

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de Batna
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Maitrise des Energies

présenté par :

Lahlah salah

(licence en electrotechnique, université de Batna)

THEME

Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C).

Devant le Jury :

| | | | |
|----------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------|
| Président : | B.Azoui | Professeur | U.Batna |
| Rapporteurs : | M.Arrouf | Maître de conférences | U.Batna |
| Examineurs : | H. Benalla | Professeur | U.Constantine |
| | D. Rahem | Maître de conférences | U.Oum El Bouaghi |

Promotion 2007

Remerciements

Le présent travail dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire d'électrotechnique de Batna.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **ARROUF MOHAMED** Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Batna pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.

Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements à :

Monsieur **AZOUI BOUBAKEUR** professeur au département d'électrotechnique a l'université de Batna, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Monsieur **H.Benalla** professeur au département d'électrotechnique à l'université de Constantine, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.

Monsieur **D.Rahem** Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université d'Oum El Bouaghi, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.

Lahlah Salah

Nomenclature

| | | |
|----------------------|--|----------------------|
| P_{turbine} | : Puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne | [W] |
| C_p | : Coefficient de puissance de la turbine. | |
| ρ | : Masse volumique de l'air | [kg/m ³] |
| R_p | : Le rayon de l'hélice | [m] |
| V_w | : La vitesse du vent | [m/s] |
| λ | : vitesse spécifique. | |
| Ω | : vitesse angulaire de rotation de la turbine | [rd/s] |
| E_{pv} | : L'énergie de photon | [eV] |
| h | : Constante de PLANCK | [J/s] |
| f | : Fréquence de l'onde lumineuse | [Hz] |
| C | : la vitesse de propagation de la lumière | [m/s] |
| I_{pv} | : Le courant fourni par la cellule | [A] |
| I_{sc} | : Courant de court-circuit de la cellule | [A] |
| I_d | : Courant dans la diode | [A] |
| I_0 | : Courant de saturation de la diode | [A] |
| I_m | : Courant maximale de la cellule | [A] |
| I_{opt} | : Courant optimale de la cellule | [A] |
| N_s | : Nombre de cellules en série. | |
| N_{ms} | : Nombre de modules en série. | |
| N_p | : Nombre de modules en parallèles. | |
| V_{cell} | : Tension aux bornes de la cellule | [V] |
| V_{oc} | : Tension a circuit-ouvert | [V] |
| V_d | : Tension aux bornes de la diode | [V] |
| V_m | : Tension maximale de la cellule | [V] |
| V_{opt} | : Tension optimale de la cellule | [V] |
| P_{max} | : Puissance maximale disponible | [W] |

| | | |
|--------------------------------|--|--------------------------|
| P_{in} | : Puissance délivrée par le GPV | [W] |
| R_s | : Résistance série par cellule | [Ω] |
| R_{sh} | : Résistance shunt par cellule | [Ω] |
| R_{opt_m} | : La charge optimale du module de base | [Ω] |
| R_{opt_G} | : La charge optimale du champ photovoltaïque | [Ω] |
| q | : Charge d'électron | [C] |
| n | : Facteur d'idéalité de la diode. | |
| k | : Constante de Boltzmann | [J/K] |
| E_g | : L'énergie de gap | [eV] |
| $T_{réf}$ | : Température de référence | [K] |
| T | : température [K]. | |
| G_0 | : L'ensoleillement de référence | [W/m ²] |
| G | : l'ensoleillement | [W/m ²] |
| α | : Coefficient de température | [mA/cm ² /°C] |
| FF | : facteur de forme. | |
| S | : surface de la cellule | [m ²] |
| η | : Rendement de la cellule | [%] |
| η_{mpp} | : Rendement du MPPT | [%] |
| MPPT | : maximum power point tracking. | |
| GPV | : générateur photovoltaïque. | |
| PPM | : point de fonctionnement optimale. | |
| DC-DC | : conversion continu-continu. | |
| P&O | : Perturb and Observe. | |
| Inc.CoN | : Incrément de conductance. | |
| H.C | : Hillclimbing. | |
| D | : rapport cyclique. | |
| T | : période de commutation du convertisseur. | |
| V_0 | : Tension a la sortie du convertisseur | [V] |
| V_{in} | : Tension a l'entrée du convertisseur | [V] |
| I_0 | : Courant a la sortie du convertisseur | [A] |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 01 |
| CHAPITRE I : RESSOURCES ENERGITIQUES RENOUVLABLES | |
| I.1 Introduction | 03 |
| I.2 La production de chaleur par les sources renouvelables | 03 |
| I.2.1 Solaire thermique | 03 |
| I.2.2 Biomasse | 04 |
| I.2.3 Géothermie | 05 |
| I.3 La production d'électricité par les énergies renouvelables | 07 |
| I.3.1 Hydraulique | 07 |
| I.3.2 Energie de la mer | 08 |
| I.3.3 Production éolienne | 08 |
| I.3.4 Photovoltaïque | 10 |
| I.5 Transformation de l'énergie du vent et de soleil en électricité | 11 |
| I.5.1 Conversion de l'énergie éolienne | 11 |
| I.5.2 Les différents types d'aérogénérateurs | 12 |
| I.5.3 Avantages et inconvénient de l'énergie éolienne | 13 |
| I.5.3.1 Avantages | 13 |
| I.5.3.2 Inconvénients | 13 |
| I.5.4 Conversion de l'énergie solaire | 14 |
| I.5.5 Avantages et inconvénients de l'énergie PV | 15 |
| I.5.5.1 Avantages | 15 |
| I.5.5.2 Inconvénients | 15 |
| I.6 Les convertisseurs | 16 |
| I.7 La charge | 16 |
| I.8 Conclusion | 16 |
| CHAPITRE II : GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES | |
| II.1 Introduction | 17 |
| II.2 La cellule photovoltaïque | 17 |
| II.2.1 Caractéristique électrique des cellules photovoltaïques | 18 |
| II.2.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque | 20 |

| | |
|---|----|
| II.3 Cellule en silicium | 21 |
| II.4 Modélisation du GPV..... | 21 |
| II.4.1 Influence de l'ensoleillement | 22 |
| II.4.2 Influence de la température | 23 |
| II.2.2 influence des résistances série et shunt sur la caractéristique I-V et P-V | 24 |
| II.5 Les modules photovoltaïque | 24 |
| II.5.1 Le groupement de cellules ou modules en parallèles | 25 |
| II.5.2 Les modules photovoltaïques et les champs de modules | 25 |
| II.6 Protection | 26 |
| II.6.1 Les diodes séries | 26 |
| II.6.2 Les diodes parallèles | 27 |
| II.7 Conclusion | 27 |
| Chapitre III TECHNIQUES DE MAXIMISATION DE LA PUISSANCE | |
| III.1 Introduction | 28 |
| III.2 structures d'étages d'adaptation pour GPV sans isolement galvanique..... | 28 |
| III.2.1 étage d'adaptation abaisseur (buck) | 28 |
| III.2.2 étage d'adaptation survolteur (boost)..... | 30 |
| III.2.3 étage d'adaptation abaisseur/survolteur (cuk)..... | 31 |
| III.3 Couplage directe générateur-charge | 31 |
| III.4 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) | 32 |
| III.5 Classification des techniques (MPPT) | 34 |
| III.5.1 Les premiers types de technique MPPT | 34 |
| III.5.2 Les techniques MPPT à algorithmes performants | 35 |
| III.5.2.1 principes des techniques perturb and observe (P&O)..... | 36 |
| III.5.2.2 MPPT a pas auto-adaptatif..... | 38 |
| III.5.2.3 principes des techniques incréments de conductance (Inc.CoN) | 39 |
| III.5.2.4 principes des techniques hillclimbing (H.C) | 42 |
| III.5.3 Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité..... | 43 |
| III.5.3.1 la technique de la tension de circuit ouvert du générateur | 43 |
| III.5.3.2 la technique de court-circuit..... | 44 |
| III.5.4 la technique de différenciation..... | 44 |
| III.5.5 Les techniques MPPT basées sur le principe de la logique floue..... | 45 |
| III.5.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels | 47 |
| III.6 Cratères d'évaluation d'une technique MPPT..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| III.6.1 Simplicité et Coût | 49 |
| III.6.2 Réponse dynamique | 49 |
| III.6.3 Flexibilité | 50 |
| III.4.4 Compétitive sur une large gamme de puissance..... | 50 |
| III.6 Conclusion | 50 |
| | |
| Chapitre IV : MODULISATION ET SIMULATION DES MPPT : P&O, I.C ET H.C | |
| IV.1 Introduction | 52 |
| IV.2 Convertisseur boost..... | 53 |
| IV.2.1 structure..... | 53 |
| IV.2.2 Valeur moyenne de (V_0) | 53 |
| IV.2.3 Courant en sortie (I_0)..... | 54 |
| IV.3 Détermination du PPM du module BP SX150S..... | 56 |
| IV.4 Modélisation de hacheur sur voltaire (boost) | 57 |
| IV.5 La technique perturb and observe (P&O)..... | 59 |
| IV.6 La technique incrément de conductance (Inc.CoN) | 64 |
| IV.7 La technique hillclimbing (H.C) | 70 |
| IV.8 Comparaison entre trois techniques MPPT (P&O, I.C et H.C) | 74 |
| IV.9 Conclusion | 78 |
| CONCLUSION GENERALE | 79 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 80 |
| ANNEXE A | 84 |
| ANNEXE B | 85 |
| ANNEXE C | 87 |
| ANNEXE D | 90 |

Introduction générale

L'augmentation du Coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes ; ce sont les énergies de l'avenir. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie photovoltaïque. Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix du générateur qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Pour surmonter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies :

- Augmente le rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques.
- Maximise la puissance délivrée par le générateur [1].

Objectif du travail

Le présent travail est basé sur l'étude et la comparaison entre trois techniques de maximisation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (Perturbation et Observation, Incrémentation de Conductance et Hill Climbing), pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres.

Structure de la mémoire

Le premier chapitre traite les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, avec focalisations sur la production d'électricité photovoltaïque.

Le deuxième chapitre expose un rappel sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différents facteurs pouvant affecter son fonctionnement. L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et en parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire possède un point de puissance maximale.

Le troisième chapitre explique le contexte et la problématique engendrée par l'optimisation de la production d'énergie d'un générateur photovoltaïque GPV, ces principales caractéristiques ainsi

que les avantages et les inconvénients des divers modes de recherche du point de puissance maximale PPM présent dans la littérature.

En fin dans le quatrième chapitre un modèle de recherche de point de puissance maximal d'un générateur photovoltaïque basé sur un hacheur élévateur est présenté dans l'environnement MATLAB/ SIMULINK. La simulation du modèle avec les algorithmes des trois techniques perturbations et observation (P&O), incrémentation de conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) sous les mêmes conditions météorologique et la comparaison des résultats obtenus. En conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus.

chapitre I

Ressources énergétiques renouvelables

I.1 Introduction

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et Géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les Réserves sont mal réparties et épuisables. de plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès.

Même au sein de l'europe occidentale de tels "sites isolés" ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs Titres :

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- elles sont inépuisables ;
- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- elles offrent une importante indépendance énergétique.

Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes [2].

I.2 La production de chaleur par les sources renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables permettent d'abord de produire de l'énergie thermique, ainsi le bois, le biogaz, le soleil et la géothermie.

I.2.1 solaire thermique

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage (Figure 1.1). La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couvertes de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines).

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement. La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [3].

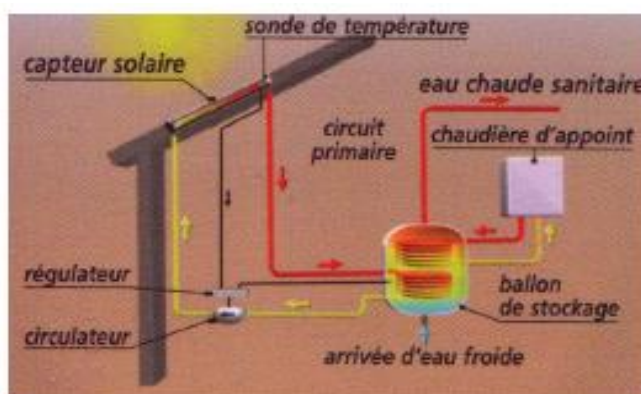


Figure 1.1. Principe du capteur solaire [3]

I.2.2 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Les différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz.

Le bois énergie est une ressource très abondante (Figure 1.2). C'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois: les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes, ...Etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW [4].

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du Baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, Tournesol...) offrent des Avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus

d'épuration injecté dans les réseaux de distribution. Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours, la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. en 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir [5].

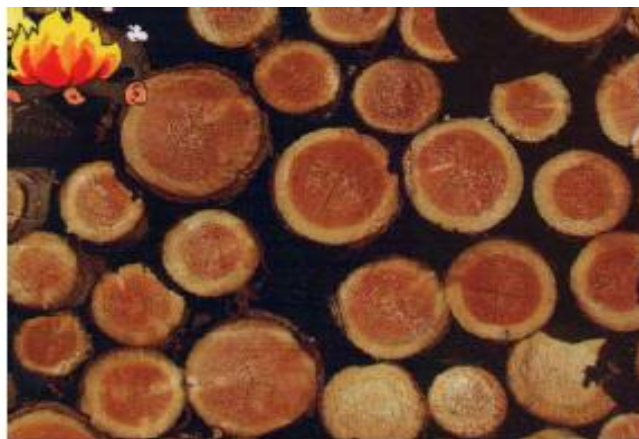


Figure 1.2. Le bois source de l'énergie verte [3]

I.2.3 Géothermie

La température du sous-sol s'élève avec la profondeur. C'est ce qu'on appelle le « Gradient géothermique ». En moyenne, on gagne 3 °C de plus tous les 100 m. ainsi, la température de l'eau située dans une roche-réservoir à 1500 m de profondeur peut atteindre 60 à 70 °C. Le principe de la géothermie consiste à pomper ces eaux chaudes afin de les utiliser pour le chauffage ou, si elles sont suffisamment chaudes, pour produire de l'électricité. L'énergie géothermique est une énergie renouvelable, à condition de gérer l'extraction de l'eau prudemment, car elle se réchauffe très lentement dans le sous-sol. Un complexe géothermique comporte deux forages, l'un d'où l'on extrait l'eau chaude et l'autre où on la réinjecte après récupération de la chaleur (Figure 1.3).

Quand la température de l'eau est comprise entre 30 et 100 °C, on parle de géothermie basse énergie. La profondeur des réservoirs est comprise entre 1000 et 2500 m. l'eau est utilisée pour le chauffage, mais il y a souvent des problèmes de corrosion. Pour une température comprise entre 100 et 180 °C, on parle de géothermie moyenne énergie. Ces eaux proviennent des réservoirs à grande profondeur (2500 à 4000m) ou bien moins profonds mais dans des régions volcaniques où le gradient géothermique est très fort. On les utilise pour produire de l'électricité. Quand la température de l'eau est comprise entre 180 et 300 °C, on parle alors de géothermie Haute énergie. L'eau est utilisée sous forme de vapeur pour produire de l'électricité. On rencontre de telles températures dans les régions

volcaniques (Islande, Philippines, Nouvelle Zélande... sont des pays qui utilisent abondamment la géothermie haute énergie pour leur production électrique).

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre dont les températures varient de 1000 °C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [4].

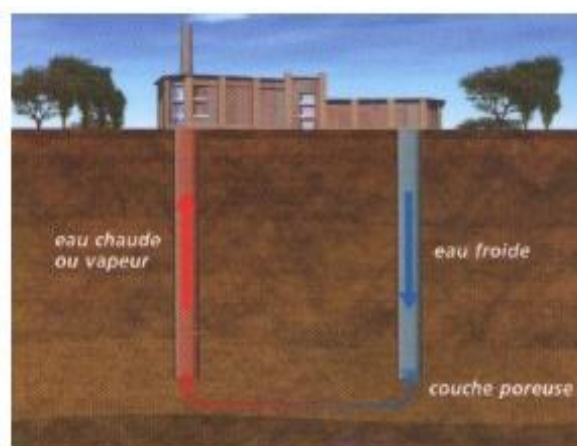


Figure 1.3. Principe de la géothermie [3]

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

- La haute (>180°C),
- Moyenne (>100°C),
- Basse (>30°C) et très basse énergie.

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages: chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... etc. La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps [3].

I.3 La production d'électricité par les énergies renouvelables

Les sources d'énergie disponibles dans notre environnement proche et permettant de produire de l'électricité est : l'eau, le soleil et le vent.

I.3.1 Hydraulique

L'expression, « l'énergie est le mouvement » s'applique aux précipitations. L'eau des océans, évaporée par le soleil et transportée jusqu'à la source des cours d'eau sous forme de pluie, acquiert une énergie potentielle, qu'elle dissipe peu à peu en retournant à la mer. C'est de l'énergie potentielle contenue dans une chute d'eau que profite une centrale hydroélectrique, pour la transformer en électricité. L'énergie d'une chute d'eau est proportionnelle à sa hauteur et à son débit. Une centrale hydroélectrique (figure 1.4) comporte en général trois éléments : un barrage pour créer une chute d'eau importante, un canal de dérivation (conduite, galerie souterraine, ou canal à ciel ouvert) qui prélève l'eau nécessaire au fonctionnement de la centrale et l'usine où la chute d'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur d'électricité. Outre produire de l'électricité, un barrage permet aussi de réguler le cours d'eau et d'offrir un réservoir d'eau pour l'irrigation ou, parfois même, pour les sports nautiques. La sécurité d'un barrage doit être maximale : il doit résister aux crues du cours d'eau, aux séismes, aux infiltrations. Son impact écologique sur la vie aquatique en amont et en aval doit être étudié et limité autant que possible. L'hydroélectricité est une énergie renouvelable et non Polluante.

Au niveau mondial, le L'hydroélectricité est une énergie renouvelable et non polluante et on pense que le potentiel restant est cinq fois supérieur au potentiel exploité ; mais avec de grandes disparités géographiques : ainsi, l'Europe et l'Amérique du Nord ont exploité plus de la moitié de leur potentiel (et une grande partie pour la France). Le frein principal au développement de l'hydroélectricité est le coût financier, écologique et humain (personnes déplacées des zones inondées) des grands barrages.

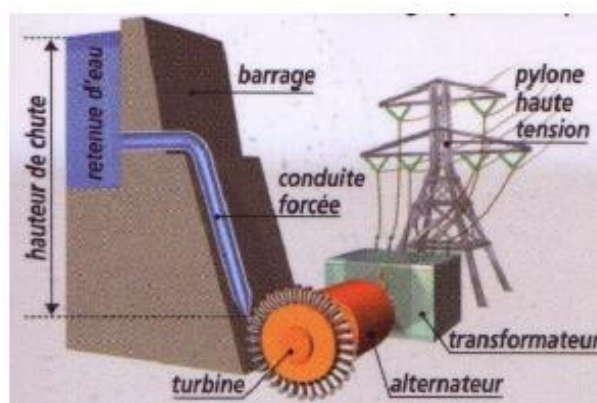


Figure 1.4. Principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique [3]

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «Stockable». Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage [4].

I.3.2 Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

Une autre façon de la récupérer de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada. L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [3].

I.3.3 Production éolienne

Les grandes éoliennes commencent à devenir habituelles dans les paysages des régions où le vent souffle souvent (Figure 1.5) et elles le deviendront sans doute de plus en plus, car l'électricité éolienne est particulièrement propre : pas de gaz à effet de serre, entièrement renouvelable. Leurs seuls inconvénients sont la transformation des paysages et un bruit léger qui empêche de pouvoir les construire trop près des habitations. Les éoliennes sont des machines très hautes (le mât mesure de 80 à 100 m pour les plus puissantes), parce que le vent est plus régulier et plus fort à quelques dizaines de mètres d'altitude qu'en surface. L'hélice, en général munie de trois pales, est généralement de grandes dimensions (jusqu'à 110 m de diamètre), parce que la puissance d'une

éolienne est proportionnelle à la surface balayée par les pales. La nacelle, située à l'arrière de l'hélice et du nez de l'éolienne, abrite les équipements qui produisent de l'électricité. Les éoliennes ont besoin d'une vitesse minimale du vent de 10 à 15km/h pour pouvoir fonctionner. Au delà de 90 km/h, elles sont arrêtées pour ne pas subir trop d'efforts qui les useraient prématurément.

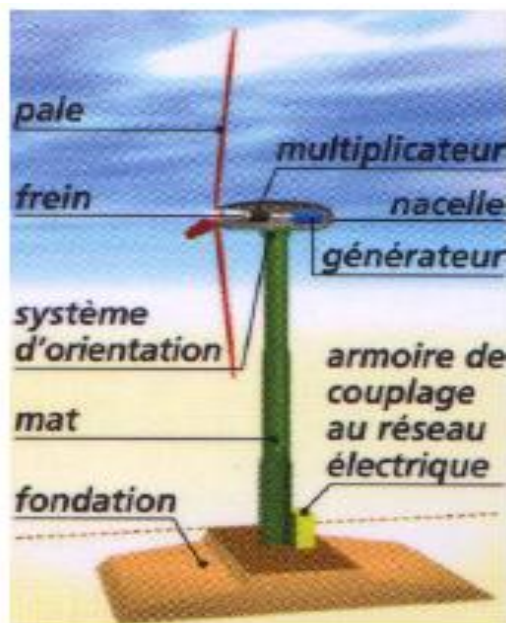


Figure 1.5. Principe d'une éolienne [3]

Aujourd'hui, l'électricité éolienne est plus chère que celle produite par des centrales thermiques à charbon ou nucléaires. Elle doit donc être subventionnée. Mais cela pourrait rapidement changer dans les années à venir. Certains pays ont choisi d'encourager fortement la filière éolienne, comme le Danemark, où près du quart de l'électricité produite provient du parc éolien. A l'avenir, ces espaces couverts de dizaines d'éoliennes (on les appelle des « fermes éoliennes ») devraient se multiplier, sur des sites à terre et sans doute aussi en mer (îles artificielles).

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde [3].

I.3.4 Photovoltaïque

Le soleil est à l'origine de toutes les formes d'énergie présentes sur terre (à l'exception de l'énergie nucléaire). Le rayonnement solaire apporte à la terre de la chaleur et de la lumière. Cette énergie peut être captée de trois façons : en utilisant directement la chaleur (chauffage solaire direct, capteurs thermiques), en transformant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en transformant la chaleur en électricité (centrales électriques solaires).

L'architecture solaire passive consiste à construire des bâtiments en fonction des effets bénéfiques du soleil. Les systèmes actifs de captation de la chaleur solaire sont des capteurs non vitrés (de gros tubes noirs utilisés pour le chauffage des piscines) ou vitrés (caissons où la chaleur s'accumule avant d'être transportée par de l'air ou de l'eau), qu'on utilise pour l'eau chaude ou le chauffage des bâtiments. Les plus performants de ces capteurs sont ceux qui fonctionnent sous vides : ils permettent d'atteindre de hautes températures et sont adaptés aux applications industrielles.

Les capteurs photovoltaïques sont des panneaux dans lesquels sont intégrées de nombreuses Cellules appelées photopiles, où les photons lumineux produisent de l'électricité en percutant les atomes de silicium. Suivant l'affinement du silicium, le rendement varie de 5 à 16 %. Les cellules à meilleur rendement sont plus coûteuses. L'électricité photovoltaïque est chère, c'est pourquoi elle est subventionnée (en France, et aux états unis obligation de rachat par l'état à un tarif élevé, indication fiscale).

Les centrales solaires permettent de concentrer les rayons solaires pour obtenir des températures très élevées (500 à 800 °C suivant le type de centrale) dont on se sert pour produire de l'électricité. Elle occupe beaucoup d'espace et doivent être construites dans les régions très ensoleillées et où l'air est pur.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du Soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à

La technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques

dités MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne. Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (Télécommunication, balises maritimes, ... etc.)[2].

I.5 Transformation de l'énergie du vent et du soleil en électricité

I.5.1 Conversion de l'énergie éolienne

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * \pi * R_p^2 * V_w^3 \quad (1.1)$$

Avec :

C_p : coefficient de puissance de la turbine (il caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne),

ρ : Masse volumique de l'air (1.225kg/m³ au niveau de la mer)

R_p : le rayon de l'hélice, et V_w la vitesse du vent. On introduit une variable sans dimension λ appelée vitesse spécifique pour caractériser les performances aérodynamiques d'une éolienne :

$$\lambda = \frac{R_p * \Omega}{V_w} \quad (1.2)$$

Avec

Ω : vitesse angulaire de rotation de la turbine.

R_p : Rayon de la turbine. La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (1.3)$$

La (figure 1.6) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pales. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, λ_{opte} , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ ne sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale [2] [6].

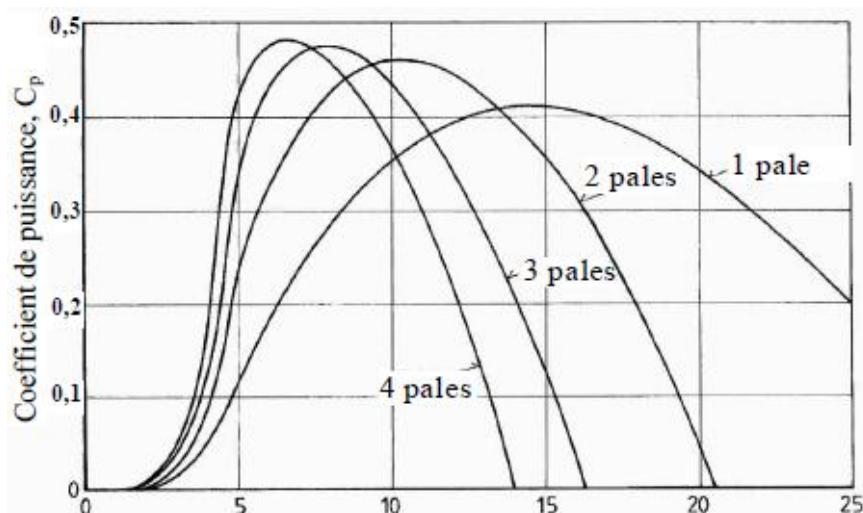


Figure 1.6. Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation Normalisée λ [2]

I.5.2 Les différents types d'aérogénérateur

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- les turbines éoliennes à axe vertical.



Figure 1.7. Technologies d'éoliennes [2]

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ (Figure 1.8).

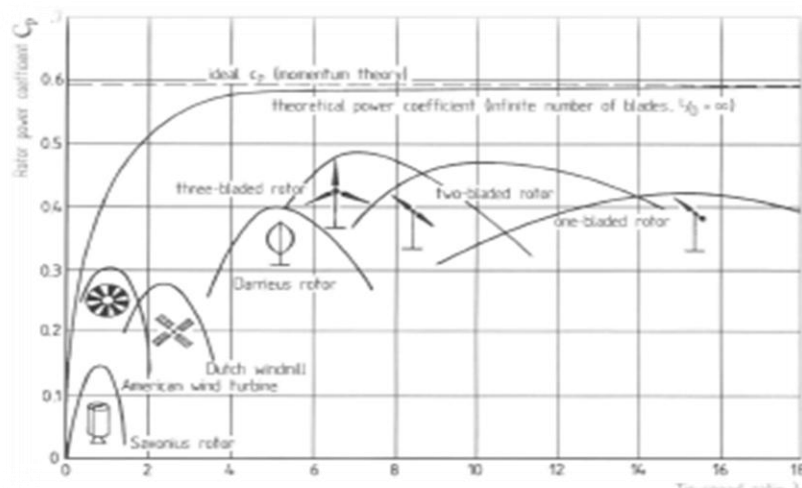


Figure 1.8. Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour Différents types de turbines [2]

I.5.3 Avenages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tout système de production d'énergie éolienne à ses avantages et ses inconvénients

I.5.3.1 Avantage

- énergie propre non polluante
- elle peut-être complémentaire aux filières traditionnelles
- elle ne consomme pas de combustibles
- abondante
- elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple : agricoles
- bas impact environnemental
- ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et ventées
- ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité
- temps de réalisation d'une centrale éolienne minimum
- les ont une longue durée de vie
- on élimine les frais et les risques de transport associé aux énergies fossiles [7].

I.5.3.2 Inconvénients

- instable, elle est sujette à des variations du vent et a des périodes de calme
- difficulté de stockage de l'énergie
- les équipements sont chers et produisent du bruit

- impact visuel (effets d'ombre dus au mouvement et réflexions intermittentes)
- interférences électromagnétiques [7].

I.5.4 Conversion de l'énergie solaire

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur (figure 1.9)

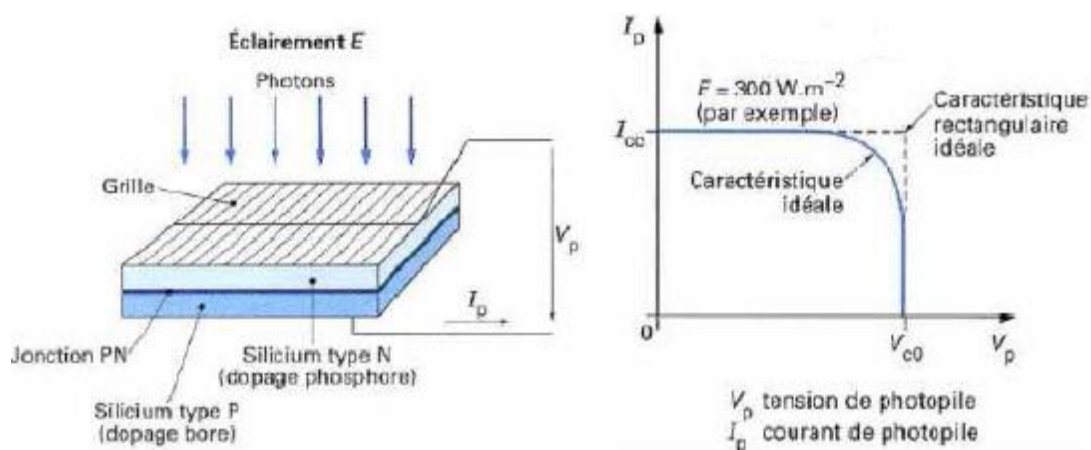


Figure 1.9. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [6]

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série Et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque dans le cas d'installations autonomes figure 1.10, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif. Le système peut également être connecté au réseau [2].

