

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème

Application des algorithmes de commande prédictive sur un système photovoltaïque

Préparé par :

KHOULALENE Anais

OULD YOUNES Lisa

Dirigé par :

Mr LEHOUCHE Hocine

Mme OUALI Nassima

Examiné par :

Mr A.OUARET

Mr S.AISSOU

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à remercier en tout premier lieu DIEU tout puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et le courage d'élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre entière reconnaissance et nos sincères remerciements à nos encadrants M^r LEHOUCHE et Mme OUALI qui nous ont aidés à réaliser notre travail et qui ont été à nos côtés par son suivi, et ses orientations.

Un immense merci à nos parents, pour leurs conseils, leur soutien, et pour tous les efforts qu'ils ont fournis durant notre parcours.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir consacré leur temps à l'évaluation de notre modeste travail.

Enfin, nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir accompagnée pendant toutes ces années, de m'avoir guidée à faire les bons choix et aidé dans toutes circonstances afin d'être ce que je suis aujourd'hui.

Je tiens à remercier du fond du cœur Mr LEHOUCHE ainsi que Melle OUALI pour leur professionnalisme, leurs disponibilités, leur encadrement, leur partage de connaissances sans réserve, leurs précieux conseils, leurs compréhensions et leurs empathies. J'espère qu'un jour, si Dieu le veut, mes étudiants me verront avec la même admiration que j'ai envers eux.

Je remercie mon frère Samy Islam, pour toutes les fois où il a été à mes côtés et m'a remis en confiance. Petit frère sans toi je ne suis rien !

Ensuite, et c'est l'essentiel ! car toute ma vie dépend d'eux. Tout ce que je suis, ce n'est que grâce à mes parents : Malek et Rabha CHERFA. Leur amour inconditionnel, leurs protections, leurs sacrifices, leurs encouragements, leurs présences à mes côtés dans mes hauts et bas a fait que je m'améliore de jour en jour. Et ce n'est que le début ! Les rendre fiers est mon ultime objectif de vie.

Je remercie ma tante Nadia ainsi que son mari pour nous avoir toujours traité comme leurs propres enfants, de nous avoir aimés, chéris et encouragé mon frère et moi dans chaque étape de notre vie.

Bien que je n'aie pas de sœur de ma propre mère, mais Dieu m'a donnée une formidable cousine prénommée Sonia, qui est plus qu'une sœur pour moi : c'est mon pilier et mon exemple de réussite.

Je remercie ma meilleure amie Mariem, pour son soutien moral, ses paroles apaisantes, sa sagesse et son amour. L'avoir dans ma vie est une bénédiction.

Et pour finir, je tiens à citer un professeur qui m'a marquée toute petite : Mr BOULAHOUAD, car je tiens à ce que toute personne qui lise ce manuscrit le connaisse. C'est un homme en or, qui nous a toujours considéré comme ses propres enfants et soutenu tout au long de notre parcours. Tous les mots ne suffiront jamais pour le décrire et je me considère très chanceuse de l'avoir eu comme professeur.

Toutes ces personnes citées sont la raison de ma réussite.

Finalement, je remercie les membres du jury Mr AISSOU ainsi que Mr OUARET de nous avoir fait honneur d'accepter de juger notre travail.

Lisa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour leur soutien et leurs encouragements auxquels je ne pourrai rendre assez. A mon frère et ma sœur, tout en leur souhaitant la réussite dans tout ce qu'ils entreprennent.

A Toute ma famille, ami(es) et tous ceux qui me sont chers.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé dans la réalisation de ce travail.

A mon amie Lisa et à toute sa famille.

Anais

Application des algorithmes de commande prédictive sur un système photovoltaïque

Résumé :

L'énergie solaire a connu un réel engouement durant ces dernières années, néanmoins pour la production de l'énergie électrique ; où le panneau solaire est la forme la plus courante grâce à son énergie inépuisable. L'objectif principale de ce travail consiste à développer des stratégies de contrôle et de commande sur un système photovoltaïque alimentant une charge résistive dans un but de poursuite de point de puissance maximale et d'optimisation de la qualité d'énergie. Pour se faire nous avons examiné les caractéristiques du générateur photovoltaïque, ensuite on a développé des algorithmes de commande à savoir la commande prédictive fonctionnelle et généralisée. L'implémentation de ces algorithmes de commande a été réalisé sous Matlab/Simulink pour différentes conditions de fonctionnement tel que la variation des conditions météorologiques ainsi les résultats de simulation ont bien montrés la validité de la commande.

