètre flux solaire Φ entre 1000 et 400 W/m², nous obtenons la caractéristique $I=f(V)$ représentée par la figure (I.18).

D'après cette courbe, nous constatons que lorsque le flux diminue le courant de court-circuit diminue, la tension de circuit-ouvert reste relativement constante et le point de puissance maximale diminue.

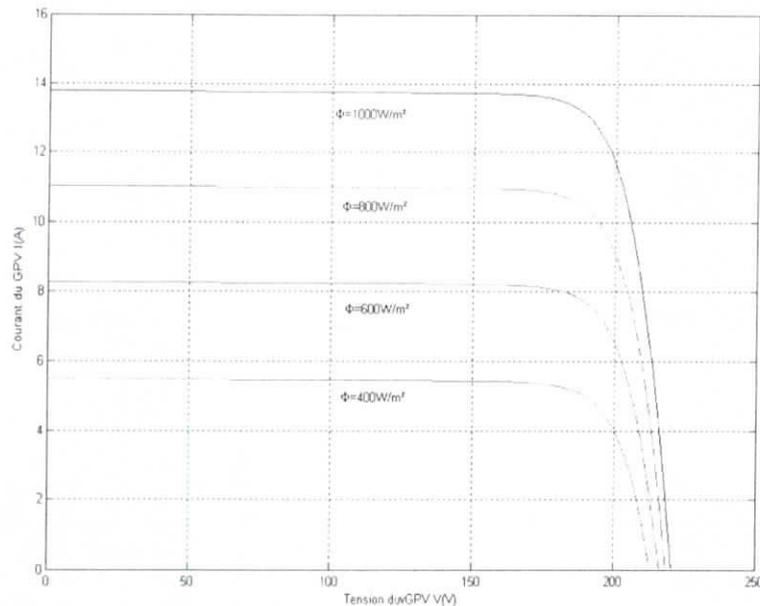


Figure I.18 : Influence du flux solaire Φ sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque, avec $T=25^{\circ}\text{C}$.

b- Influence de la température

En faisant varier le paramètre température entre 0 et 60°C, nous obtenons la caractéristique $I=f(V)$ représentée par la figure (I.19).

D'après les résultats de la simulation, nous remarquons que lorsque la température T augmente, la tension de circuit-ouvert diminue, le courant de court-circuit reste pratiquement constant, et le point de puissance maximale diminue par conséquent.

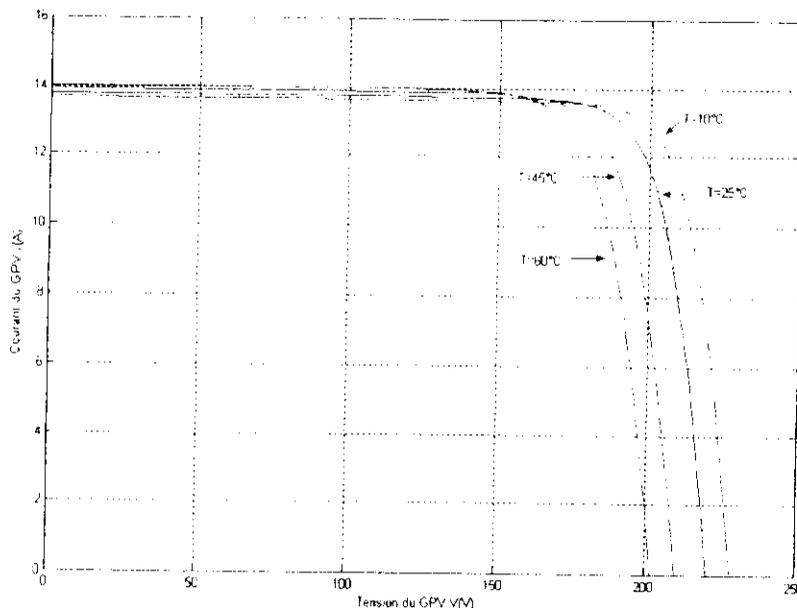


Figure I.19 : Influence de la température T sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque avec $\Phi = 1000 \text{ W/m}^2$.

c- Influence de la résistance shunt

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

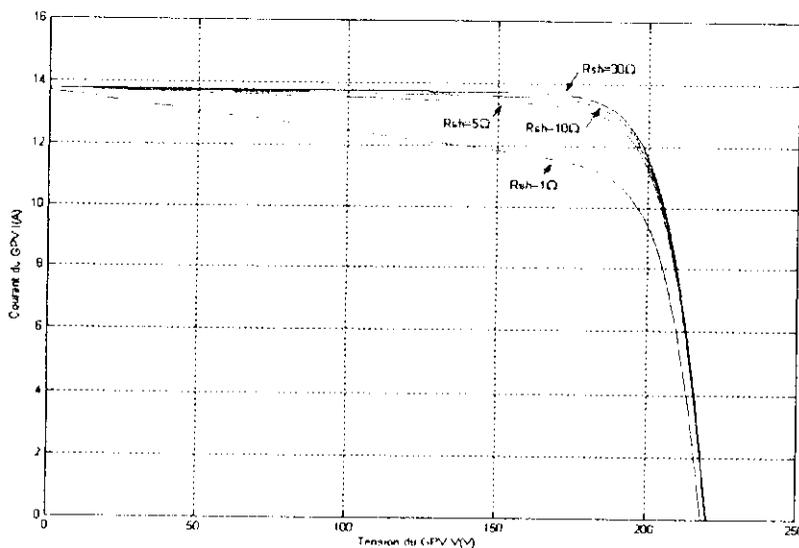


Figure I.20 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

d- Influence de la résistance série

Après la simulation, on remarque que la résistance série influe directement sur la puissance du point de fonctionnement optimal. En effet, l'augmentation de la résistance série fait chuter le point de puissance maximale.

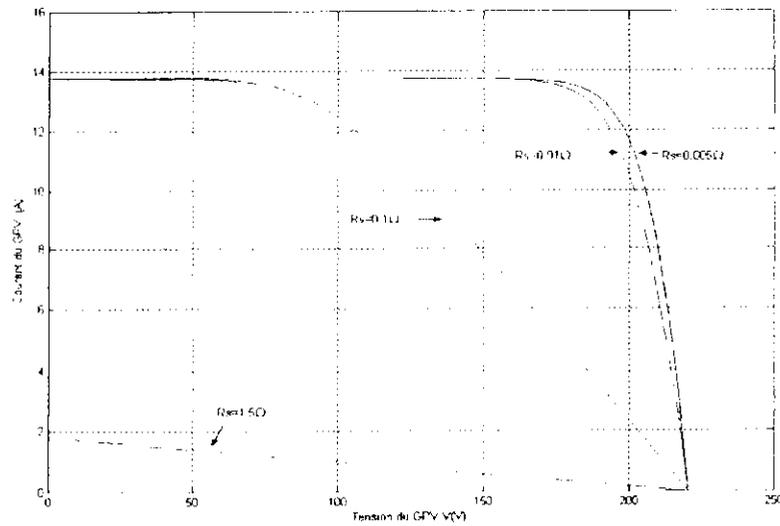


Figure I.21 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

1.7.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 du point de puissance maximale et pour une meilleure simulation du système photovoltaïque.

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION
GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE-HACHEUR MPPT

II.1 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 la température 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 ce soit sur l'aspect dimensionnement, contrôle ou asservissement afin d'éviter l'instabilité du système [8].

Le convertisseur DC-DC étudié est le hacheur parallèle 'survolteur' car il a été démontré que la poursuite du point optimal basée sur la configuration de convertisseur de ce type a un meilleur rendement et donc une utilisation plus efficace des modules solaires que dans le cas des hacheurs dévolteurs [8].

II.2 Hacheur survolteur 'Boost convertter'

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'une part, et pour limiter les ondulations du courant d'autre part [8]. Le schéma équivalent du convertisseur est représenté dans la figure (II.1).

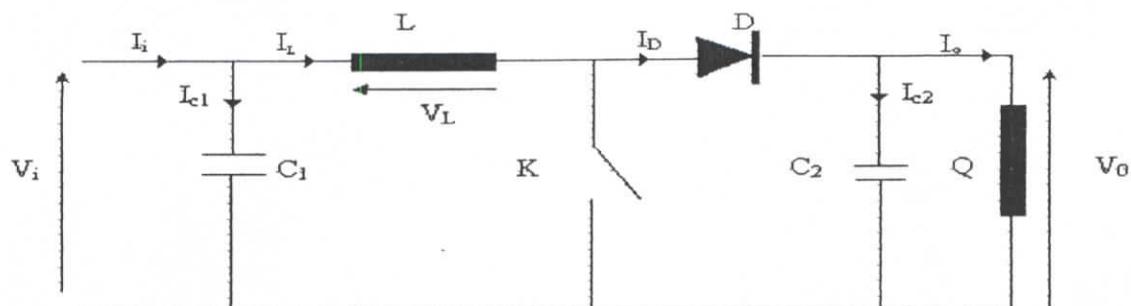


Figure II.1 : Schéma équivalent d'un hacheur survolteur 'Boost'.

- Pendant la fermeture de l'interrupteur K entre $[0, dT]$, le courant traverse l'inductance L et la diode reste bloquée, donc le courant I_D 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.

Par application de la loi de Kirchoff :

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

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \quad (II.1)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (II.2)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (II.3)$$

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

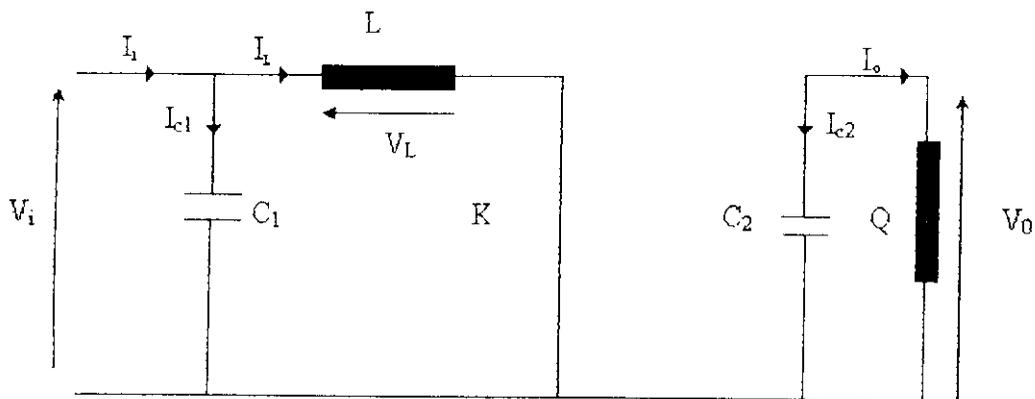


Figure II.2 : Schéma équivalent du hacheur pendant la fermeture de l'interrupteur K.

b) pour $t \in [dT, T]$, K ouvert, on a les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \quad (II.1)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (II.4)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (II.5)$$

La figure II.3 représente le principe de fonctionnement du hacheur pendant l'ouverture de l'interrupteur K c'est-à-dire dans l'intervalle $[dT, T]$.

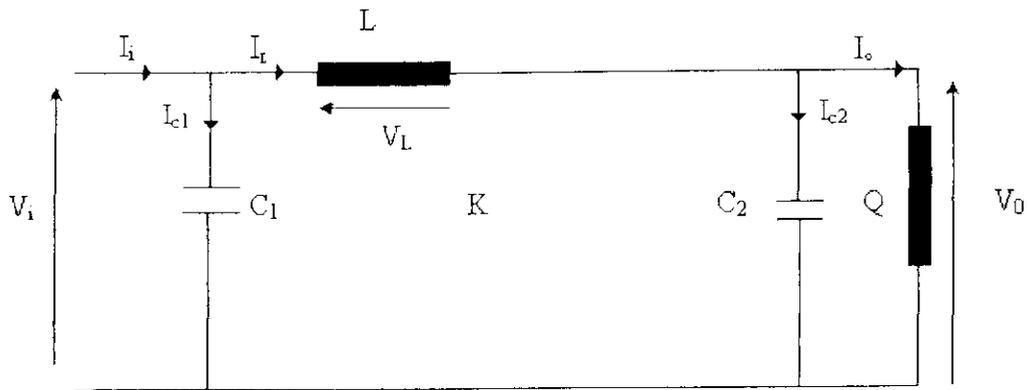


Figure II.3 : Schéma équivalent du hacheur pendant l'ouverture de l'interrupteur K.

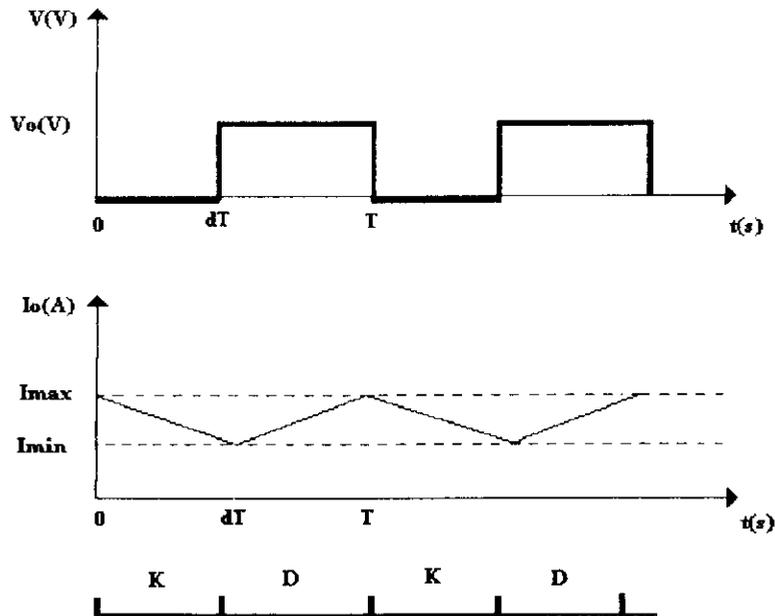


Figure II.4 : Les formes d'ondes de la tension et du courant de sortie.

La tension et le courant moyens de sortie du hacheur ont pour valeur :

$$\bar{V}_0 = \frac{V_i}{1-d} \tag{II.6}$$

$$\bar{I}_0 = I_i(1-d) \tag{II.7}$$

II.3 Conception d'un hacheur Boost

Pour la conception et le calcul des éléments de ce convertisseur (la capacité C_1 et la bobine L), on se base sur l'équation suivante [8] :

$$L = \frac{V_d I'}{N} \quad (II.8)$$

Une solution est choisie pour rendre le courant, que le générateur débite, sensiblement constant ; elle consiste en l'utilisation d'un filtre. Le filtre à réaliser doit être de telle façon que : $LC_1 \omega^2 \geq 1$.

D'où :

$$C_1 = \frac{1}{L \omega^2} \quad (II.9)$$

II.4 Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimal

Plusieurs algorithmes de poursuite du point de puissance maximale « 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 maximale (MPP) [8].

Les méthodes les plus importantes sont les suivantes :

- La méthode de la dérivée de la puissance,
- La méthode de comparaison de phase,
- La méthode de la cellule pilote,
- La méthode 'perturber et observer' [8].

On a choisi d'appliquer la méthode dite « perturber et observer » sur le hacheur.

C'est l'algorithme de tracking le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur V_{ref} en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [20]. De cette façon, le système de poursuite du point de puissance maximale cherche continuellement le point de puissance maximale [8].

La figure II.5 donne l'organigramme de cet algorithme.

Dans cet algorithme, la tension V du panneau oscille autour de la tension optimale V_{opt} , ce qui cause une perte de puissance qui dépend du pas de perturbation. Si ce pas est grand le système répond rapidement à des changements brutaux de l'ensoleillement mais on aura une augmentation des pertes d'ondulations, et si le pas de perturbation est faible ces ondulations sont réduites mais le système répond lentement à des changements brutaux des conditions de fonctionnement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [13].

Dans notre travail, on a choisi le pas de variation du rapport cyclique $\Delta d = 0.001$.

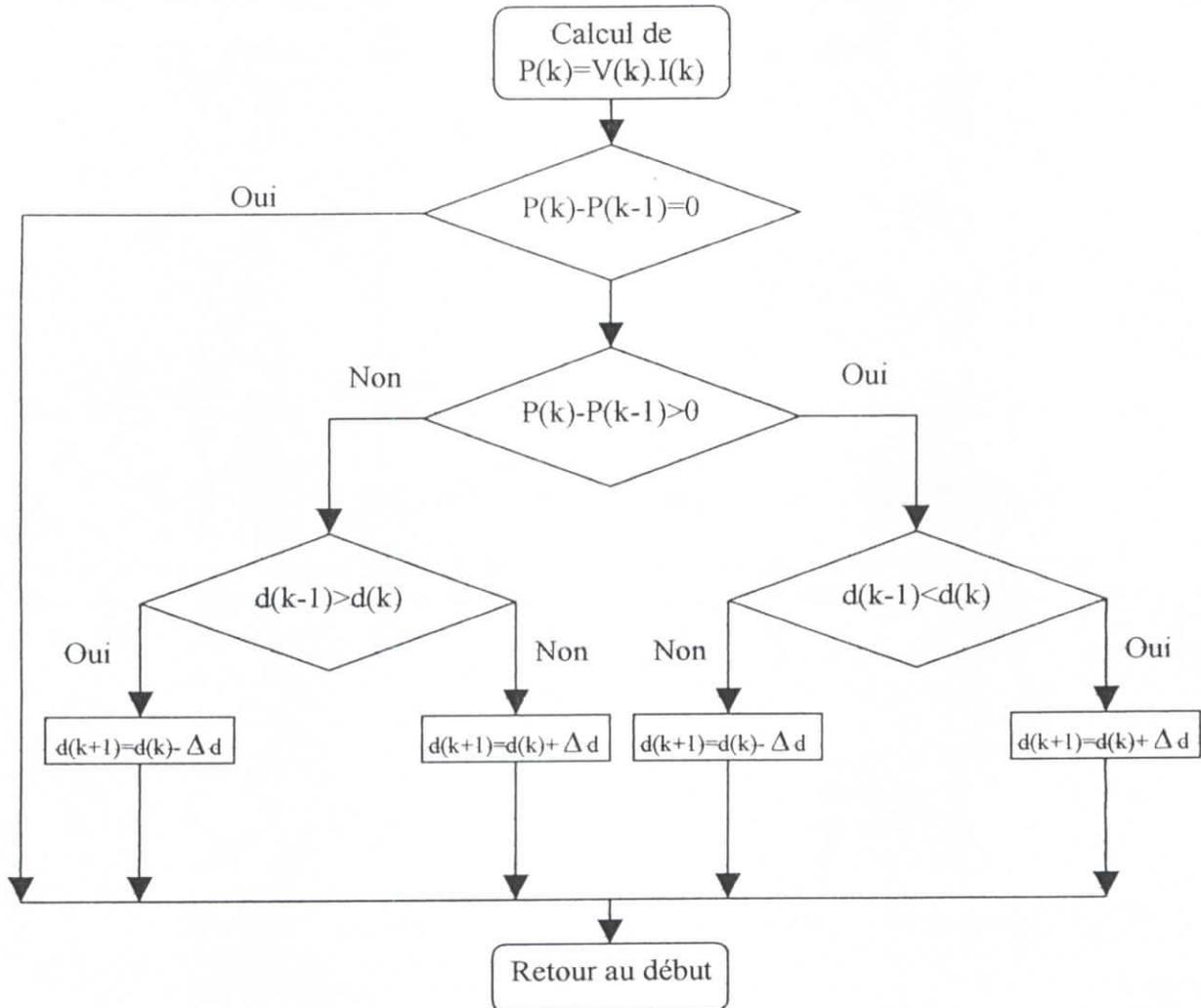


Figure II.5 : L'algorithme de la méthode perturber et observer.

II.5 Simulation de l'association générateur photovoltaïque hacheur

Dans cette simulation, on a fait un assemblage de 36 cellules solaires en série formant ainsi un module puis on a pris 4x9 modules en parallèle constituant notre panneau photovoltaïque qui a les caractéristiques suivantes : $V_{co}=220V$ et $I_{co}=13.8A$ et $P_{max}=2511W$ dans les conditions standards d'ensoleillement et de température $\Phi=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$. Le générateur photovoltaïque ainsi obtenu est directement relié au hacheur survolteur. Dans le but de maximiser la puissance délivrée par le générateur solaire, on optimise sa tension. Cette dernière, imposée par le hacheur, dépend de son rapport cyclique d (relation II.6); il suffit donc de jouer sur d pour avoir la tension correspondant à la puissance maximale. Et c'est justement le système MPPT qui commande directement le rapport cyclique d du hacheur de façon à ce que le générateur photovoltaïque délivre sa puissance maximale.

II.5.1 Simulation d'un hacheur survolteur 'Boost'

Pour construire le modèle de ce hacheur, on subdivise le hacheur sous forme de blocs représentant les différents éléments du circuit équivalent. La figure (II.6) illustre le modèle global.

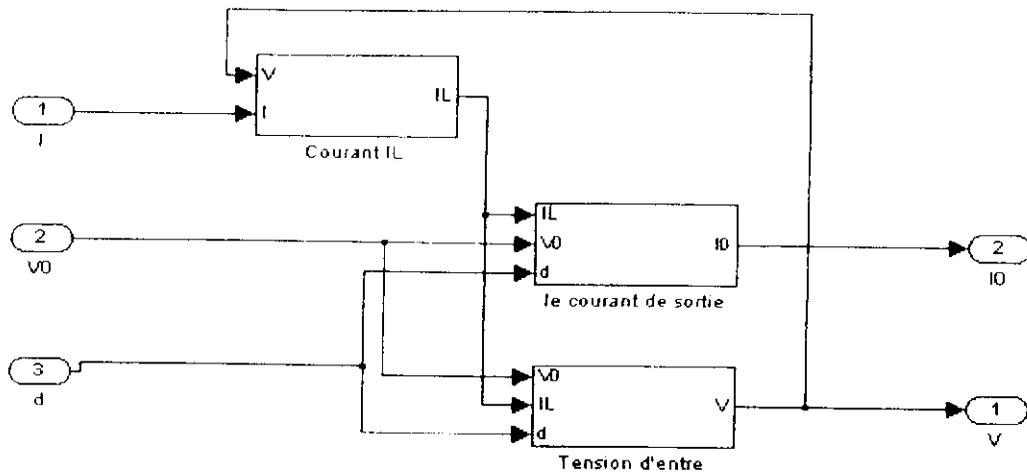


Figure II.6 : Schéma global de la simulation du hacheur.

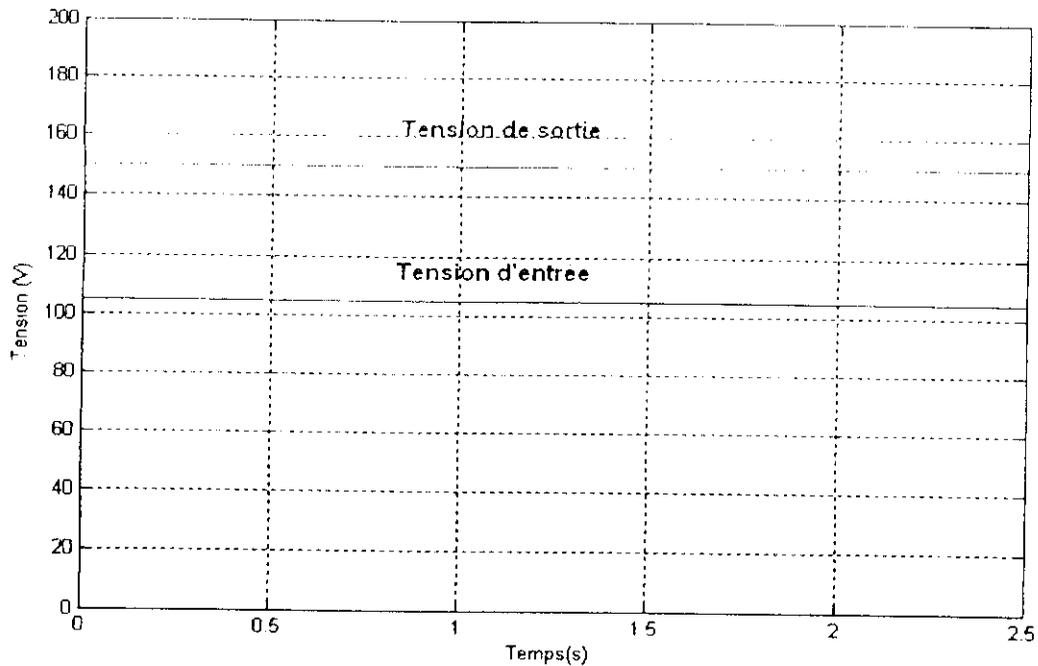


Figure II.7 : Tension de sortie et d'entrée d'un hacheur Boost avec $d=0.3$.

II.5.2 Simulation de la MPPT

La méthode perturber et observer est simulée avec MATLAB (SIMULINK) sous forme de blocs. La figure (II.8) illustre le modèle global.

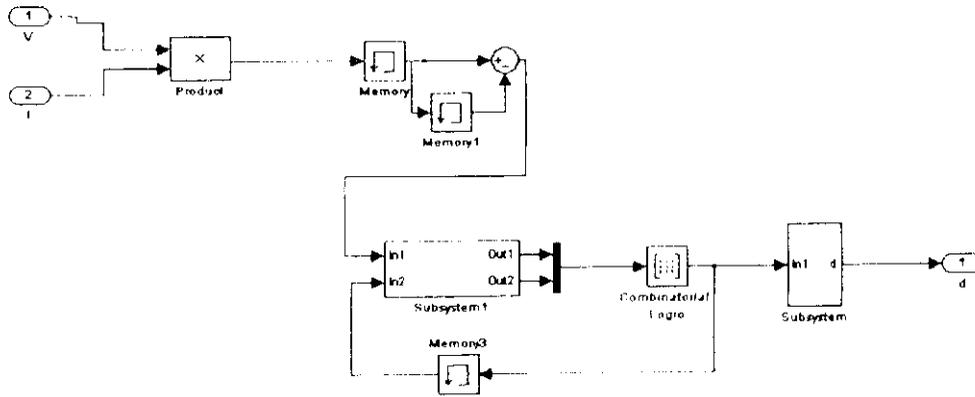


Figure II.8 : schéma global de la MPPT.

