

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie électrique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en : Electrotechnique

Option : commande et motorisation de véhicule électrique

**Adaptation d'un système d'entraînement d'un pivot
d'irrigation alimenté par énergie PV**

Présenté par :
Hammoudi Djilali

Soutenu publiquement le **11 juillet 2016**

Devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------|---------------------------|------------|----------------------|
| Pr. Ammar Moussi | Professeur | Rapporteur | Université de Biskra |
| Pr. Betka Achour | Professeur | Président | Université de Biskra |
| Pr. Rabhi Boualagua | Maitre de conférences 'A' | Examineur | Université de Biskra |
| Pr. Abderazzak Debilou | Maitre de conférences 'A' | Examineur | Université de Biskra |

Introduction générale 01

Chapitre I : le pivot solaire

I.1.Introduction 03

I.2.description des techniques d'irrigation 04

I.3.Classification des Systèmes d'irrigation 04

I.3.1.Irrigation gravitaire 04

I.3.1.1Irrigation à la raie 05

I.3.1.2. L'irrigation par bassin 07

I.3.1.3.L'irrigation par planche 08

I.3.1.4. Avantages et inconvénients de l'irrigation gravitaire..... 08

I.3.2. Irrigation goutte à goutte 09

I.3.3. L'irrigation par aspersion 10

I.4. Le système d'irrigation par pivot solaire 13

I.4.1. Introduction 13

I.4.2. Historique de pivot d'irrigation 14

I.4.3. Principe de fonctionnement..... 14

I.4.4.Descriptif technique 15

I.4. 4. 1. L'élément central..... 15

I.4. 4. 2. Les travées 15

I.4. 4. 3. Les tours 16

I.4. 4. 4. Le motoréducteur..... 16

I.4. 4. 5. Les roues 17

I.4. 4. 6. La conduite d'arrosage..... 17

I.4. 4. 7. Le porte -à-faux..... 18

I.4. 4. 8. Le générateur 18

I.4. 4. 7. L'alignement 19

I.4.5. L'alimentation en eau 19

I.4. 6.Mode de fonctionnement 19

I.4.7. Le système de commande du pivot irrigation 20

I.4.8. Les avantages d'un pivot d'irrigation solaire 21

I.4.9. Les inconvénients d'un pivot d'irrigation 21

I.5.Dimensionnement et conception le système d'irrigation étudié 21

I.5.1.Caractéristiques techniques des pivots et équipements 22

I.5.2.Programme d'irrigation à vitesse d'avancement 100%..... 22

I.5.3.Dose journalière de pointe..... 22

I.5.4.Calcul de rythme du passage 23

I.6.Conclusion 23

chapitre II: énergie solaire photovoltaïque

II.1.Introduction 25

II.2. Caractéristiques du Rayonnement Solaire 25

II.2.1.Le spectre de rayonnement solaire 26

II.3. Rappel sur les semi-conducteurs 27

| | |
|---|----|
| <i>II.3.1. Dopage du silicium</i> | 28 |
| <i>II.3.1.1. Dopage de type N</i> | 28 |
| <i>I.3.1.2. Dopage de type P</i> | 28 |
| <i>II.3.2 La jonction N-P</i> | 28 |
| <i>II.4 La cellule photovoltaïque</i> | 28 |
| <i>I.4.1 Historique</i> | 28 |
| <i>II.4.2 L'effet photovoltaïque</i> | 29 |
| <i>II.4.3 Rendement Photovoltaïque</i> | 30 |
| <i>II.4.4 Les différents types de cellules solaires</i> | 30 |
| <i>II.4.4.1 La filière Silicium</i> | 30 |
| <i>I.4.4.2 Les filières dites « Couches Minces »</i> | 31 |
| <i>II.5. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)</i> | 31 |
| <i>II.5.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle</i> | 31 |
| <i>II.5.2. Association de cellules photovoltaïques en série</i> | 32 |
| <i>II.5.3. Le module photovoltaïque</i> | 32 |
| <i>II.5.4. générateur photovoltaïque</i> | 33 |
| <i>II.6. Implantation du champ de modules</i> | 33 |
| <i>II.7. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque</i> | 33 |
| <i>II.8. Influence de l'Éclairement</i> | 34 |
| <i>I.9. Influence de la Température</i> | 35 |
| <i>II.10. Connexion directe source-charge</i> | 35 |
| <i>II.11. Modélisation du générateur photovoltaïque</i> | 36 |
| <i>II.11.1 Cellule photovoltaïque idéale-</i> | 36 |
| <i>II.11.2 Cas d'une cellule réelle</i> | 37 |
| <i>II.12. les caractéristiques électriques d'un module PV</i> | 39 |
| <i>II.12 .1.Courant de court-circuit</i> | 40 |
| <i>II.12 .2.Tension de circuit ouvert</i> | 40 |
| <i>II.12 .3.Puissance optimale</i> | 41 |
| <i>II.12. 4. Le facteur de forme</i> | 41 |
| <i>II.12. 5. Rendement de conversion</i> | 41 |
| <i>II.13. Simulation du générateur PV</i> | 42 |
| <i>II.13. 1.Les caractéristiques électriques du panneau PV</i> | 42 |
| <i>II.13.2 L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV</i> | 43 |
| <i>II.13.3 L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau</i> | 43 |
| <i>II.13.4 Simulation sans MPPT (connexion direct)</i> | 44 |
| <i>II.14.CONCLUSION</i> | 45 |
| <i>chapitre: Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT</i> | |
| <i>III.1.Introduction</i> | 46 |
| <i>III.2. Convertisseurs DC/DC</i> | 46 |
| <i>III.2.1. Hacheur dévolteur « Buck »</i> | 47 |
| <i>III.2.1.1. Modèle mathématique du circuit équivalent</i> | 48 |
| <i>III.2.1.2. Approximation des Petites ondulations</i> | 48 |
| <i>III.2.1.3. Étude du régime continue</i> | 49 |
| <i>III.2.1.4. Le rapport de conversion</i> | 50 |
| <i>III.2.2. Hacheur survolteur « Boost »</i> | 51 |

| | |
|---|----|
| III.2.3. Hacheur dévolteur-survolteur « Buck-Boost converter » | 52 |
| III.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) | 53 |
| III.4.Classification des commandes MPPT selon le type de recherche..... | 54 |
| III.4.1.Méthodes à contre réaction de tension | 54 |
| III.4.1.1.Référence fixe | 55 |
| III.4.1.2.Référence en fonction de V_{oc} | 55 |
| III.4.1.3.Tension de référence externe (Cellule pilote) | 56 |
| III.4.2. Méthodes à contre réaction de courant | 57 |
| III.4.3. Algorithme ‘incrémental conductance : | 57 |
| III.4.4. Commande MPPT par réseaux de neurones | 57 |
| III.4.5. Commande MPPT par logique floue..... | 57 |
| III.4.6. Méthode ‘perturbation et observation’ | 57 |
| III.4.7. Simulation Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) | 59 |
| III.4.7. 1.Simulation de l’Algorithme Perturbation et Observation (P&O) | 60 |
| III.4.7. 2.Simulation du hacheur Buck | 60 |
| III.4.7. 3.Fonctionnement sous des conditions climatiques stables | 61 |
| III.4.7. 4.Performance sous un niveau de rayonnement variant | 64 |
| III.4.7. 5.Simulation sous des conditions variables de température | 66 |
| III.5.Conclusion | 68 |

Chapitre IV: commande du pivot d’irrigation

| | |
|--|----|
| IV.1.Introduction | 69 |
| IV.2.Description de la machine asynchrone..... | 70 |
| IV.3.Modélisation du moteur asynchrone en vue de sa commande | 70 |
| IV.3.1.Modèle linéaire | 70 |
| IV.3.2.Modèle de la MAS dans le repère réel abc..... | 70 |
| IV.3.2.1.Les équations électriques | 71 |
| IV.3.2.2.Les équations magnétiques | 72 |
| IV.3.3.Équations en diphasée MSA | 73 |
| IV.3.3.1.Transformation de Concordia – référentiel (α, β) | 73 |
| IV.3.3.2.Transformation de Park – référentiel (u.v.)..... | 73 |
| IV.3.4. Application de la Transformation de Park à la MAS..... | 74 |
| IV.3.4.1.Équations électriques | 74 |
| IV.3.4.2.Équation magnétiques | 75 |
| IV.3.5. Choix de repère du référence | 75 |
| IV.3.6.Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant | 75 |
| IV.3.6.1.Équations électrique | 76 |
| IV.3.6.2.Équation magnétiques | 76 |
| IV.3.6.3.Équations mécaniques | 76 |
| IV.3.7. Mise sous forme d’état..... | 76 |
| IV.4.Modélisation de l’onduleur de tension | 77 |
| IV.5. Commande de l’onduleur | 79 |
| IV.5.1. MLI à porteuse triangulaire | 79 |
| IV.5.2. MLI à bande hystérésis | 79 |
| IV.6.Commande vectorielle de la MAS..... | 81 |

| | |
|--|---------|
| <i>IV.6.1.Introduction</i> | 81 |
| <i>IV.6.2.Principe de découplage dans une commande vectorielle</i> | 81 |
| <i>IV.6.3.Principe de la commande vectorielle par orientation du flux</i> | 81 |
| <i>IV.6.3.2. La Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté (IRFOC)</i> | 82 |
| <i>IV.6.4. Mise en équation de la commande IRFOC</i> | 83 |
| <i>IV.6.4.1. Estimation de ω_s et θ_s</i> | 84 |
| <i>IV.6.4.2. Expression du couple électromagnétique</i> | 84 |
| <i>IV.7. Découplage entrée – sortie</i> | 85 |
| <i>IV.7.1. Découplage par compensation</i> | 85 |
| <i>IV.8. Calcul des régulateurs</i> | 87 |
| <i>IV.9. Résultats de simulation et interprétations</i> | 90 |
| <i>IV.9.1. Référence de vitesse carrée</i> | 90 |
| <i>IV.9.2. Fonctionnement en mode de défluxage</i> | 92 |
| <i>IV.10.Dimensionnement du système pivot solaire</i> | 92 |
| <i>IV.10.1Dimensionnement du générateur photovoltaïque :</i> | 93 |
| <i>IV.10.2.Application de la commande vectorielle sur pivot d'irrigation</i> | 93 |
| <i>IV.11.Schéma bloqué de système pivot solaire</i> | 93 |
| <i>IV.11.1Résultats de simulation : fonctionnement à 100%</i> | 94 |
| <i>IV.11.2.Résultats de simulation : fonctionnement à Fonctionnement à 76.79%</i> | 96 |
| <i>IV.12.Conclusion</i> | 98 |
| <i>Coclusion Générale et perspectives</i> | 100 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig. I.1: pivot solaire | 03 |
| Fig. I.2: Différentes méthodes d'irrigation pratiquées | 04 |
| Fig. I.3: irrigation par siphon | 05 |
| Fig. I.4: Irrigation par gaines souples..... | 06 |
| Fig. I.5: Transirrigation | 07 |
| Fig. I.6: Irrigation par bassins pour les arbres | 07 |
| Fig. I.7: Alimentation des planches par siphons | 08 |
| Fig. I.8: Irrigation par goutte à goutte | 09 |
| Fig. I.9: Disposition des asperseurs..... | 10 |
| Fig. I.10: Irrigation par déplacement d'une rampe mobile..... | 11 |
| Fig. I.11: Couverture totale par les rampes | 11 |
| Fig. I.12: Couverture intégrale par les rampes et les asperseurs | 11 |
| Fig.I.13: Enrouleur | 12 |
| Fig. I.14: Schéma de principe d'un pivot solaire | 14 |
| Fig. I.13: L'élément central de pivot d'irrigation..... | 15 |
| Fig. I.14: Les travées d'un pivot | 16 |
| Fig. I.15: Tour d'un pivot rotative..... | 16 |
| Fig. I.16: Le réducteur de vitesse | 17 |
| Fig. I.17: La porte -à-faux | 18 |
| Fig. I.18: Schéma du dispositif d'alignement..... | 19 |
| Fig. I.19:principe de l'avancement d'un pivot | 20 |
| Figure II.1 : heure de puissance crête..... | 26 |
| Figure II.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire | 26 |
| Figure II.3 : Silicium dopé n avec un électron libre | 28 |
| Figure II.4 : Silicium dopé p avec un trou..... | 28 |
| Figure. II.5: Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN) | 29 |
| Figure II.6 : Groupement de cellules en parallèle | 31 |
| Figure II.7 : Groupement de cellules en série | 32 |
| Figure II.8 : Module photovoltaïque | 32 |
| Figure II.9 Composantes d'un générateur photovoltaïque | 33 |
| Figure II.10 : les différentes zones de la caractéristique V (I) | 34 |
| Figure II.11:Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements..... | 34 |
| Figure II.12:Influence de la température sur la caractéristique électrique | 35 |
| Figure II.13 : Connexion directe entre un GPV | 35 |
| Figure II.14: Schéma équivalent d'une cellule idéale | 36 |
| Figure II.15: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV | 37 |
| Figure. II.16: Caractéristique (I-V) d'un module PV | 40 |
| Figure. II.17: Caractéristique (P-V) d'un module PV | 40 |
| Figure II.18 Modèle 'SIMULINK' du système solaire passif (sans contrôleur)..... | 42 |
| Figure II.19 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du panneau PV (température=25°C insolation=1000W/m ²) | 42 |
| Figure II.20 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un panneau PV en fonction de l'éclairement à température constante 25°C..... | 43 |
| Figure II.21 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module en fonction de la température à éclairement constant (1000W/m ²). | 44 |

| | |
|--|----|
| Figure II.22. Modèle ‘SIMULINK’ du système solaire passif (sans contrôleur)..... | 44 |
| Figure II.23 Caractéristiques I/V d’un GPV et d’une | 45 |
| Figure (III.1) Schéma de principe du hacheur..... | 46 |
| Figure (III.2) : périodes fermeture et ouverture d’un commutateur | 47 |
| Figure III.3. Circuit idéal du hacheur | 47 |
| Figure III.4. Circuit équivalent du hacheur dévolteur-survolteur(a):K fermé, (b) : K ouvert..... | 47 |
| Figure (III.5).Forme d’onde de la tension d’inductance $V_L(t)$ Pour un hacheur dévolteur..... | 50 |
| Figure III.6. Circuit électrique de base du hacheur survolteur | 51 |
| Figure (III.7) : Schémas équivalents du hacheur survolteur,(a): K fermé, (b) : ouvert..... | 52 |
| Figure III.8. Circuit idéal du hacheur | 52 |
| Figure III.9 Circuit équivalent du hacheur dévolteur-survolteur(a):K fermé, (b) : K ouvert...53 | |
| Figure III.10 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension et la trajectoire de PPM d’un panneau PV en fonction de l’éclairement à température..... | 54 |
| Figure III.11 Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence..... | 54 |
| Figure III.12. Intervalles de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des enseillements et des températures variables..... | 55 |
| Figure. III.13. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau..... | 56 |
| Figure. III. 14. Signe de dp/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance | 59 |
| Figure. III.15. : organigramme de methode P&O | 59 |
| Figure. III.16. Schéma synoptique pour la simulation du système photovoltaïque | 60 |
| Figure II.17.Modèle ‘SIMULINK’ du contrôleur MPPT P and O..... | 60 |
| Figure III. 18. Modèle ‘SIMULINK’ du convertisseur Buck | 61 |
| Figure. III.19. courbe détaillé sue les signaux de puissance ,rapport cyclique et la tension et le courant de module PV et la tension et le courant à la borne de la charge générés pat la méthode MPPT pour un pas de perturbation de 0.0001..... | 62 |
| Figure. III.20. courbe détaillé sue les signaux de puissance ,rapport cyclique et la tension et le courant de module PV et la tension et le courant à la borne de la charge générés pat la méthode MPPT pour un pas de perturbation de 0.0001..... | 63 |
| Figure. III.21. la puissance de PV et puissance sortie de cnvertisseur et le rapport cyclique pour la diminution rapîde de l’enoileillement | 64 |
| Figure. III.22. la puissance de PV et puissance sortie de cnvertisseur et le rapport cyclique pour la diminution lente de l’enoileillement | 65 |
| Figure. III.23. la puissance de PV et puissance sortie de cnvertisseur et le rapport cyclique pour l’augmmentation lente de l’enoileillement | 66 |
| Figure. III.24. la puissance de PV et puissance sortie de cnvertisseur et le rapport cyclique pour l’augmmentation lente de la température | 67 |
| Figure. III.25. la puissance de PV et puissance sortie de cnvertisseur et le rapport cyclique pour l’augmmentation rapide de la température | 68 |
| Fig.VI.1: Représentation spatial des enroulements de la MAS..... | 71 |
| Fig.IV.2. référentiel : triphasé (a, b, c)-fixe (α, β)-tournant (u,v) | 74 |
| Fig. IV.3. Schéma de l'onduleur triphasé | 77 |
| Fig.IV.4. Le signal de porteuse et les signaux de référence..... | 77 |
| Fig.IV.5 : La bande de courant à hystérésis | 79 |
| Fig.IV.6 : contrôle par hystérésis | 80 |

| | |
|--|----|
| Fig. IV.7 : Schéma de principe du découplage pour la MAS en analogie avec la MCC | 80 |
| Fig. IV.8 : illustration de l'orientation du flux (rotorique, statorique, enterfer)..... | 81 |
| Fig. VI.9: Orientation du flux rotorique | 83 |
| Fig.VI.10: Reconstitutions des tensions V_{sd} et V_{sq} | 86 |
| Fig.VI.11:Commande découplé – expression de C_e , et Φ | 86 |
| Fig.VI.12:Schéma de principe de la commande à flux orienté | 87 |
| Fig.VI.13. Schéma fonctionnel de régulateur de courant I_{sd} | 87 |
| Fig.VI.14.Schéma fonctionnel de régulateur de courant I_{sq} | 87 |
| Fig.VI.15. Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse ω_r | 89 |
| Fig.VI.16.Vitesse rotation et Couple électromagnétique | 90 |
| Fig.VI.17. Composantes du courant statorique(a) composante directe (b) composante quadrature | 90 |
| Fig.VI.18. (a) Composante du flux rotorique et (b) Courant du stator..... | 91 |
| Fig.IV.19. Réponses de la machine en mode défluxé | 92 |
| Fig.IV.20. commande des moteurs d'entraînement du pivot solaire | 94 |
| Fig.IV.21. séquence de fonctionnement des moteur d'entraînement a AV=100% | 95 |
| Fig.IV.22.séquence de fonctionnement des moteur d'entraînement a AV=79.76% | 95 |

| | |
|---------------|---|
| Ω_{hv} | : Vitesse angulaire de l'axe haute vitesse (rad/s); |
| Γ_{hv} | : Couple sur l'axe haute vitesse (N.m); |
| Ω_{bv} | : Vitesse angulaire de l'axe basse vitesse (rad/s); |
| Γ_{bv} | : Couple sur l'axe basse vitesse (N.m). |
| A_0 | : Angle de déclenchement |
| A_1 | : Angle d'arrêt |
| A_n | : Angle séparant les travées(n) et (n-1) |
| $A(H)$ | : Surface arrosée par un pivot |
| T_{min} | : Temps de minimum de révolution d'un pivot |
| $V_t(m/min)$ | : Vitesse maximale de la dernière tour |
| dd | : Dose de superficie irriguée à vitesse d'avancement 100% |
| RP | : Rythme des passages |
| RFU | : Rapport de la dose admissible |
| E_{ph} | : Quantité d'énergie. |
| λ | : Longueur d'onde. |
| c | : Vitesse de la lumière. |
| h | : Constante de Planck |
| V_t | : Tension thermique. |
| N | : Facteur d'idéalité de la photopile. |
| q | : Charge d'électron. |
| k | : Constante de Boltzmann. |
| $I_{ph,n}$ | : Courant photonique sous condition de référence (A) ; |
| G, G_n | : Éclairement réels et à la condition de référence [W/m ²] ; |
| T, T_{ref} | : Température de cellules, réelles et à la condition de référence [K] ; |
| K_1 | : Coefficient de la température du courant de court circuit (A/K) |
| I_{pv} | : Courant généré par la cellule photovoltaïque ; |
| I_{ph} | : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ; |
| I_d | : Courant circulant dans la diode; |
| A | : Facteur d'idéalité de la jonction ; |
| E_g | : Énergie de gap [ev] ; |
| T | : Température de la jonction des cellules PV [°K] ; |
| T_{ref} | : Température de référence des cellules PV [°K] ; |
| I_p | : Courant circulant dans la résistance R_p ; |
| V_{pv} | : Tension de sortie ; |
| F | : facteur de forme. |
| $P_{max}(W)$ | : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV. |
| $V_{co}(v)$ | : Tension de circuit ouvert. |

| | |
|-----------------|--|
| $I_{cc} (A)$ | : Intensité de court –circuit. |
| T_s | : Période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$ |
| d | : Rapport cyclique du commutateur ($d \in [0.1]$) |
| $[V_{sabc}]$ | : Vecteur tension statorique. |
| $[I_{sabc}]$ | : Vecteur courant statorique. |
| $[\Phi_{Sabc}]$ | : Vecteur flux statorique. |
| $[V_{rabc}]^T$ | : Vecteur tension rotorique. |
| $[I_{rabc}]$ | : Vecteur courant rotorique. |
| $[\Phi_{rabc}]$ | : Vecteur flux rotorique. |
| R_s | : Résistance par phase du stator |
| R_r | : Résistance par phase du rotor |
| $[L_{ss}]$ | : Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques. |
| $[L_{rr}]$ | : Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques. |
| $[L_{msr}]$ | : Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques. |
| l_{ms} | : Inductance mutuelle entre enroulements statorique. |
| l_{mr} | : Inductance mutuelle entre enroulement rotorique. |
| l_m | : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase de rotor |
| θ | : Angle entre la phase a du stator et celle du rotor. |
| J | : Moment d'inertie des masses tournantes. |
| C_r | : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine |
| Ω | : Vitesse rotorique. |
| C_{em} | : Couple électromagnétique. |
| f_r | : Coefficient de frottement visqueux. |
| $f_r \Omega$ | : Terme de couple de frottement visqueux |
| L_s | : Inductance cyclique propre du stator |
| L_r | : Inductance cyclique propre du rotor |
| M | : Inductance cyclique mutuelle du stator-rotor. |
| R_t | : Résistance totale ramenée au stator. |
| σ | : Coefficient de dispersion ; |
| T_r | : Constante de temps rotorique. |
| $[A]$ | : Matrice fondamentale qui caractérise le système et |

| | |
|---------------|---|
| $[B]$ | : Matrice d'entrée. |
| $[U_{dc}]$ | : Vecteur tension d'entrée de l'onduleur ; |
| $[U_{ac}]$ | : Vecteur tension de sortie de l'onduleur ; |
| $[C]$ | : Matrice de transfert continu – alternatif |
| Ω_{hv} | : Vitesse angulaire de l'axe haute vitesse (rad/s); |
| Γ_{hv} | : Couple sur l'axe haute vitesse (N.m); |
| Ω_{bv} | : vitesse angulaire de l'axe basse vitesse (rad/s); |
| Γ_{bv} | : Couple sur l'axe basse vitesse (N.m). |
| A_0 | : Angle de déclenchement |
| A_1 | : Angle d'arrêt |
| A_n | : Angle séparant les travées(n) et (n-1) |
| $A(H)$ | : Surface arrosée par un pivot |
| T_{rmin} | : Temps de minimum de révolution d'un pivot |
| $V_t(m/min)$ | : Vitesse maximale de la dernière tour |
| dd | : Dose de superficie irriguée à vitesse d'avancement 100% |
| RP | : Rythme des passages |
| RFU | : Rapport de la dose admissible |
| λ | : Longueur d'onde. |
| c | : Vitesse de la lumière. |
| h | : Constante de Planck |
| V_t | : Tension thermique. |
| N | : Facteur d'idéalité de la photopile. |
| q | : Charge d'électron. |
| k | : Constante de Boltzmann. |
| I_{phn} | : Courant photonique sous condition de référence (A) ; |
| K_1 | : Coefficient de la température du courant de court circuit (A/K) |
| I_{pv} | : Courant générer par la cellule photovoltaïque ; |
| I_{ph} | : Photo courant créé par la cellule |
| I_d | : Courant circulant dans la diode; |
| A | : Facteur d'idéalité de la jonction ; |
| E_g | : Énergie de gap [ev] ; |
| T | : Température de la jonction des cellules PV [°K] ; |
| T_{ref} | : Température de référence des cellules PV [°K] ; |
| I_p | : Courant circulant dans la résistance R_p ; |
| V_{pv} | : Tension de sortie ; |
| F | : Facteur de forme. |

Introduction générale

Les économies d'eau ont une grande importance dans les recherches d'amélioration des techniques d'irrigation, tout particulièrement dans les pays arides. En effet, plus le climat est aride, plus la ressource en eau est limitée et plus les besoins en irrigation sont importants pour la production agricole. Il faut donc valoriser au mieux l'eau dont on dispose. L'évolution des techniques d'irrigation y contribue grâce aux meilleures performances des équipements, à condition que ces équipements soient bien choisis et bien utilisés.

Bien que clairement définie, l'irrigation n'a pas été vraiment identifiée ni distinguée du vaste domaine des activités de développement hydraulique, telles les constructions majeures et mineures pour la collecte, le stockage, le transport et la distribution de l'eau, la réalisation des forages et les pompes. La plupart des efforts et investissements consentis dans de nombreux pays pour le développement de l'irrigation ont davantage porté sur la mise en valeur des ressources en eau plutôt que sur l'amélioration de l'utilisation de l'eau au niveau de la parcelle.

L'application des méthodes et techniques d'amélioration de l'irrigation dans les petites exploitations est en rapide expansion parce que la nécessité d'une plus grande efficacité de l'irrigation, d'une meilleure utilisation de l'eau, ainsi que d'une intensification et d'une diversification de la production se fait sentir de manière accrue. [1]

Le pivot d'irrigation rotatif est un système d'irrigation moderne utilisée en agriculture pour mieux valoriser les ressources en eau, particulièrement dans les régions arides de grande culture. L'intérêt essentiel de ce type de matériel est sa simplicité de mise en œuvre, ses possibilités de fonctionnement automatique et ses performances en termes d'uniformité d'apport d'eau.

Actuellement, le réseau de distribution électrique est la source principale d'alimentation des systèmes de pivot d'irrigation. L'opération est limitée pour irriguer des sites où ces lignes électriques n'existent plus ou en raison du coût élevé de leur construction. Dans le cas où ces lignes n'existent pas, l'alimentation du pivot d'irrigation peut être obtenue à partir d'un groupe électrogène (générateur à combustion). [2]

Comme nous le savons, dans ces deux sources, l'énergie fournie provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est mondialement convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement. À partir de ce constat, il est nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées dans nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles. [3]

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés plus particulièrement par l'énergie solaire photovoltaïque, et comme application, le pivot d'irrigation rotatif dans des sites isolés. Nous verrons que cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de site.

Les générateurs photovoltaïques, qui ont connu une période d'intense développement avec l'aventure spatiale, suscitent un renouveau d'intérêt tout particulier dans le domaine des usages terrestres. Bien que les motivations qui conduisent au choix du photovoltaïque comme source d'énergie soient, dans les deux cas, relativement différentes. Il existe toutefois une motivation commune qui est la notion d'autonomie. Autonomie de lieu, mais toute aussi importante est la notion d'autonomie de fonctionnement.

Dans ce cadre, nous avons organisé notre plan de travail en quatre chapitres qui se résument comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les méthodes d'irrigation telle que : L'irrigation gravitaire et l'irrigation par aspiration et irrigation à goutte à goutte. Les techniques utilisées par chacun de ces méthodes d'irrigation, leurs avantages et inconvénients sont aussi présentés. A la fin de ce chapitre, on a intéressé au système d'irrigation par pivot rotatif. Les différents composants du pivot rotatif (alimentation, dispositifs de commande, les moteurs d'entraînement,...).

Le deuxième chapitre sera consacré aux cellules solaires photovoltaïques. Nous présenterons le principe de fonctionnement et les différentes équations caractéristiques des cellules solaires, puis une étude générale sur les différentes technologies photovoltaïques, et la modélisation de module photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre nous rappellerons les principales techniques de poursuite MPPT, puis nous allons appliquer la technique perturb and observe pour maximiser l'énergie extraite du PV.

Le dernier chapitre sera consacré sur l'étude du système d'entraînement du pivot rotatif. Ce système est composé des moteurs asynchrones couple avec des réducteur et leurs système de commande. On a utilisé la commande vectorielle pour régler la vitesse d'avancement du pivot selon la dose de l'eau demandée par les plantes.

I.1.Introduction

L'eau devient de plus en plus un facteur limitant de la vie sur la planète. L'augmentation de la population, le développement des diverses activités, consomme des quantités d'eau de plus en plus importantes, qui ne peuvent provenir, en général que d'un prélèvement sur les volumes excessifs utilisés jusqu'ici par l'irrigation du fait de l'utilisation de techniques traditionnelles génératrices de pertes d'eau, tant au cours du transport que pendant la distribution à la parcelle.

D'où l'obligation, pour l'agriculture irriguée dont la croissance en surface est exponentielle d'adopter de nouvelles techniques pour réduire les besoins de main-d'œuvre, améliorer la production agricole, et d'optimiser l'utilisation de l'eau. Ces techniques sont dites pivot d'irrigation.

L'irrigation par pivot rotatif consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle. L'eau est mise sous pression, généralement par pompage, pour être ensuite distribuée au moyen d'un réseau de canalisations. La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'aspenseurs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol, [4]

Dans nos jours, la demande pour l'irrigation est de plus en plus très importante, en particulier dans les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile voir pratiquement impossible. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pivot solaire autonome La figure (I.1), fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est En facile à installer, avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

Le pivot solaire fonctionne de la même façon qu'un pivot alimenté par le réseau Électrique ou par un groupe électrogène. Il permet d'offrir une solution alternative aux autres sources d'énergie. En effet, dans certaines conditions, la distance avec la première source d'énergie disponible est telle qu'il est financièrement intéressant d'utiliser l'énergie solaire directement disponible au pied du pivot.



Fig. I.1: pivot solaire

I.2.description des techniques d'irrigation

L'irrigation est l'opération qui consiste à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production, et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de la nappe, en particulier dans les zones arides. Les différents systèmes d'irrigation nécessitent des matériaux bien connus, pratiqués aux champs avec des méthodes adaptées. En effet, chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Il existe plusieurs systèmes d'irrigation.

I.3.Classification des Systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en trois grandes catégories: L'irrigation gravitaire et l'irrigation sous par aspiration et irrigation à goutte à goutte. La figure (I.2) présente une architecture de ces différentes méthodes d'irrigation pratiquées partout dans le monde. [5]

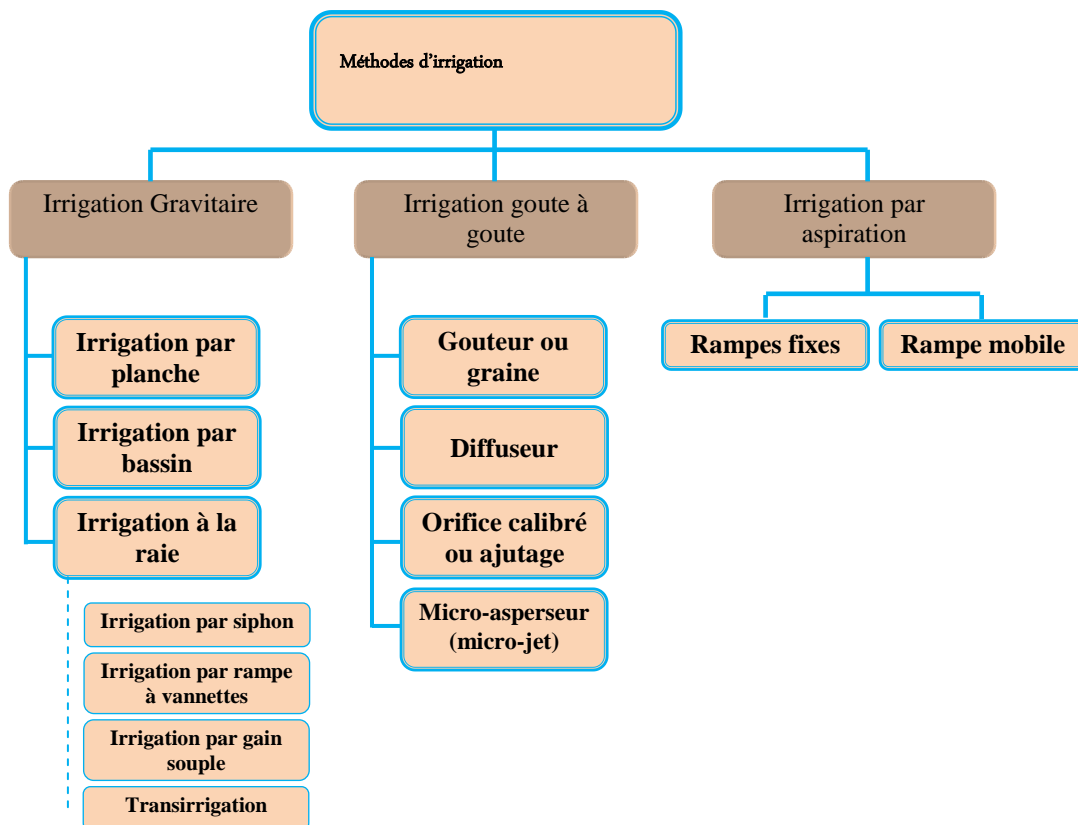


Fig. I.2: Différentes méthodes d'irrigation pratiquées

I.3.1.Irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire ou irrigation de surface consiste à répartir l'eau sur la parcelle cultivée par ruissellement sur le sol dans les sillons (irrigation à la raie) ou en nappe (Irrigation par planche ou calant) ou encore par submersion contrôlée (irrigation par bassin). Elle reste le mode le plus répandu dans les périmètres irrigués dans le monde. [5] Cette technique trouve sa large utilisation dans le fait qu'elle est adaptée aux parcelles de mauvais état de nivellement.

I.3.1.1 Irrigation à la raie :

L'irrigation à la raie est divisée aussi en quatre types principaux :

a. Irrigation Par siphon :

Les siphons sont des tuyaux de petit diamètre (20 à 50 mm) d'une longueur comprise entre 1 m et 1,50m. il sont réalisés en matériaux rigides ou semi-rigides, les plus courants étant en PVC.

Ils nécessitent une faible charge de 10 à 20 cm et permettent, sous ces charges, de délivrer un débit pouvant varier de 0,4 à 2 l/s environ. On peut modifier les débits en plaçant des bouchons percés à la sortie du siphon ou en utilisant des siphons de diamètre différents ou encore en jouant sur le nombre de siphons

Les siphons présentent l'avantage de ne pas coûter cher, ils permettent d'assurer une bonne répartition des débits. Néanmoins le transport et l'amorçage des siphons nécessitent une manutention relativement importante .il faut d'autre part surveiller les risque de désamorçage en cours d'irrigation.[6]



Fig. I.3: irrigation par siphon

b. Irrigation par gaines souples :

Les gaines souples sont constituées d'une manche souple en matière plastique placée en tête de parcelle sur laquelle sont fixées des manchettes de dérivation qui alimentent les raies. Ces manchettes sont souvent munies d'un dispositif permettant d'écraser plus ou moins le tube pour limiter les débits, elles ont un diamètre de 50 mm et une longueur de 0,50 m. L'utilisation correcte des gaines nécessite une charge de 40 cm à 1 m de colonne d'eau. A titre indicatif, le débit à pleine ouverture d'une dérivation est de l'ordre de 2 l/s pour une charge de 50 à 60 cm. Les gaines souples présentent l'avantage de pouvoir être installées rapidement, elles peuvent être pliées et rangées aisément en fin de campagne. L'inconvénient majeur est de ne pas permettre un réglage précis des débits admis dans les raies.