Mots clés: Système photovoltaïque, commande prédictive généralisée, commande prédictive fonctionnelle.

Application of predictive control algorithms on a photovoltaic system

Abstract:

The solar energy has experienced a real craze in recent years, however for the production of electric energy; where the solar panel is the most common form due to his inexhaustible energy. The main goal of this work is to develop control strategies for a photovoltaic system feeding a resistive load in order to track the maximum power point and improve energy quality. To achieve this, we investigated the characteristics of the photovoltaic generator before developing control algorithms such as the generalized and functional predictive control. The implementation of these control algorithms was carried out in Matlab/Simulink for various operating conditions such as weather variation, and the simulation results have clearly demonstrated the effectiveness of the algorithms.

Key words: Photovoltaic system, generalized predictive control, predictive functional control

Table des matière

Liste des abréviation.....	I
Liste des symboles.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux	IV

CHAPITRE 1 : Modélisation et simulation d'un système PV

I.1 Introduction	3
I.2 Energies Renouvelables	3
I.2.1 Energie photovoltaïque.....	3
I.3 La cellule PV	4
I.3.1 Les différents types de cellules PV	4
I.3.2 Fonctionnement Scientifique.....	5
I.4 L'utilisation de l'énergie photovoltaïque	6
✓ Centrale électrique	6
✓ Pour les bâtiments	6
✓ Pour les appareils autonomes.....	6
✓ Pour les satellites	6
I.5 Les avantages et inconvénients du photovoltaïque.....	7
I.5.1 Les principaux avantages de l'énergie solaire.....	7
• Le photovoltaïque est une énergie renouvelable	7
• Une solution économique.....	7
I.5.2 Les principaux inconvénients de l'énergie solaire	7
• Le coût élevé de l'installation	7
• Une efficacité en dent de scie.....	7
• La nécessité de posséder un grand espace.....	8
I.6 Le photovoltaïque	8
I.6.1 Les différents types de systèmes photovoltaïques	8
• Système isolé ou autonome.....	8
• Système raccordé au réseau	8
I.6.2 Durée de vie d'un système photovoltaïque	8
I.6.3 L'effet photovoltaïque.....	9
I.6.3.1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV	9
I.7 Modélisation d'un générateur photovoltaïque	9

I.7.1	Model d'un générateur photovoltaïque	10
I.7.1.1	Model idéal d'un générateur photovoltaïque	10
I.7.1.2	Model réel d'un générateur photovoltaïque	10
I.7.2	Les convertisseurs statiques	13
I.7.2.1	Convertisseur Buck (hacheur série)	13
➤	Fonctionnement.....	13
I.7.2.2	Convertisseur Buck Boost	13
➤	Fonctionnement.....	14
➤	Modélisation	14
I.7.2.3	Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)	15
➤	Fonctionnement scientifique	15
➤	Modélisation	15
I.8	L'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristique P_V et I_V d'un générateur PV	17
I.8.1	L'influence de la température	17
I.8.2	L'influence de l'éclairement	18
I.9	La commande MPPT(maximum power point tracking) :	19
I.10	Conclusion.....	20
II.1	Introduction	21
II.2	Concepts fondamentaux de la commande prédictive	21
II.3	Principe de la Commande Prédictive	21
II.3.1	Différentes techniques de commande prédictive	22
II.4	Algorithme de la commande prédictive	23
II.5	La commande prédictive généralisée (GPC)	24
II.5.1	Principe de la commande prédictive approche polynomiale (RST)	25
II.6	Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée	25
Figure II.3	Principe fonctionnement de GPC.....	25
II.6.1	Principe de l'algorithme de la commande prédictive généralisée.....	26
II.7	Synthèse de la loi de commande GPC sans contrainte	26
II.7.1	Modèle du système.....	26
II.7.2	Expression du critère quadratique.....	27
II.7.3	Choix des paramètres GPC.....	28
➤	Choix de l'horizon minimal de prédiction N1	28
➤	Choix d'horizon maximal de prédiction N2	28