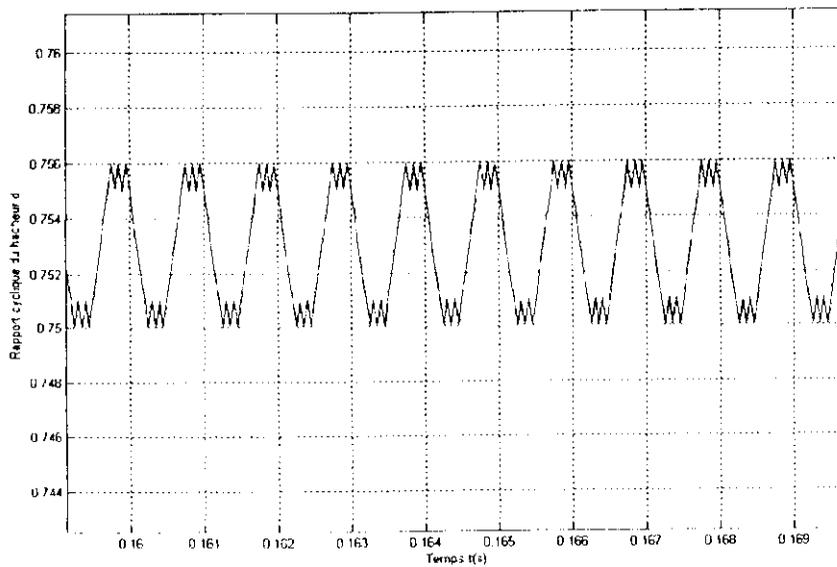
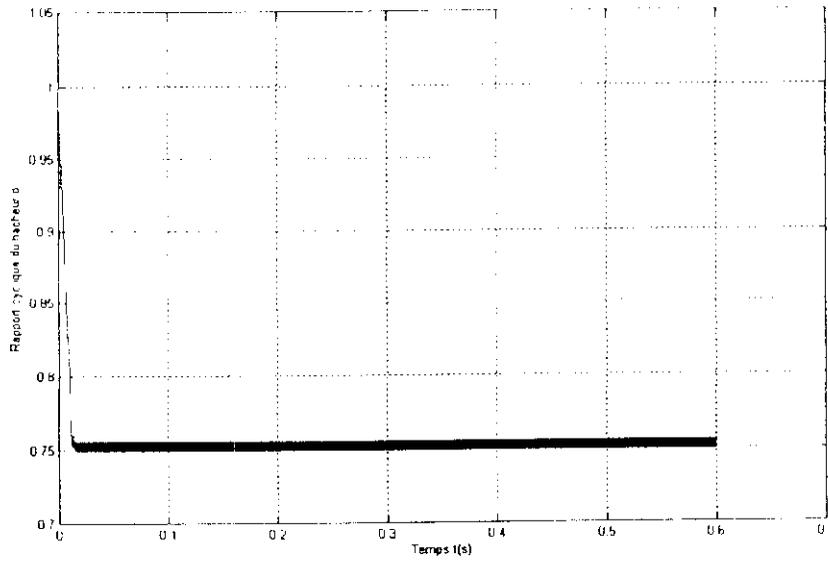


Figure II.9 : Variation du rapport cyclique en fonction du temps.

II.5.3 Résultats de la simulation

Après la simulation de l'ensemble générateur photovoltaïque et hacheur, on obtient les résultats suivants :

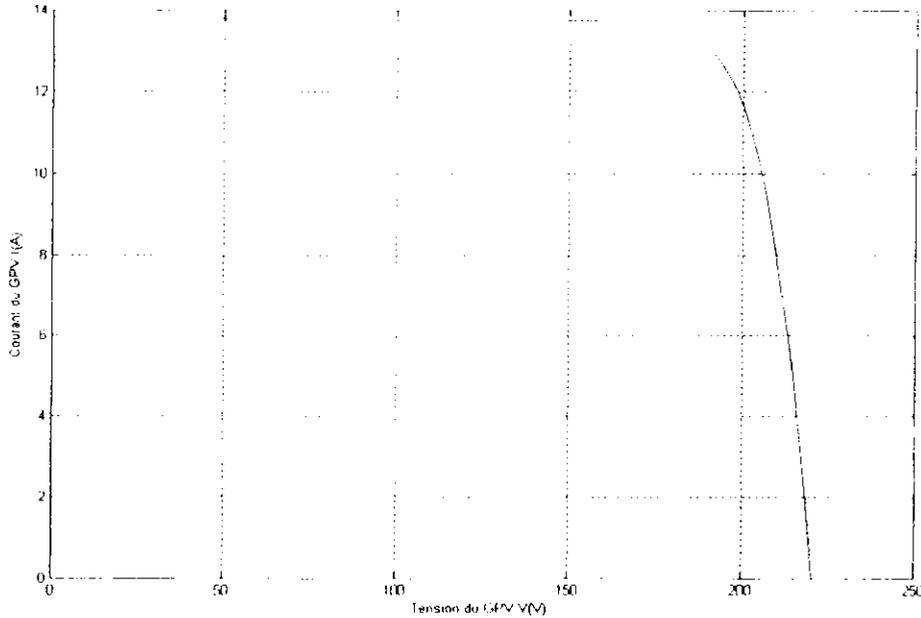


Figure II.10 : La caractéristique I=f (V) du générateur solaire, $\Phi = 1000W/m^2$, $T = 25^\circ C$.

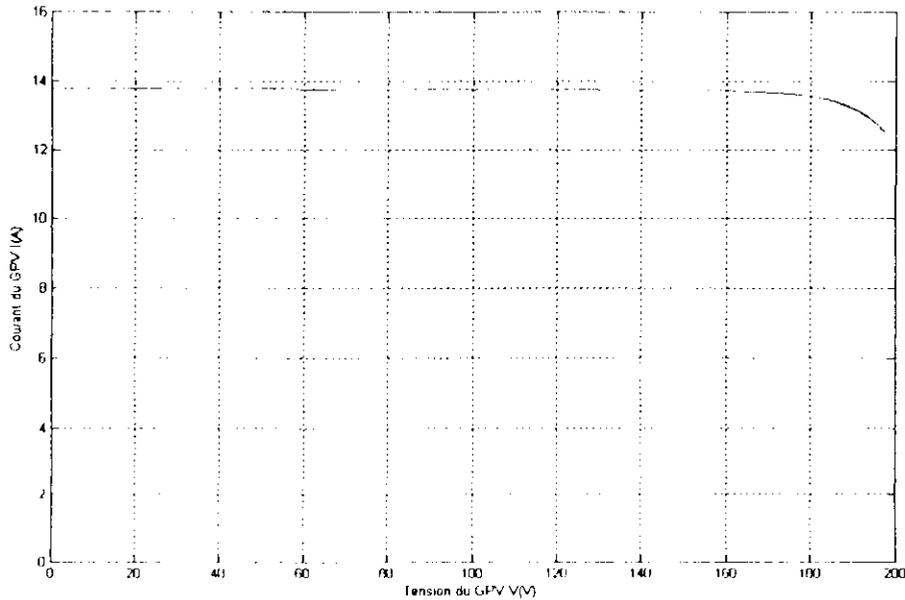


Figure II.11 : La caractéristique I=f (V) de l'ensemble générateur-hacheur après l'intégration de la MPPT.

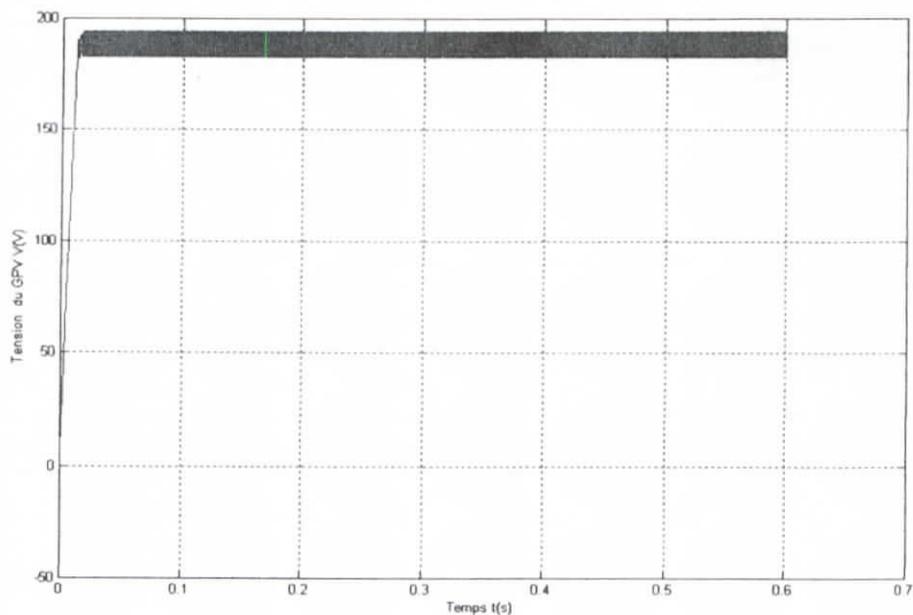


Figure II.12 : Tension optimale du générateur photovoltaïque
 $\Phi = 500\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$.

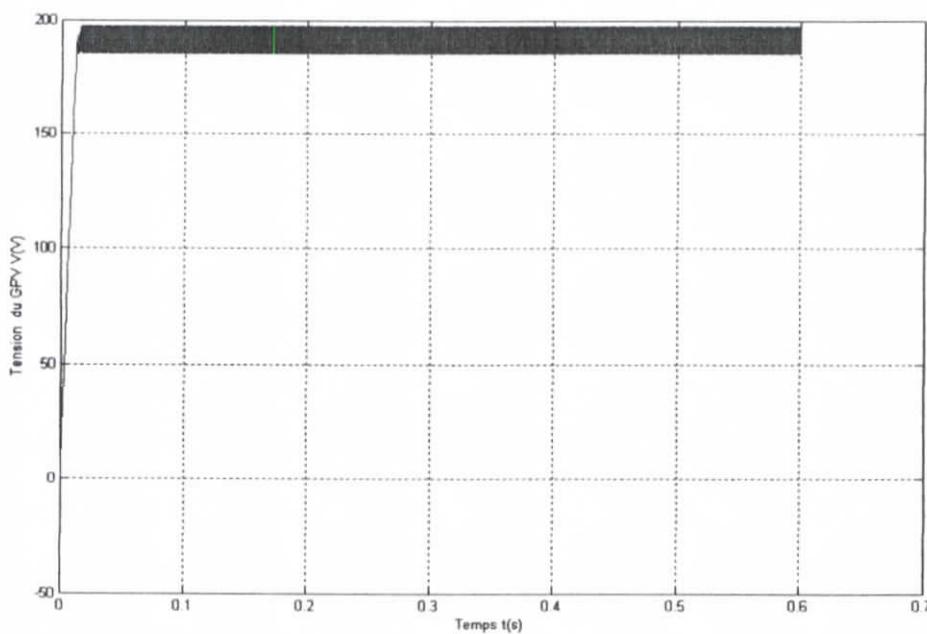


Figure II.13 : Tension optimale du générateur photovoltaïque
 $\Phi = 1000\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$.

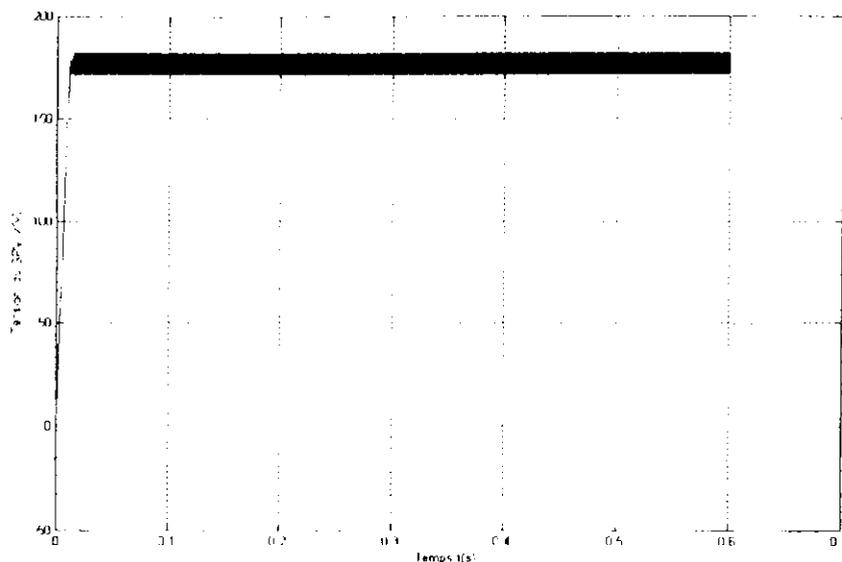


Figure II.14 : Tension optimale du générateur photovoltaïque $\Phi = 500W/m^2$, $T=45^\circ C$.

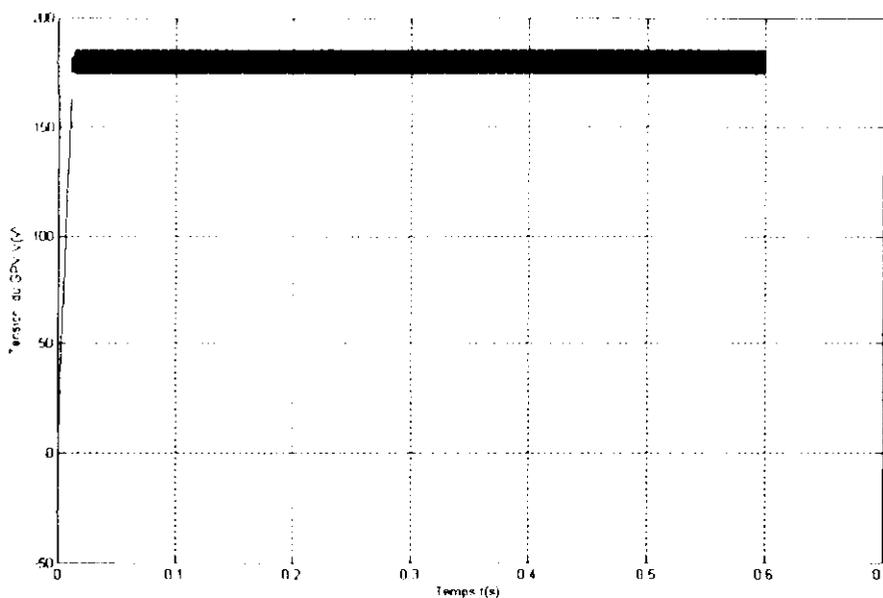


Figure II.15 : Tension optimale du générateur photovoltaïque $\Phi = 1000W/m^2$, $T=45^\circ C$.

II.6 Conclusion

Après avoir étudié les principales caractéristiques du convertisseur Boost, on a effectué la simulation du générateur photovoltaïque intégrant ce convertisseur.

Afin d'obtenir une tension optimale correspondant à une puissance maximale, en tenant compte des variations du flux solaire et de la température, le contrôle continu du rapport cyclique d est indispensable et a été obtenu à l'aide de la MPPT appliquée au hacheur.

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 a le pompage photovoltaïque [8].

Dans ce chapitre, on étudie d'abord la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux, puis la modélisation dans le repère de Park de la machine asynchrone. On étudie aussi le comportement de l'association onduleur-moteur en utilisant la stratégie triangulo-sinusoidale. La simulation est faite sur le logiciel MATLAB (SIMULINK).

III.2.Modélisation et commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux

III.2.1.Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

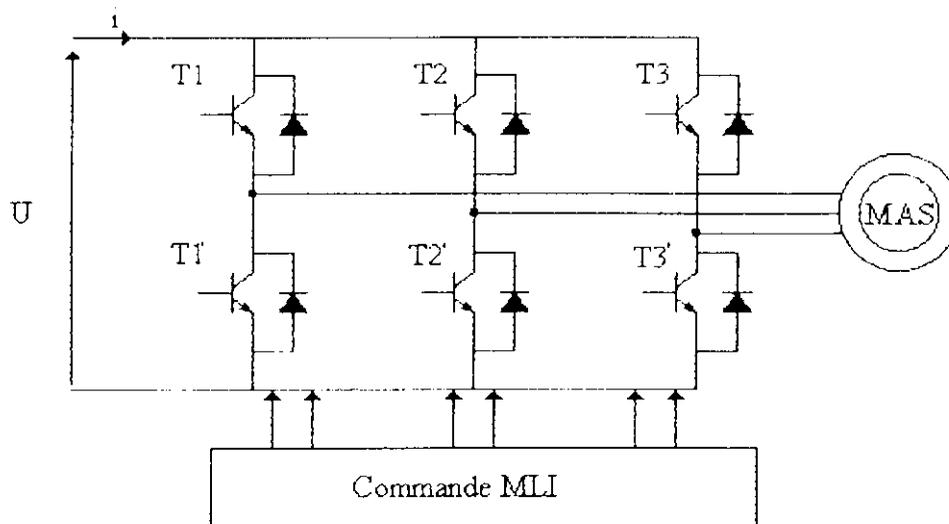


Figure III.1 : Onduleur de tension triphasé.

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, il est composé de six transistors ($T_1, T_2, T_3 ; T_1', T_2', T_3'$) shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ($D_1, D_2, D_3, D_1', D_2', D_3'$) qui permettent de renvoyer le courant négatif vers le condensateur de filtrage mis à l'entrée de l'onduleur (Figure III.1).

La commande des transistors d'un bras est complémentaire. On peut donc remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions K_i qui est la sortie du modulateur MLI (figure III.2).

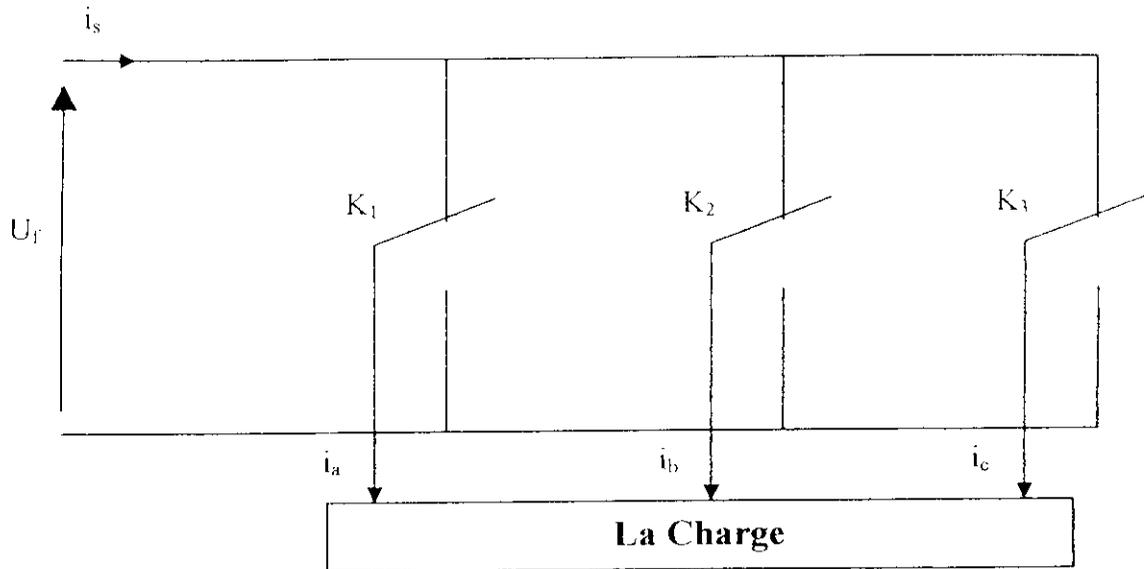


Figure III.2 : Représentation des transistors par des interrupteurs.

On définit les fonctions logiques de connexion K_i 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 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La MLI (ou PWM : Pulse Width Modulation) permet d'obtenir une tension de sortie formée de plusieurs créneaux.

La multiplication des nombres d'impulsions formant chaque alternance présente deux avantages :

- Elle pousse vers les fréquences 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 [8].

Le principe de fonctionnement d'une telle commande est illustré par les instants de commutation des interrupteurs qui sont déterminés par l'intersection du signal de référence appelé modulateur avec un signal triangulaire de haute fréquence appelée porteuse (Figure III.3).

Pour mettre au point une commande à MLI plusieurs techniques sont envisageables. Dans notre cas, nous utilisons la technique appelée **triangulo-sinusoidale**.

Cette stratégie est la plus simple à mettre au point. Elle consiste à comparer directement la porteuse avec le signal de référence. L'intersection du signal de référence avec la porteuse définit les instants de commutation des interrupteurs.

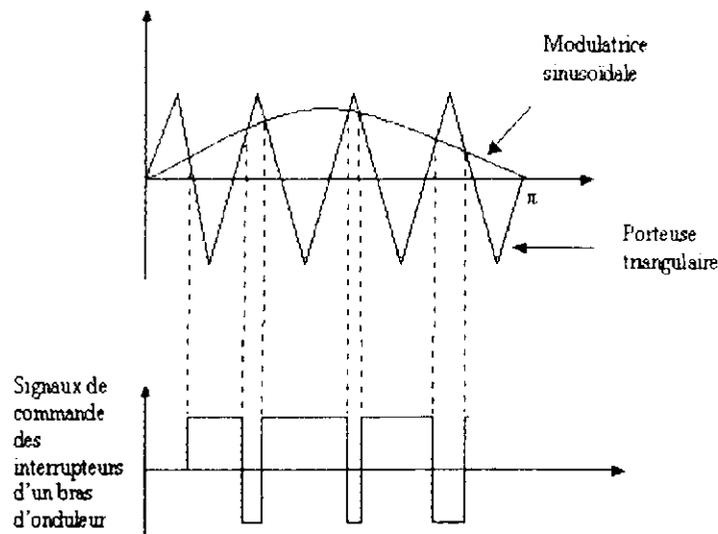


Figure III.3 : principe de la MLI à stratégie triangulo-sinusoidale.

Dans cette technique, on définit les deux paramètres suivants :

- L'**indice de modulation** « m » qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse « f_p » et la fréquence de la référence « f » désirée ;
- Le **taux de modulation** ou le **coefficient de réglage en tension** « r » qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence et de la valeur de crête de l'onde porteuse [8].

Dans notre étude, on a pris $m=21$ et $r=0.8$. Nous obtenons ainsi la tension de sortie de l'onduleur, sa forme est illustrée dans la figure suivante.

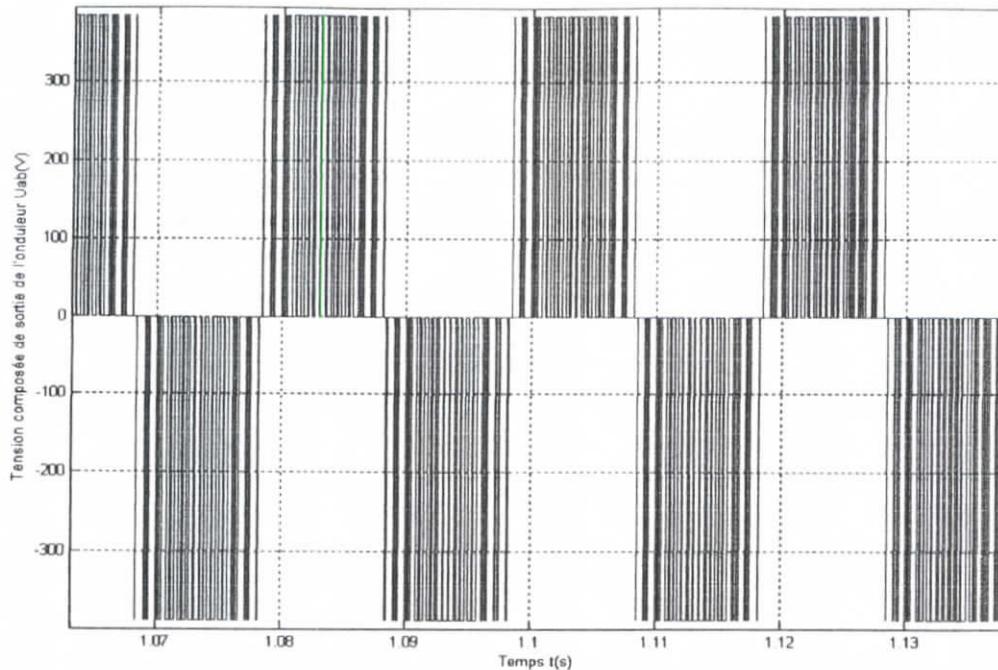


Figure III.4 : Tension composée de sortie de l'onduleur commandé par MLI ($m=21$, $r=0.8$).

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 paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique de valeur égale à $\frac{2\Pi}{3}$.

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

Le champ statorique tourne à la vitesse $\Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$, ω_s étant la pulsation du courant et de la tension statoriques et p le nombre de paire de pôles.

La vitesse mécanique du rotor est notée Ω .

Le rapport $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ 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, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire de poser certaines hypothèses :

- les circuits magnétiques sont non saturés et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont linéaires ;
- la densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires. L'effet de peau est négligé ;
- seulement le premier harmonique d'espace de distribution de la force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor est tenu en compte.
- Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques .

III.3.3.Conventions

La machine est représentée par trois phases statoriques a_s, b_s, c_s et trois phases rotoriques a_r, b_r, c_r [8].

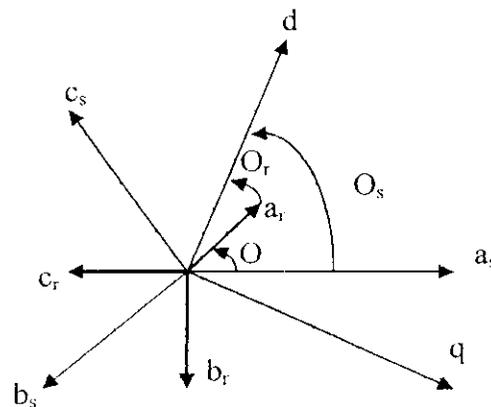


Figure III.6 : Représentation des axes de la machine.

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

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

$$\omega = P\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

III.3.4.Modèle de la machine asynchrone

Compte tenu des hypothèses précédentes, les équations qui décrivent le fonctionnement de la machine sont :

III.3.4.1.Equations électriques de la machine asynchrone

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

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] [I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\ [0] &= [R_r] [I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \end{aligned} \quad (III.6)$$

Les flux sont donnés par:

$$\begin{aligned} [\Phi_s] &= [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\Phi_r] &= [L_{rr}] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{aligned} \quad (III.7)$$

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

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

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

$$[M_{sr}] = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

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

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

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

III.3.4.2. Equation mécanique

Le couple électromagnétique développé s'écrit:

$$C_e = P [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [I_r] \quad (III.12)$$

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

La résolution analytique du modèle dans ce repère n'est pas aisée, car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine). Pour faciliter la résolution, on passe à un système différentiel à coefficients constants au moyen de la transformation de R.H.PARK.

III.3.5. Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents. Ce passage est rendu possible, pour la transformation des grandeurs physiques, par la matrice de PARK $[P(\theta)]$ [8].

$$[P(\theta)] = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

Avec : n_1 et n_2 : nombres fictifs de spires.

On identifie i_0 à la composante homopolaire lorsque les courants $i_{a,b,c}$ sont sinusoïdaux, pour une première détermination des coefficients n_1/n_2 et K_0 [8] :

$$i_0 = \frac{(i_a + i_b + i_c)}{3} = \frac{n_1}{n_2} K_0 (i_a + i_b + i_c) \quad (III.15)$$

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 [8].

$$\begin{aligned} i_a &= I \cos(\omega t) ; & i_b &= I \cos(\omega t - \frac{2\Pi}{3}) ; & i_c &= I \cos(\omega t + \frac{2\Pi}{3}) ; \\ i_d &= I \cos(\omega t - \theta) ; & i_q &= I \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (III.16)$$

Après la transformation triphasée diphasée, on a :

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

$$\text{Finalement, on trouve : } \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ et } K_0 = \frac{1}{2}.$$

$$[P(\theta)] = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

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 [8].

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

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

A partir de cette relation, on démontre que la matrice de passage $[P]$ doit être orthogonale, c'est-à-dire que la condition suivante soit vérifiée : $[P]^t = [P]^{-1}$.