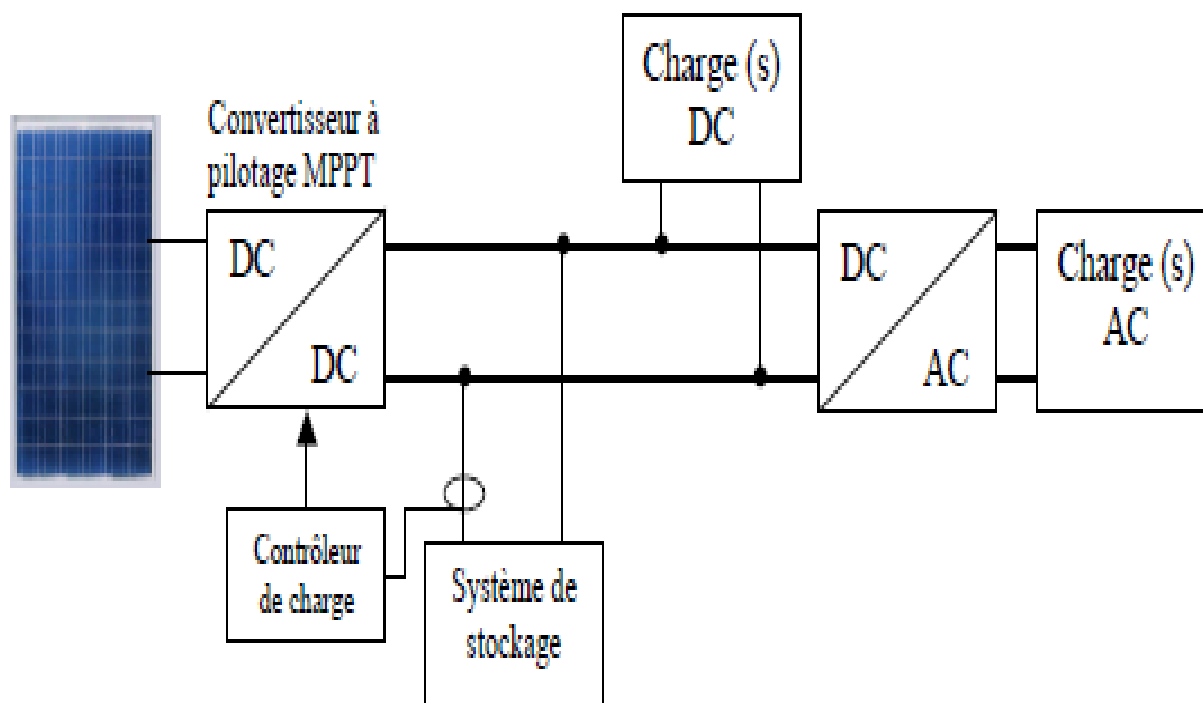


Figure 1.10. Installation photovoltaïque autonome

I.5.5 Avantages et inconvénients de l'énergie PV

Tout système de production d'énergie photovoltaïque a ses avantages et ses inconvénients

I.5.5 .1 Avantages

- d'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.
- le cout de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions

➤ I.5.5 .2 Inconvénients

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

- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15%, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport au générateur diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [8].

I.6 Les convertisseurs

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs [4].

I.7 La charge

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peuvent être de type continu comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique, ce cas nécessite un onduleur [7].

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes des énergies renouvelables. Tous les éléments ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes éoliens et photovoltaïques. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients des systèmes éoliens et PV.

chapitre II

Générateurs photovoltaïques

II.1 Introduction

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules Photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique [2].

Dans ce chapitre on développe un modèle mathématique du générateur PV pour prévoir les performances, conceptuelles et énergétiques, des systèmes photovoltaïque.

II.2 La cellule photovoltaïque

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet Photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Un élément essentiel dans la conversion photovoltaïque est l'énergie transmise par les photons. On définit un rayon de lumière solaire comme la superposition d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. C'est aussi un faisceau de photons dont l'énergie est liée à la longueur d'onde par la constante de PLANCK

$$E_{ph} = h * f \quad (2.1)$$

- E_{ph} : L'énergie de photon
- h : constante de PLANCK = $(6.62 \times 10^{-34} J/s)$
- f : la fréquence correspondant a la longueur d'onde λ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

- c : étant la vitesse de propagation de la lumière (3108 m/s).

Une cellule est donc constituée par un semi-conducteur qui joue le rôle d'absorbeur et de Collecteur (figure 2.1). La description quantique de la conductivité électrique dans les semi-conducteurs met en jeu un certain nombre de phénomènes de la physique du solide [9] [10].

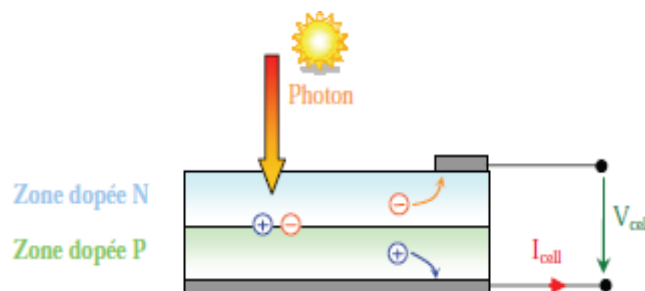


Figure 2.1. Schéma de principe de la conversion photovoltaïque [11].

II.2.1 Caractéristique électrique des cellules photovoltaïques

Le schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque est donné par la (figure 2.2) [4] [8] [12] [13]. Il fait apparaître;

- le générateur de courant dont la valeur I_{sc} est proportionnel à l'éclairement,
- la diode dont la tension directe est de l'ordre de 0,6 volts,
- une résistance série R_s , représentant les diverses résistances de contact et de connexions,

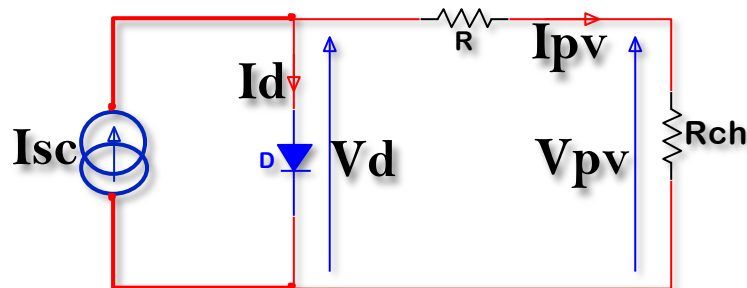


Figure 2.2. Circuit équivalent utilisé dans les simulations.

$$I_{pv} = I_{sc} - I_d \quad (2.3)$$

- I_{pv} : le courant fourni par la cellule.
- I_{sc} : le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, (Courant par photon)
- I_d : courant dans la diode.

La tension aux bornes de la diode.

$$V_d = V_{pv} + R_s * I_{pv} \quad (2.4)$$

Le courant de diode I_d est donné par l'équation de diode du Schrockley :

$$I_d = I_0 * \left[e^{q \left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{nKT} \right)} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Le remplacement d' I_d l'équation (2.5) dans l'équation (2.3) dans la caractéristique courant-tension de la cellule

$$I_{pv} = I_{sc} + I_0 * \left[e^{q \left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{nKT} \right)} - 1 \right] \quad (2.6)$$

$$V_{pv} = \frac{nKT}{q} \ln \left[\frac{I_{pv} - I_{sc}}{I_0} + 1 \right] - R_s * I_{pv} \quad (2.7)$$

- I_0 : courant de saturation de la diode (A).
 - q : la charge d'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$).
 - V_{pv} : la tension aux bornes de la cellule (V).
 - R_s : la résistance série par cellule (Ω).
 - n : le facteur d'idéalité de diode il prend une valeur entre un et deux ($n=1$ pour la diode idéale).
 - k : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$).
 - T : la température de la jonction en kelvin(k).
- le courant de saturation de la diode (I_0) est constant sous la température constante.

Dans le cas de circuit ouvert dans l'équation (2-6)

$$0 = I_{sc} - I_0 \left(e^{q \frac{V_{oc}}{nKT}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{q \frac{V_{oc}}{nKT}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(e^{q \frac{V_{oc}}{nKT}} - 1 \right)} \quad (2.10)$$

La valeur de I_{sc} est connue dans les conditions d'essai standard ($G_0=1Kw/m^2$ et $T_{ref} = 25^\circ C$)
Le courant de court-circuit est proportionnel à l'ensoleillement. À l'ensoleillement donné(G) est :

$$I_{sc_G} = \left[\frac{G}{G_0} \right] * I_{sc_G0} \quad (2.11)$$

D'abord on calcule le courant de court-circuit I_{sc_T} à une température donnée de cellule (T).

$$I_{sc_T} = I_{sc_Tref} * [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (2.12)$$

- I_{sc_Tref} : est donné dans datasheet (mesuré sous l'ensoleillement $1000W/m^2$).
- T_{ref} : est la température de référence de la cellule en kelvin ($298k=25^\circ C$).
- α : coefficient de température.

Le courant de saturation de la diode (I_0) à la température de référence T_{ref} est donné par l'équation (2.9). Le courant (I_0) à la température T est calculé par l'équation suivante

$$I_{0_T} = I_{0_Tref} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 e^{-\frac{qEg}{nK} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right]} \quad (2.13)$$

- n : facteur d'idéalité de la diode.
- E_g : l'énergie de gap (1.12eV pour Si).
- q : la charge d'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$).
- k : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$).

La résistance série R_s est dérivé en différenciant l'équation (2-6) et puis en la réarrangeant en termes de R_s

$$I_{pv} = I_{sc} + I_0 * \left(e^{q \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$dI = 0 - I_0 * q * \left[\frac{dV_{pv} + R_s dI_{pv}}{nKT} \right] * \left(e^{q \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nKT} \right)} \right) \quad (2.14)$$

$$R_s = - \left(\frac{dV}{dI} \right) - \frac{\frac{nKT}{q}}{I_0 e^{\frac{qV_{oc}}{nKT}}} \quad (2.15)$$

II.2.2 Paramètre d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

-courant de court- circuit I_{sc} .

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle.

-tension de circuit ouvert V_{oc}

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nulle.

-facteur de forme FF

Le rapport
$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2.16)$$

Valeur maximale de la puissance pouvant être extraite, au produit $I_{sc} * V_{oc}$

-le rendement η

Le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement incident sur la surface S de la cellule.

$$\eta = \frac{I_m * V_m}{G * S} \quad (2.17)$$

Pour une cellule du commerce, le facteur de forme est de l'ordre de 70% et le rendement de l'ordre de 12 à 14% l'examen des courbes des figures montre que cette résistance influence très vite sur la puissance maximale disponible.

-Le watt-crête (W_c)

Est l'unité servant à définir la puissance disponible aux bornes d'une cellule ou d'un assemblage de cellules (module champ), sous l'éclairement de référence (1 kW m^{-2} et $T=25^\circ\text{C}$).

Le W_c a en fait les dimensions d'une surface puisque étant le rapport d'une puissance électrique en W a un éclairement en $W \text{ m}^{-2}$ [8] [14] [15].

II.3 Cellules en silicium

On peut voir dans le (tableau 2.1) un récapitulatif des différentes filières silicium présentent actuellement sur le marché. Ce bilan rappelle les avantages et les inconvénients de chacune des technologies qui doivent être pris en compte dans la réalisation d'un projet photovoltaïque.

| Technologie | Rendement Typique | Influence Température | Taux de dégradation | Prix d'un module (2008) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| Monocristallin | 12 à 16% | -0.442% par °C | -0.38% par an | 3.13 € / |
| Poly-cristallin | 11 à 14% | -0.416% par °C | -0.35% par an | 2.95 € / W |
| Amorphe | 6 à 7% | +0.175 % par °C | -1.15% par an | 2.35 € / W |

Tableau 2.1. Performance de la technologie Silicium simple jonction [11]

II.4 Modélisation du GPV

La modélisation du générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab/Simulink est basée sur les équations du schéma équivalent de la cellule solaire dépendant des paramètres éclairement et la température. Le modèle représenté sur la (figure 2.3) est conçu pour N cellule en série, éclairement variable, température variable et résistance série variable.

Les résultats de simulation du modèle du GPV sont montrés sur la (figure 2.4). Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sont obtenues pour une cellule du générateur photovoltaïque dans les conditions atmosphériques standards.

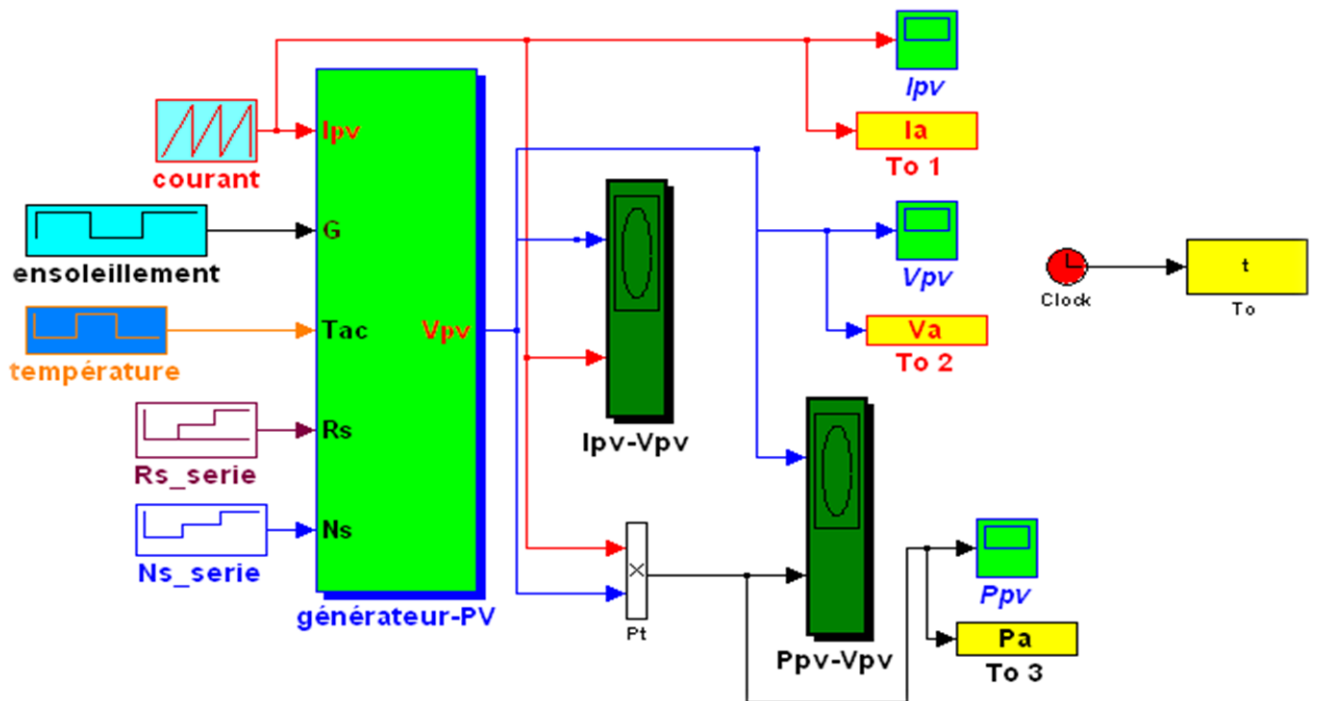


Figure 2.3. Modèle du générateur photovoltaïque utilisant SIMULINK

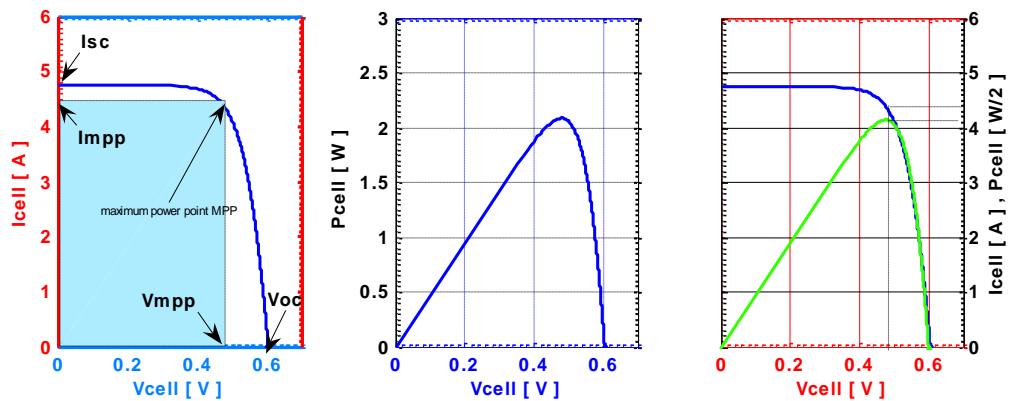


Figure 2.4. Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule
($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

II.4.1 influence de l'ensoleillement

La caractéristique I-V donnée sur la (figure 2.4) est obtenue pour l'éclairement de référence 1kwm^{-2} et a une température de 25°C . L'éclairement et la température de cellule vont modifier cette

caractéristique, non dans sa forme générale, mais pour les valeurs, I_{SC} , V_{CO} , et le produit $I_m * V_m$ (Figure 2.5).

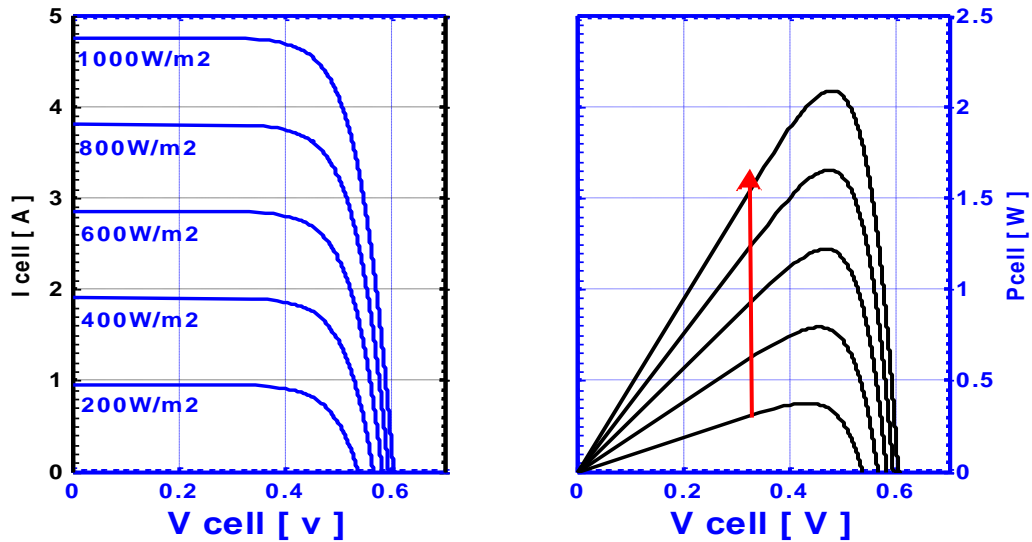


Figure 2.5. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule($T=25^{\circ}C$).

II.4.2 Influence de la température

La température a un effet très important sur la tension de circuit ouvert et un effet non remarquable sur le courant de court-circuit de la cellule. Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0.025mA/cm^2/^{\circ}C$ alors que la tension décroît de $2.2mV/^{\circ}C$ cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0.4\%/^{\circ}C$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque (Figure 2.6). L'augmentation de la température de travail se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible.

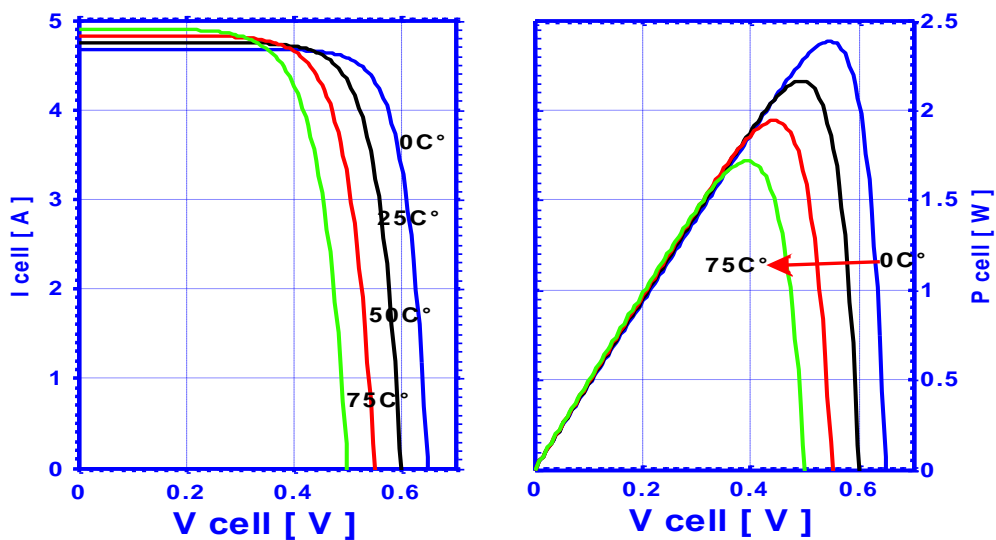


Figure 2.6. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule ($G=1KWm^{-2}$).

II.4.3 Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique I-V et P-V

Les résistances série et shunt sont modifier la caractéristique I-V. La (figure 2.7) montre l'influence de la résistance série la tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristique se déforme très rapidement. La (figure 2.8) présente l'influence de la résistance shunt la tension de circuit ouvert est diminuée et la zone basse tentions présente une pente.

Il faut noter que ces résistances série et shunt sont liées a la technologie d'élaboration des jonctions et des électrodes.il faut minimiser R_s et faire en sorte que R_{sh} ne soit pas trop faible [16] [12].

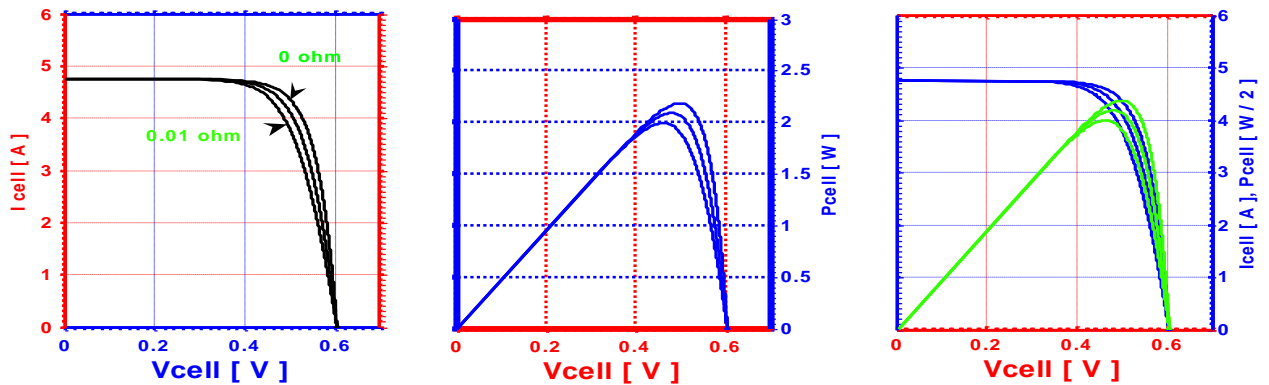


Figure 2.7. Influence de R_s sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule ($G=1\text{KWm}^{-2}$ et $T=25\text{C}^\circ$).

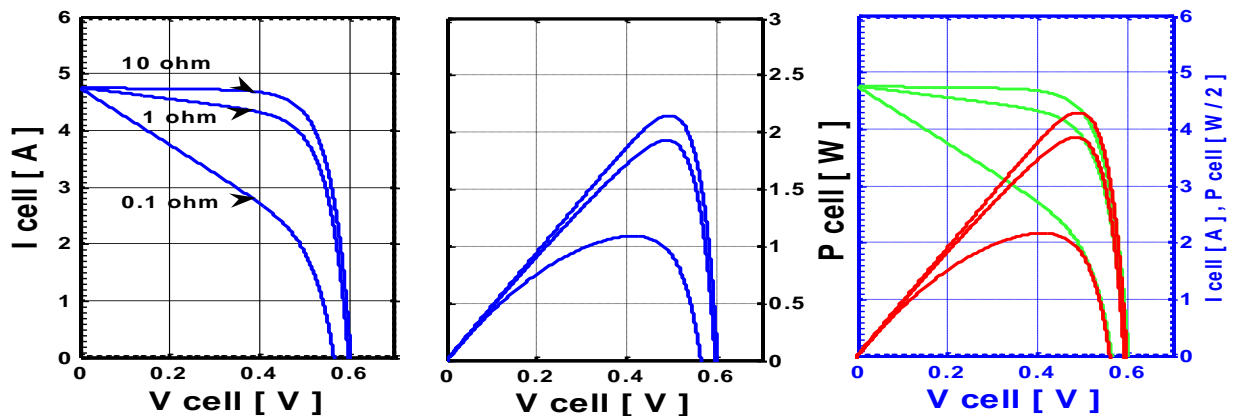


Figure 2.8. Influence de R_{sh} sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule ($G=1\text{KWm}^{-2}$ et $T=25\text{C}^\circ$).

II.5 Les modules photovoltaïques

Dans la majorité des cas associer en série un certain nombre de cellules pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter. C'est ce qui est réalisé dans un module

Photovoltaïque, le groupement série délivrera le courant $N_p I_{cell}$ sous la tension $N_s V_{cell}$, l'impédance optimale pour le groupement série est N_s fois plus grande que l'impédance optimale pour une cellule de base. La (figure 2.9) montre les caractéristiques I-V et P-V de l'association de N cellule en série

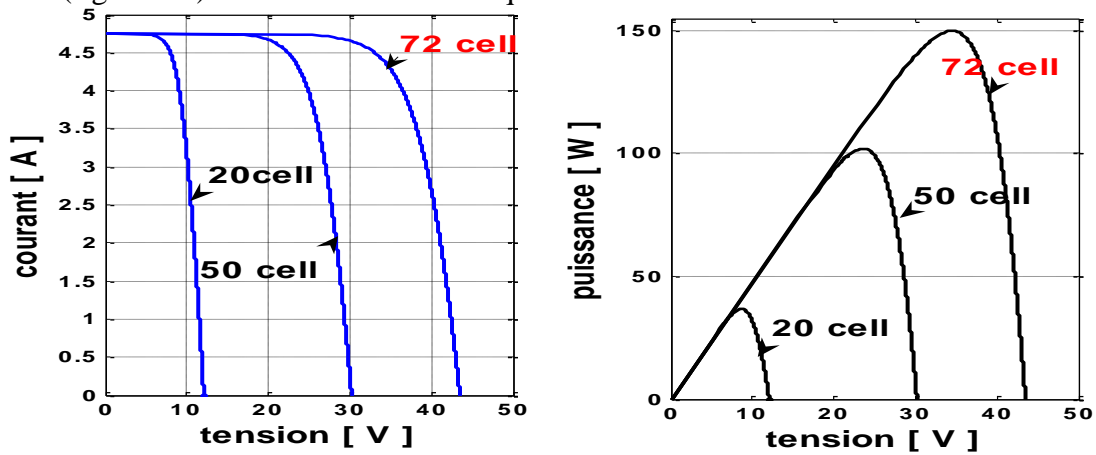


Figure 2.9. Groupement de cellules ou module (identique) en série ($G=1kW/m^2$ et $T=25^{\circ}C$).

II.5.1 Le groupement de cellules ou modules en parallèles

On augmente le courant fourni à la charge en disposant en parallèle plusieurs modules photovoltaïques. La tension générée étant la même pour tous les modules, il est nécessaire de connecter en parallèle des modules de caractéristiques électriques identiques. La caractéristique électrique résultante est obtenue en additionnant point par point les courants des modules constituant le groupement en parallèle pour des tensions communes (figure 2.10).

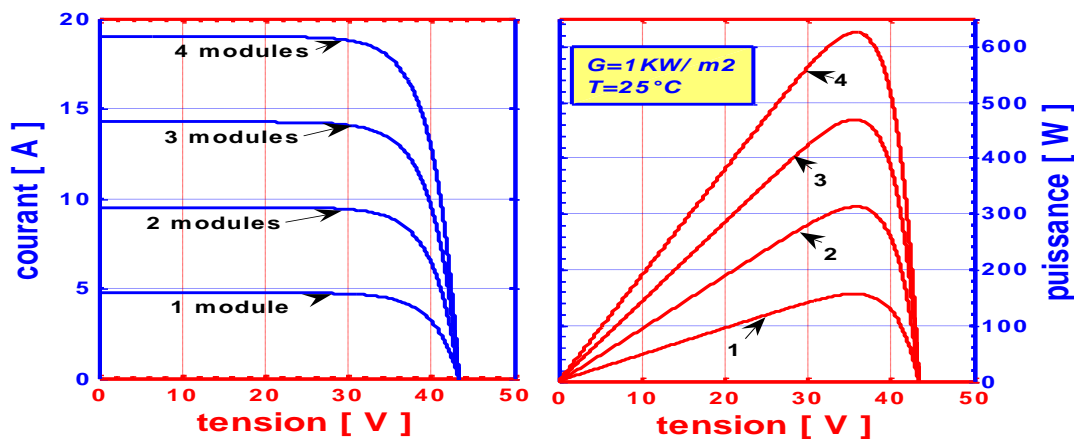


Figure 2.10. Groupement du module (identique) en parallèle.

II.5.2 Les modules photovoltaïques et les champs de modules

Le fournisseur de photopiles réalise des modules constitués d'un certain nombre de cellule placée en série. En fonction des besoins (tension-puissance), on réalise le générateur photovoltaïque

par association série-parallèle d'un certain nombre de modules (figure 2.11). La caractéristique globale du générateur présente une allure analogue à celle d'une photopile élémentaire. Le groupement de N_{ms} module en série dans une branche, et N_{bp} branches en parallèle. Si P_m est la puissance crête disponible sur un module, la puissance disponible aux bornes de ces panneaux photovoltaïques sera

$$P = N_{ms} * N_{bp} * P_m \quad (2.18)$$

Cette puissance pourra être obtenue sous les conditions de référence (1kWm^{-2} et 25°C) sur la charge optimale du groupement R_{optg} telle que :

$$R_{optg} = \left(\frac{N_{ms}}{N_{bp}} \right) * R_{optm} \quad (2.19)$$

Ou R_{optm} est la charge optimale du module de base dans les mêmes conditions. Dans la pratique, les modules photovoltaïques d'un panneau ne sont jamais identiques d'un part, et d'autre part des déséquilibres peuvent survenir, générés par certaines cellules [16].