➤	Choix d'horizon de prédiction sur la commande Nu	28
➤	Choix du facteur de pondération de la commande λ	28
II.7.4	Prédicateur optimal sous forme matricielle	29
II.7.5	Critère quadratique sous forme matricielle.....	30
II.7.6	Minimisation de la fonction du coût	30
II.8	Identification de système	31
II.9	Mise en œuvre de l'algorithme de moindres carrés récursif.....	32
II.10	La commande prédictive fonctionnelle (PFC).....	33
II.10.1	Principe de la commande prédictive fonctionnelle	33
II.10.1.1	Le modèle interne	34
II.10.2	Trajectoire de référence	35
II.10.3	Horizon de coïncidence.....	36
II.10.4	Horizon fuyant.....	36
II.11	Calcul de la commande prédictive fonctionnelle.....	36
II.11.1	Choix des paramètres pour la commande PFC	40
II.12	Application à un ordre quelconque à partir de sa réponse indicielle.....	41
II.12.1	Commande PFC du processus d'ordre élevé.....	42
II.12.1.1	Modèle interne sous forme parallèle	42
II.13	Conclusion.....	43
III.1	Introduction	45
III.2	Paramètres du système PV utilisés	45
III.3	Identification du système	46
III.4	Application de l'algorithme GPC approche RST sur le système	48
III.4.1	Résultats de simulation pour un éclairage fixe	49
III.4.2	Résultats de simulation pour un éclairage variable :	51
III.4.3	Résultats de simulation pour une température variable :.....	52
III.5	Application de l'algorithme PFC.....	55
III.5.1	Premier cas :.....	56
III.5.2	Deuxième cas	57
III.5.3	Dernier cas :	59
III.6	Conclusion.....	60

Liste d'abréviations

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur photovoltaïque

PFC : Commande prédictive fonctionnelle

GPC : Commande prédictive généralisée

MPPT: Maximum power point tracking

PPM : Point de puissance maximale

MPC : Model predictif control

DMC: Dynamic matrix control

PID: Régulateur proportionnel, Intégrateur, Dérivateur

ARMA: Auto regressif moving average

BOZ: Bloqueur d'ordre zéro

RST : Régulateur polynomial

MCR : Moindre carrée réursive

Liste de symboles

P_{max}	Puissance maximale
V_{mp}	Tension au point de la puissance maximale
I_{mp}	Courant au point de la puissance maximale
H	Point de coïncidence
u	Commande
C	Consigne
T_s	Temps de simulation
T_e	Période d'échantillonnage
V_{oc}	Tension à circuit ouvert
I_{cc}	Courant à court-circuit
α	Rapport cyclique
I_{ph}	Photo-courant
I_d	Courant aux bornes de la diode
I_{sh}	Courant à la borne de la résistance shunt
I_0	Courant de saturation.
E	Irradiation solaire
E_{ref}	Irradiation de référence 1000 W/m ²
T	Température de fonctionnement
T_{ref}	Température de référence 25°C
K_i	Coefficient d' I_{cc}
V_T	Tension thermique
n	Facteur d'idéalité
N_s	Nombre de cellule en série

i_L	Courant de l'inductance L
E	Tension d'entrée
V_{dc}	Tension de sortie
T_{on}	Temps de conduction
T_s	Période de découpage
$w(k)$	Consigne
$y(k)$	Sortie du processus
$\hat{y}(k)$	Sortie prédite
$\Delta(q^{-1})$	Opérateur de différence
$\varphi(k)$	Bruit blanc centré
$w(t + j)$	Consigne appliquée à l'instant $(t + j)$
$\hat{y}(t + j)$	Sortie prédite à l'instant $(t + j)$
$\Delta u(t + j - 1)$	Incrément de commande à l'instant $(t + j - 1)$
N_1	Horizon de prédiction minimal sur la sortie
N_2	Horizon de prédiction maximal sur la sortie
N_u	Horizon de prédiction sur la commande
y_r	Trajectoire de référence
y_p	Sortie réelle du processus
T_e	Période d'échantillonnage
τ	Constante de temps