Tel que $[P]$ s'écrit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

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

Dans la repère de PARK (d, q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$, les équations (III.6) s'écrivent :

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

$$\omega = \frac{d}{dt} \theta$$

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

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

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

Avec :

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

III.3.7. Choix du référentiel

- Référentiel lié au stator :

C'est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées [8] :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \frac{d\theta_r}{dt} = - \frac{d\theta}{dt} = - \omega$$

- **Référentiel lié au rotor :**

Dans ce repère : $\theta_s = \theta$, donc :

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

- **Référentiel lié au champ tournant :**

Dans ce cas, la vitesse ω_s est la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme ω_{syn}). Les équations relatives au modèle de la machine asynchrone, dans ce repère, sont données par:

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

Avec :

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

Dans notre étude, on a choisi le référentiel lié au champ tournant.

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

La représentation du modèle non linéaire de la machine asynchrone sous forme d'équations d'état électrique est :

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

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

Avec :

X : vecteur d'état.

Y : vecteur de sortie.

U : vecteur d'entrée.

On peut choisir différents vecteurs d'état X.

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

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_c - C_r - K_f\Omega) \end{cases} \quad (III.23)$$

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

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & -R_s & 0 \\ -\omega_s & 0 & 0 & -R_s \\ \frac{1}{\sigma L_r L_s} & \frac{\omega}{\sigma L_s} & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) & (\omega_s - \omega) \\ -\frac{\omega}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma L_r L_s} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

Avec : $T_r = \frac{L_r}{R_r}$; $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ sont respectivement les constantes de temps rotorique et statorique

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$: est le coefficient de dispersion.

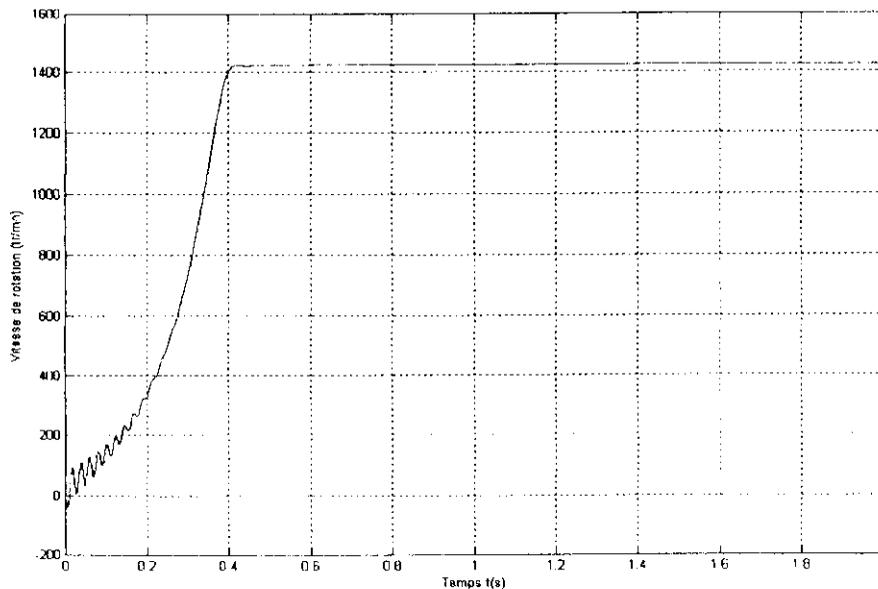


Figure III.7 : Vitesse du moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé par MLI (m=21, r=0.8) Avec application d'une charge de 14 N.m.

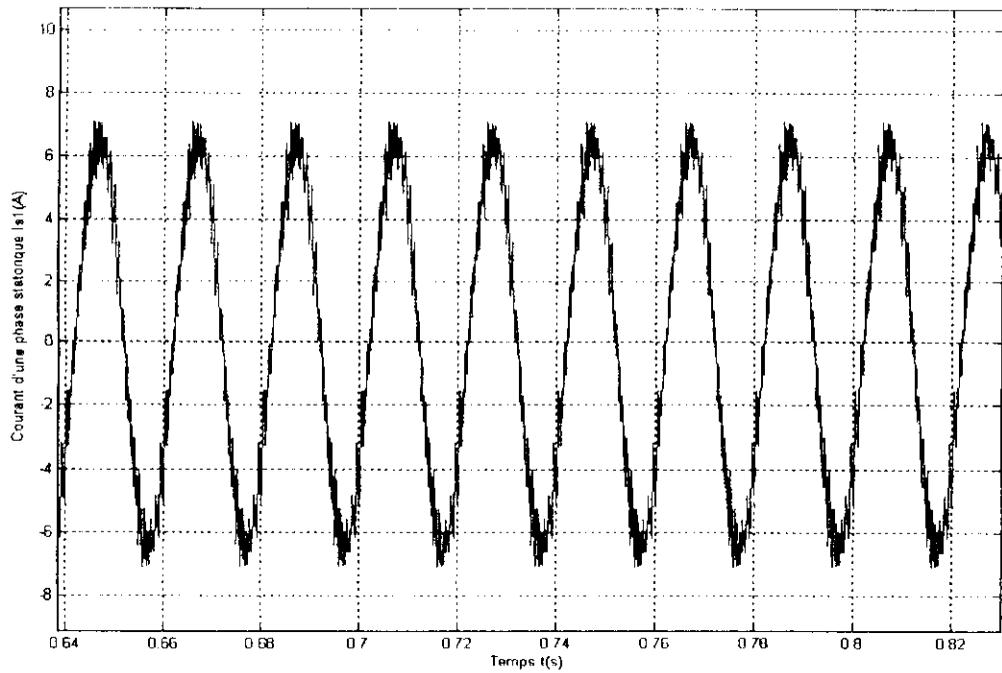
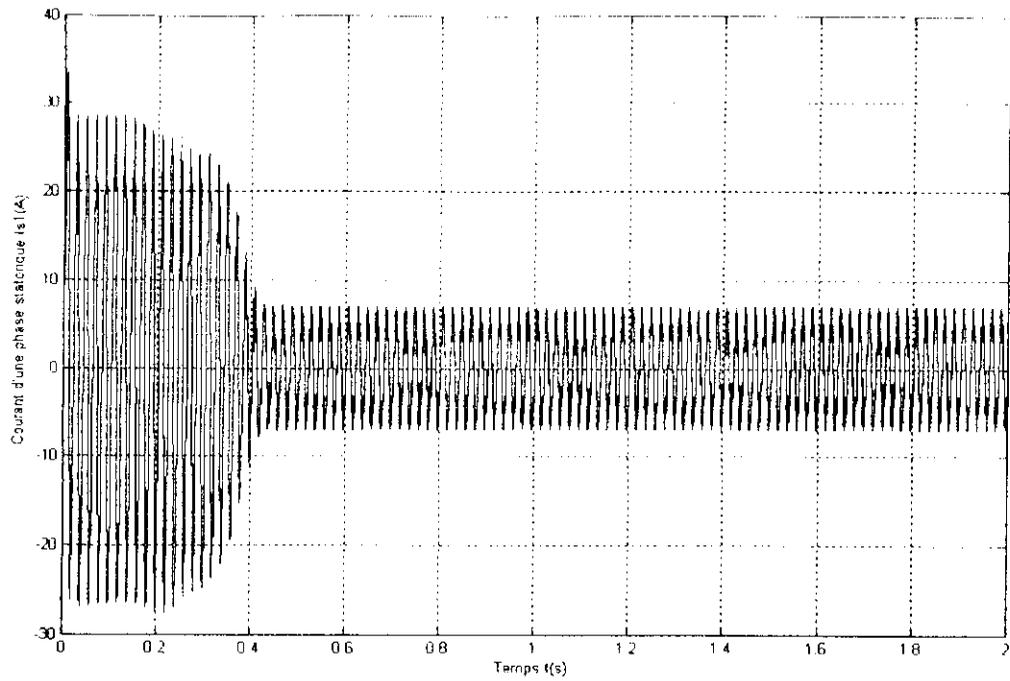


Figure III.9 : Les courants statoriques du moteur asynchrone.

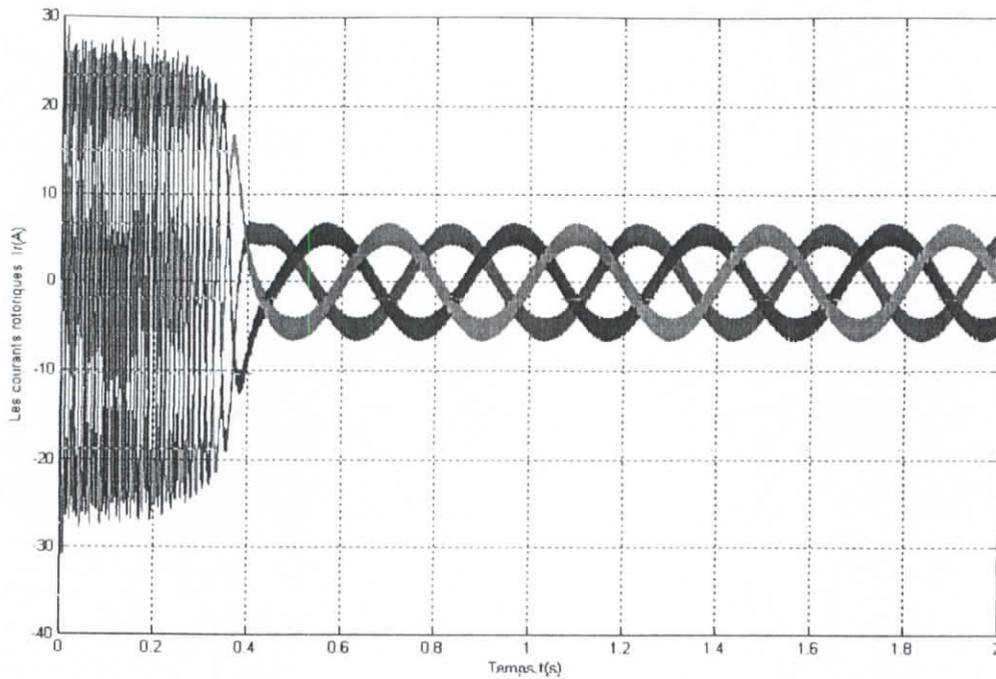


Figure III.10 : Les courants rotoriques du moteur asynchrone.

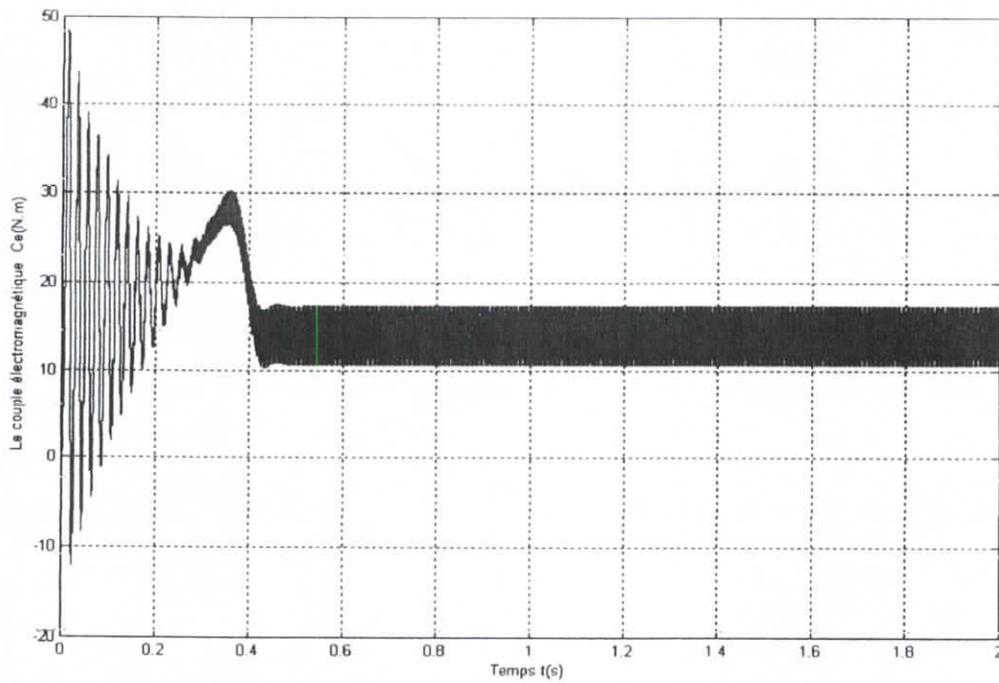


Figure III.8 : Couple du moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé par MLI ($m=21$, $r=0.8$)
Avec application d'une charge de 14 N.m.

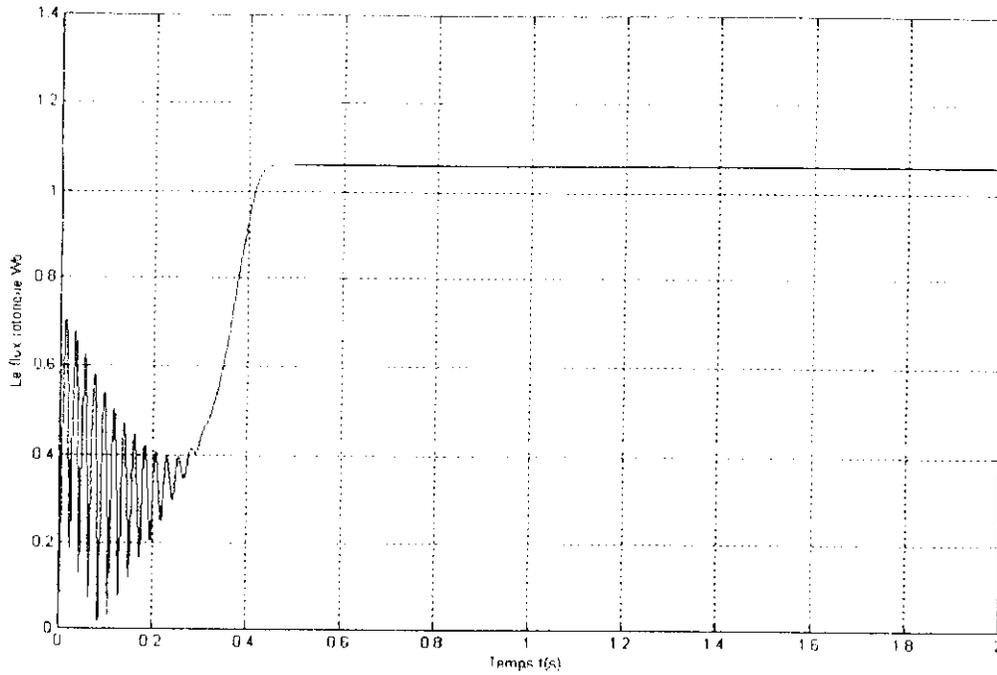


Figure III.11 : Variation du flux rotorique du moteur asynchrone.

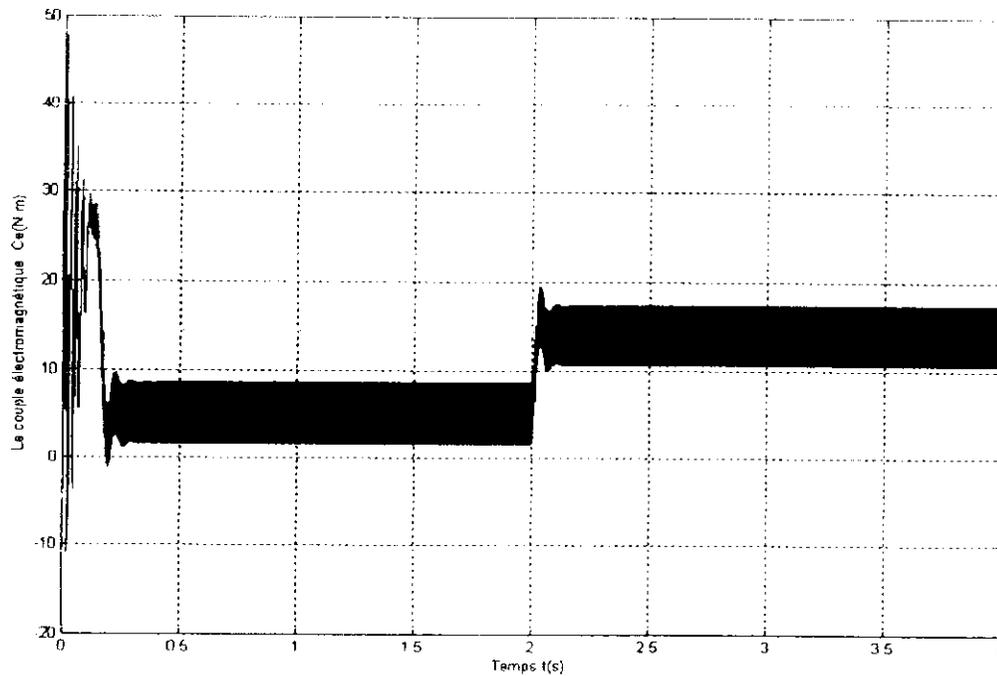


Figure III.12 : Le couple du moteur asynchrone avec une variation de charge de 5 N.m à 14 N.m à $t = 2$ s.

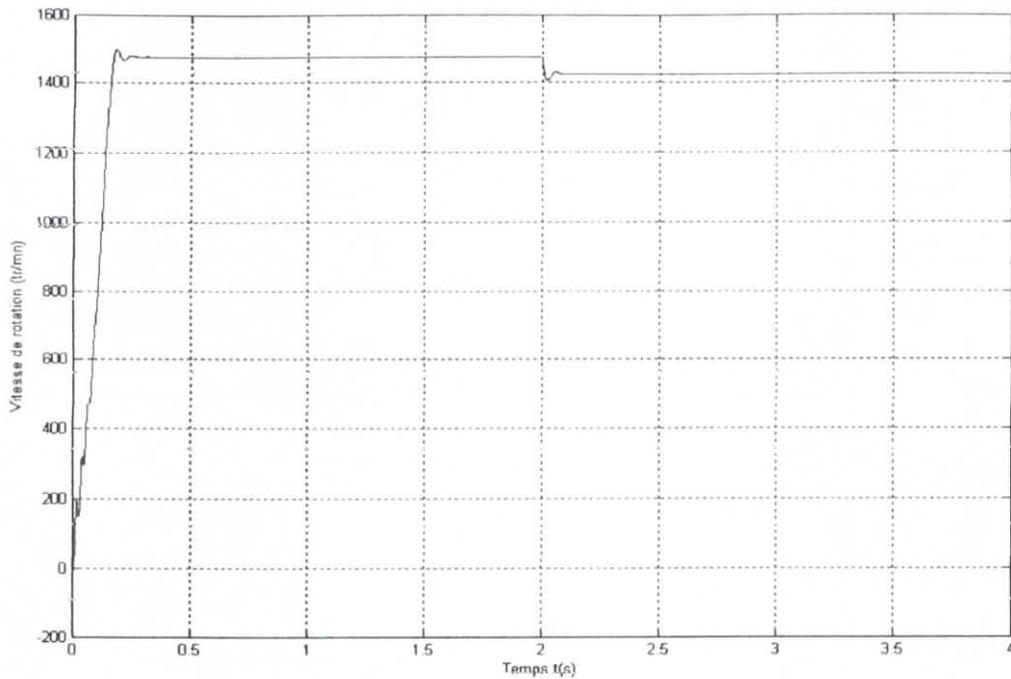


Figure III.13 : La vitesse du moteur asynchrone avec une variation de charge de 5 N.m à 14 N.m à $t=2s$.

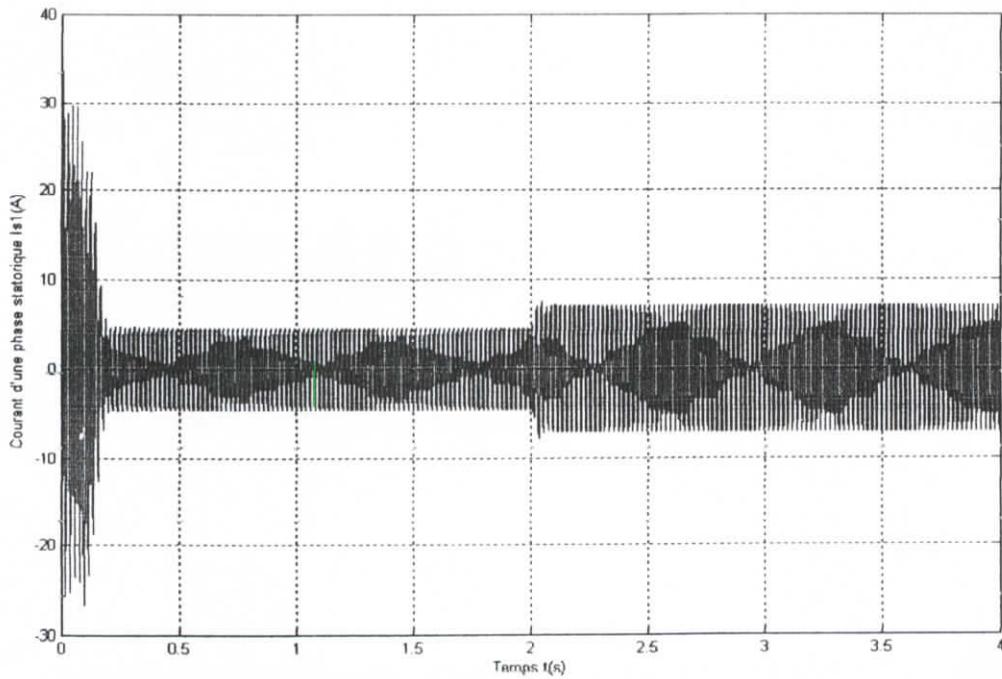


Figure III.14 : Les courants statoriques du moteur asynchrone avec une variation de charge de 5 N.m à 14 N.m à $t=2s$.

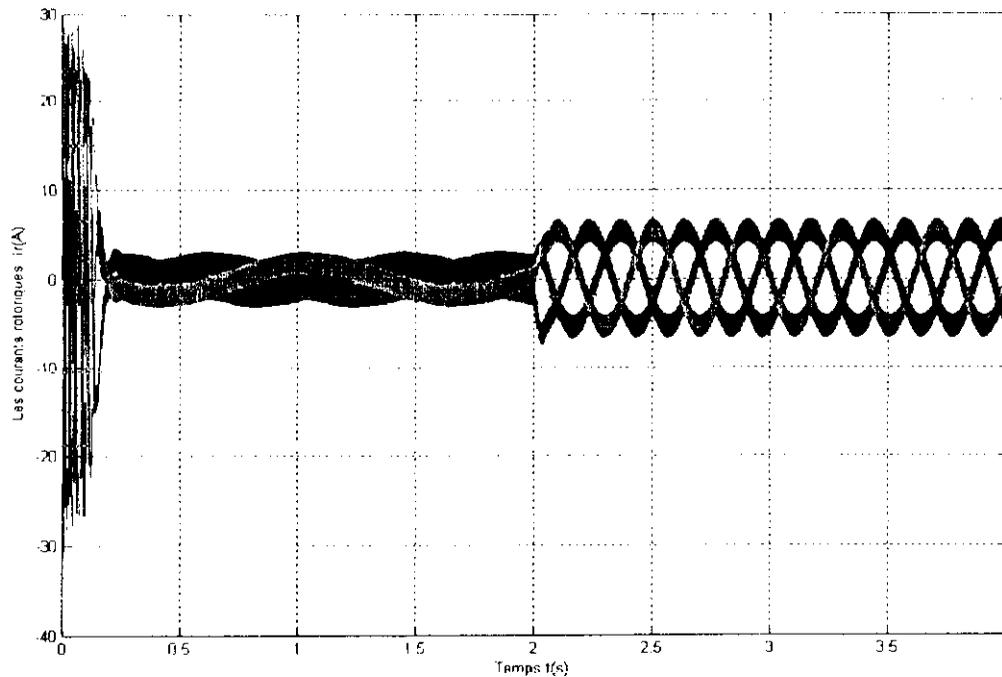


Figure III.15 : Les courants rotoriques du moteur asynchrone avec une variation de charge de 5 N.m à 14 N.m à $t = 2$ s.

III.4.Conclusion

Le développement de la technique de modulation à largeur d'impulsion a contribué efficacement dans la régulation de la machine asynchrone.

En effet, cette stratégie assure un fonctionnement optimal de la machine garantissant un faible taux d'harmonique de la tension et du courant et une minimisation des fluctuations du couple.

CHAPITRE IV

**MODELISATION ET SIMULATION DU MODELE GLOBAL
AVEC ET SANS HACHEUR**

IV.1.Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons effectué la modélisation et la simulation de chaque partie du système à part en adoptant les étapes suivantes :

- Modélisation et simulation du panneau solaire selon le modèle à cinq paramètres.
- Modélisation et simulation du convertisseur statique (hacheur de type BOOST) avec intégration de la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) du type « perturber & observer ».
- Simulation de l'association générateur photovoltaïque-hacheur MPPT.
- Modélisation et simulation de l'association onduleur-moteur asynchrone en utilisant la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Dans ce chapitre, nous aboutissons à la simulation du système global selon les deux parties suivantes:

Partie 1 : Simulation de l'association panneau solaire-hacheur-onduleur-moteur asynchrone ; en intégrant la MPPT dans le hacheur et une stratégie de commande adéquate (V/f constant) pour le moteur afin d'assurer le bon fonctionnement du moteur asynchrone en pompage.

Partie 2 : Simulation du système global sans le hacheur c'est-à-dire panneau solaire-onduleur-moteur asynchrone.

IV.2.PARTIE 1 : Simulation du panneau solaire-hacheur-onduleur-moteur asynchrone.

IV.2.1. Conditions pour un bon fonctionnement

Notre système ne fonctionne que sous éclairement, puisqu'il ne contient pas de batteries qui servent à assurer l'approvisionnement en électricité en l'absence du soleil [8]. L'absence de batteries impose, pour que le système fonctionne correctement, ce qui suit:

- 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 (n'ayant pas la possibilité de stocker l'énergie dans des batteries), d'où la diminution du rendement global du système

La simulation du modèle global est faite en premier lieu pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

Après la simulation du système global, on a obtenu les caractéristiques suivantes :

- Pour le panneau, on a visualisé l'évolution de la tension et de la puissance.
- Pour le hacheur, on a visualisé le rapport cyclique d et la tension de sortie.
- Pour l'onduleur, on a visualisé les tensions de sortie.
- Pour le moteur, on a visualisé l'évolution des courants statoriques et rotoriques, des couples utile et résistant ainsi que de la vitesse de rotation de l'arbre.

La tension de sortie du panneau solaire oscille autour du point de puissance maximale.

Le rapport cyclique d du hacheur se stabilise et oscille aussi autour de la valeur correspondant à l'obtention de la tension optimale du générateur. Cette valeur est obtenue à l'aide de l'algorithme MPPT (méthode Perturber et Observer).

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) [8].

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

Les schémas ci-dessous illustrent toutes les caractéristiques mécaniques et électriques du moteur asynchrone.

Caractéristiques mécaniques

- Le fonctionnement normal d'un moteur asynchrone (à induction) apparaît sur la courbe couple-vitesse (figure VI.13).
Le démarrage se produit, si le couple de démarrage T_d est supérieur au couple résistant T_r (la charge). Le moteur accélère en développant un couple de plus en plus grand, puis son couple décroît et 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, on remarque 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 les 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'ensoleillement varie entre $1000W/m^2$ et $400W/m^2$ par pas de $200 W/m^2$).

On remarque que la variation de l'ensoleillement influe sur tout le système y compris le moteur. En effet, quand l'ensoleillement diminue, 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 ω_m augmente pour assurer la conservation de la puissance. La relation suivante indique la relation entre la vitesse et le couple : $P_u = \Gamma_m \cdot \Omega$.