Fig. I.4: Irrigation par gaines souples

c. Irrigation Par rampe à vannettes

Ce type de matérielle correspond mieux aux cultures irriguées à la raie et qui nécessitent peu d'intervention sur la parcelle. L'avantage réside dans la possibilité de réglage des débits par des vannettes coulissantes ; qui offrent des positions d'ouverture 25, 50, 75 et 100% par rapport aux siphons, on évite l'opération d'amorçage qui un travail lent et fatigant. L'autre avantage réside dans le fait que les débits obtenus sont plus précis et faibles et de ne pas gêner les travaux agricoles. Par contre une étude de dimensionnement est nécessaire. Lorsque l'irrigation de toute la parcelle se fait en même temps, toutes les sorties sont ouvertes, sinon les sorties non utilisées doivent être fermées d'une manière étanche. [4]

d. Transirrigation

Le système transirrigation est constitué d'un tuyau rigide posé avec une pente régulière en tête de parcelle et percé d'orifices calibrés qui alimentent les raies. Le déplacement automatique d'un piston à l'intérieur du tube entraine le déplacement de la main d'eau sur l'ensemble de la parcelle. Le nombre de trous alimentés est toujours le même, et le débit de chaque trou décroît progressivement jusqu'à s'annuler au fur et à mesure que le piston se déplace vers l'aval du trou. Le tuyau est en PVC rigide traité anti ultra-violet de diamètre de 150 mm il est posé avec une pente comprise entre 2.5 et 6 mm par mètre et les orifices sont calculés en fonction du débit que l'on souhaite obtenir, la main d'eau délivrée est de l'ordre de 30 à 50 l/s. Ce dispositif présente l'avantage de nécessiter peu de travail pendant l'irrigation. Il permet par ailleurs une très bonne maîtrise de la dose apportée grâce à la modulation automatique des débits décroissants à chaque trou ; ce qui permet de réduire les pertes en colature. L'installation peut être en surface ou enterrée avec des cannes de sortie sur chaque orifice. [6]

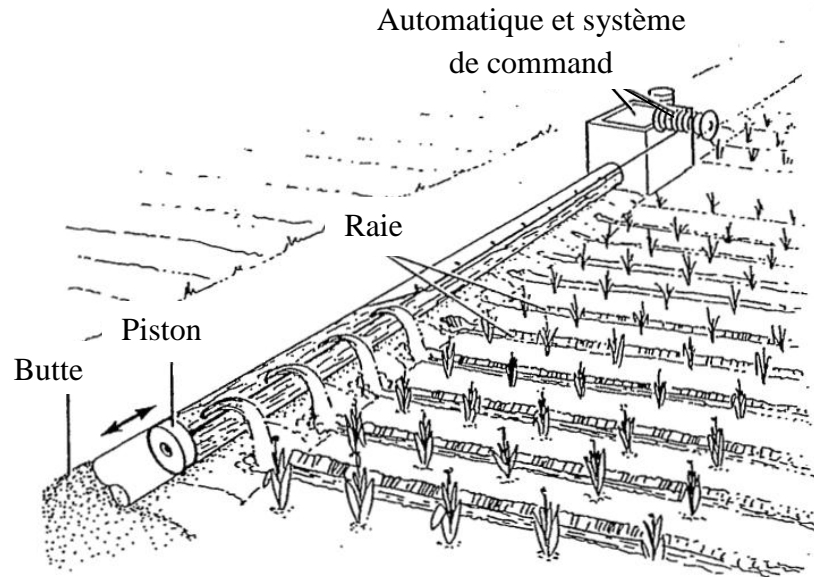


Fig. I.5: Transirrigation

I.3.1.2. L'irrigation par bassin

Les champs sont des bassins qui peuvent être remplis d'eau soit de façon continue (rizières), soit par arrosages successifs pour les cultures qui ne poussent pas dans l'eau. La principale caractéristique de ces diverses techniques d'irrigation gravitaire est qu'il est nécessaire de saturer la planche ou le bassin (c'est à dire la totalité de la surface arrosée) ou au moins la raie. Il en résulte d'importantes pertes d'eau à la fois par la colature et par infiltration profonde. La consommation d'eau est donc forcément forte et le rendement total de l'irrigation ne peut être bon.

Dans certains cas extrêmes la consommation peut atteindre 15 000 à 30 000 m³/ha/an pour des prairies arrosées par planches ou submersion (Espagne du sud). Toutefois, une irrigation à la raie soigneuse et bien menée peut être.



Fig. I.6: Irrigation par bassins pour les arbres

Beaucoup plus économe (3 000 à 4 000 m³/ha/an). Cela étant, les risques de tassement des sols et d'asphyxie sont toujours présents. [1]

La modernisation de ces techniques d'irrigation par planche et par bassin peut consister en plusieurs points :

- Étancher le canal qui distribue l'eau en tête de parcelle
- L'équiper de vannes de régulation pour irriguer successivement les différents bassins
- Automatiser l'ouverture et la fermeture des différentes vannes
- Recouvrir les canaux de distribution, les remplacer par des canaux préfabriqués ou encore les enterrer sous terre. [4]

I.3.1.3.L'irrigation par planche

Le système des planches est composé de planches d'une longueur pouvant dépasser 100 m et de largeur de 4 à 8 m, délimitée par des ados. La pente est supposée être constante et le nivellement doit faire l'objet d'un entretien régulier. Des planches beaucoup plus larges peuvent être irriguées, il s'agit alors du système de calant qui monopolise des mains d'eau beaucoup plus importantes. La planche traditionnelle est alimentée par un débit variant en moyenne de 4 à 15 l/s selon les caractéristiques de dimension et de type de sol. La stratégie d'irrigation consiste à couper l'alimentation avant que le front d'avancement n'atteigne tout à fait l'extrémité aval de la parcelle. Lorsqu'il n'apparaît pas de zones de ruissellement préférentiel, ce système mobilise très peu de main-d'œuvre. Ces techniques sont utilisées pour les cultures semées à plat telles que les céréales, le bersim, la luzerne, des plantes fourragères etc. [7]



Fig. I.7: Alimentation des planches par siphons

I.3.1.4. Avantages et inconvénients de l'irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire présente plusieurs avantages tels que :

- les coûts d'investissement sont souvent relativement faibles,
- les besoins énergétiques sont faibles ou nuls,
- ces techniques sont anciennes, bien connues et éprouvées et sont insensibles au vent,

- les végétaux ne sont généralement pas mouillés, ce qui est plus favorable sur le plan phytosanitaire ,
- les techniques sont assez bien adaptées à l'épandage d'eaux de sortie de station d'épuration par exemple ;

Néanmoins, ce système présente aussi des inconvénients :

- besoin en main d'œuvre important,
- faible rendement (sauf s'il y a recyclage des eaux de colatures),
- terrassements, souvent, importants et impliquent la possibilité d'apparition de zones plus ou moins stériles en surface,
- techniques inadaptées sur des sols filtrants,
- parcellaire est souvent figée,
- problèmes de qualité de l'eau,
- nécessité un terrain plat ou un nivellement,
- Difficultés de l'estimation du volume réellement consommé,

I.3.2. Irrigation goutte à goutte

L'irrigation « goutte à goutte » est appelée aussi « irrigation localisée ou micro - irrigation ». On l'appelle irrigation par « infiltration » lorsqu'elle est réalisée au moyen de tuyaux filtrants enterrés. L'irrigation goutte à goutte se développe de plus en plus dans le but de palier à la rareté de l'eau. Elle se caractérise par un apport d'eau localisé, fréquent et continu utilisant des débits réduits à des faibles pressions. Seule la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement humectée. Cela permet une réduction de l'évaporation, une meilleure conservation de la structure du sol et une réduction des mauvaises herbes. Ce système permet aussi d'exploiter des champs à topographie et configuration irrégulières, des sols lourds qui se fissurent en été, ou des sols légers filtrants. La fréquence élevée des arrosages permet une dilution des sels présents dans la solution du sol sous le distributeur et un maintien des sels à la périphérie du bulbe humecté.

La goutte à goutte permet une économie de l'eau (50 à 70 % par rapport au gravitaire) et une réduction du coût de la main d'œuvre impliquée dans les opérations de l'irrigation et de la fertilisation, et une baisse des quantités d'eau et d'engrais utilisés. [8]



Fig. I.8: Irrigation par goutte à goutte

I.3.3. L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion s'est rapidement développée après la seconde guerre mondiale, notamment en Europe et aux États-Unis. Avec les améliorations techniques de rendement et de la baisse du coût, elle s'est petit à petit développée dans les régions arides et semi-arides. L'eau est transportée dans des réseaux de conduites sous pression puis délivrée au niveau de la parcelle par des bornes qui régulent la pression et le débit. L'eau est ensuite dirigée dans d'autres conduites (porte-rampes et rampes) qui alimentent sous pression des asperseurs qui répandent l'eau en pluie. [9]

Le porte-rampes et les rampes sont constitués de tube sont faits en alliage d'aluminium en acier galvanisé ou encore en polychlorure de vinyle. On trouve également un diamètre de 50 mm. L'asperseur est caractérisé par le diamètre de sa buse qui, pour une pression déterminée, définit son débit, la portée du jet et la répartition de l'eau, en un mot pluviométrie de l'asperseur. il existe des asperseurs équipés d'une seule buse et d'autres qui sont munis de deux buses de différent diamètre pour améliorer l'homogénéité de la répartition pluviométrique dans la surface arrosée. Les asperseurs peuvent être montés directement sur la rampe par l'intermédiaire d'une allonge rigide de 0.5m à 2m que l'on fiche sur un té à clapet, fixé sur une plaque stabilisatrice. On peut également monter les asperseur sur un bipied ou sur un trépied de 1 à 2m50 de hauteur.

Les asperseurs les plus couramment utilisés sont des asperseurs à moyenne pression qui fonctionnent sous une pression de 2 à 5 bars, avec des débits de l'ordre 1 à 3 m³/h et des portées de jet de 12 à 18m. On obtient des pluviométries de 3.5 à 6.mm/h. Si la pression est supérieure à la pression nominale, notamment en bas de pente, on peut équiper chaque asperseur d'un régulateur de pression que l'on monte juste à l'amont de celui-ci.

La quantité d'eau qui arrive au sol le long du jet d'asperseur diminuant lorsque l'on s'éloigne de celui-ci, pour obtenir une répartition de l'eau homogène on doit disposer les asperseurs de manière à avoir un recouvrement suffisant des jets. Ils sont généralement disposés en carré, rectangle ou en triangle Figure(I.9).

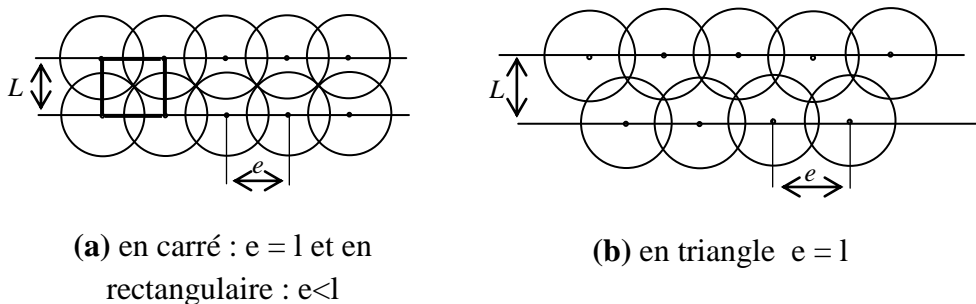


Fig. I.9: Disposition des asperseurs

Les premiers réseaux Figure (I.10) étaient équipés de petit asperseurs disposés le long d'une rampe mobile en alliage léger que l'on déplaçait à la main poste en poste, pour irriguer l'ensemble de la parcelle. [6]

L'inconvénient le plus commun de ce système est qu'il nécessite une main-d'œuvre importante pour le déplacement des rampes et des asperseurs d'un poste à un autre à travers le champ. Dans certaines régions la main-d'œuvre est rare et par conséquent chère.

On a peu à peu évolué vers la couverture totale qui consiste à disposer sur la parcelle en début de campagne un quadrillage de rampes de petits diamètres, le long desquelles on déplace ensuite manuellement les asperseurs (Figure I.11).

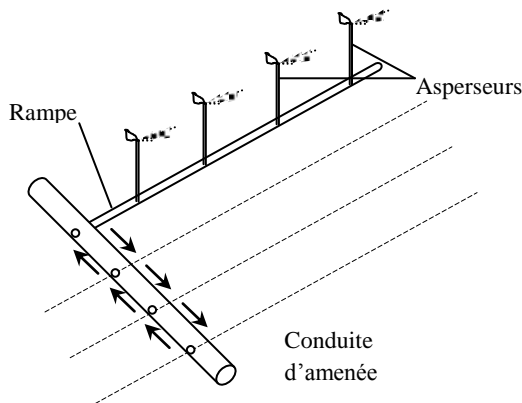


Fig. I.10: Irrigation par déplacement d'une rampe mobile

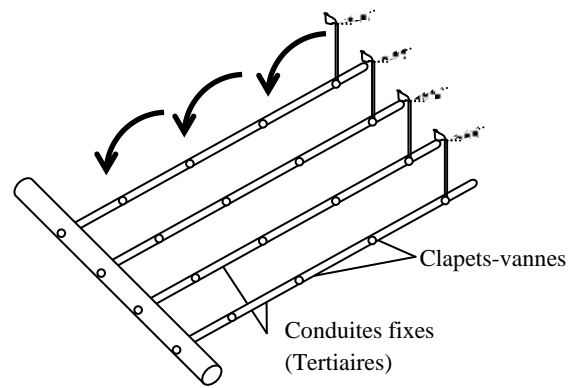


Fig. I.11: Couverture totale par les rampes

On a finalement abouti à la couverture intégrale qui consiste à équiper les rampes fixes de l'ensemble n'est plus déplacé pendant toute la saison d'irrigation. La mise en eau successive des postes d'arrosage est réalisée par l'ouverture ou la fermeture de petites vannes en tête de chaque rampe. Ces vannes peuvent être de chaque rampe, et peuvent être commandées manuellement ou à l'aide de vannes semi-automatique comme les vannes volumétriques ou encore de manière automatique par des programmeurs d'arrosage.

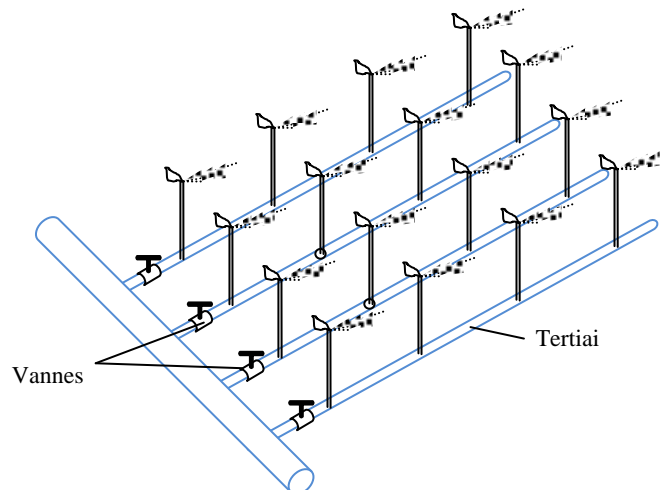


Fig. I.12: Couverture intégrale par les rampes et les asperseurs

La couverture intégrale présente l'avantage de supprimer les interventions manuelles pour les changements de poste. Presque totalement lorsque les manœuvres de vannes sont

manuelles ou totalement si ces manœuvres sont automatiques .cet avantage est néanmoins obtenu au prix d'un investissement d'autant plus élevé que le système est automatisé.

Le gros intérêt de la couverture intégrale est qu'avec une bonne disposition d'asperseurs on peut obtenir une répartition bien homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface irriguée. Les pertes des rendements hydrauliques de l'ordre de 90 à 95%. Ces systèmes peuvent être bien adaptés à toutes les formes de parcelle, à toutes les natures de sol quelle que soit la topographie et à toute cultures. La couverture intégrale convient particulièrement bien aux cultures annuelles, dont le sol irriguée peut être déplacée dans l'assolement sur l'ensemble de l'exploitation.

Le problème en aspersion est l'influence du vent qui augmente très sensiblement l'hétérogénéité de répartition de l'eau des que la vitesse de vent atteint 10 Km/h, au-delà de 30 Km/h l'irrigation devient pratiquement impossible. On atténue l'effet du vent en rapprochant le plus possible les asperseurs et en les disposant en triangle ou en rectangle, dont la plus grande dimension est orientée dans le sens du vent.

Peu à peu ,pour arroser de plus grande surface, les asperseur ont évolué vers les canon d'arrosage qui sont de gros asperseurs rotatifs fonctionnant sous une pression élevée de l'ordre de 5 à 8 bars, équipés de buses de 16 à 30 mm, ces canon ont un débit de 30 à 100m³/h et une portée du jet qui peut aller d'une vingtaine de mètre à plus de cinquante mètre. Il faut savoir que l'irrigation au canon est d'autant plus sensible au vent que la portée du jet est importante. Par ailleurs les gros canons ont une forte pluviométrie avec de grosses gouttes qui peuvent poser des problèmes de battances du sol (formation de croûte superficielle) sur des soles limoneux ou fins. [6]

Le système a également évolué peu à peu vers des appareils mobiles est les enrouleurs : L'enrouleur est constitué d'un tambour, sur laquelle s'enroule un tuyau flexible en polyéthylène. L'enroulement du tuyau provoque le déplacement d'un canon d'arrosage monté sur roues à l'extrémité du tuyau. L'enrouleur effectue ainsi un arrosage en bande, sans intervention. En fin de parcours l'enroulement s'arrête automatiquement et l'ensemble est déplacé au moyen d'un tracteur pour arroser la bande suivante. La longueur du flexible varie évidemment en fonction de la longueur du champ et peut atteindre 600 m. Son diamètre peut aller de 50 à 140 mm. Enfin le débit peut atteindre 50 m³/h et la portée est d'environ 100m. [9]

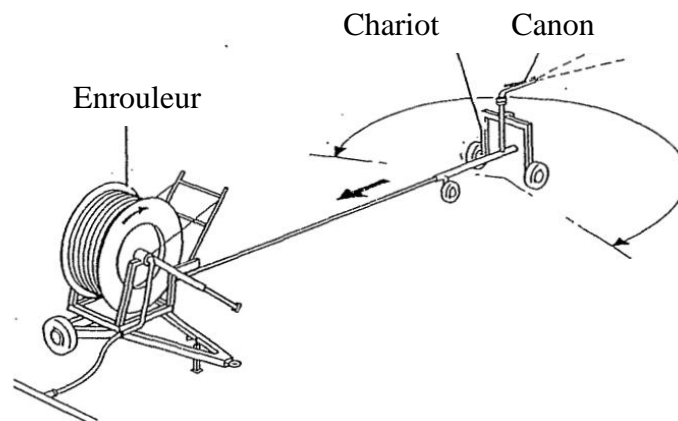


Fig. I.13: Enrouleur

L'enrouleur est le dispositif utilisé pour arroser les grande cultures annuelles Ils présentent l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation, pour être aisément déplacé d'une sole à l'autre. Ils présentent l'inconvénient du canon à savoir que la sensibilité au vent qui peut entraîner un arrosage très hétérogène .On peut y palier en remplant le canon par une rampe d'asperseurs montée sur roue. Le dispositif, beaucoup plus encombrant, perd alors de sa souplesse. Exigeant une pression de fonctionnement élevée (7 à 8 bars), il consomme beaucoup d'énergie.

Le système a également évolué vers Le système irrigation par pivot rotatif, entraîné par machine asynchrone alimenté par l'énergie électrique.

Le pivot ou rampe pivotante est constitué d'une rampe articulée dont les travées sont portées par des truelles automotrices entraînées par des moteur électriques. Ces moteurs peuvent être alimentés directement par le réseau de distribution.

En effet, dans certaines conditions, la distance avec la première source d'énergie disponible est telle qu'il est financièrement intéressant d'utiliser l'énergie solaire directement disponible au pied du pivot.

I.4. Le système d'irrigation par pivot solaire

I.4.1. Introduction

Le système d'irrigation par aspersion à pivot central est constitué d'une seule conduite d'arrosage de diamètre relativement grand, composée de tuyaux en acier léger galvanisé ou aluminium à haute résistance, suspendus au-dessus du sol par de longues structures métalliques et/ou des câbles et posés sur des tours mobiles sur des roues entraîner par un moteur électriques qui est alimenté par un panneau solaire. Une extrémité de la conduite est raccordée à un mécanisme à pivot implanté au centre de la zone à irriguer: l'ensemble de la conduite tourne autour du pivot. Le taux d'application des distributeurs d'eau varie entre les plus faibles valeurs près du pivot et les plus élevées vers l'autre extrémité et se fait au moyen de buses de diamètres variables le long de la conduite. [1]

L'eau est fournie par une station de pompage, peut être située à distance de quelques kilomètres de site à irriguer, sur un canal d'irrigation. La présence de la canalisation sous pression ne signifie pas que l'énergie solaire a été utilisée pour le système de pompage, l'énergie solaire était seulement utilisée pour alimenter les pivots d'irrigation et leurs systèmes de contrôle. [2]

Le pivot central est un système d'irrigation automatisé, entièrement mécanisé à basse/moyenne pression et assemblé de manière permanente. Il est devenu très populaire ces dernières années pour l'irrigation de la plupart des cultures de plein champ, céréales, légumineuses, fourrages et légumes. Il est également utilisé pour l'irrigation supplémentaire des céréales cultivées en sec. Le coût de chaque unité étant relativement élevé, ce système est mieux adapté aux grandes exploitations irriguées. La superficie irriguée peut varier entre 3, et 80 ha, selon la taille du pivot central, et plus la superficie arrosée est vaste, plus le coût unitaire par ha est faible. [1]

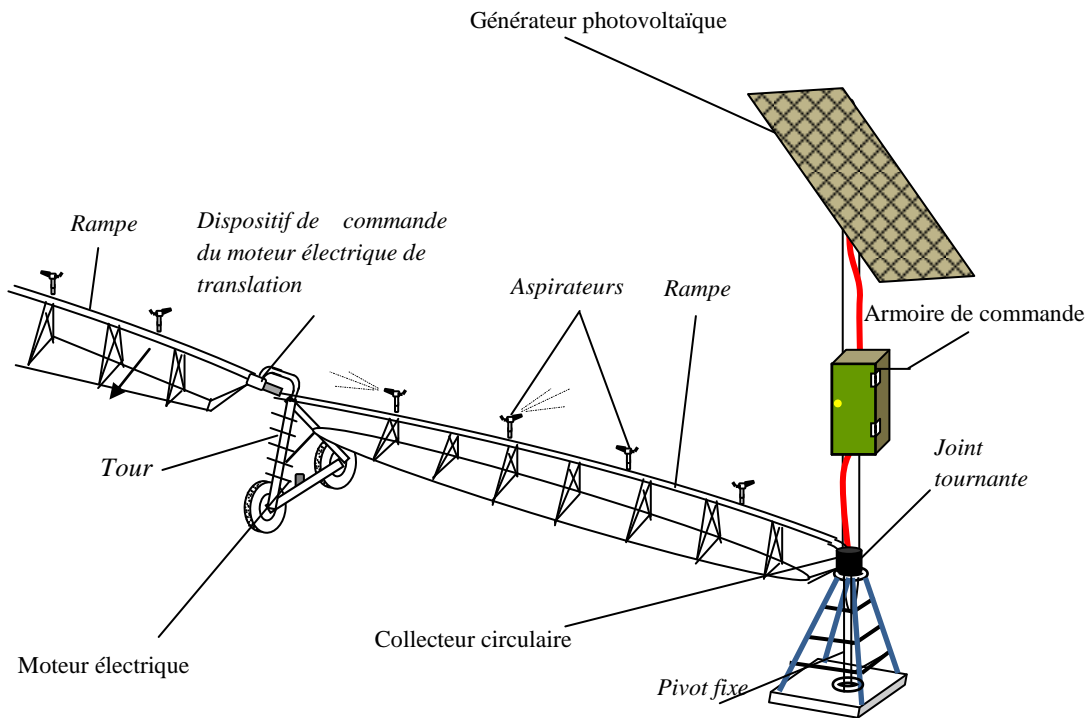


Fig. I.14: Schéma de principe d'un pivot solaire

I.4.2. Historique de pivot d'irrigation

Ce système a connu depuis 1952 un développement considérable quand apparaît l'utilisation des pipes d'arrosage qui étaient transportées d'une place à une autre manuellement ou bien remorquées par des tracteurs. En suite le système moteur par des roues est introduit qui répondait aux plusieurs besoins ; C'est pour cela qu'en 1952 et après avoir palier ces difficultés que le système d'irrigation par le pivot rotatif a connu une application considérable dans de nombreuses régions américaines telle que NEBRASKA où les agricultures étaient les premiers à utiliser ce système dans une région d'élevage et de pâturage. La NEBRASKA seule contient environ 20.000 unités de pivot, occupants une superficie de 0,7 millions d'hectares ; dans tous les États unis on estime que 80% des systèmes d'irrigation sont des pivots

Le pivot a continué à progresser dans d'autres pays du monde tel que l'Ukraine où il y avait en 1981 plus de 2000 pivots qui irriguaient 100.000h D'importants projets d'irrigation sont réalisés avec des systèmes pivot dans plusieurs pays du monde, tels que le CANADA, les pays d'Amérique latine, les pays du Golf et l'Afrique du Nord. [10]

I.4.3. Principe de fonctionnement :

La programmation de fonctionnement du système d'irrigation par pivot est également déterminée avec précision sur la base de la conception de l'appareil un ajustement fin des vitesses de rotation ainsi que des arrêts et des démarrages du moteur à partir de l'armoire de commande de pivot, permet un apport précis de la quantité d'eau apportée à la culture. [11]

I.4. 4.Descriptif technique

I.4. 4. 1. L'élément central

C'est le point où se fait l'arrivée l'eau et d'électricité. L'élément central est généralement fixé sur une dalle en béton équipée d'ancrages scellés dans des plots dont le volume dépend du type de structure de la machine.

La dalle doit permettre de résister au couple de retournement exercé par la rampe ; son volume minimum dépend du type de structure et de drainage. Chaque ancrage doit être capable de supporter la moitié du couple de renversement résultant. L'eau est amenée à la colonne montante (axe de rotation de l'ensemble). L'électricité est distribuée à la machine soit par un collecteur circulaire à balais pour les appareils effectuant une rotation complète, soit par un câble pour un fonctionnement en secteur. La figure (I.15). [12]

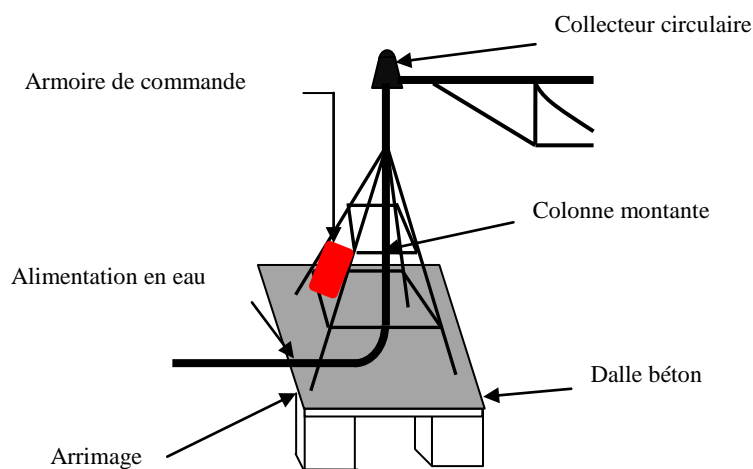


Fig. I.13: L'élément central

I.4. 4. 2. Les travées

Les travées sont comprises entre deux tours, elles sont constituées par une canalisation servant de poutre, rigidifiée par une structure d'une longueur de 30m à 65m, elles laissent un dégagement sous structure de 2.5 à 3.5 m pour une hauteur totale de 3.5 à 5m, les pivots utilisés en arboriculture, peuvent laisser un dégagement sous structure de 5.5 m au moins.

Les grands pivots fixes peuvent avoir plus de quinze travées. Pour les solutions déplaçables, on se limitera à 5 travées. [12]



Fig. I.14: Les travées d'un pivot

I.4. 4. 3. Les tours

Les tours intermédiaires Structures entièrement en acier galvanisé à chaud, posées sur des pieds de tour à haute résistance, avec supports des deux côtés, et axe d'entraînement à haute résistance, supportant les boîtes de vitesse, les pieds des tours et l'unité motrice. Les supports des unités motrices sont intégrés dans le cadre de la boîte de vitesses et non sur la conduite libre. [1]



Fig. I.15: Tour d'un pivot rotative

I.4. 4. 4. Le motoréducteur

Le moteur est connecté à un réducteur de vitesse. Cet ensemble est constitué de trois parties comme le montre la figure (I.16). Un premier en entrée tournant à haute vitesse, puis l'engrenage du réducteur de vitesse et enfin, un axe de sortie tournant à basse vitesse.

Les moteurs électriques de pivot d'irrigation ont une puissance de (0.18 à 2.KW) ils sont disposés sur les tours, aux milieux de la barre transversale qui relie les roues. [12]

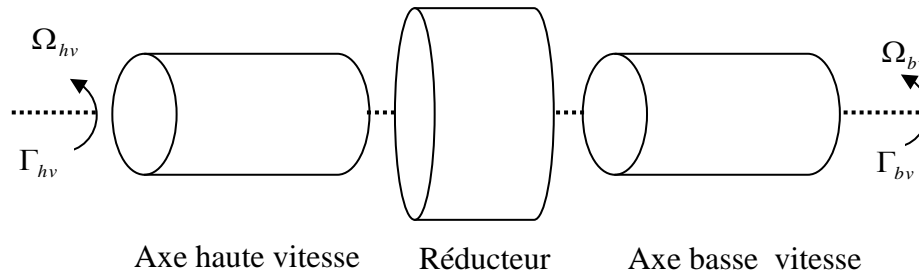


Fig. I.16: Le réducteur de vitesse

Ce réducteur réduit donc la vitesse d'entrée par un facteur G . Les relations entre les vitesses et les couples sont les suivantes :

$$\Omega_{hv} = G \times \Omega_{bv} \quad (\text{I.1})$$

$$\Gamma_{hv} = \frac{1}{G} \Gamma_{bv} \quad (\text{I.2})$$

Ω_{hv} : vitesse angulaire de l'axe haute vitesse (rad/s);

Γ_{hv} : Couple sur l'axe haute vitesse (N.m);

Ω_{bv} : vitesse angulaire de l'axe basse vitesse (rad/s);

Γ_{bv} : Couple sur l'axe basse vitesse (N.m).

Entre le motoréducteur et les roues, utilise différents système (bielle, chaînes, cardans). La transmission par cardan au sortir d'un réducteur se généralise.

I.4. 4. 5. Les roues

Existent en différentes dimensions avec différent profils de pneus le choix sera fonction de la pression au sol admissible, du pluviomètre appliqué, de la pente maximale du terrain, les pneus à profil agraire sont préférés.

I.4. 4. 6. La conduite d'arrosage

La longue conduite latérale portant les distributeurs d'eau (asperseurs, barboteurs ou mini-diffuseurs) a un diamètre qui peut varier entre 140 et 250 mm, selon le débit et la longueur du système; des dimensions standard d'environ 160 mm (6 pouces) et 200 mm (8 pouces) sont très courantes. La longueur de la conduite peut varier de 50 à 750 m selon le projet. Elle est constituée d'aluminium ou d'acier léger galvanisé à résistances élevées, avec des raccords extra forts pour résister aux pressions de fonctionnement du système. La conduite est disposée entre les tours intermédiaires de support en forme de A et sur roues, dont la hauteur type au-dessus du sol est de trois mètres minimum et qui sont espacées de 35 à 55 m (longueur de la travée); la longueur habituelle ou standard est de 40 mètres. Des charpentes métalliques en arc maintiennent une distribution régulière des charges et poids entre les tours. Au niveau du sol, la hauteur libre requise varie de 2,75 à 4,5 mètres pour les plus grandes machines. [1]

La liaison mécanique entre travées doit être articulée dans le plan vertical (variation de pentes) et dans le plan horizontal (avancement) elle permet de tolérer des pentes pouvant aller jusqu'à 15%. Elle est, en générale, assurée par cardan ou une rotule, lorsque le terrain est vallonné, ou par un joint caoutchouc, lorsque le terrain est plat.

I.4. 4. 7. Le porte –à-faux

Un canon d'aspersion, monté au bout de la conduite suspendue figure (I.17), peut accroître la longueur du dispositif des trois quarts de son rayon d'arrosage, bien que les performances des asperseurs rotatifs soient faibles en basse pression. Les pressions de fonctionnement étant faibles le long de la ligne, le système est sensible aux variations de pression causées par les pertes de charge dues au frottement ou les différences d'élévation ou inégalités du sol. L'installation de manomètres permettant un suivi fréquent est importante, afin d'assurer un débit uniforme et une bonne efficacité et uniformité d'application. Un manomètre est indispensable en fin de conduites. Puisque les régulateurs de pression à 0,4 bar souvent utilisés dans le mode d'application précise à faible énergie nécessitent pour fonctionner correctement au moins 0,65 bar à leur entrée, le maintien de 0,65 bar minimum en fin de ligne garantira un bon fonctionnement de tous les régulateurs. La pression d'admission normale dans le système à pivot est légèrement inférieure à 3 bars. [1]



Fig. I.17: La porte –à-faux

I.4. 4. 8. Le générateur

Le générateur photovoltaïque est un élément clé du système de pivot solaire, il permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, pour alimenter les moteurs électriques situés sur chaque tour du pivot. Il est composé d'ensemble de modules (série/parallèle). Une étude bien détaillée du générateur photovoltaïque sera l'objectif du chapitre suivant de ce mémoire.

I.4.4.9. L'alignement

Au niveau de chaque tour un boîtier étanche renferme un système de micro rupteur à came et biellettes figure (I.18), ou à tiroir dans le cas d'une propulsion hydraulique, permettant de maintenir l'angle entre deux travées dans un intervalle donné. Ce boîtier de tour doit être conforme aux normes électriques en vigueur. Chaque boîtier est équipé d'un micro-rupteur de commande et d'un, voire deux, micro-rupteur de sécurité, ils interviennent lorsque l'angle entre deux travées contiguës dépasse 1 degré. Ils arrêtent la rampe et la station de pompage (mise en sécurité). [12]

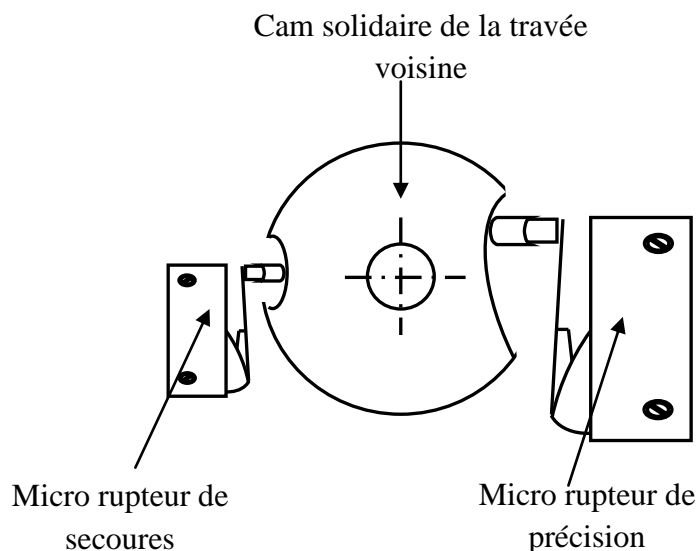


Fig. I.18: Schéma du dispositif d'alignement

I.4.5. L'alimentation en eau

Plusieurs solutions sont possibles :

- Gavage directe ou alimentation directe : à partir d'une ou plusieurs forages, l'alimentation est directe et ne nécessite pas de pompe reprise.
- Bâche de reprise l'eau pompée à partir des forages se déverse dans bassine. Une pompe de reprise alimente le pivot. Cette méthode permet une bonne observation de l'état de fonctionnement des forages.
- Pompage en rivière ou en retenue ; cela revient à un gavage directe.
- Borne d'un réseau collectif : l'eau arrive sous pression, au pied du pivot.

Quand la canalisation d'amenée d'eau enterrée, il est conseillé de prévoir dès la conception une entrée pour assurer le nettoyage au moyen d'un obus racleur.

I.4.6. Mode de fonctionnement

La vitesse moyenne de déplacement de la rampe pivotante est fixe par le temps de fonctionnement de la tour d'extrémité. Le mouvement de l'ensemble de l'appareil se fait ensuite par correcteur angulaires successives entre travées, comme décrit et illustré ci-dessous figure (I.19).

L'angle entre deux tours voisins doit rester compris entre deux angles limites : A_0 l'angle de déclenchement (angle à partir duquel la tour considérée se met en marche) et A_1 l'angle d'arrêt (angle à partir duquel la tour considérée s'arrête). lorsque l'appareil est mis sous tension (temps t_0), seule la dernière tour (n) démarre jusqu'à ce que l'angle A_n séparant la tour (n) et la tour (n-1) atteigne la limite de déclenchement, la tour (n-1) se met alors en marche (temps t_1). comme cette dernière doit parcourir une distance moins important que la tour (n) pour parcourir le même angle, il arrivera un moment où l'angle entre les tour (n) atteindra la limite d'arrêt (temps t_2), il en est ainsi de proche en proche jusqu'à l'axe du pivot.[13]

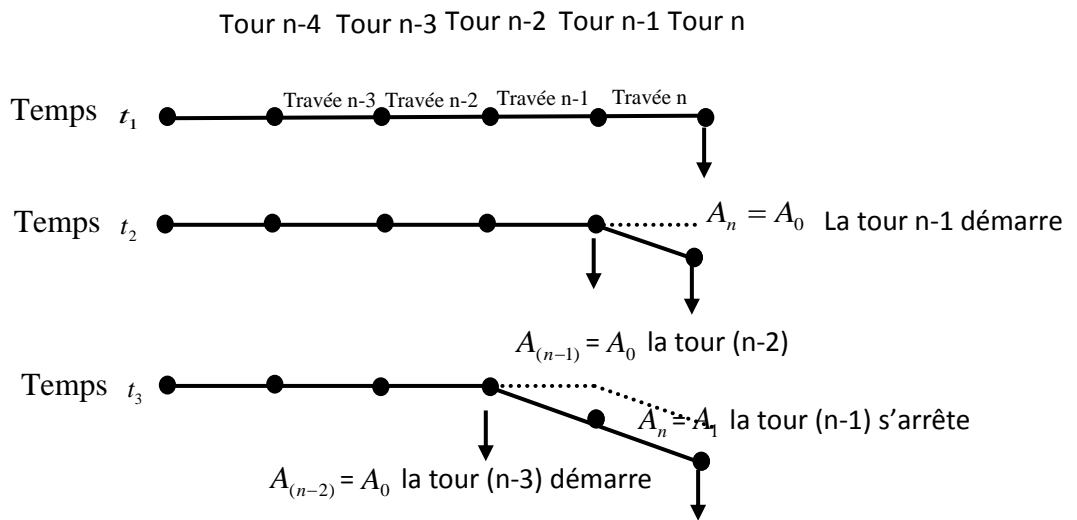


Fig. I.19: principe de l'avancement d'un pivot

A_0 : Angle de déclenchement

A_1 : Angle d'arrêt

A_n : Angle séparant les travées(n) et (n-1)

I.4.7. Le système de commande du pivot irrigation

La machine à pivot central, entièrement mécanique, fonctionne automatiquement. Des petits moteurs électriques, montés sur chaque tour à deux roues, assurent le déplacement du pivot. Un dispositif automatique de maintien d'alignement assure un alignement permanent de la conduite latérale. La distance parcourue par chaque tour de support varie d'un maximum à l'extrémité de la conduite latérale à un minimum près de la tour centrale. Les tours ne bougent pas continuellement, mais progressent par une série d'avances et d'arrêts contrôlée par la fréquence de mouvements de la tour guide externe. Le pourcentage de temps établit la fraction de temps de fonctionnement de la tour guide externe durant chaque cycle de mouvement, ce qui fixe la vitesse de rotation du système et la dose d'irrigation appliquée. Les micro-contacts du mécanisme d'alignement actionnent les moteurs des tours intermédiaires de manière à maintenir l'alignement du système. Le moteur d'entraînement (moteur asynchrone à 3

phases), son alimentation, le fonctionnement à vitesse de rotation fixe et le mécanisme d'alignement du pivot d'irrigation seront les objectifs du quatrième chapitre.