Liste des Figures

- Figure I.1** Structure basique d'une cellule photovoltaïque
- Figure I.2** Constitution d'une cellule photovoltaïque
- Figure I.3** Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E)
- Figure I.4** circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale
- Figure I.5** circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.
- Figure I.6** Schéma de principe de l'hacheur Buck
- Figure I.7** Schéma de principe de l'hacheur Buck Boost
- Figure I.8** Schéma de principe de l'hacheur Boost
- Figure 1.9** Caractéristiques I_V et P_V d'un générateur PV
- Figure I.10** Caractéristiques I_V et P_V pour différentes températures
- Figure I.11** Caractéristiques I_V et P_V d'un générateur PV sous effet d'éclairement
- Figure II.1** Evolution temporelle de la prédiction
- Figure II.2** Algorithme de la commande prédictive
- Figure II.3** Principe fonctionnement de GPC
- Figure II.4.** Modèle CARIMA.
- Figure II.5** Schéma du régulateur RST
- Figure II.6** Principe de la commande prédictive
- Figure II.7** Modèle interne.
- Figure II.8** Schéma bloc de la PFC sans retard pur
- Figure II.9** Schéma bloc de la PFC avec retard pur
- Figure II.10** Modèle parallèle d'ordre élevé de degré m.
- Figure III.1** Evolution des caractéristiques d'un panneau SunPower 415E.
- Figure III.2** Allures représentant les paramètres d'identification.
- Figure III.3** schémas bloc de la GPC.
- Figure III.4** Allures de la sortie du modèle et la sortie du système.
- Figure III.5** Allure de la consigne et la sortie du système .
- Figure III.6** Allure de tension .
- Figure III.7** Allure de courant
- Figure III.8** Allure de puissance.
- Figure III.9** Allure de la variation de l'éclairement.
- Figure III.10** Allure de puissance à éclairage variable.

Figure III.11 Allure de la variation de la température.

Figure III.12 Allure de sortie.

Figure III.13 Allure de sortie du système et de la consigne.

Figure III.14 Allure de la tension.

Figure III.15 Allure de la variation de courant .

Figure III.16 Allure de puissance du générateur.

Figure III.17 schémas bloc de la commande GPC.

Figure III.18 Allure de l'erreur consigne-système.

Figure III.19 Allure de la tension.

Figure III.20 Allure de courant.

Figure III.21 Allure de la puissance.

Figure III.22 Allure de la variation de la température.

Figure III.23 Allure de l'erreur.

Figure III.24 Allure de la tension.

Figure III.25 Allure de la variation du courant.

Figure III.26 Allure de puissance.

Figure III.27 Allure de la variation de l'irradiation

Figure III.28 Allure de l'écart type de l'erreur.

Figure III.29 Allure de puissance.

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Paramètres utilisés dans le calcul de la PFC

Tableau III.1 Les paramètres de simulation.

Tableau III.2 Les paramètres d'identification

Tableau III.1 Les résultats des paramètres du régulateur

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont de plus en plus mises en avant, dans un monde de plus en plus pollué, causé par la production et la consommation des énergies fossiles. Les énergies renouvelables sont donc un bon compromis, une énergie inépuisable, naturelle et sans émission de gaz lors de la production de ses composants. L'énergie photovoltaïque est la forme la plus abondante et la plus propre des énergies, issue directement du rayonnement solaire, le panneau solaire est la forme la plus courante de ce système permettant de transformer l'énergie solaire en électricité. Le premier panneau solaire produit, avec un rendement de 6% fabriqué en 1954 par les laboratoires Bell [1], depuis, la technologie n'a cessé de se développer, aujourd'hui le rendement moyen d'un panneau à base de silicium est de 12 à 17% [2].

Dans le but d'optimiser l'exploitation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque, l'utilisation d'un convertisseur statique Continu-Continu commandé par un contrôleur MPPT nous permet d'extraire avec un bon rendement, son rôle essentiel est de poursuivre le point de puissance maximal lorsque le système PV est exposé à des conditions météorologiques. L'augmentation de ce rendement et la poursuite du point de puissance maximale est un objectif clé de ce travail, on propose donc de concevoir une application de deux types de la commande prédictive.