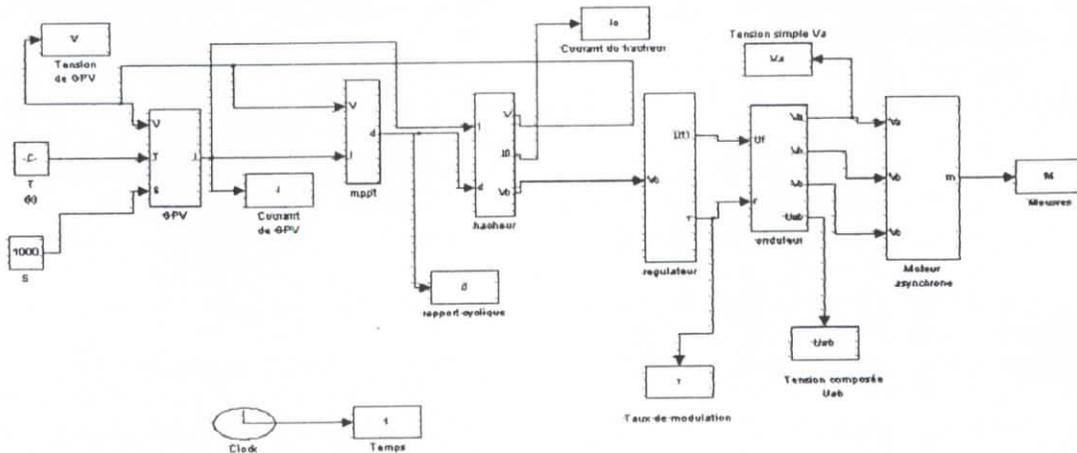


Figure IV.1 : Schéma de la simulation du système global avec hacheur.

Les résultats de la simulation sont représentés par les courbes suivantes :

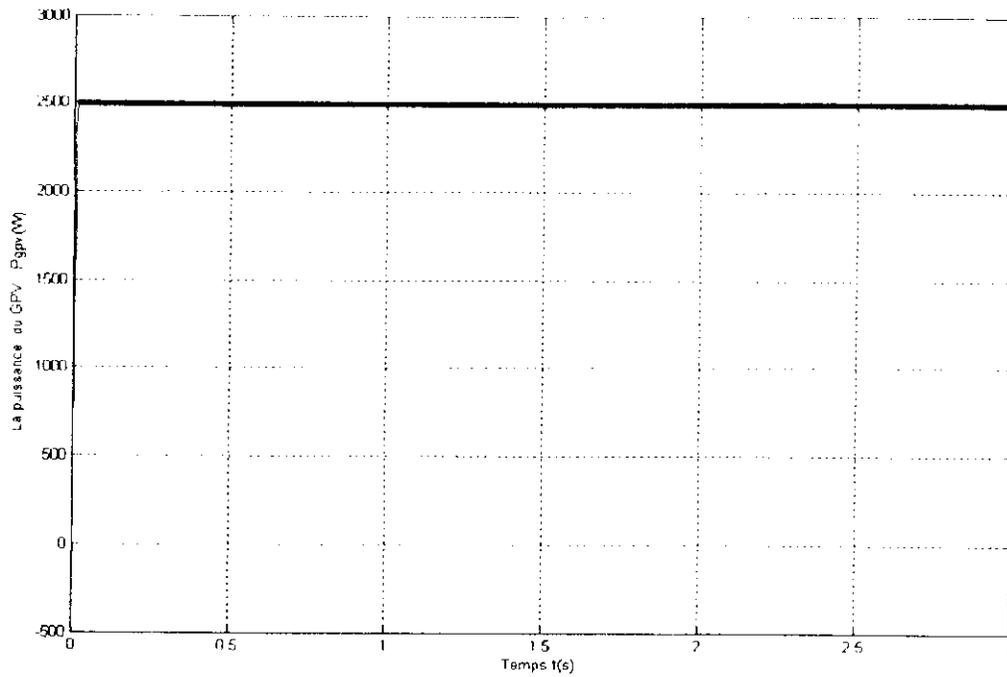


Figure IV.2: La puissance du panneau en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

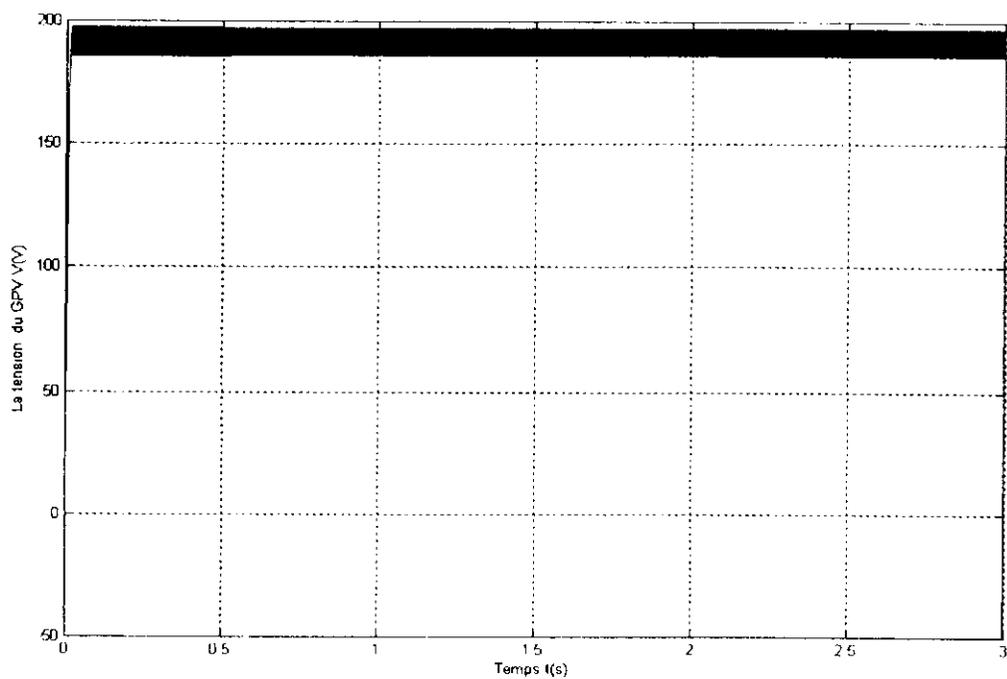


Figure IV.3 : La tension du générateur photovoltaïque en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

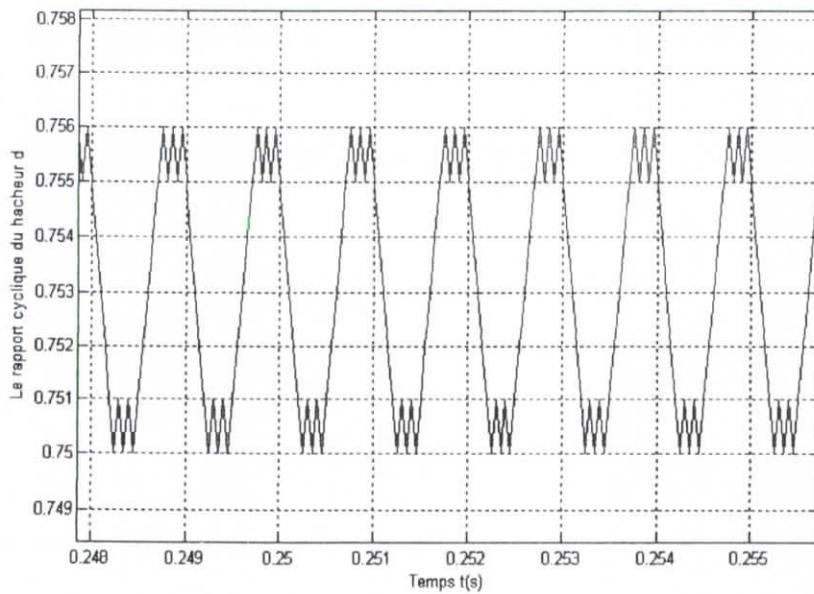
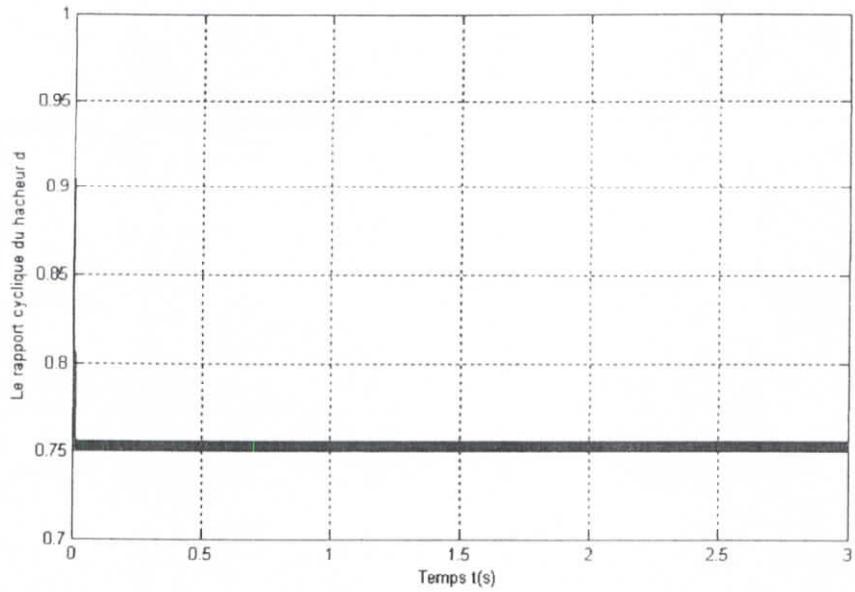


Figure IV.4 : Le rapport cyclique du hacheur en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C

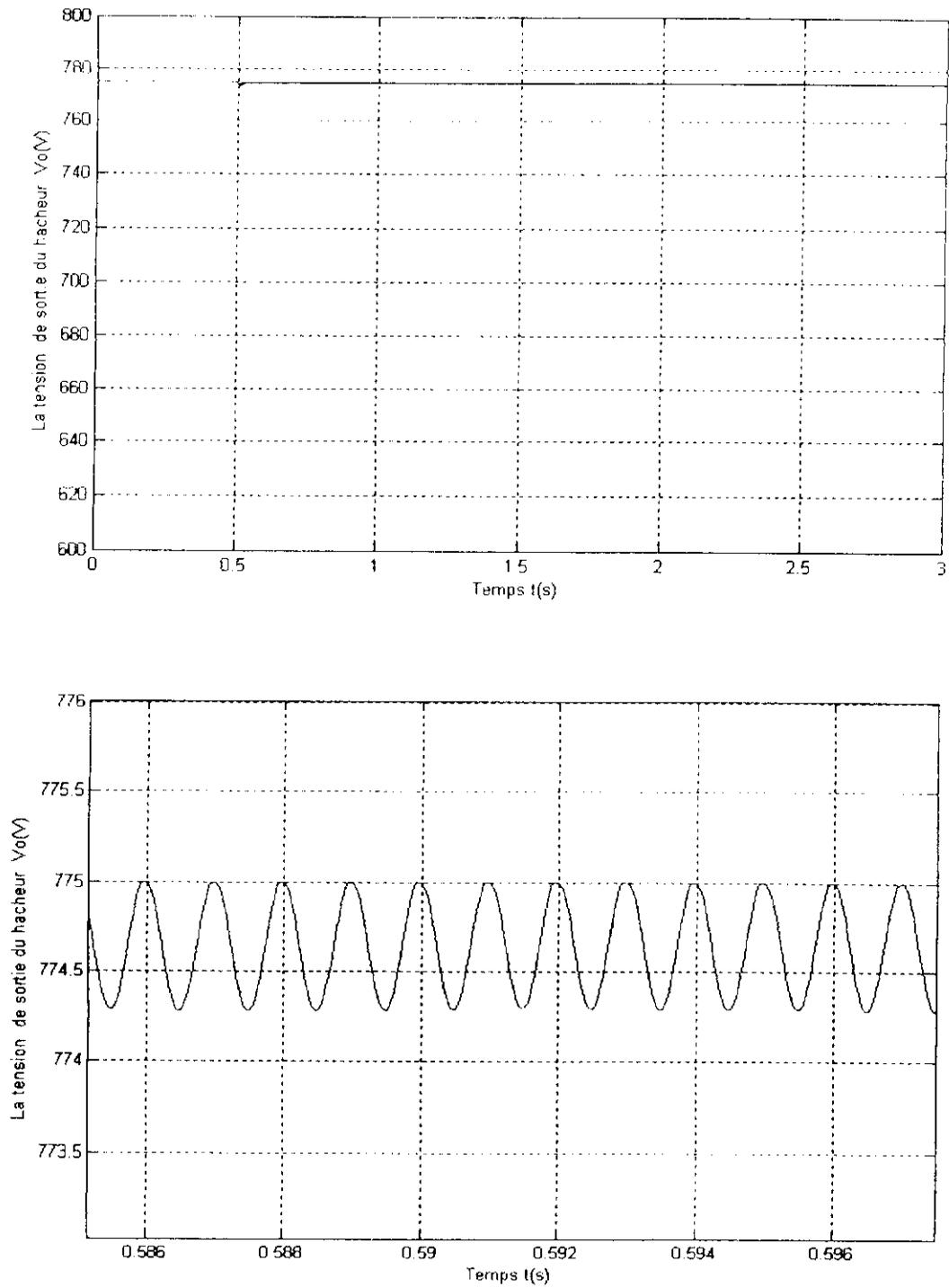


Figure IV.5 : La tension de sortie du hacheur en fonction du temps pour un ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$.

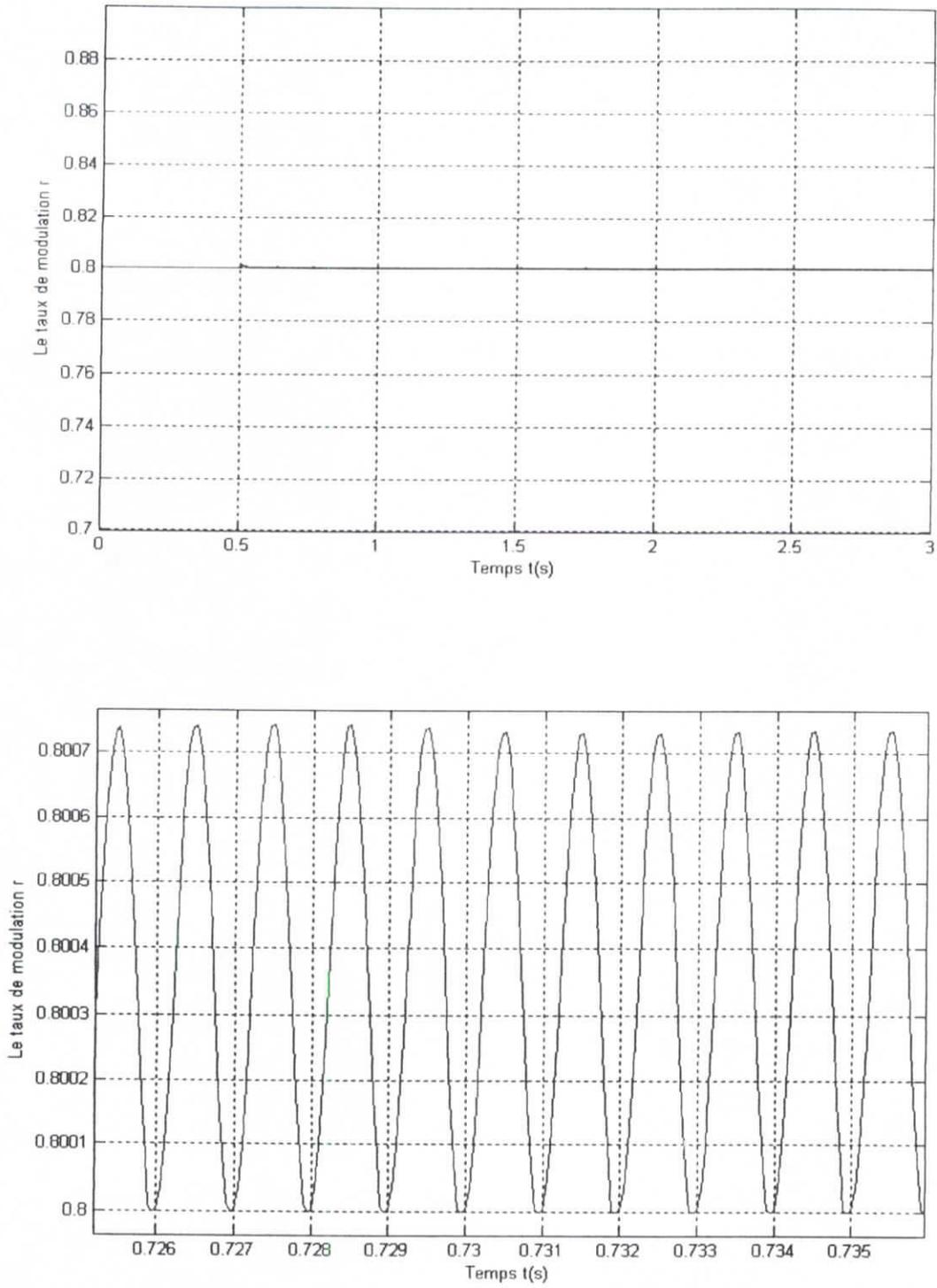


Figure IV.6 : Le taux de modulation de l'onduleur en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

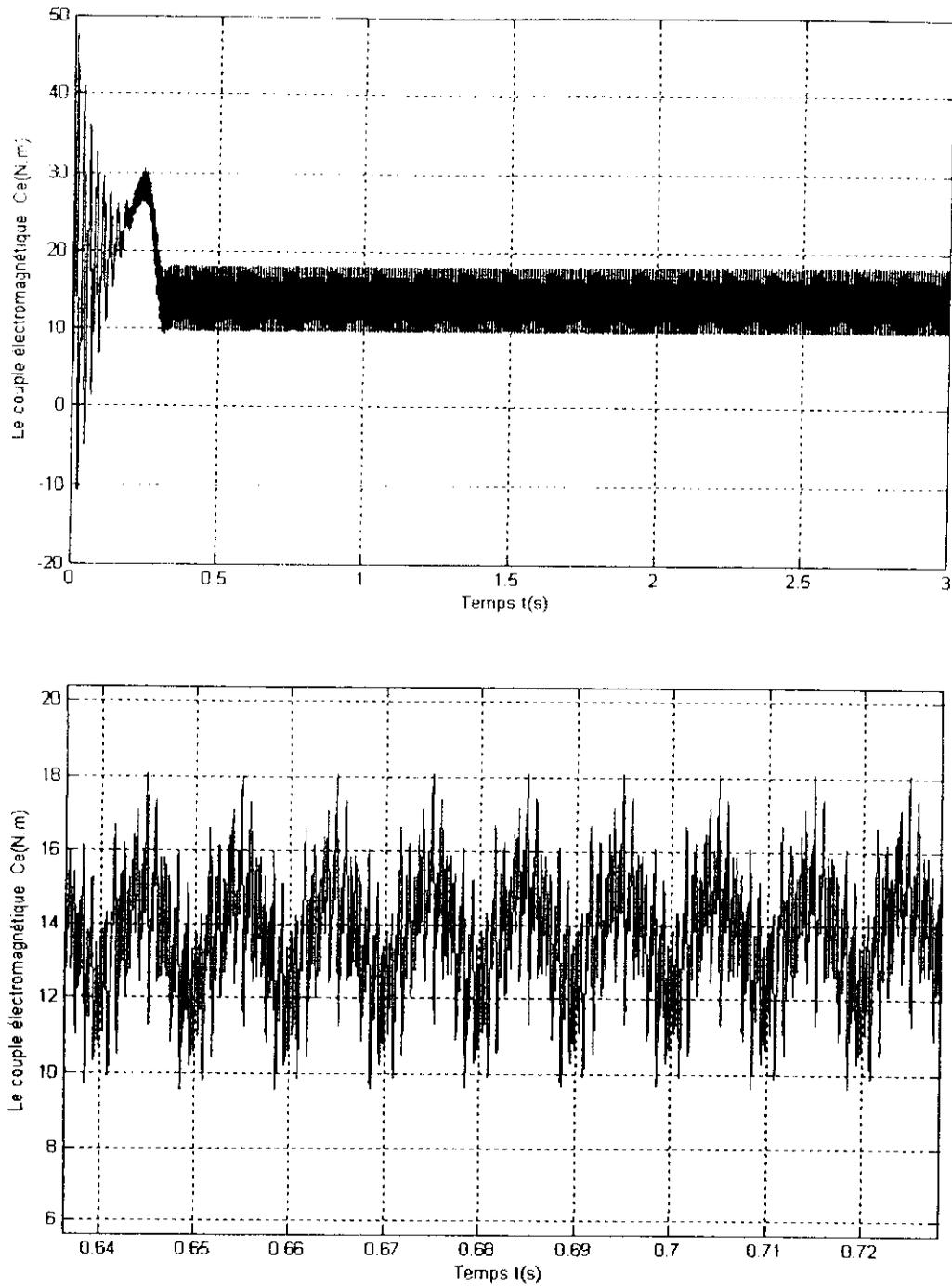


Figure IV.7 : Le couple du moteur en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

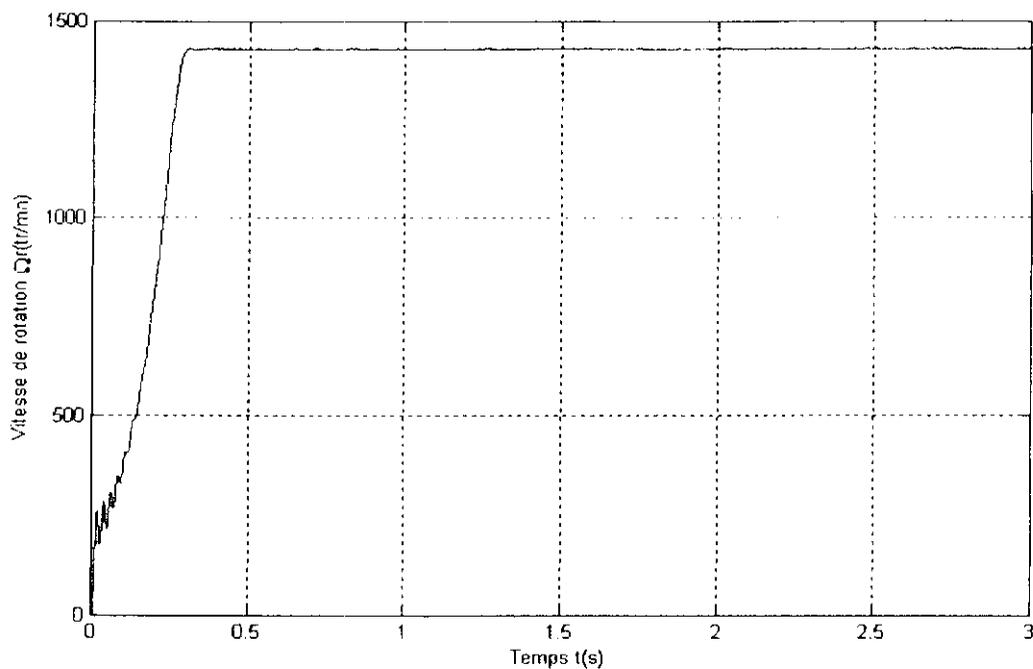


Figure IV.8 : La vitesse du moteur en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

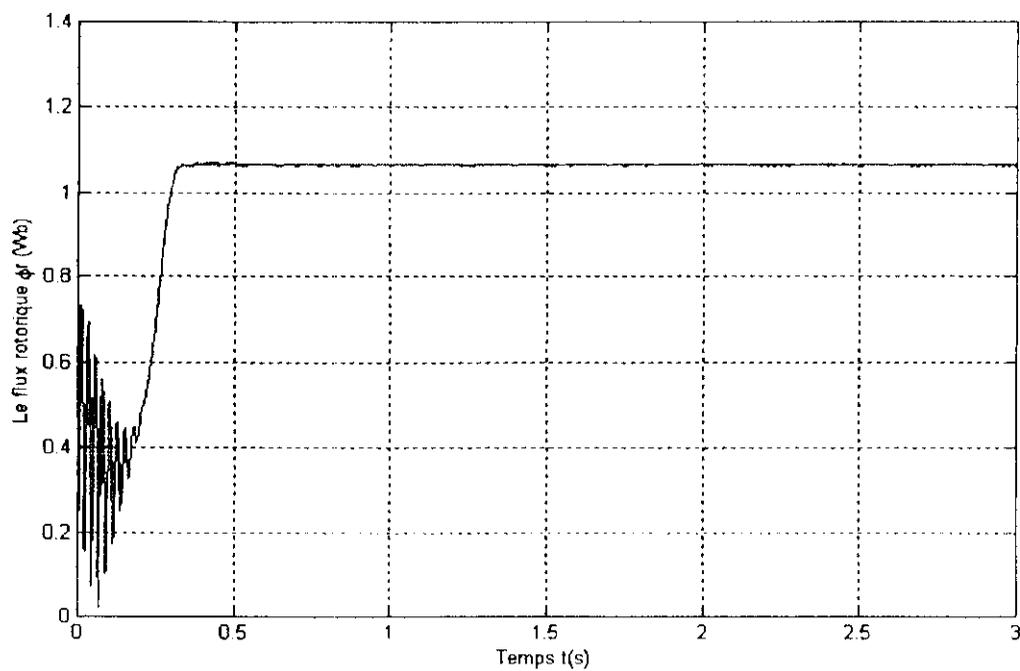


Figure IV.9 : Le flux rotorique en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