I.4.8. Les avantages d'un pivot d'irrigation solaire

- La source d'énergie est au pied du pivot : pas de surdimensionnement des câbles dû à une longueur importante entre la source d'énergie et le pivot.
- Pas de dépenses liées à l'installation d'un compteur ou d'un transformateur.
- Pas de consommation de gasoil en cas alimentation électrique par Groupe Électrogène
- Pas d'entretien annuel du groupe (vidange, etc...).
- Efficacité d'application élevée de 75–85 pour cent permettant des économies d'eau, avec contrôle absolu de l'eau d'irrigation depuis la source jusqu'à la plante (figure 10.6).
- Meilleure uniformité d'application en comparaison d'autres systèmes d'aspersion ou de vaporisation, en raison de la continuité de distribution de l'eau.
- En fin d'irrigation, le système se retrouve au point de départ.
- Économies de main-d'œuvre et de carburant.
- Labour et coûts connexes limités.
- Contrôle de la salinité. Le lessivage intégral de la zone racinaire en Fin de saison est très efficace avec le pivot central.
- Applicable en irrigation supplémentaire des céréales cultivées en sec durant les périodes de sécheresse.

I.4.9. Les inconvénients d'un pivot d'irrigation

- Investissement initial important.
- Non adapté aux petites exploitations.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes

I.5. Dimensionnement et conception le système d'irrigation étudié

La conception d'un projet d'irrigation par pivot central est relativement plus simple que celle de systèmes conventionnels par des techniques d'irrigation classique. Une culture de plein champ d'été est sélectionnée dans une région semi-aride avec une forte évapotranspiration et des ressources en eau plutôt limitées. Les principales étapes sont les suivantes:

- a. Détermination de la surface arrosée par un pivot
- b. Le temps de minimum de révolution d'un pivot $T_{r,\min}$
- c. La dose de superficie irriguée à vitesse d'avancement 100%
- d. le temps T de La dose nécessaire pour irriguée la superficie

e. calcule le réglage de la machine ou avancement (AV)% de la vitesse maximum, pour respecter le tour d'eau qu'on s'est fixé

I.5.1. Caractéristiques techniques des pivots et équipements

Les composantes des pivots utilisés sont:

- Une tour centrale avec panneau de commande et conduite d'un diamètre 219.1 mm avec des asperseurs de marque (Senninger Irrigation), soutenue par 9 tours automotrices intermédiaires sur roues, une pompe de remise en pression avec moteur, la longueur des travées est de 50.80 m, hauteur du pivot par rapport au sol 4m.
- La longueur de la conduite 480 m (9 travées de 50.8 m plus 12.8 m de porte à faux).
- Rayon total d'arrosage : 510 m.
- Débit du système: 162.3 m³/h.
- La vitesse d'avancement maximale : 2m/min.
- Un canon d'extrémité BIG GUN de la marque NELSON
- la puissance de motoréducteur 1kW

I.5.2. Programme d'irrigation à vitesse d'avancement 100%

a. Détermination de la surface (A) arrosée par un pivot

$$A(H) = \frac{3.14 * (L + RG)^2}{10000} = \frac{3.14 * (510)^2}{10000} = 81.67.63H \tag{I.1}$$

L : la longueur totale du pivot en mètre.

RG : la longueur de canon

b. Le temps de minimum de révolution d'un pivot $T_{r\min}$

$$T_{r\min}(h) = \frac{L_i(m)}{V_i(m/min)} \times 0.1047 \tag{I.2}$$

$$T_{r\min}(h) = \frac{457.2}{2} \times 0.1047 = 23.93h \tag{I.3}$$

$L_i(m)$: La distance entre l'axe du pivot et la dernière tour.

$V_i(m/min)$: La vitesse maximale de la dernière tour.

c. La dose de superficie irriguée à vitesse d'avancement 100%

$$d = \frac{Q \times T_r}{A(H)} = \frac{162.3 \times 23.96}{81.67 * 10} = 4.76mm \tag{I.4}$$

I.5.3. Dose journalière de pointe

Dans des conditions semi-arides ou en cas de saison sèche prolongée, il est nécessaire d'irriguer pour compenser le déficit d'évapotranspiration (transpiration des cultures et évaporation à partir du sol) dû à l'insuffisance ou à l'irrégularité des précipitations. La consommation d'eau pour l'irrigation est définie comme étant le volume d'eau nécessaire

pour compenser le déficit entre d'une part l'évaporation potentielle et d'autre part les pluies efficaces pendant la période de croissance des cultures et le changement dans la teneur en eau du sol. Elle varie considérablement en fonction des conditions climatiques, des saisons, des cultures et des types de sol.

Dans tous les cas, en région semi-aride, le système d'irrigation à pivot central doit être conçu pour les besoins en eau de pointe des cultures, jusqu'à 6 mm/jour sur un sol de ($RFU = 32\text{mm}$)[4].

Le rythme des passages ou tour d'eau (R_p) est intervalle de temps qui sépare deux arrosages. On peut le définir comme étant le rapport de la dose admissible (RFU) par passage sur la dose journalière nécessaire (d): [12]

$$R_p \leq \frac{RFU}{D_j} \tag{I.5}$$

a. le temps T de La dose nécessaire pour irriguée la superficie T :

$$T = \frac{A(H) \times d_1}{Q} = \frac{81.67 \times 10 \times 6}{162.3} = 30.19h \tag{I.6}$$

b. calcule le réglage de la machine ou avancement (AV)% de la vitesse maximum, pour respecter le tour d'eau qu'on s'est fixé

$$AV(\%) = \frac{100 \times T_{r\min}}{T} = \frac{100 \times 23.93}{30.19} = 79.26\% \tag{I.7}$$

La vitesse de rotation du pivot doit respecter 79.26% de la vitesse maximale, définit par le constructeur, pour obtenir la dose journalière désirée. Pour cela nous allons appliquer à l'entrée de système de commande de la machine d'entraînement un échelon égal 79.26% de la vitesse maximale du pivot.

I.5.4.Calcul de rythme du passage

$$R_p \leq \frac{RFU}{D_j} = \frac{32}{6} = 5 \text{ jour} \tag{I.8}$$

I.6.Conclusion :

L'étude des implications énergétiques de l'irrigation au niveau de l'exploitation nécessite de relier simplement les contraintes locales, les consommations en eau, les consommations d'énergie et le service rendu.

On remarque que la lecture proposée, par éléments fonctionnels, est compatible avec l'intégration de la plupart des contraintes et des éléments de contexte. De plus, elle reste ouverte à la prise en compte de nouveaux paramètres.

L'impact de l'adéquation dans : le temps entre les apports en eau et les besoins des cultures sur l'efficacité en eau, donc la vitesse moyenne de déplacement de la rampe pivotante doit être fixe par le temps de fonctionnement de la tour d'extrémité ce qui nécessite une boucle de régulation du moteur d'entraînement , Et la demande en énergie de l'irrigation devrait

ultérieurement être prise en compte, autrement dit, la puissance du PV doit être satisfaisante pour l'alimentation du moteur d'entraînement et leurs dispositifs de commande.

Une étude de la commande et de régulation selon les contraintes de gestion proposées est une évaluation qui implante dans les prochains chapitres.

II.1.Introduction

La demande mondiale en systèmes solaires d'alimentation électrique croît constamment depuis les années 1990. Aujourd'hui, l'industrie photovoltaïque repose essentiellement sur les besoins des régions isolées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Dans un grand nombre d'applications, le photovoltaïque est la solution la plus rentable. Parmi ces applications : les systèmes isolés alimentant des chalets ou des résidences éloignées, les sites éloignés de télécommunications des services publics et de l'armée, le pompage de l'eau dans les fermes et l'irrigation par pivot solaire.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère. Cette énergie est de l'ordre de $1000W/m^2$ dans les zones tempérées et atteint $1400W/m^2$ dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou chargée d'eau. [14]

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) résulte de la conversion directe de l'énergie provenant de photons résidants dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) ayant une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (P_{PM}). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule, ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondants au courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté et est plus ou moins éloigné du PPM caractérisé par le courant et la tension optimaux notés (I_{opt}, V_{opt}) . [15]

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimisant son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur les semi-conducteur, on présentera la cellule photovoltaïque ainsi que l'influence des paramètres météorologiques sur la caractéristique de la cellule, nous allons également nous intéresser au fonctionnement de la cellule, l'association des cellules en série et en parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

II.2. Caractéristiques du Rayonnement Solaire

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil, elle est mesurée en W/m^2 . L'irradiance est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère. L'irradiance est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, elle est mesurée en KWh/m^2 . L'irradiation est souvent exprimée en «heures de puissance crête», qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de $1KW/m^2$, nécessaire pour produire l'irradiation quotidienne. Le nombre d'heures de puissance crête est obtenu par intégration de l'irradiance sur toutes les heures de clarté figure (II.1). La connaissance de cette valeur permet quantifier rapidement les possibilités offertes par le générateur solaire. Un module de $50Wc$ fournira $150Whc$ dans un site correspondant à un ensoleillement de 3 heures de puissance crête.

L'irradiance et l'irradiation dépendent de l'emplacement, des conditions climatiques et de la période de l'année. Elles dépendent aussi de l'ombre des arbres et des bâtiments qui pourrait exister et de l'inclinaison de la surface. [16]

Dans le cadre de l'utilisation des panneaux photovoltaïques, il serait utile de pouvoir déterminer avec exactitude, la durée d'insolation à un endroit particulier en un jour précis.

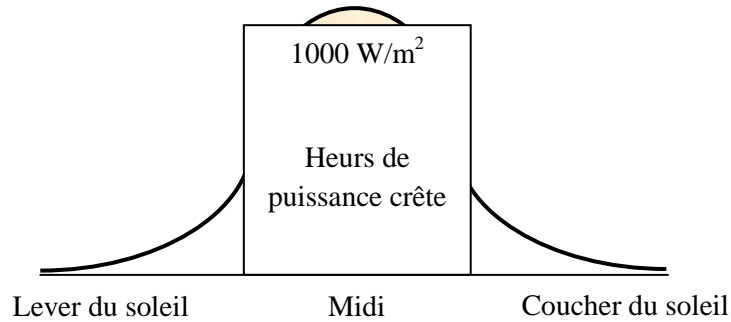


Figure II.1 : heure de puissance crête

II.2.1. Le spectre de rayonnement solaire

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \tag{II.1}$$

Où

E_{ph} : représente la quantité d'énergie.

λ : La longueur d'onde.

c : La vitesse de la lumière.

h : La constante de Planck.

D'après la relation (II.1), cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle qu'elle le montre la figure (II.2)

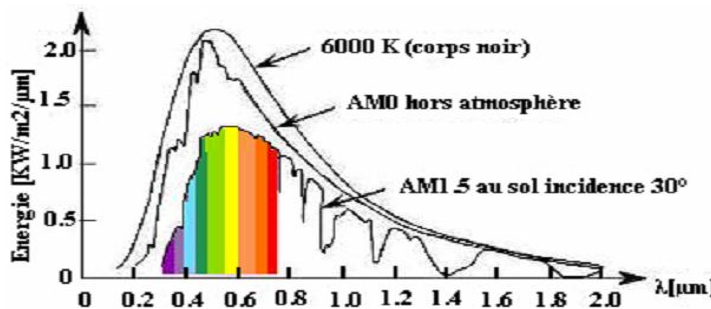


Figure II.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire, [17]

Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

Ainsi les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2 μm (ultraviolet) et 0,4 μm (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5 μm . La figure (II.2) montre aussi que 97,5% de cette énergie est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm , et notamment, entre 0,4 μm et 0,78 μm qui correspond au visible. Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons. Le tableau (II.1) donne les valeurs énergétiques et caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'onde ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

| $\lambda(\mu\text{m})$ | $E_{ph}(e\text{v})$ | Zone |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| 0.2 | 6.2 | Ultraviolet |
| 0.4 | 3.1 | Visible bleu |
| 0.5 | 2.48 | Visible jaune vert |
| 0.78 | 1.59 | Visible rouge |
| 1 | 1.24 | Infrarouge |
| 2 | 0.62 | Infrarouge |
| 4 | 0.31 | Infrarouge |

Tableau (II.1): valeurs énergétiques des photons pour diverses longueurs d'onde

II.3. Rappel sur les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique, intermédiaire entre celle des conducteurs ($10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) et des isolants 10^{-22} à ($10 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) varie dans une grande proportion sous l'effet de la température, l'éclairement et la présence d'impuretés.

Les semi-conducteurs (germanium et silicium) ont une structure cristalline possédant des électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10^{11} atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque. [18]

Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique. Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière 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 dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant avec des impuretés. Un semi-conducteur

présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P. [19]

II.3.1. Dopage du silicium

Le silicium est dopé en introduisant des impuretés dans le cristal. On distingue deux types de dopage suivant la nature des éléments ajoutés au silicium.

II.3.1.1. Dopage de type N

On parle de semi-conducteur de type n lorsque le dopage est réalisé avec des éléments ayant 5 électrons de valence comme le phosphore, l'arsenic et l'antimoine. L'atome avec 5 électrons de valence forme 4 liaisons de covalence et garde un électron qui est alors relativement libre. Figure (II.3).

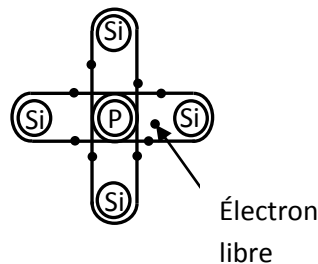


Figure II.3 : Silicium dopé n avec un électron libre

I.3.1.2. Dopage de type P

On parle de semi-conducteur de type p lorsque le dopage est réalisé avec des éléments ayant 3 électrons de valence comme le bore, l'aluminium et le gallium. L'atome avec 3 électrons de valence ne peut former que 3 liaisons de covalence. Il y en a quelque sorte un trou d'électron Figure(II.4).

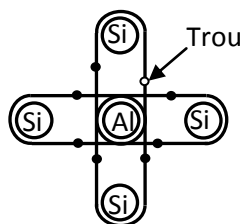


Figure II.4 : Silicium dopé p avec un trou

II.3.2 La jonction N-P

La jonction N-P est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

II.4 La cellule photovoltaïque :

I.4.1 Historique :

Les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) sont apparues en 1930, puis en sélénium (Se). En 1954, les premières cellules au silicium (Si) ont été réalisées dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone aux États-Unis. Aujourd'hui des recherches sont

menées afin de créer de nouvelles cellules à plus fort rendement et ayant une certaine stabilité de leurs caractéristiques dans le temps, tout en réduisant leur coût de fabrication.[17]

II.4.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque ce matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés/décrochés ". Mais une partie de ces électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. La figure(II.5) illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule.[20]

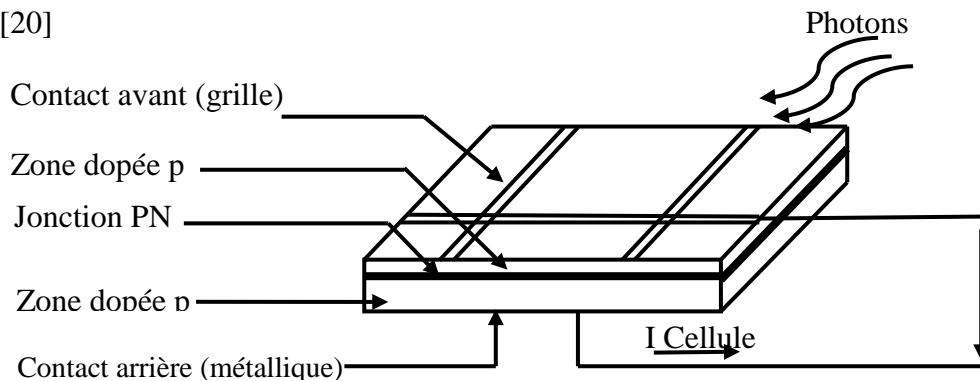


Figure. II.5: Structure d'une cellule photovoltaïque (présence d'une jonction PN).

Une tension électrique apparaît dans les deux cotés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière.

Toute l'énergie de la lumière solaire n'est pas transformée en électricité:

- ❖ Certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles.
- ❖ Certains n'ont pas assez d'énergie pour arracher un électron.
- ❖ Seuls les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créent des paires électrons trous.
- ❖ Enfin de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile. [21]

II.4.3 Rendement Photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance. Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum.

Les principales pertes sont dues à :

- ❖ une absorption incomplète des photons.
- ❖ les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur.
- ❖ la réflexion optique à la surface des cellules, c'est la raison pour laquelle une couche antireflet (SiO_2 , Al_2O_3 ...) est déposée à la surface des cellules.
- ❖ La collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.
- ❖ La grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- ❖ pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles). [16]

II.4.4 Les différents types de cellules solaires :

Différentes technologies de cellules photovoltaïques sont aujourd'hui utilisées. Elles reposent toutes sur les propriétés photo-électriques des matériaux semi-conducteurs. Il est possible de distinguer plusieurs grandes familles de cellules PV selon les technologies utilisées :

II.4.4.1 La filière Silicium :

Actuellement c'est la plus utilisée et ce dès les années 50. Elle offre, à l'heure actuelle, l'un des meilleurs compromis rendement énergétique / coût. On peut distinguer diverses technologies de modules selon la synthèse du matériau silicium.

➤ **Le silicium monocristallin** : Le silicium sous cette forme présente une très grande pureté. Si le cristal est obtenu par la méthode dite de Czochralsky, la structure cristalline est

parfaite. Pour arriver à ce résultat, la fabrication est complexe et coûteuse en énergie. Les rendements de conversion obtenus sont parmi les meilleurs par rapport à la filière silicium.

➤ **Le silicium polycristallin** : La pureté du réseau cristallin est moindre que précédemment. Les rendements de conversion alors obtenus sont plus faibles mais le coût de fabrication de ces cellules est moins élevé.

I.4.4.2 Les filières dites « Couches Minces » :

Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, par exemple :

➤ **Le silicium Amorphe (a-Si)** : L'utilisation de silicium à l'état amorphe remonte au début des années 70. Son utilisation en couches minces limitant les coûts forme actuellement des générateurs à moindre coût concurrençant les filières précédentes.

➤ **Le Tellure de Cadmium (CdTe)** : Le rendement de conversion obtenu pour cette filière est nettement plus satisfaisant. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.

➤ **Le Cuivre Indium Selenium (CIS)** : Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité.

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche. [22]

II.5. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

II.5.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche voir figure (II.6). [23]

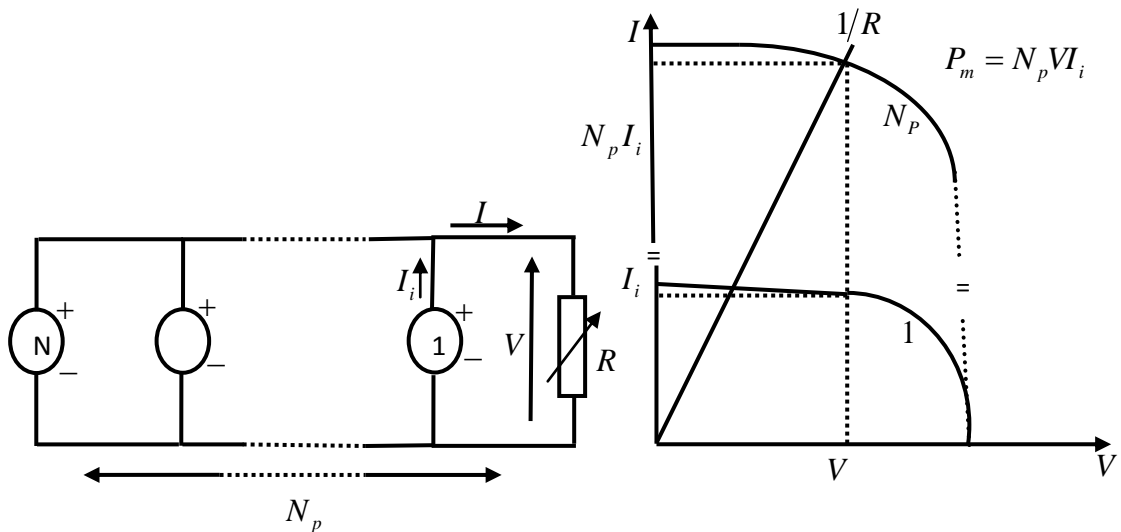


Figure II.6 : Groupement de cellules en parallèle.

II.5.2. Association de cellules photovoltaïques en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série voir figure (II.7).[23]

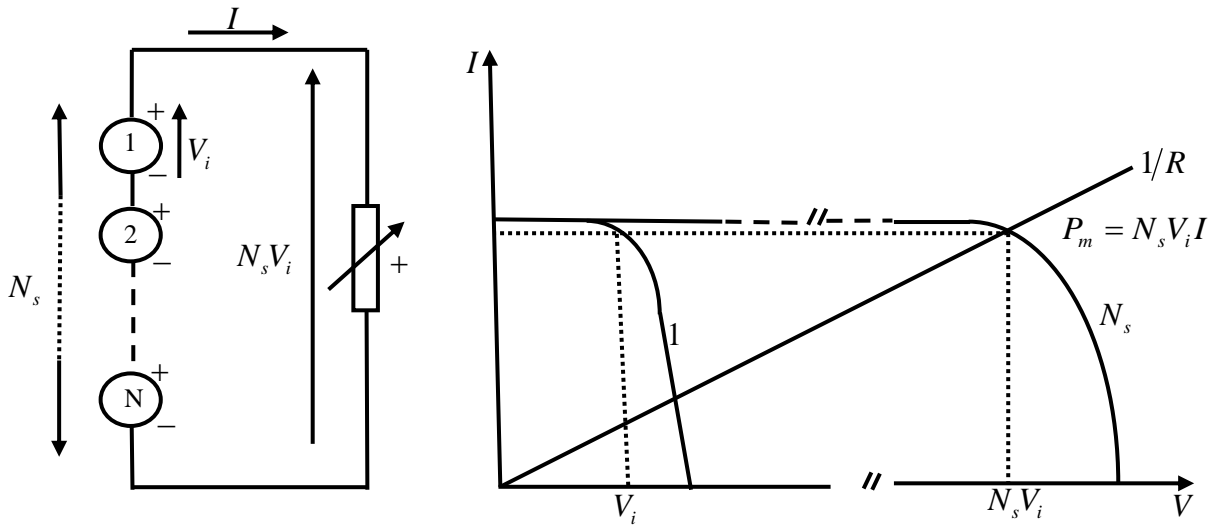


Figure II.7 : Groupement de cellules en série

II.5.3. Le module photovoltaïque

Afin d’augmenter V_{pv} à tension d’utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d’augmenter la tension et l’intensité d’utilisation. [17]

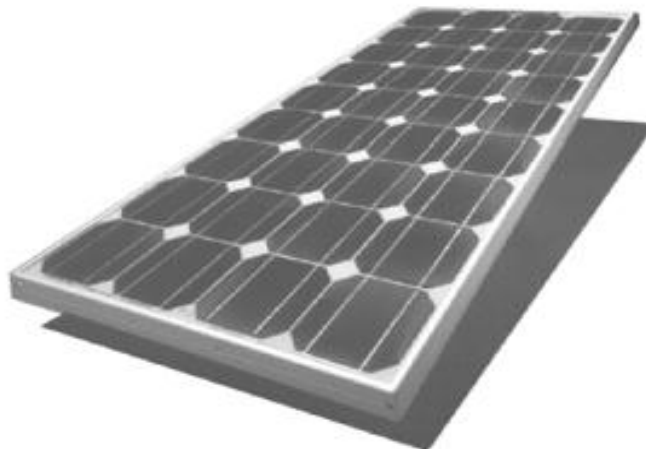


Figure II.8 : Module photovoltaïque

II.5.4. générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} un V_{co} désirés. [24]

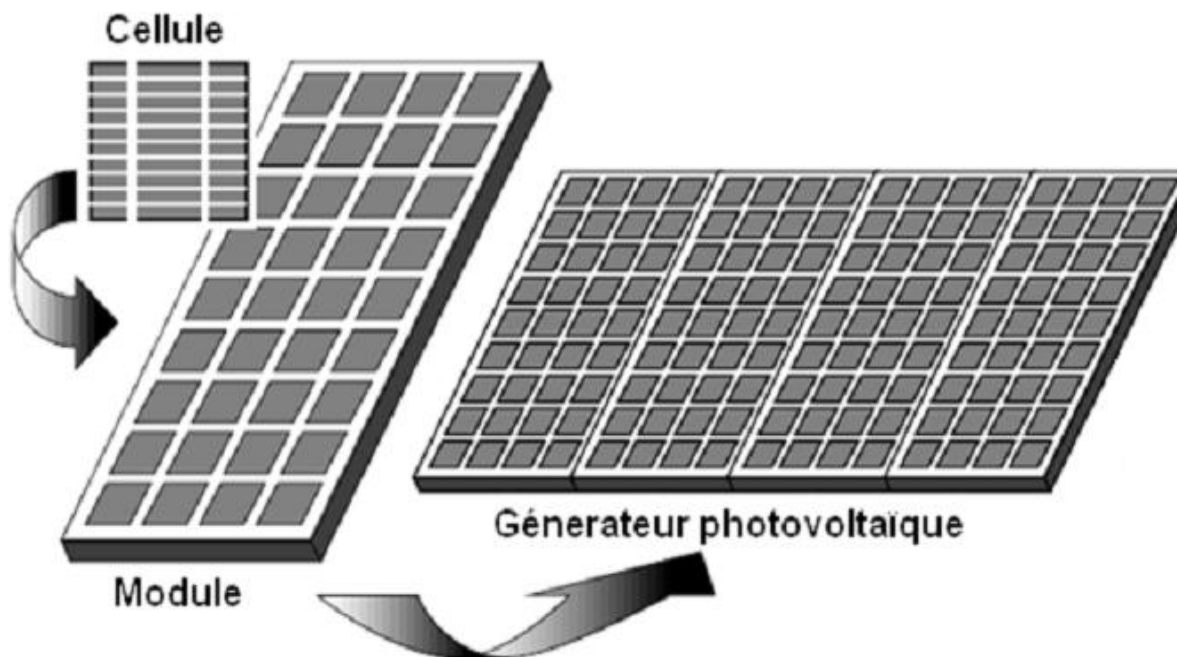


Figure II.9 Composantes d'un générateur photovoltaïque. [17]

II.6. Implantation du champ de modules

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer:

- **L'orientation du champ de modules:** favoriser au maximum une orientation Sud dans l'hémisphère Nord.
- **L'inclinaison des modules:** en fonction de la période de fonctionnement de l'installation, il faudra favoriser soit le fonctionnement été, soit le fonctionnement hiver.
- **L'ombre portée sur le champ de modules:** un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.[21]

II.7. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce graphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. ces notions sont en effet nécessaire pour comprendre le comportement d'un générateur PV et en suite effectuer des optimisations de fonctionnement. La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques du chaque cellule (irradiation et température uniformes).

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- zone 1-2, assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnelle à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{ch}$
- zone 2-3 assimilable à un générateur de tension V_{oc} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s
- Zone 3-4 ou l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh}

C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{opt}, V_{opt}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées. [25]

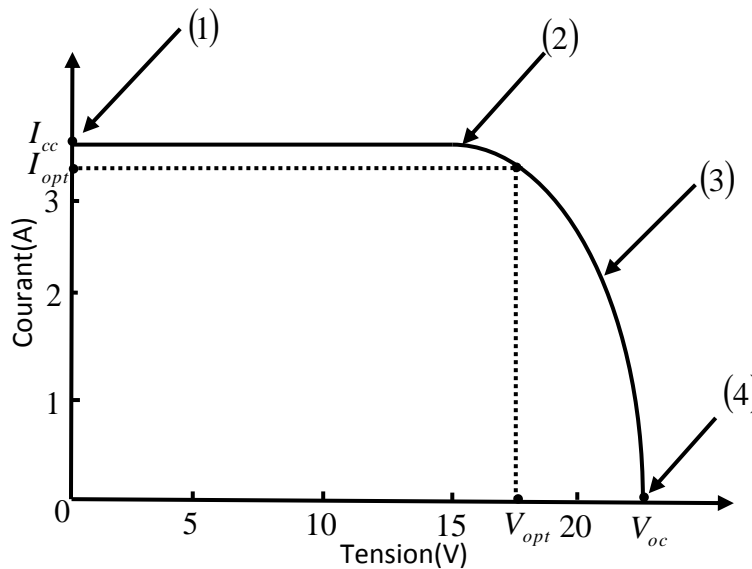


Figure II.10 : les différentes zones de la caractéristique V (I).

II.8. Influence de l'Éclairement La figure (II.11) présente un exemple de courbes pour différents niveaux de rayonnement.

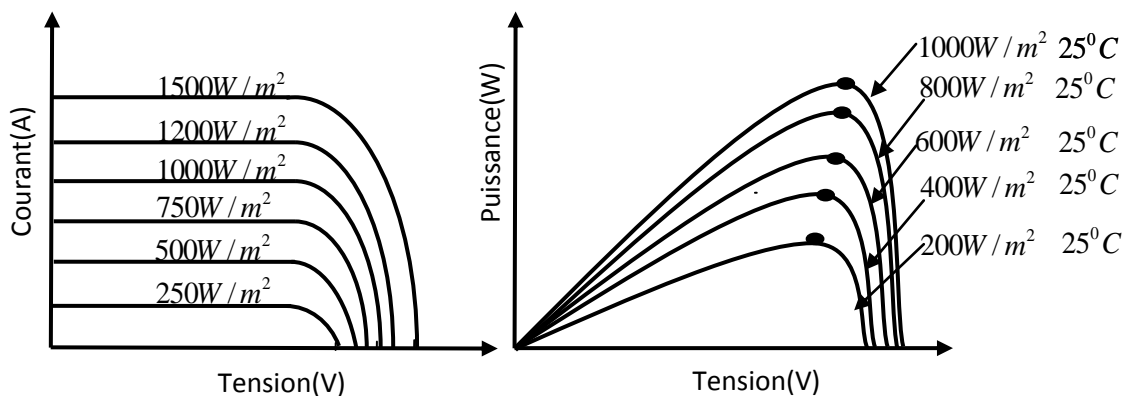


Figure II.11: Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements. [26]

A partir de cette figure, il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

I.9. Influence de la Température

La figure (II.12) présente des courbes courant- tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

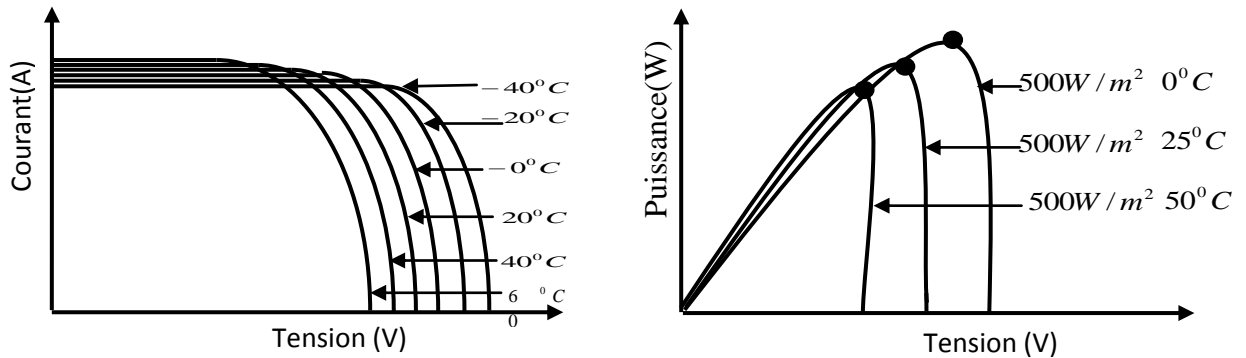


Figure II.12: Influence de la température sur la caractéristique électrique. [24]

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

II.10. Connexion directe source-charge

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût Figure (II.13). [27]

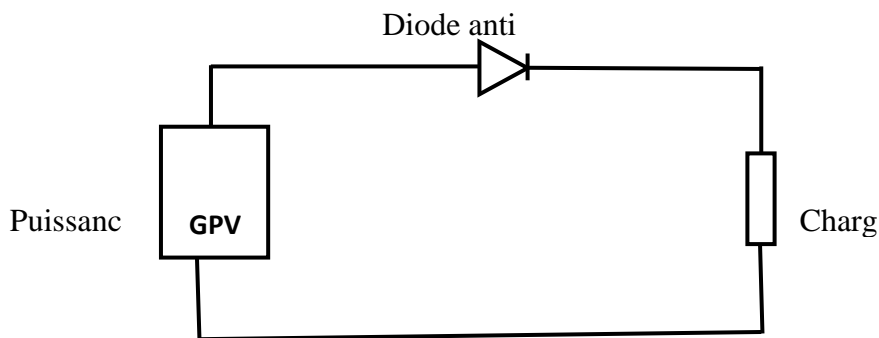


Figure II.13 : Connexion directe entre un GPV

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension. Le transfert de P_{\max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. [27]

II.11. Modélisation du générateur photovoltaïque

II.11.1 Cellule photovoltaïque idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.21), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. [28]

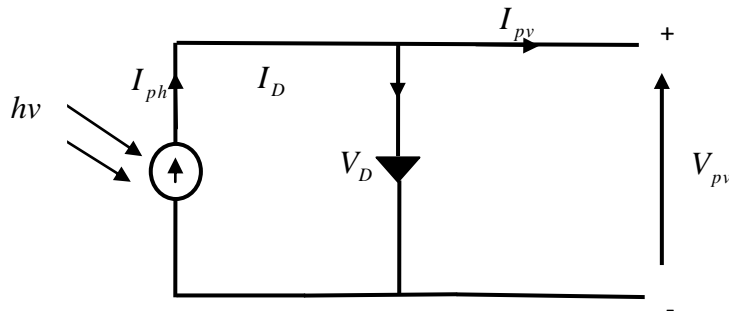


Figure II.14: Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- ❖ L'équation caractéristique est déduit d'une manière directe à partir de loi de kirchoff est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.2)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par : [28]

$$I_{ph} = [I_{ph.ref} + K_1(T - T_{ref})] \frac{G}{G_n} \quad (II.3)$$

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_t} - 1\right) \right] \quad (II.4)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{N \cdot K \cdot T}{q}$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

q : la charge d'électron [$1.60217646 \times 10^{-19}$ C] ;

k : la constante de Boltzmann [$1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K] ;

$I_{ph,n}$: Le courant photonique sous condition de référence (A) ;

G, G_n : L'éclairement réels et à la condition de référence [W/m²] ;

T, T_{ref} : Température de cellules, réelles et à la condition de référence [K] ;

K_1 : Coefficient de la température du courant de court circuit (A/K) :

Pour simplifier le calcul de I_{ph} , on fait souvent l'approximation que le courant $I_{ph,ref}$ est égal au courant de court circuit $I_{sc,ref}$ du module.

II.11.2 Cas d'une cellule réelle

Nous avons utilisé le modèle électrique de littérature de Kaiser et Reise. La figure suivante Figure (II.15) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . la première diode D_1 décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde D_2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge.

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). [29]

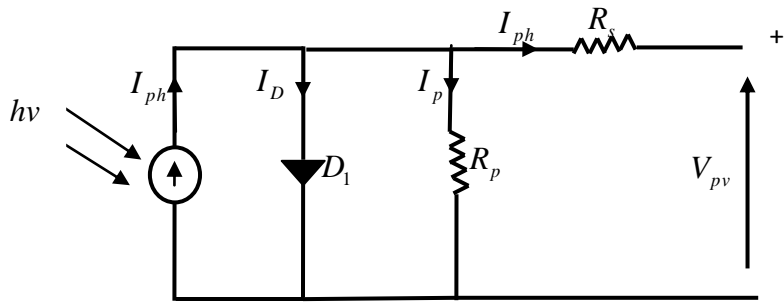


Figure II.15: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \tag{II.5}$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;

I_d : Le courant circulant dans la diode;

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_t} - 1\right) \right] \tag{II.6}$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression : [30]

$$I_s = I_{sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{E_g \cdot q}{A \cdot K} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (II.7)$$

I_{sref} : Est le courant de court circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence ;

A : Facteur d'idéalité de la jonction ;

E_g : Énergie de gap [ev] ;

T : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

T_{ref} : Température de référence des cellules PV [°K] ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;

V_{pv} : La tension de sortie ;

R_p : Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et Sur les coins de cellule.