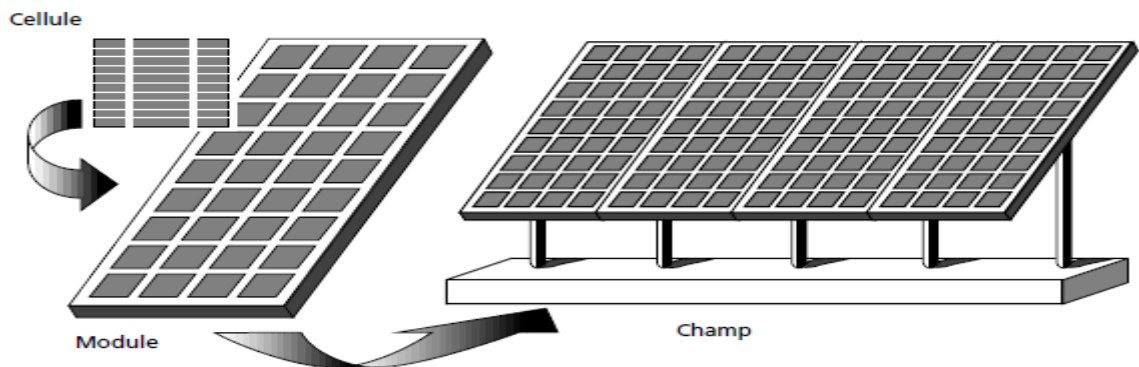


Figure 2.11. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [17]

II.6 Protection

Tout choc électrique doit être évité aux cellules, qui sont des éléments fragiles. En particulier, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant, les modules doivent donc être protégés par des diodes.

II.6.1 Les diodes séries

Les diodes de blocage ou diodes série (figure 2.12) sont placées en série avec un module ou une branche de modules câblés en série afin d'empêcher tout courant électrique de retourner vers les modules. Pour les systèmes solaires connectés à une batterie, la diode de blocage empêche la

circulation d'un courant inverse dans le sens batterie vers panneau durant la nuit. La chute de tension aux bornes de la diode dépend du type utilisé.

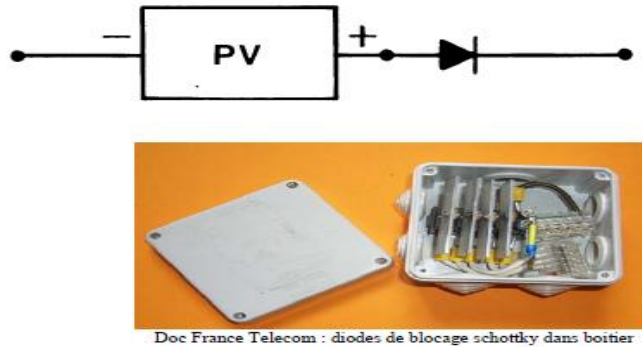


Figure 2.12 les diodes de blocage ou diode séries

II.6.2 Les diodes parallèles

Les diodes by-pass (figure 2.13) sont utilisées pour empêcher les phénomènes de point chaud et pour minimiser les pertes dans une branche série dans le cas où une cellule, un groupe de cellules ou un module se trouve en position circuit ouvert (coupure ou ombre portée).

La diode by-pass est appelée diode shunt car elle shunte les cellules correspondant à la partie non éclairée les autres cellules continuent à produire l'énergie correspondant à la partie éclairée du module. En condition normale de fonctionnement les diodes shunt ne conduisent aucun courant.

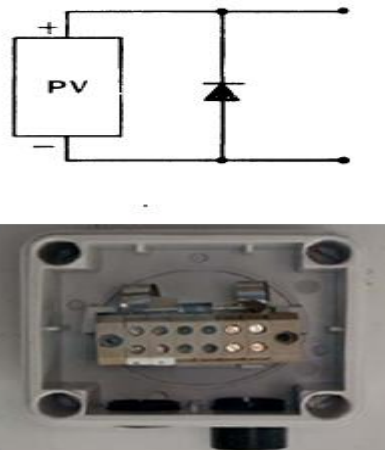


Figure 2.13 Diode by-pass

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques des éléments constitutifs d'un générateur photovoltaïque (GPV).

Nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Chapitre III

Techniques de maximisation de la puissance

III.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs connus sous le nom de MPPT (maximum power point tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

III.2 Structures d'étages d'adaptation pour GPV sans isolement galvanique

Pour connaître les performances des étages d'adaptation de GPV de type Convertisseur DC basés sur différentes structures sans isolement galvanique (buck, boost et Cuk), nous avons effectué des études systématiques. Pour tous les essais, nous avons utilisé un générateur PV, un ou plusieurs panneaux PV et comme charge, des batteries au plomb de tension nominale 12V, 24V puis 48V. Les convertisseurs statiques fonctionnent à fréquence de découpage fixe en mode MLI analogique (Modulateur à Largeur d'Impulsion).

III.2.1 Etage d'adaptation abaisseur (buck)

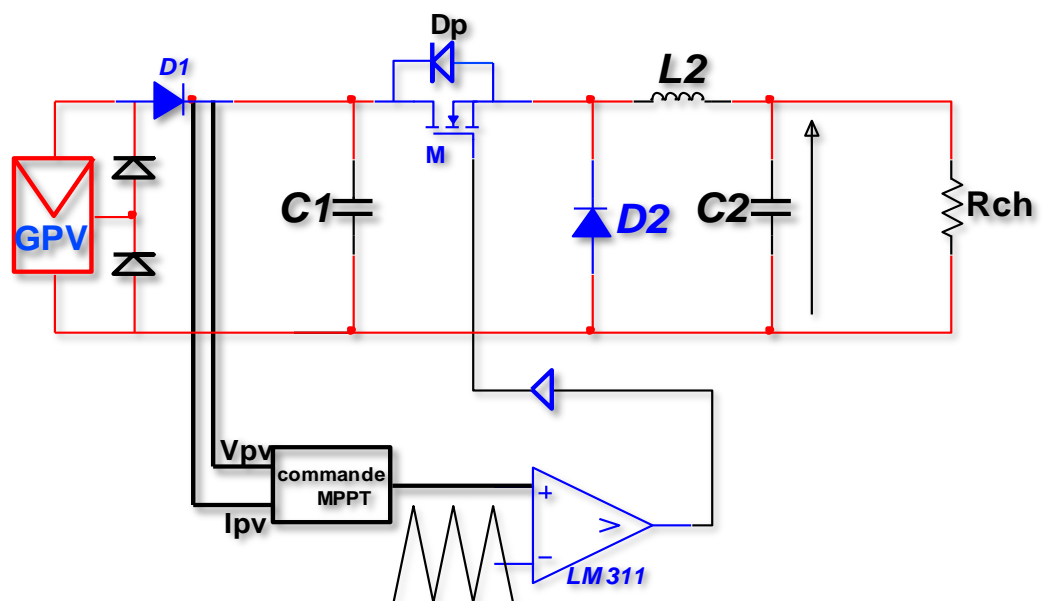


Figure 3.1. Schéma de principe d'un étage d'adaptation abaisseur d'un GPV avec fonction MPPT.

La (figure 3.1) montre un GPV avec son étage d'adaptation constitué d'un convertisseur abaisseur (buck). Pour assurer la protection du GPV, nous devons inclure la diode anti-retour D1, celle-ci empêchant la batterie de se décharger pendant la nuit.

Par la commande MLI, le convertisseur buck génère des courants pulsés sur le port d'entrée. Afin d'éviter que les courants pulsés affectent le GPV et pour assurer que le courant délivré par le GPV soit continu, il est nécessaire de placer un condensateur de filtrage C1 entre le GPV et le convertisseur. Un compromis doit être fait sur la valeur de ce condensateur devant assurer d'un côté un filtrage suffisant et, de l'autre, ne devant pas avoir une valeur trop élevée pour ne pas ralentir trop la réponse du système.

Pour éliminer complètement la présence des courants pulsés liés au fonctionnement du convertisseur statique et pouvant perturber le GPV, nous pouvons insérer un filtre de deuxième ordre de type LC à l'entrée du buck.

Pour que le buck puisse transférer de la puissance électrique instantanément de l'entrée vers la sortie, la tension de sortie doit être inférieure à la tension d'entrée ou, de manière équivalente, le courant de sortie doit être supérieur au courant d'entrée (condition du dévolteur). Nous pouvons trouver une situation où le convertisseur ne transfère pas de puissance quand, par exemple, une des cellules du GPV est complètement ombrée. Alors, la puissance fournie par le GPV sera nulle malgré la mise en conduction de la diode by-pass du sous réseau de cellules auquel appartient la diode ombrée. En effet, la mise en conduction de cette diode donne lieu au fonctionnement de la moitié du module restant sans défaut pouvant fournir jusqu'à la moitié de la puissance nominale d'un panneau, mais comme la tension de ce sous-réseau sera inférieure à la tension de la batterie, le convertisseur ne transférera pas de puissance à la batterie. Alors, le circuit de commande MPPT peut avoir des problèmes de recherche de point optimal quand la tension optimale V_{opt} correspondante est inférieure à la tension de la batterie. Ceci peut arriver quand la batterie est en fin de charge et la tension optimale V_{opt} est faible à cause par exemple d'une température de fonctionnement des cellules trop élevée [18].

III.2.2 Etage d'adaptation survolteur (boost)

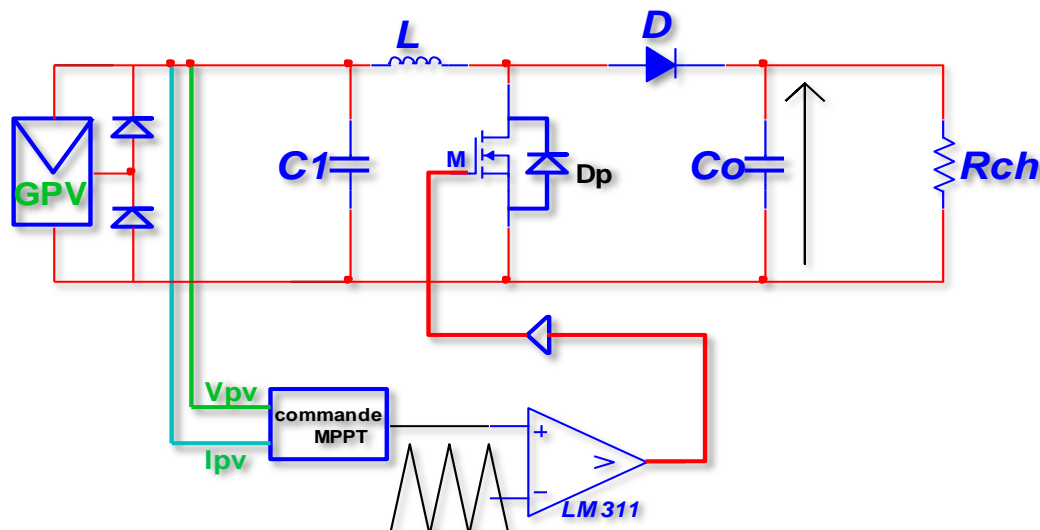


Figure 3.2. Schéma de principe d'un étage d'adaptation survolteur d'un GPV avec fonction MPPT.

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type boost est présenté en (figure 3.2). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert V_{oc} du générateur. Il peut être remarqué que la protection anti-retour du courant de la batterie sur le GPV peut être directement assurée par la diode jouant le rôle de roue libre au sein de la structure. L'utilisation de cette structure permet donc de faire des économies par rapport à la structure abaisseuse. En effet, la réduction de composants réduit d'autant le coût de l'étage d'adaptation mais permet également d'augmenter le rendement global de la chaîne par l'élimination des pertes dues à la conduction directe de la diode anti-retour.

Pour le convertisseur boost, théoriquement, le transfert de puissance n'est possible que si la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Toutefois, en réalité, si on considère le cas où la tension de batterie peut devenir inférieure à la tension du GPV, lorsque par exemple l'état de charge de la batterie est très faible ou proche d'une dégradation définitive, la structure boost peut fonctionner en mode dégradé. En effet, le passage de courant du générateur vers la batterie est possible à travers la diode de roue libre permettant ainsi la récupération d'une partie de l'énergie du GPV. Dans ce mode de fonctionnement dégradé, aucune régulation n'est possible et l'étage d'adaptation ne fonctionne pas à proprement parlé.

Le point de fonctionnement de l'ensemble est alors lié directement à la valeur de la tension de la batterie. Ceci peut représenter un avantage important de cette structure par rapport à la structure abaisseuse qui dans le cas d'une tension de batterie supérieure à celle de V_{oc} , ne permet aucun transfert de puissance [19] [20].

III.2.3 Etage d'adaptation abaisseur/survolteur (Cuk)

Schéma de principe :

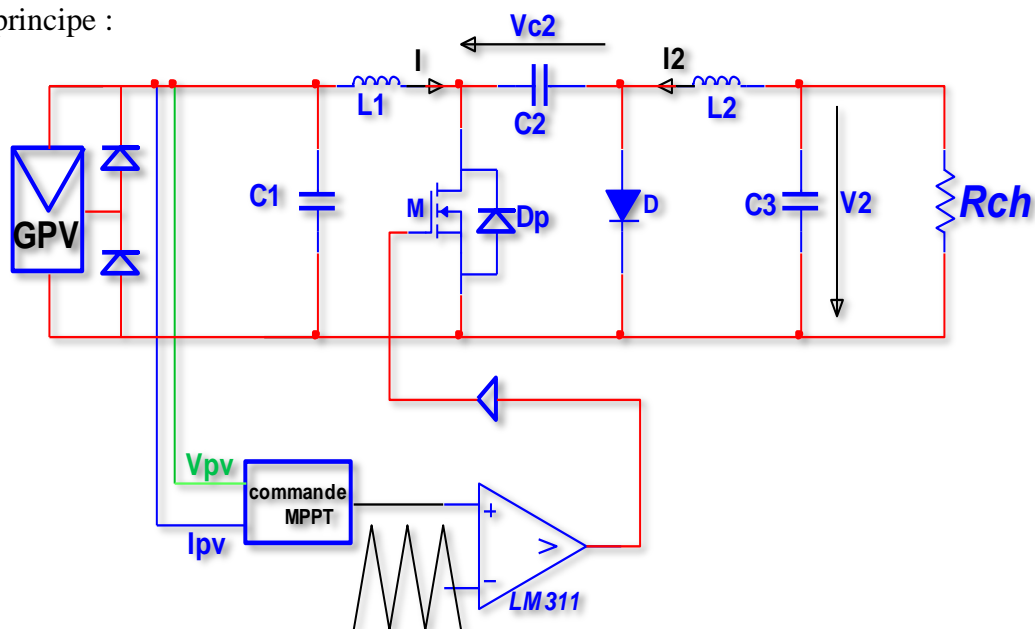


Figure 3.3. Schéma de principe d'un étage d'adaptation Cuk d'un GPV avec fonction MPPT.

Parmi les différents convertisseurs abaisseur-élevateur c'est le convertisseur Cuk (figure 3.3) que nous avons choisi d'étudier ce choix a principalement été dicté par la présence d'une inductance en série sur les ports d'entrée et de sortie conférant à la structure des niveaux d'interférences électromagnétiques inférieurs à ceux présents dans le convertisseur buck-boost ou bien même dans le convertisseur SEPIC. Un inconvénient subsiste concernant l'inversion de signe de la tension de sortie par rapport à celle d'entrée par sa structure, le convertisseur Cuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée [19].

III.3 Couplage direct générateur-charge

C'est le système le plus simple et minimal, ou le générateur photovoltaïque est couplé directement à une charge susceptible de fonctionner à puissance variable. Ce fonctionnement est dit "au fil du soleil". Le générateur et la charge ne sont plus adaptés (figure 3.4) ce qui implique un fonctionnement non optimal du générateur. Trois types de charges DC typiques existent :

- ❖ une charge purement résistive
- ❖ une charge de type source de tension
- ❖ une charge de type source de courant.

Sur la (figure 3.4), nous avons représenté les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV ainsi que les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de

fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P_{max}) pour un courant optimal ($I_{opté}$) et une tension optimale ($V_{opté}$), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I(V)$ du générateur et celles des trois types de charges :

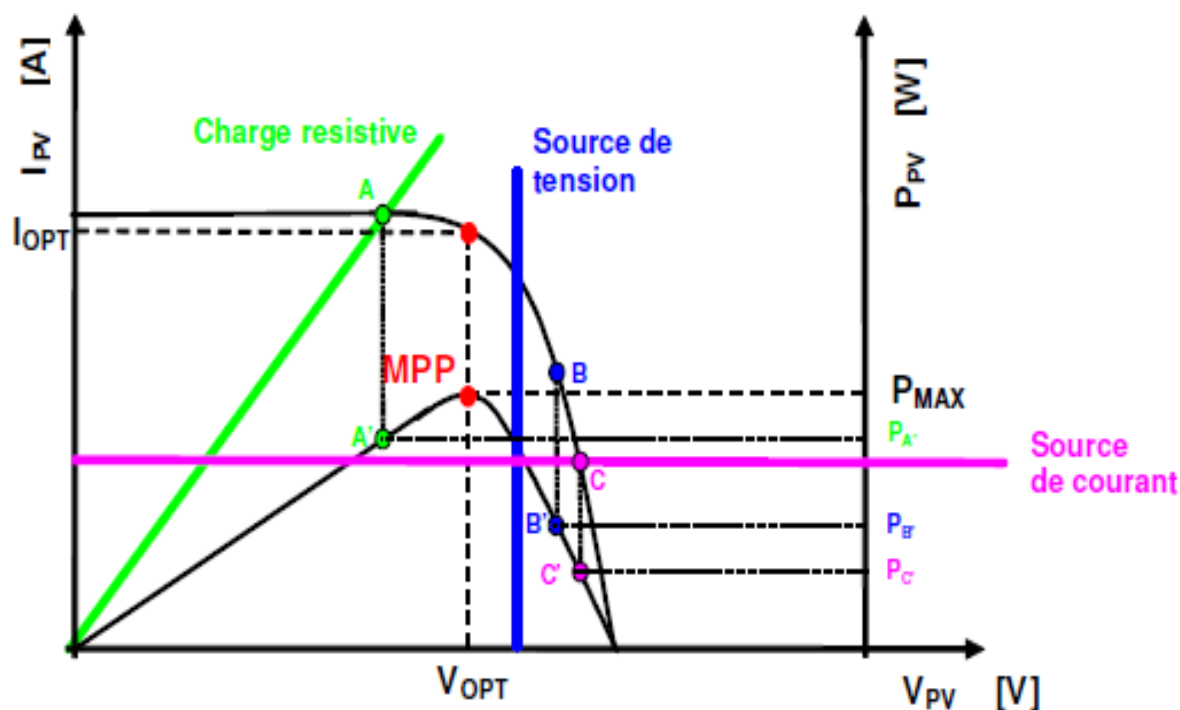


Figure 3.4. Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

- ❖ point A pour une charge résistive,
- ❖ point B pour une charge de type source de tension,
- ❖ point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement $P_{A'}$, $P_{B'}$ et $P_{C'}$, que comme l'illustre la (figure 3.4) correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} .

Donc, une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV implique à la longue des pertes de production énergétiques importantes [18] [21].

III.4 Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs,

assurer une fonction de mise en forme d'un générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

La (figure 3.5) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, dans le cas de la conversion solaire.

L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [22] [23] [24].

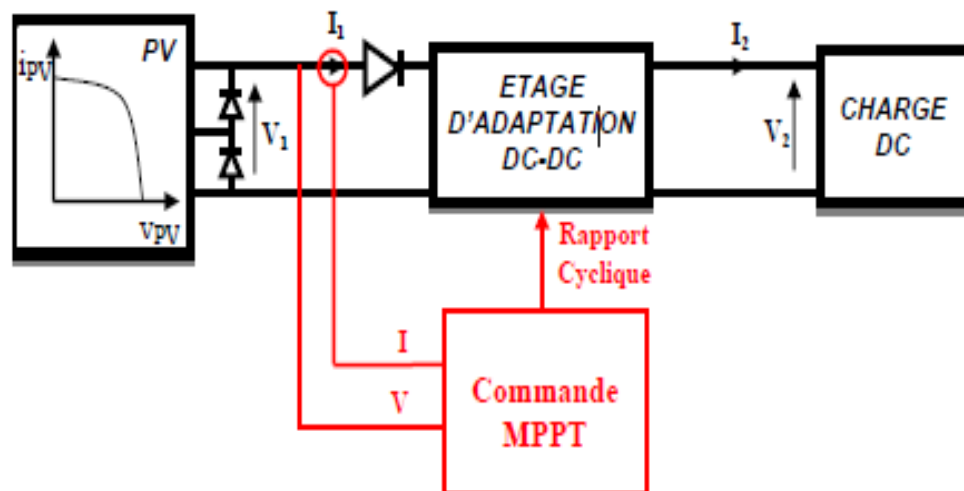


Figure 3.5. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La (figure 3.6) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- ❖ Pour une variation d'ensoleillement (cas a),

Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

- ❖ Variations de température de fonctionnement du G PV (cas b).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

❖ Pour une variation de charge (cas c),

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM :

Est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [23] [24] [25].

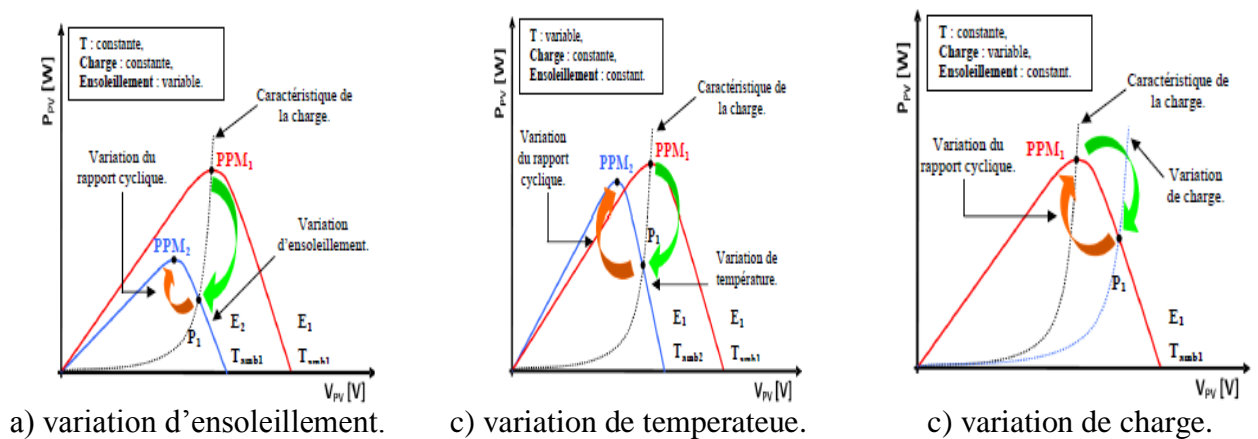


Figure 3.6. Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

III.5 Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [23] [26].

III.5.1 Les premiers types de technique MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications,

surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM).

Ce dernier est décrit en (figure 3.7) et peut être implanté entièrement en numérique [23].

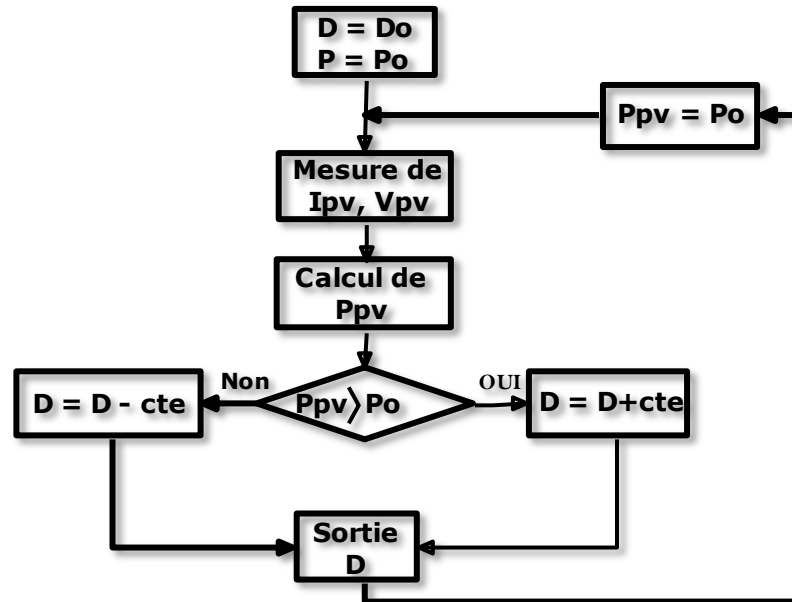


Figure 3.7. Principe de la première technique MPPT numérique

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_n à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{n-1} . De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [23].

III.5.2 Les techniques MPPT à algorithmes performants

Dans notre cas, ce dernier est constitué d'un hacheur dont la commande intègre le système MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette commande à base d'un microcontrôleur contrôle les variations de l'intensité du courant I et de la tension V et calcule la puissance P afin d'optimiser le transfert d'énergie électrique fournie par les panneaux.

Le système MPPT cherche à faire débiter ces panneaux à leur puissance maximale en agissant sur le rapport cyclique D .

Le principe du contrôleur MPPT est souvent basé sur une méthode par tâtonnement, comme le montre la (figure 3.8) suivante qui illustre le principe de recherche du MPP.

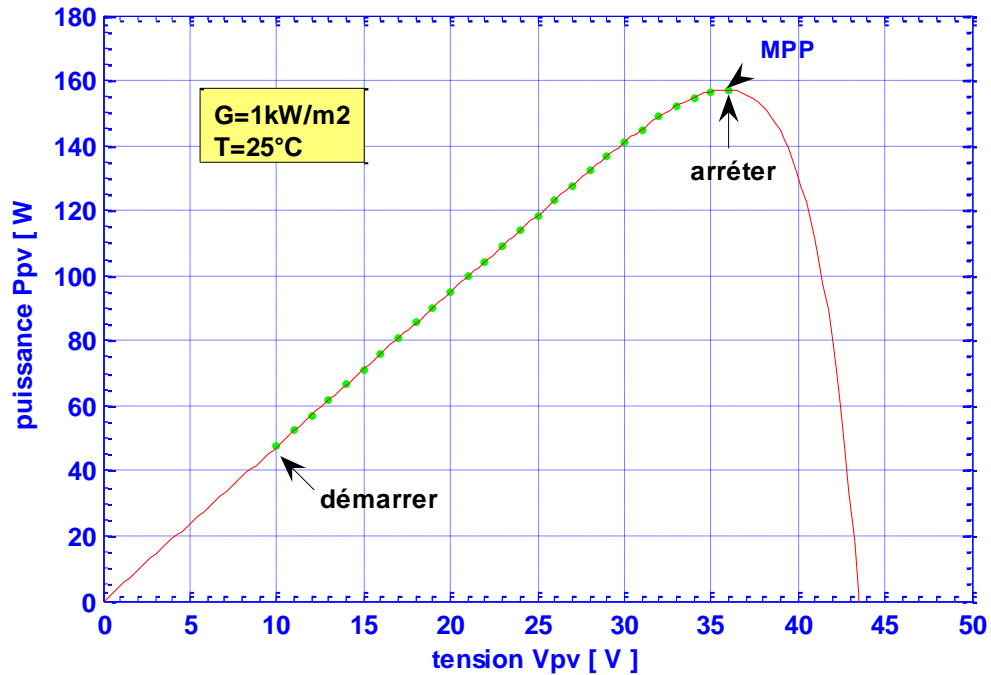


Figure 3.8. recherche du MPP

La charge va imposer son point de fonctionnement (P_1) par exemple. Le programme développé choisit un sens d'ajustement de D par pas $+(d=cte)$ ou $-(d=cte)$. Il compare si la valeur du point suivant en puissance est supérieure ou non à celui qui précède.

Si oui, on se déplace au point suivant (P_2) avec le même sens de variation de α , jusqu'au moment où le terme suivant (P_n) devienne inférieur au précédent (P_{n-1}). A ce moment, on prend le sens opposé d'ajustement de α et l'on recommence la même procédure, jusqu'à obtenir un système qui va basculer entre trois points qui englobent le MPP (P_{opt}).

III.5.2.1 Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la (figure 3.9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. à partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de

situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La (figure 3.10) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [27].

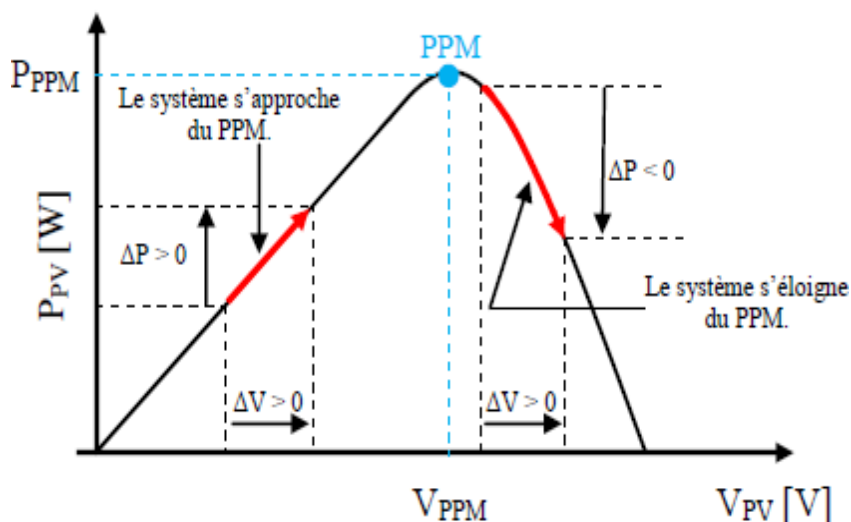


Figure 3.9. Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour Déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

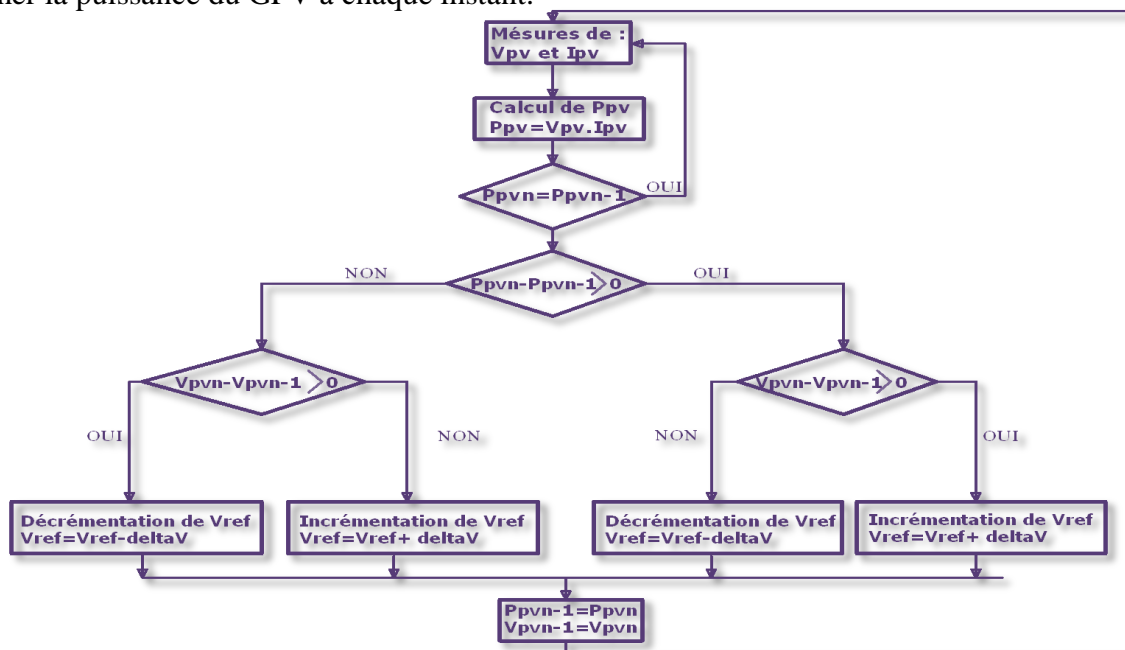


Figure 3.10. Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O) [27] [28]

III.5.2.2 MPPT à pas auto-adaptatif

Le principe fondamental de notre algorithme est la variation du pas d'incrémentation, ceci permettant de converger plus rapidement vers le MPP mais aussi de réduire les oscillations autour de ce point.