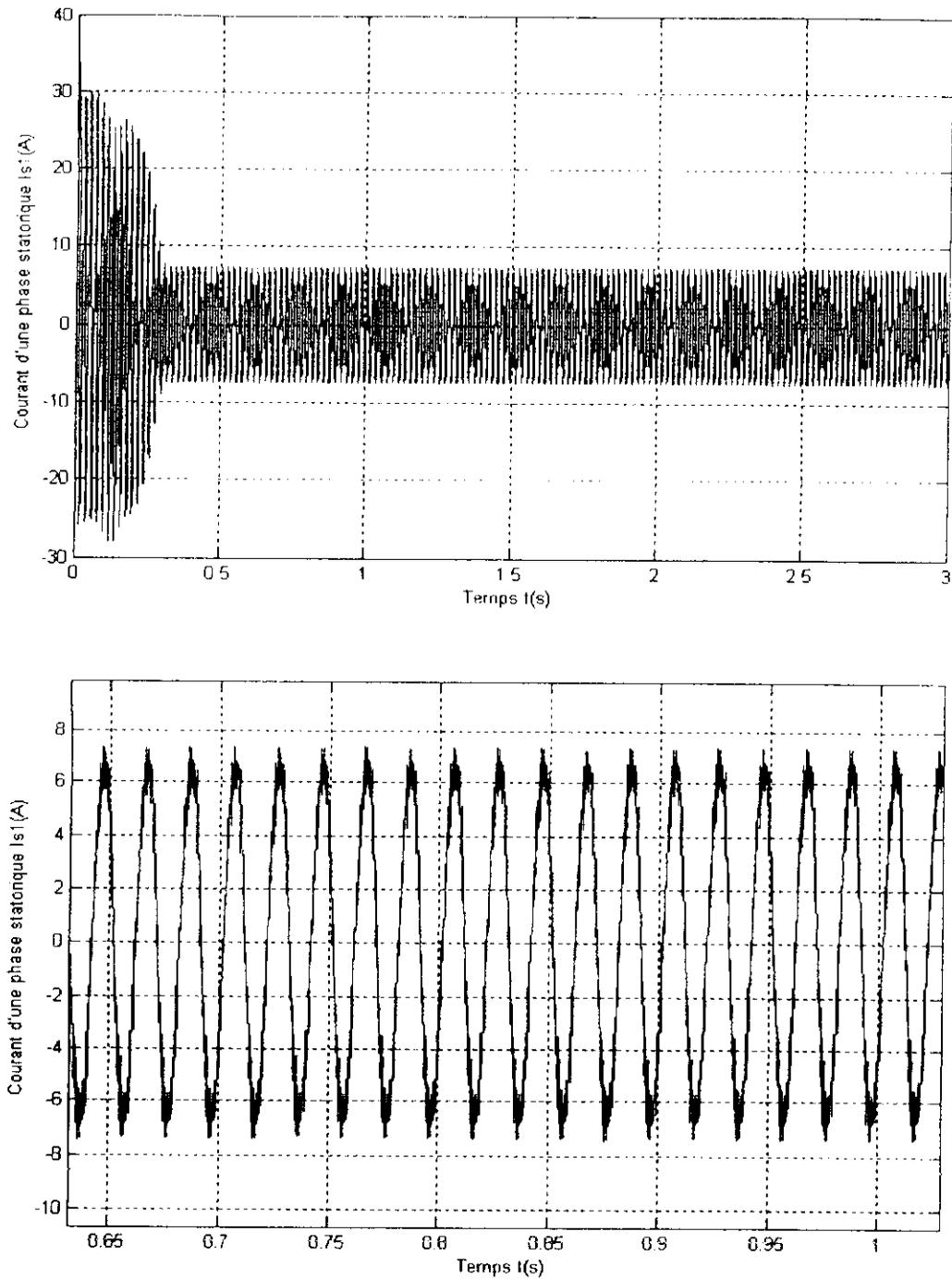


Figure IV.10 : Le courant d'une phase statorique pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

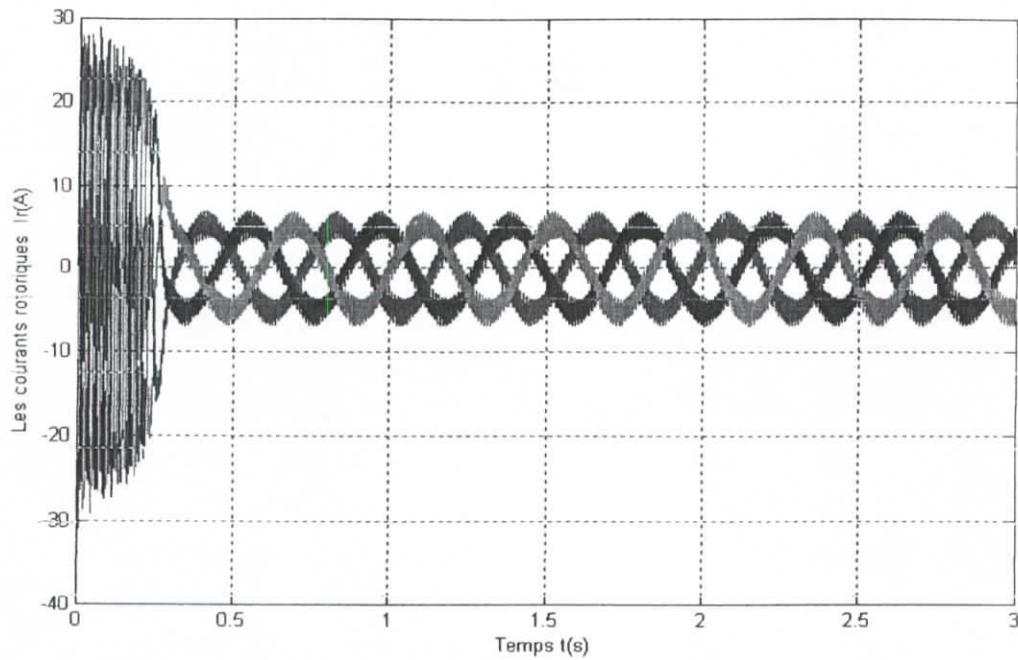


Figure IV.11 : Les courants rotoriques en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

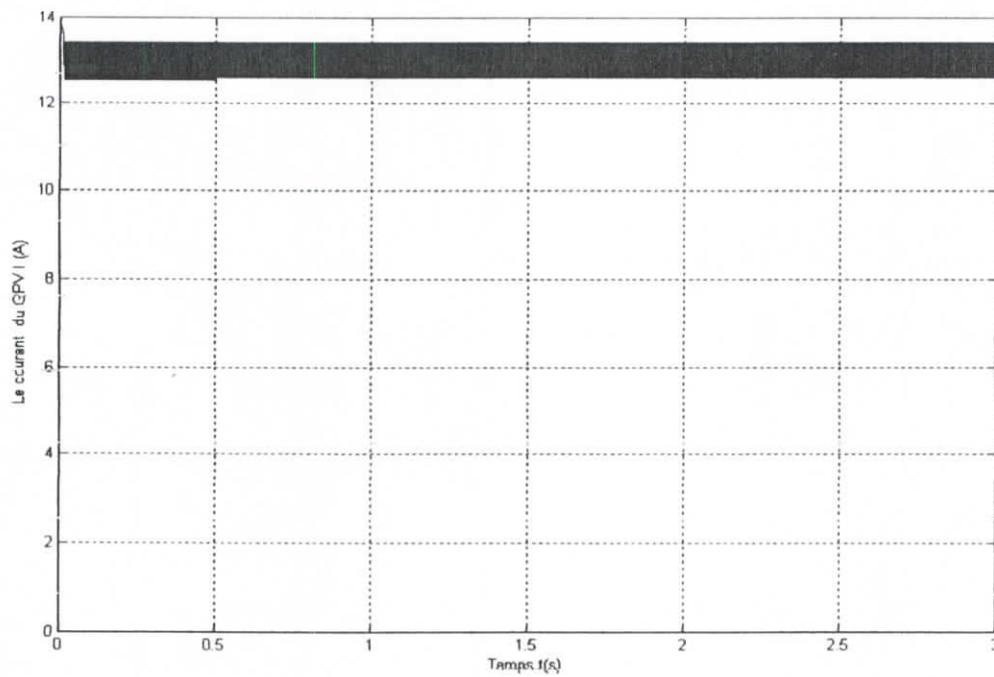


Figure IV.12 : Le courant du générateur photovoltaïque en fonction du temps pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

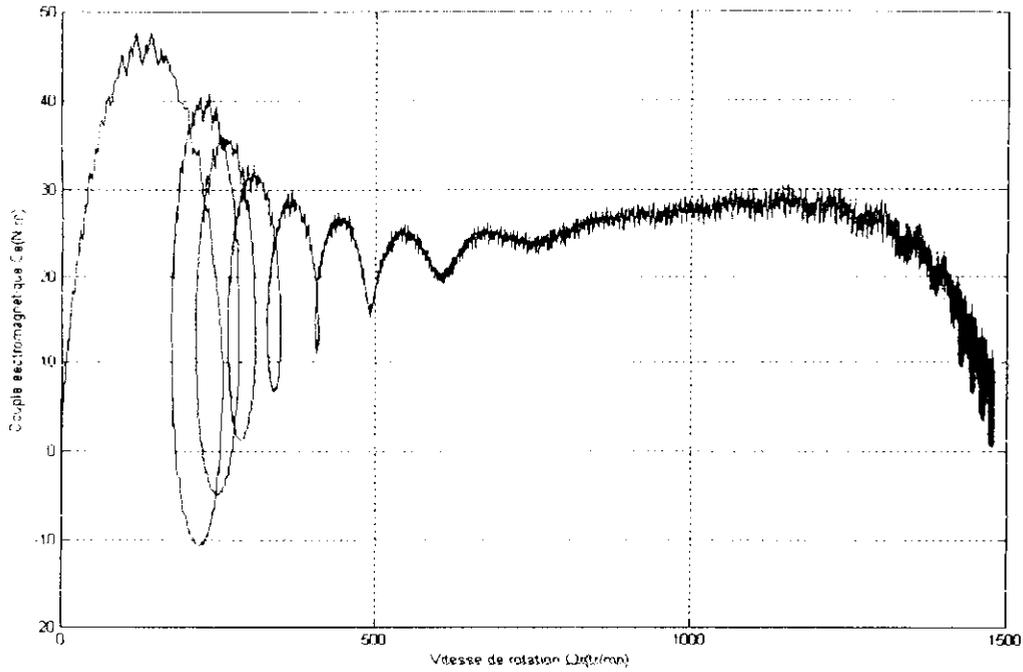


Figure IV.13 : Le couple électromagnétique en fonction de la vitesse pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

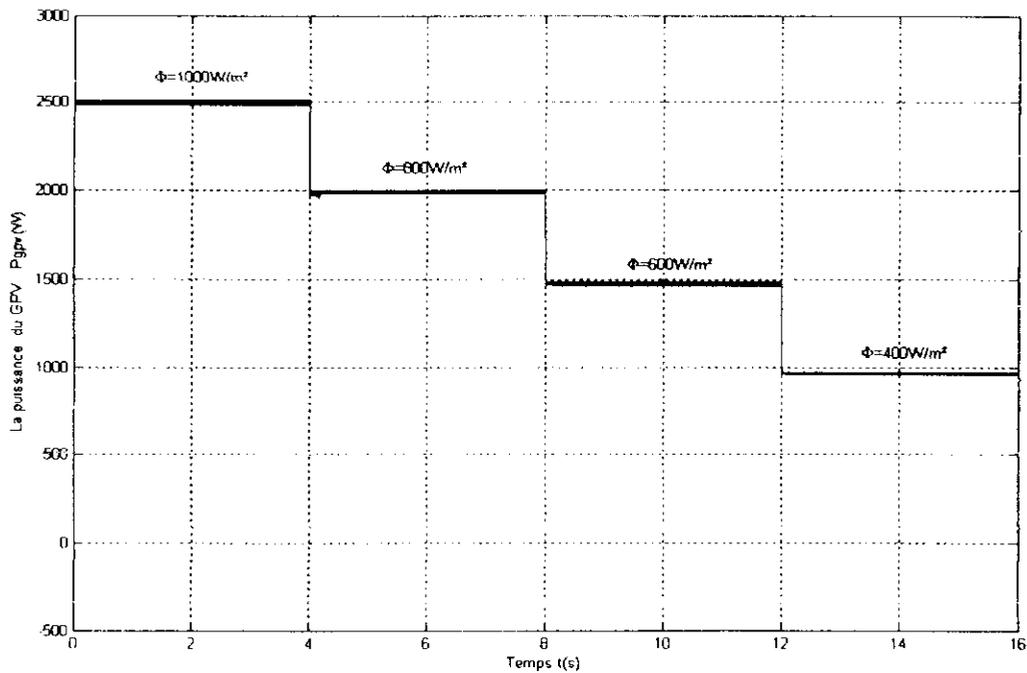


Figure IV.14 : La puissance du panneau pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

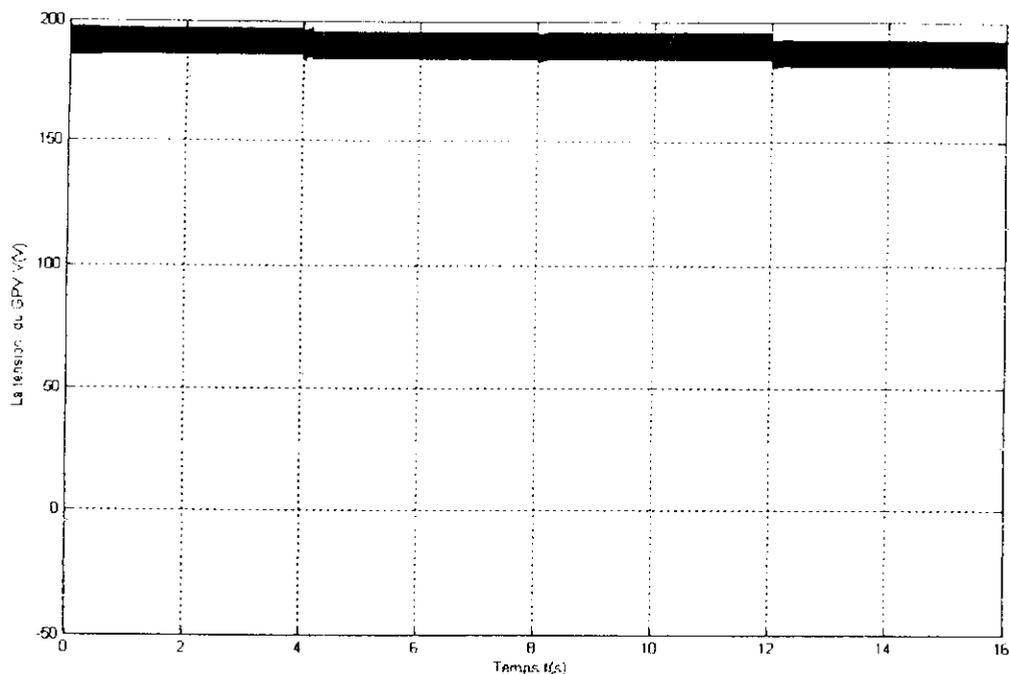


Figure IV.15 La tension du panneau en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

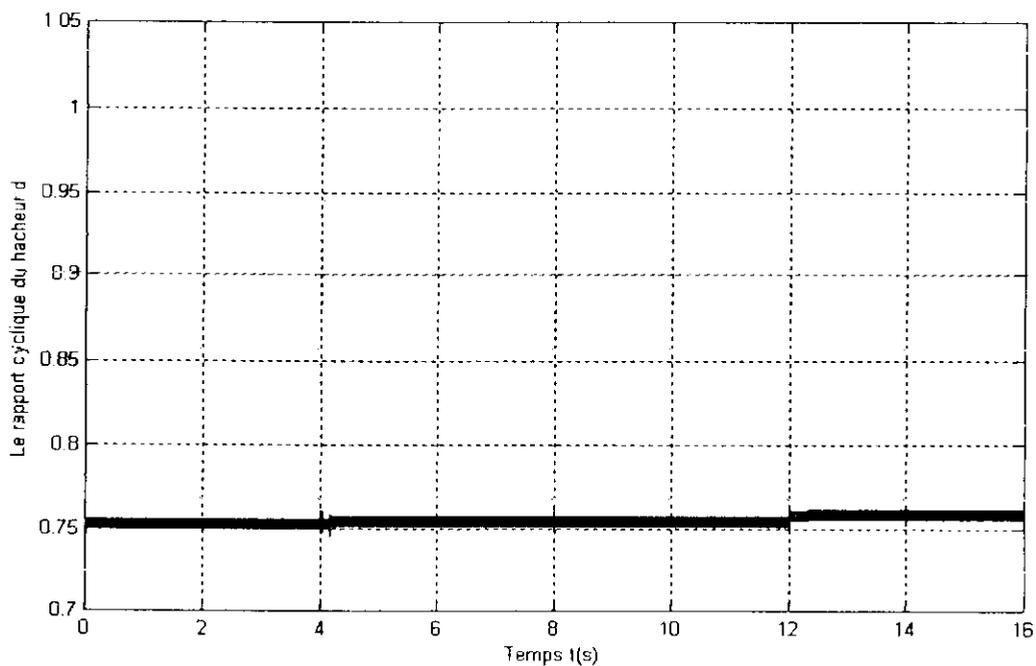


Figure IV.16 : Le rapport cyclique du hacheur en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

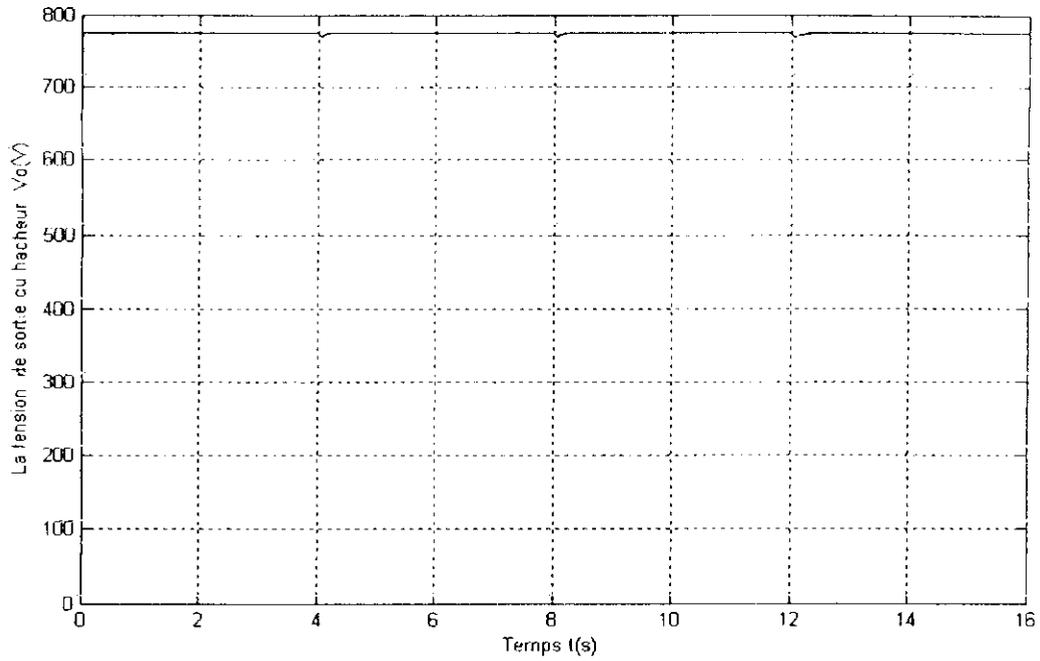


Figure IV.17 : La tension et de sortie du hacheur en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

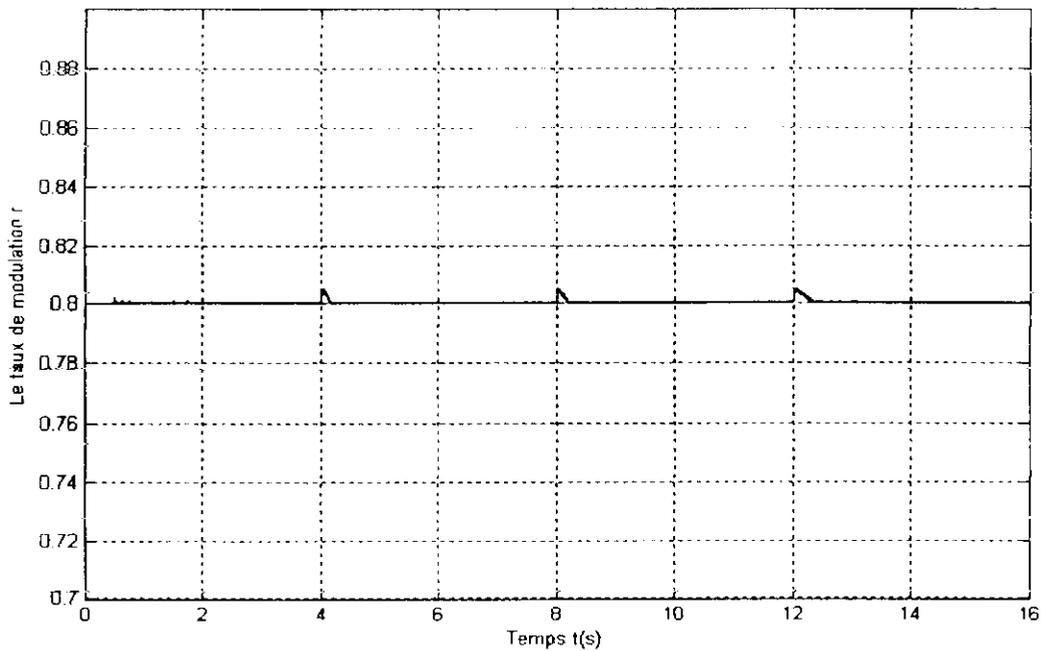


Figure IV.18 : Le taux de modulation pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

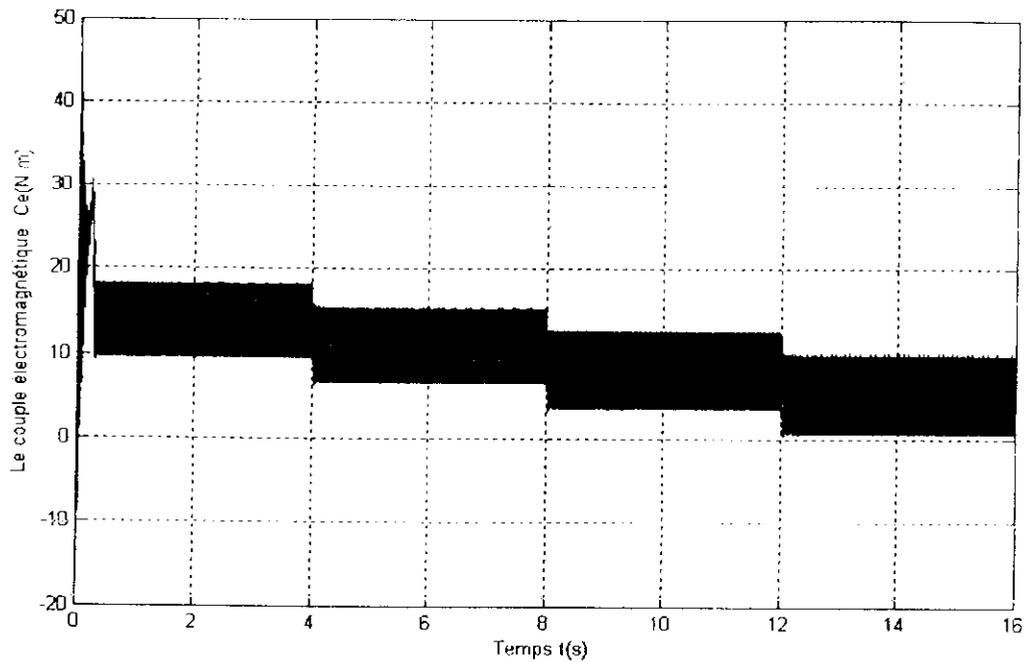


Figure IV.19 : Le couple du moteur en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $400W/m^2$ par pas de $200 W/m^2$ à $T=25^\circ C$.

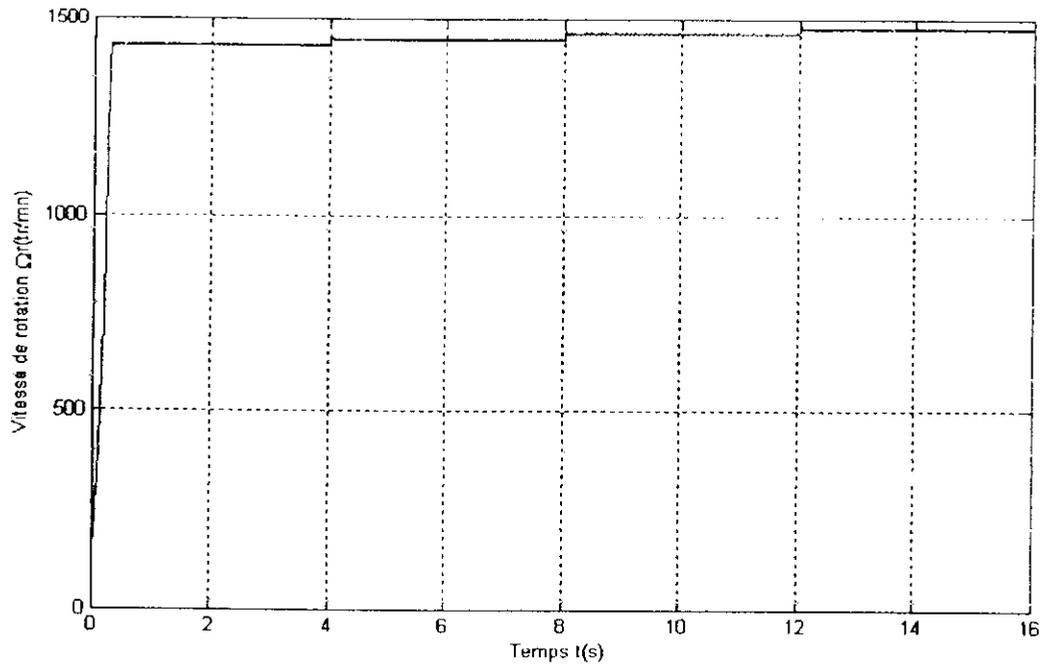


Figure IV.20 : La vitesse du moteur en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $400W/m^2$ par pas de $200 W/m^2$ à $T=25^\circ C$.