R_s :résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connections des cellules.

En substituant les équations (II.10) et (II.11) dans l'équation (II.9) le courant I_{pv} devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - \left(I_s \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{V_t} \right) + \frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{R_p} \right) \quad (II.8)$$

Le modèle d'un générateur photovoltaïque fait donc intervenir 6 paramètres inconnus suivants (I_{phref} , I_s , R_p , n , R_s , k_1). Le coefficient de température du photocourant k_1 est fréquemment donné par le fabricant .Il est en général positif, mais très faible. La valeur de la résistance shunt R_p , représente l'inverse de la pente du plateau de la courbe $I(V)$ pour les valeurs faibles de V . elle peut être déterminée à partir des valeurs mesurée. Les quatre paramètres (I_{phref} , I_s , n , R_s), sont déterminés à partir de la mesure de la caractéristique $I(V)$ pour irradiance et température donnée (G_{ref} , T_{cref}).

Le module solarex *MSX60*, typique de 60 W, à poly cristallin a été choisi pour modéliser le générateur photovoltaïque, le module comprends 36 cellules connectée en série la modélisation du module PV est effectué par le logiciel Matlab avec les points caractéristiques suivantes :

| | |
|---|----------------------|
| Éclairement standard G | 1000W/m ² |
| Température standard T | 25 ⁰ C |
| Puissance maximale P_{\max} | 60W |
| Tension à puissance maximale ou la tension optimale (V_{opt}) | 17.1V |
| Courant à puissance maximale ou courant optimale (I_{opt}) | 3.5A |
| Tension à circuit ouvert V_{co} | 21.1V |
| Courant de court- circuit I_{sc} | 3.8A |
| Énergie de la bande interdite | 1.12 ev |
| Coefficient de température de I_{sc} | 65 mA/ °C |
| Coefficient de température de V_{co} | -80m V/ °C |
| Coefficient de température de puissance | (0.5±0.05)% /°C |
| Courant de saturation I_{sat} | 20 NA |
| Nombre des cellules en série | 36 |

Tableau (II.2) : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards «CST» [31]

II.12. Les caractéristiques électriques d'un module PV

Les figures (II.16) et (II.17) (caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV) présentent, pour un éclairement et une température donnés, trois points remarquables: le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la puissance optimale qui est la puissance maximale (P_{\max}) délivrée par les modules PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie des modules PV, il faut les faire fonctionner au point de puissance maximale

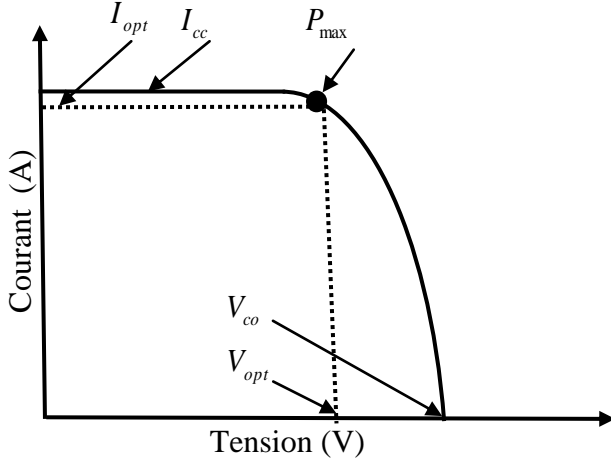


Figure. II.16: Caractéristique (I-V) d'un module PV. [32]

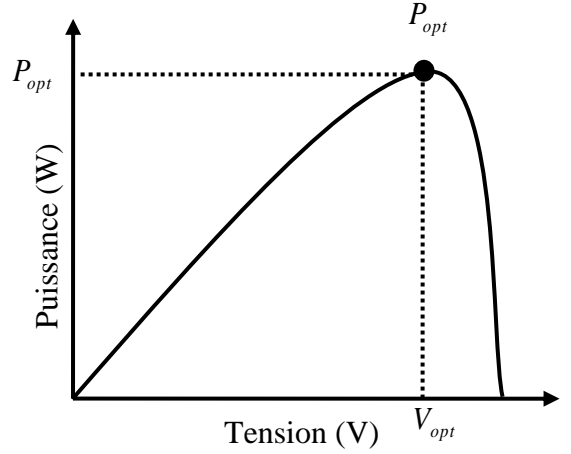


Figure. II.17: Caractéristique (P-V) d'un module PV. [32]

II.12 .1.Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 * \left(\exp\left(\frac{R_s * I_{cc}}{V_t}\right) - \frac{R_s * I_{pv}}{R_p} \right) \quad (II.9)$$

Pour la plupart des modules PV (dont la résistance est faible), et sous éclaircment normal, on peut négliger le terme : $I_0 * \left(\exp\left(\frac{R_s * I_{cc}}{V_t}\right) - 1 \right)$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} = I_{ph} - \frac{R_s * I_{cc}}{R_p} \quad (II.10)$$

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), le courant I_{cc} se confond avec le photocourant.

II.12 .2.Tension de circuit ouvert

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul. C'est la tension maximale d'un générateur PV. De ce fait la tension en circuit ouvert s'écrira:

$$V_{co} = V_T \ln\left(I_{ph} - \frac{V_{co}}{R_p} \right) \frac{1}{I_0} + 1 \quad (I.11)$$

Dans le cas d'un module PV idéal, sa valeur est:

$$V_{co} = V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.12)$$

Où :

$$\frac{V_{co}}{R_p I_0} \ll \left\langle \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right\rangle$$

II.12 .3.Puissance optimale

La puissance maximale utile $P_{opt} = V_{opt} I_{opt}$, s'obtient en annulant la dérivée de la puissance.

$$\left(\frac{dP}{dV} \right) = \left(\frac{dPV}{dV} \right) = 0 \quad \text{Ce qui donne : } \left(\frac{dV}{dI} \right) = - \frac{V_{opt}}{I_{opt}}$$

on aura donc:
$$\frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_T}{I_{cc} + I_0 - I_{opt}} \quad (\text{II.13})$$

II.12. 4. Le facteur de forme

On appelle facteur de forme f le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule, $P_{max}(W)$ dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) [17]:

$$F = \frac{P_{max}}{I_{CC} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.14})$$

F : facteur de forme.

$P_{max}(W)$: Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

$V_{co}(v)$: Tension de circuit ouvert.

$I_{cc}(A)$: Intensité de court –circuit.

II.12. 5. Rendement de conversion

Le rendement, η (efficiency) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{co} \times I_{cc} \times F}{E \times S} \quad (\text{II.15})$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm.

La densité de puissance incidente égale à $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

II.13. Simulation du générateur PV

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

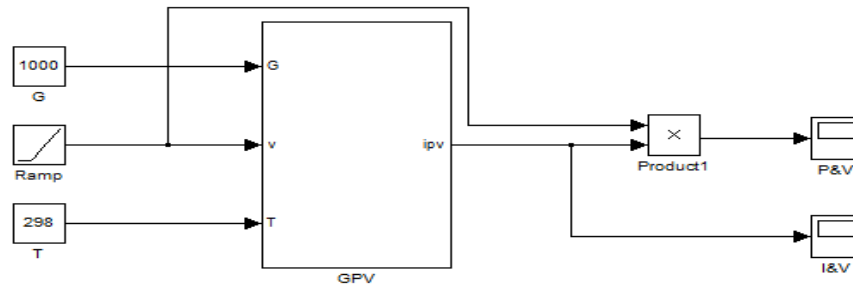


Figure II.18 Modèle 'SIMULINK' du système solaire passif (sans contrôleur).

II.13. 1. Les caractéristiques électriques du panneau PV

La courbe caractéristique d'un panneau PV : représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes du panneau PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes du panneau PV).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (température=25°C, insolation=1000W/m²).

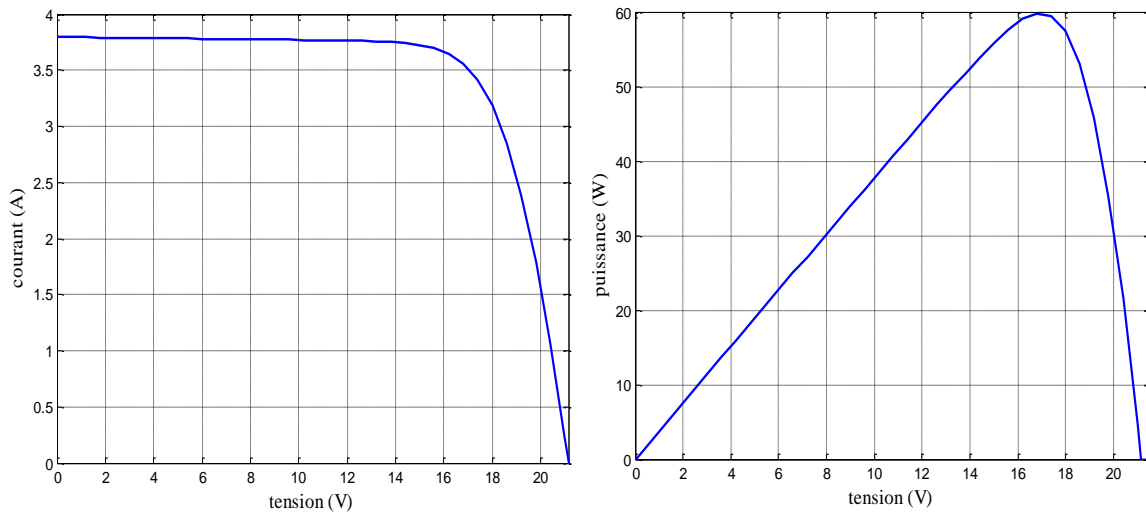


Figure II.19 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du panneau PV (température=25°C insolation=1000W/m²).

D'après cette caractéristique on a :

Tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I_{co} = 0$)

La Tension de circuit ouvert V_{co} du panneau est égale a : 21.15 volts.

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du panneau PV.

B. Courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{cc} = 0$)

Le courant I_{cc} du panneau est égale a 3.79A On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du panneau.

C. La puissance maximale

La puissance maximale p_{max} correspond à la valeur : 60 watt

II.13.2 L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV

L'énergie électrique produite par un panneau PV dépend de l'éclairement qu'il reçoit sur sa surface. La figure suivante (II.20) représentent respectivement les caractéristiques courant-tension, puissance-tension d'un module PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température constantes= 25°C .

On remarque que la tension V_{opt} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{opt} qui augmente fortement avec l'éclairement.

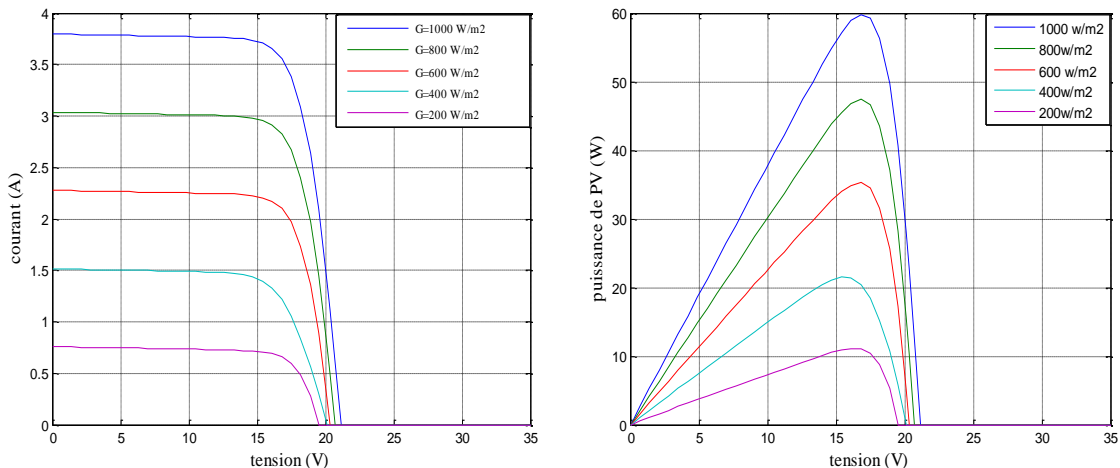


Figure II.20 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un panneau PV en fonction de l'éclairement à température constante (25°C).

II.13.3 L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV

Les caractéristiques électriques du panneau PV dépendent de la température. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension ainsi que de la puissance en fonction de la température, les autres conditions extérieures restant fixes.

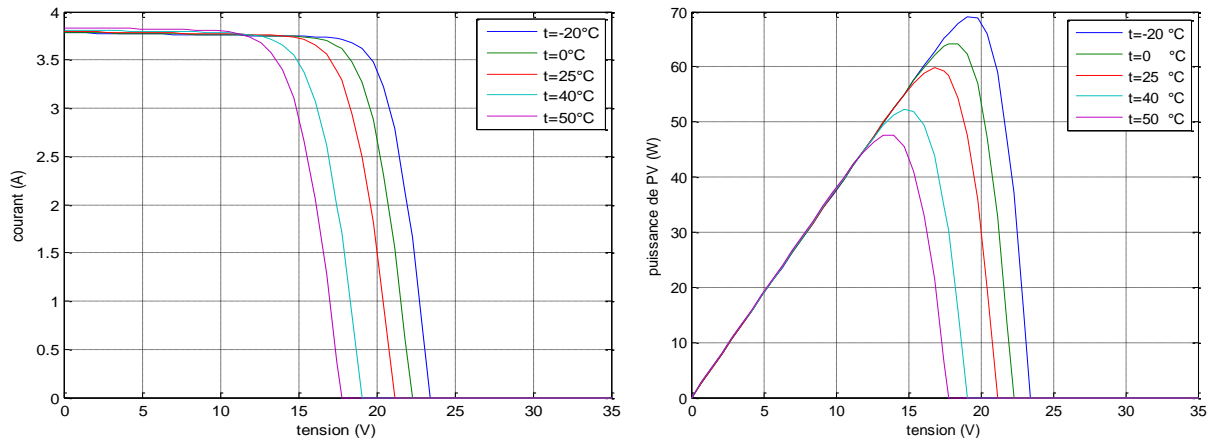


Figure II.21 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module en fonction de la température à éclairement constant ($1000W/m^2$).

La figure (II.21), montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale.

II.13.4 Simulation sans MPPT (connexion direct)

La figure (I.21), illustre d'un couplage direct entre un GPV et une batterie (un système sans contrôleur). Le but de cette étude est de voir le comportement des panneaux photovoltaïques sans régulateur et de montrer ainsi la nécessité d'un contrôleur MPPT.

Le panneau comporte un module de 36 cellules en série et La charge est un modèle de batterie. Cet essai est fait dans les conditions suivantes :

- Un éclairement solaire de $1000w/m^2$. Une batterie
- La température ambiante reste constante et égale à 25^0C

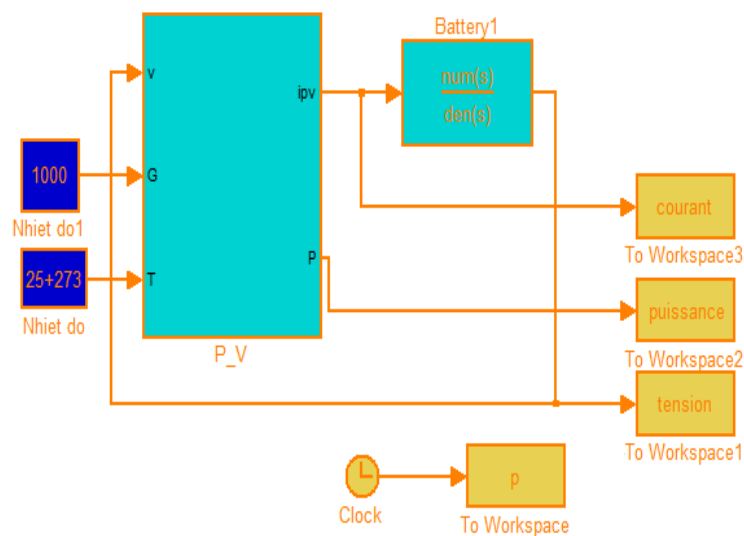


Figure II.22. Modèle 'SIMULINK' du système solaire passif (sans contrôleur).

La courbe caractéristique d'une batterie idéale peut être représentée par une ligne droite (source de tension). Elle varie en fonction de l'état de charge sur une certaine plage de tension, par exemple entre 11.7V et 14.4V dans le cas d'une batterie au plomb d'une tension nominale de 12V .

La figure (II.23) représente les courbes caractéristiques d'un GPV ainsi que celle d'une batterie pour quatre niveaux d'éclairement. On remarque que les quatre points de fonctionnement sont loin du MPP. Dans ce cas, un étage d'adaptation pour pouvoir tirer le maximum de puissance que le GPV est apte à fournir.

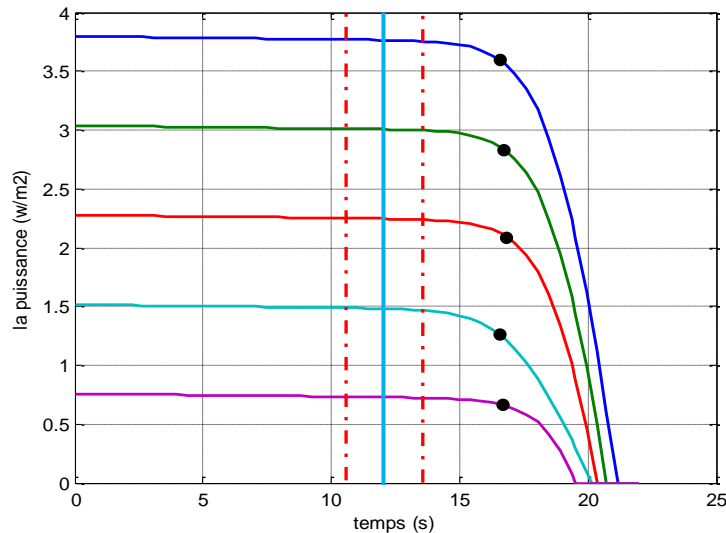


Figure II.23 Caractéristiques I/V d'un GPV et d'une

La connexion directe du panneau solaire reste actuellement le mode de fonctionnement le moins cher. L'inconvénient majeur de ce fonctionnement est la dépendance directe de la puissance fournie par le générateur envers l'éclairement.

II.14.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Comme exemple d'application, nous avons pris des charges. Les résultats donnés montrent que ce type de connexion GPV-Charge quelconque peut s'annoncer très rentable, pour certaines charges et pas pour d'autres charges. Cette étude peut donc nous renseigner si nous devons adopter cette connexion directe ou pas, selon la charge à approvisionner par voie photovoltaïque. Les valeurs de nos charges imposeront donc ce choix. La connexion directe GPV-Charge doit être préalablement testée par une étude concise du rendement global du système. Opter pour un tel système est étroitement lié aux charges à alimenter. Avec une détermination précise, on peut s'apercevoir s'il y a concordance entre l'union directe GPV-Charge ou s'il est souhaitable d'inclure d'autres méthodes en vue d'une bonne exploitation du générateur photovoltaïque (par exemple introduction d'un dispositif de recherche de point de puissance optimale).

III.1.Introduction

Nous avons vu précédemment que les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un Générateur photovoltaïque montrent que la puissance maximale générée dépend de l'éclairement et de la température. De plus le Générateur photovoltaïque ne peut céder son maximum d'énergie que pour une certaine tension et courant de fonctionnement. Le point de puissance maximal (PPM) est à son tour fonction de l'éclairement, de la température ainsi que de la charge. Par conséquent il faut adapter la charge en permanence pour que le Générateur cède le maximum d'énergie.

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « buck », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

III.2. Convertisseurs DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Figure (III.1) rappelle le schéma de principe d'un hacheur.

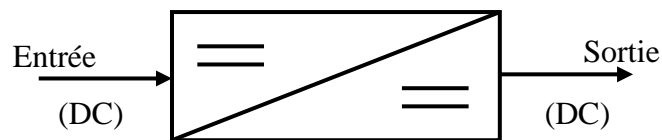


Figure (III.1) Schéma de principe du hacheur

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT. [17]

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Comme le montre la figure (III.2) pendant le fonctionnement du hacheur, on ferme le commutateur avec un temps de fermeture égal à $d.T_s$, et on l'ouvre dans un temps d'ouvertures égal à $(1-d)T_s$, où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$
- d Le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$)

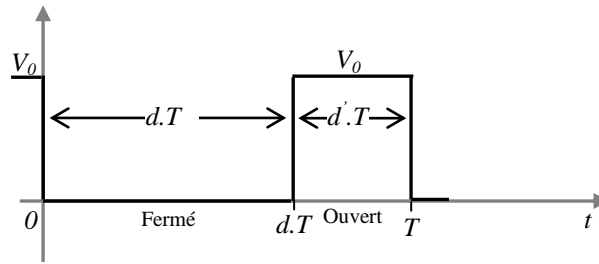


Figure (III.2) : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Dans cette section on va discuter les différents types de convertisseurs Continu-Continu (DC/DC) afin de les modéliser mathématiquement pour une utilisation facile de simulation:

- Les éleveurs (BOOST),
- Les abaisseurs (BUCK),
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents.

III.2.1. Hacheur dévolteur « Buck »

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (III.3.). Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.[33]

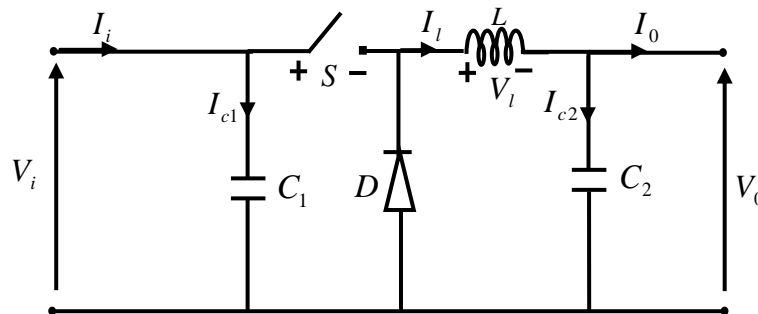


Figure III.3. Circuit idéal du hacheur

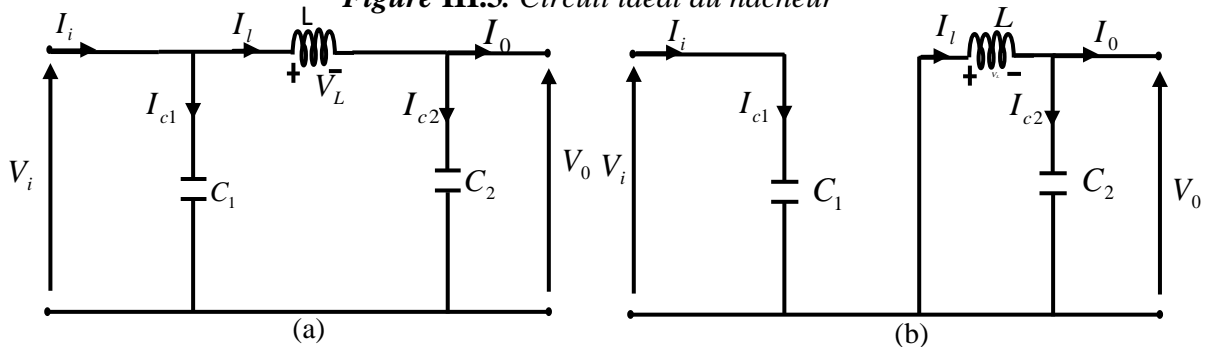


Figure III.4. Circuit équivalent du hacheur dévolteur-survolteur

(a) : K fermé, (b) : K ouvert

Quand le commutateur est fermé Figure (III.4.a) (c.à.d. $t \in [0, dT_s]$), la diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance. Dès que le commutateur sera ouvert $t \in [d'T_s, T_s]$, la source et la charge ne sont plus en contact durant cette phase. La diode sera saturée et l'inductance maintiendra le courant dans la charge, Figure (III.4.b) $t \in [d'T_s, T_s]$

III.2.1.1. Modèle mathématique du circuit équivalent :

Pour avoir le modèle mathématique du convertisseur dévolteur, on l'analyse pour les deux états de commutation (commutateur ouvert et fermé).

La Figure (III.4.a) montre le circuit équivalent du convertisseur buck avec le commutateur fermé. La Figure (III.4.b) représente le convertisseur buck avec le commutateur ouvert pendant un intervalle de temps $d'T_s$ ou d'est défini comme suit :

$$d' = 1 - d \quad (III .1)$$

1. Quand le commutateur est fermé figure (III.4.a). (c.à.d. $t \in [0, dT_s]$) on a les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i}{dt} = I(t) - I_i(t), \quad (III .2)$$

$$I_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o}{dt} = I_i(t) - I(t), \quad (III .3)$$

$$V_l(t) = L \frac{dI_l}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (III .4)$$

2. Quand le commutateur est fermé (III.4.b) (c.à.d. $t \in [dT_s, T_s]$) on a les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I(t), \quad (III.5)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_l(t) - I_o(t) \quad (III.6)$$

$$V_l(t) = L \frac{dI_l(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (III.7)$$

C'est les équations de base utilisées pour obtenir tous les modèles mathématique qui décrivent les différentes propriétés du convertisseur Buck.

III.2.1.2. Approximation des Petites ondulations

Chaque variable des équations (III.2) à (III.7) a une composante continue plus une composante harmonique. Cela peut être exprimé en générale par :

$$x(t) = X + x_{ond}(t) \quad (III.8)$$

Ou : X représente la composante continue du signal $x(t)$, qui est égale à sa valeur moyenne $\langle x(t) \rangle$, tandis que x_{ond} : est la composante alternative du signal.

L'amplitude des ondulations est très petite par rapport à la composante continue :

$$|X_{ond}(t)| \ll \langle X \rangle \quad (III.9)$$

Pour cela les ondulations peuvent être négligées et le signal peut être approximé par sa composante continue :

$$X(t) \cong X = \langle X(t) \rangle \quad (III.10)$$

Cette approximation s'appelle approximation des petites ondulations ou l'approximation des ondulations linéaire ; elle facilite beaucoup l'analyse mathématique des hacheurs.

Les équations (III.2) à (III.7) pour dT_s deviennent alors :

$$I_{C1} = I - I_l \quad (III.11)$$

$$I_{C2} = I_l - I_0 \quad (III.12)$$

$$V_l = V_i - V_0 \quad (III.13)$$

Et similairement pour $d \cdot T_s$

$$I_{C1} = I \quad (III.14)$$

$$I_{C2} = I_l - I_0 \quad (III.15)$$

$$V_l = -V_0 \quad (III.16)$$

III.2.1.3. Étude du régime continue

Les valeurs de la composante continue de la tension d'inductance et du courant de condensateur sont définies comme la moyenne de leur signal original :

$$V_l = \langle V_l \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_l(t) dt \quad (III.17)$$

$$I_c = \langle I_c \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_c(t) dt \quad (III.18)$$

Utilisant la relation $V_l = L \frac{dI_l}{dt}$ et $I_c = C \frac{dV_c}{dt}$ on obtient :

$$I_l(T_s) - I_l(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} V_l(t) dt \quad (III.19)$$

$$V_c(T_s) - V_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} I_c(t) dt \quad (III.20)$$

Si on suppose qu'on est à l'état d'équilibre (permanent), les valeurs initiales et finales pendant une période de commutation doivent être égales. [21]

$$I_l(t + T_s) = I_l(t), \quad (III.21)$$

$$V_i(t + T_s) = V_i(t) \quad (III.22)$$

Ces conditions s'appellent inductor volt-second balance et capacitor charge balance respectivement . [21] Il est maintenant possible de réécrire les équations (III.18) et (III.19) comme suit:

$$\frac{1}{L} \int_0^{T_s} V_L(t) dt = 0, \quad (III.23)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^{T_s} I_C(t) dt = 0 \quad (III.24)$$

En comparant les équations (III.6) et (III.7), avec les définitions des valeurs moyennes de V_i et I_C dans (III.17) et (III.18), il est évident que les valeurs de la composante continue pour la tension d'inductance et le courant de condensateur doivent être nulles :

$$V_i = \langle V_i(t) \rangle = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} V_L(t) dt = 0 \quad (III.25)$$

$$I_C = \langle I_C(t) \rangle = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} I_C(t) dt = 0 \quad (III.26)$$

En employant cette conclusion et en appliquant la relation de la valeur moyenne (III.9) sur les systèmes d'équations (III .2) à (III .7) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} I_0 = I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \\ I_L = \frac{1}{d} \left(I - C_1 \frac{dV_i}{dt} \right) \\ V_L = \frac{1}{d} \left(V_0 - L \frac{dI_L}{dt} \right) \end{cases} \quad (III.27)$$

III.2.1.4. Le rapport de conversion

Les équations (III.13) et (III.16) qui explicitent la tension aux bornes de l'inductance dans les deux périodes de fermeture et d'ouverture du commutateur, utilisant l'approximation des petites ondulations, donnent la figure III.5.

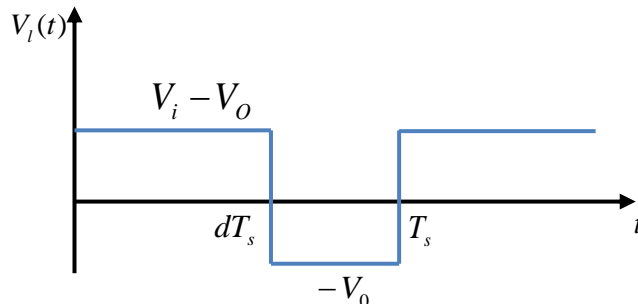


Figure (III.5). Forme d'onde de la tension d'inductance $V_L(t)$
Pour un hacheur dévolteur

L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde de la Figure (III.5).d'après la condition qui s'appelle inductor volt-second balance et capacitor charge balance la tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent donc:

$$V_l(t) = d(V_i - V_o) + d'(-V_o) = 0 \quad (III.28)$$

En utilisant les équations (III.11) à (III.13) et en appliquant le principe de capacité charge balance (l'équilibre des charges capacitives) on obtient les expressions suivantes pour les courants moyens du condensateur :

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = d(I - I_l) + d'I = 0 \quad (III.29)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = d(I_l - I_o) + d'(I_l - I_o) = 0 \quad (III.30)$$

L'avantage de la combinaison de (III.28) et (III.30) avec (III.1) mène à trois équations simples qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état d'équilibre d'un hacheur dévolteur.

$$dV_i = V_o \quad (III.31)$$

$$I = dI_l \quad (III.32)$$

$$I_l = I_o \quad (III.33)$$

A partir de l'équation (III.28), le rapport de conversion de hacheur dévolteur est donné par la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = d \quad (III.34)$$

L'équation (III.34) qui montre bien que le convertisseur buck est un abaisseur de tension, car la tension de sortie du convertisseur est égale à la tension d'entrée multipliée par un coefficient qui varie dans l'intervalle [0 1].

III.2.2. Hacheur survolteur « Boost » :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (III.6). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

[19]

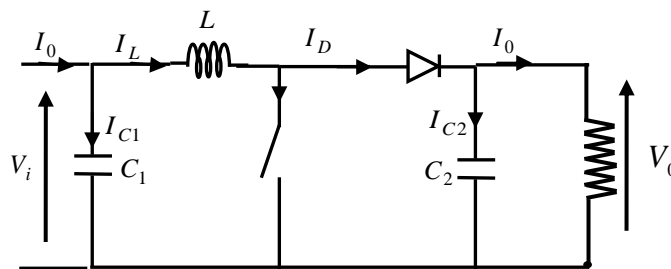


Figure III.6. Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

Comme montré sur la figure (II.7), dans la première phase de fonctionnement, quand l'interrupteur S est fermé le courant dans L augmentera et quand le commutateur est ouvert (la deuxième phase de fonctionnement) le courant I_L traversera la diode pour être réparti dans le circuit RC.

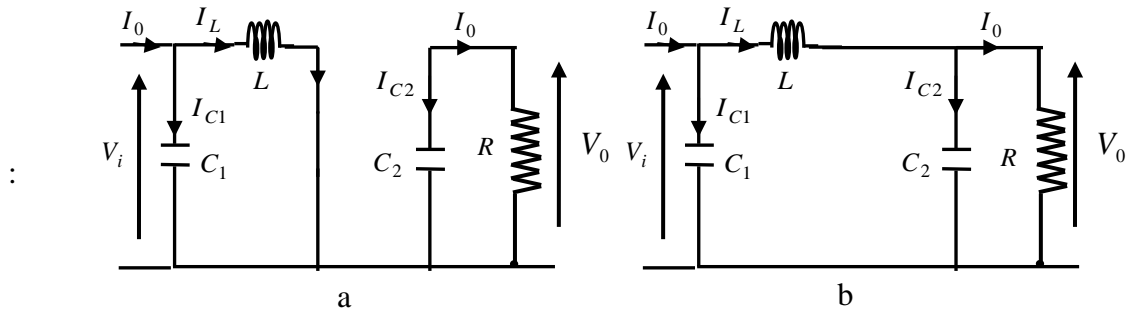


Figure (III.7) : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a): K fermé, (b) : ouvert

Dans le hacheur Boost on a:

$$V_i \times D \times T = (V_o - V_i)(1 - D) \times T \quad (III.35)$$

Dans ce hacheur la limite entre la mode continu et le mode discontinu peut être trouvée par la formule suivante :

$$L_b = (1 - D)^2 \times D \times \frac{R}{2f} \quad (III.36)$$

La valeur minimale pour que la capacité satisfasse le mode de conduction continu sera trouvé par :

$$C_{\min} = \frac{D \times V_o}{V_r \times L \times f^2} \quad (III.37)$$

A partir de l'équation (III.35), le rapport de conversion de hacheur dévolteur est donné par la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (III.38)$$

III.2.3. Hacheur dévolteur-survolteur « Buck-Boost convertter »

Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée. [14]

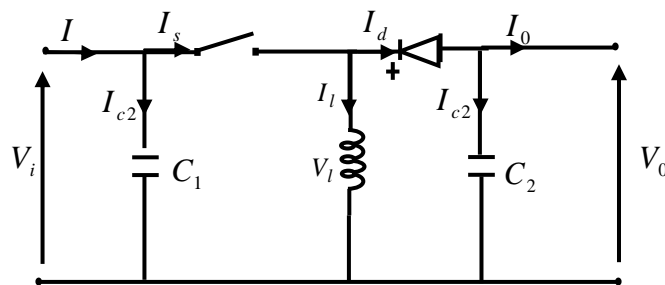


Figure III.8. Circuit idéal du hacheur dévolteur-survolteur.

La figure (III.8) montre le schéma de circuit équivalent idéal de convertisseur dévolteur-survolteur. Quand le commutateur est fermé, pendant l'intervalle dT_s de la période de commutation T_s , le courant commence à circuler de la source d'entrée jusqu'à la masse à travers l'inductance figure (III.9). Après que le commutateur s'ouvre au début de l'intervalle $d'T_s$ le courant est maintenu grâce à la nature de l'inductance, mais cette fois il circule à travers la diode et la charge. Puisque le courant est forcé à traverser la charge, la tension de sortie V_0 du convertisseur dévolteur-survolteur est négative. La variation du rapport cyclique d changera le rapport de conversion entre la tension d'entrée et la tension de sortie $\frac{V_o}{V_i}$.

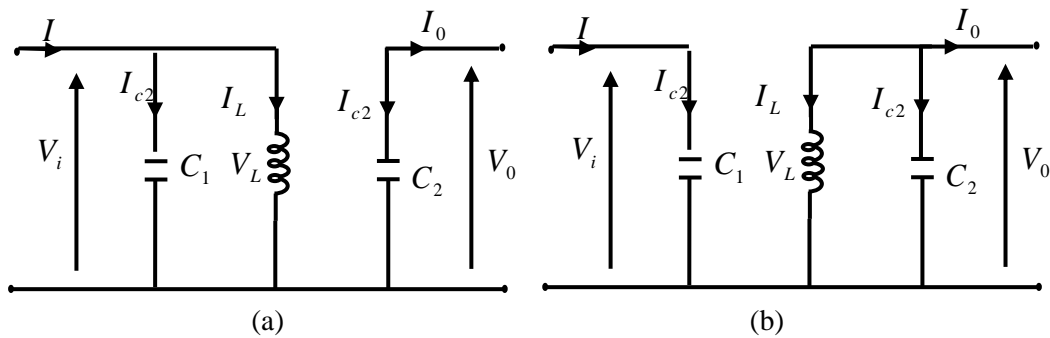


Figure III.9 Circuit équivalent du hacheur dévolteur-survolteur
(a) : K fermé, (b) : K ouvert

La condition sur le courant dans L Pour (une étude en régime continu) donne :

$$V_i * d * T_s + (1-d) T_s * V_0 = 0 \tag{III.39}$$

D'où la fonction de transfert concernant la relation entrée-sortie est donne par:

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{d}{1-d} \tag{III.40}$$

Dans cet hacheur la limite entre la conduction continue et la discontinu peut être trouvée dans la formule suivante :

$$L_b = (1 - D)^2 \times D \times \frac{R}{2f} \tag{III.41}$$

Puisque la structure de circuit de ce hacheur est la même que celle du hacheur survolteur La valeur minimale pour que la capacité pour le hacheur dévolteur-survolteur reste la même.