La commande prédictive permet de commander un système complexe, en faisant appel à un modèle mathématique du processus en temps réel, afin d'anticiper le futur comportement du procédé [3], cet approche est connu sous le nom « model prédictif control ou tout simplement 'MPC' ». Les premiers résultats de la commande sont publiés en 1978, sous le nom Identification et Commande (IDCOM), par J. Richalet et al, les ingénieurs de Shell, les développeurs de l'approche fonctionnelle de la commande prédictive 'PFC'. En 1980, apparait la commande par matrice dynamique DMC « Dynamic matrix control » développée par Cutler et al », suivi un peu plus tard par l'approche de la commande prédictive généralisée 'GPC' par D.W Clarke et al en 1985[4].

Ce travail est constitué de trois chapitres, le premier présente des généralités sur des systèmes photovoltaïque et ses différents types, suivi d'une modélisation du système et sa simulation, afin de visualiser l'influence des éléments extérieurs sur les caractéristiques du panneau.

Le deuxième chapitre, comporte une définition de la commande prédictive accompagnée de ses principes fondamentaux, ensuite nous allons présenter la commande prédictive généralisée (GPC), en précisant les bases théoriques pour cette méthode entre autres, le modèle interne, le critère d'optimisation et la loi de commande, ainsi que le choix des paramètres de synthèse tel que l'horizon de prédiction. Et nous terminons par une présentation détaillée de la commande prédictive fonctionnelle (PFC), à savoir les principaux fondamentaux, trajectoire de référence, l'équation de la commande, et les paramètres nécessaires pour la mise en œuvre de cette approche.

Dans le dernier chapitre, les résultats de simulation des deux algorithmes de commande GPC et PFC seront présentées, et cela après avoir passée par l'étape d'identification du système photovoltaïque, enfin, on termine par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

Avec l'avancée technologique, les énergies renouvelables sont omniprésentes au quotidien afin d'assurer le développement optimisé des différents domaines.

Dans ce chapitre, nous aborderons une des énergies les plus utilisées ces dernières décennies et qui est la monitrice du système qui est maître de notre recherche : l'énergie photovoltaïque. Et afin de connaître au mieux notre système, nous verrons ses essentiels composants, leur fonctionnement ainsi que leur modélisation.

Pour conclure, nous verrons l'influence de certains paramètres sur notre système ainsi qu'une brève introduction à sa commande.

I.2 Energies Renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le rythme naturel de renouvellement est suffisamment rapide pour être considéré comme inépuisable à l'échelle des temps humains. Elles proviennent de phénomènes naturels périodiques ou constants provoqués par les étoiles : le soleil principalement à cause de la chaleur et de la lumière qu'il produit, mais aussi l'attraction lunaire (marée) et la chaleur produite par la terre (géothermie). Leurs propriétés renouvelables dépendent de la vitesse à laquelle la source est consommée, d'une part, et de la vitesse à laquelle elle se renouvelle [5], d'autre part.

Il existe 4 grandes familles d'énergies renouvelables :

- Energie solaire
- Vent
- Energie hydraulique
- Biomasse

I.2.1 Energie photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » peut désigner un phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmund Becquerel en 1839) ou des technologies apparentées. L'énergie délivrée par le panneau est l'électricité produite en convertissant une partie du rayonnement solaire à travers des cellules photovoltaïques. En principe, les photons de la lumière incidente peuvent déplacer des électrons dans certaines circonstances, créant un courant électrique.

I.3 La cellule PV

Une cellule photovoltaïque ou cellule solaire est le plus petit élément d'un dispositif photovoltaïque. L'énergie lumineuse est convertie en électricité. Les cellules photovoltaïques comprennent :

- Une fine couche semi-conductrice (un matériau avec une bande interdite qui agit comme une barrière énergétique que les électrons ne peuvent pas traverser sans excitation externe, et dont les propriétés électroniques peuvent être modifiées), comme le silicium, qui est un matériau relativement conducteur.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode, les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