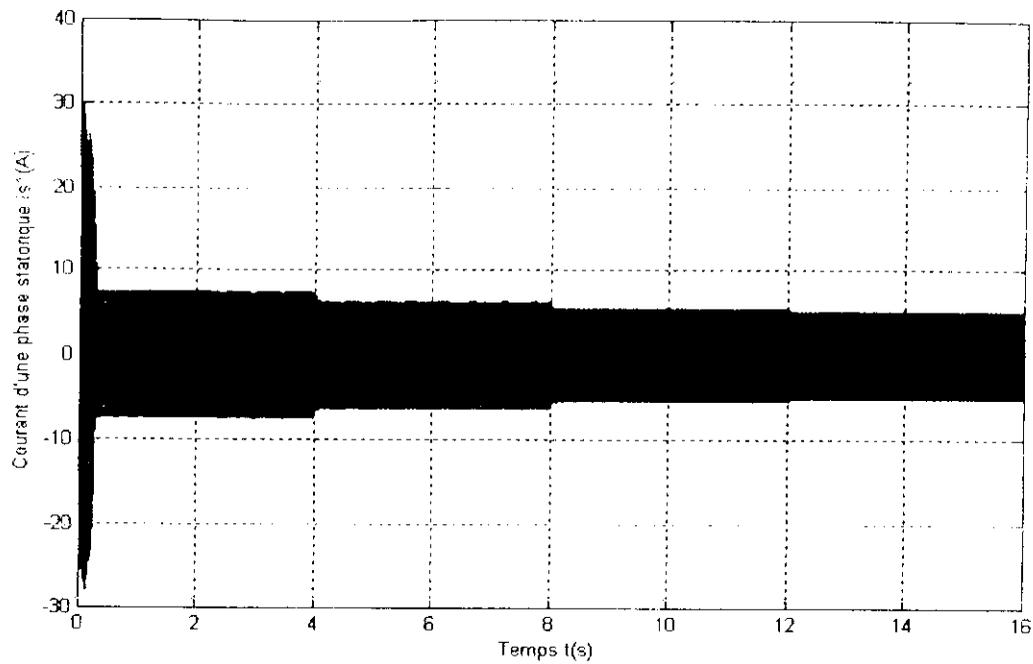


Figure IV.21 : Le courant d'une phase statorique en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

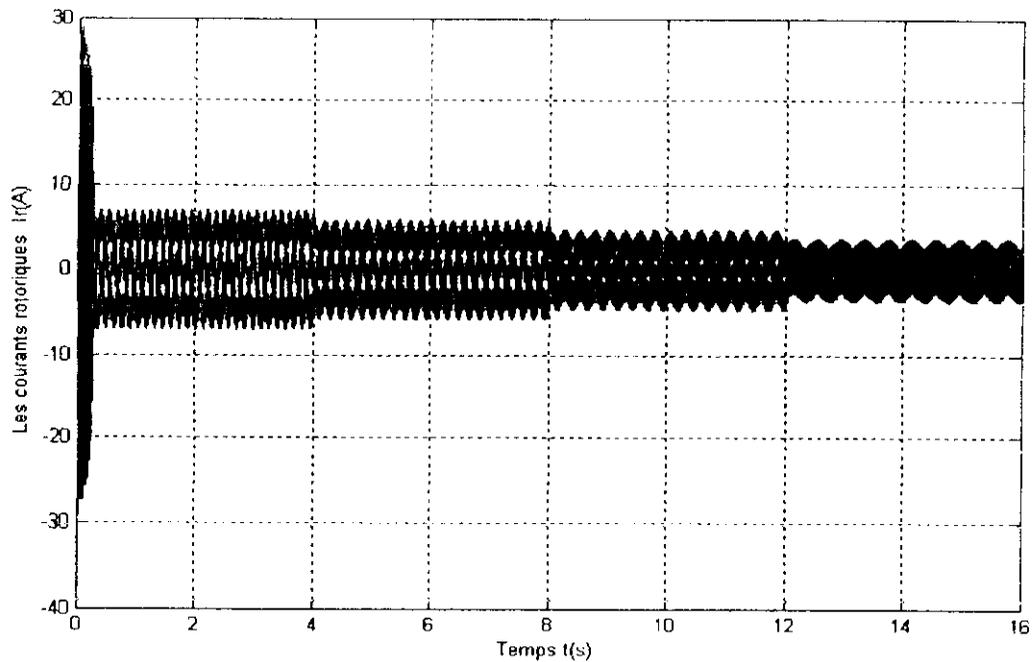


Figure IV.22 : Les courants rotoriques en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

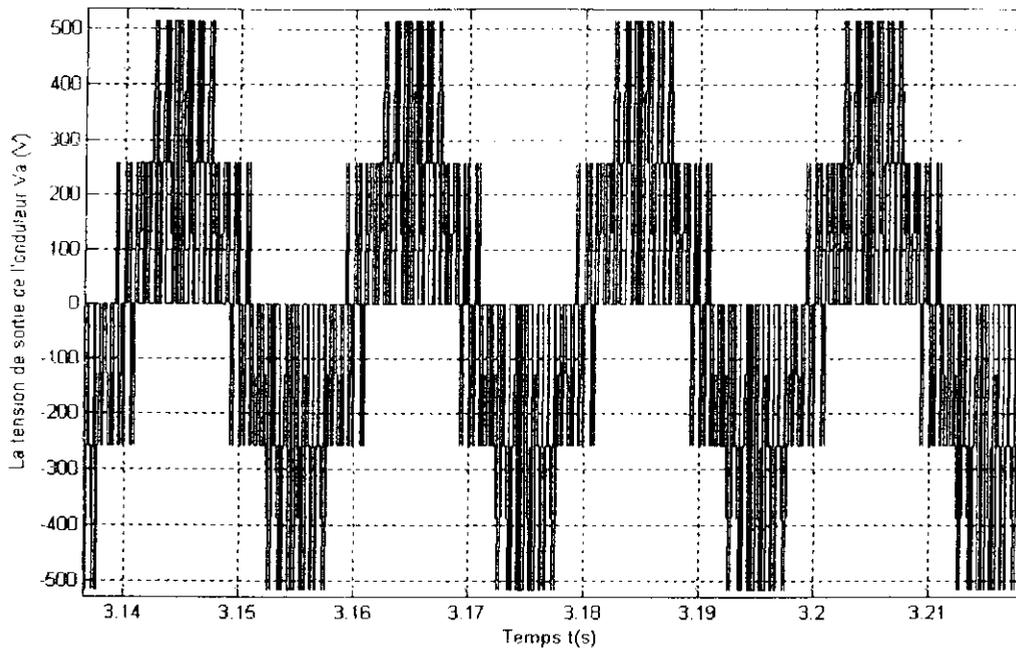


Figure IV.23 : La tension simple aux bornes du moteur.

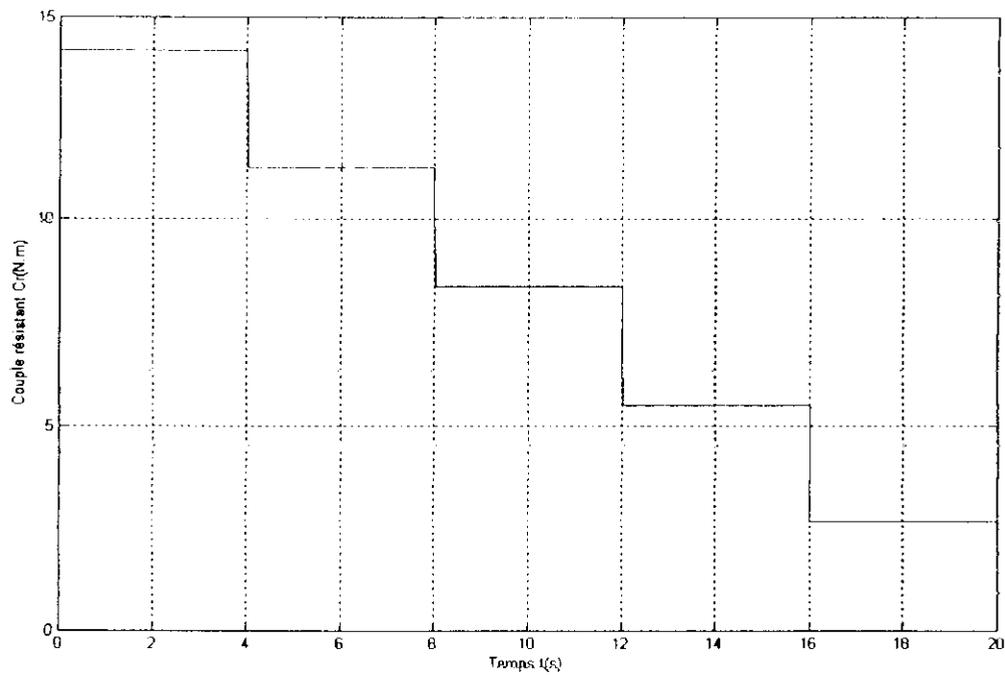


Figure IV.24 : Le couple résistant en fonction du temps pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

IV.3.PARTIE 2 : Simulation du panneau solaire-onduleur-moteur asynchrone.

IV.3.1.Modifications nécessaires pour le passage du système de pompage avec hacheur au système sans hacheur

Dans cette partie, nous effectuons la simulation du même système de pompage photovoltaïque mais sans hacheur. En effet, l'onduleur est directement alimenté par le générateur photovoltaïque. Le fait d'enlever le hacheur entraîne les modifications suivantes :

- Le hacheur ayant été élévateur de tension, la tension de sortie du même générateur photovoltaïque devient faible par rapport à celle demandée par le moteur. La solution à ce problème consiste à changer la disposition du générateur photovoltaïque en mettant tous les modules en série ainsi la tension sera augmentée.
- Pour la poursuite du point de puissance maximale, nous adoptons la même méthode « perturber & observer » que dans le système avec hacheur. Le principe est évidemment le même que celui avec un hacheur mais cette fois à la sortie de la MPPT, appliquée à l'onduleur, on aura le taux de modulation de l'onduleur qui va varier avec le point de puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.
- Le moteur est commandé par la stratégie V/f constant. Cette commande requiert l'utilisation d'un régulateur proportionnel de telle sorte que le moteur soit toujours alimenté avec une tension dont la valeur efficace de son fondamental est maintenue à 220V (tension simple) et que la fréquence soit toujours égale à 50Hz.

IV.3.2.Application de la MPPT à l'onduleur

A chaque condition atmosphérique (ensoleillement et température) correspond un point de fonctionnement pour lequel la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est maximale. Notre but est justement d'imposer au générateur photovoltaïque ce point de fonctionnement. Ce dernier sera poursuivi sans relâche grâce à la MPPT selon la procédure suivante :

A partir du taux de modulation de l'onduleur donné par la MPPT, le régulateur proportionnel impose une tension d'entrée à l'onduleur (selon la relation IV.1) de telle sorte que le rapport V/f soit maintenu constant. Cette tension imposée à l'entrée de l'onduleur est aussi imposée au générateur photovoltaïque. De cette façon, ce dernier est contraint à un point de fonctionnement précis. La MPPT teste ce point et fait en sorte qu'il soit celui qui permet de délivrer le maximum de puissance et ceci en ajustant le taux de modulation (en ajoutant ou bien en soustrayant du taux de modulation précédant une valeur Δr et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la puissance maximale, et le taux de modulation va ainsi osciller autour de ce point de fonctionnement).

La quasi totalité de la puissance délivrée par le panneau fonctionnant au point de puissance maximale est transmise au moteur en passant par l'onduleur.

$$U_f = 2\sqrt{2} V r \quad (IV.1)$$

U_f : tension d'entrée de l'onduleur délivrée par le générateur photovoltaïque.

V : tension de sortie de l'onduleur.

f : fréquence de la tension d'alimentation du moteur 50Hz.

r :taux de modulation.

IV.3.3. Résultats de la simulation

Le schéma bloc du système global simulé avec SIMULINK est donné par la figure IV.26.

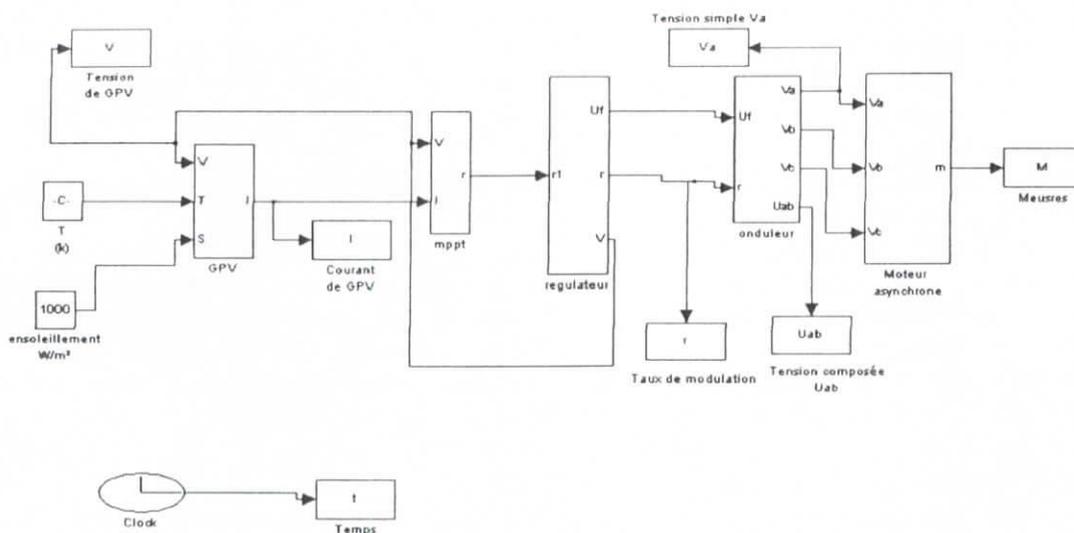


Figure IV.26 : Schéma de la simulation du système global sans hacheur.

La simulation du modèle global est d'abord faite pour les conditions atmosphériques standard (un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C).

A partir de la simulation globale on a relevé les caractéristiques suivantes :

- L'évolution de la tension, courant et puissance de générateur photovoltaïque ;
 - L'évolution de taux de modulation et tension de sortie de l'onduleur ;
 - L'évolution des courants statorique et rotorique, vitesse et couple du moteur asynchrone.
- Le taux de modulation oscille autour de la valeur permettant au générateur photovoltaïque de délivrer sa puissance optimale avec un pas de variation donné par Δr utilisé dans la méthode « perturber & observer ».
 - En comparant les variations du taux de modulation r et du rapport cyclique d autour du point donnant la puissance optimale, on constate que le taux de modulation de l'onduleur s'éloigne beaucoup moins du point de fonctionnement optimal que le rapport cyclique du hacheur. En effet, d varie dans l'intervalle $[0.75, 0.756]$ et r varie dans l'intervalle $[0.81, 0.812]$ (figure IV.36).
 - Les caractéristiques du moteur sont les mêmes que pour le système avec hacheur.

Après avoir fait la simulation du système pour un ensoleillement donné, on passe maintenant à la simulation pour un ensoleillement variable de 1000 à 400 W/m^2 avec un pas de 200 W/m^2 .

- La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est variable en fonction de l'ensoleillement.
- La MPPT poursuit parfaitement le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque.
- La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est transmise directement au moteur.

- Le moteur absorbe la puissance délivrée par le générateur entraînant la variation du couple et de la vitesse d'après la relation suivante : $P_u = C_e \Omega_r$.
- Le rendement du système global avec ou sans hacheur est le produit des rendements de chaque partie du système. Donc, le fait d'enlever le hacheur va augmenter le rendement du système surtout que le rendement du hacheur peut chuter considérablement (figure IV.45 [13]) car il dépend de la charge z alimentée par ce dernier et du rapport cyclique d .

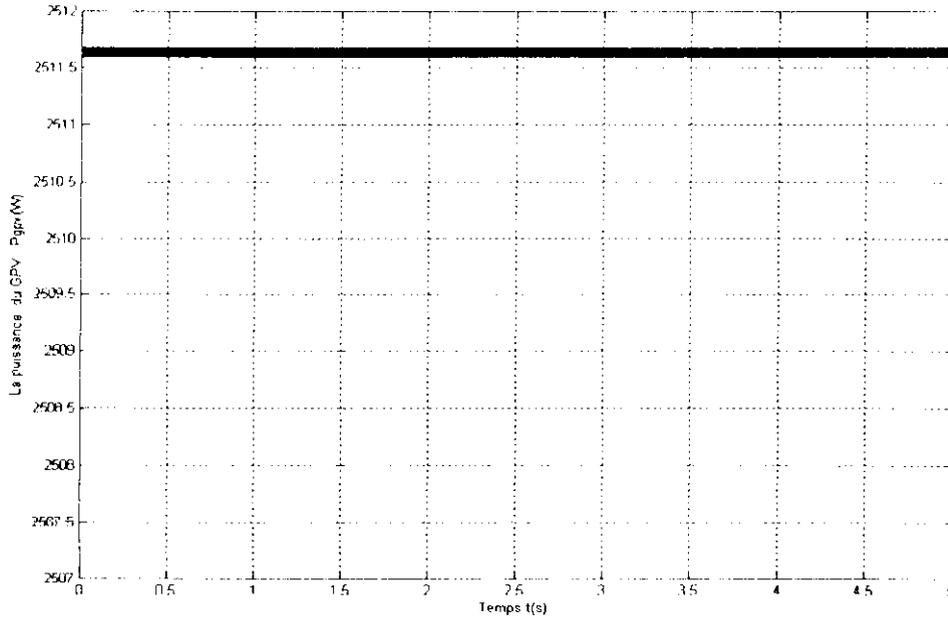


Figure IV.27 : Puissance du générateur photovoltaïque pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

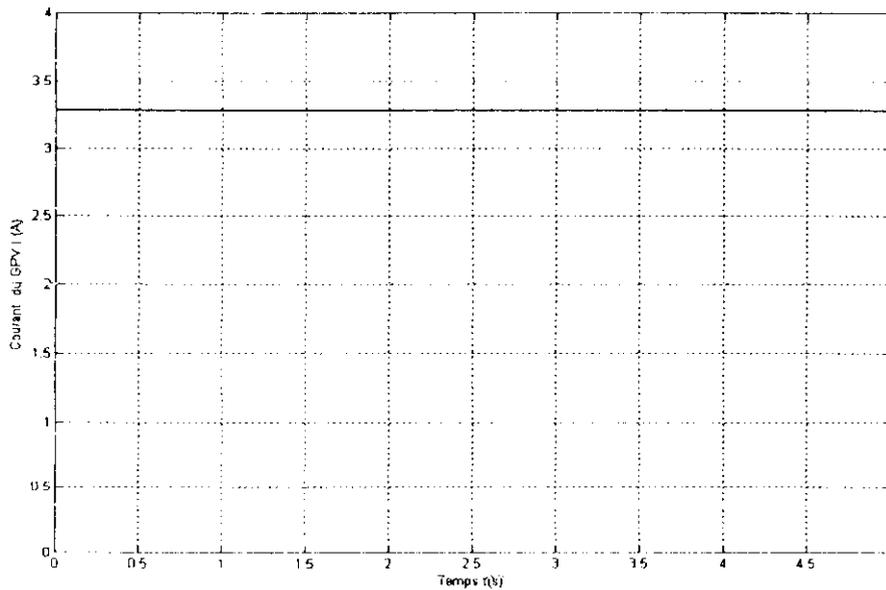
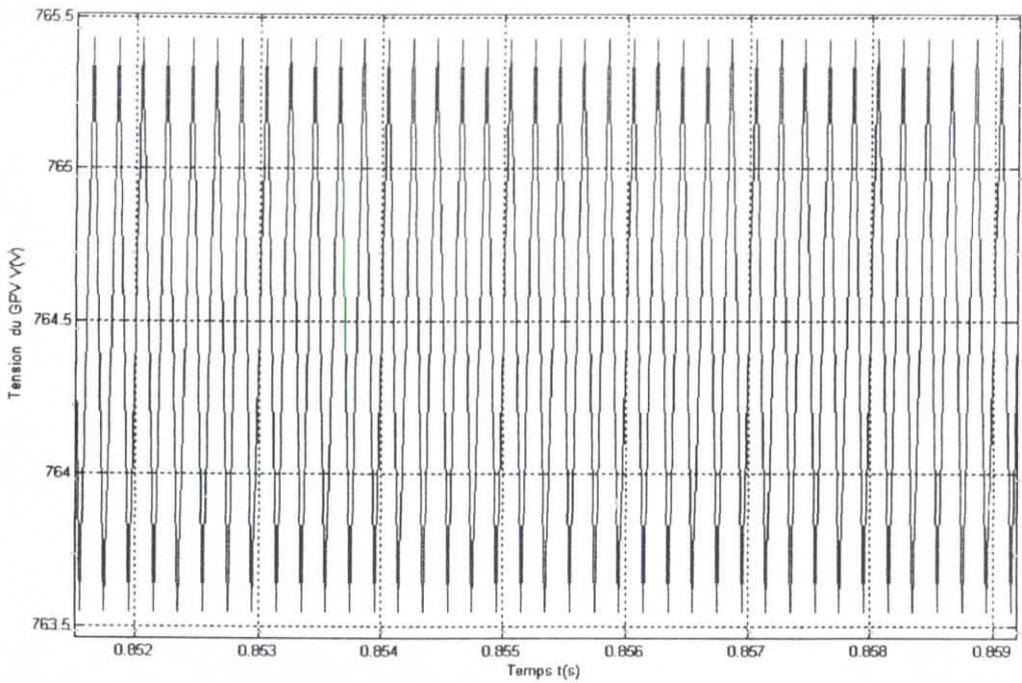
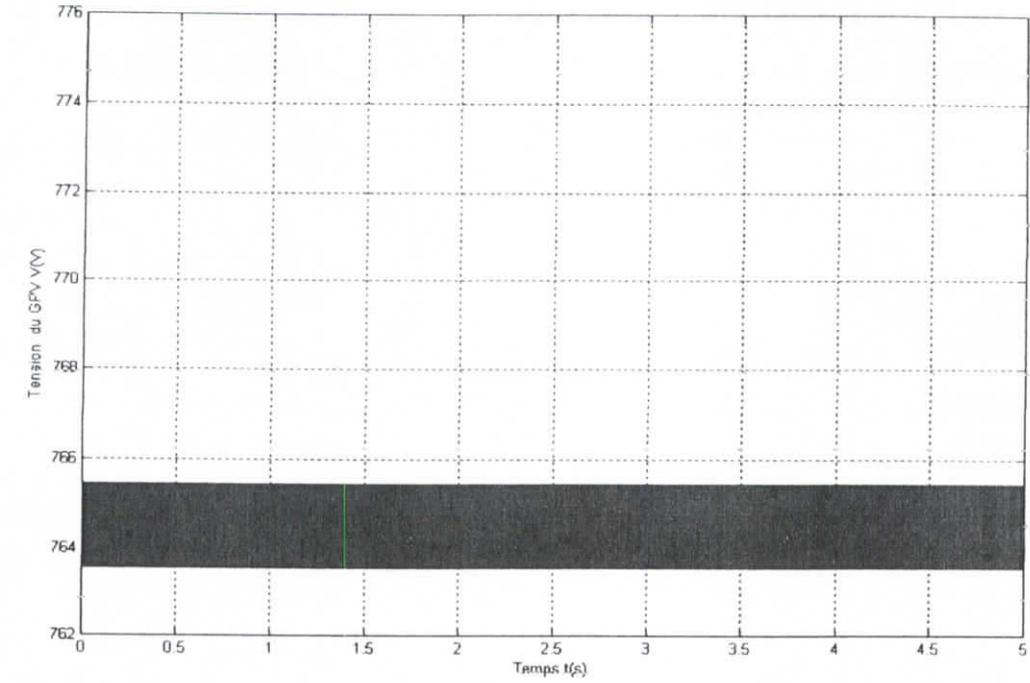


Figure IV.28 : Le courant du générateur photovoltaïque pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .



FigureIV.29 : Tension du générateur photovoltaïque pour un ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$.

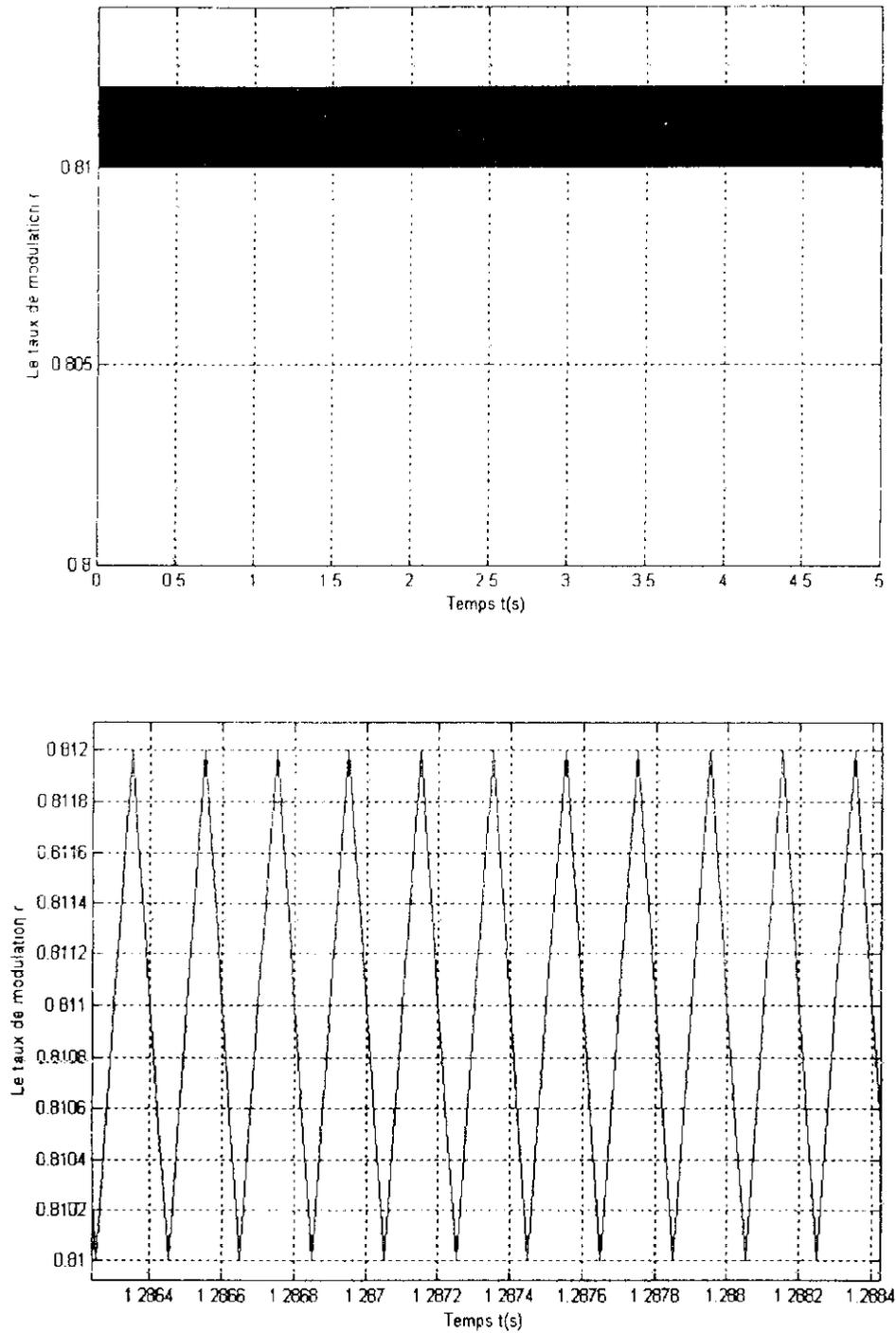
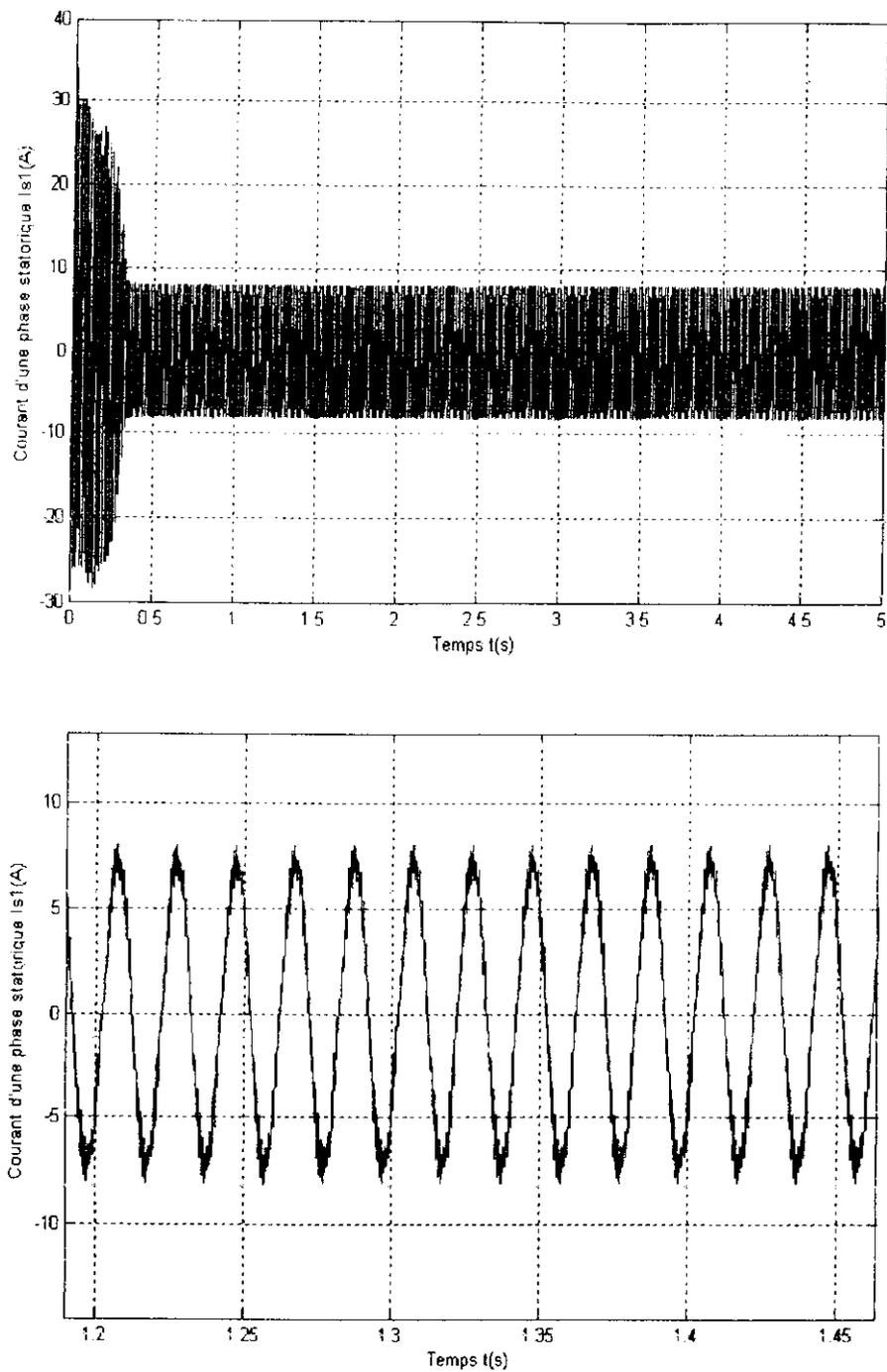


Figure IV.30 : Le taux de modulation de l'onduleur pour un ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$.