III.3.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracker, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques. [1]Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique $I = f(U)$ est fortement non linéaire. En

conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Les Figure (III.10) représentent la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

Dans cette partie, on va citer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale allant de la méthode la plus simple jusqu'à la plus complexe et en citant à la fin notre méthode qui est l'application Méthode 'perturbation et observation à la poursuite du point de puissance maximale

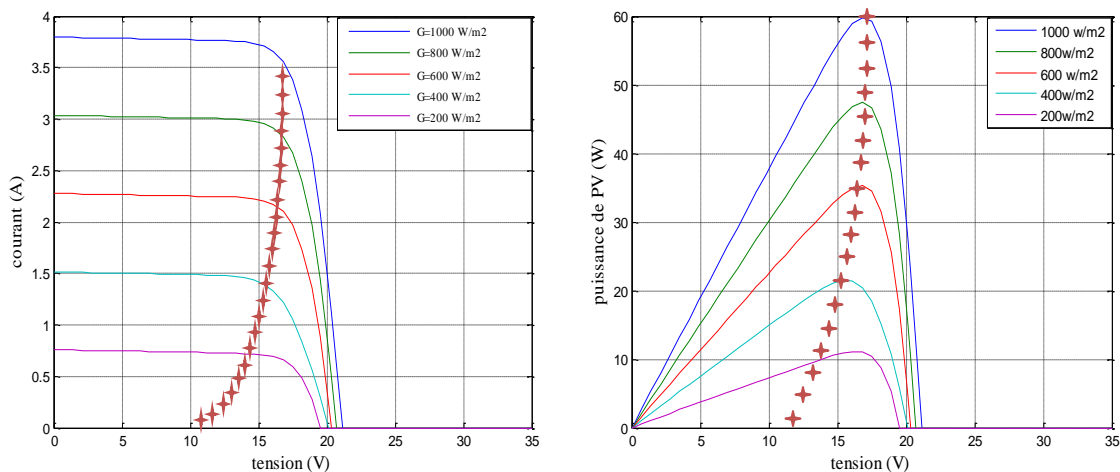


Figure III.10 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension et la trajectoire de PPM d'un panneau PV en fonction de l'éclairement à température

III.4. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

III.4.1. Méthodes à contre réaction de tension

Dans ce cas on se repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur. [21] La figure (III.11) présente le schéma synoptique de cette méthode.

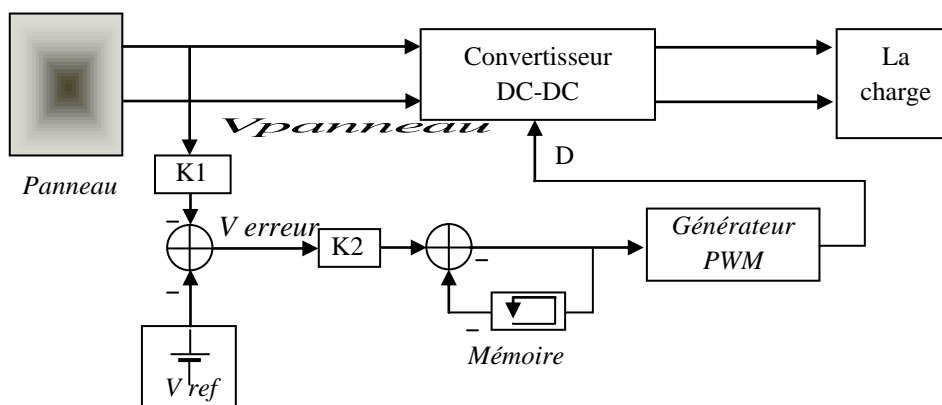


Figure III.11 Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) :

III.4.1.1. Référence fixe

A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l’ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l’année.

Dans cette méthode la tension de référence est prédéfinie Figure (III.12). Elle correspond à la tension moyenne de l’intervalle des points des puissances maximales Figure (III.13) relevées par des tests sous différentes conditions d’ensoleillement et de température.

Afin de générer le maximum de puissance on fait varier simplement les différents facteurs de pondération lors de la mise au point. [14]

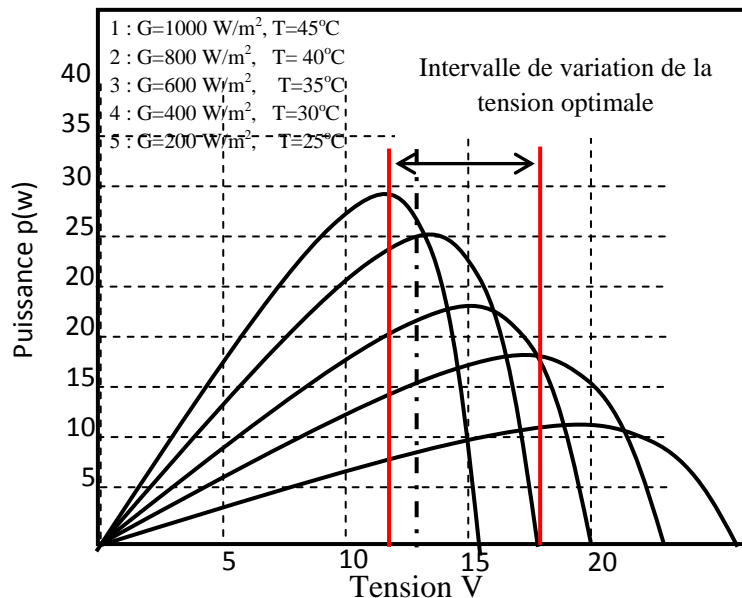


Figure III.12. Intervalles de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des ensoleillements et des températures variables.

II.4.1.2. Référence en fonction de V_{oc}

Pour un ensoleillement et une température donnés la tension qui correspond à la puissance maximale du panneau est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du panneau. [34]

La fonction $V_{mp} = f(V_{oc})$ est pratiquement linéaire et elle est de forme $V_{mp} = KV_{oc}$. Pour cela la tension en circuit ouvert du panneau est prélevée régulièrement par le débranchement du panneau pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité généralement égale à 0.77 figure (III.14). En exploitant cette propriété, on peut traquer en permanence le point de puissance maximale.

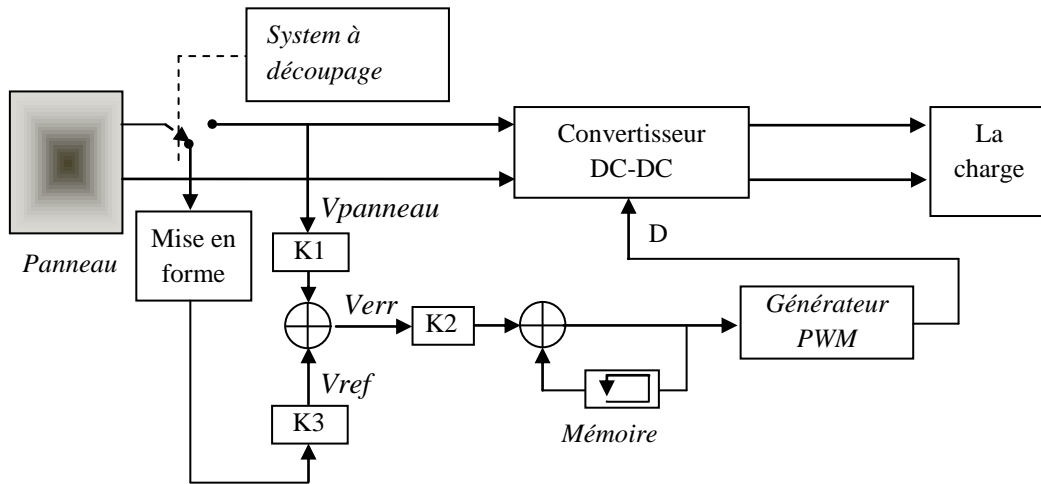


Figure. III.13. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau.

L'avantage est que la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque prend en considération l'insolation et la température, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules.

L'inconvénient c'est que l'ajustement de la tension de référence à 77% de la tension à vide du panneau est toujours une fraction fixe, cette méthode ne peut pas être considérée comme un vrai moyen et exacte de poursuite de MPPT. L'exactitude de l'ajustement de la tension de fonctionnement à la tension maximum V_{mp} de puissance dépend du choix de cette fraction comparée au vrai rapport $\frac{V_{mp}}{V_{oc}}$.

Un autre défaut est que l'interruption du fonctionnement du système avec une certaine fréquence engendre des pertes qui sont estimées par Sullivan et Powers à 0,05% de la puissance maximale disponible. [21]

III.4.1.3. Tension de référence externe (Cellule pilote)

Pour éviter les problèmes de la méthode précédente une cellule pilote est ajoutée au panneau solaire (c'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée). La tension en circuit ouvert de cette cellule mesurée continuellement va nous donner une information implicite de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des panneaux solaires, en multipliant cette tension avec le nombre de cellules en série. [14]

Cette méthode évite l'interruption du système mais il existe des problèmes, car la cellule pilote utilisé comme référence pour le comportement de la rangée n'est pas facile à mettre en application. La superficie des modules photovoltaïques et l'emplacement de la cellule, font que la celle ci ne soit pas toujours fidèle à ce qui est ressentie par le panneau.

Pour limiter cet inconvénient on place une cellule pilote individuelle pour chaque petit groupe de panneaux puis on estime le facteur pour le fonctionnement optimum.

Et comme les méthodes précédentes, cette méthode utilise un facteur fixe pour estimer la tension V_{mp} à partir de la tension V_{oc} ce qui donne que le MPP n'est pas poursuivi parfaitement.

III.4.2. Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension, le courant de court circuit du générateur permet de savoir la valeur du courant optimale qui correspond au fonctionnement à puissance maximale du générateur. Le courant optimal est proportionnel au courant de court circuit $I_{mp} = k_2 I_{sc}$. Le coefficient K_2 est généralement entre 0.78 et 0.92. [35]

III.4.3. Algorithme 'incrémental conductance :

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du générateur est calculée d'une autre manière. Elle est fonction de la tension et de la différence de la tension ainsi que du courant et de sa différence. Cette dérivée est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. [36]

III.4.4. Commande MPPT par réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles électroniques basés sur la structure neuronale du cerveau lesquels sont souvent utilisés pour l'optimisation de l'algorithme de MPPT. En effet les réseaux de neurone peuvent être utilisés afin de trouver la position du point maximum de puissance avec un nombre réduit d'itérations pour atteindre le MPP et une réduction des oscillations autour du PPM. [36]

III.4.5. Commande MPPT par logique floue

La logique floue est une nouvelle méthode de tracking du MPP, elle a l'avantage de travailler sur plusieurs phases de tracking. La première est rude ou le pas de recherche est important, une fois le point de fonctionnement est proche du MPP l'algorithme fonctionne dans la phase fine ou le pas de recherche est faible, ainsi l'ondulation est minime.

III.4.6. Méthode 'perturbation et observation'

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure (III.14), on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente $\left(\frac{dp}{dV} > 0\right)$ alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPPT. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\frac{dp}{dV} < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPPT. L'algorithme inversera la direction de la

perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur le tableau (III.2) et l'organigramme de la figure (III.15). L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(K) = V(K-1) + \Delta V \cdot \text{sign}\left(\frac{dp}{dV}\right)_{V=V_{K-1}} \quad (\text{III.42})$$

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPPT soit atteint. Le système oscille alors autour du MPPT, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [16].

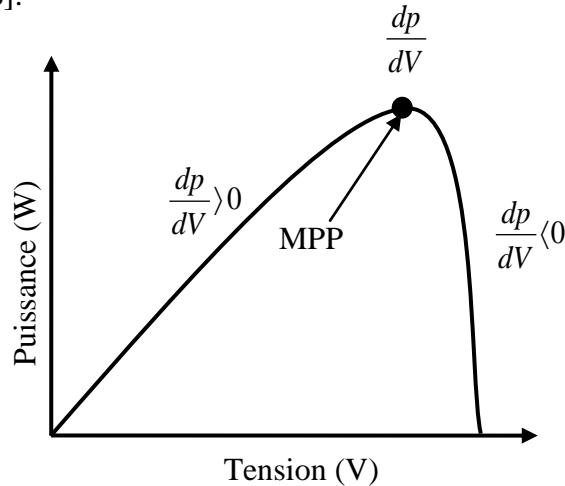


Figure. II.14: Signe de dp/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

| perturbation | Changement dans la puissance | Perturbation suivante |
|--------------|------------------------------|-----------------------|
| positive | Positif | Positive |
| positive | Négatif | Négative |
| négative | Positif | Négative |
| négative | Négatif | Positive |

Tableau (III.2): la direction de la perturbation algorithme PO

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension Soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPPT est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Sur la Figure (II.20) on voit bien que la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

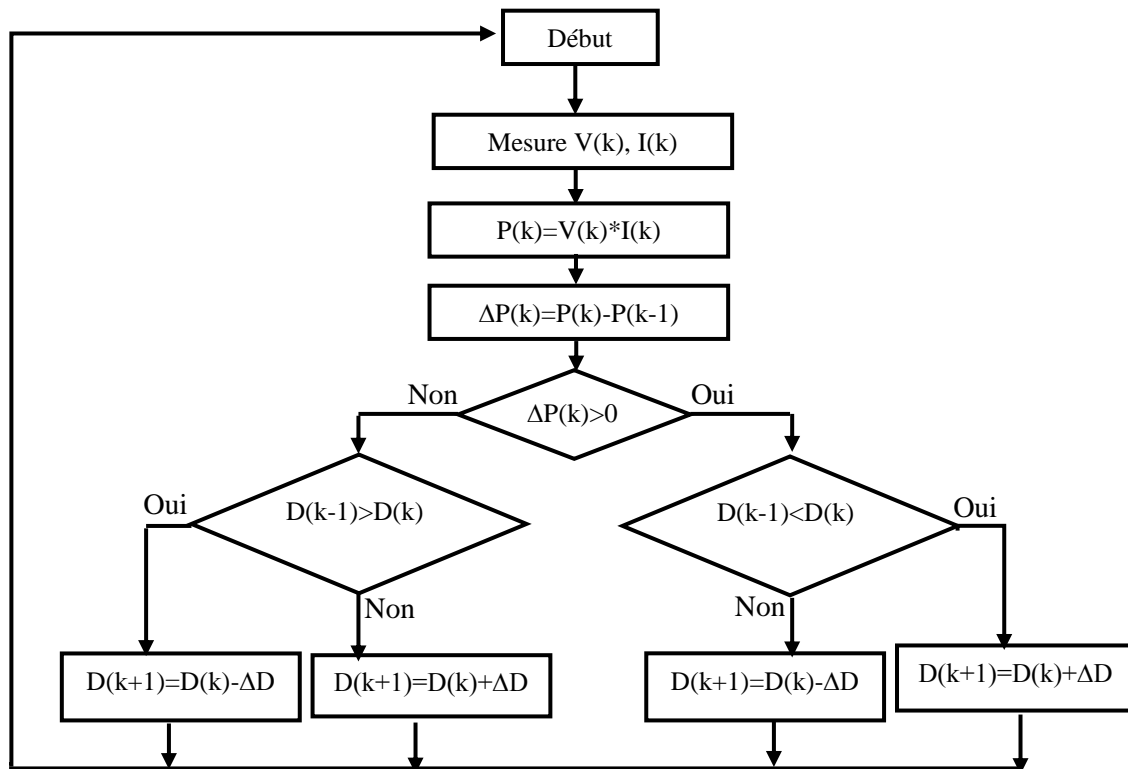


Figure. III. 15. Organigramme de la méthode P&O

Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant à partir des quels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant.

Il existe une variante de l’algorithme P&O qui utilise uniquement deux mesures, à savoir le courant et la tension en sortie du convertisseur. Le but est de maximiser la puissance en sortie. Le principe de fonctionnement est alors le même moyennant quelques changements. Bien que cette technique donne de bons résultats en simulation avec un convertisseur idéal, il n’est pas prouvé en pratique que le MPPT soit atteint.

III.4.7. Simulation Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

La Figure. (III.16) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » pour une charge sur le coté (DC) est une charge (batterie):

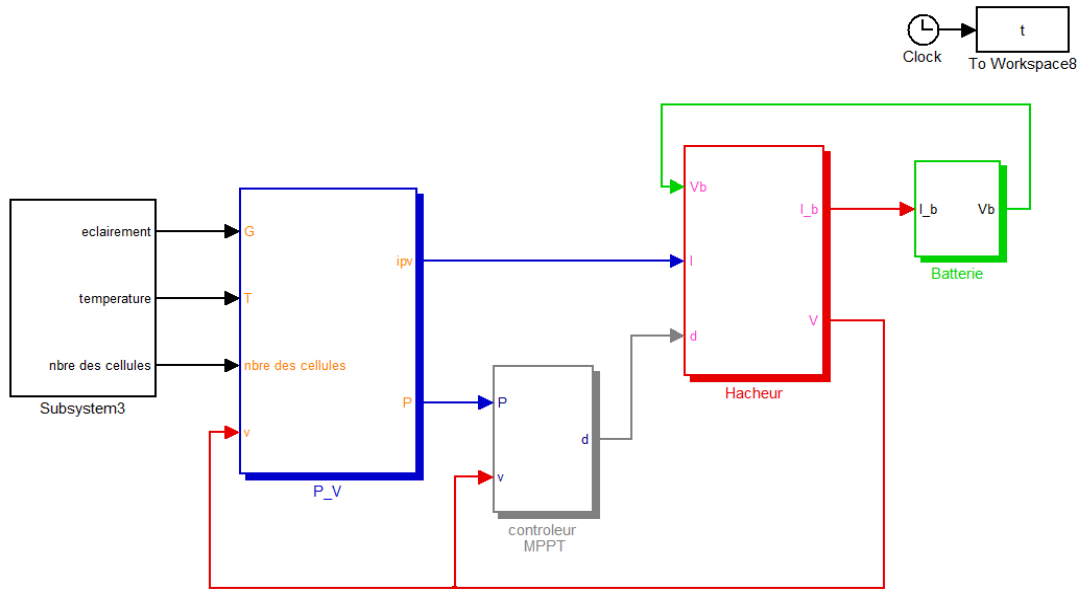


Figure. III.16. Schéma synoptique pour la simulation du système photovoltaïque.

III.4.7. 1.Simulation de l'Algorithme Perturbation et Observation (P&O) :

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O Figure(III.17), en nous basant sur l'organigramme illustré sur la Figure (III. 14)

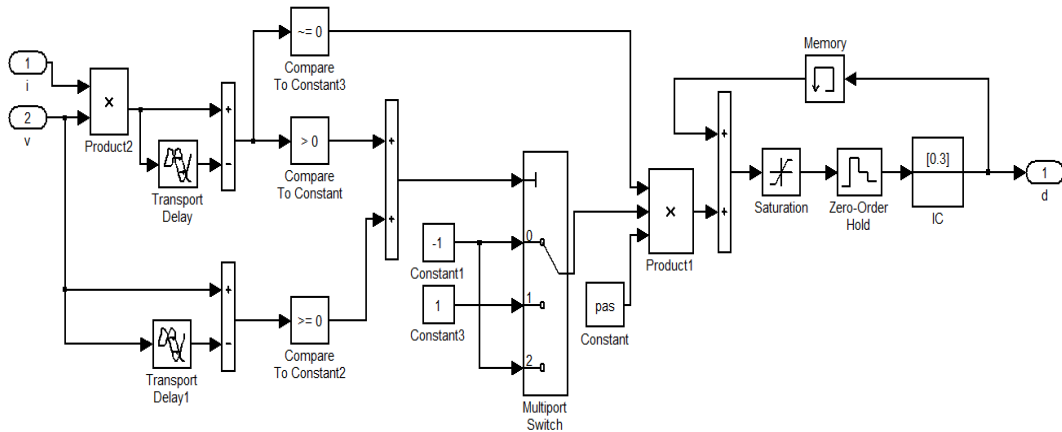


Figure II.17.Modèle 'SIMULINK' du contrôleur MPPT P and O.

III.4.7. 2.Simulation du hacheur Buck :

Les équations de base pour le hacheur dévolteur ont été données dans la section (III.27) On aura donc le bloc Simulink du hacheur buck qui est illustrer sur la Figure (III.18)

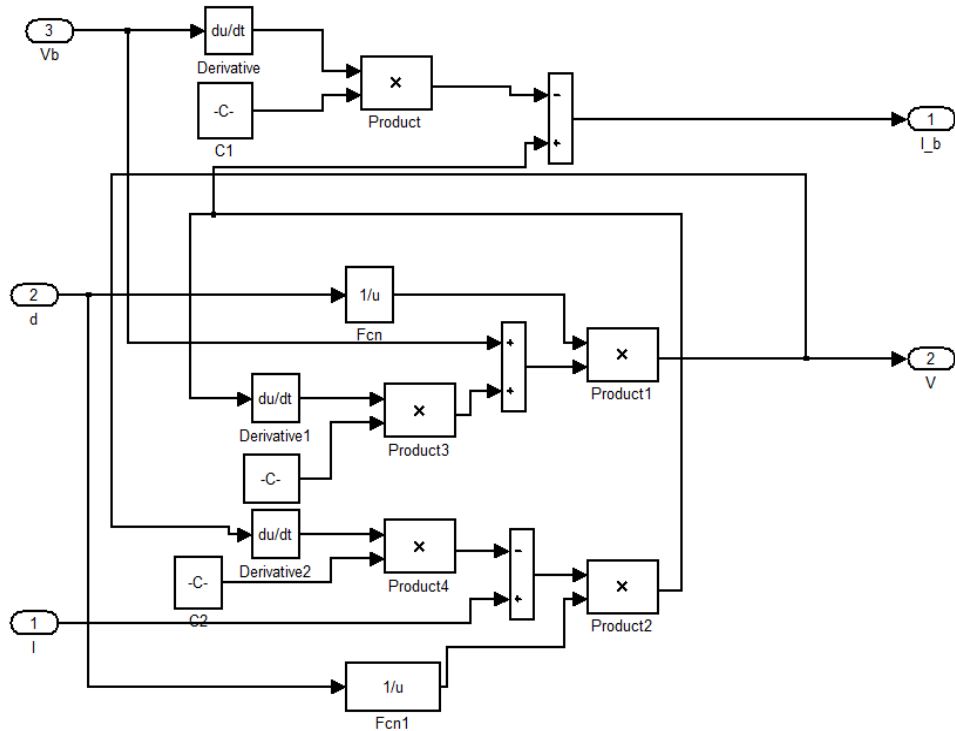


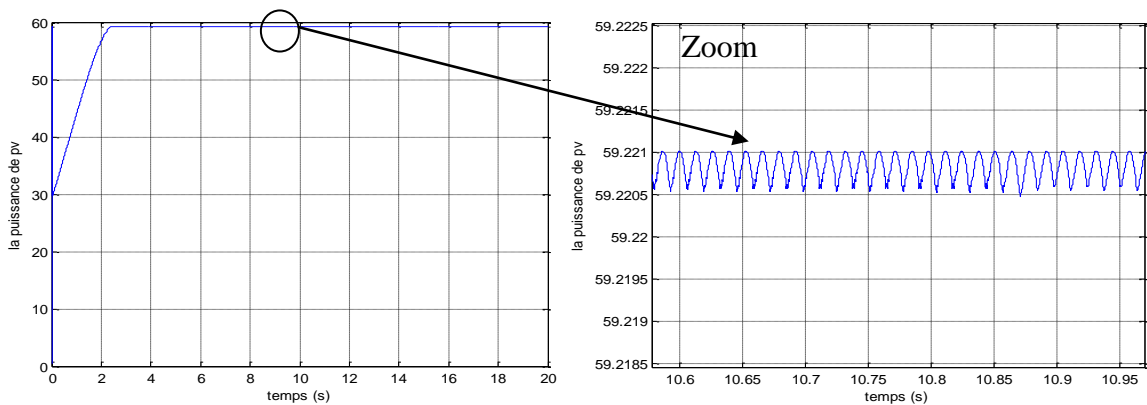
Figure III. 18. Modèle 'SIMULINK' du convertisseur Buck.

III.4.7. 3.Fonctionnement sous des conditions climatiques stables :

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température=25°C et l'ensoleillement=1000W/m2.

L'objectif du convertisseur MPPT est de ramener le point de fonctionnement au MPP et faire une adaptation entre la source et la charge c'est une batterie permet une première étude du comportement du système.

- a- Les résultats de la simulation sont représentés sur la Figure (III. 19) suivant pour un pas de perturbation de 0.0001



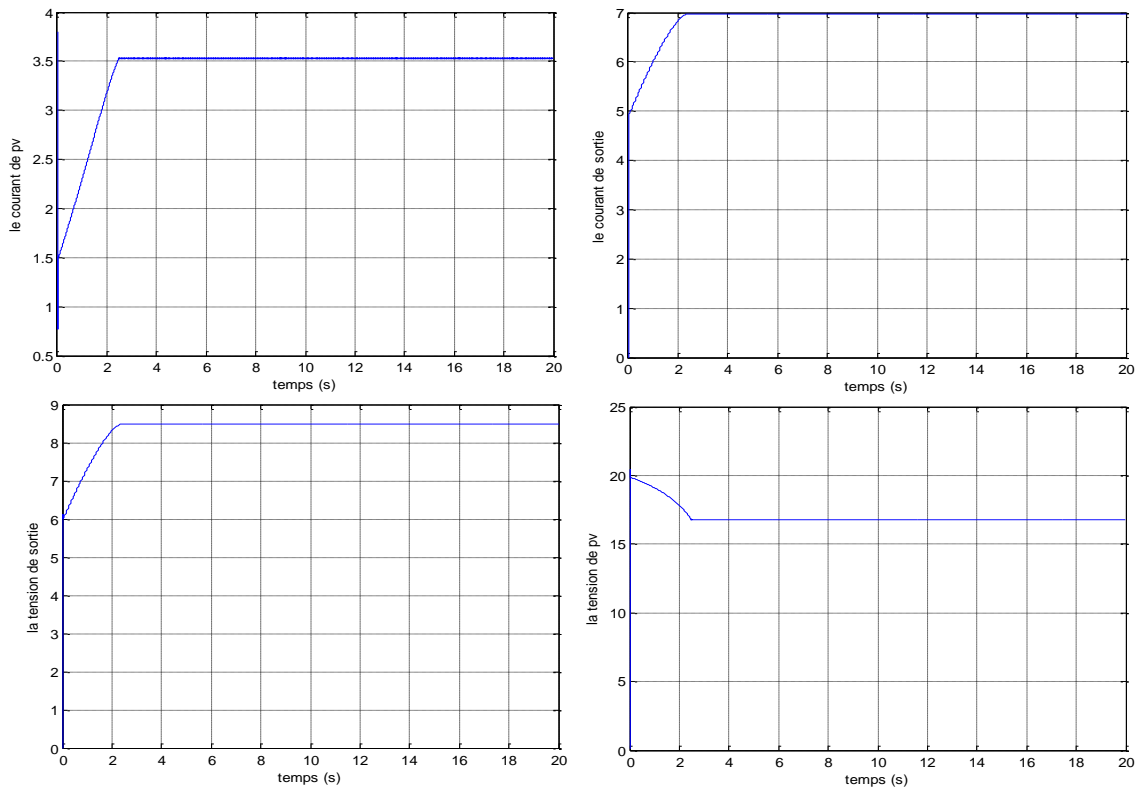
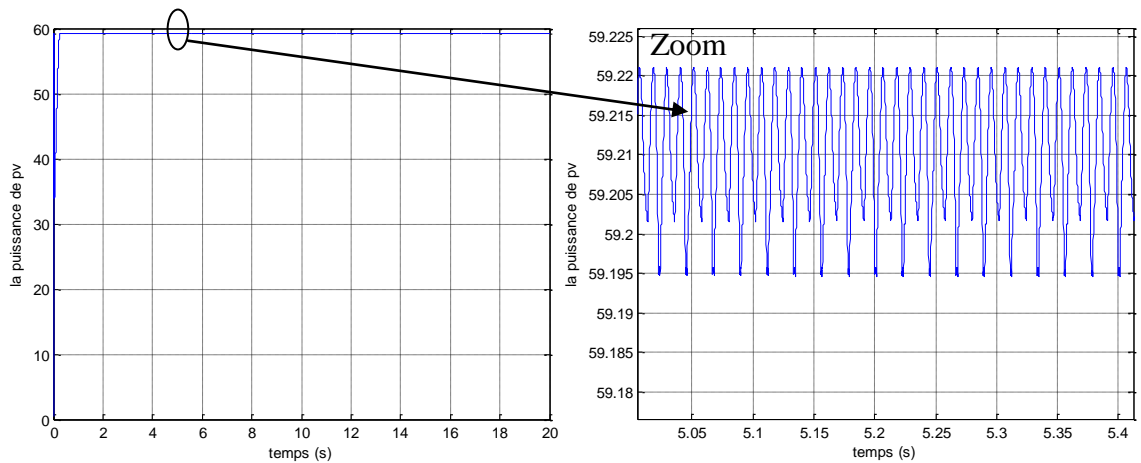


Figure III. 19. courbe détaillé sur les signaux de puissance, rapport cyclique et la tension et le courant de module PV et la tension et le courant à la borne de la charge Générés par la méthode MPPT P&O pour un pas de perturbation de 0.0001

b- les résultats de la simulation sont représentés sur la Figure (III. 20) suivant pour un pas de perturbation de 0.001.



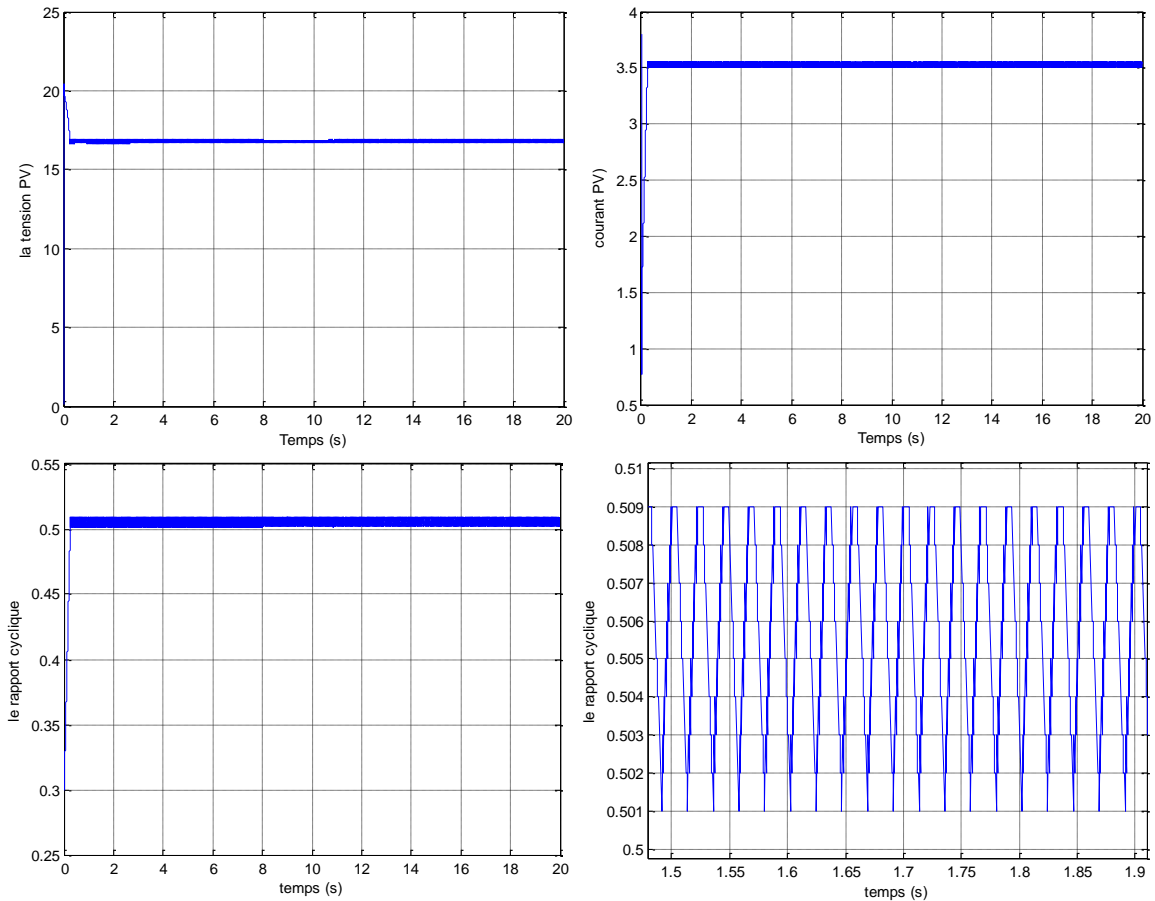


Figure III. 20. courbe détaillé sur les signaux de puissance, rapport cyclique et La tension et le courant de module PV Générés par la méthode MPPT P&O pour un pas de perturbation de 0.001

Interprétation

Les résultats de simulation du Figure (III. 19) et Figure (III. 20) du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation », représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant à la sortie et le rapport cyclique du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur dévolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles. L'hacheur dévolteur fournit une tension à sa sortie inférieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV. On remarque que pour un pas de perturbation de 0.0001 (Figure III. 19) le point de fonctionnement atteint le MPP en 2.2s. Contre 0.1s pour un pas de perturbation de 0.001 et la réponse est donc plus rapide dans un pas de perturbation 0.001. Par contre, l'amplitude de l'oscillation autour du MPP est moins importante dans le premier cas. Par conséquent, la perte de puissance engendrée est réduite. On peut dire que la réponse est plus précise dans le premier cas. Ceci met en évidence le compromis qui existe entre rapidité et précision. Néanmoins, un temps de réponse 0.1s reste suffisant pour notre application.

III.4.7. 4. Performance sous un niveau de rayonnement variant :

a. Diminution rapide de l'insolation (1000 à 800 W/m²) :

Dans ce test la température est toujours maintenue constante à 25°C alors qu'on effectue une diminution de l'insolation de 1000 à 600 W/m² pour un pas de perturbation de 0.001.

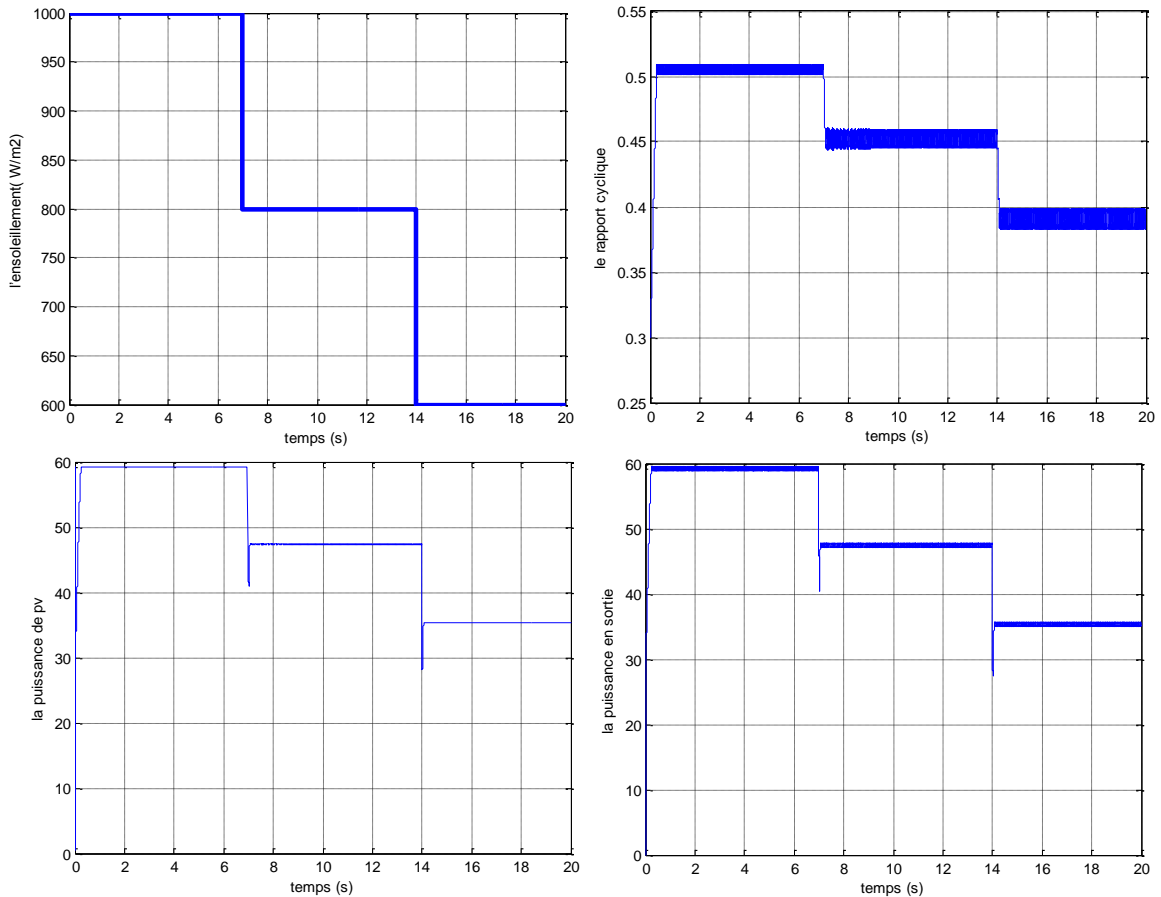


Figure III. 21. Puissance de PV et puissance sortie de convertisseur et le rapport cyclique pour la Diminution rapide de l'insolation

Interprétation

La diminution rapide de l'insolation entraîne également une diminution rapide de la puissance. Le mécanisme de poursuite « perturbation et observation », détecte cette diminution, et va réagir afin d'ajuster le rapport cyclique et cela par une légère diminution de sa valeur. Une fois l'insolation ne varie plus, le rapport cyclique se stabilise. Cette déviation une fois l'insolation stabilisé prend quelque temps pour être récupéré, et cause un retard de presque 0.05 sec, ce qui implique l'efficacité du système.

b. Diminution lente de l'insolation (1000 à 800 W/m²) :

Une diminution lente de 1000W/m² à 800 W/m² de l'insolation dans un intervalle de 7s est effectuée avec une température constante de 25°C pour un pas de perturbation de 0.001.