En effet, afin de converger rapidement vers le MPP, nous définissons, suivant un critère de variation de puissance, une région (r) de recherche à pas variable. En dehors de la région (r), l'algorithme se comporte comme un P&O normal avec un pas fixe note C, mais lorsque l'on entre dans la région (r), le pas s'auto-adapte et se réduit au fur et à mesure que l'on approche du MPP. Les équations (3.1) à (3.7) détaillent le calcul du pas auto adaptatif, nous supposons qu'autour du MPP, la tension reste constante et donc seul le courant varie.

$$\frac{dP_{pv}}{dt} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} + I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

Pour le calcul du pas auto-adaptatif, nous supposons qu'autour du MPP:

$$dV_{pv} \rightarrow 0 \quad (3.2)$$

$$dI_{pv} \rightarrow 0 \quad (3.3)$$

$$V_{pv} dI_{pv} \rightarrow dP_{pv} \quad (3.4)$$

$$dI_{pv} \rightarrow \frac{dP_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.5)$$

Finalement, nous obtenons le pas auto-adaptif :

$$C_{auto} = x \cdot dP_{pv} \quad (3.6)$$

$$\text{Avec} \quad x \approx \frac{k}{V_{pv}} \quad (3.7)$$

P_{pv} étant la puissance aux bornes des panneaux photovoltaïques ; V_{pv} et I_{pv} , respectivement leurs tension et courant.

Le coefficient k est un coefficient correcteur ($k \in [0.1, 1]$) qui permet de converger dans de bonnes conditions et résulte d'un réglage par itération basé sur le compromis (temps de convergence / stabilité).

L'algorithme MPPT est représenté à la (figure 3.11) [29].

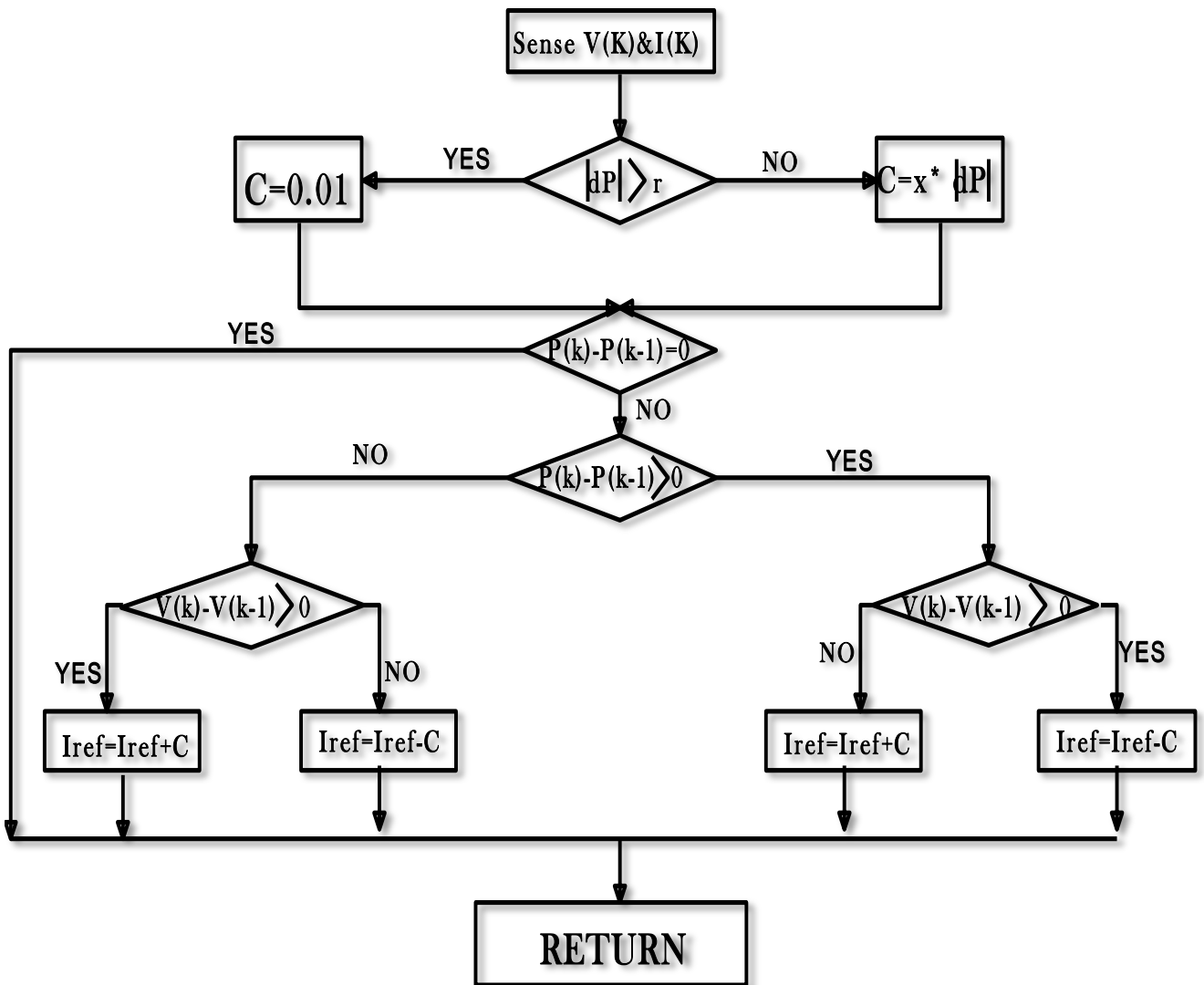


Figure 3.11. Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif

III.5.2.3 Principe des techniques “Incrément de conductance” (Inc.CoN)

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{3.8}$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \tag{3.9}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{pv}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite [30].

La (Figure 3.12) permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

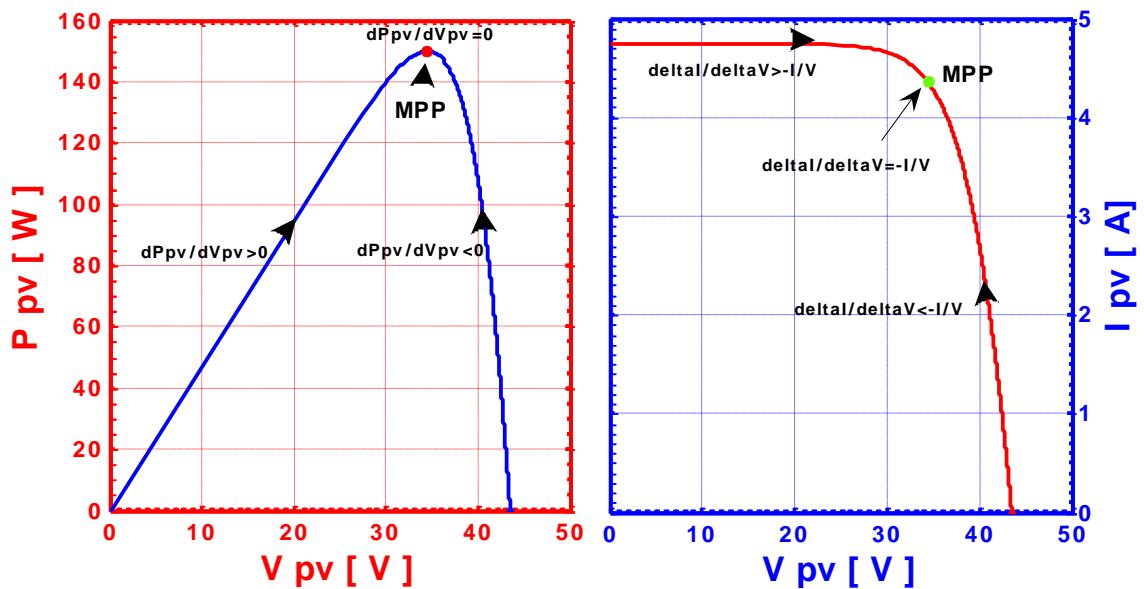


Figure 3.12. Positionnement du point de fonctionnement ($G=1kW/m^2$, $T=25C^\circ$).

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (3.8) et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d[I_{pv} \cdot V_{pv}]}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3.10)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (3.10) sur la dérivée de puissance :

- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$), comme l'illustre l'algorithme de la (figure 3.13). V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{OPT} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv} .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la (figure 3.13) [21] [31].

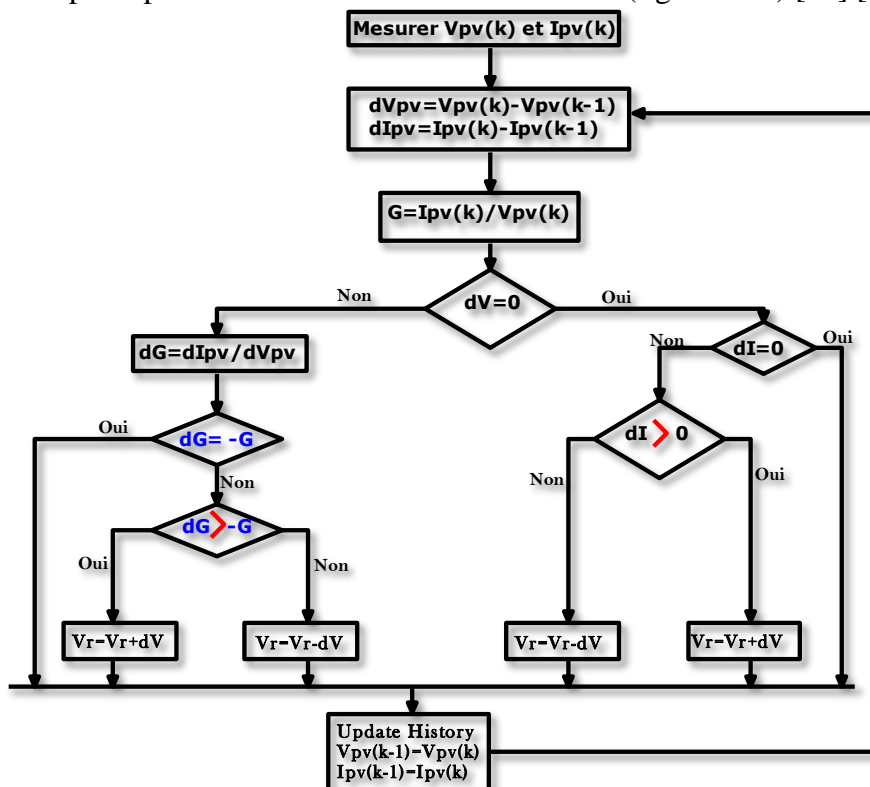


Figure 3.13. Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN)

III.5.2.4 Principe des techniques Hill Climbing (H.C)

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint.

Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque ($\frac{dP_{pv}}{dD} = \frac{d(Rin \cdot Ipv^2)}{dD}$) est forcé à zéro par la commande, comme le montre la (figure 3.14) [32] [23].

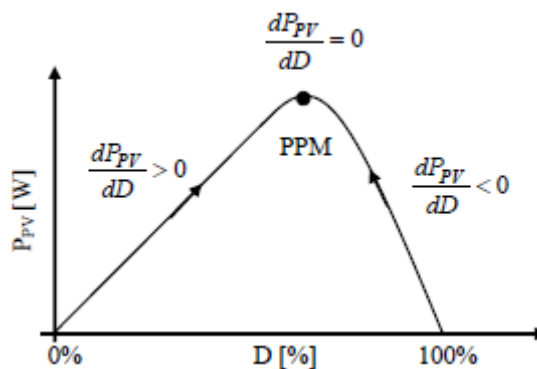


Figure 3.14. Relation entre P_{PV} et le rapport cyclique D du CS.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la (figure 3.15).

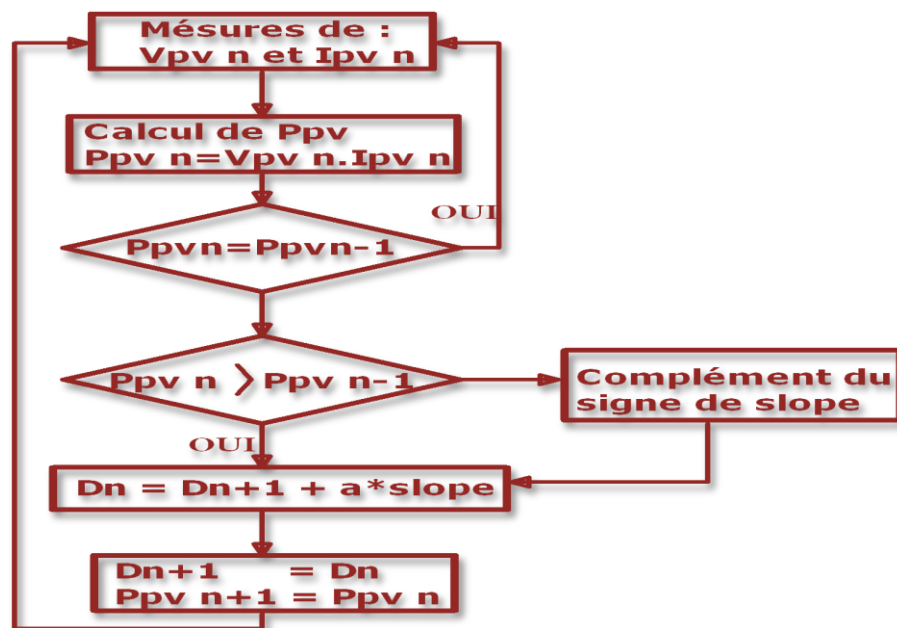


Figure 3.15. Algorithme MPPT Hill Climbing (H.C).

Le slope correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. D et P_{PV} représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique.

Périodiquement, la puissance P_{PVn} est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{PVn-1} , en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter.

III.5.3 Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{sc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

III.5.3.1 La techniques de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette technique de recherche du PPM est très simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau (V_{PV}) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale (V_{opt}). L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du CS, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre V_{opt} et V_{OC} d'un module PV :

$$V_{opt} = K_v * V_{oc} \quad (3.11)$$

Avec k_v correspondant à un facteur de tension dont sa valeur dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des GPV en Si, il est compris entre 0.71 et 0.78. A partir de (3.11) et connaissant k_v , il faut cependant mesurer la tension de circuit ouvert (V_{OC}) afin d'en déduire la tension de référence (V_{opt}) à appliquer au PV.

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{OC} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure.

Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de k_v dans un GPV suivants les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en si qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la

température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents [33].

III.5.3.2 La techniques de court-circuit

Cette nouvelle méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{opt} et I_{CC} comme le montre l'équation :

$$I_{opt} = K_i * I_{sc} \quad (3.12)$$

Avec K_i correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et est généralement compris entre 0.78 et 0.92.

À L'équation (3.12) montre que le courant I_{opt} peut être déterminé par une mesure d' I_{CC} et que le PPM peut être atteinte en appliquant un courant de référence égal à I_{opt} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de I_{CC} implique une perte de transfert de puissance du a la mise en court circuit du GPV.

Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80.

Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales citées au début de ce document. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (I_{CC} et V_{CO}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée.

III.5.4 La techniques de différenciation

Cette méthode est basée sur la propriété de la dérivée d'une fonction qui s'annule en un De ses extrema. La résolution de l'équation (3.13) permet d'obtenir le point de puissance maximale :

$$\frac{dP_{pv}}{dt} = V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dt} + I_{pv} * \frac{dV_{pv}}{dt} = 0 \quad (3.13)$$

Cependant, afin d'atteindre réellement le point de puissance maximale, cette équation doit être résolue rapidement. Cette opération est longue et complexe car exigeant au moins huit calculs et

mesures : mesures de la tension V_{pv} des panneaux, du courant I_{pv} , de la variation de la tension dV_{pv} , de la variation du courant dI_{pv} , permettant le calcul de la variation de la puissance dP_{pv} puis sa comparaison à 0. Si la variation de la puissance n'est pas nulle, son signe permet de déterminer la direction de la recherche du MPP. Cette méthode nécessite donc des moyens de calcul qui soient très efficaces [34].

III.5.4 Les techniques MPPT basées sur le principe de la logique floue

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs.

L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De Plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique).

La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, Est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable Linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes

- NB : Negative Big,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zero,
- PS : Positive Small,
- PB: Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en (figure 3.16).

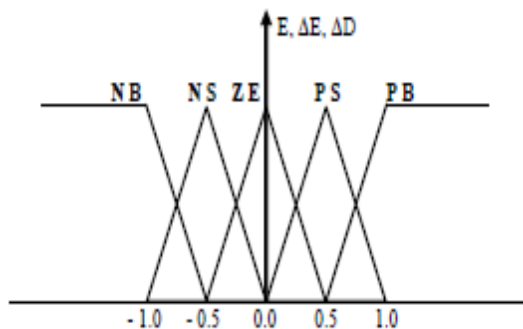


Figure 3.16. Structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liés aux équations suivantes

$$E(n) = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \tag{3.14}$$

$$\Delta E(n)=E(n)-E (n-1) \tag{3.15}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau (3-1), Une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔD .

| $E \backslash \Delta E$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| NB | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| NS | ZE | ZE | NS | NS | NS |
| ZE | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB | PB | PB | PB | ZE | ZE |

Tableau 3.1. Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM.

En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à ΔD s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie ΔD , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. Noppadol Khaehintung a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la

logique floue permet d'améliorer d'un facteur 8 le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique.

Dans cet article, aucune indication n'est donnée sur la variable d'incrément, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM. Sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s'immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s'y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu'elle l'a atteint.

Une comparaison plus fine est donc nécessaire pour affirmer les gains de ce nouveau type de commande à l'algorithmique de base très complexe.

La commande logique floue est comparée directement à la méthode Hill Climbing. Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est légèrement amélioré, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible. Ici, contrairement à l'exemple cité ci-dessus, la valeur de l'incrément est importante. Malheureusement la qualité des relevés ne permettent pas de déterminer avec précision le gain en termes de temps de recouvrement ainsi que le rendement de cette commande à cause d'une échelle de temps et des calibres de mesures trop grands.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité. De la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau.

Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [23] [35].

III.5.5 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la (figure 3.17).

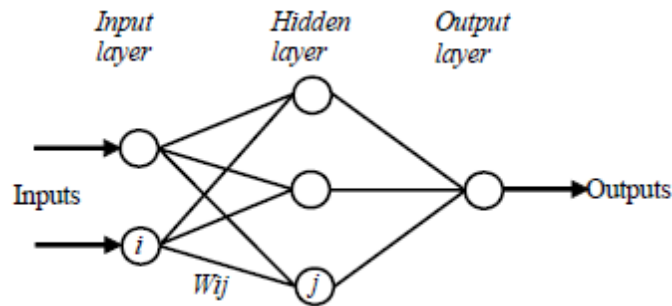


Figure 3.17. exemple d'un reseau de neurones

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré D'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (V_{OC} , I_{CC}) associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM.

Éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site D'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisant [23].

III.6 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de Fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{mpp} , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{mppT} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (3.16)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande [19].

III.6.1 Simplicité et Coût

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application [23].

III.6.2 Réponse dynamique

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible [23].

III.6.3 Flexibilité

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse [23].

III.6.4 Compétitive sur une large gamme de puissance

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance [23].

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement la problématique de la recherche du PPM en établissant une classification des commandes MPPT présentes dans la littérature.

Les définitions des principaux rendements utilisés comme références de comparaison et qui interviennent dans les étages d'adaptation et de conversion.

Chapitre IV

**Modélisation et simulation des MPPT :
P&O, I.C et H.C**

IV.1 Introduction

Quand un module PV est directement couplé à une charge, le point de fonctionnement du module PV est l'intersection de sa caractéristique $I=f(V)$ de PV et la caractéristique $I=f(V)$ De la charge. Par exemple sur la (figure 4.1), une charge résistive a une caractéristique droite avec une pente I/R représenté sur (figure 4.2). En d'autres termes, l'impédance de la charge dicte la condition de fonctionnement du module de PV.

Ce chapitre discute les caractéristiques $I-V$ des modules et des charges de GPV, et l'utilisation des convertisseurs DC-DC en tant que moyens de MPPT. Les détails des algorithmes des trois MPPT leurs limitations et la comparaison entre les trois techniques après modélisation et simulation dans l'environnant Matlab/Simulink sont également traité.

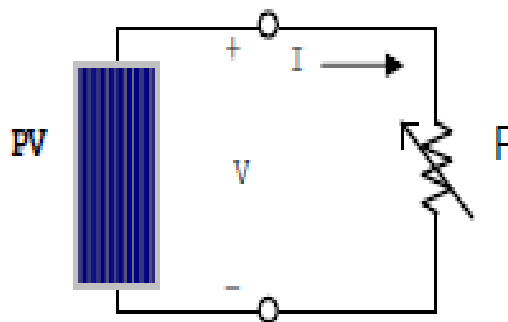


Figure 4.1. Connexion d'un GPV à une charge résistive variable

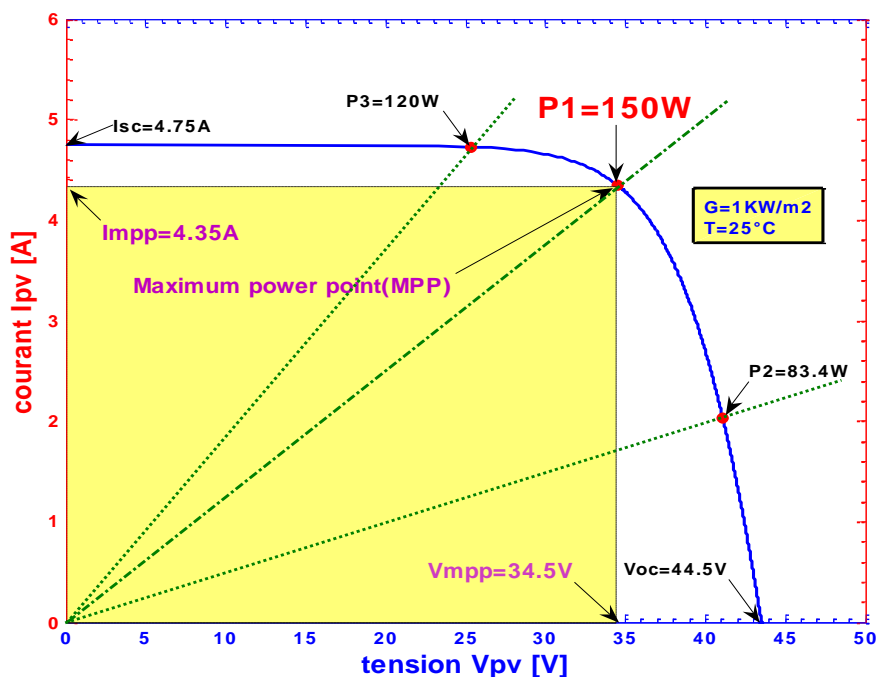


Figure 4.2. Caractéristique I-V de module SX150S et déverses charges résistives.

IV.2 Convertisseur boost

IV.2.1 Structure

La structure du hacheur élévateur (boost) est constituée d'une seule cellule de commutation, ainsi que représente (Figure 4.3) [36].

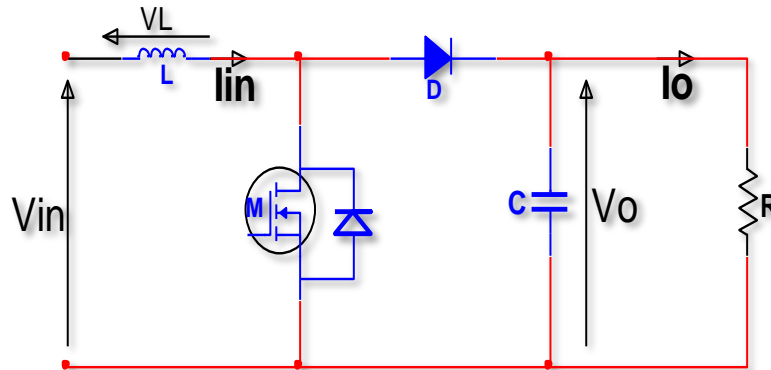


Figure 4.3. Hacheur élévateur (boost)

IV.2.2 Valeur moyenne de V_0

Avent de déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur élévateur, nous nous référons au schéma (figure 4.3). Nous avons représentée la tension V_L aux bornes de l'inductance, ainsi que les variations du courant I_{in} qui la traverse.

On définit D le rapport cyclique, comme le rapport entre la durée d'amorçage du transistor et la période de commutation du convertisseur T . La tension V_L dépend de la phase de fonctionnement du convertisseur considérée

$$\text{Pendant } DT : \quad V_L = V_{in} \tag{4.1}$$

$$\text{Pendant } (1-D)T : \quad V_L = V_{in} - V_0 \tag{4.2}$$

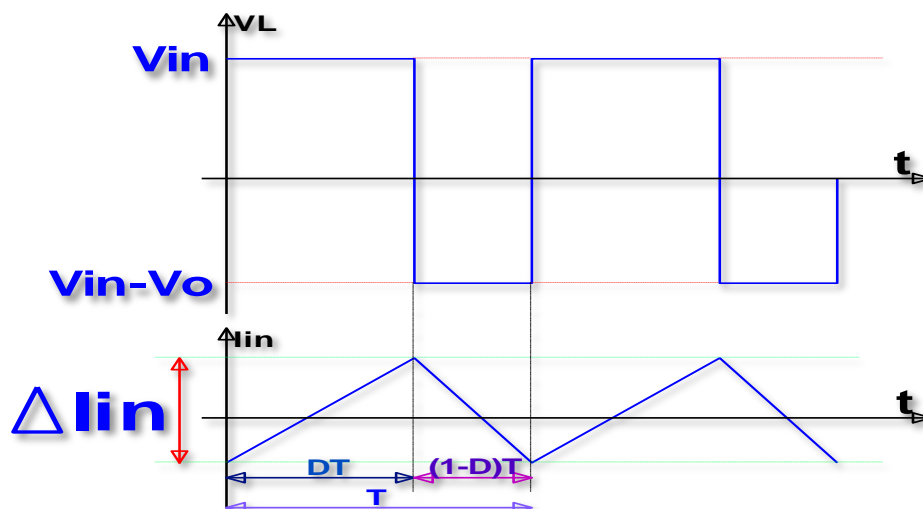


Figure 4.4. Tension V_L aux bornes de l'inductance L .

On peut ainsi calculer l'expression $(V_L)_{moy}$ de la valeur moyenne de V_L

$$(V_L)_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_L(t) dt \quad (4.3)$$

$$(V_L)_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_{in} dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^T (V_{in} - V_o) dt \quad (4.4)$$

$$(V_L)_{moy} = V_{in} * D + (V_{in} - V_o) * (1 - D) \quad (4.5)$$

$$V_o = V_{in} * \frac{1}{1-D} \quad (4.6)$$

Le rapport cyclique pouvant varier de 0 a 1, la tension V_o en sortie peut varier d' V_{in} ... a l'infini. Il est Bien entendu que ce dernier cas peut s'avérer ((problématique)) pour le dimensionnement du convertisseur.

Il faudrait trouver la diode et le transistor capables de tenir une tension infinie Malgré cette restriction (qui peut rendre un tel convertisseur difficile a commandé), le hacheur élévateur permet donc, grâce a la valeur du rapport cyclique D d'obtenir en sortie une tension nettement plus élevée que celle appliquée en son entrée [37].

IV.2.3 Courant en sortie I_o

On suppose que la puissance la puissance de sortie égale à la puissance d'entrée en peut écrire :

$$P_{in} = P_o \Rightarrow V_{in} * I_{in} = V_o * I_o \quad (4.07)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (4.08)$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (4.9)$$

$$R_{ch} = \frac{V_o}{I_o} \quad (4.10)$$

De l'équation (4.6) et (4.9) l'impédance d'entrée du convertisseur est :

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{(1-D)*V_o}{\frac{1}{1-D}*I_o} = (1 - D)^2 * \frac{V_o}{I_o} = (1 - D)^2 * R_{ch} \quad (4.11)$$

La (figure 4.5) montre le schéma de connexion d'une charge résistive au GPV à travers un convertisseur DC-DC. La variation de l'impédance vue par le générateur photovoltaïque en fonction du rapport cyclique D est représentée sur la (figure 4.6.)