FigureIV.31 : Le courant d'une phase statorique pour un ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$.

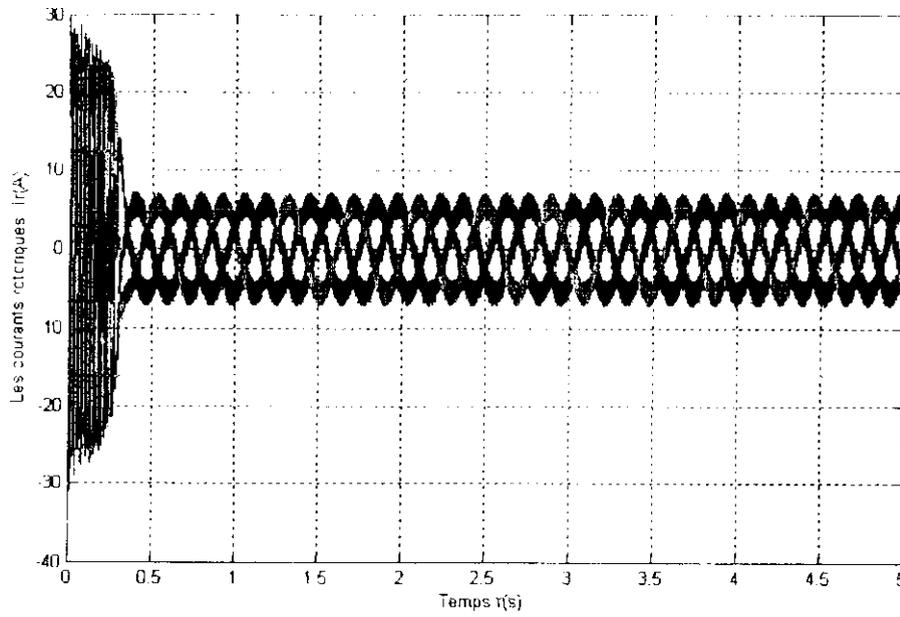


Figure IV.32 : Les courants des phases rotoriques pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

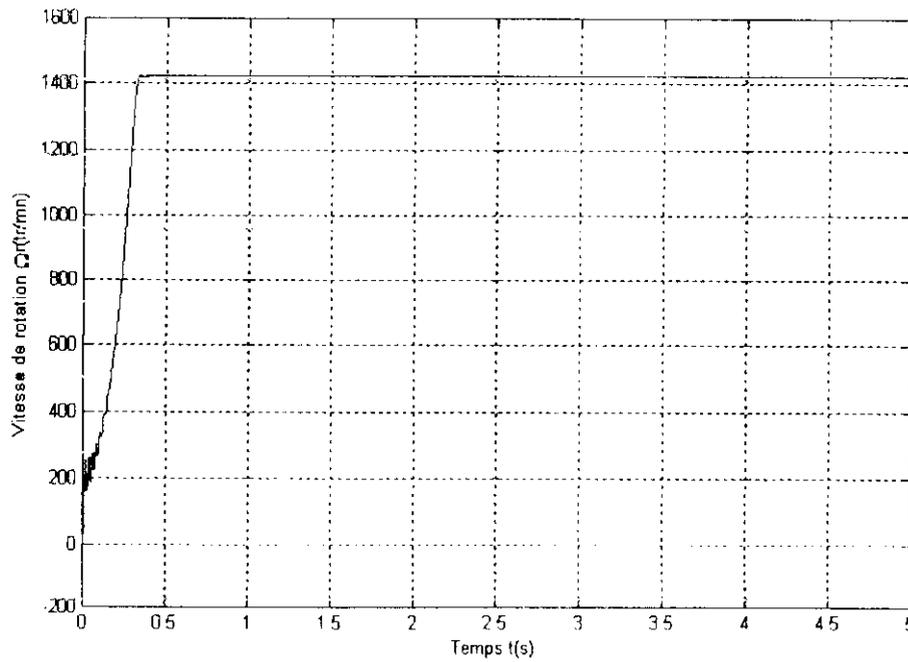
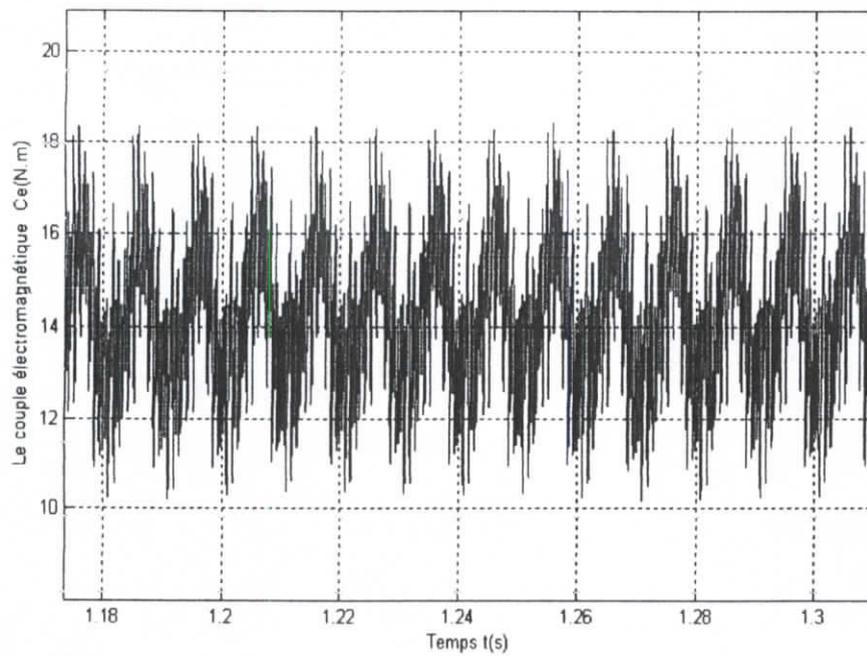
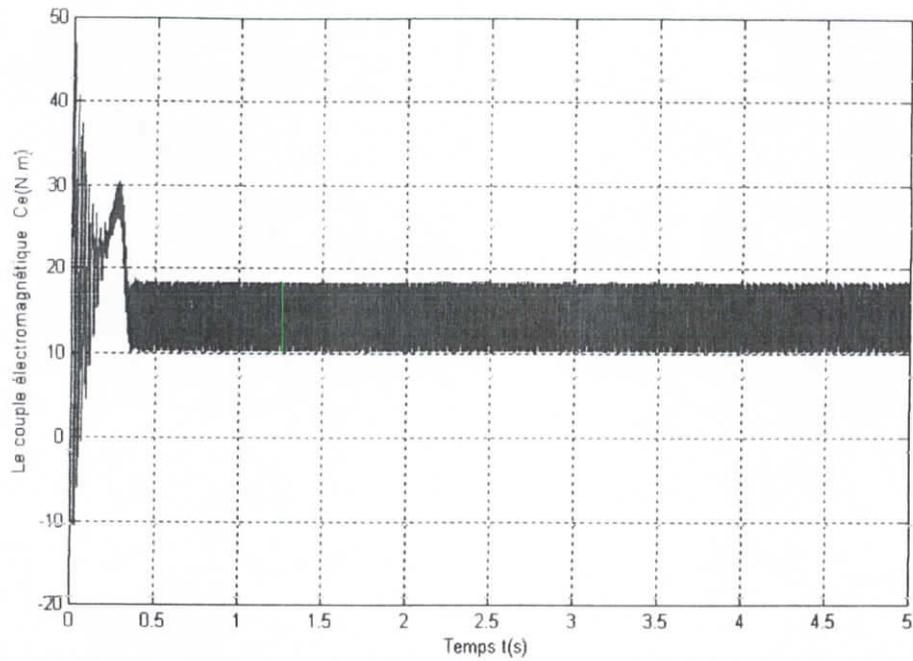


Figure IV.33 : La vitesse de rotation de l'arbre du moteur pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .



FigureIV.34 : Le couple du moteur pour un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

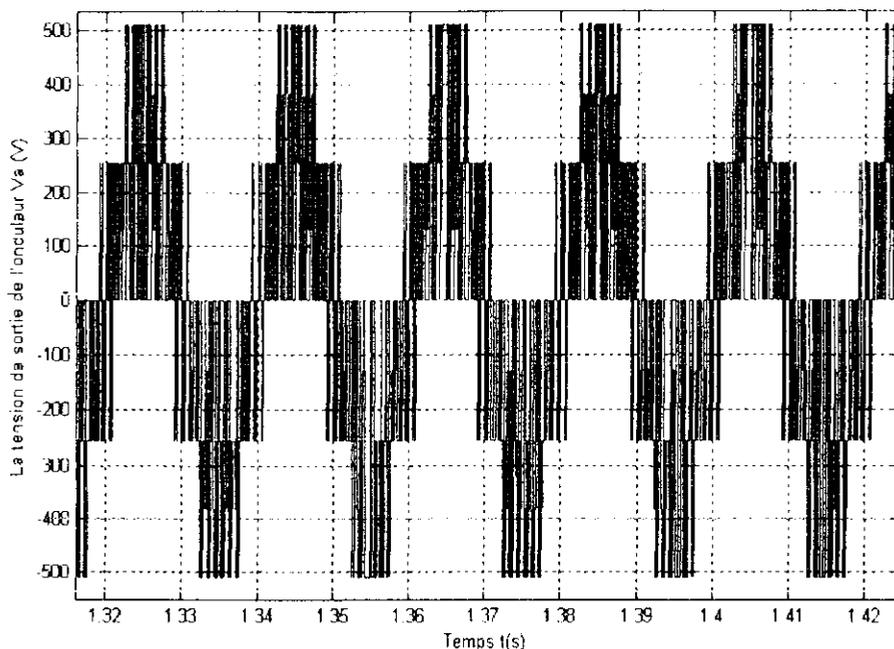


Figure IV.35 : La tension de sortie de l'onduleur pour un ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$.

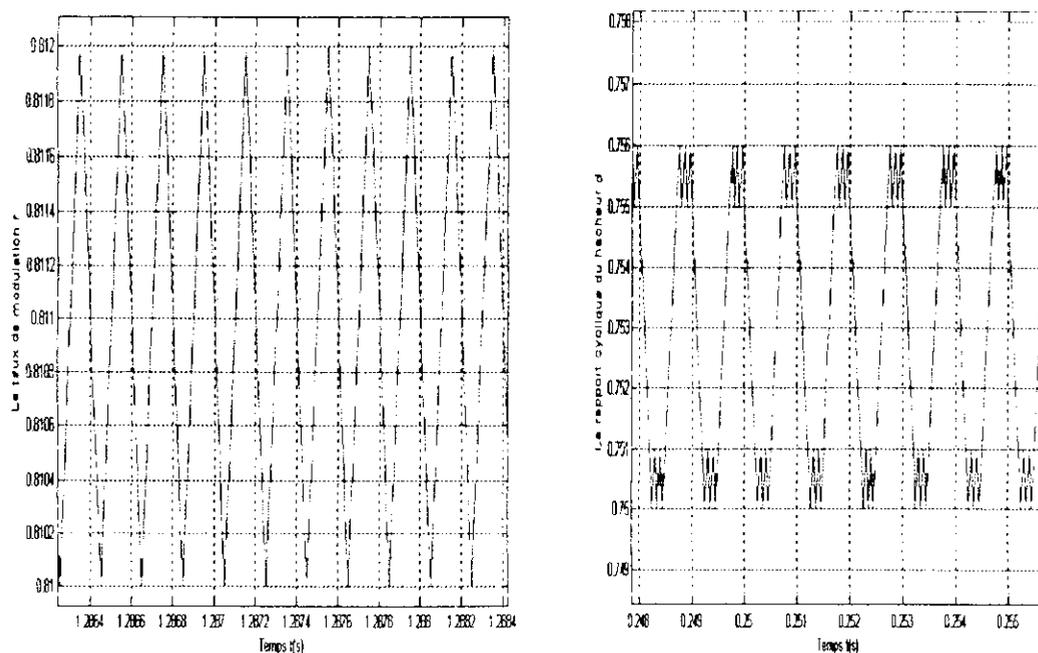


Figure IV.36 : Comparaison entre les plages de variation de d et de r. Les courbes suivantes donnent la réponse du système à une telle variation d'ensoleillement :

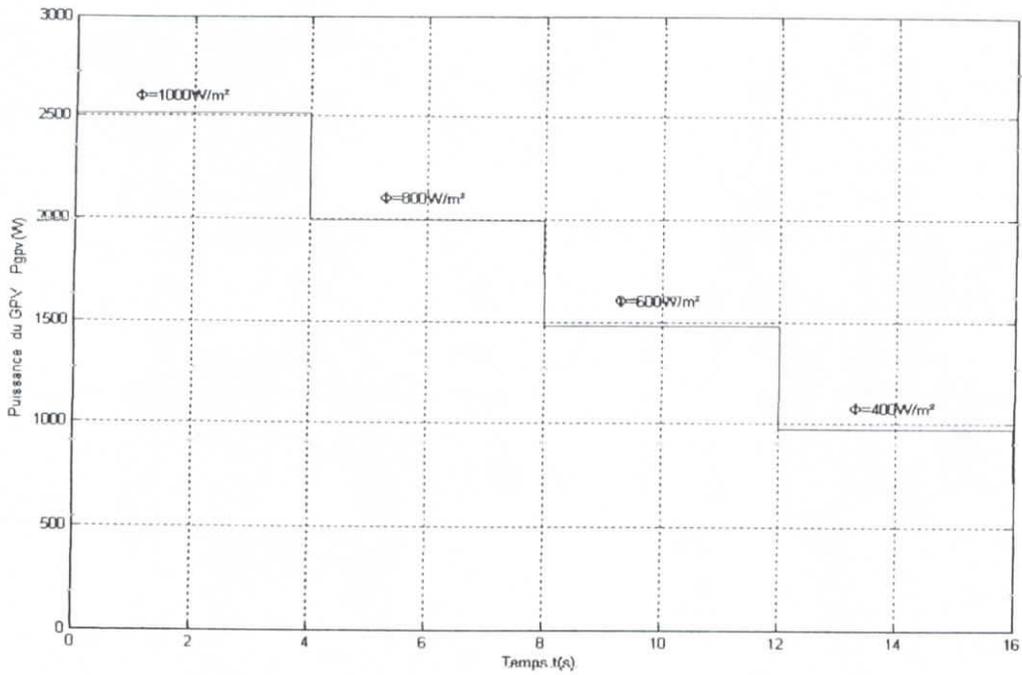


Figure IV.37 : La puissance du générateur photovoltaïque pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

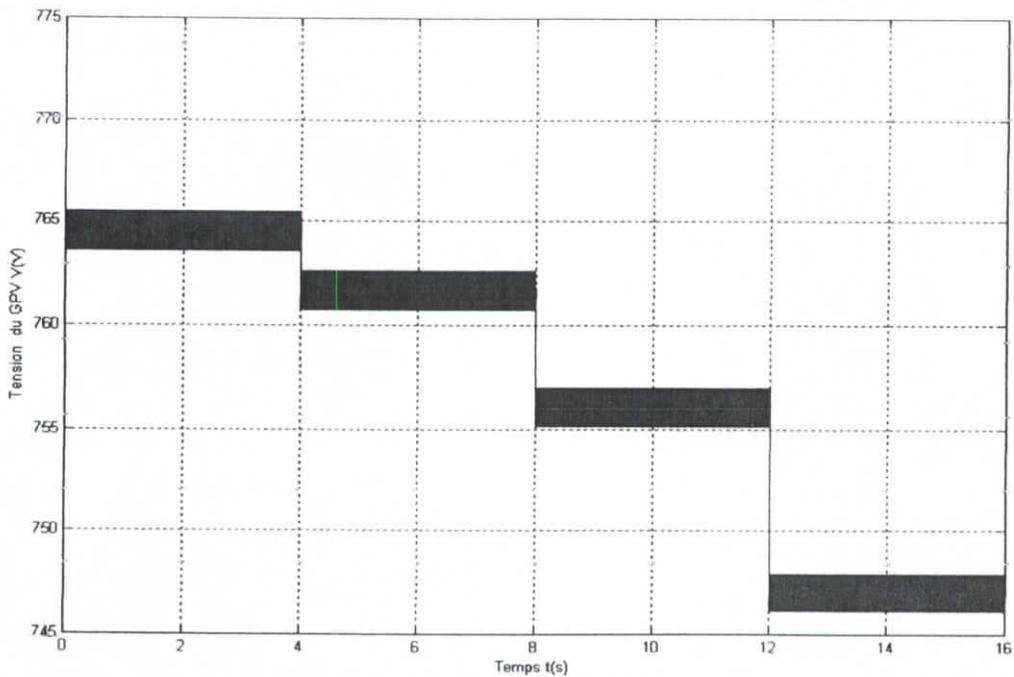


Figure IV.38 : La tension du générateur photovoltaïque pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

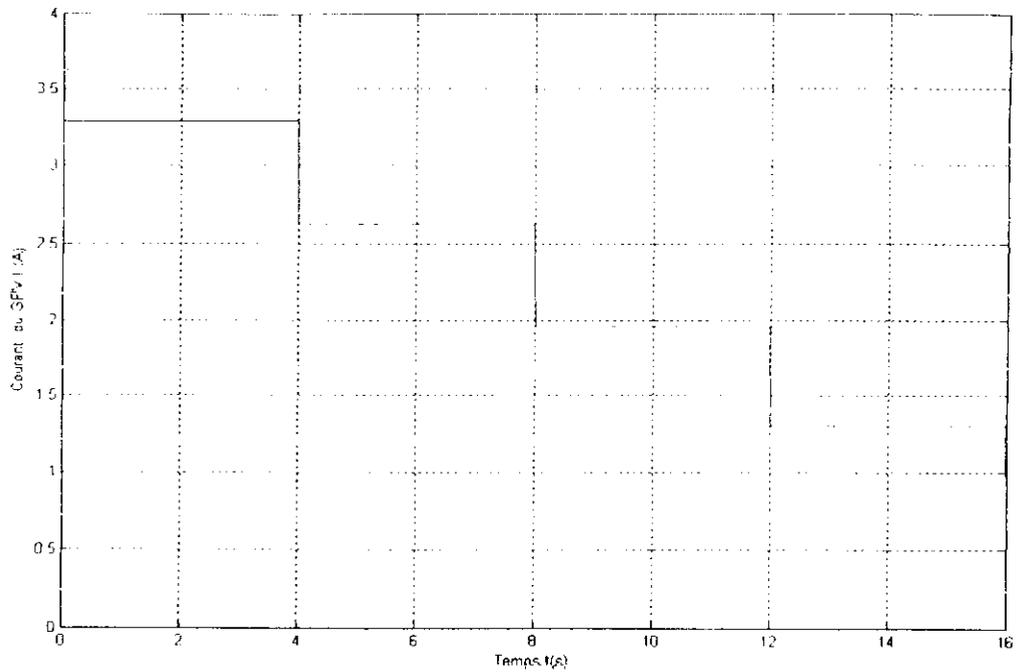


Figure IV.39 : Le courant du générateur photovoltaïque pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

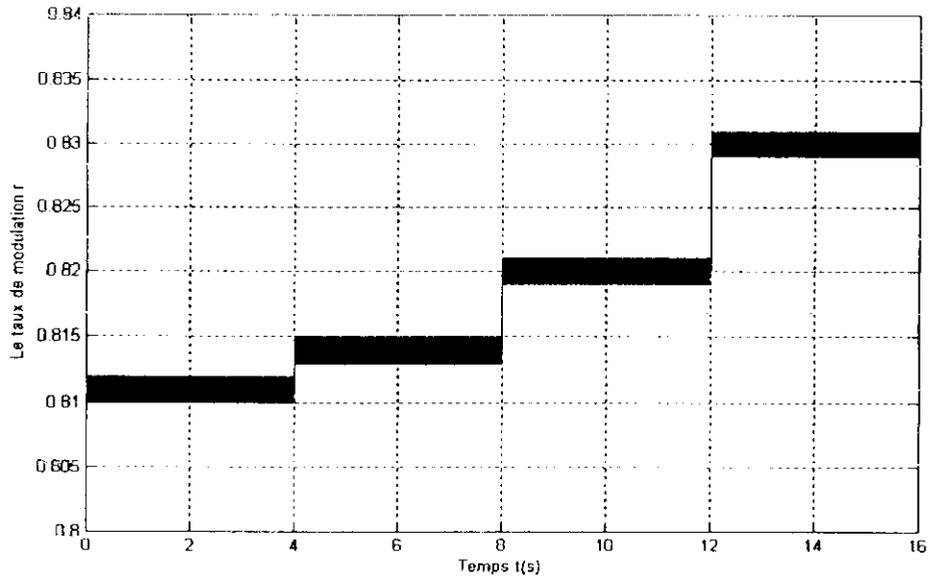


Figure IV.40 : Le taux de modulation r pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

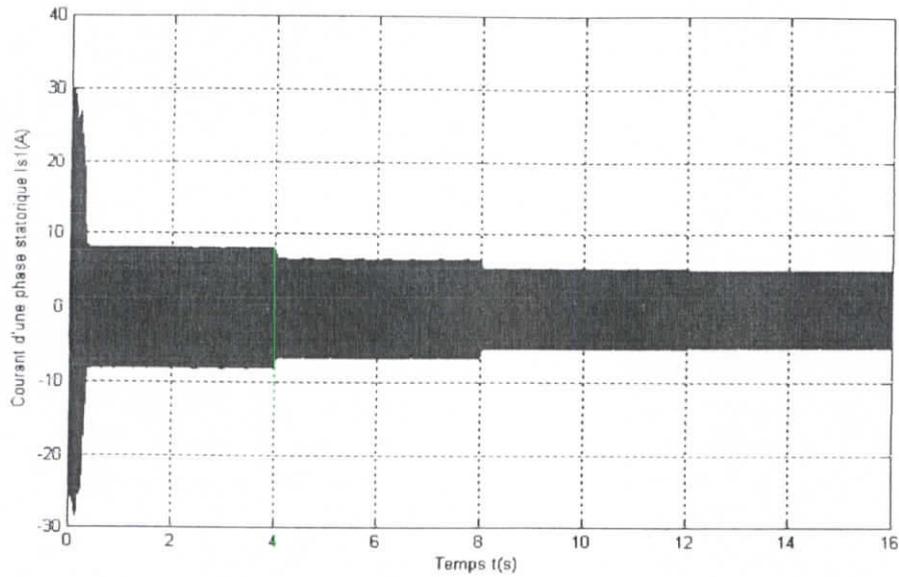


Figure IV.41 : Le courant statorique pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

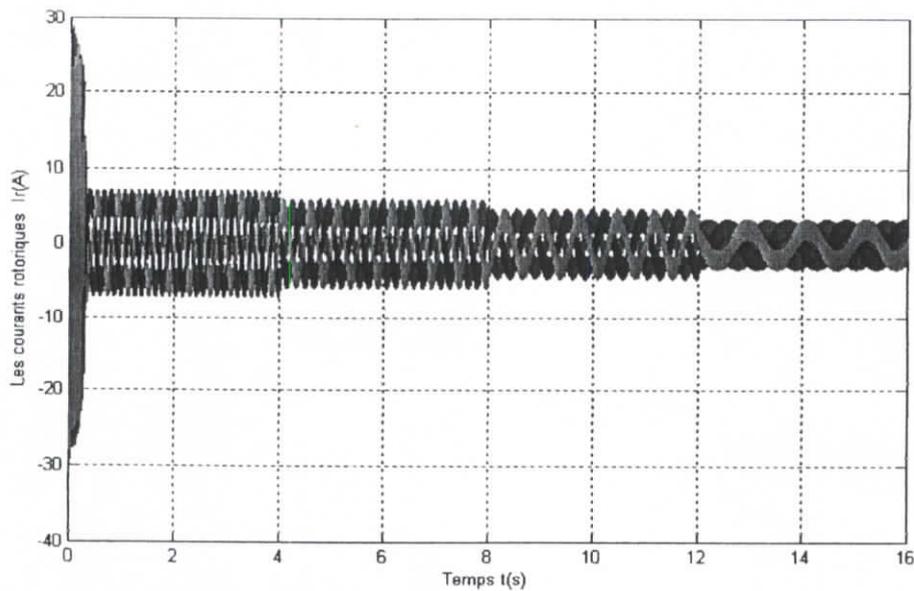


Figure IV.42 : Les courants rotoriques pour une variation de l'éclairement de 1000W/m^2 à 400W/m^2 par pas de 200 W/m^2 à $T=25^\circ\text{C}$.