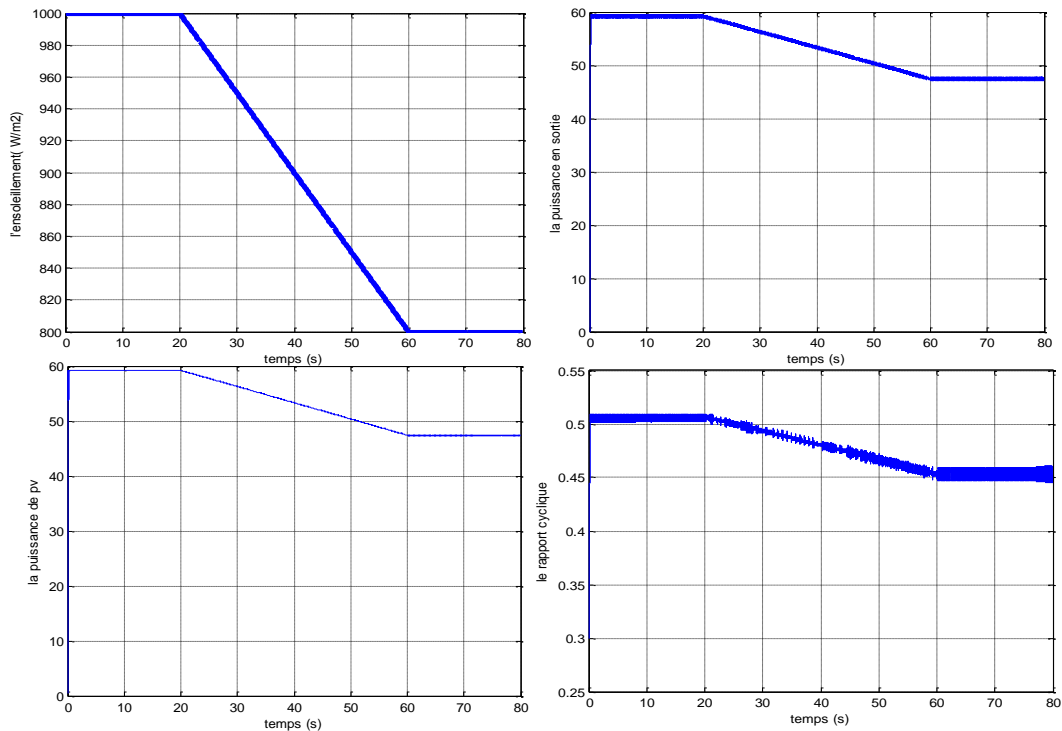


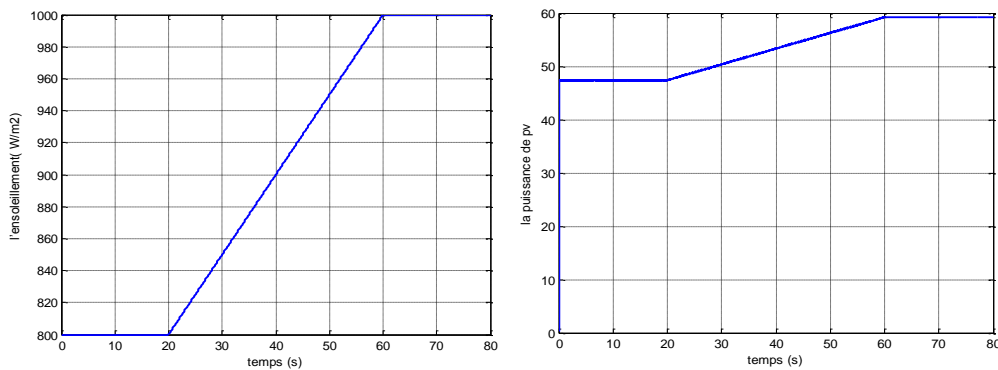
Figure III. 22. Puissance de PV et puissance sortie de convertisseur et le rapport cyclique pour la Diminution lente de l’ensoleillement

Interprétation

D’après les graphes Figure (III. 23) il est évident que la diminution lente de l’ensoleillement a entraîné une diminution lente de la puissance et par conséquent un déplacement du point de puissance maximale, pendant ce temps la commande MPPT « perturbation et observation » répond par une décrémentation jusqu’à la stabilisation une fois l’ensoleillement se stabilise.

c. Augmentation lente de l’ensoleillement (800 à 1000 W/m²) :

Dans ce test l’ensoleillement augmente de 800W/m² à 1000W/m² dans un temps de 40 secondes alors que température est prise constante à 25°C. Ce cas de figure est illustré par les courbes suivantes :



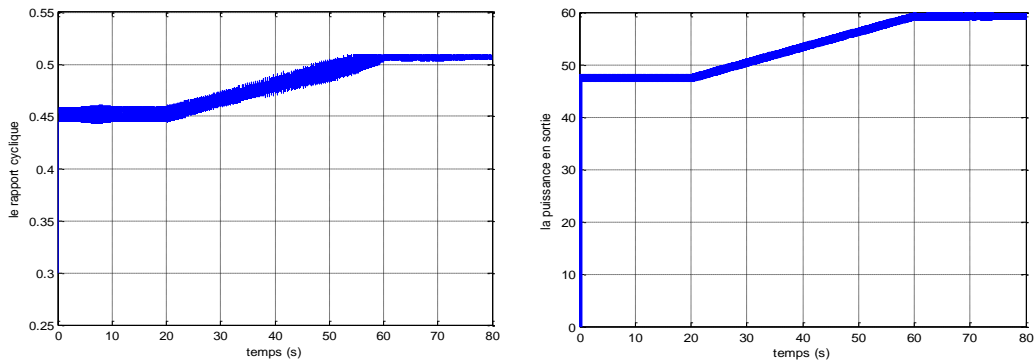


Figure III. 23. Puissance de PV et puissance sortie de convertisseur et le rapport cyclique pour l’augmentation lente de l’ensoleillement

Interprétation

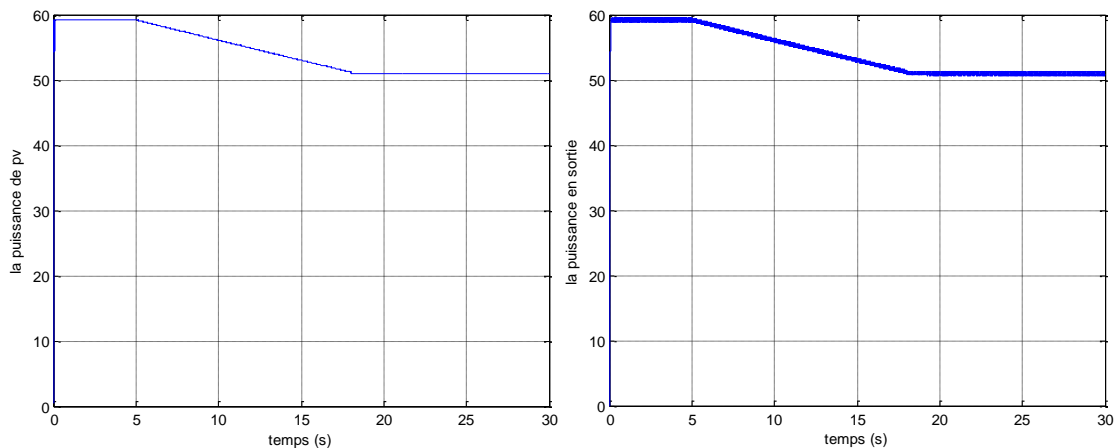
A son tour l’augmentation lente de l’insolation provoque également une augmentation lente de la puissance, le rapport cyclique détecte ce changement par une incrémentation instantanée afin d’atteindre le point de puissance maximale une fois l’insolation se stabilise. Le contrôleur MPPT « perturbation et observation » effectue une poursuite parfaite du MPP.

III.4.7. 5.Simulation sous des conditions variables de température (changement de la température) :

La température de la cellule solaire est un facteur important qui influe sur les caractéristiques du panneau solaire et par conséquent sur la puissance. Nous allons effectuer les tests suivant.

a. Augmentation lente de la température :

L’insolation est maintenue constante (1000W/m²) alors qu’on augmente la température de 25°C à 40 °C . Les résultats de la simulation sont illustrés par les courbes de la figure suivant.



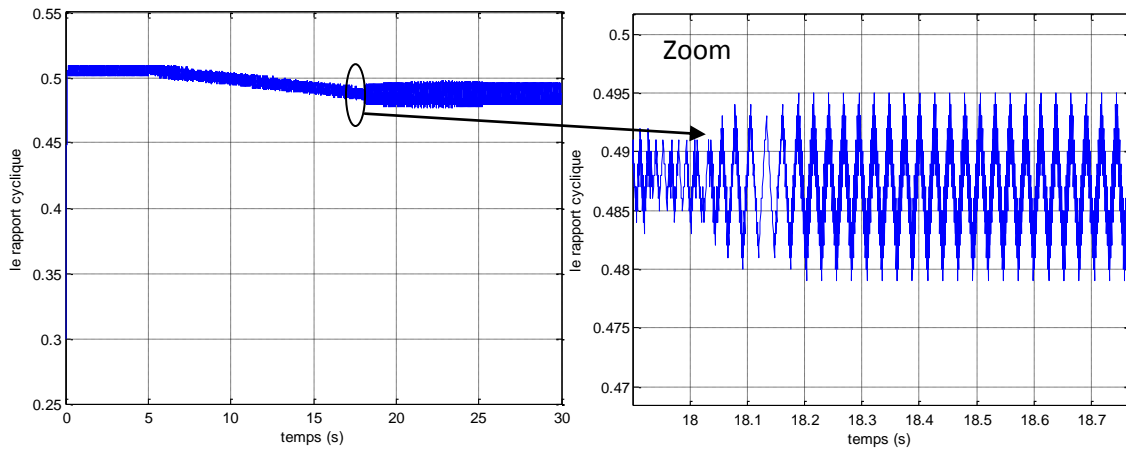


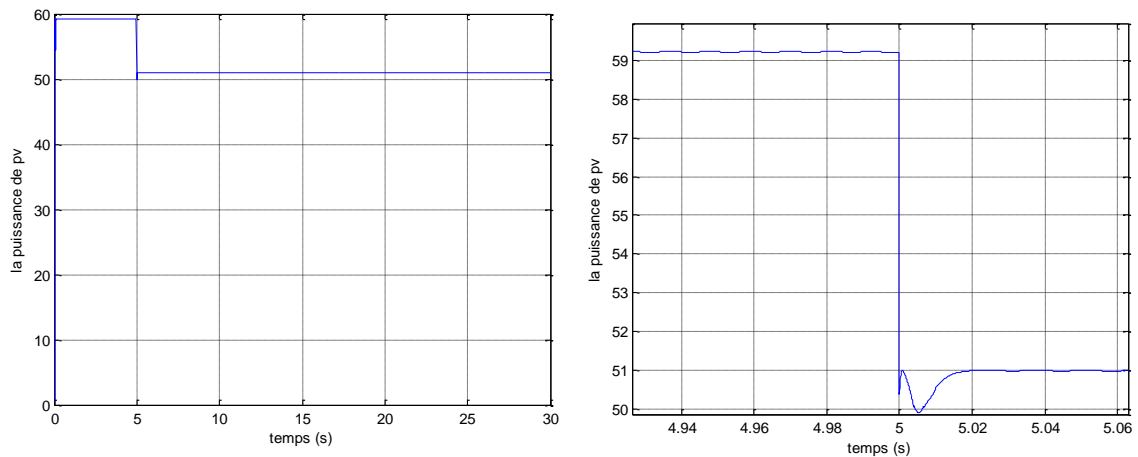
Figure III. 24. La Puissance de PV et puissance sortie de convertisseur et le rapport cyclique pour l' Augmentation lente de la température

Interprétation

L'augmentation lente de la température à son tour influence l'efficacité du système et par conséquent son rendement, cette augmentation va provoquer comme illustré dans la figure (III.24) une diminution lente de la puissance, ce changement est aussi détecté par le contrôleur (PO) qui tente d'ajuster sa valeur par une légère augmentation pour atteindre le point de puissance maximale. Dans ce cas le contrôleur suit parfaitement cette diminution et n'effectue aucun retard.

b. Augmentation rapide de la température (20°C à 45°C) :

On fait subir à notre système une augmentation de la température de 20°C à 45°C avec un ensoleillement de 1000W/m². Les résultats de la simulation sont illustrés par les courbes de la figure suivant.



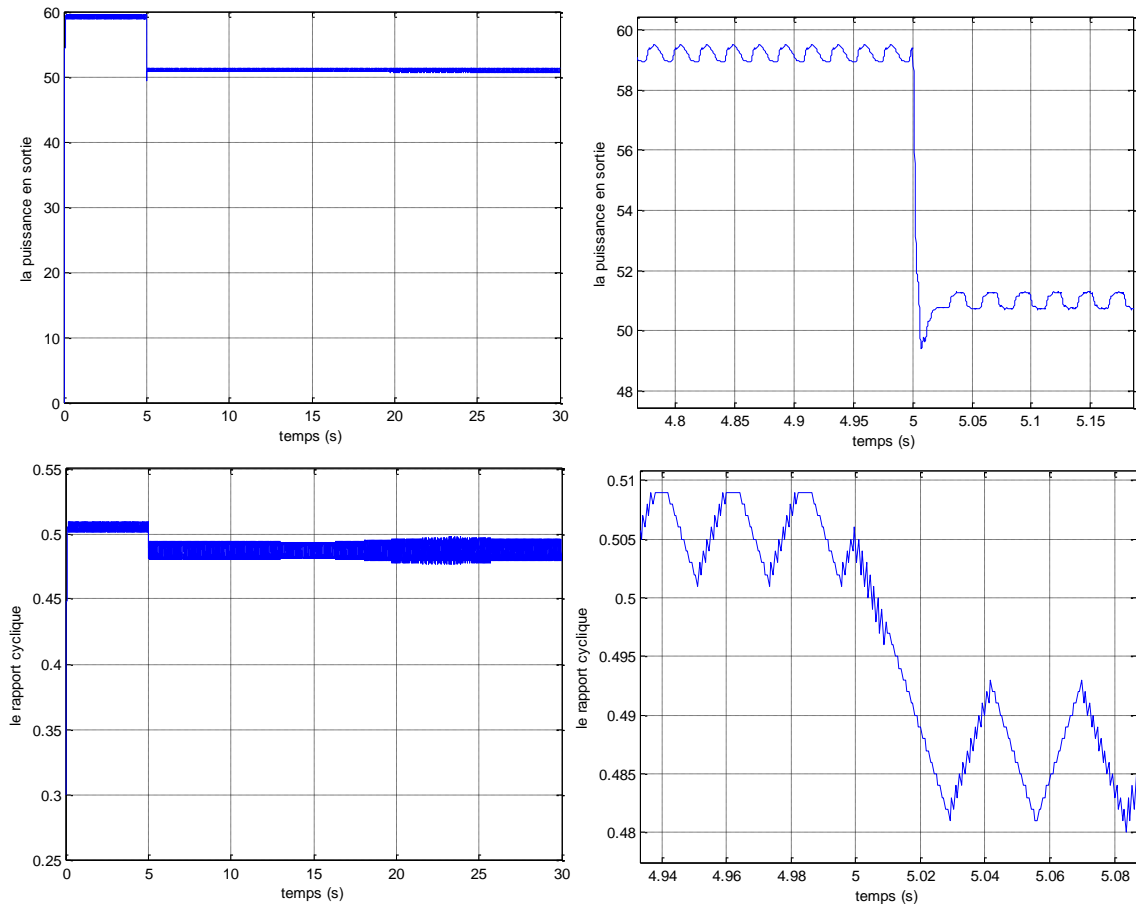


Figure III. 25. Puissance de PV et puissance sortie de convertisseur et le rapport cyclique Augmentation rapide de la température

Interprétation Nous remarquons L'augmentation de la température implique toujours une diminution de la puissance. Le contrôleur MPPT PO présente une réponse en poursuite presque parfaite.

III.4.8.Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques de chaque élément du système global ont été implémentés en forme de blocs dans simulink ensuite simulés.

Un simple circuit convertisseur DC/DC (buk) est utilisé comme interface entre le panneau PV et la charge .

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'insolation et de température, ont été obtenus en simulant le contrôleur MPPT méthode P and O .

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur P and O Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale.

IV.1.introduction

La machine asynchrone, de par sa simplicité de fabrication et d'entretien, a la faveur des industriels depuis son invention par N. Tesla à la fin du 19^{ème} siècle quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés.

Le moteur asynchrone a un intérêt majeur par rapport aux autres types de moteur par ses qualités de robustesse, le faible coût de fabrication et d'entretien [37.38] Pour que le moteur asynchrone soit utilisable dans des régimes de vitesse variable il doit être commandé par un processus externe qui permette d'ajuster au mieux la tension d'alimentation de manière à répondre aux variations de consigne de vitesse et de couple de charge.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. C'est pourquoi, la commande vectorielle n'a été introduite qu'au début des années 70, grâce aux avancées technologiques de l'électronique de puissance et de signal, car elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonction trigonométrique, des intégrations, des régulations, ce qui demande une technologie assez puissante. [38]

La première partie de ce premier chapitre sera dédiée à la modélisation de la machine à induction triphasée et l'onduleur de tension. Elle présente une importance essentielle car il lui sera associé une commande répondant aux exigences actuelles d'entraînement des moteurs asynchrones. Cette partie est très importante car c'est à partir de ce modèle que nous allons simuler les dynamiques de notre système.

Dans la deuxième partie, on exposera les principes de la commande vectorielle des machines asynchrones. On décrira les principales structures nécessaires pour le contrôle des courants, le choix du référentiel et le contrôle de flux. Et finalement on a appliqué cette commande pour régler la vitesse d'avancement de pivot d'irrigation.

IV.2.Description de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'un stator à trois enroulements triphasés appelé inducteur et d'un rotor appelé induit. Le rotor supporte soit des bobinages dans le cas des moteurs à rotor bobiné souvent à bagues, soit un ensemble de barres interconnectées dans le cas des moteurs à cage d'écureuil. Dans les deux cas, la création d'un champ tournant au stator engendre des courants induits dans le rotor à la pulsation ω_s . Ces courants tendent à s'opposer à la variation de flux dans les spires du rotor. Il en résulte un couple mécanique sur ce dernier. Le rotor tournant à la vitesse Ω , les courants rotoriques ont pour pulsation $\omega_r = \omega_s - n_p \Omega$. Le couple électromagnétique est proportionnel à la pulsation ω_r : si la pulsation des courants rotoriques s'annule, le couple s'annule également.

On parle alors de synchronisme. Le fonctionnement normal de la machine asynchrone qui suppose la génération de couple est obligatoirement accompagné d'une différence ω_r , appelée pulsation de glissement, entre la pulsation statorique ω_s et la pulsation mécanique $n_p \Omega$. [39]

IV.3.Modélisation du moteur asynchrone en vue de sa commande

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone consiste à rechercher l'ensemble des équations reliant les variables internes aux grandeurs externes : tensions aux bornes de la machine, courants consommés et couple disponible. Les différentes approches pour l'étude du modèle du moteur asynchrone reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique. Les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire, en fonction du domaine de fréquence concernée, et de la topologie (structure physique) du système étudié, c'est-à-dire en fonction des objectifs de la modélisation.

IV.3.1.Modèle linéaire

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous [40]:

- ✓ L'entrefer est supposé à épaisseur constante ;
- ✓ L'effet des encoches est négligé ;
- ✓ L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale ;
- ✓ La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis) ;
- ✓ Les pertes mécaniques sont négligées ;
- ✓ L'influence de l'effet de peau est négligée ;
- ✓ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte ;
- ✓ La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent.

Dans un premier temps, le modèle analytique classique que nous développerons, négligera également l'effet de la saturation.

IV.3.2.Modèle de la MAS dans le repère réel abc

Le stator est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace, et séparés d'un angle électrique de 120° , les mêmes propos s'appliquent au rotor qu'il soit à cage d'écureuil ou forme de trois bobines. La figure (IV.1) illustre la disposition des enroulements statoriques et rotoriques :

Les trois types d'équations traduisant le comportement de la machine asynchrone sont :

- ✓ Les équations électriques
- ✓ Les équations magnétiques
- ✓ Les équations mécaniques

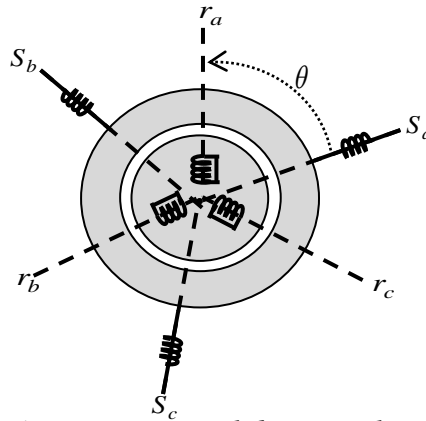


Fig. VI.1: Représentation spatial des enroulements de la MAS

IV.3.2.1. Les équations électriques

Dans le repère triphasé, les trois vecteurs S_a, S_b, S_c , sont orientés selon les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Il est de même pour le rotor. L'axe S_a est souvent considéré comme référence, et l'angle θ définit la position du rotor par rapport au stator.

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques peuvent s'écrire sous forme matricielle en appliquant la loi d'Ohm comme suit:

$$\begin{cases} [V_{Sabc}] = [R_s][I_{Sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{Sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (IV.1)$$

Les grandeurs, $[V_{Sabc}], [I_{Sabc}], [\Phi_{Sabc}]$, sont des vecteurs de dimension 3x1 définis comme suit :

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad \text{Le vecteur tension statorique.}$$

$$[I_{sabc}] = [I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]^T \quad \text{Le vecteur courant statorique.}$$

$$[\Phi_{Sabc}] = [\Phi_{sa} \quad \Phi_{sb} \quad \Phi_{sc}]^T \quad \text{Le vecteur flux statorique.}$$

$$[V_{rabc}] = [V_{ra} \quad V_{rb} \quad V_{rc}]^T \quad \text{Le vecteur tension rotorique.}$$

$$[I_{rabc}] = [I_{ra} \quad I_{rb} \quad I_{rc}]^T \quad \text{Le vecteur courant rotorique.}$$

$$[\Phi_{rabc}] = [\Phi_{ra} \quad \Phi_{rb} \quad \Phi_{rc}]^T \quad \text{Le vecteur flux rotorique.}$$

Avec :

R_s, R_r : représente respectivement les résistances par phase du stator et du rotor

IV.3.2.2. Les équations magnétiques

Les hypothèses citées précédemment conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants moyennant les notations usuelles.

$$\begin{cases} [\Phi_{Sabc}] = [L_{ss}][I_{Sabc}] + [L_{msr}][I_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [L_{mrs}][I_{Sabc}] \end{cases} \quad (IV.2)$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & l_{ms} & l_{ms} \\ l_{ms} & l_s & l_{ms} \\ l_{ms} & l_{ms} & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & l_{mr} & l_{mr} \\ l_{mr} & l_r & l_{mr} \\ l_{mr} & l_{mr} & l_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{msr}] = l_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où:

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.

$[L_{msr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

l_{ms} : Inductance mutuelle entre enroulements statorique.

l_{mr} : Inductance mutuelle entre enroulement rotorique.

l_m : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase de rotor

θ : Angle entre la phase a du stator et celle du rotor.

Notons que, la matrice des inductances mutuelles rotoriques n'est d'autre que la transposée de celle des inductances mutuelles statoriques ; $[L_{mrs}] = [L_{msr}]^T$.

IV.3.2.3. Les équations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [41] :

$$C_{em} = [I_{Sabc}]^T \frac{d}{dt} [L_{msr}] [I_{rabc}] \quad (IV.3)$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$j \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f\Omega \quad (IV.4)$$

Avec :

- J : Moment d'inertie des masses tournantes.
- C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la mach
- Ω : Vitesse rotorique.
- C_{em} : Couple électromagnétique.
- f_r : Coefficient de frottement visqueux.
- $(f_r\Omega)$: Terme de couple de frottement visqueux.

IV.3.3.Équations en diphasée MSA

Les modèles des machine électrique les plus utilisés sont basées sur la théorie unifier des machines électrique. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électrique statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes (α, β) .

IV.3.3.1.Transformation de Concordia – référentiel (α, β)

Il s'agit d'une transformation des grandeurs d'un référentiel triphasé (a,b,c) à un référentiel diphasé (α, β) fixe au stator. Ainsi, aux trois grandeurs triphasées x_a, x_b, x_c est associé le vecteur $[X_{(s)}]$ dans le référentiel (α, β) fixe au stator.

$$D'où : \quad [X_{(s)}] = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = K_T \cdot [C_0] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{IV.5}$$

$$Avec : [C_0] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad K_T = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

x_0 : Composante homopolaire nulle (système triphasé équilibré).

$[C_0]$: Matrice de Concordia.

L'introduction de K_T mène à $[C_0]^{-1} = [C_0]^T$, ce qui garantit la conservation de la puissance instantanée.

IV.3.3.2.Transformation de Park – référentiel (u, v)

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation. [41] D'où

$$[X_{(T)}] = \begin{bmatrix} x_u \\ x_v \\ x_0 \end{bmatrix} = [p(\theta_s)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Avec :

$$[p(\theta_s)] = [R(\theta_s)][C_0], [R(\theta_s)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s & 0 \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La figure (Fig.IV.2) montre la représentation du vecteur $[X_{(s)}]$ dans le référentiel fixe (α, β) ainsi que le passage au référentiel tournant (u, v) .

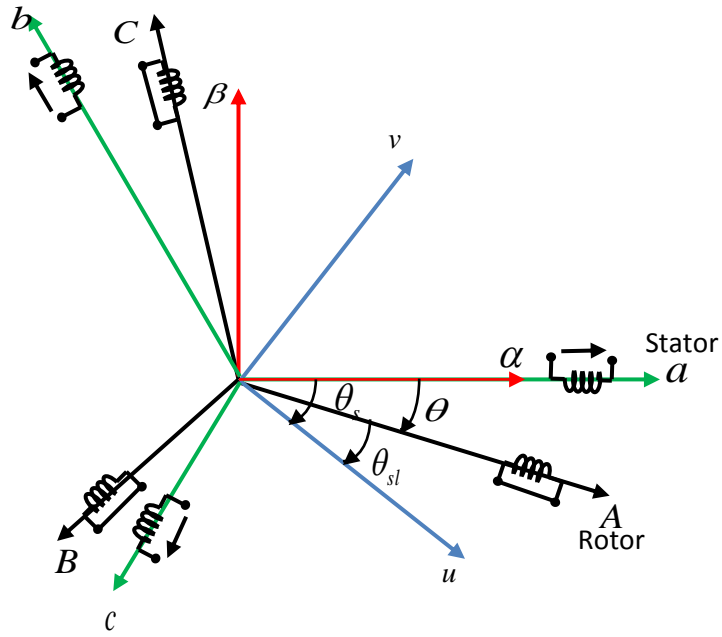


Fig.IV.2. référentiel : triphasé (a, b, c) -fixe (α, β) -tournant (u, v)

IV.3.4. Application de la Transformation de Park à la MAS :

En appliquant la transformation de PARK sur les équations (IV.1), et (IV.2) en remplaçant θ_s par θ_{obs} dans la matrice (IV.6). Après simplification on obtient les équations électriques et magnétiques de la machine dans le repère $(u, v, 0)$:

IV.3.4.1.Équations électriques

$$\begin{bmatrix} V_{su} \\ V_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{su} \\ I_{sv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} + \omega_{obs} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ru} \\ V_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ru} \\ I_{rv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} \quad (IV.8)$$

Avec :

$\omega_{obs} = \frac{d\theta_{obs}}{dt}$: représente la vitesse angulaire du repère $(u, v, 0)$ dans la repère du stator.

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$: représente la vitesse angulaire du repère (u, v, o) dans la repère du rotor

$\omega_r = \omega_{obs} - \omega = \frac{d\theta}{dt}$: représente la vitesse angulaire électrique du rotor.

IV.3.4.2.Équation magnétiques

$$\begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{su} \\ I_{sv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ru} \\ I_{rv} \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ru} \\ I_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{su} \\ I_{sv} \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

$L_s = l_s - l_{m_s}$: Inductance cyclique propre du stator

$L_r = l_r - l_{m_r}$: Inductance cyclique propre du rotor

$M = \frac{2}{3}l_m$: Inductance cyclique mutuelle du stator-rotor.

IV.3.5. Choix de repéré du référence

Bien que le choix de l'orientation du repère d'axe puisse quelconque, il reste à déterminer pour l'objectif de l'application [42]:

- ✓ **Repère d'axe (α, β) fixe lié au stator $\omega_{obs} = 0$** : Les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation satorique ω_s . Ce repère est utilisé pour l'estimation des flux, de la vitesse et pour les techniques de commande non linéaire.
- ✓ **Repère d'axes (x, y) lié au rotor $\omega_{obs} = \omega$** : Les grandeurs en évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques $g\omega_s$. Elles sont de faible fréquence (fréquence de glissement). La position du repère est déterminée généralement par intégration de vitesse du moteur.
- ✓ **Repère d'axe (d,q) lié au champ tournant $\omega_{obs} = \omega_s$** : Les grandeurs du modèle sont continues, puisque la pulsation du champ tournant est égale à la pulsation des tensions satoriques. Ce repère est souvent utilisé dans l'étude des commandes vectorielles par orientation du flux.

IV.3.6.Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant :

En remplaçant dans les systèmes d'équations (IV.7, 8,9,) et (IV.10) ω_{obs} par ω_s, ω_r par $(\omega_s - \omega)$ et les indices (u, v) par (d, q) , on obtient les systèmes d'équations liés au champ tournant suivants :

IV.3.6.1.Équations électrique

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (IV.11)$$

IV.3.6.2.Équation magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sq} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (IV.12)$$

IV.3.6.3.Équations mécaniques

Le couple électromécanique représenté dans l'équation (IV.3) devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} np \frac{M}{L_r} (\Phi_{ru} I_{sv} - \Phi_{rv} I_{su}) \quad (IV.13)$$

IV.3.7. Mise sous forme d'état

Les équations différentielles obtenues précédemment peuvent être regroupées sous la forme d'une représentation d'état :

$$\begin{cases} \dot{X} = [A][X] + [B][U] \\ y = h(x) \end{cases} \quad (IV.14)$$

$X = [I_{sd} \quad I_{sq} \quad \Phi_{rd} \quad \Phi_{rq}]^T$: Variable d'état ;

$U = [V_{sd} \quad V_{sq}]^T$: Vecteur de commande.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{\sigma L_s} & \omega_s & \left(\frac{M}{\sigma L_s L_r T_r}\right) & \left(\frac{M}{\sigma L_s L_r}\right) \cdot \omega \\ -\omega_s & -\frac{R_t}{\sigma L_s} & -\left(\frac{M}{\sigma L_s L_r}\right) \cdot \omega & \left(\frac{M}{\sigma L_s L_r T_r}\right) \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -(\omega_s - \omega) \\ 0 & \frac{M}{T_r} & (\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$R_t = R_s + R_r \left(\frac{M^2}{L_r} \right) \quad : \text{Résistance totale ramenée au stator.}$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad : \text{Coefficient de dispersion ;}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad : \text{Constante de temps rotorique.}$$

[A] : Matrice fondamentale qui caractérise le système et

[B] : Matrice d'entrée.

IV.4. Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables. [42]

Dans l'étude de l'ensemble onduleur - machine, nous nous intéressons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Du fait que les constantes de temps des machines est très grandes devant le temps de commutation des composants semi-conducteurs, on peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant l'onduleur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infini à l'état bloqué et réaction instantanée aux signaux de commande. Cette méthode est la plus couramment utilisée dans l'étude de l'ensemble onduleur machine.

La figure (IV.3) représente le schéma de cet onduleur. Les six interrupteurs relient les deux bornes de la source de tension aux trois phases de la charge. On peut représenter l'onduleur par le schéma suivant [43] :

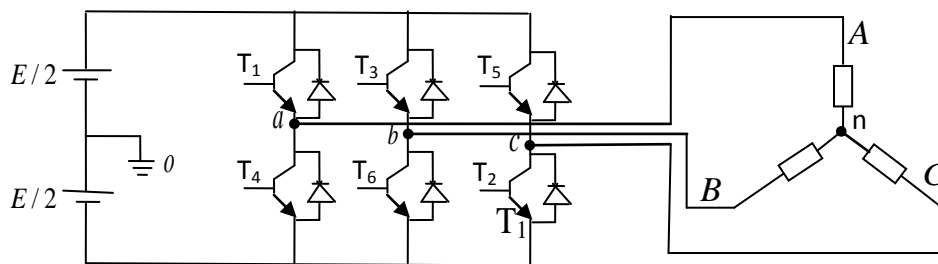


Fig. IV.3. Schéma de l'onduleur triphasé.

Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne :

$$S_{a,b,c} = 1 \quad : \text{Interrupteur du demi-bras haut fermé ;}$$

$$S_{a,b,c} = 0 \quad : \text{Interrupteur du demi-bras bas fermé.}$$

Les tensions composées à la sortie du pont triphasé sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{ao} - U_{bo} \\ U_{bc} = U_{bo} - U_{co} \\ U_{ca} = U_{co} - U_{ao} \end{cases} \quad (IV.15)$$

Où U_{ao}, U_{bo}, U_{co} peuvent être considérées comme des tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues.

Soit « n » l'indice du point neutre du côté alternatif. On peut écrire les relations suivantes :

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

U_{an}, U_{bn}, U_{cn} Sont les tensions simples de la machine et U_{no} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point milieu fictif « 0 ».

La charge étant équilibrée et le neutre isolé, on obtient donc :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \quad (IV.17)$$

La substitution de (IV.16) dans (IV.17) aboutit à :

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

En remplaçant (IV.15) dans (IV.16), on obtient :

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

On peut écrire le système d'équations (IV.19) sous forme matricielle comme suit :

$$[U_{ac}] = [C][U_{dc}] \quad (IV.20)$$

Tel que :

$$[U_{ac}] = [U_{an} \ U_{bn} \ U_{cn}]^t, [U_{dc}] = [U_{ao} \ U_{bo} \ U_{co}]^t, [C] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Où :

$[U_{dc}]$: Vecteur tension d'entrée de l'onduleur ;

$[U_{ac}]$: Vecteur tension de sortie de l'onduleur ;

$[C]$: Matrice de transfert continu – alternatif ;

En introduisant les grandeurs booléennes définies précédemment, on peut écrire :

$$U_{dc} = E[s_a \quad s_b \quad s_c]^T$$

Il reste à déterminer les fonctions S_i , celles-ci dépendent de la stratégie de commande de l'onduleur

IV.5. Commande de l'onduleur

IV.5.1. MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans La figure (IV.4). Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire. La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas. Il en résulte un temps d'impulsion "passante" ou "non-passante" variable reconstituant un courant sinusoïdal en sortie du variateur de vitesse.

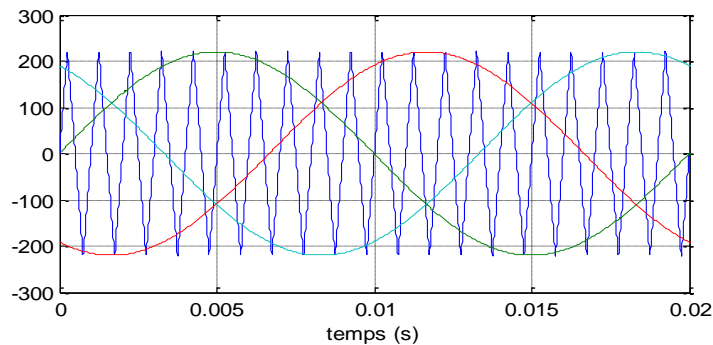


Fig.IV.4. Le signal de porteuse et les signaux de référence.

IV.5.2. MLI à bande hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés, dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

Les interrupteurs K_j et K'_j ($j = 1, 2, 3$) de chaque bras de l'onduleur, sont commandés, l'un par la sortie logique du comparateur à hystérésis et l'autre par sa sortie complémentaire figure (IV.5)

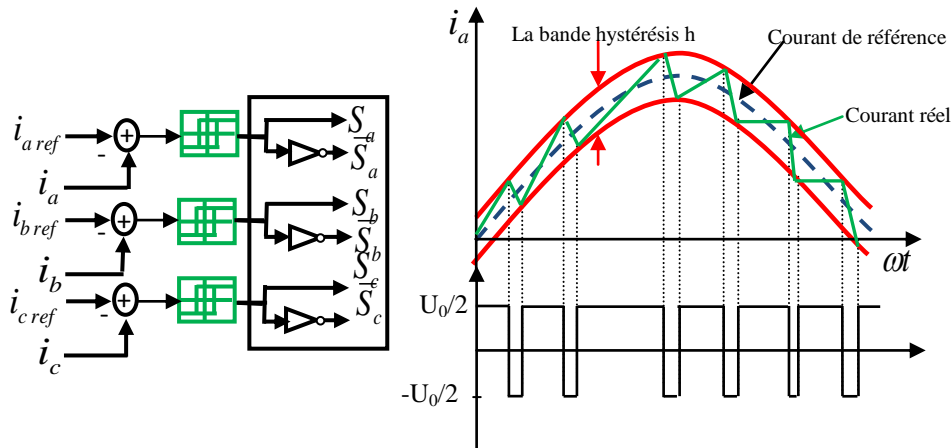


Fig.IV.5 : La bande de courant à hystérésis

Le courant de référence est comparé avec celui de phase de chaque bras de l'onduleur, la différence entre le courant de référence i_{j_ref} et le courant mesuré i_j , c'est-à-dire l'écart i_e est appliqué à l'entrée du comparateur qui fournit le signal logique.

$$\text{si } i_e > +\frac{h}{2}; S = 1$$

$$\text{si } i_e < -\frac{h}{2}; S = 0$$

La bande d'hystérésis (h) est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs utilisés et à minimiser les harmoniques des courants.