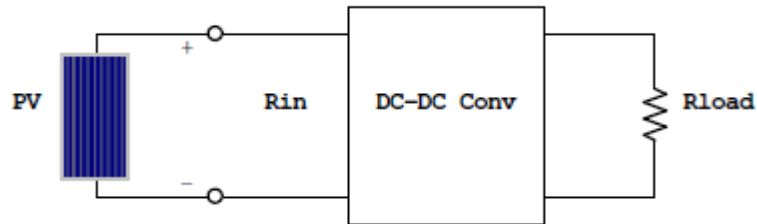


Figure 4.5. L'impédance vue par GPV est R_{in} réglable par le rapport cyclique D

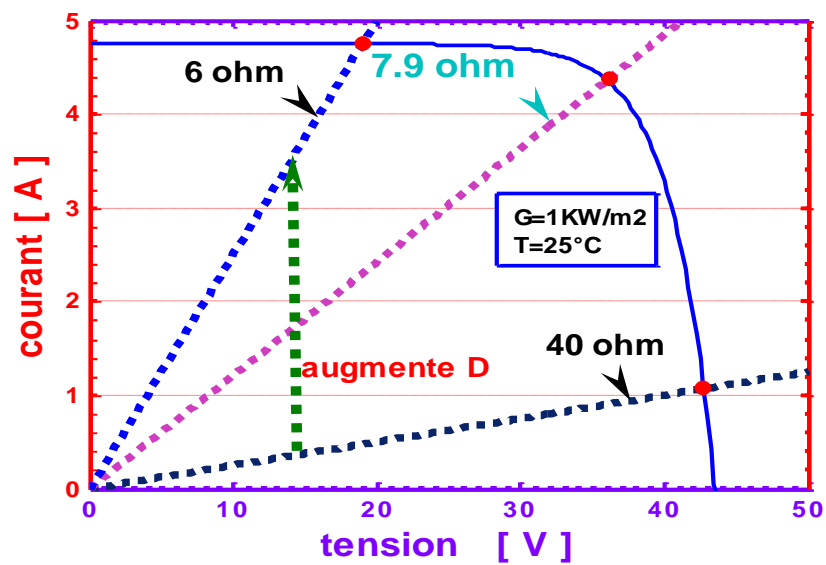


Figure 4.6. L'impédance d'entrée du convertisseur boost et sont rapport Cyclique

L'équation (4.12) pour le convertisseur boost est résolue pour un rapport cyclique :

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{in}}{R_{ch}}} \quad (4.12)$$

De l'équation (4.6) la tension de sortie du convertisseur est :

$$V_o = \left(\frac{1}{1-D}\right) V_{in} \quad (4.13)$$

De l'équation (4.9) le courant de sortie du convertisseur est :

$$I_o = (1 - D)I_{in} \quad (4.14)$$

IV.3 Détermination du PPM du module BP SX 150S

Les résultats de calcul sont tabulés dans les tables ci-dessous. Les données de module de PV sont obtenues à partir du modèle de simulation de MATLAB. En utilisant l'équation ci-dessus, deux ensembles de données sont rassemblées pour la charge de 40Ω

- A la température constante de module 25°C (figure 4.7)
- A l'ensoleillement constant 1000W/m² (figure 4.8)

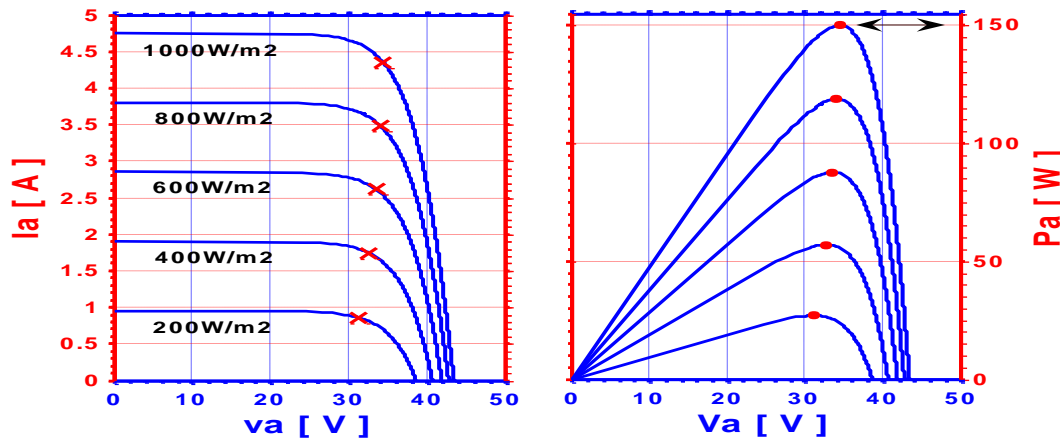


Figure 4.7. Caractéristiques I-V et P-V pour l'éclairement variable et une trace de MPP (25°C).

| | PV | | | | MPPT | | | |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------|----------------|----------------|-------------------|
| ensoleillement | V _{mpp} | I _{mpp} | P _{max} | R _{in} | D | V _o | I _o | R _{load} |
| 1000 W/m ² | 34.48V | 4.35A | 150W | 7.92Ω | 0.55 | 76.62V | 1.95A | 40 Ω |
| 800 W/m ² | 34.13 V | 3.48 A | 118.8W | 9.80 Ω | 0.50 | 68.26V | 1.74A | 40 Ω |
| 600 W/m ² | 33.59 V | 2.62 A | 87.67W | 12.82 Ω | 0.43 | 58.92V | 1.49A | 40 Ω |
| 400 W/m ² | 32.7 V | 1.74 A | 56.89W | 18.79 Ω | 0.31 | 47.39V | 1.20A | 40 Ω |
| 200 W/m ² | 31.3 V | 0.86 A | 26.92W | 36.39 Ω | 0.04 | 32.60V | 0.82A | 40 Ω |

Tableau 4.1. Convertisseur sous MPPT avec la charge résistive 40Ω(T=25°C).

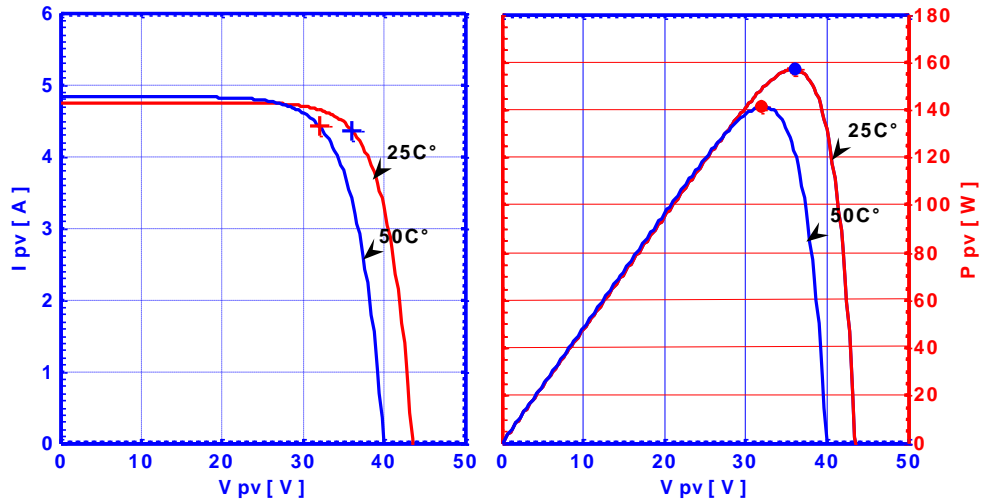


Figure 4.8. Caractéristiques I-V et P-V pour température variable et une trace de MPP (1kW/m²)

| Module PV | | | | MPPT | | | | |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| T [°C] | V _{mpp} [V] | I _{mpp} [A] | P _{max.} [W] | R _{in} [Ω] | D | V _o [V] | I _o [A] | R _{load} [Ω] |
| 25 | 34.48 | 4.35 | 150 | 7.92 | 0.55 | 76.62 | 1.95 | 40 |
| 50 | 30.61 | 4.38 | 134.1 | 6.98 | 0.58 | 72.88 | 1.83 | 40 |

Tableau 4.2. Convertisseur sous MPPT avec la charge résistive 40Ω (G=1kWm⁻²).

IV.4 Modélisation du hacheur survolteur

A partir d'une tension d'entrée de 36V, nous souhaitons avoir en sortie une tension de 79V avec une puissance nominale de 160W. La fréquence de commutation du convertisseur est de 40kHz. Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$\Delta I_{in} = \frac{V_{in}}{L \cdot f} * D \tag{4.15}$$

$$\Delta V_0 = \frac{V_{in} * D}{R_{ch} * C * f * (1-D)} \tag{4.16}$$

Avec $\Delta I_{in}=0.25A$ et $\Delta V_0=1V$, les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes. Nous obtenons ainsi le tableau récapitulatif suivant avec le rapport cyclique $D_0=54\%$ qui permet de passer de la tension des panneaux ($V_{in}=36V$) à la tension du bus continu ($V_0=79V$).

| F [KHz] | V _{in} [V] | I _{in} [A] | V ₀ [V] | I ₀ [A] | P [W] | L [H] | C [F] |
|---------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------|------------------------|-----------------------|
| 40 | 36 | 4.36 | 79 | 2 | 160 | 1.944*10 ⁻³ | 48.9*10 ⁻⁶ |

Tableau 4.3. Paramètre du hacheur boost.

Ce hacheur comporte trois composants : Une inductance L, une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, u=1 et u=0 (figure 4.9).

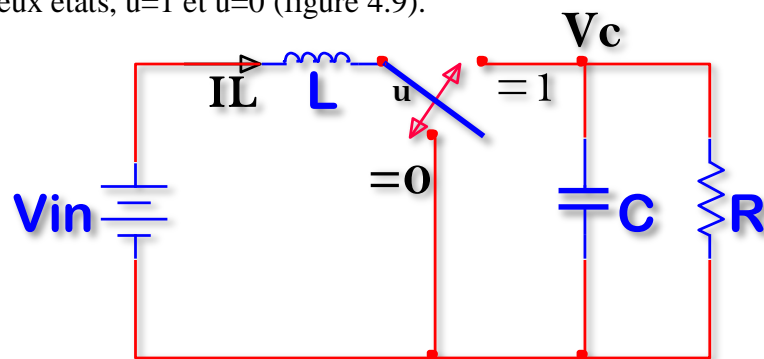


Figure 4.9. Forme simple du hacheur boost

Son principe peut être expliqué de la manière suivante : Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie. Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes [11] [6] [18]. En remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage c'est-à-dire le rapport cyclique D ($D = \frac{T_{on}}{T}$) :

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1-D}{C} * I_L - \frac{V_C}{R*C} \quad (4.17)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{1-D}{L} * V_C \quad (4.18)$$

Le modèle Simulink du hacheur idéal est montré sur la (figure 4.10).

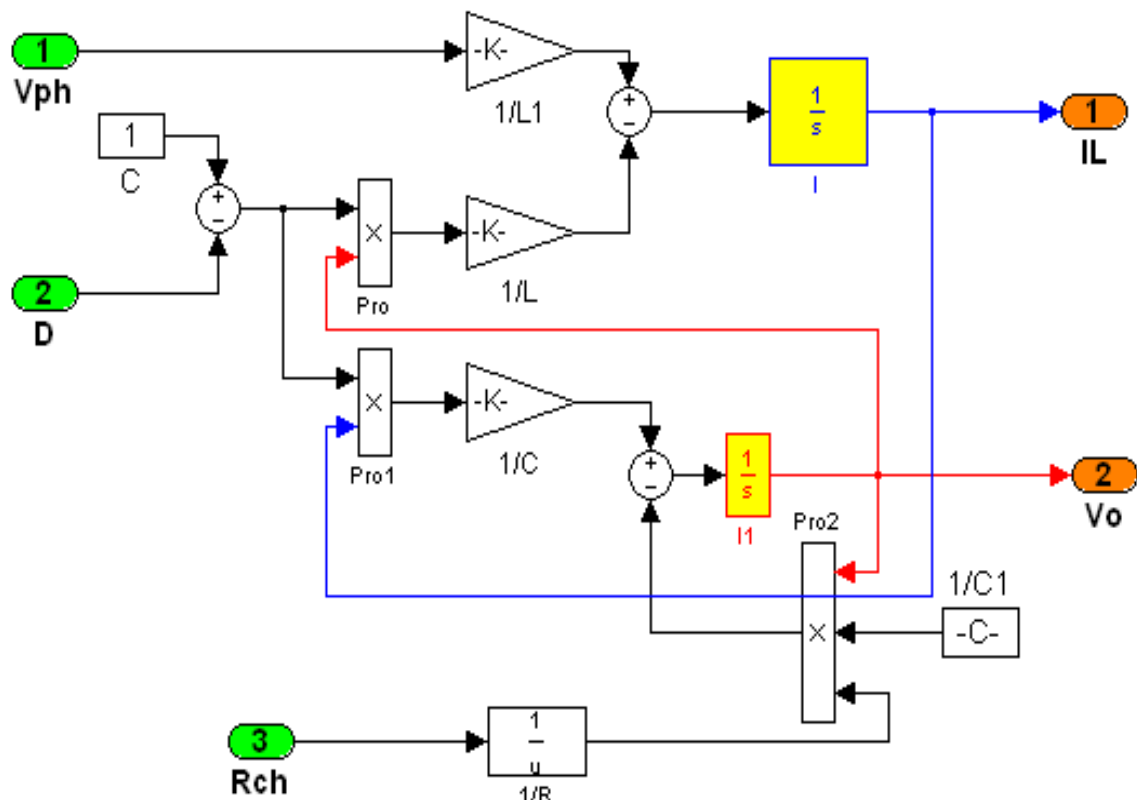


Figure 4.10. Modèle simulink du hacheur boost.

IV.5 La technique “Perturb and Observe” (P&O)

C’est l’algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) le plus utilisé, et comme son nom l’indique il est basé sur la perturbation du système par l’augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l’observation de l’effet sur la puissance de sortie en vue d’une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [21] [38].

La (figure4.11) montre l’organigramme de l’algorithme de P&O tel qu’il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle .Le modèle Simulink est donné par la (figure 4.12)

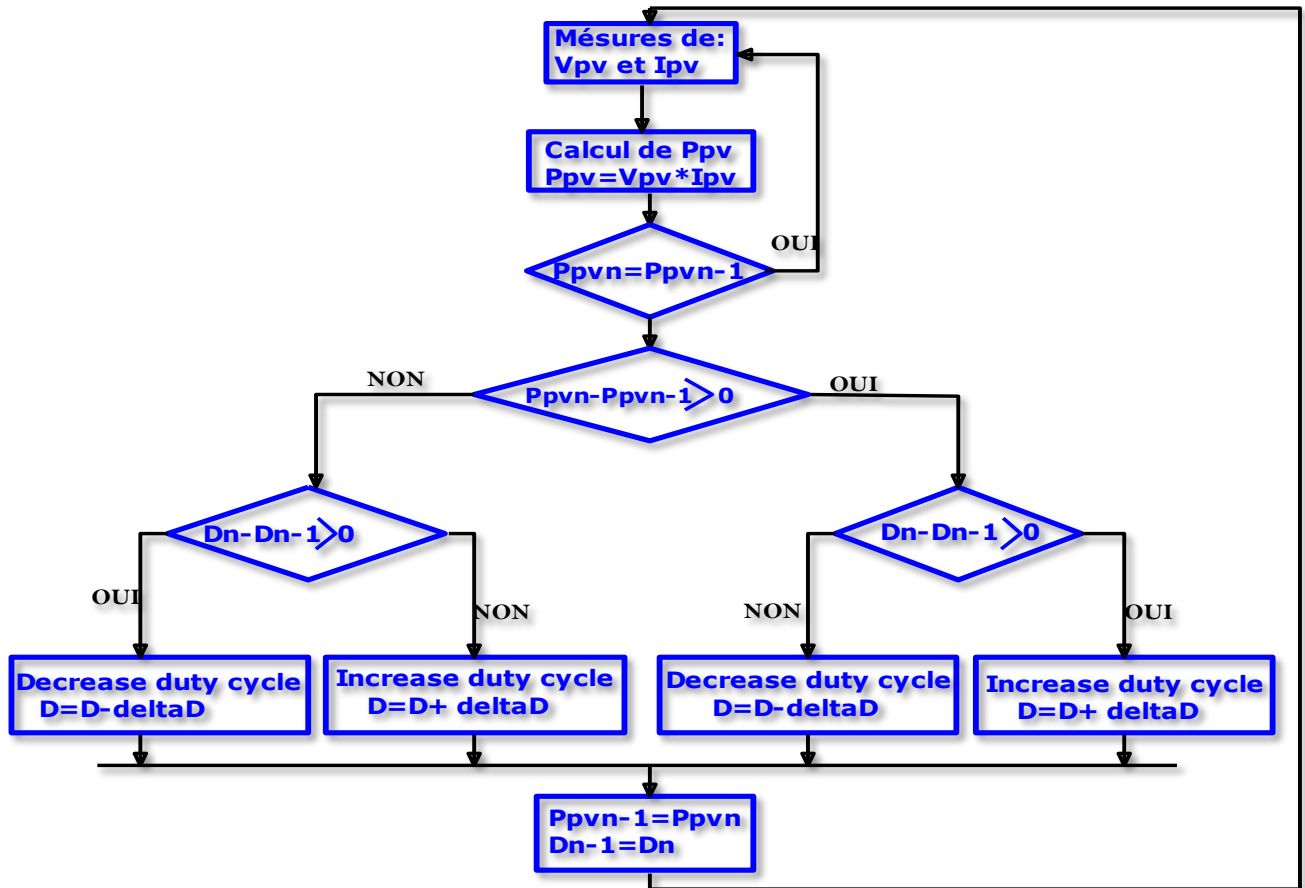


Figure 4.11. Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O)

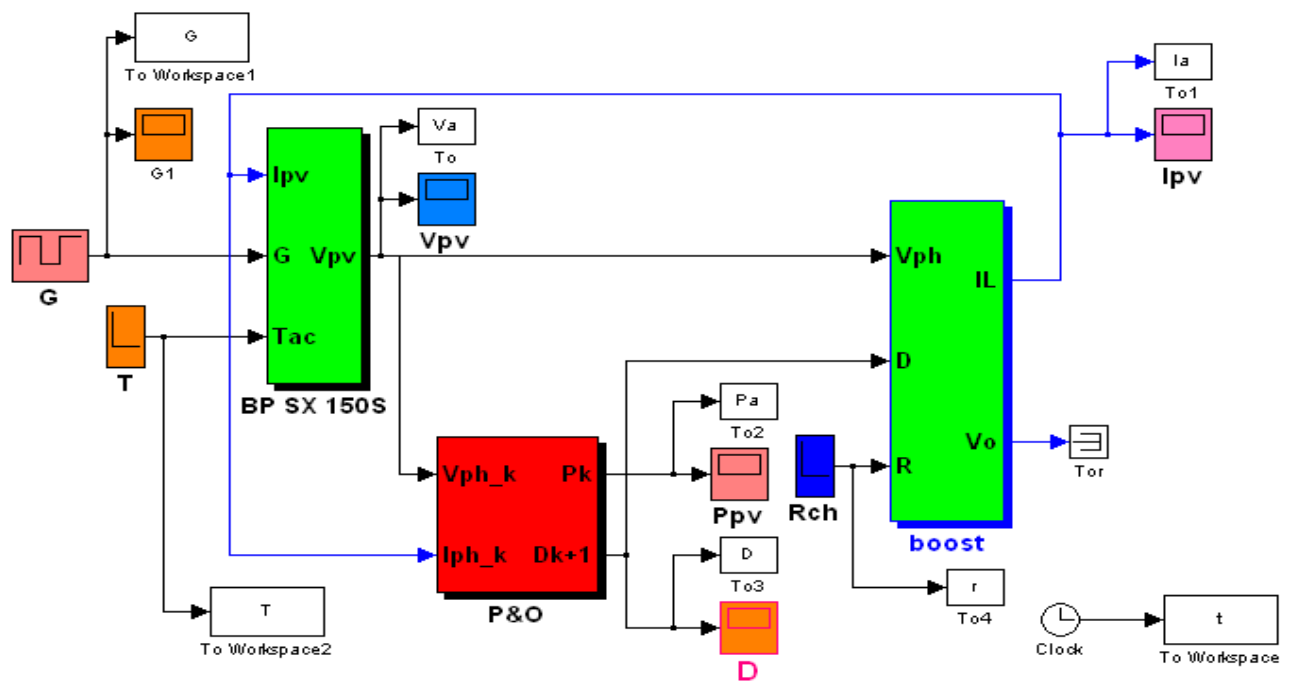


Figure 4.12. Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT (P&O).

Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement qui sont représentées sur la (figure4.13a) nous avons représenté la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur (figure 4.14a) pour une charge et température constantes. Quant la charge varie de 40Ω à 20Ω (figure4.13b) et éclairement de 1kW/m² la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur et donnée par la (figure4.14b).

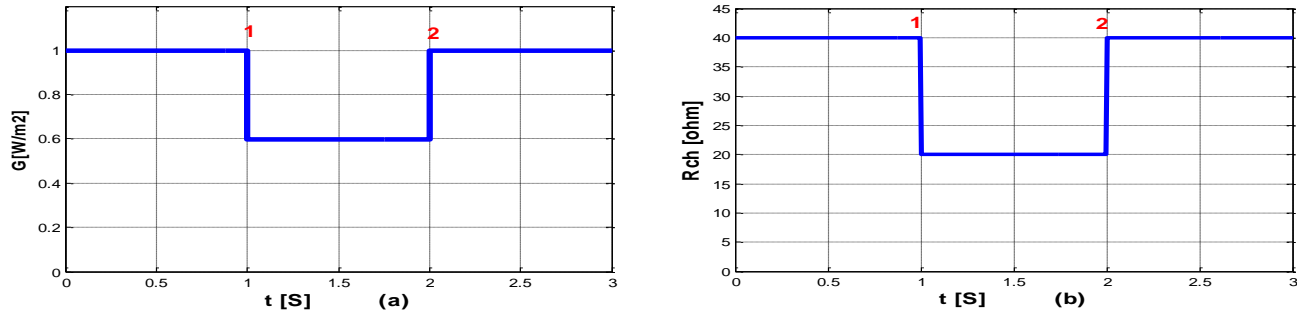


Figure 4.13. Variation de l'ensoleillement en fonction du temps (a) et de la charge(b)

Etat de la puissance

Après un régime transitoire de durée 20 ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM. Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que :

Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 35 ms), le système converge vers un nouveau PPM qui correspond à l'éclairement imposé (figure 4.14). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 35ms), le système converge vers le PPM trouver avant le changement d'éclairement. Aussi, nous avons vérifié que La puissance d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de : 149.86 W et 149.96 W pour $G=1kW/m^2$ et $T=25^{\circ}C$, 87.63W et 87.67W pour $G=.6kW/m^2$ et $T=25^{\circ}C$.

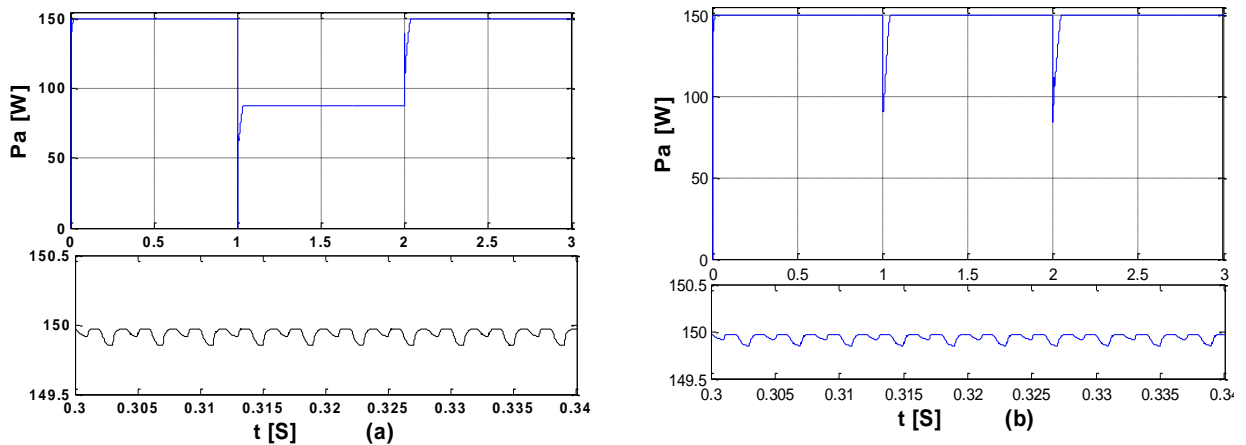


Figure 4.14. Puissance du GPV en fonction du temps : variation de l'ensoleillement(a) et de la charge(b).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω la (figure 4.14b) représente les résultats de simulation ; la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur pour un éclairement de 1kW/m^2 et une température de 25°C . Il apparaît qu'au bout de 50 ms, le système PV converge vers le point PPM. Donc, la commande MPPT utilisée contrôle bien le fonctionnement du générateur PV autour des conditions optimales.

➤ Etat du rapport cyclique

Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 40 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au point PPM (Figure 4.15a). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 40 ms), le rapport cyclique du convertisseur, augmente puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au point PPM. Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour de :

0.552 et 0.56 pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 0.428 et 0.434 pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

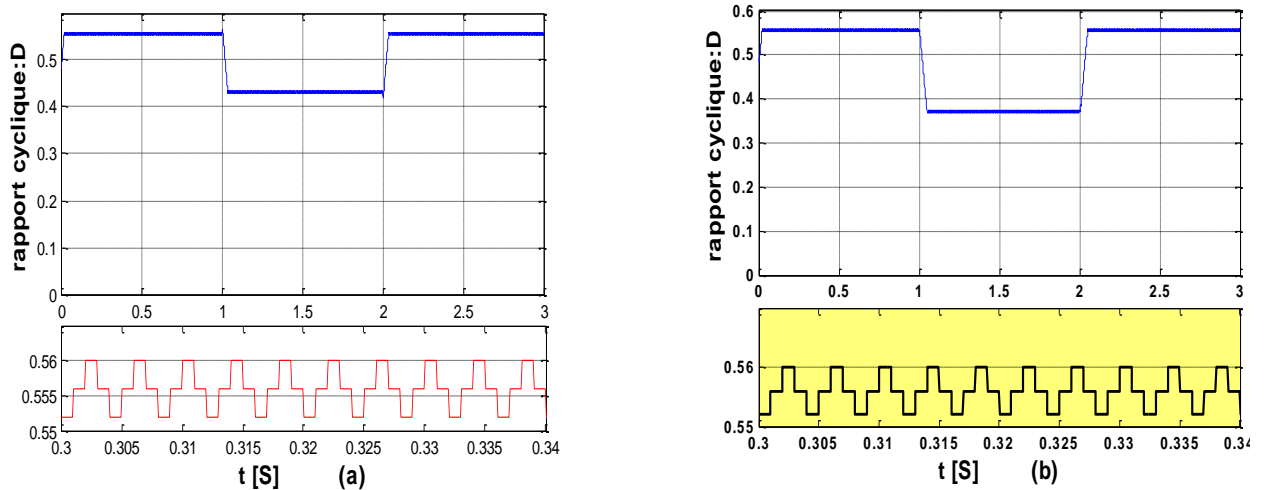


Figure 4.15. Rapport cyclique D en fonction du temps : variation de l'ensoleillement (a) et de la charge (b).

Pendant les deux changements de charge (qui dure 50 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue (augmente) puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au point PPM (Figure 4.15b). Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour des valeurs suivantes :

0.552 et 0.56 pour $R_{ch}=40\text{ohm}$, 0.368 et 0.376 pour $R_{ch}=20\text{ohm}$.

➤ **Etat de la tension**

Après un régime transitoire de durée 20 ms, Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 35 ms), le système converge vers la tension 0V, puis converge vers une nouvelle tension qui correspond au PPM (figure 4.16a). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 35ms), le système converge vers la tension du circuit ouvert 40V, puis converge vers une nouvelle tension qui correspond au PPM de départ.

La tension d'entrée du convertisseur oscille autour des points suivants:

34.1 V et 34.7 V pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 33.4 V et 33.85 V pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

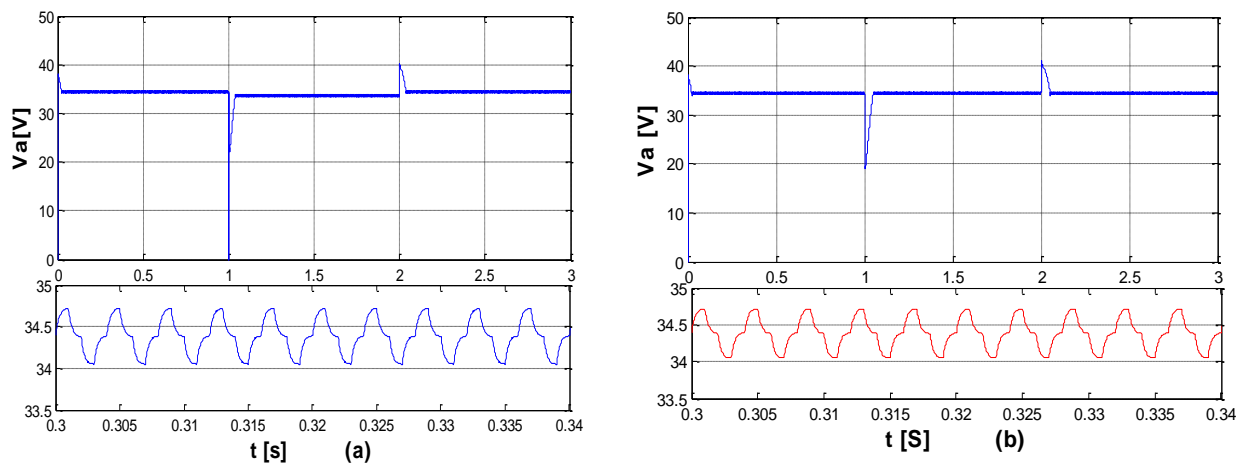


Figure 4.16. Tension du GPV en fonction du temps : Variation de l'ensoleillement (a) et de la charge(b).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω nous avons représenté (figure 4.16b) les résultats de simulation, la tension du GPV pour un éclairement de 1kW/m^2 et une température de 25°C . Il apparaît qu'au bout de 50 ms, le système PV converge vers le point PPM.