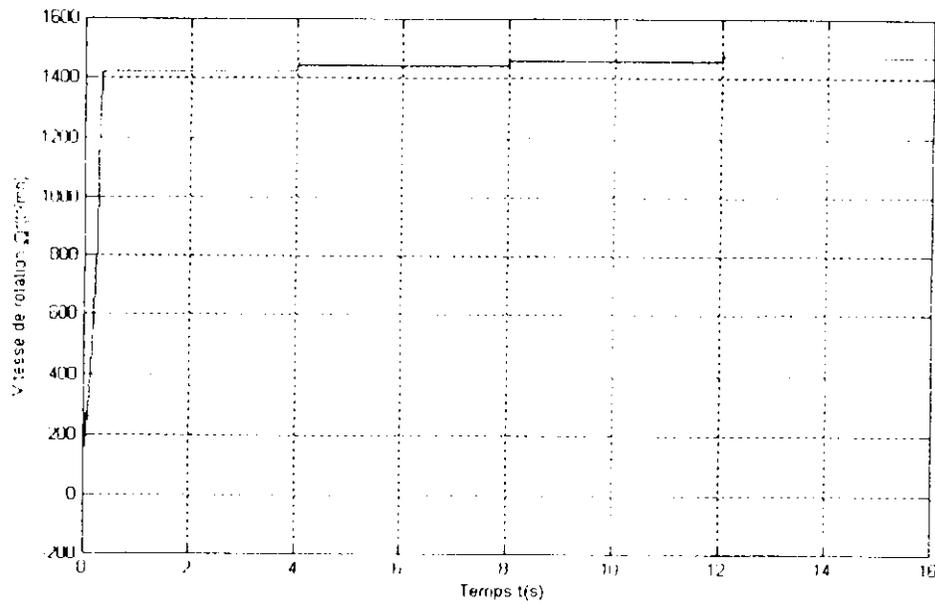


Figure IV.43 : La vitesse de rotation de l'arbre du moteur pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

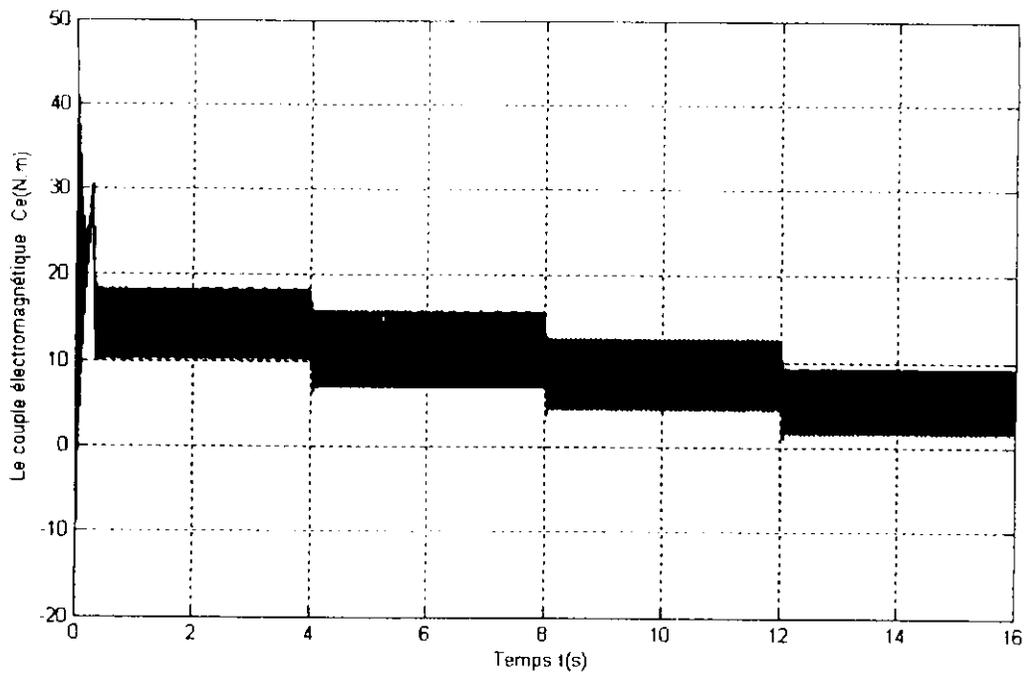


Figure IV.44 : Le couple du moteur pour une variation de l'éclairement de 1000W/m² à 400W/m² par pas de 200 W/m² à T=25°C.

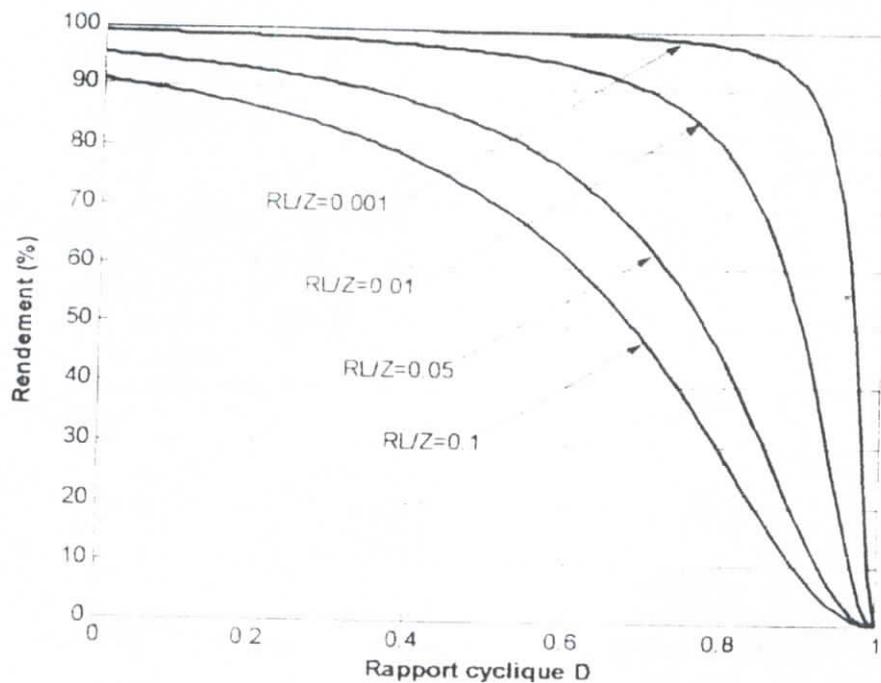


Figure IV.45 : Rendement du hacheur en fonction du rapport cyclique d .
 R_L : résistance de la bobine du hacheur.
 Z : l'impédance de la charge à la sortie du hacheur.

IV.4.Conclusion

Le modèle global simule un système de pompage photovoltaïque (la pompe est exclue de la simulation) sans batteries.

Les courbes simulées présentent clairement l'influence des conditions climatiques (l'ensoleillement) sur le système.

Les résultats de la simulation du système global avec et sans hacheur sont les mêmes par rapport au moteur.

La simulation des systèmes avec et sans hacheur montre que le système sans hacheur est meilleur car c'est celui qui délivre le plus de puissance dans les mêmes conditions atmosphériques et ceci avec un meilleur rendement.

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 (figure IV.46).

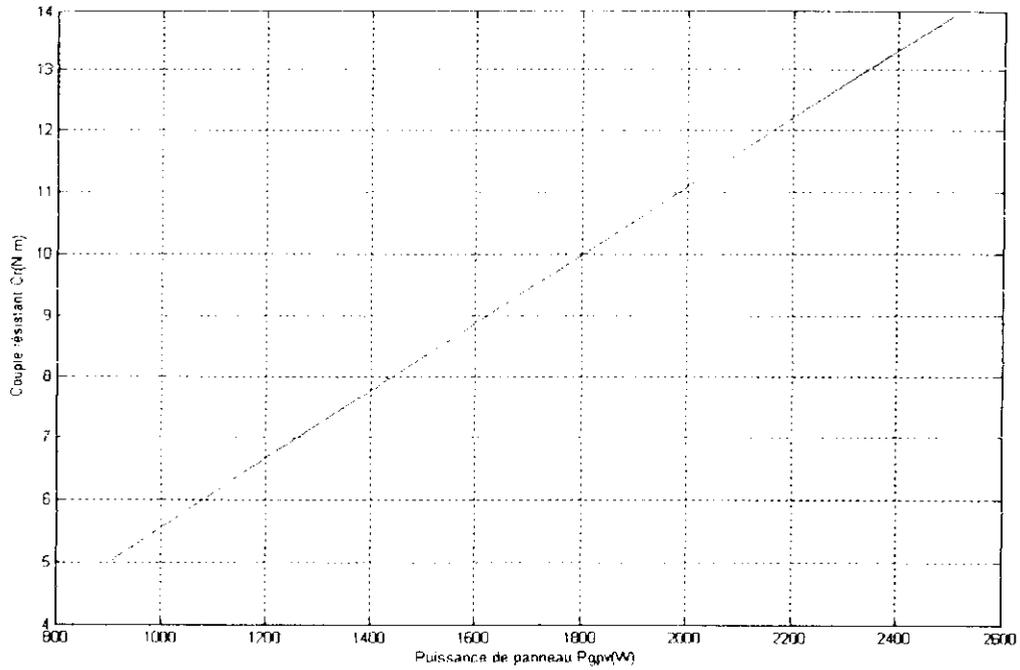


Figure IV.46 : Couple résistant en fonction de la puissance du générateur photovoltaïque.

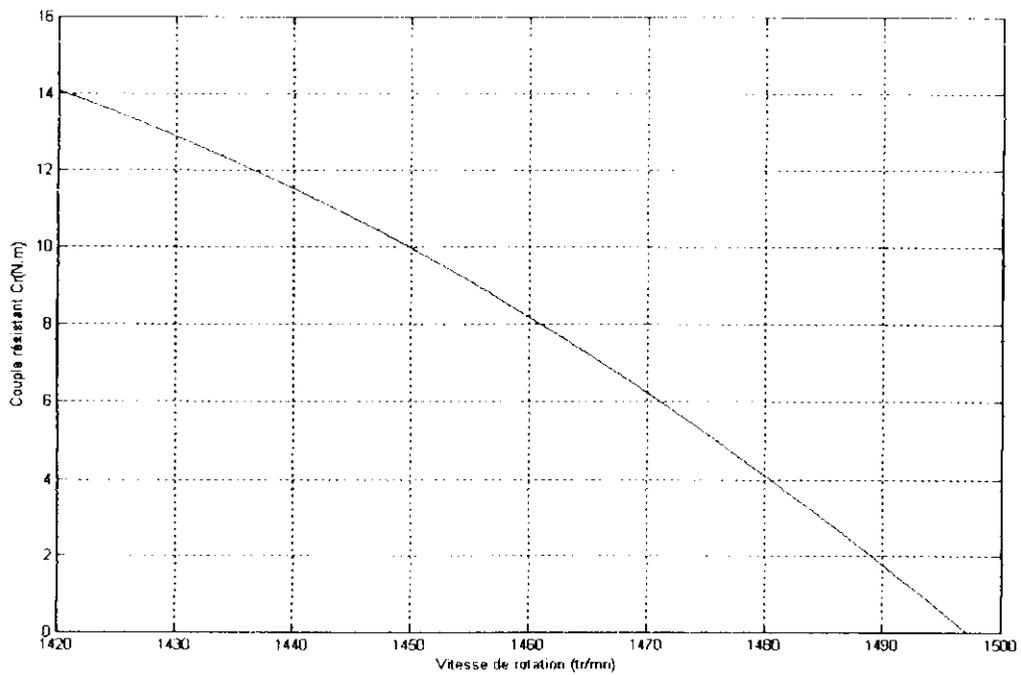


Figure IV.47 : Le couple résistant en fonction de la vitesse de rotation.

Conclusion générale

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.

Notre travail consiste à étudier un système de pompage photovoltaïque sans batteries dans le but d'augmenter son rendement et absorber le maximum de puissance du générateur. Pour cela, nous avons simulé le même système de pompage avec un hacheur puis sans hacheur en faisant les changements nécessaires pour un bon fonctionnement. Nous avons constaté que sans hacheur le rendement est plus élevé et la puissance récupérée est plus grande.

A travers ce travail, nous avons vu les caractéristiques de chaque partie ainsi que du système global avec et sans hacheur.

En ce qui concerne le moteur asynchrone qui entraîne 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 du moteur asynchrone, ce qui maximise l'efficacité énergétique.

Le pompage photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- Une haute fiabilité du fait qu'il ne comporte pas de pièces mobiles ce qui le rend particulièrement approprié aux régions isolées ;
- 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 différentes puissances ;
- Le coût de fonctionnement est faible car l'entretien est réduit et ils ne nécessitent ni combustible ni transport ni personnel hautement spécialisé ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation de milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [8].

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

Le coût du panneau solaire est élevé et le rendement est faible ce qui fait que sa rentabilité ne commence qu'après plusieurs années.

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

Bibliographie

- [1] M. Veerachary, T. Senjyu, K. Uezato. Voltage-Based Maximum Power Point Tracking Control of PV System.
IEEE transactions on aerospace and electronic systems vol. 38, NO. 1, January 2002
- [2] D. C. Martins, R. Demont, J. Barbe. Usage of Solar Energy from the Photovoltaic Panels for the Generation of Electrical Energy
- [3] O. Gergaud. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur
Thèse de doctorat, école supérieure de Cachan 2002
- [4] M. Godoy Simoes, N. N. Franceschetti. A Risc-Microcontroller Based Photovoltaic System For Illumination Applications.
IEEE 05508-900, S. Paulo 2000
- [5] A. Ricaud. Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés.
Presses polytechniques et universitaires romandes
- [6] V. Salas, M. J. Manzanar, A. Lazaro, A. Barrado and E. Olias. The Control Strategies for Photovoltaic Regulators Applied to Stand-alone Systems.
IEEE 0-7803-7474-6, Madrid 2002
- [7] N. K. Lujara, J.D.V. Wyk, P. N. Materu. Power Electronic Loss Models of dc-dc Converters in Photovoltaic Applications.
IEEE 0-7803-4756-0, 1998
- [8] B. Ramdane, B. Dabouz. Contribution à l'Etude et la Commande d'un Moteur Asynchrone Alimenté par un Système Solaire. Application au Pompage Photovoltaïque.
ENP 2003.
- [9] M. Orgeret. Les piles solaires, le composant et ces applications. Masson, 1985
- [10] A. Ricaud. Photopiles Solaires
- [11] P. Audibert. Les énergies du soleil
Edition du seuil, 1978.
- [12] Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique. Convertisseurs photovoltaïques.
- [13] K. Sobaihi. Etude et réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension.
Mémoire de Magister, ENP Novembre 2003
- [14] Jeune Afrique N° 2241-2242 du 21 décembre 2003
- [15] F. Labrique, G. Segulier. Les convertisseurs de l'électronique de puissance Tome 4, La conversion continue-alternative, TEC&DOC, Lavoisier, 1989
- [16] GRUNDFOS. Système de pompage solaire 92.

Web biographie

[www.perso.wanadoo.fr \energies-nouvelles-entreprises\consult.htm](http://www.perso.wanadoo.fr/~energies-nouvelles-entreprises/consult.htm)

www.total-energie.fr

www.enerdev.org

www.solargie.com

ANNEXE

Annexe A

Caractéristique des différentes parties du système de pompage simulé

A.1. Caractéristiques du module solaire

$$n_s=36.$$

$$n_p=1.$$

$$P_{max}=70W.$$

$$V_{oc}=24.48V.$$

$$I_{oc}=3.45A.$$

$$V_{opt}=21.1V.$$

$$I_{opt}=3.28A.$$

$$R_s=0.005\Omega.$$

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

Type de cellules solaires : monocristalline.

A.2. Caractéristiques du hacheur

$$C_1=950\mu F.$$

$$C_2=90\mu F.$$

$$L=80\mu H.$$

$$f=1kHz.$$

A.3. Caractéristiques du moteur asynchrone

$$P_u=2kW.$$

$$2 \cdot p=4.$$

Phase: 3.

$$V=220/380V.$$

$$I=6.3A/3.2A.$$

$$C_n=14N.m.$$

$$\Omega_n=1428tr/mn.$$

$$\cos \varphi =0.8.$$

$$R_s=3.5\Omega.$$

$$R_r=2.5\Omega.$$

$$L_m=0.294 mH.$$

$$L_s=0.31mH.$$

$$L_r=0.31mH.$$

$$\eta=0.8.$$

Annexe B

Les pompes

B.1. Choix du type de la pompe

Le choix de la pompe, lors de la conception d'un système de pompage d'eau, est important et est lié aux exigences du service envisagé [8].

Deux conditions doivent être satisfaites :

1-La première est liée aux besoins de l'utilisateur.

Les facteurs les plus importants à déterminer sont :

- La hauteur totale d'élévation H .
- 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 20m) pour des débits moyens (de $2\text{m}^3/\text{h}$ à $40\text{m}^3/\text{h}$). Les trois types de pompes suivants peuvent ainsi être utilisés :

- **La pompe alternative** qui est bien adaptée aux faibles débits (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 de très faibles valeurs jusqu'à des valeurs moyennes (inférieures 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 [8].

2-La deuxième condition est liée au type de moteur d'entraînement utilisé, en particulier au démarrage et à 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 [8].

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 [8].

En général, 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 [8].

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 [8].

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 [8].

B.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 spécifiques appelées pertes de charges, celles-ci sont dues au frottement du liquide, à la rugosité des parois et au frottement mécanique [8].

Les principaux éléments constituant la pompe sont :

- Une roue mobile ou impulsée 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 [8].

Ces machines ne comportent pas de pistons, elles sont donc simples et robustes. Elles ne s'amorcent pas seules à moins d'être dotées d'un dispositif spécial d'amorçage [8].

B.3.Relations fondamentales et tracées des caractéristiques

B.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 sera :

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

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

- Les pertes de charge dues aux frottements et en partie des 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 [8].

B.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 [8].

La puissance utile ou la puissance fournie par une pompe est l'énergie qui est transmise en une seconde au liquide par cette pompe [8].

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

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 :

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

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.

B.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 2) 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 [8].

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

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 [8].

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 [8].

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 vitesse de rotation N_2 et ceci en utilisant les formules de similitude [8].

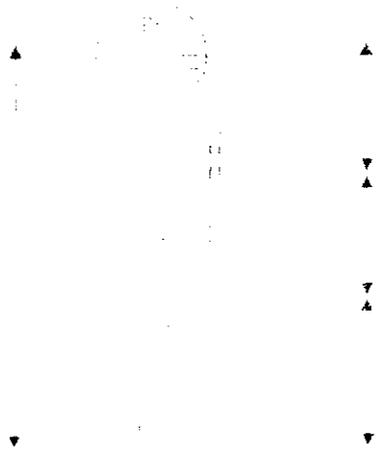


Figure 1 : Mesure de la hauteur créée par une pompe.

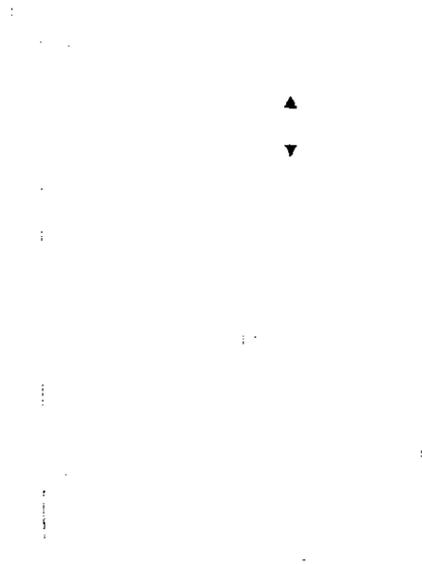


Figure 2 : Tracé de la caractéristique calculée.

Annexe C

Les étapes d'installation d'un système de pompage solaire

Etape 1

Valeur du rayonnement solaire

Pour tous les mois de l'année, l'ensoleillement moyen sur une surface horizontale (en cal/cm^2 jour) 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 [8].

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 on ne possède pas d'informations suffisantes sur la quantité d'eau à pomper par jour, on peut établir une estimation en fonction des besoins approximatifs en eau pour les personnes, les animaux et les cultures dans les régions tropicales [8].

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 [8].

Le panneau solaire est disponible avec des différentes longueurs de jambes support correspondant aux angles d'inclinaison de 15° à 50° [8].

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

La position du soleil dans le ciel dépend de la date. Au printemps et en 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 [8].

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 [8].

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 [8].

Il se trouve qu'un angle d'inclinaison fixe entre la latitude -15° et la latitude $+15^\circ$ ne causera que de petites variations de la puissance maximale produite pendant l'année [8].

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 à l'automne [8].

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 [8].

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

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°29'	15°
Les forts en été (lat. -15°)	-37°29'	30°
Les fort en hiver (lat. +15°)	+39°99'	50°

+ : latitude nord.

- : latitude sud.

Etape 4

Ensoleillement sur la surface inclinée

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

L'énergie solaire reçue sur la surface inclinée est :

H_T (kWh/m² jour).

Energie solaire reçue sur le plan horizontal :

H_H (cal/cm² jour).

$$H_T = H_H * \frac{1}{86} * F_T \text{ (kWh/m}^2 \text{ jour).}$$

($\frac{1}{86}$ 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 [8].

Annexe D

Etude économique de l'installation d'un système de pompage photovoltaïque

Le but de cette étude est d'avoir une idée générale sur le coût de l'installation et de sa rentabilité. Dans notre cas, on va s'intéresser au coût du panneau, du moteur et de la pompe car ils présentent les parties les plus coûteuses de l'installation sans prendre en compte le coût du réservoir.

D.1. Dimensionnement des différents éléments de l'installation

Panneau solaire

Notre choix va se porter sur un panneau avec des cellules en silicium monocristallin car elles sont garanties 25 ans; le panneau utilisé a une puissance max de 2511W. En se basant sur les données du site internet : www.perso.wanadoo.fr/energies-nouvelles-entreprises/consult.htm, nous avons choisi le module SHE060 ayant les caractéristiques suivantes :

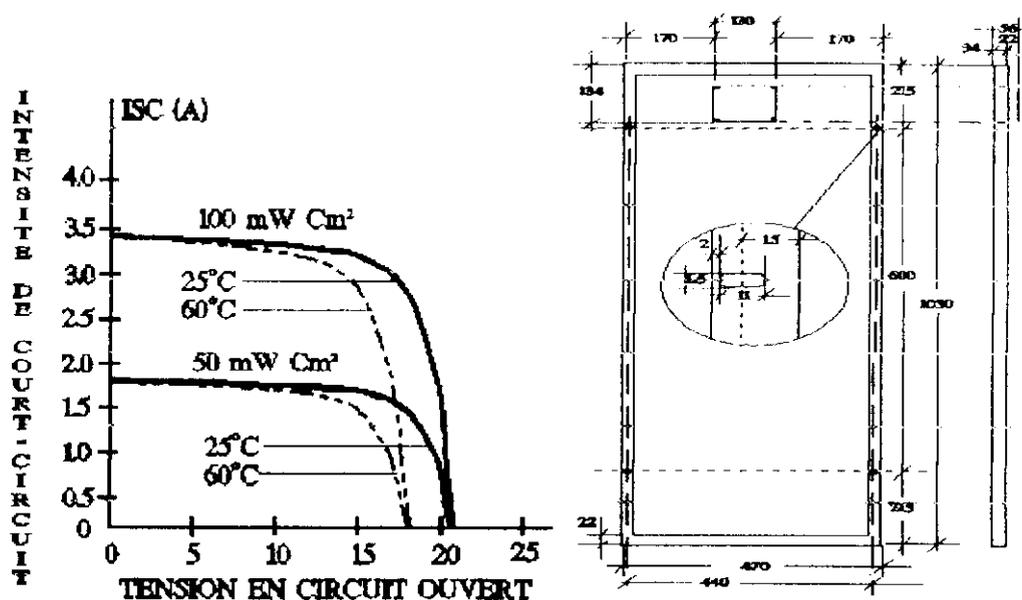


Figure3 Caractéristique $I=f(V)$ et dimension du module SHE060.

Caractéristiques du module SHE060 :

PUISSANCE MAXIMUM DU PANNEAU:	60 W
COURANT DE COURT - CIRCUIT:	3.65 A
TENSION EN CIRCUIT OUVERT:	20.9 V
VOLTAGE DU PANNEAU A P. MAX:	17.7 V
COURANT DU PANNEAU A P. MAX:	3.40 A
VARIATION DE TENSION/TEMPÉRATURE:	-90 mV/°C

Pour obtenir la puissance désirée, nous avons associé 42 modules en série. Le prix d'un module en euro est de 374.85 euro (HT) soit l'équivalent en dinar de 31 650 DA (HT). Son prix TTC est de 37335DA (TTC) ce qui fait que le prix total du panneau est de 1 334 463DA.

Moteur asynchrone et pompe

La puissance maximale délivrée par le panneau est de 2520 W, donc notre moteur doit avoir une puissance au moins égale à 2520W afin de ne pas avoir un excès de puissance (qui serait perdue car notre système ne comporte pas de batteries).

Le choix de la pompe va imposer le choix du type de moteur, pour cela on doit poser certaines données nécessaires :

- La hauteur du puits au réservoir est de 35m ;
- Le débit de la pompe est de 11m³/h.

A partir du catalogue de constructeur Grundfos, on a porté notre choix sur la pompe et le moteur du type CH 12-50 :

Une pompe centrifuge multicellulaire avec orifice d'aspiration axial et orifice de refoulement radial et un moteur asynchrone triphasé monté en socle.

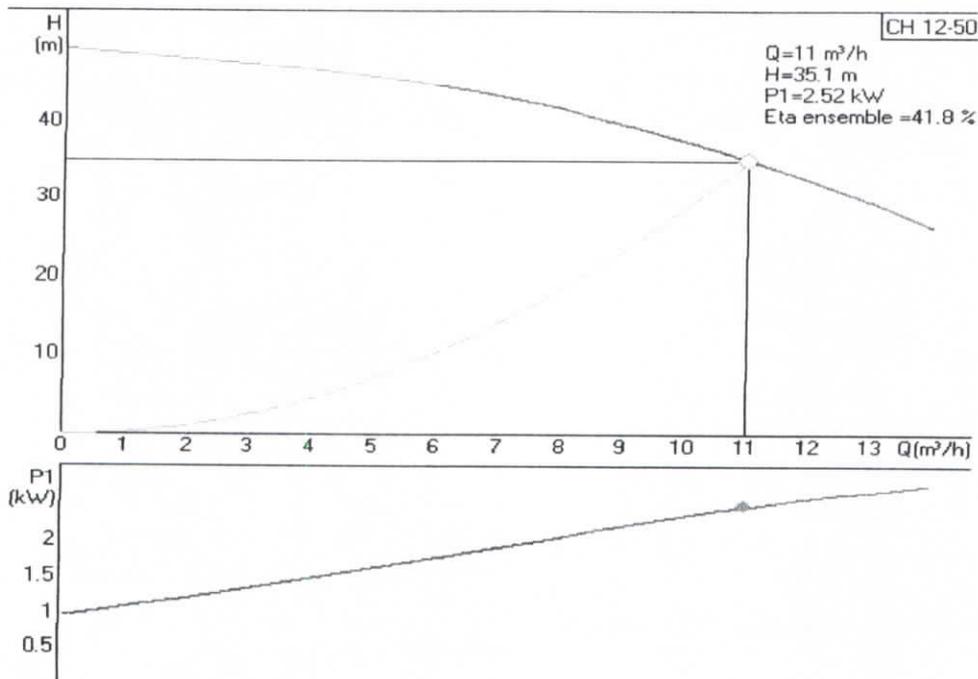


Figure 4 : Caractéristique de la pompe et du moteur.

Le prix de cet ensemble est de 640euro soit 50 350 DA (TTC), en ajoutant à cela :

- le coût des fils d'alimentation, de l'onduleur et de la tuyauterie estimé à 50 000 DA ;
- le coût de la main d'œuvre pour l'installation du système estimé à 50 000 DA.

Donc, le coût total de l'installation estimé à **1 440 000 DA**.

Rentabilité de la station de pompage photovoltaïque

On suppose que la station fonctionne en moyenne 8h /jour, ce qui fait sur une année 2848 heures avec un débit moyen de $10\text{m}^3/\text{h}$, soit un total d'eau pompée sur une année de $28\,480\text{ m}^3$.

Le prix du mètre cube est facturé à 4DA, alors la station rapporte un total annuel de **113 920 DA**. Donc, l'amortissement de l'investissement initial se fera sur 13ans.