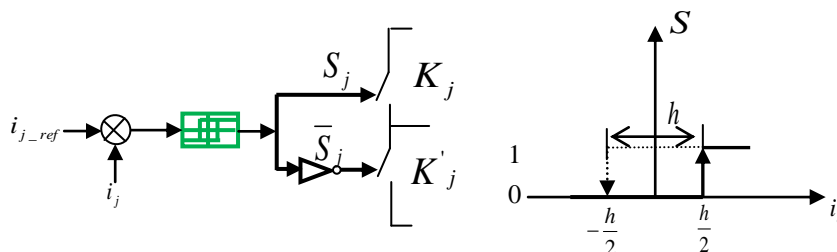


Fig. IV.6 : contrôle par hystérésis

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable, et dans la mesure où les trois courants de charge ne sont pas indépendants peut être ses inconvénients.

La conséquence immédiate est l'interaction entre les régulateurs ce que ne peut garantir que chaque courant reste en permanence dans sa fourchette d'hystérésis.

Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe. [44]

IV.6. Commande vectorielle de la MAS

IV.6.1. Introduction:

Les entraînements électriques doivent satisfaire de nombreuses exigences et offrir, en particulier, une excellente dynamique dans une large plage de vitesse. Quelque soit le type de machine, les performances dynamique sont très conditionnées, en terme de commande, par la qualité du découplage entre le flux et le couple. Certes, ce découplage s'obtient sans problème dans le cas à machine à courant continu, malgré les inconvénients qui lui sont associés, c'est -à-dire sa complexité constructive et sa maintenance coûteuse. C'est la raison essentielle pour laquelle plusieurs stratégies de commande ont été développées afin de conférer une dynamique concurrentielle aux machines asynchrone qui sont beaucoup plus robuste, fiable et nettement moins coûteuses. [42]

La commande de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, et du flux. Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. C'est pourquoi, la commande vectorielle n'a été introduite qu'au début des années 70, grâce aux avancées technologiques de l'électronique de puissance et de signal, car elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonction trigonométrique, des intégrations, des régulations, ce qui demande une technologie assez puissante. [38]

Dans ce qui suit on va développer en premier l'étude théorique de la commande vectorielle à flux rotorique orienté dans le but de l'implémenter sous Simulink.

IV.6.2. Principe de découplage dans une commande vectorielle

En négligeant la réaction magnétique d'induit, la machine à courant continu possède un découplage naturel. [42] l'objectif de la commande vectorielle est de réaliser artificiellement un découplage similaire comme la montre figure (IV.7)

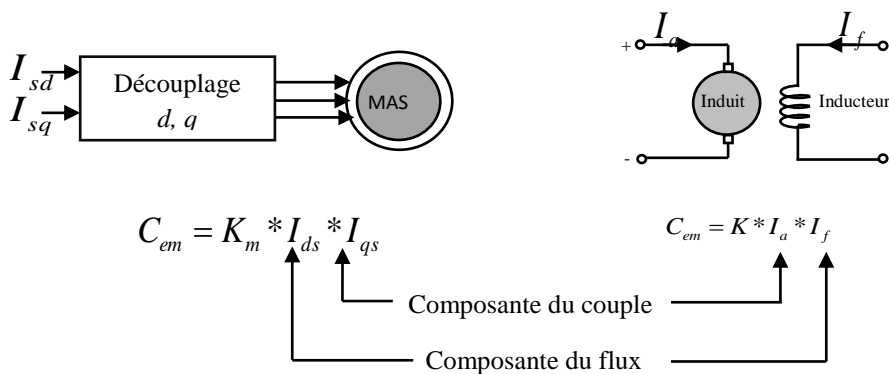


Fig. IV.7 : Schéma de principe du découplage pour la MAS en analogie avec la MCC

IV.6.3. Principe de la commande vectorielle par orientation du flux

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation

des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées. [45]

La commande par orientation du flux est basée sur une orientation du repère tournant (T) d'axes (d,q) tels que l'axe d soit confondu avec la direction du flux Φ comme le montre la figure (IV.8).

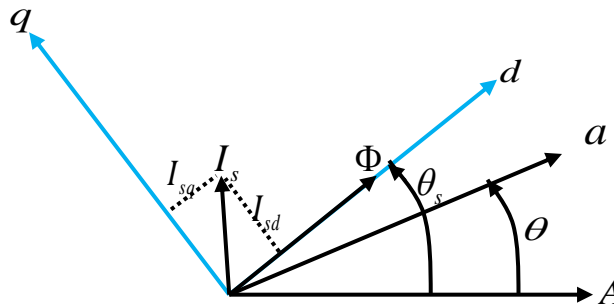


Fig. IV.8 : illustration de l'orientation du flux (rotorique, statorique, enterfer)

Il existe trois choix pour l'orientation du flux selon l'axe direct d du repère tournant :

- Orientation du flux rotorique : $\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases}$
- Orientation du flux statorique : $\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases}$
- Orientation du flux magnétisant : $\begin{cases} \Phi_{md} = \Phi_m \\ \Phi_{mq} = 0 \end{cases}$

Dans les trois cas, le couple est proportionnel au produit du flux par la composante en quadrature du courant statorique avec le flux. Seul le choix du flux rotorique permet un découplage naturel caractérisé par une indépendance du flux par rapport à la composante en quadrature du courant statorique.

IV.6.3.2. La Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté (IRFOC)

Dans le cas de la commande indirecte, le flux n'est pas régulé (donc ni mesuré, ni estimé). Celui-ci est donné par la consigne et orienté à partir de l'angle θ_s qui est obtenu à partir de la pulsation statorique ω_s . Cette dernière est la somme de la pulsation rotorique ω_{sl} estimée et la pulsation mécanique $np \cdot \Omega$ mesurée. [38]

Donc, cette approche consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais seulement sa position. Elle élimine le besoin d'un capteur ou d'un estimateur ou d'un observateur de flux, mais nécessite l'utilisation d'un capteur de vitesse, le contrôle vectoriel est alors simplifié. [46][47]

L'intérêt de cette méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées. [46]

IV.6.4. Mise en équation de la commande IRFOC

Rappelons que dans un repère lié au champ tournant, les équations des tensions statoriques et rotoriques de la MAS sont les suivantes:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \end{cases} \quad (IV.21)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (IV.22)$$

La mise en œuvre de la commande vectorielle à flux rotorique orienté est basée sur l'orientation du repère tournant d'axes dq, tel que l'axe d soit confondu avec la direction de ϕ_r (figure IV.9).

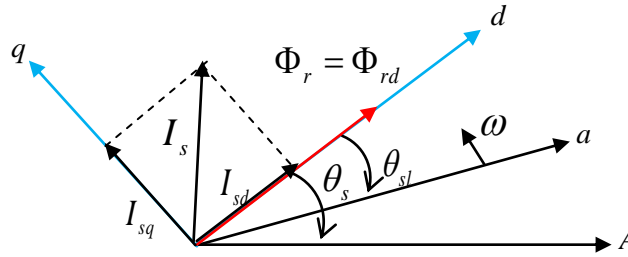


Fig. VI.9: Orientation du flux rotorique

L'orientation du flux magnétique selon l'axe direct conduit à l'annulation de sa composante en quadrature, on a alors

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (IV.23)$$

Les équations des tensions rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \\ 0 = R_r I_{rq} - (\omega_s - \omega) \Phi_r \end{cases} \quad (IV.24)$$

Celles des flux:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) I_{sd} + \frac{M}{L_r} \Phi_r \\ \Phi_{sq} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

Nous obtenons donc les composantes des tensions statoriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sd} - \omega_s \sigma L_s I_{sq} - \frac{M}{T_r L_r} \Phi_r \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sq} + \omega_s \sigma L_s I_{sd} + \frac{M}{L_r^2} np \cdot \Omega \Phi_r \end{cases} \quad (\text{IV.26})$$

IV.6.4.1. Estimation de ω_s et θ_s :

Dans la commande IRFOC la pulsation statorique est déterminée indirectement depuis, la mesure de la vitesse mécanique et la relation suivante : [48]

$$\omega_s = np \cdot \Omega + \frac{M}{T_r} \frac{I_{sq}}{\Phi_r} \quad (\text{IV.27})$$

Nous remarquons l'apparition de la constante de temps rotorique, qui est un paramètre influent sur les performances de cette commande.

La position θ_s est déterminée ensuite par l'intégration de ω_s

$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int \left(np \cdot \Omega + \frac{M}{T_r} \frac{I_{sq}}{\Phi_r} \right) dt \quad (\text{IV.28})$$

IV.6.4.2. Expression du couple électromagnétique

Il découle de l'expression du couple électromagnétique (IV-13) la nouvelle relation suivante:

$$C_{em} = \left(\frac{3}{2} np \frac{M}{L_r} \right) \Phi_r^* I_{sq} \quad (\text{IV.29})$$

Il devient tout à fait claire qu'en fixant la valeur de Φ_{rd} à une valeur de référence Φ_{rd}^* , le couple ne dépendra que du courant statorique I_{sq} (comme dans le cas d'une MCC à excitation séparée), qui est le but de la commande vectorielle.

Les équations de la machine sont résumées dans (IV-30) :

$$\begin{cases}
V_{sd} = \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sd} - \omega_s \sigma L_s I_{sq} - \frac{M}{T_r L_r} \Phi_r \\
V_{sq} = \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sq} + \omega_s \sigma L_s I_{sd} + \frac{M}{L_r^2} np \cdot \Omega \Phi_r \\
T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M I_{sd} \\
\omega_s = np \cdot \Omega + \frac{M}{T_r} \frac{I_{sq}}{\Phi_r} \\
C_e = \left(\frac{3}{2} np \frac{M}{L_r} \right) \Phi_r I_{sq} \\
J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \Omega
\end{cases} \quad (IV.30)$$

Finalemnt l'écriture en équation d'état déduite de (IV.30), (en reconnaissant Φ_{rq}), conduit au système suivant:

$$\begin{cases}
\frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(V_{sd} - \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sd} + \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{T_r L_r} \Phi_r \right) \\
\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(V_{sq} - \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sq} - \omega_s \sigma L_s I_{sd} - \frac{M}{L_r^2} np \cdot \Omega \Phi_r \right) \\
\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \Phi_r \\
J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \Omega
\end{cases} \quad (IV.31)$$

On remarque dans ces équations, que V_{sd} et V_{sq} dépendent à la fois des courants des deux axes choisis comme variables d'états I_{sd} et I_{sq} donc ils influent sur le flux et le couple. Il est donc indispensable de procéder au découplage des termes couplés.

II.7. Découplage entrée – sortie:

L'objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie. Nous pourrions alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes mono-variables évoluant en parallèle. [49] Les commandes sont alors non interactives. Différentes techniques existent : découplage utilisant un régulateur, découplage par retour d'état, découplage par compensation. Nous présenterons ce dernier type de découplage :

II.7.1. Découplage par compensation :

Définissons deux nouvelles variables de commande $(V_{sd}^1 \quad V_{sq}^1)$ telles que :

$$\begin{cases}
V_{sd}^* = V_{sd}^1 - e_{sd} \\
V_{sq}^* = V_{sq}^1 - e_{sq}
\end{cases} \quad (IV.32)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_{sd} = \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{T_r L_r} \Phi_r \\ e_{sq} = -\omega_s \sigma L_s I_{sd} - \frac{M}{L_r} \omega_s \Phi_r \end{cases} \quad (IV.33)$$

Les tensions $(V_{sd}^* \ V_{sq}^*)$ sont alors reconstituées à partir des tensions $(V_{sd}^1 \ V_{sq}^1)$. Nous définissons ainsi un nouveau système pour lequel :

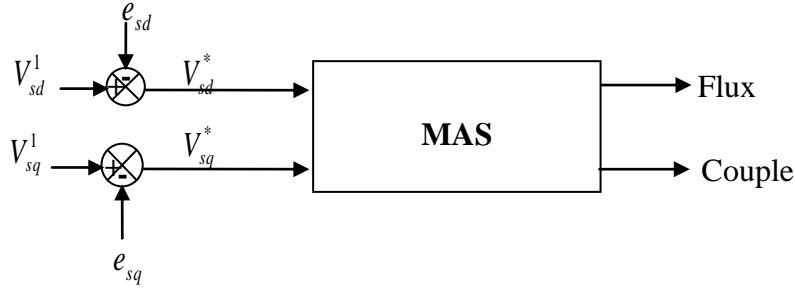


Fig.VI.10: Reconstitutions des tensions V_{sd}^* et V_{sq}^* .

Nous définissons ainsi un nouveau système pour lequel Les actions sur les axes d et q sont découplées :

$$\begin{cases} V_{sd}^1 = \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sd}^* + \sigma L_s \frac{dI_{sd}^*}{dt} \\ V_{sq}^1 = \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sq}^* + \sigma L_s \frac{dI_{sq}^*}{dt} \end{cases} \quad (IV.34)$$

En faisant apparaitre de manière explicite le flux (IV.25) et le couple (IV.29), nous obtenons :

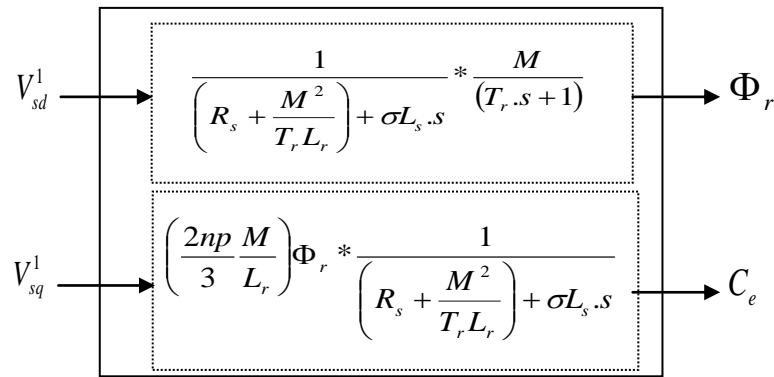


Fig.VI.11: Commande découplé – expression de C_e , et Φ_r .

On aboutira finalement au système schématisé sur la Fig.VI.12.

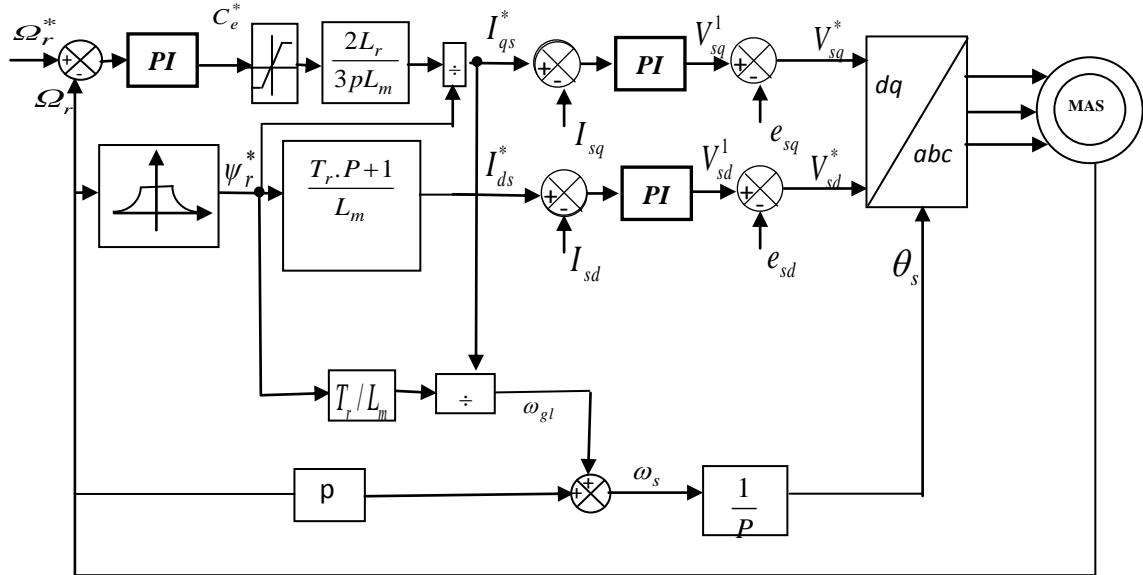


Fig. VI.12: Schéma de principe de la commande à flux orienté

Le schéma bloc de commande vectorielle avec orientation du flux rotorique est représenté par la Fig.VI.12.

IV.8. Calcul des régulateurs :

Nous avons vu que le découplage entre les axes *d* et *q* nous permet d'étudier séparément les boucles de régulation du flux et du couple

a. Régulateur du courant I_{sd}

Le régulateur du courant I_{sd} fourni la tension V_{sd}^1 de référence d'après l'équation (IV.34), la boucle de régulation est alors comme indiqué à la figure. (VI.13). La fonction transfert du régulateur *PI* est donnée par:

$$V_{sd}^1 = \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) I_{sd}^* + \sigma L_s \frac{dI_{sd}^*}{dt} \tag{IV.35}$$

La boucle de régulation des courants I_{sd} sont représenté par la Fig.VI.13.

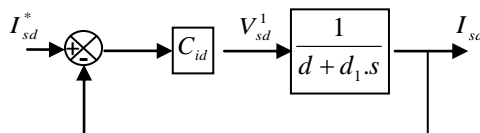


Fig. VI.13. Schéma fonctionnel de régulateur de courant I_{sd}

Avec : $d = R_s + \frac{M^2}{T_r L_r}$, $d_1 = \sigma L_s$

L'expression mathématique du régulateur PI du correcteur C_{id} est donnée par les relations suivantes :

$$C_{id} = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \quad (IV.36)$$

On a donc :

$$V_{d1}^1 = \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) (I_{sd}^* - I_{sd}) \quad (IV.37)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{I_{d1}}{I_{d1}^*} = \frac{\frac{k_{pd}.s + k_{id}}{d1}}{s^2 + \frac{d + k_{pd}}{d_1}.s + \frac{k_{id}}{d_1}} \quad (IV.38)$$

Le polynôme caractéristique pour la boucle de régulation est :

$$P(s) = s^2 + \frac{d + k_{pd}}{d_1}.s + \frac{k_{id}}{d_1} = 0 \quad (IV.39)$$

En imposant pour chaque polynôme caractéristique en boucle fermée deux pôles complexes conjugués $s = \rho(-1 \pm j)$, on aura :

$$P(s) = s^2 + 2.\rho.s + 2.\rho^2 = 0 \quad (IV.40)$$

Par identification terme à terme des équations, on aura :

$$\begin{cases} k_{pd} = 2.\rho.d_1 - d \\ k_{id} = 2.\rho^2.d_1 \end{cases} \quad (IV.41)$$

b. Régulateur du courant I_{sq}

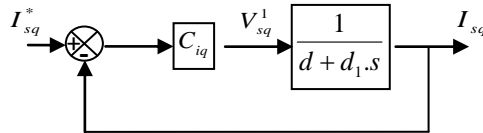


Fig.VI.14.Schéma fonctionnel de régulateur de courant I_{sq}

En procédant de la même manière que pour le régulateur de I_{sd} on déterminera les coefficients du régulateur de courant I_{sq} qui fournit la tension de référence V_{sq}^* . Le schéma de régulation du courant I_{sq} est représenté sur la Fig.VI.14, on remarque bien que c'est la même que pour le courant I_{sd}

c. Boucle de la régulation de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence afin de maintenir la vitesse correspondante.

Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit plus rapide par rapport à celle de la vitesse.

D'après l'équation mécanique de la machine asynchrone à double étoile, on a :

$$\Omega = \frac{C_{ref}}{J.s + k_f} = \frac{C_{em} - C_r}{J.s + k_f} \quad (IV.47)$$

La chaîne de régulation de vitesse peut être représentée par le schéma fonctionnel suivant (Fig.VI.15). L'expression mathématique du régulateur PI du correcteur C_Ω est donnée par la relation suivante :

$$C_\Omega = k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} \quad (IV.48)$$

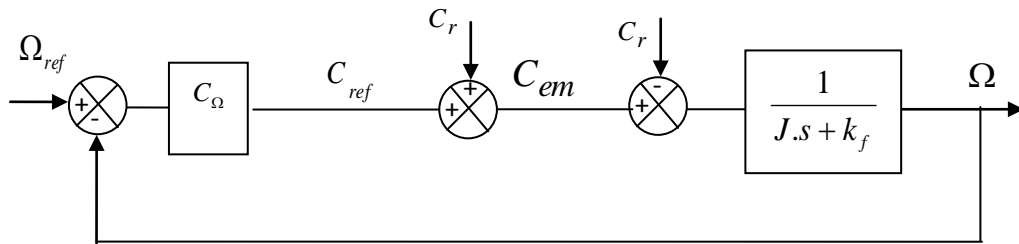


Fig.VI.15. Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse ω_r .

La fonction de transfert en boucle fermée, calculée à partir du schéma précédent, est donnée par :

$$\frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{(k_{p\Omega}.s + k_{i\Omega}) \frac{1}{J}}{s^2 + \frac{k_f + k_{p\Omega}}{J}.s + \frac{k_{i\Omega}}{J}} \quad (IV.49)$$

L'équation du polynôme caractéristique en boucle fermée $P(S)$ est :

$$P(s) = s^2 + \frac{k_f + k_{p\Omega}}{J}.s + \frac{k_{i\Omega}}{J} = 0 \quad (IV.50)$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée deux pôles complexes conjugués : $s_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$, on aura :

$$P(S) = s^2 + 2.\rho.s + 2.\rho^2 = 0 \quad (IV.51)$$

Par identification, on trouve :

$$\begin{cases} k_{i\Omega} = 2.J.\rho^2 \\ k_{p\Omega} = 2.j.\rho - k_f \end{cases} \quad (IV.52)$$

Pour valider les performances de la commande vectorielle avec régulateur PI, deux tests sera appliqués sur le système de régulation :

- Application, d'un échelon à l'entrée de système de commande, une couple de charge et inversion de sens de rotation.
- Fonctionnement au delà de la vitesse nominale pour le bloque de déffluxage (fonctionnement à puissance constante)

A la suite de notre travail nous allons utiliser la commande vectorielle pour maintenir la vitesse de rotation du pivot d'irrigation constante. L'entrée du système de commande sera la vitesse calculée dans la première chapitre de ce mémoire, où elle est en fonction de plusieurs grandeurs telle que (la dose, la nature du sol, le débit du pivot, les conditions climatique,..)

IV.9. Résultats de simulation et interprétations

IV.9.1. Référence de vitesse carrée

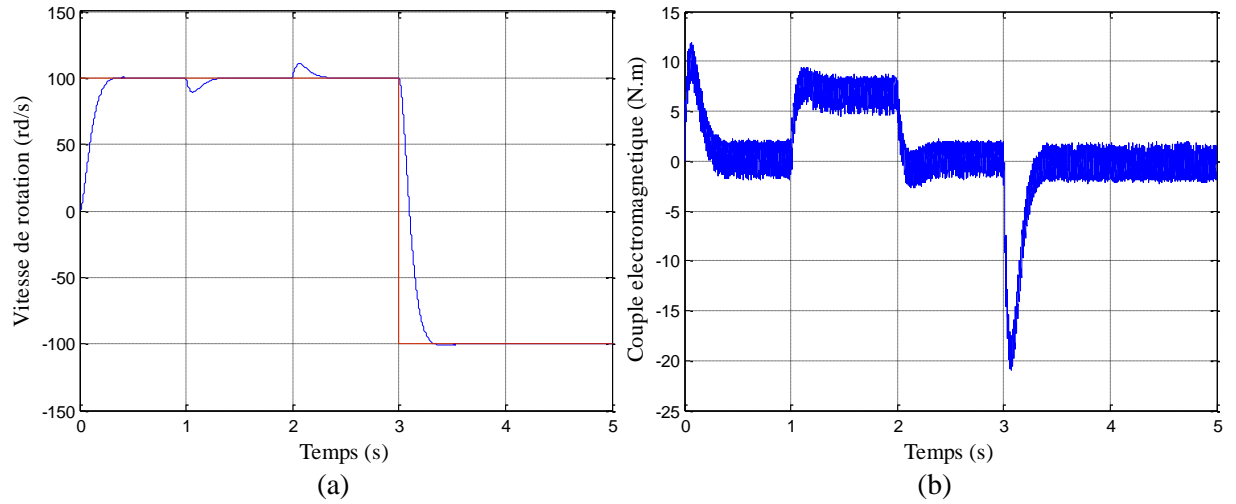


Fig.VI.16. Vitesse rotation et Couple électromagnétique

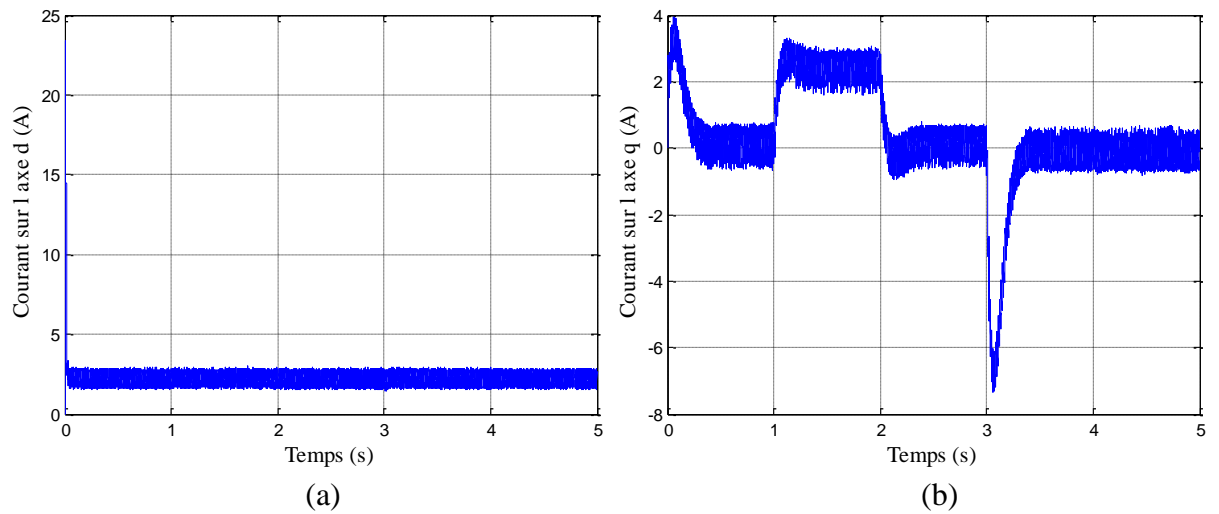


Fig.VI.17. Composantes du courant statorique
 (a) composante directe (b) composante quadrature

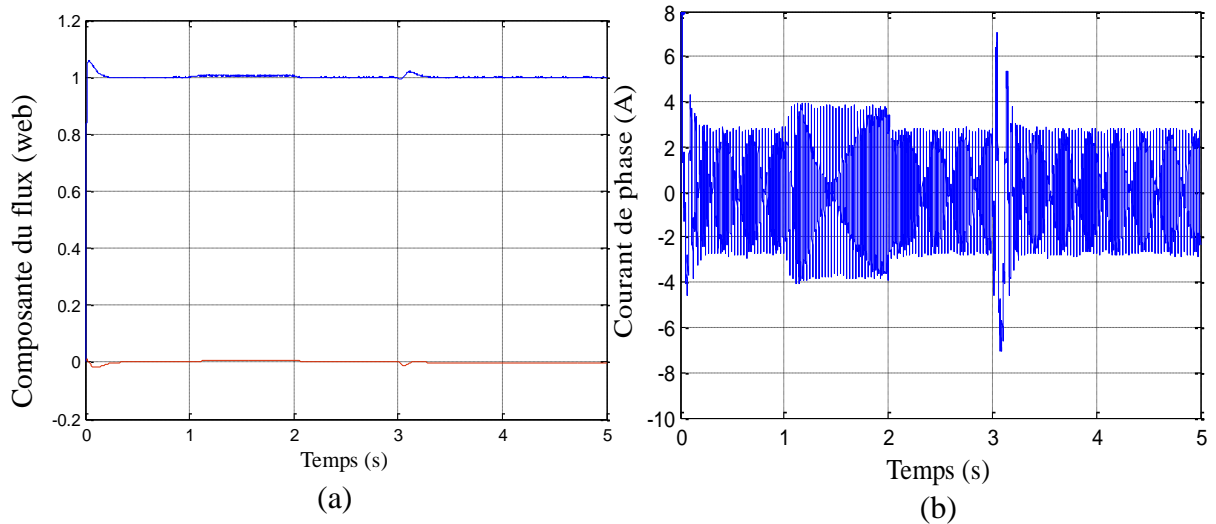


Fig.VI.18. (a) Composante du flux rotorique et (b) Courant du stator

Interprétations

Nous remarquons que cette commande présente des résultats très satisfaisants avec une bonne dynamique de poursuite ainsi qu'un rejet acceptable de la perturbation.

D'autre part, on remarque que la vitesse s'établit à sa valeur nominale avec une bonne dynamique et sans erreur statique, à l'instant où l'on applique le couple de charge, la vitesse est réduite, mais elle se rétablit à nouveau sans erreur statique. A l'application d'une consigne de -100 rd/s, la vitesse suit sa commande avec une bonne réponse, et les mêmes performances précédentes (Fig.VI.16.(a)).

Dans les figures (VI.16.(a)), (VI.18.(a)) et (VI.18.(8)), on remarque l'apparition des pics dans le couple et dans les courants statoriques de phases ainsi qu'aux flux rotoriques, lors de l'application du couple de charge et surtout lors de l'inversion de la vitesse, puis il y a stabilisation en régime permanent.

On peut remarqué aussi que, les composantes du flux rotoriques présentent un découplage réussi avec un bon contrôle du flux, et les régimes transitoires du courant et du couple sont vite maîtrisés.

On remarque dans la e courbe du courant statorique, que la forme d'onde des courants statoriques présentent des ondulations se qui se répercutent directement sur le couple, cependant l'atténuation des ondulations du couple est évidente, mais elles persistent toujours.

IV.9.2. Fonctionnement en mode de défluxage

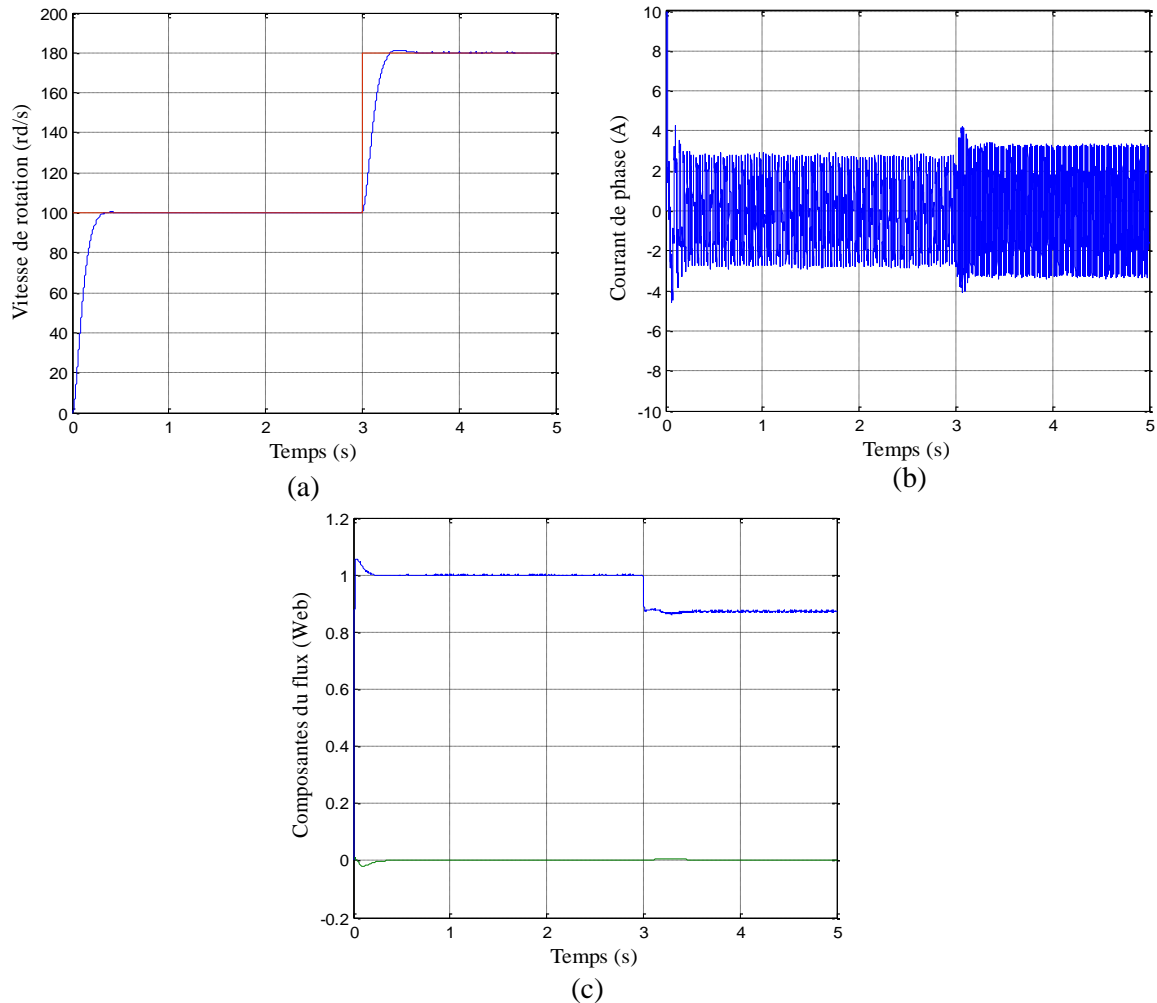


Fig.IV.19. Réponses de la machine en mode défluxé

Interprétations

On remarque que la machine suit sa référence avec un dépassement important à l'instant du changement de cette référence. On constate que ce dépassement est dû au choix des paramètres du régulateur PI. Comme la vitesse de référence de 160 rad/s est supérieure à la vitesse nominale de 148.67 rad/s, la machine fonctionne en mode défluxé, ce qui se traduit par une diminution du flux comme on le voit sur Fig. (IV.19).

IV.10. Dimensionnement du système pivot solaire

Le moteur d'un pivot solaire fonctionnera habituellement « au fil du soleil », c'est-à-dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie. Dans ce cas, il est important que la puissance fournie par le générateur PV soit utilisée le plus complètement possible au point de fonctionnement maximal du moteur de pivot d'irrigation sur la plage de fonctionnement la plus large possible. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation d'énergie photovoltaïque sera indispensable. Dans le 3^{ème} chapitre on a introduit l'algorithme PO (perturbe and observe) pour maximiser la puissance extraite par le GPV. Les résultats de simulation montrent les performances de cet algorithme.

Selon le choix de la puissance de pivot irrigation et pour avoir le l'entraînement de pivot d'irrigation pour un éclairement et une température donnée, on peut dimensionner le

générateur photovoltaïque par le choix de la meilleure combinaison entre les types et les nombres des modules.

IV.10.1. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

La puissance que doit fournir le générateur photovoltaïque sera déterminée par la puissance nominale demandée par l'ensemble des moteurs d'entrainements du pivot et leurs commandes.

La puissance nominale demandée par un moteur est de 1000 W. On doit dimensionner le générateur PV, c'est-à-dire déterminer le nombre de modules qui le constituent pour alimenter ces moteurs.

$$P_{pv} = V_{mp} * I_{mp} = 59 \text{ W}$$

$$P_{Gpv} = 59.85 * 18 = 1077.3 \text{ W}$$

Donc le nombre de module en série est $N_s=9$ et le nombre de modules en parallèle est $N_p=2$. Donc la puissance maximale est $(17.1*9)*(3.5*2)=1077.3 \text{ W}$.

IV.10.2. Application de la commande vectorielle sur pivot d'irrigation

La vitesse de référence du pivot est définie selon des conditions climatiques, les besoins des plantes (dose journalière), et sera un pourcentage de la vitesse maximale du pivot définie par le constructeur. Nous avons fait deux tests de simulation :

- Le premier concernant un fonctionnement nominal (vitesse maximale) ou à 100%.
- Le deuxième concernant un fonctionnement selon une dose calculée en fonction des besoins du point (6 mm/jour).

IV.10.3. Schéma bloqué de système pivot solaire

La structure de la commande est constituée de l'association des moteurs d'entrainements alimentés par des onduleurs de tension et le générateur photovoltaïque avec l'MPPT. La figure (2.13) présente la structure de système général. Au niveau de chaque tour, le moteur est équipé d'un système de micro-rupteur permettant de maintenir l'angle entre les deux travées adjacentes entre deux valeurs (angle de déclenchement et angle d'arrêt).