Aussi, nous avons vérifié (figure 4.17) que le courant d'entrée du convertisseur oscille autour des points suivantes :

4.32A et 4.4A pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 2.58 et 2.62A pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

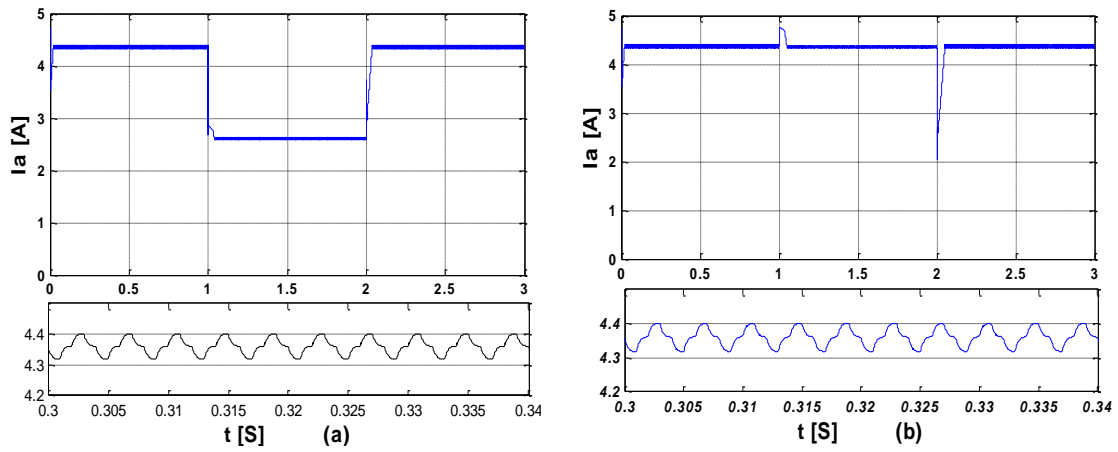


Figure 4.17. Courant du GPV en fonction du temps : Variation de l’ensoleillement (a) et de la charge(b).

➤ **Influence de la température**

La température à une influence notable sur le rendement d’une GPV de manière générale, on remarque que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension a vide est beaucoup plus influencée (de l’ordre de - 0.4%/K). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d’une GPV. L’influence du changement de la température sur la position de point de puissance maximale pour les trois techniques est donnée sur les figures B.1, B.2, et B.3 en annexe B.

L’annexe C montre l’évolution du point de fonctionnement(MPPT) dans la caractéristique V-I et V-P pour différents niveaux d’ensoleillement, La relation entre la puissance de sortie du convertisseur et son rapport cyclique, et la relation entre le courant et la tension de sortie du convertisseur qui est égale à la charge de 40 ohms.

IV.6 La technique “Incrément de conductance” (Inc.CoN)

Nous allons dans cette méthode nous intéresser directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG, nous allons chercher le maximum de la courbe P=f(V) (figure 4.17) en cherchant le point d’annulation de la dérivée de la puissance. Précisément la puissance en sortie de la source peut s’écrire :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \tag{4.19}$$

D’où en dérivant :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{4.20}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (4.21)$$

Donc

$$\left(\frac{1}{V_{pv}} \right) \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (4.22)$$

Soit

$$\left[\frac{1}{V_{pv}} \right] * \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = G + \Delta G \quad (4.23)$$

En général, la tension issue de la source est positive, c'est pourquoi, nous pouvons déduire les Résultats clés de la méthode de la conductance incrémentielle.

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Rightarrow G > -\Delta G \quad (4.24)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow G = -\Delta G \quad (4.25)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \Rightarrow G < -\Delta G \quad (4.26)$$

Nous déduisons facilement les actions à faire dans les différent cas sur le schéma $P=f(V)$.

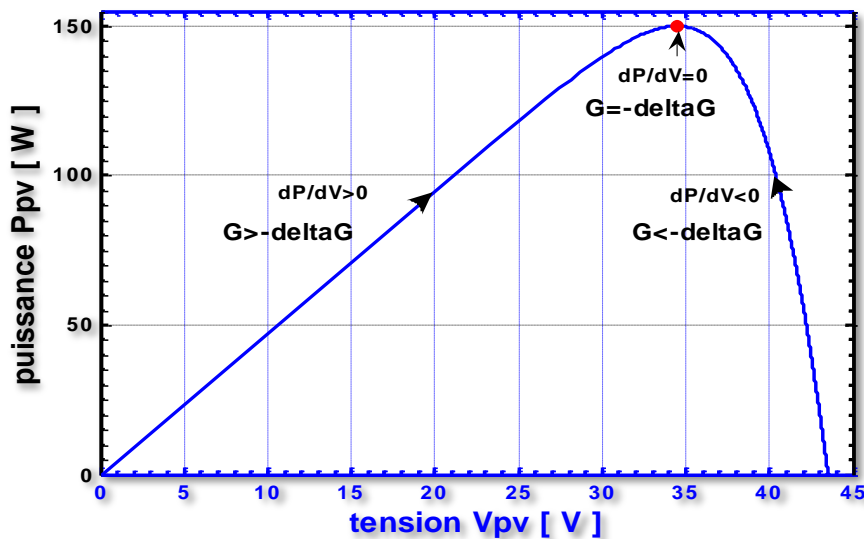


Figure 4.18. MPP par méthode incrémentation de la conductance.

On déduit donc :

- $G > -\Delta G \Rightarrow$ On augmente $V_{PV} \Rightarrow$ on diminue α
- $G = -\Delta G \Rightarrow$ On garde V_{PV} constant \Rightarrow on ne modifie pas α
- $G < -\Delta G \Rightarrow$ On diminue $V_{PV} \Rightarrow$ on augmente α

Il existe un cas dans lequel on ne peut pas comparer les conductances : lorsque le système était effectivement au PPM à l'itération précédente. En effet, dans ce cas, le rapport cyclique n'a pas été modifié et donc V_{GPV} est restée constante. La conductance incrémentielle ΔG n'est alors pas

définie (il faudrait diviser par 0 pour la Calculer). Il suffit dans ce cas d'observer les variations de I_{GPV} . On déduit les variations de V_{GPV} à provoquer de la :

- $\Delta I_{GPV} = 0 \Rightarrow$ On garde V_{GPV} constant on ne modifie pas α
- $\Delta I_{GPV} > 0 \Rightarrow$ On augmente V_{GPV} on diminue α
- $\Delta I_{GPV} < 0 \Rightarrow$ On diminue V_{GPV} on augmente α

Ceci explique pourquoi le 1er test de l'algorithme est $dV_{GPV} = 0$, chose que nous pouvons constater dans le schéma fonctionnel de l'algorithme donné juste après :

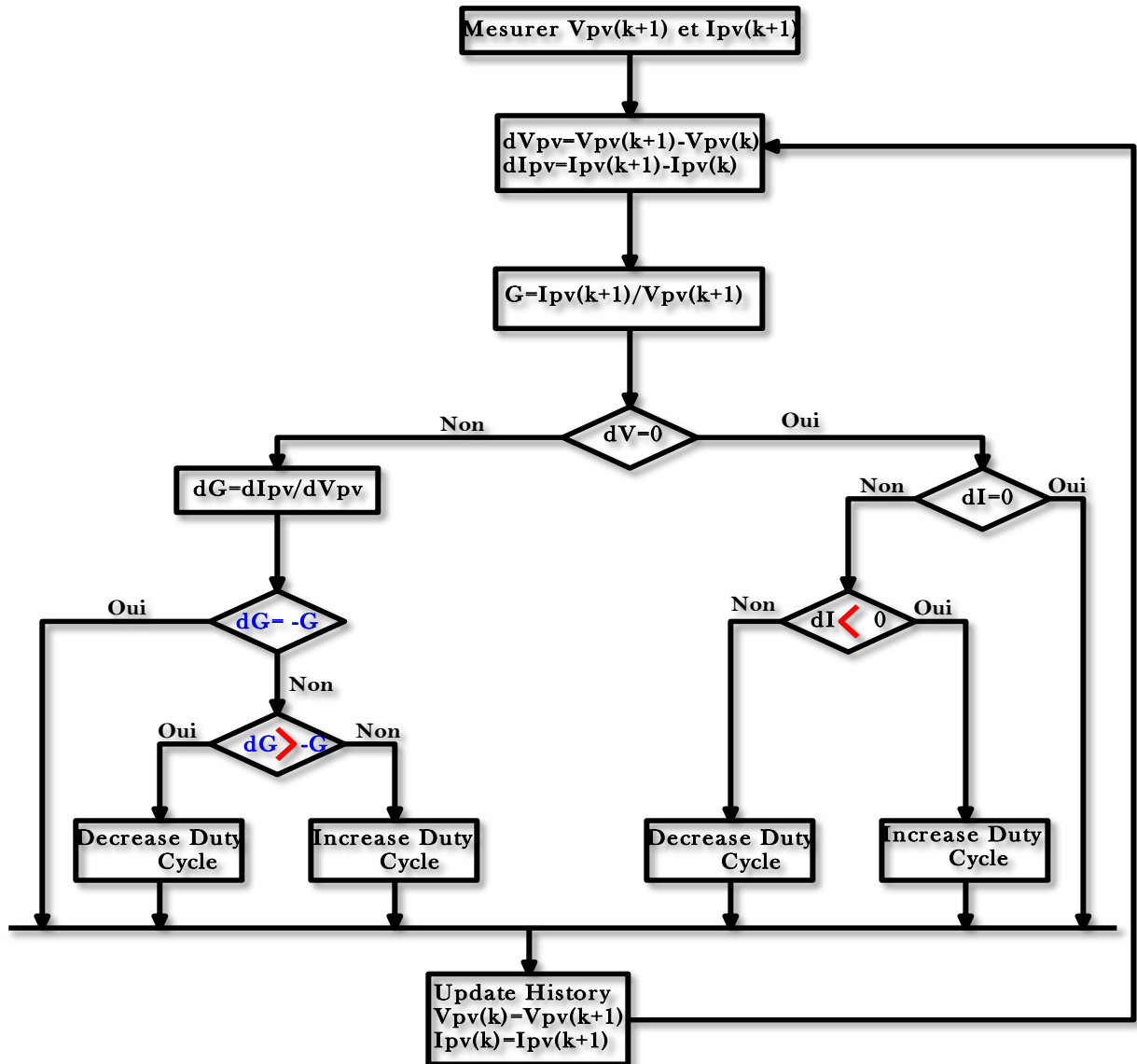


Figure 4.19 .algorithme d'une technique MPPT basé sur la méthode (Inc.CoN)

➤ Etat de la puissance

Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 25 ms), Les grandeurs électriques oscillent autour de leurs valeurs optimales: La puissance d'entrée (sortie) du convertisseur (figure4.22a) oscille autour des point suivantes : 149.85 W et 149.96 W pour, $G=1\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, 87.62 et 87.66 pour $G=.6\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$.

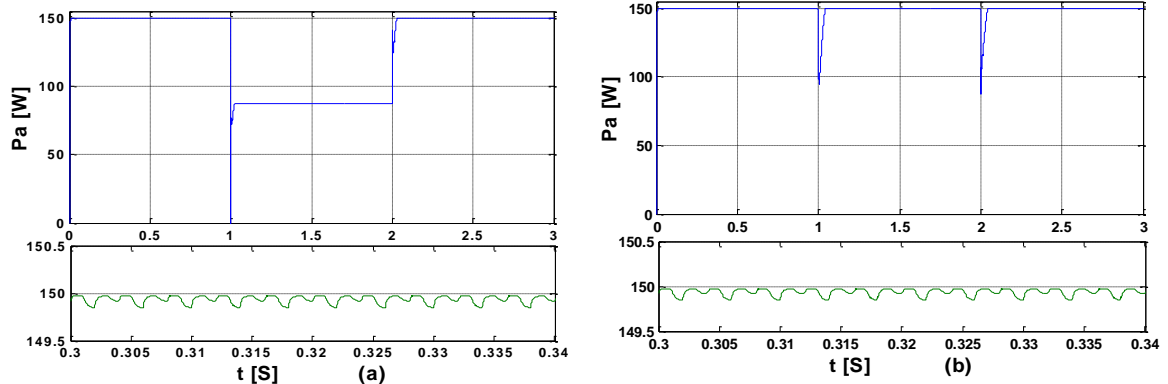


figure4.22. Puissance du GPV en fonction du temps : Variation de l'ensoleillement (a) et de la charge(b).

Pour s'assurer de la convergence du système autour des conditions optimales, nous avons vérifié qu'à fréquence de 1 kHz et un rapport cyclique de 0.55 et 0.43. Cette dernière valeur est en bon accord à celle obtenue lors de l'analyse du fonctionnement optimal du convertisseur boost. Ceci montre bien le fonctionnement optimal du système PV.

Les oscillations obtenues dépendent fortement de la fréquence augmente (diminue), le système devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω , nous avons représenté sur la (figure 4.22b) les résultats de simulation de la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur pour un éclairement de 1kW/m^2 et une température de 25°C . Il apparaît qu'au bout de 45 ms, le système PV converge vers le point PPM.

➤ Etat du rapport cyclique

Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 30 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond le point PPM (Figure 4.23a). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 30 ms), le rapport cyclique du convertisseur, augmente puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond le point PPM. Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour des points suivants :

0.552 et 0.56 pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 0.428 et 0.436 pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

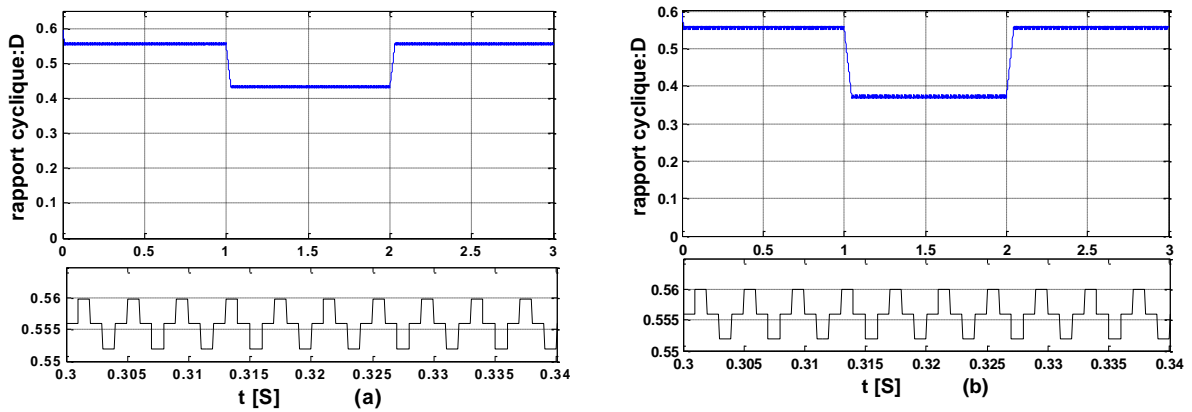


Figure 4.23. Rapport cyclique D en fonction du temps : Variation de l’ensoleillement (a) et de la charge(b).

Pendant les deux changements de charge (qui dure 50 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue (augmente) puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond le point PPM (Figure 4.23b). Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour de :

0.552 et 0.56 pour $R_{ch}=40\Omega$, 0.368 et 0.376 pour $R_{ch}=20\Omega$.

➤ **Etat de la tension**

Dans les deux cas de changement de l’intensité d’éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d’éclairement (qui dure 30 ms), le système converge vers 0V, puis converge vers un nouveau PPM (figure 4.24a). Pendant le deuxième changement d’éclairement (qui dure 30ms), le système converge vers la tension du circuit ouvert 40V, puis converge vers un nouveau PPM. La tension d’entrée du convertisseur oscille autour de :

34.1 V et 34.7 V pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 33.4 V et 33.85 V pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

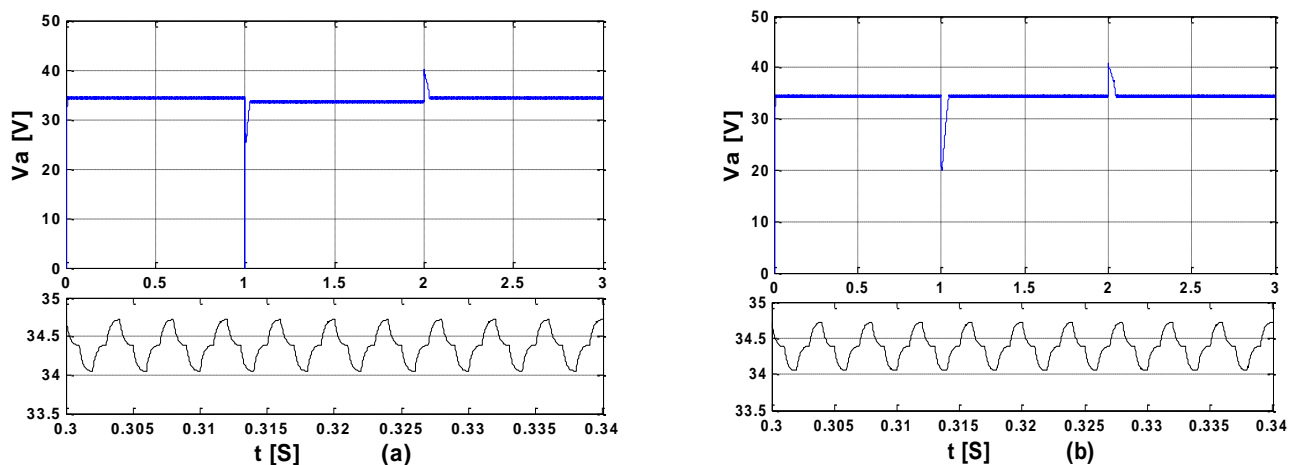


Figure 4.24. Tension du GPV en fonction du temps : Variation de l’ensoleillement (a) et de la charge(b).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω nous avons représenté (figure 4.24b) les résultats de simulation la tension du GPV pour un éclairement de 1kW/m^2 et une température de 25°C . Il apparaît qu’au bout de 50 ms, le système PV converge vers le point PPM. Aussi, nous avons vérifié (figure 4.25) que le courant d’entrée du convertisseur oscille autour de :

4.32A et 4.4A pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 2.58 et 2.62A pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

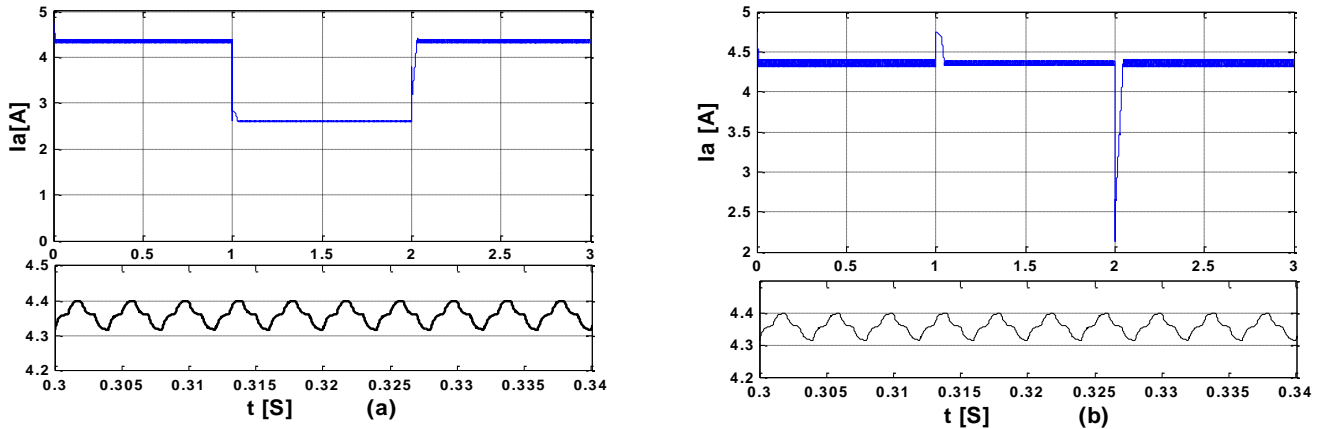


Figure 4.25. Courant du GPV en fonction du temps : Variation de l’ensoleillement(a) et de la charge(b).

IV.7 La technique “Hill Climbing”(H.C)

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s’arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du générateur et la valeur du rapport cyclique appliqué du Convertisseur Statique. Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque $\frac{dP_{pv}}{dD}$ est forcé à zéro par la commande, comme le montre la (figure 4.26).

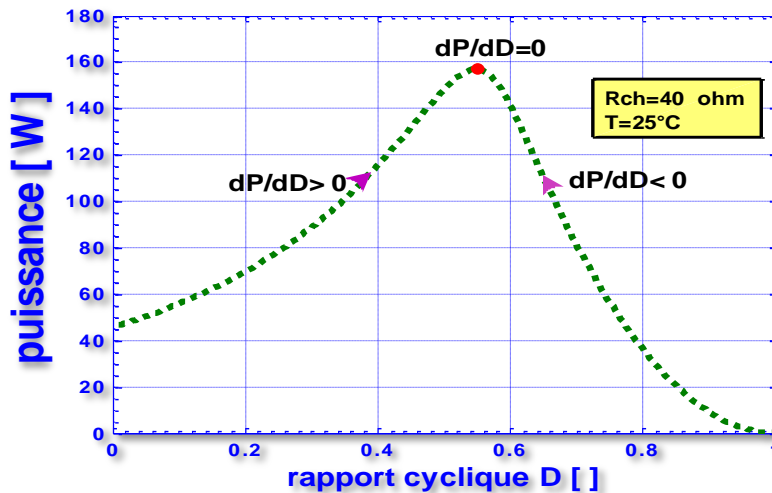


Figure 4.26. Relation entre P_{GPV} et le rapport cyclique D du convertisseur statique boost.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la (figure 4.27). La variable *Slope* correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. D et P_{GPV} représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_{GPVn} est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{GPVn-1} , en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur *Slope* change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier [9].

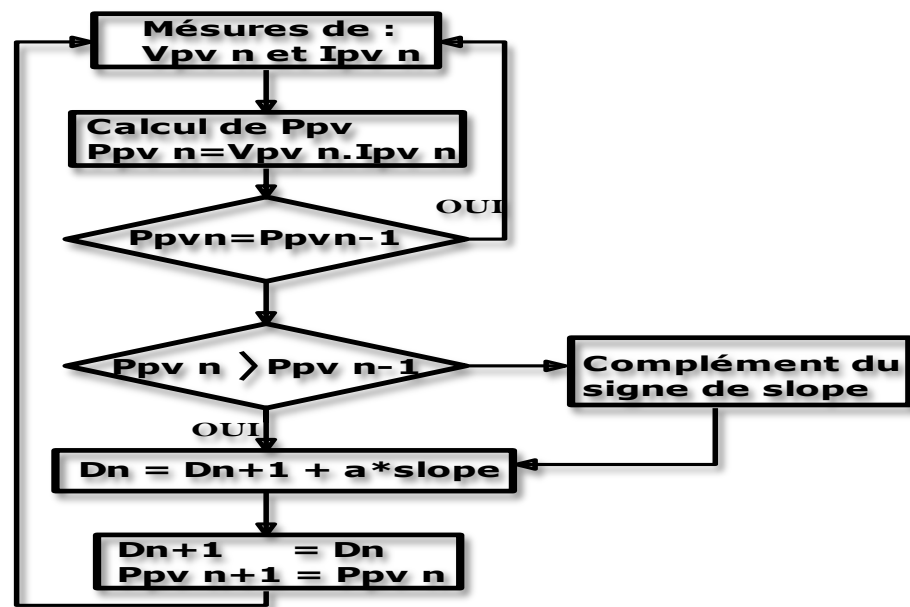


Figure 4.27. Algorithme de la technique hill_climbing

Le modèle Simulink de la technique Hill Climbing est montré sur est la (figure 4.28) :

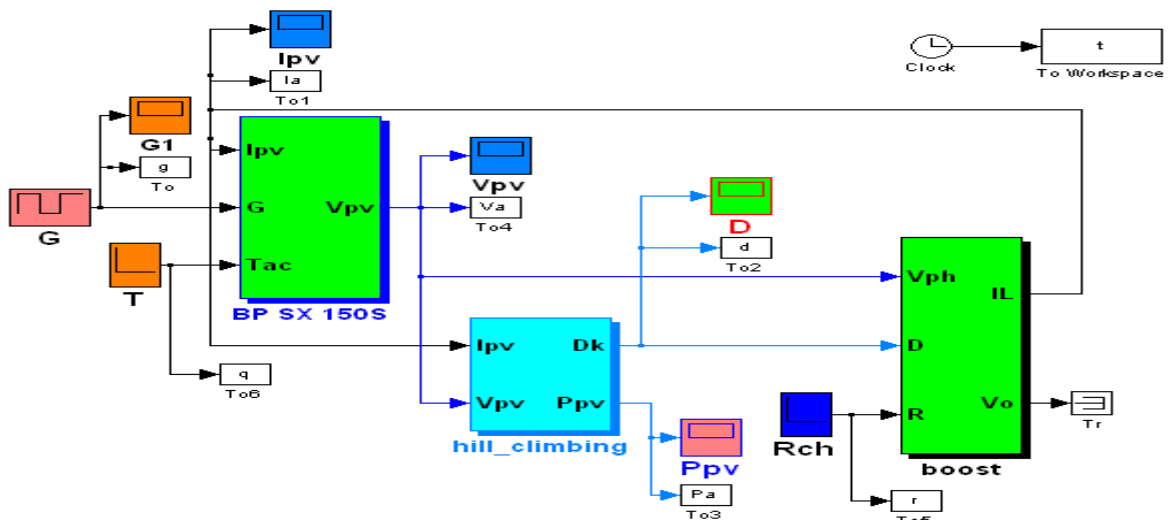


Figure 4.28. Modèle de simulation du GPV adapte par la technique MPPT (hill_climbing).

➤ **Résultat de simulation**

Sur la (figure 4.29) le générateur photovoltaïque à subir le changement de deux paramètres :

a) l'éclairement

b) charge

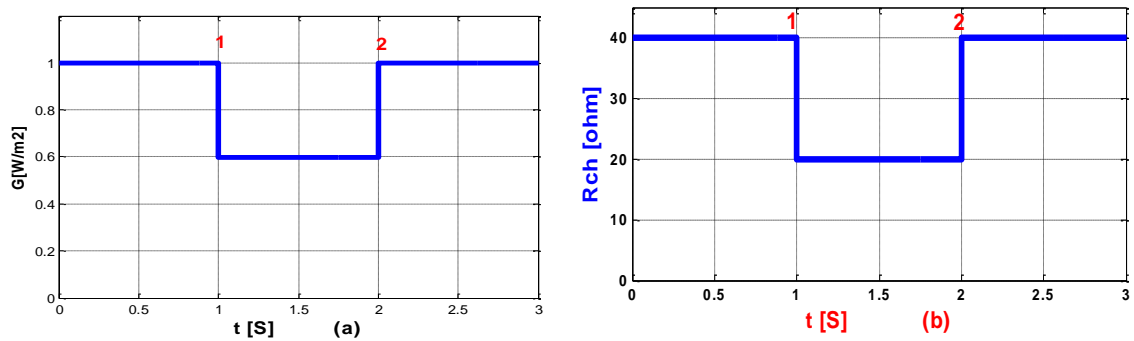


Figure 4.29. Variation de l'ensoleillement en fonction du temps (a) et de la charge(b)

➤ **Etat de la puissance**

Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 40 ms), le système converge vers un nouveau PPM (figure4.30a). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 40ms), le système converge vers l'état de départ du PPM. Aussi, nous avons vérifié que La puissance d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour des points suivantes : 149.2 W et149.9 W pour $G=1kW/m^2$ et $T=25^{\circ}C$, 87.5W et 87.6W pour $G=.6kW/m^2$ et $T=25^{\circ}C$.

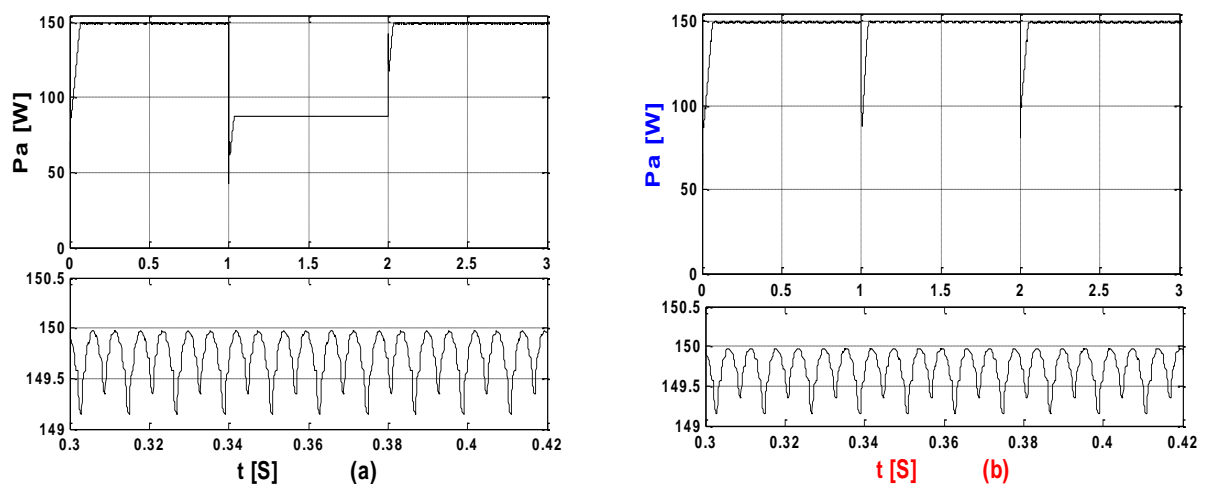


Figure 4.30. Variation de la puissance du GPV : Variation de l'ensoleillement (a) et de la charge(b).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω , nous avons représenté (figure 4.30b) les résultats de simulation la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur pour un éclairement de $1kW/m^2$ et une

température de 25 °C. Il apparaît qu'au bout de 70 ms, le système PV converge vers le nouveau PPM.

➤ Etat du rapport cyclique

Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 45 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au PPM (Figure 4.31a). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 45ms), le rapport cyclique du convertisseur, augmente puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond au PPM. Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour des points suivants :

0.545 et 0.565 pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 0.440 et 0.425 pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

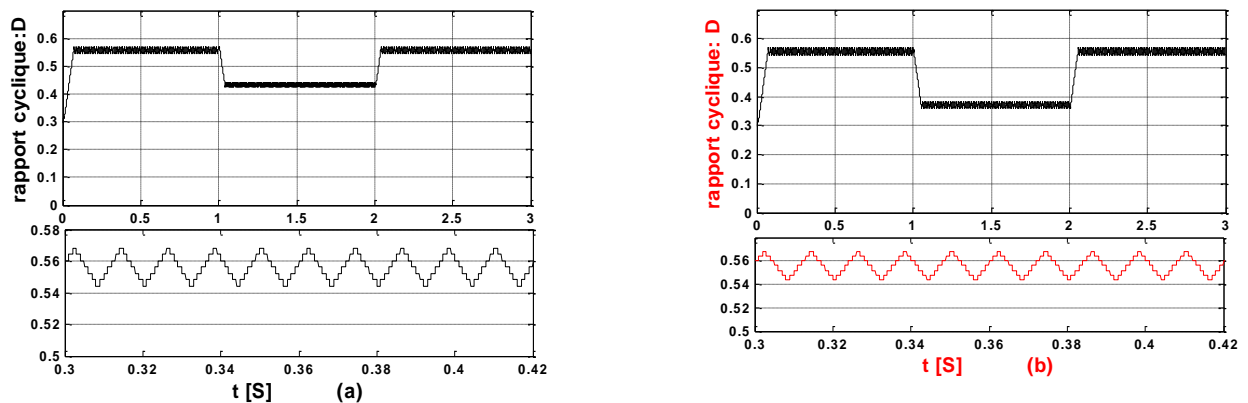


Figure 4.31. Rapport cyclique D en fonction du temps : Variation de l'ensoleillement(a) et de la charge(b).