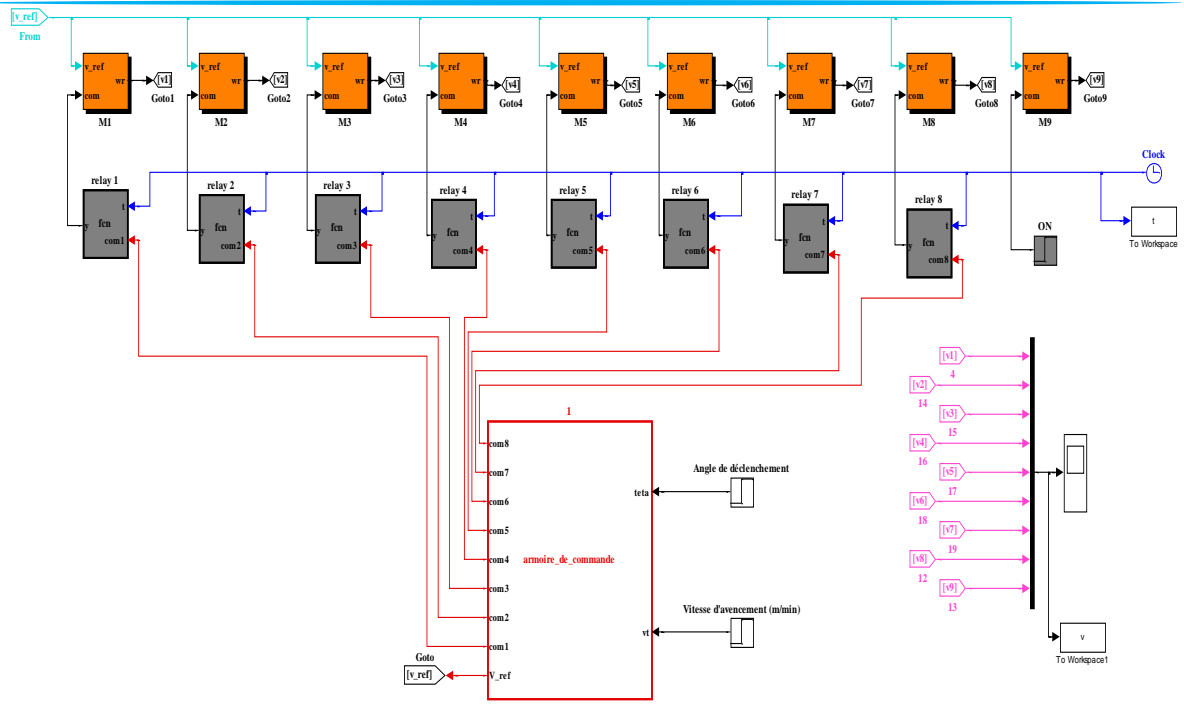
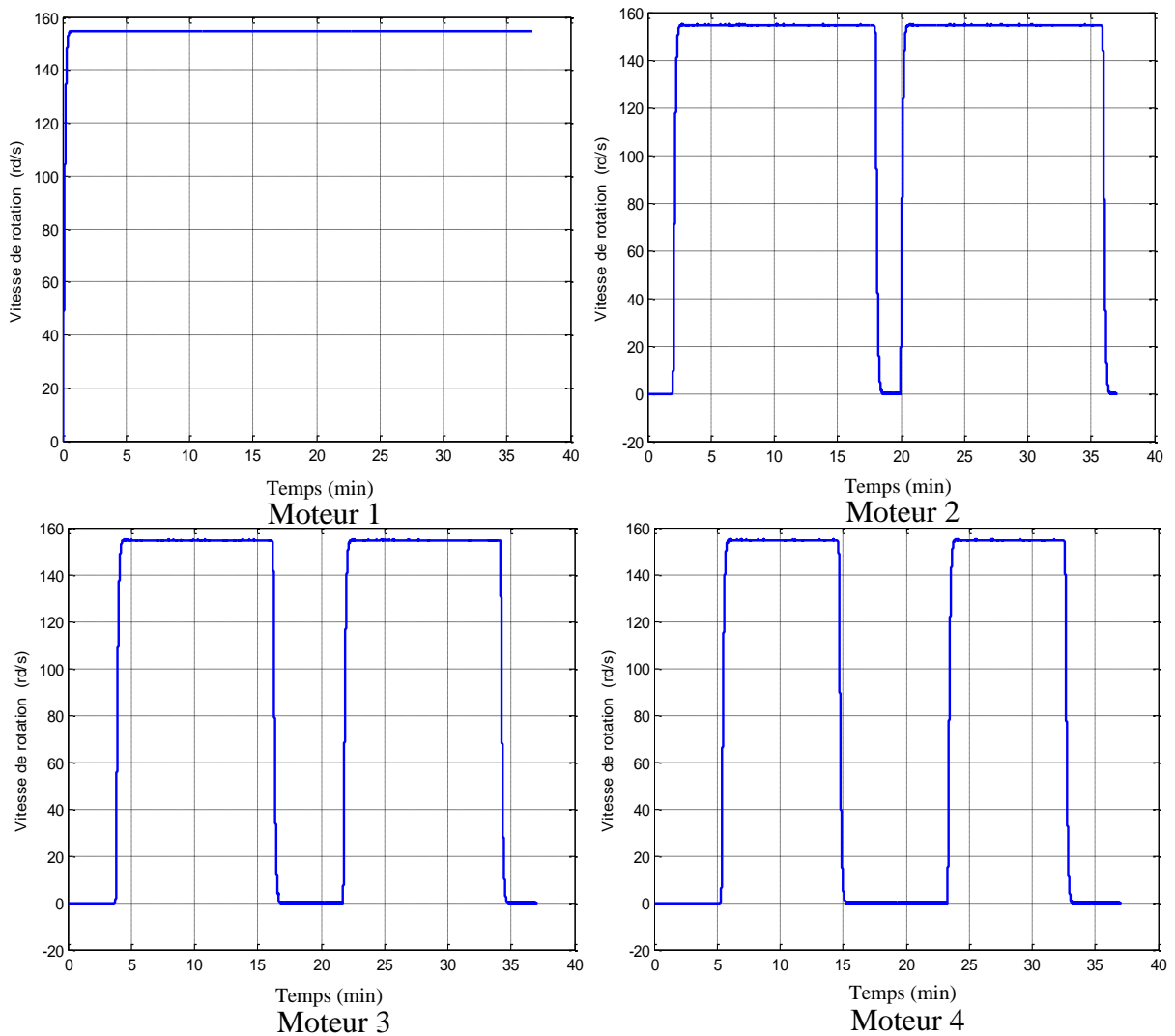


Fig. IV.20 Commande des moteurs d'entraînement du pivot

IV.11.1. Résultats de simulation : fonctionnement à AV=100%



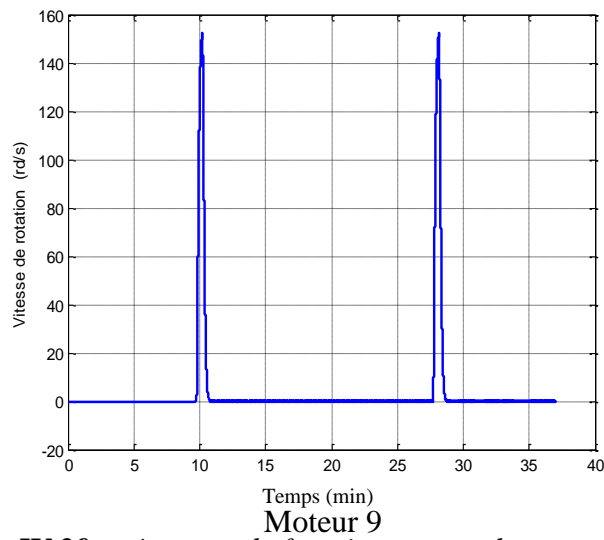
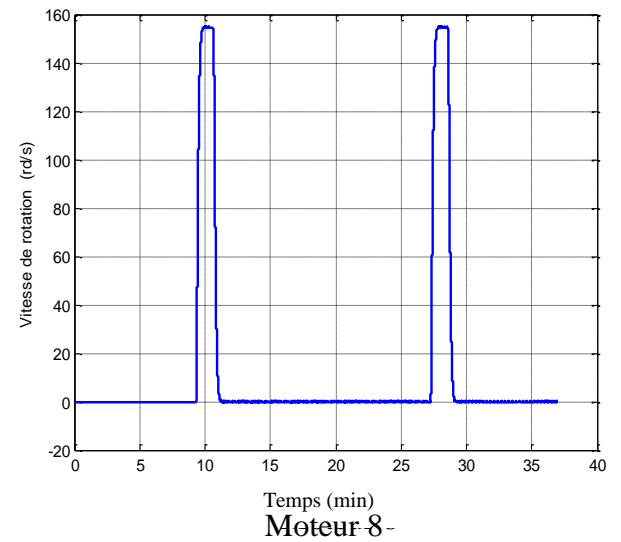
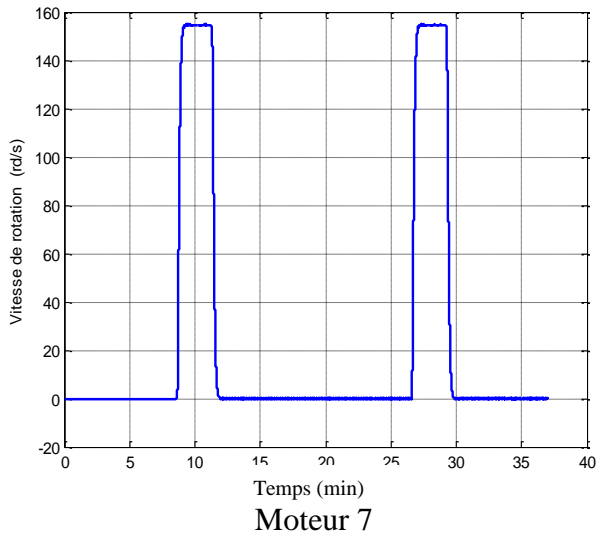
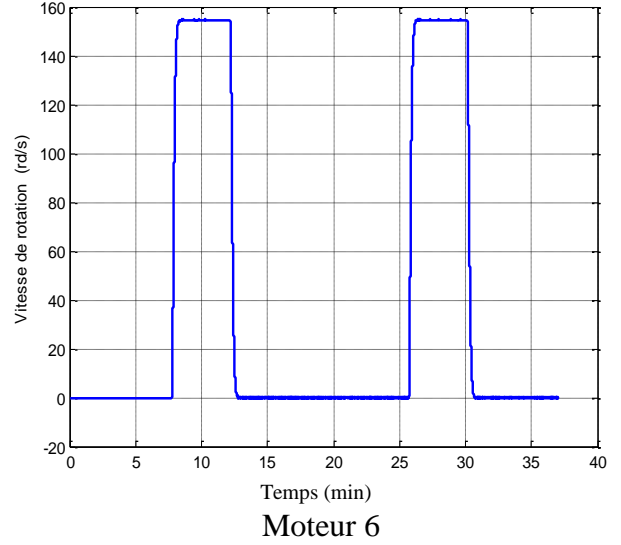
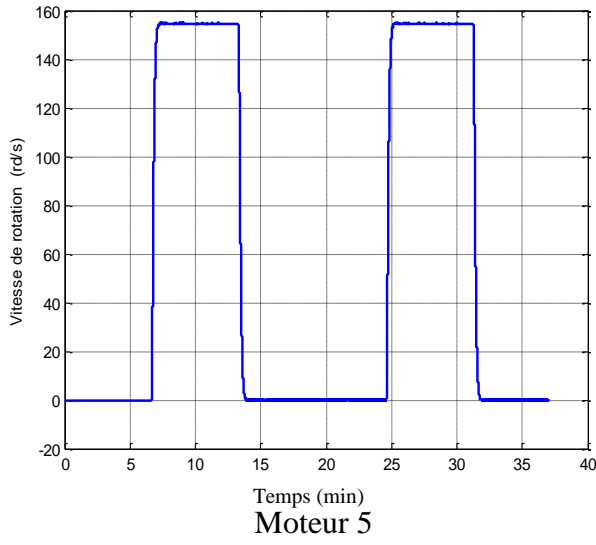


Fig. IV.29 : séquence de fonctionnement des moteurs d'entraînement à AV=100%

Interprétations

La vitesse moyenne de déplacement de la rampe pivotante est fixe par le temps de fonctionnement de la tour d'extrémité. Cette vitesse est calculée à partir des données de culture (la dose, le débit de système,...).

Dans Le premier teste, on pris une vitesse de 2m/min qui est la vitesse nominale de pivot. On a pris aussi un angle de déclanchement égale à 0.5 degrés, et l'angle d'arrêt et toujours égale à zéros degrés, pour ajuster l'alignement.

Au démarrage d'irrigation seul le moteur de la dernière tour qui commence à avancer et il reste toujours en marche pendant toute l'opération d'irrigation (courbe de moteur 9), les autres moteurs sont en repos.

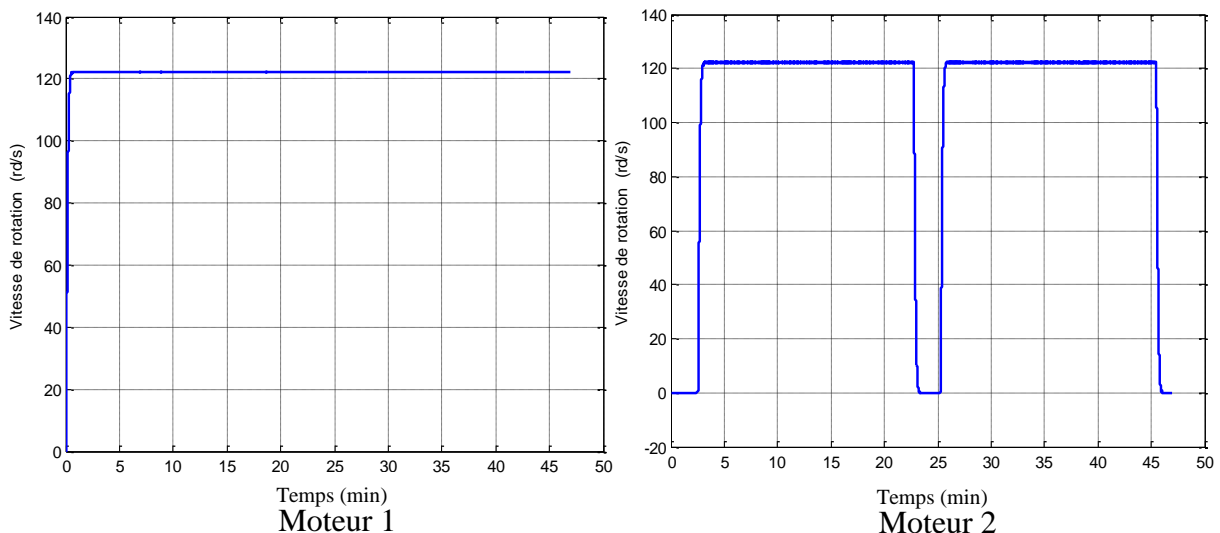
Des que la moteur 9 traverse un angle de 0.5 degrés (angle de déclanchement du moteur 8), le moteur 8 va commencer son avancement jusqu'il atteint un angle d'arrêt qu'elle est zéros entre son travée et la sienne du moteur 9. Le temps de fonctionnement du moteur 8 sera inferieur à celle du moteur 9, parce qu'il traverse une distance (circonférence) moins que celle de ce moteur (courbe de moteur 8).

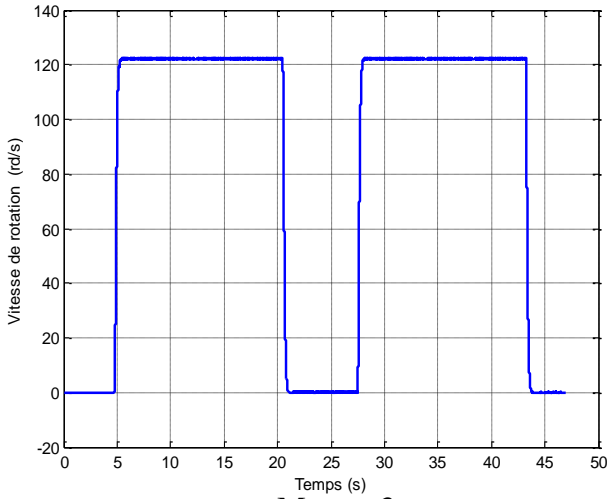
Le moteur 7 se met en marche des que le moteur 8 atteint un angle de 0.5 degrés. Il arrête quand l'angle entre lui et le mateur 8 (moteur précédent) sera égale zéros degrés courbe moteur 7. Le temps de fonctionnement du 7ème moteur est toujours inferieur à celui de 8ème moteur.

Même procédure de (marche/arrêt) pour tous les autres moteurs, le moteur (n) démarre jusqu'à ce que l'angle A_n séparant la tour (n) et la tour (n-1) atteigne la limite de déclenchement (0.5 degrés), le moteur (n-1) se met alors en marche, comme cette dernière doit parcourir une distance moins important que la tour (n) pour parcourir le même angle.

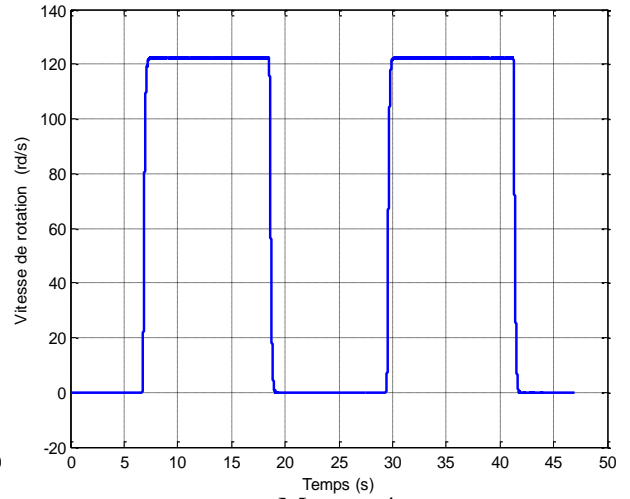
IV.11.2.Résultats de simulation : fonctionnement à $AV= 79.26\%$

Comme on a montré dans le premier chapitre, pou une dose de 6 mm/jour, la vitesse de rotation doit respecter un avancement de 79.26% de la vitesse maximale pour irriguée la superficie. Ce Teste de simulation est d'appliquer cette vitesse d'avancement à l'entre de commande de vitesse (commande vectorielle), et de respecter la condition de l'alignement.

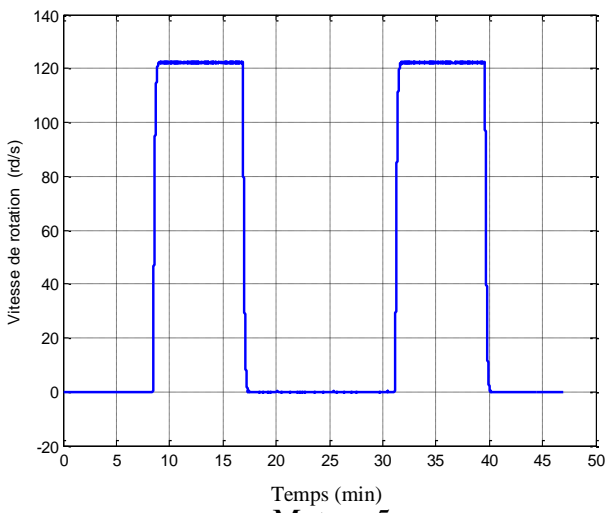




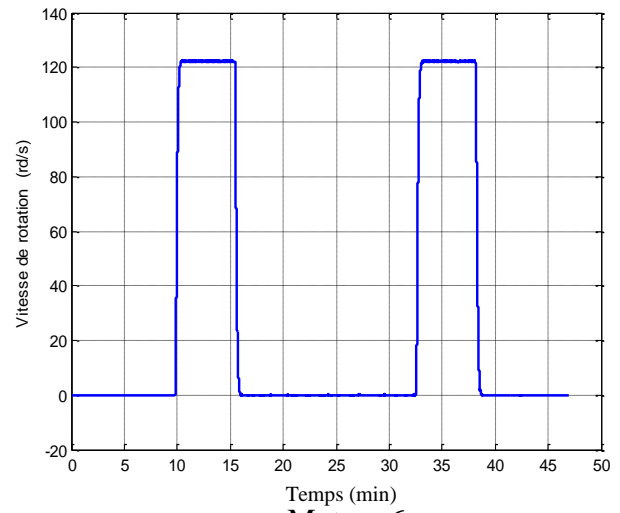
Moteur 3



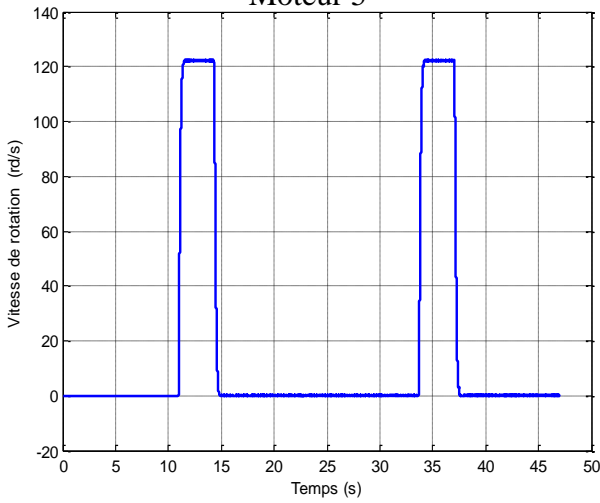
Moteur 4



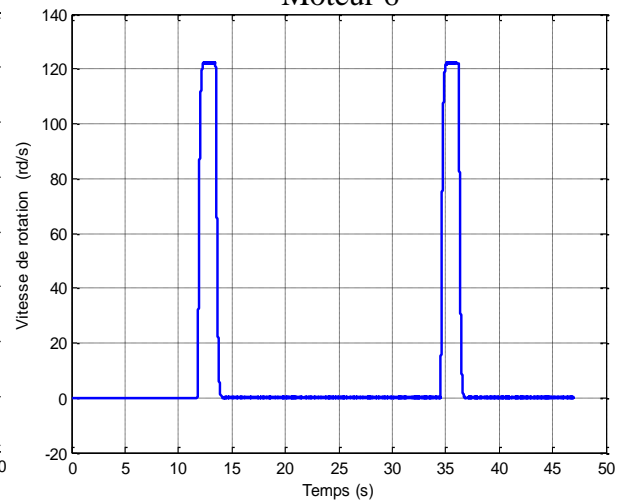
Moteur 5



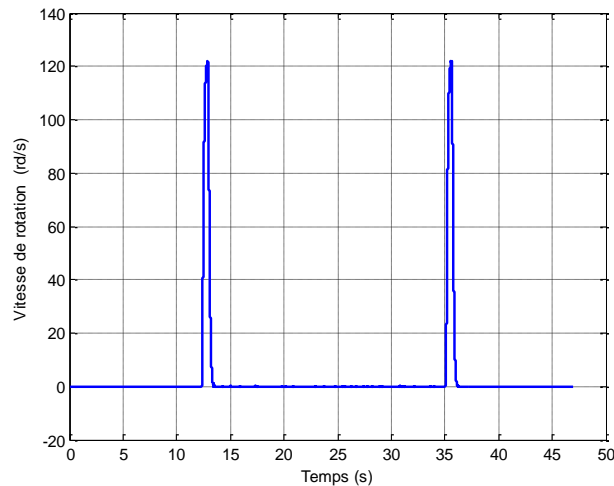
Moteur 6



Moteur 7



Moteur 8



Moteur 8

Fig. IV.30 : séquence de fonctionnement des moteurs d'entraînement $AV=79.26\%$

Interprétation

Pour le fonctionnement à 76.26%, on constate que :

- Même procédure de (marche/arrêt), le moteur (n) démarre jusqu'à ce que l'angle A_n séparant la tour (n) et la tour (n-1) atteigne la limite de déclenchement (0.5 degrés), pour vérifier l'alignement du pivot.
- Puisque la vitesse d'avancement est inférieure à la vitesse d'avancement maximale, le temps de déclenchement des moteurs (8 à 1) est supérieur que le temps de déclenchement pour la vitesse maximale.

IV .12.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu la modélisation de la machine asynchrone. Dans celle-ci, les équations différentielles qui régissent le comportement dynamique de la machine asynchrone ont été posées. Nous avons ensuite procédé à la transformation d'axes qui permet de simplifier la modélisation du système. Dans ce cas, les équations de la machine sont exprimées dans un référentiel de *Park* liées au champ tournant.

La commande de la machine asynchrone est difficile à cause du couplage entre le flux et le couple. La commande vectorielle vient régler ce problème. On a introduit le principe de base de la commande vectorielle indirecte qui fournit le découplage nécessaire entre le flux et le couple. Associée à un régulateur conventionnel de type PI. Différents résultats de simulation ont été exposés dans le but de montrer les performances dynamiques de la commande vectorielle associée à un régulateur PI. Cette commande a donné de bonnes performances aussi bien en poursuite qu'en réglage.

La vitesse d'avancement des moteurs d'entraînement (moteur asynchrone), qui définit la dose d'eau portée à la parcelle, est un grandeur importante dans le système d'irrigation par pivot rotatif. C'est pourquoi, on a utilisé la commande vectorielle pour régler cette vitesse et la maintenir à sa valeur calculée en fonction de la dose nécessaire (besoins des plantes), les conditions climatiques, et la nature de sol.

Pour des raisons de sécurité, la procédure d'irrigation se fait d'une manière à garder l'alignement du pivot. Pour cela chaque boîtier est équipé d'un micro-rupteur de commande et d'un, voire deux, micro-rupteur de sécurité, ils interviennent lorsque l'angle entre deux travées contiguës dépasse 1 degré. Ils arrêtent la rampe et la station de pompage (mise en sécurité). A la fin de ce chapitre, nous avons simulé cette procédure à l'aide de logiciel MATLAB/Siulink, et les résultats de simulation montre la conséquence de fonctionnement des moteurs d'entraînement pour assurer l'opération de l'irrigation et l'alignement du pivot.

Conclusion générale :

Les ressources en eau dans les régions semi-arides subissent une pression croissante sous l'effet conjugué de la croissance des besoins (démographie galopante et extension des zones irriguées), et de la réduction des ressources (sécheresse passagère et/ou liée aux changements climatiques). Pour une gestion durable des ressources en eaux, des progrès doivent être accomplis pour lutter contre le gaspillage et mettre en place des observatoires régionaux des ressources en eaux.

Des statistiques sur les volumes excessifs utilisés dans l'irrigation du fait de l'utilisation de techniques traditionnelles, montrent qu'il y en a des pertes d'eau, tant au cours du transport que pendant la distribution à la parcelle.

Dans ce mémoire nous avons étudié un système d'irrigation par pivot rotatif alimentée par des panneaux solaires. Comme une technique d'irrigation moderne, ces pivots permet de minimiser les pertes en eau, et à cause de son autonomie, il permet aussi d'irriguer les sites isolés.

Les premier chapitre de ce mémoire a été consacré sur L'étude des technique des irrigations, en cas particulier la technique d'irrigation par pivot rotatif. On a détaillé les éléments qui composent le pivot solaire. Implications énergétiques de l'irrigation au niveau de l'exploitation nécessite de relier simplement les contraintes locales, les consommations en eau, les consommations d'énergie et le service rendu. On a calculé la vitesse moyenne de déplacement de la rampe pivotante pour satisfaire les besoins de la culture en eau (dose journalière nécessaire).

Le deuxième chapitre, a été consacré à l'étude de l'alimentation du pivot solaire. Cette alimentation est simplement un générateur photovoltaïque. Nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. Ce générateur est une source caractérisé par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques, un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque travail avec une meilleure efficacité.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé le système avec et sans contrôleur MPPT, une simulation qui nous a permis de voir l'intérêt des MPPT (la méthode perturbe et observe) dans la poursuite du point de puissance maximale, afin d'optimiser le générateur photovoltaïque.

L'objectif du dernier chapitre a été le dispositif d'entraînement du pivot solaire. Ce dispositif est composé du moteur asynchrone, un réducteur, et le système de la commande du pivot. Nous avons présenté en premier lieu la modélisation de la machine asynchrone. Dans celle-ci, les équations différentielles qui régissent le comportement dynamique de la machine asynchrone ont été posées.

La quantité d'eau portée à la superficie à irriguée, a une relation directe avec La vitesse d'avancement du pivot. Donc pour une dose bien déterminée, le pivot doit avancer par une vitesse fixe. Cette dernière a été appliquée à l'entrée du système de commande de la machine

d'entraînement du pivot. On a utilisé la commande vectorielle indirecte pour régler la vitesse de la MAS (machine d'entraînement du pivot). On a commandé les neuf moto-réducteurs d'une manière à garder toujours l'alignement du pivot d'irrigation. Nous avons simulé cette procédure à l'aide de logiciel MATLAB/Siulink.

Perspectives :

- Études des systèmes d'irrigation utilisant d'autre source d'énergie : comme l'énergie éolienne, ou une alimentation hybride (solaire/éolienne).
- Intégration de système de stockage pour améliorer l'irrigation et de permettre d'irriguer pendant la nuit.
- Réalisation pratique du pivot rotatif solaire.

Résumé

La technique d'irrigation par rampe pivotant est une technique fortement mécanisée permettant la couverture de très grandes surfaces. Elle offre une excellente efficacité et une économie dans l'utilisation de l'eau. L'utilisation des énergies renouvelables pour alimenter les pivots d'irrigation offre une solution alternative en particulier dans des sites isolés. Ce travail a pour but d'étudier un système d'irrigation par pivot rotatif à neuf travées. L'énergie solaire a été étudiée comme source d'énergie économique dans le but de faire fonctionner des systèmes d'irrigation et l'algorithme d'optimisation P&O a été utilisé pour maximiser l'énergie extraite du PV. On a utilisé la commande vectorielle pour fixer la vitesse d'avancement du pivot qu'elle doit fixer afin d'obtenir la dose d'eau nécessaire à la culture. Les moteurs d'entraînement fonctionnent d'une façon à garantir l'alignement du pivot.

Abstract

The irrigation technique by rotating pivot irrigation is a highly mechanized technique to cover very large areas. It provides excellent efficiency and economy in the use of water. The use of renewable energy to supply the irrigation pivots is an alternative solution especially in isolated locations. This work aims to study an irrigation system by rotating pivot irrigation. Solar energy has been studied as a source of energy to operate irrigation systems, and P&O optimization algorithm was used to maximize the energy extracted from the PV. Flux oriented control was used to fix the pivot's advance speed who must be regulate to obtain the quantity of water needed to grow. The drive motors operate in a manner to ensure the pivot alignment.

- [1] Jean Dunglas «Les techniques d'irrigation , Membre de l'Académie d'agriculture» de France Manuscrit publié en février 2014 .
- [2] Evan Derald « Best Management Practices of A Solar Powered Mini-Pivot for Irrigation of High Value Crops» Master of Science University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan 2008.
- [3] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla» mémoire de magister université el hadj lakhdar batna 2008.
- [4] C. Brouwer «Méthodes d'irrigation, gestion des eaux en irrigation» Manuel de formation n° 5 1990.
- [5] Azougagh M «Transfert de technologie en agriculture bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA.MADREEF » /DERD N 81, juin 2008.
- [6] Rieul R. « Les techniques modernes d'irrigation et les économies d'eau. État de l'agriculture en Méditerranée» Ressources en eau : développement et gestion dans les pays méditerranéens. Bari :CIHEAM, 1993. p. 177-197.
- [7] Mailhol « Diagnostic des pratiques d'irrigation gravitaire dans le Moyen Sebou : perspectives d'amélioration »Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 avril 2004.
- [8] KY Thierry S. Maurice «Système Photovoltaïque Dimensionnement pour pompage d'eau pour une irrigation goutte-à-goutte », DEA en Physique Appliquée Option : Semi-conducteurs ANNEE UNIVERSITAIRE 2005-2006.
- [9] Nadia Saiyouri, « méthodes d'irrigation en milieu aride », Projet d'Eau 2012.
- [10] Rolland, 1981: Étude du Cemagref : « la mécanisation de l'irrigation par aspersion », TOME II, n° 481. CEMAGREF Bordeaux, pp 65-126.
- [11] BEKKAIR A. et DRENI M., 1995: « Etude de la production d'une variété de blé tendre (var. ccinia) ».
- [12] Léopold Rielle et Brunon Molle « .le pivot », Éditions Cemagref, 1995.
- [13] guide pratique d'irrigation
- [14] Salah Mohamed Ait Cheikh, « Étude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse doctorat Ecole Nationale Polytechnique Algérie Décembre 2007.
- [15] Angel Cid Pastor « conception et réalisation de modules photovoltaïques », thèse doctorat l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse la France 29 septembre 2006.

[16] Boukhli hacen omar « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ». thèse magister université Abou –Bakr Belkaid de tlemcen 2010.

[17] ISSAADI Salim, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones ». Thèse magister École Nationale Polytechnique Algérie 2006.

[18] Nadia Benahmed Benabdallah nadia « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiG » thèse magister université Abou –Bakr Belkaid de tlemcen 2006.

[19] J. Royer T. Djiako E. Schiller et B. S. Sy , « Le Pompage photovoltaïque » «Manuel de cours, université d'Ottawa, Canada, 1998.

[20] Clarence Semassou, aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du benin, thèse doctorat l'université bordeaux 1 15 décembre 2011.

[21] Mme.obeidi néé :tchokhtch kebir gul filiz « commande des hacheurs MPPT par la logique floue » ,mémoire de magister .ecole nationale polytechnique el –Harrach Alger février 2006.

[22] Jean-François Reynaud «Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques», thèse doctorat de l'université de Toulouse 4 Janvier 2011.

[23] Jimmy Royer .Thomas Djiako.Eric Schiller.Bocar SadaSy «pompage photovoltaïque» manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniques Université d'Ottawa.

[24] Faiza belhachat « commande neuro-floue d'un hacheur MPPT » .mémoire de magister école nationale polytechnique el –Harrach Alger Juin 2007.

[25] Helali kamella, « modélisation d'une cellule photovoltaïque :étude comparative » ,mémoire de magister électrotechnique université mouloud mammeri de tizi –ouzou Juin 2012.

[26] Zouak Belkacem « Étude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité», mémoire de magister électrotechnique université mouloud mammeri de tizi –ouzou mai 2012.

[27] M. . Zerhouni «Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique» Revue des Énergies Renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.

[28] R. Merahi. R.Chenni2. M. Houbes « Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab» Journal of Scientifique Research N° 0 vol. 1 (2010).

- [29] Belhadj Mohammed «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome» Mémoire de Magistère de Centre Universitaire De Bechar 2007-2008.
- [30] Basim Alsayid « Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model» International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE) Volume 1, Issue 3, June 2012.
- [31] M. Djarallah « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique » Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [32] Tahar tafticht « analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien » Thèse de Doctorat, Université de Québec décembre 2006.
- [33] Salma Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de Magistère université ferhat abbas – setif 2011.
- [34] Ramanarayanan, « DC to DC converters – dynamics, Resource Centre of the Power Electronics Group », SMPS Course Notes 2000.
- [35] L. Protin et S. Astier « Convertisseurs Photovoltaïques » Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 3 360.
- [36] Chatelain , « Machines électriques », Tome 1, Presse polytechnique romandes 1983.
- [37] Rachide azaizia « étude et commende d'une machine asynchrone a double alimentation par un convertisseur multi niveaux » mémoire de magister université m' hamed bougra boumerdes 2008.
- [38] Rezgui salah edine « commande de machine électrique en environnement » mémoire de magister électrotechnique université mentouri de Constantine 2009.
- [39] Malek ghanes « observation et commende de la machine asynchrone sans capteur mécanique » thèse doctorat l'école centrale de Nantes et l'université de Nantes 03 novembre 2005.
- [40] Kassa idjidaene « Contribution à l'Étude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Électriques Éoliennes Autonomes » thèse doctorat l'Université Lille 1(France) 23 mai 2010.
- [41] Dissa Abdennour « Contrôle Direct du Couple du Moteur à Induction Sans Capteur de Vitesse Associée à un Observateur Non Linéaire » mémoire de magister l'Université de Batna
- [42] sihem damkhi « commande sans capteur de vitesse d'un moteur asynchrone par la sfg (signal flow graphs) de holtz » mémoire de magister Université de Batna 2007

[43] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » mémoire de magister université badji mokhtar –Annaba 2009/2010.

[44] Zekkour Abdelhamid « Contrôle Direct du Couple du Moteur à Induction Sans Capteur de Vitesse Associé à un Observateur Adaptatif » mémoire de magister Université de Batna11/07/2010.

[45] Bennour Cherif « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister université mohamed khider –biskra 19/11/2012

[46]Toufouti rida « contribution a la commande directe du couple de la machine asynchrone » thèse doctorat université mentouri de Constantine02/06/2008.

[47] Dahman Kamal « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée par Convertisseurs Matriciels »mémoire de magister école nationale polytechnique 27 novembre 2004

[48] Amor bourak « contribution à la simulation d'une commande en mode glissant appliquée à une machine à courant alternatif » » thèse doctorat université Batna 2007.

[49] Gabriel buche « commande vectorielle de machine asynchrone asynchrone en environnement temps réel matlab/simulink » mémoire d'ingénieur C.N.A.M conservatoire national des arts et métiers centre régional associé de grenoble (C.U.E.F.A) 07/03/2001.