Pendant les deux changements de charge (qui dure 60 ms), le rapport cyclique du convertisseur, diminue (augmente) puis converge vers une nouvelle valeur qui correspond le point PPM (Figure 4.23b). Le rapport cyclique du convertisseur oscille autour de : 0.552 et 0.56 pour $R_{ch}=40\ \text{ohm}$, 0.36 et 0.38 pour $R_{ch}=20\ \text{ohm}$.

➤ Etat de la tension

Dans les deux cas de changement de l'intensité d'éclairement, il apparaît que : Pendant le premier changement d'éclairement (qui dure 40 ms), le système converge vers la tension 0V puis converge vers un nouveau PPM (figure4.32). Pendant le deuxième changement d'éclairement (qui dure 45ms), le système converge vers la tension du circuit ouvert 40V, puis converge vers un nouveau PPM.

La tension d'entrée du convertisseur oscille autour de :

33.5 V et 35 V pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 33.2 V et 34 V pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

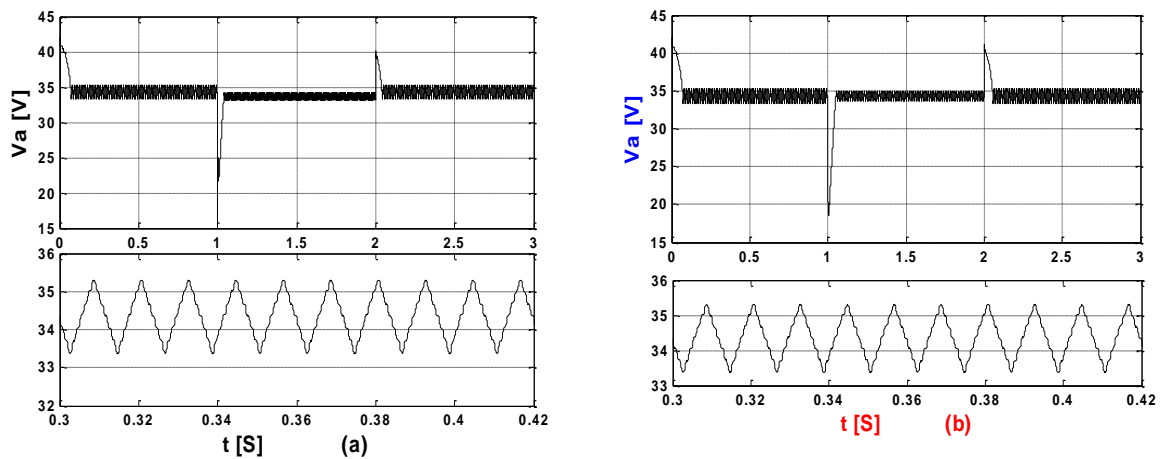


Figure 4.32. Tension du GPV en fonction du temps : Variation de l'ensoleillement (a) et de la charge(b).

Lorsque la charge varie de 40Ω à 20Ω nous avons représenté (figure 4.41b) les résultats de simulation la tension du GPV pour un éclairement de 1kW/m^2 et une température de 25°C . Il apparaît qu'au bout de 50 ms, le système PV converge vers le point PPM. Aussi, nous avons vérifié (figure 4.33) que le courant d'entrée du convertisseur oscille autour de :

4.32A et 4.4A pour $G=1\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, 2.58 et 2.62A pour $G=.6\text{kW/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

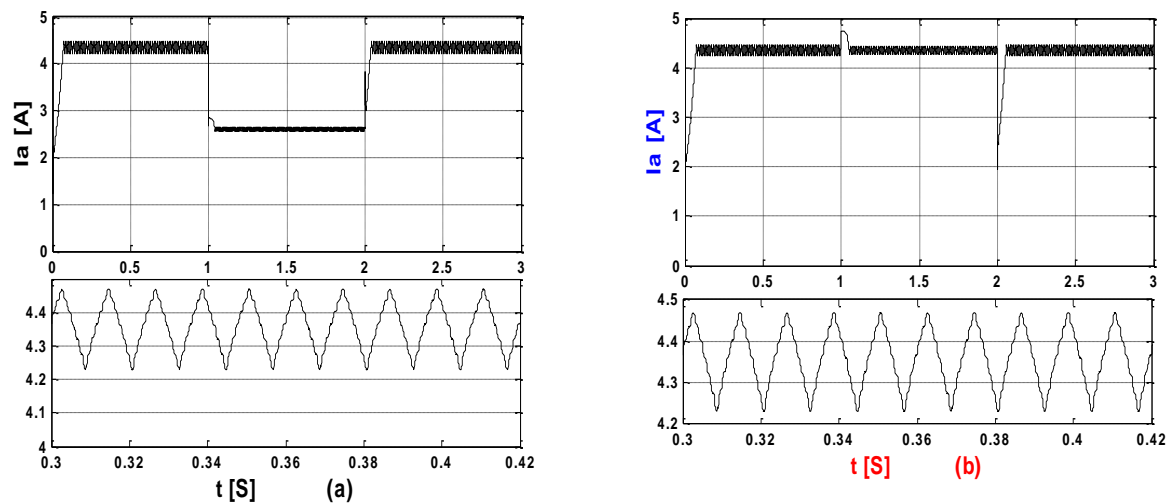


Figure 4.33. Courant du GPV en fonction du temps : variation de l'ensoleillement (a) et de la charge(b).

IV.8 Comparaison entre trois techniques MPPT (P&O, Inc.CoN et H.C)

La (figure 4.34) représente les conditions de simulation que nous avons utilisés pour analyser les performances énergétiques des trois types de model à comparer, à savoir trois algorithmes (P&O), (Inc.CoN), (H.C),

Les trois model doivent être simulé dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons de performances des étages d'adaptation et en déduire s'il y a

Amélioration des performances ou non. La (figure 4.34) montre le model simulink pour la comparaison des algorithmes.

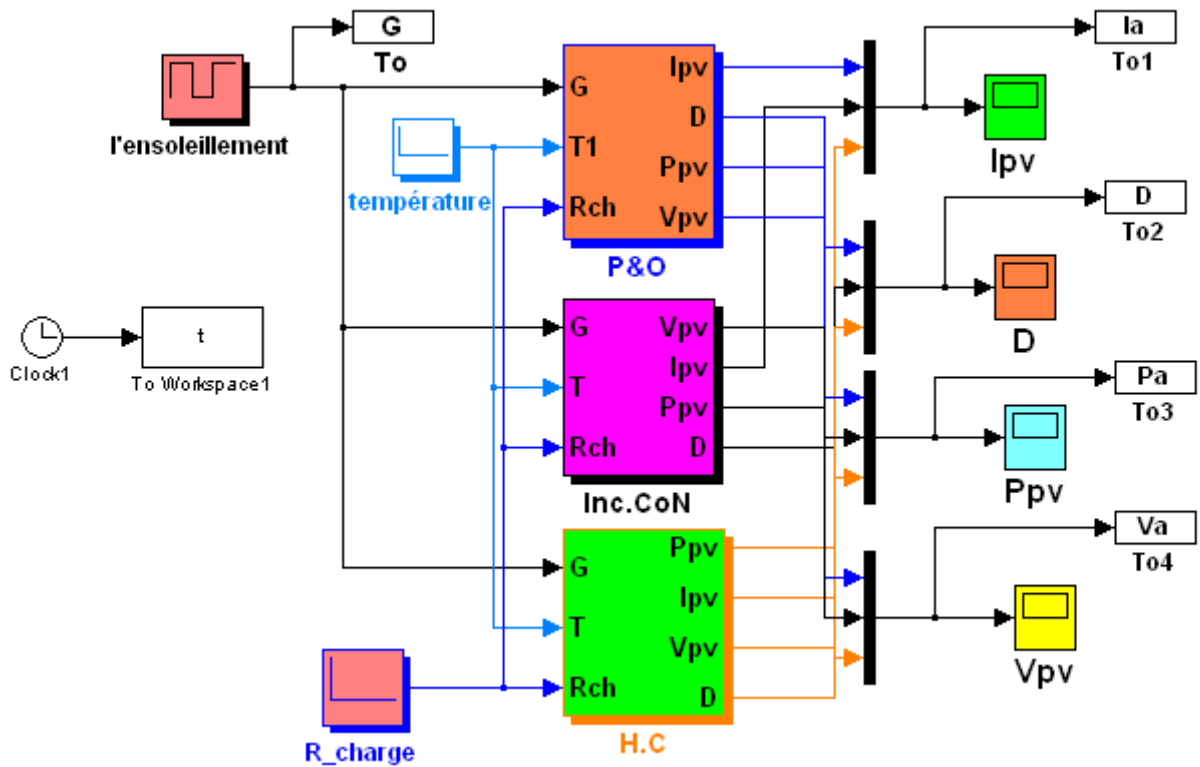


Figure 4.34. Modèle de simulation utilisée pour la comparaison des trois techniques.

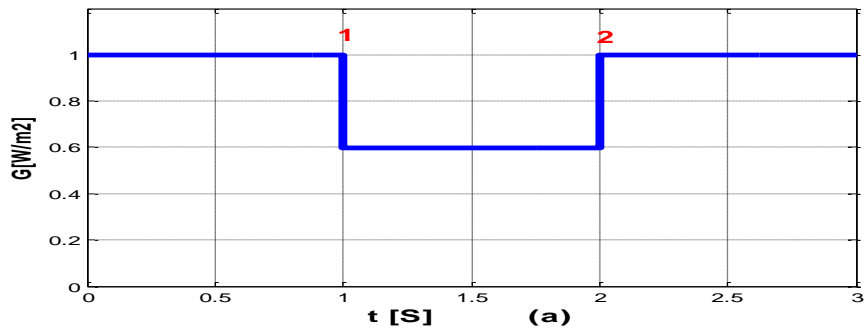


Figure 4.35. Variation de l'éclairement en fonction du temps.

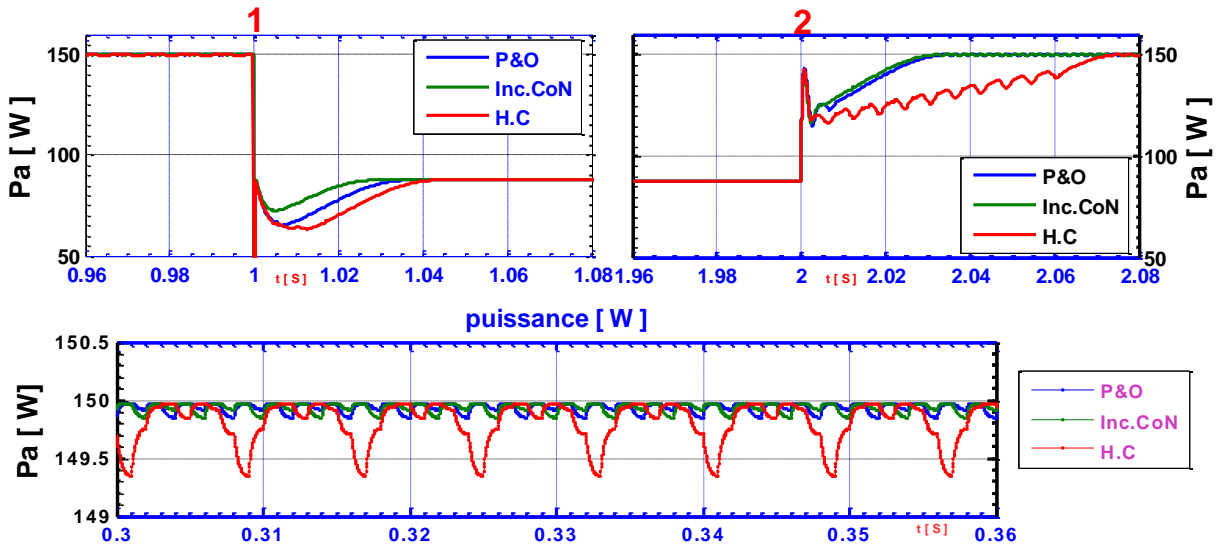


Figure 4.36. Variation du P_{GPV} en fonction du temps pendant le changement de l'ensoleillement

Pour un ensoleillement de $1000W/m^2$, les algorithmes nous permettent d'atteindre P_{opt} qui est de 150W, de même lors d'une variation brusque de l'ensoleillement de 1000 à $600W/m^2$, le système converge vers la tension du court-circuit, puis converge vers un nouveau PPM. Nous atteignons $P_{opt}=87.67W$ avec un temps de 25ms pour I.C, 35ms pour P&O et 40ms pour H.C. Par contre, lors d'une variation brusque de l'ensoleillement de 600 à $1000W/m^2$, les algorithmes ne suivent plus le PPM et mettent le générateur à la tension de circuit ouvert 40V environ, puis convergent vers un nouveau PPM, $P_{opt}=150W$ avec un temps de 30ms pour I.C, 35ms pour P&O et 40ms pour H.C.

Ceci s'explique par le fait que la variation du pas ne se fait pas de manière optimale. En effet, lors d'une grande variation d'ensoleillement, l'algorithme incrémental (ou décremental), se retrouvant ainsi rapidement en butée. L'algorithme reste bloqué en ce point, puisque la variation de puissance devient nulle.

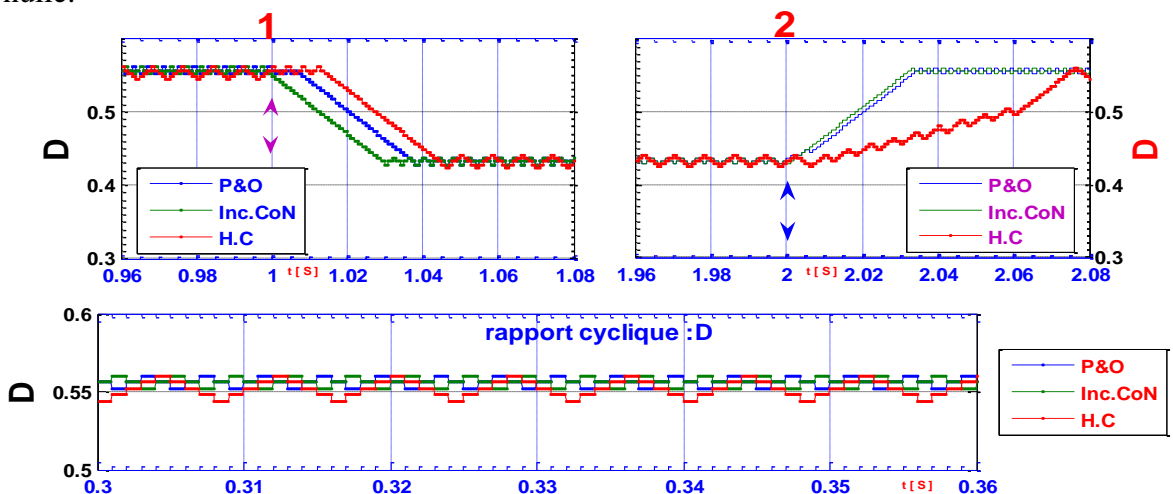


Figure 4.37 rapport cyclique D pendant le changement de l'ensoleillement

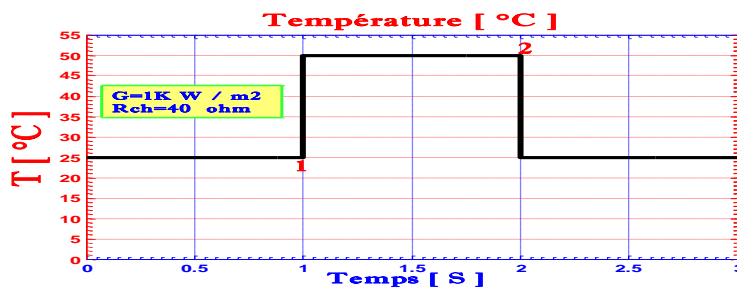


Figure 4.38. Variation de température en fonction du temps.

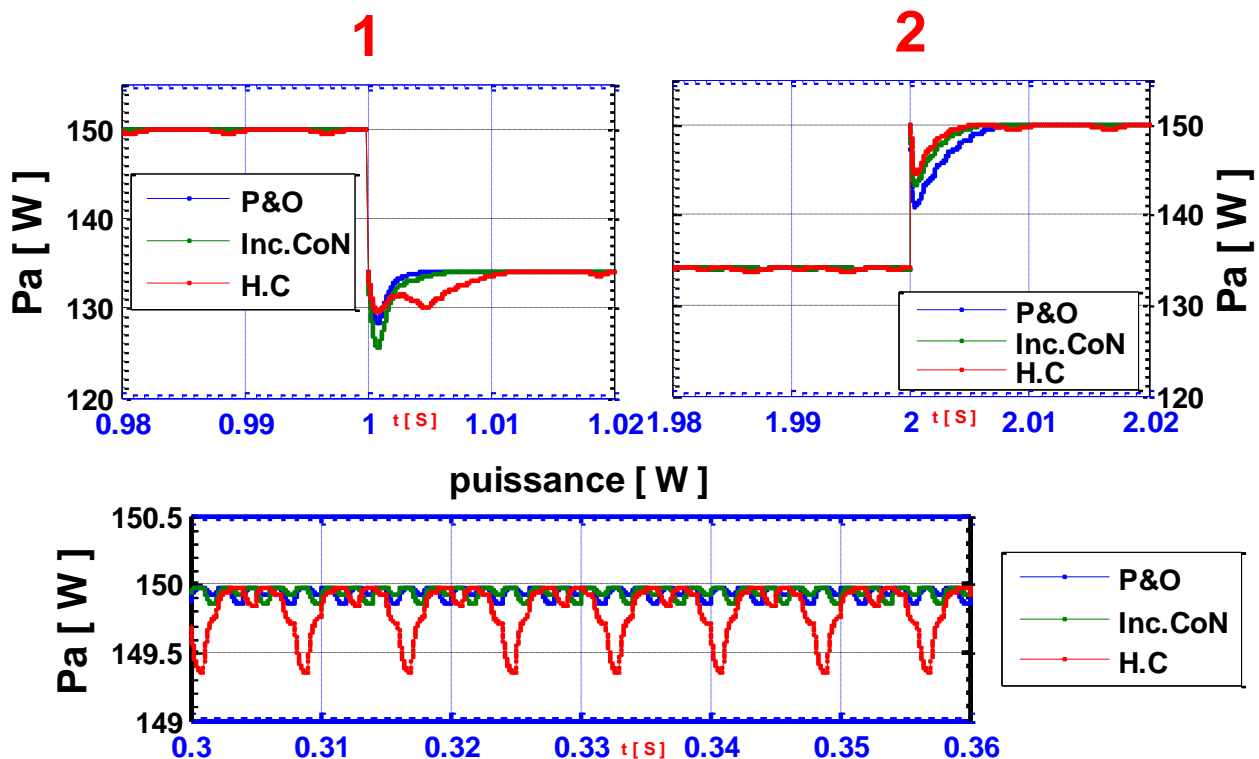


Figure 4.39. Variation du P_{GPV} en fonction du temps pendant le changement de la température.

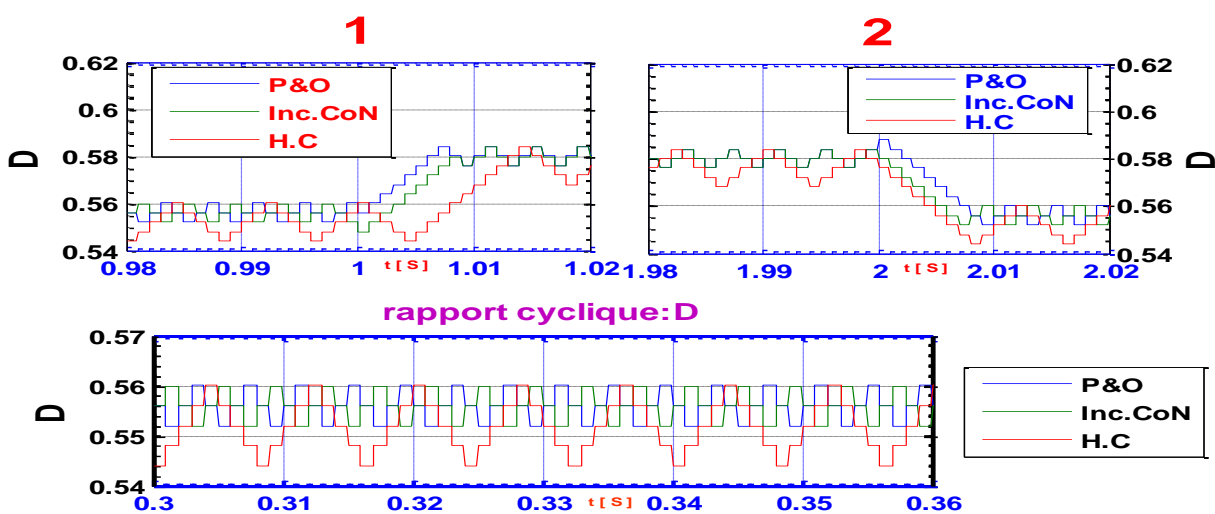


Figure 4.40 rapport cyclique D en fonction du temps pendant le changement de la température.

L'ensemble des résultats obtenus montre que :

- La commande MPPT elle régule la puissance fournie par le générateur photovoltaïque à sa valeur optimale.
- la meilleure technique de MPPT et le P&O.
- la technique P&O montre sa limite en réponse à fréquence de commutation basse.
- la technique Inc.CoN a une efficacité inférieure aux technique P&O mais son temps de réponse tout a fait indépendant aux valeurs d'ensoleillement et à son augmentation d'efficacité avec le niveau d'ensoleillement cette technique peut être une bonne alternative aux technique P&O dans les applications caractérisées par haut rapidement et la variation continue de l'ensoleillement.
- la technique de Hillclimbing est toujours une logique très simple qui fournit une efficacité bonne avec de bas couts.

IV.9 Conclusion

Nous avons analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par convertisseur DC-DC (hacheur boost), régulé par une commande MPPT.

Les résultats obtenus montrent que : Pendant une durée inférieure et en variant d'une manière automatique le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur le système converge vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge.

Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce sujet concernent la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du GPV à la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur. La chaîne énergétique constituée du générateur photovoltaïque, de l'étage d'adaptation basé sur la techniques de poursuit de point de puissance maximal et la charge a été abordé dans sa globalité en vue de faire une comparaison entre les trois techniques du MPPT, Perturbation et Observation, Incrémentation de l'Inductance et Hillclimbing.

Avant d'aborder la problématique du MPPT, nous avons tout d'abord étudié le Contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'est avéré nécessaire pour acquérir une connaissance pratique approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Pour mieux comparé les algorithmes de contrôles.

Dans ce projet nous avons traité les points suivants :

1-Nous avons étudié, modélisé et simulé le générateur photovoltaïque, l'étude est portée sur le principe de l'effet photovoltaïque et les équations mathématiques du schéma équivalent du générateur. A partir des équations mathématiques un modèle en simulink à été développé. La simulation du modèle simulink nous a permis d'étudier les caractéristiques courant -tension et puissance-tension en tenant compte des variations brutales des conditions météorologique.

2- Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC-DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal .Une étude approfondie sur les différents algorithmes des techniques de poursuite de point de puissance maximal et le choix du convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique des différente configuration des convertisseur DC-DC nous a facilité la tache de développement un modèle de recherche du MPPT en simulink. La simulation du modèle simulink du MPPT assemblé avec le modèle du générateur pour les trois algorithmes : P&O, Inc.CoN, et H.C on a obtenu les caractéristiques de la variation du MPPT en fonction de la variation brusque des conditions atmosphérique.

3- Un modèle simulink des trois techniques du MPPT à été élaboré. Une comparaison a été faite entre les différentes techniques "P&O, Inc.CoN et H.C" dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons de performances des étages d'adaptation et en déduire Inc.CoN plus rapide et plus stable.

Bibliographies

- [1] R. Andoulsi "étude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph modélisation, analyse et commande ", Thèse de doctorat université des sciences et technologies de Lille 2001.
- [2] O. Gergoud "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan 2001.
- [3] D. Bellala " contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie application aux systèmes photovoltaïques ", Thèse de doctorat université de Batna 2010.
- [4] G. ROUSSELOT, "Les énergies AEDIS" éditions 03200 VICHY 2007.
- [5] G. THABUIS, "Energies Renouvelables et Efficacité Energétique" Association Hespul. Mars 2007. Available on <http://www.hespul.org>.
- [6] A. J. Mahdi, W. H. Tang and Q. H. Wu " improvement of a MPPT algorithm for PV systems and Its experimental validation ", Department of Electrical Engineering and Electronics The University of Liverpool, Liverpool, L69 3GJ, U.K.
- [7] S. Belakehal "conception et commande des machines a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables ", Thèse de doctorat université de Constantine 2010.
- [8] M. Djarallah " contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique ", Thèse de doctorat université de Batna 2008.
- [9] B. Stéphane " nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Thèse de doctorat université de Toulouse 2009.
- [10] C. lishou "optimisation en temps réel du fonctionnement du générateur photovoltaïque d'une microcentrale énergétique et gestion du transfert d'énergie par processeurs spécialises", Thèse de doctorat l'école nationale supérieure universitaire de technologie (E.N.S.U.T) 1987 DAKAR.
- [11] S. Ghabrou "modélisation et simulation d'un système de pompage alimenté par un générateur photovoltaïque dans l'environnement MATLAB/SIMULINK ", Thèse de magister université de Batna année 2001/2002.
- [12] A. Ricaud " Convertisseurs photovoltaïques" , Nov. 2007
- [13] R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne, T. Kerbache " Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ", Sciences&Technologie B-N°26, décembre (2007) ,49-54.

- [14] D. S.Koussa, M.Haddadi “Modélisation d’un générateur photovoltaïque dans l’environnement « MATLAB» ”, 4th International Conférence on Computer Integrated Manufacturing CIP’2007 03-04.
- [15] H. L.Tsai, C. S.Tu, and Y.J. Su, “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK”, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA.
- [16] “ énergie solaire photovoltaïque ”, volume1 physique et technologie de la conversion photovoltaïque.
- [17] j. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy “ le pompage photovoltaïque ”, Manuel de cours à l’ intention des ingénieurs et des techniciens, institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français.
- [18] S. Ndoye “ modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK de la chaine d’alimentation d’une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique ” . Ndoye et al / J. Sci.Vol. 9, N° 2 (2009) 45 – 55
- [19] A. Cid bastor “ conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ”, Thèse de doctorat l’institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.
- [20] A. Aziz, K. Kassmi “Conception et modélisation d’un système photovoltaïque optimisé par une commande analogique munie d’un circuit de détection de dysfonctionnement et de redémarrage du système ”, Revue des Energies Renouvelables CER’07 Oujda (2007) 95 – 98
- [21] M. S. Jamri and T. C. Wei “Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State-Space Averaging Technique”, American Journal of Applied Sciences 7 (5): 682-691, 2010.
- [22] A. B. learreta “ réalisation de commandes MPPT numériques ”, Projet fin d’études universitat rovira/virgili.
- [23] C. Cédric “optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque ”, Thèse de doctorat université de Toulouse 2008.
- [24] K. Kassmi, M. Hamlaoui et F. Olivier “Conception et modélisation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.
- [25] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui “ Conception, modélisation et réalisation d’un système photovoltaïque de moyenne puissance”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 567 – 575.

- [26] C. Ali “ Etude de la Poursuite du Point de Fonctionnement Optimal du Générateur Photovoltaïque (G. PV) ”, SETIT 2005 3rd International Conférence: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Télécommunications March 27-31, 2005 – TUNISIA
- [27] V. Boitier, P. Maussion “ Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques”, 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
- [28] A. Yafaoui., B. Wu and R. Cheung “ implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems”, 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007.
- [29] A. Tchapo singo “système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.
- [30] H. Knopf “analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle”, Theses master of science in electrical engineering, Portland state university 1999.
- [31] M. Frederick “ design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply”, Department of electrical. Power engineering, Norwegian university of science and technology o.s bragstads plass 2e, 7491 Trondheim, Norway.
- [32] V. Boitier, P. Maussion “Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques ”, LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
- [33] A. P. Hu, “Evaluation of Micro Controller Based Maximum Power Point Tracking Methods Using dSPACE Platform”, Australian University Power Engineering Conference 2006.
- [34] A. Tchapo singo “système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.
- [35] M. S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras “ Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°3 (2007) 387 – 395
- [36] W. Xiao, G. Dunford “A Modified Adaptive Hill Climbing MPPT Method for Photovoltaic Power Systems”, 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004.
- [37] A. Rufer “cours d’électronique de puissance conversion DC/DC ”, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

[38] B. Amrouche, M. Belhamel and A. Guessoum “ artificial intelligence based p&o MPPT method for photovoltaic systems ” , Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 11 – 16.

[39] A. Oi “disign and simulation of photovoltaic water pumping system”, Theses master of science in electrical engineering, California polytechnic state University San Luis Obispo, 2005.

Caractéristique électrique du module photovoltaïque BP SX 150S [39]

Puissance maximale $P_{max.}=150$ W

Tension au point de la puissance maximale $V_{mp}=34.5$ V

Courant au point de la puissance maximale $I_{mp}=4.35$ A

Tension de circuit ouvert, $V_{oc}=43.5$ V

Courant de court circuit, $I_{sc}=4.75$ A

Coefficient de variation du courant I_{sc} en fonction de la température 0.065 ± 0.015 %/ °C.

Coefficient de variation de la tension V_{oc} en fonction de la température -160 ± 20 mV/ °C.

Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température -0.5 ± 0.05 %/ °C.

La température normale de fonctionnement de la cellule (NOCT) 47 ± 2 °C.

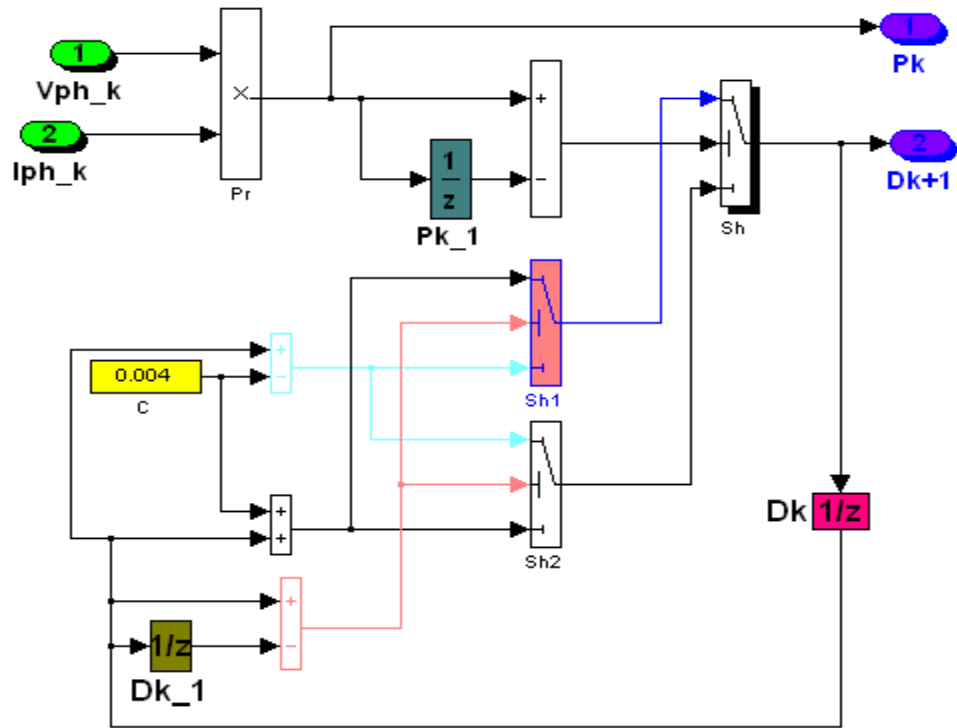


Figure A.1. Modèle Simulink de l'algorithme P&O.

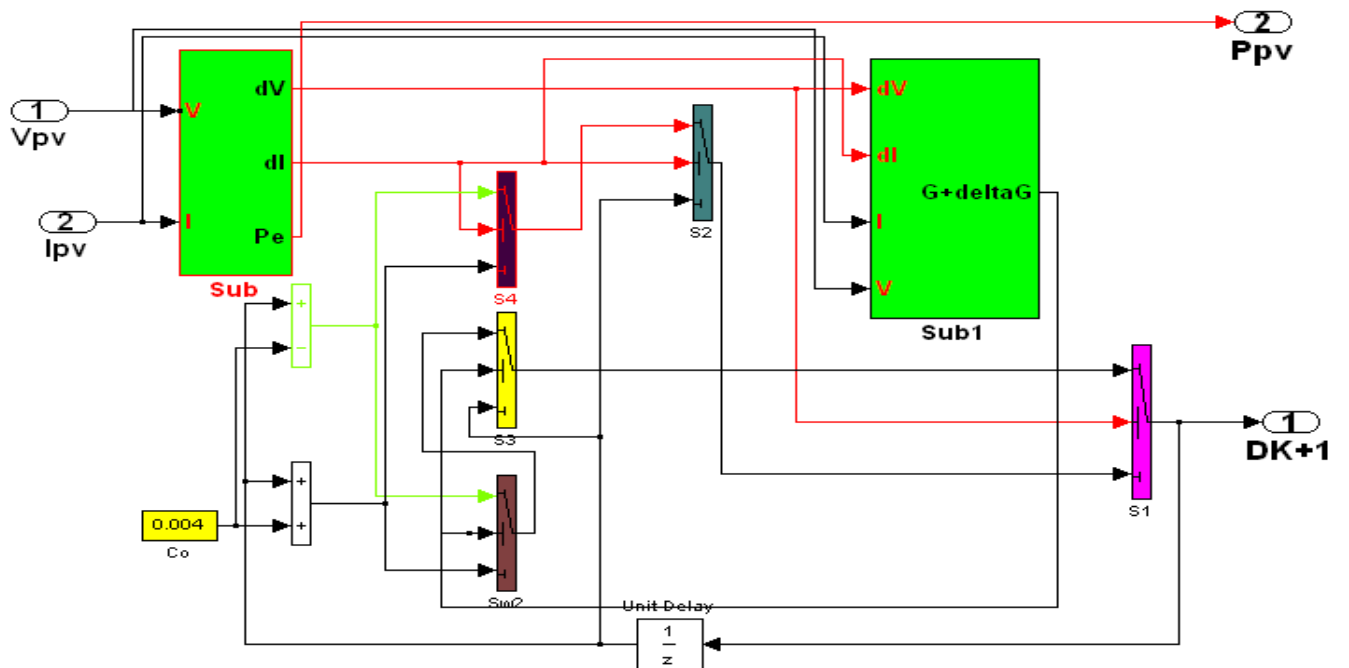


Figure A.2. Modèle Simulink de l'algorithme (Inc-Cond).

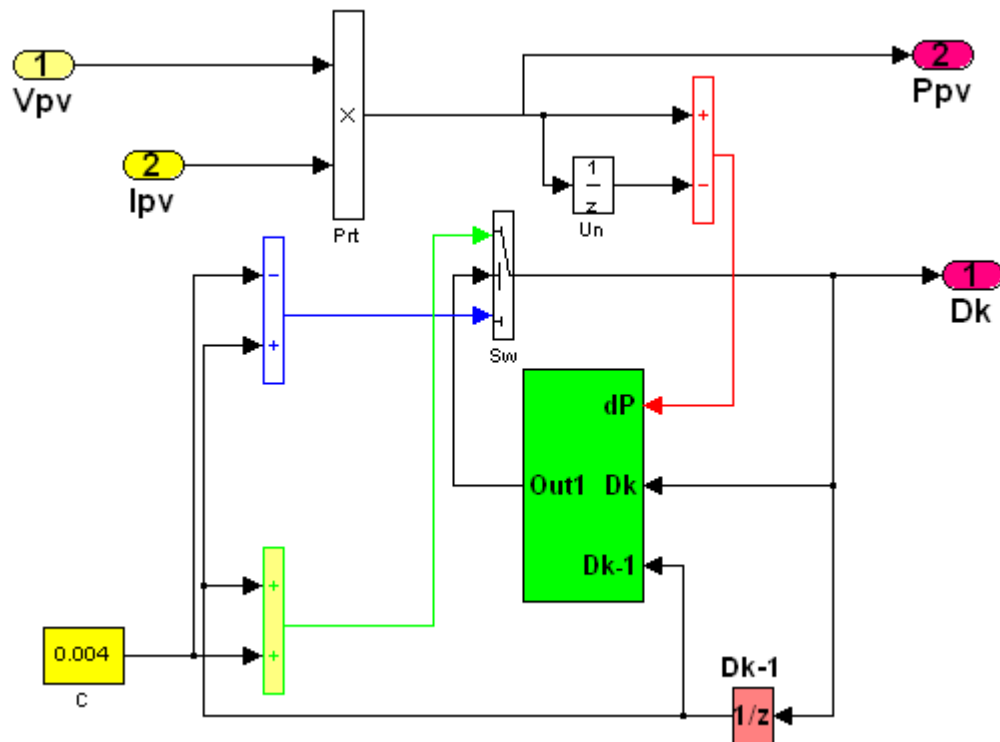


Figure A.3. Modèle Simulink de l'algorithme (hill_climbing)

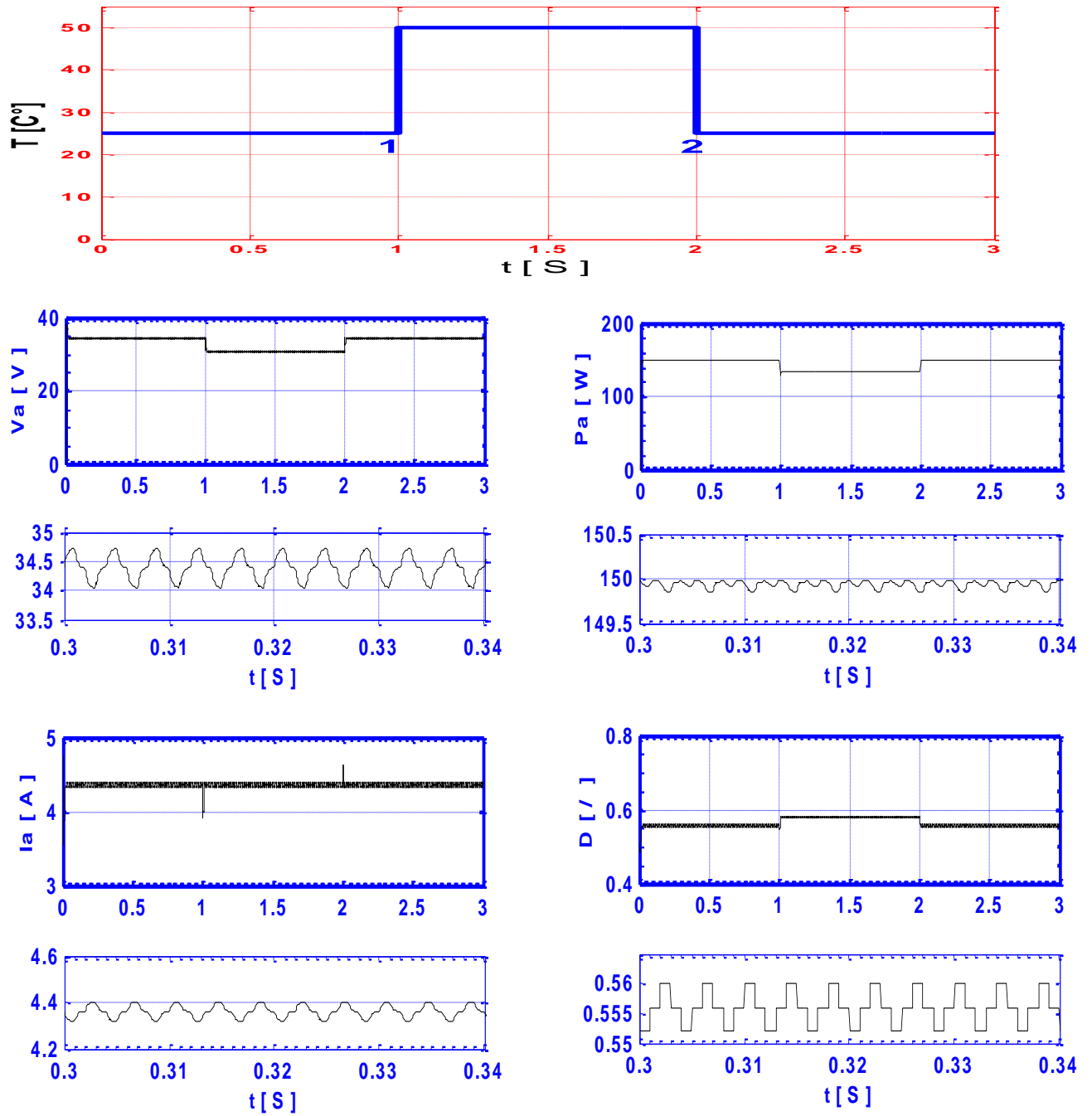


Figure C.1. Simulation de l'influence du changement de température sur les grandeurs électriques (tension, courant, puissance et rapport cyclique). ($G=1\text{KW}/\text{m}^2$, $R_{ch}=40\Omega$, algorithme P&O).

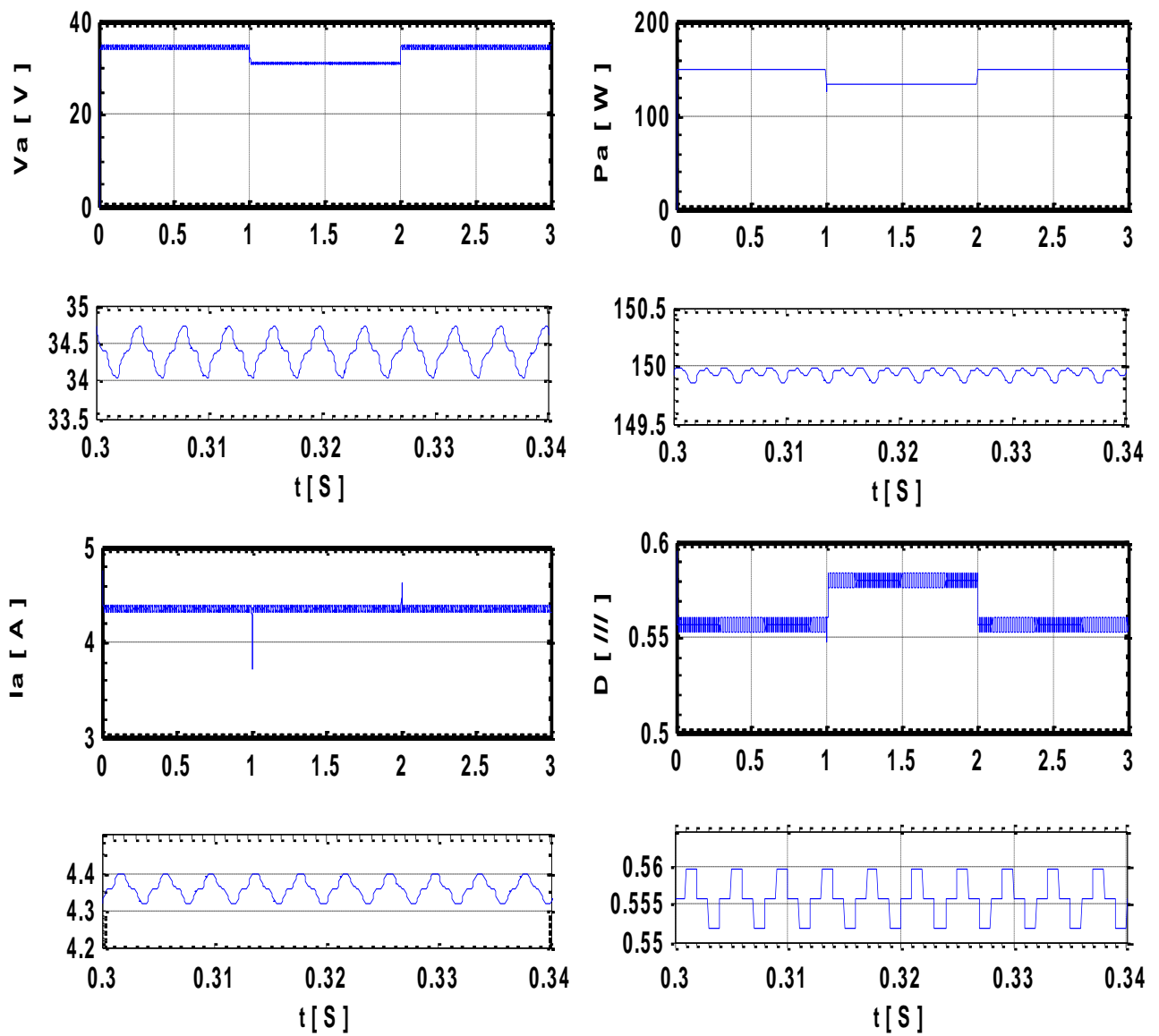


Figure C.2. Simulation de l'influence du changement de température sur les grandeurs électriques

(Tension, courant, puissance, rapport cyclique).

($G=1\text{KW/m}^2$, $R_{ch}=40\Omega$, algorithm Inc_Cond).

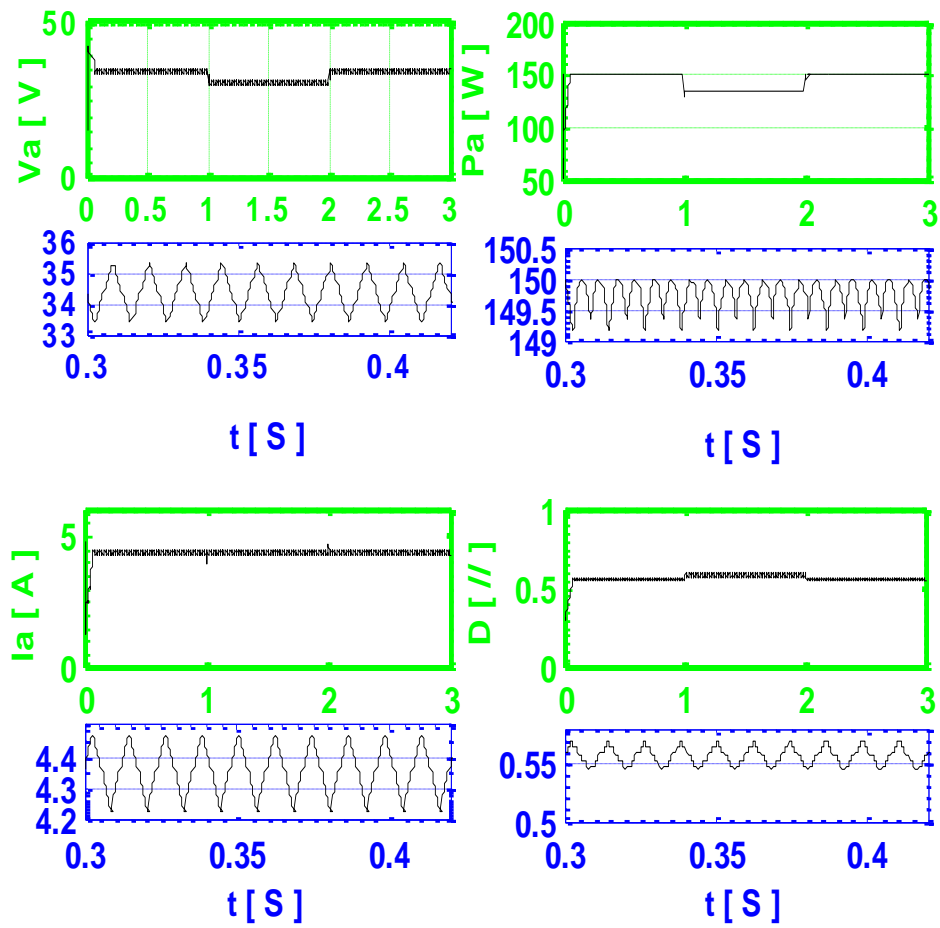
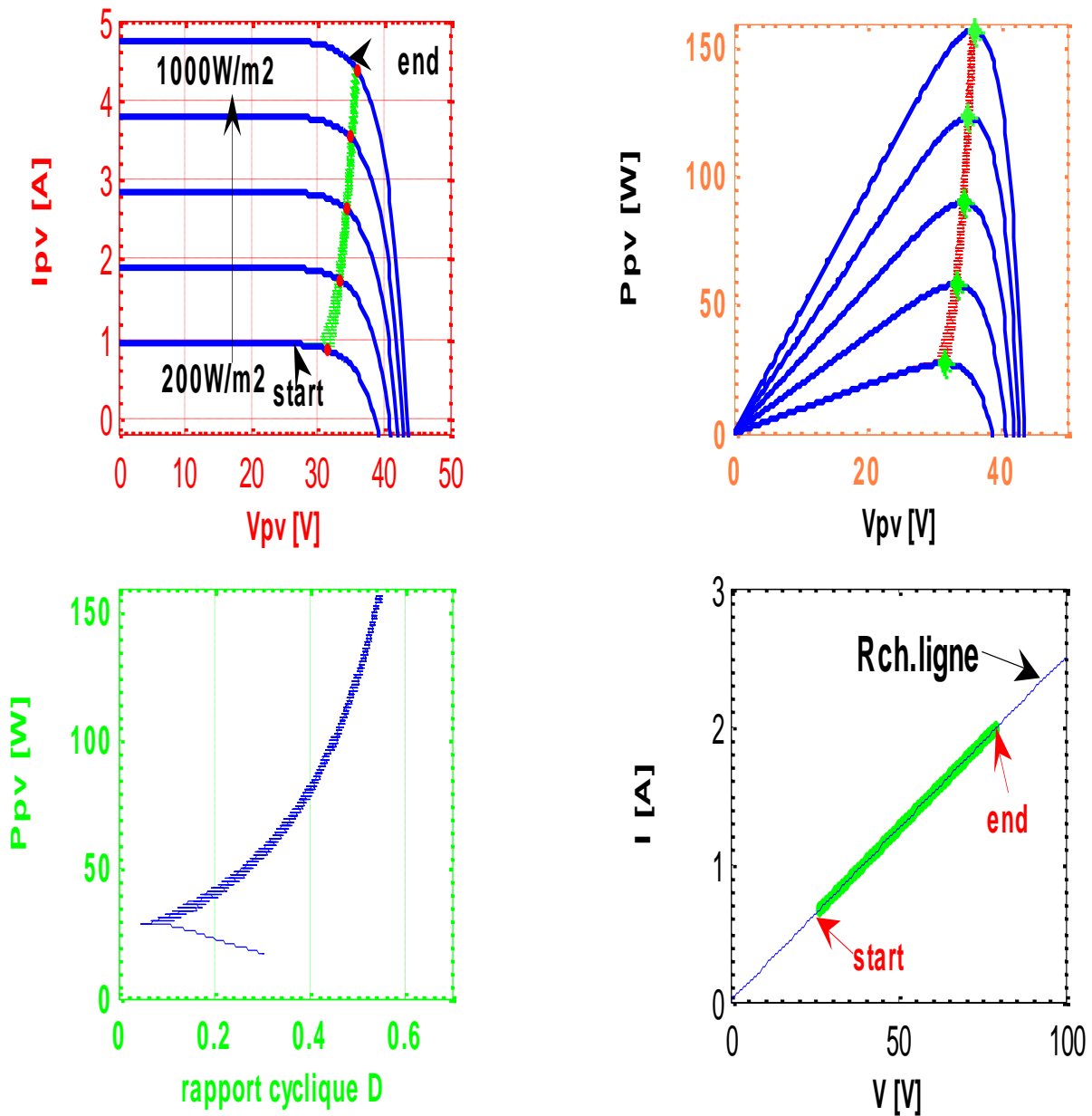
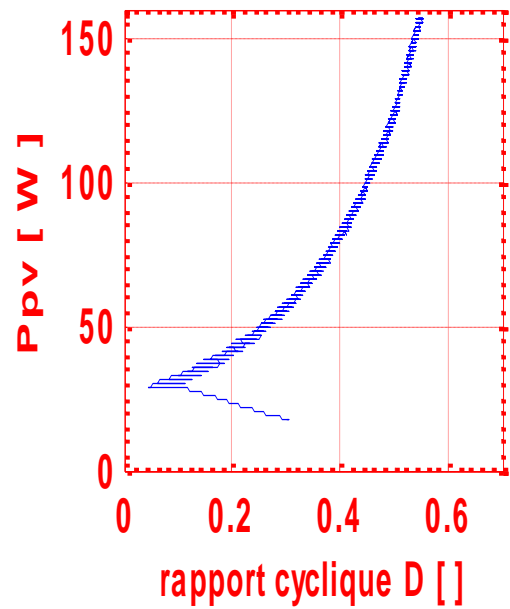
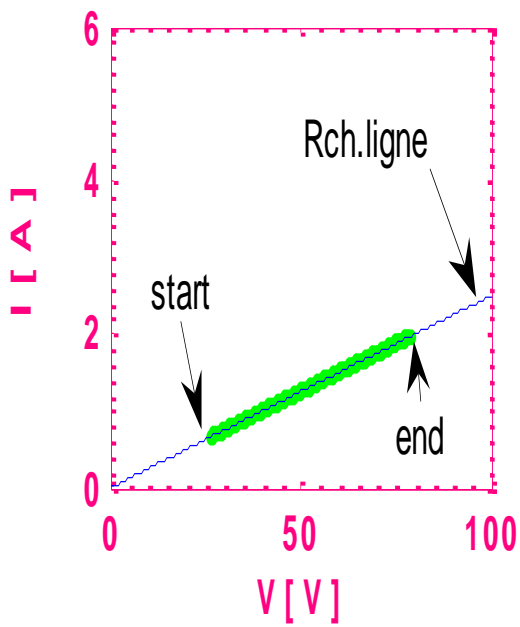
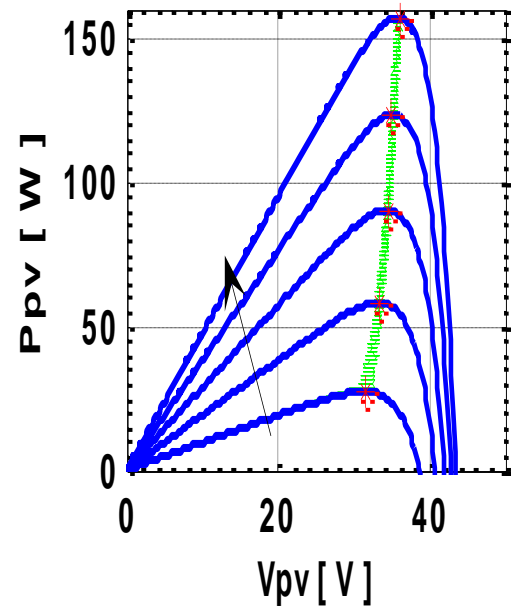
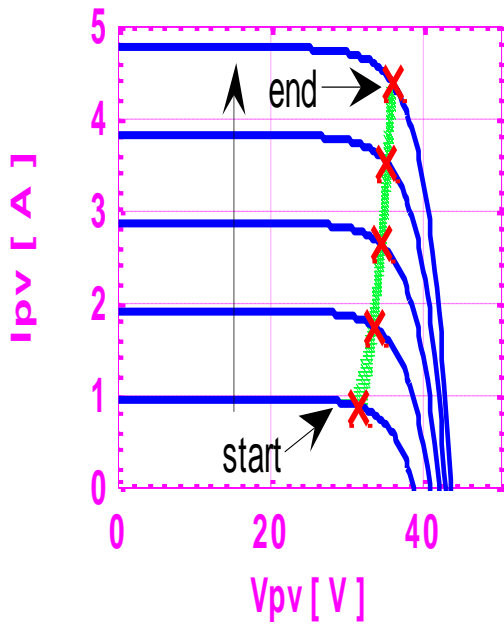


Figure C.3. Simulation de l'influence du changement de température sur les grandeurs électriques (tension, courant, puissance, rapport cyclique).
 ($G=1\text{KW/m}^2$, $R_{ch}=40\Omega$, algorithm hill_climbing).

MPPT avec la technique (P&O) obtenue par programme en MATLAB

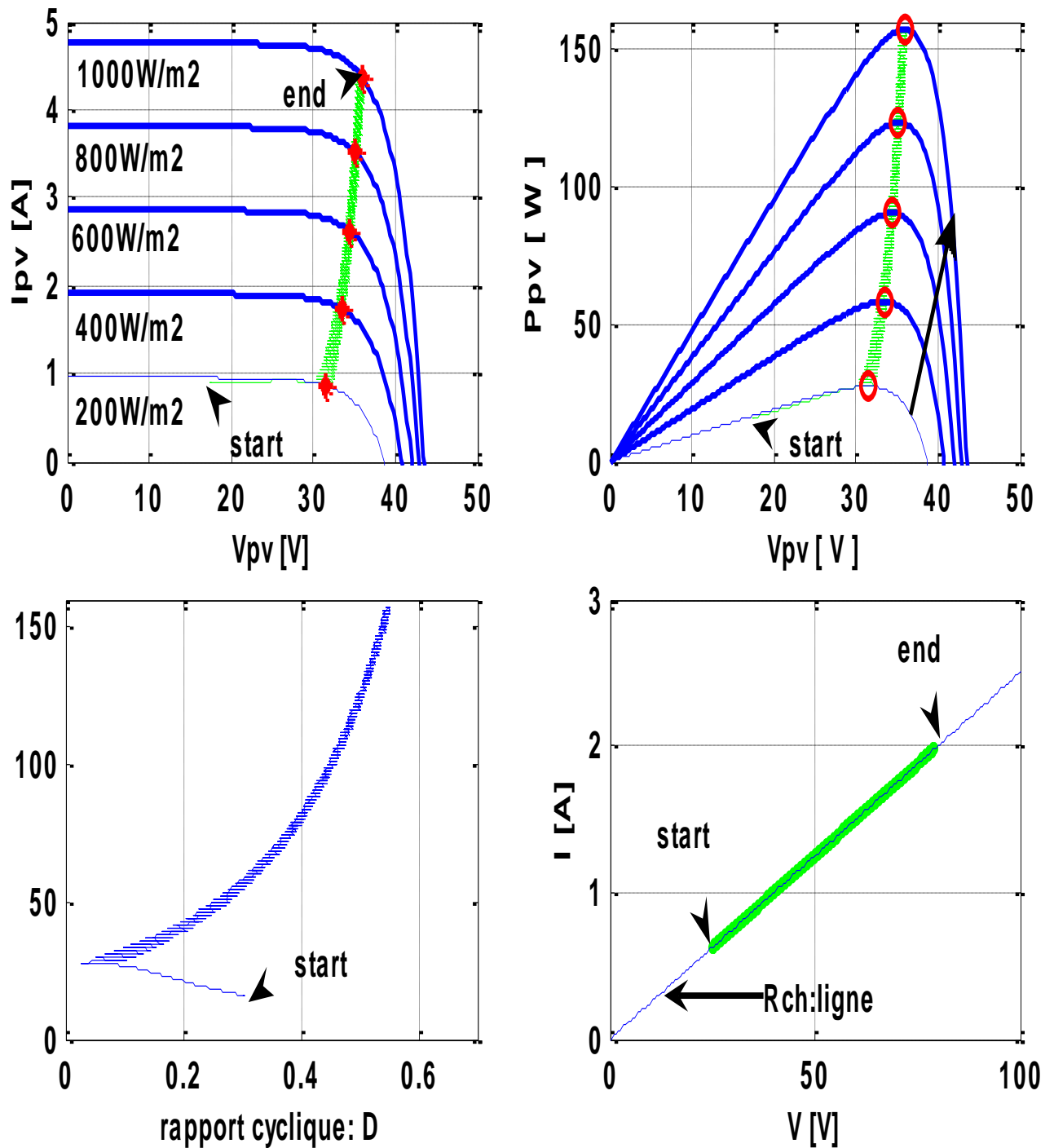
Charge résistive 40Ω .

MPPT avec la technique (Inc.CoN) obtenue par programme en MATLAB



Charge résistive 40Ω .

MPPT avec la technique (H.C) obtenue par programme en MATLAB

Charge résistive 40Ω .