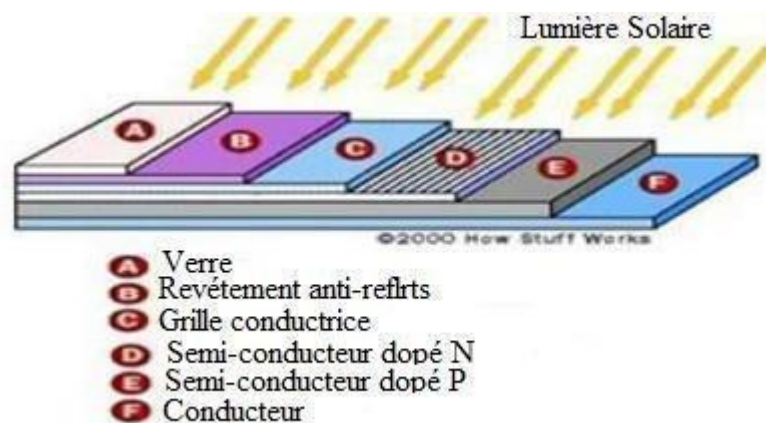


Figure I.1 Structure basique d'une cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui produit une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier de 0,3 V à 0,7 V, selon le matériau et l'agencement utilisés, ainsi que la température et le vieillissement de la cellule [6].

I.3.1 Les différents types de cellules PV

I.3.1.1 Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial.

✓ **Les cellules monocristallines**

C'est la filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

✓ **Les cellules poly cristallines**

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre. Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des cellules poly cristallines à couches minces afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

✓ **Les cellules au silicium amorphe**

Les cellules solaires amorphes sont constituées de silicium non cristallisé et les coûts de production sont beaucoup plus bas que les autres, mais malheureusement il y a aussi des rendements faibles qui fluctuent entre 8 et 10 %. Cette technologie permet l'utilisation de couches de silicium très fines de 0,3 à 1,0.

I.3.2 Fonctionnement Scientifique

Les cellules photovoltaïques sont constituées de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'un avec un excès d'électrons et l'autre avec un déficit. Un atome de silicium possède 4 électrons périphériques. Une des couches de la batterie est dopée avec des atomes de phosphore, eux-mêmes à 5 électrons. On dit que le dopage de type n est négatif si les électrons sont redondants.

L'autre couche est dopée avec des atomes de bore à 3 électrons. On dit que le dopage de type p est positif si les électrons résultants sont insuffisants. Lorsque le premier entre en contact avec le second, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. En traversant la cellule solaire, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium dans les deux couches n et p. Par la suite, les électrons émis se déplacent dans toutes les directions. Ce mouvement d'électrons n'est rien d'autre que de l'électricité.

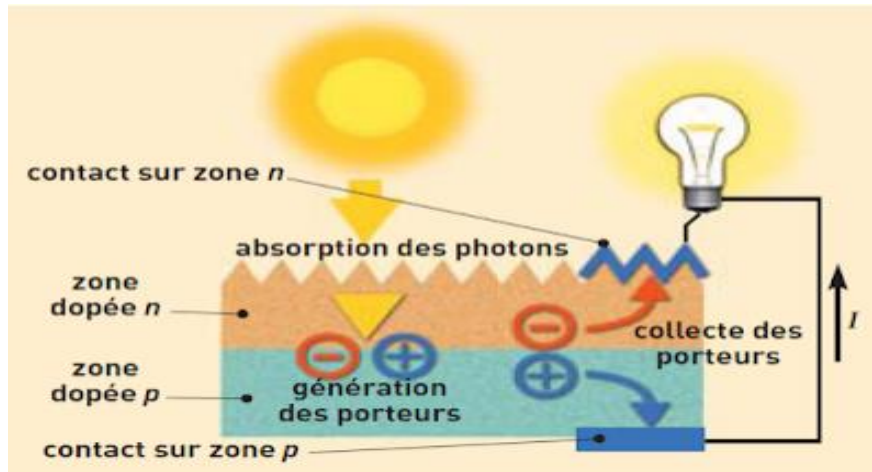


Figure I.2 Constitution d'une cellule photovoltaïque

I.4 L'utilisation de l'énergie photovoltaïque

✓ Centrale électrique

En 2009, le parc solaire le plus important a généré environ 60 MW. D'autre part, cela nécessite une très grande surface pour capter le rayonnement solaire et le convertir en électricité et un grand nombre de modules PV.

✓ Pour les bâtiments

L'installation d'un système PV est facilement possible dans un bâtiment. Le système peut être éloigné ou proche du bâtiment. Il s'agit d'un système attractif pour ceux qui souhaitent être autonomes en énergie ou isolés des lignes principales standard. Dans la plupart des cas, les panneaux sont montés directement sur le toit et certains sont situés à proximité du bâtiment. De plus en plus de bâtiments modernes disposent de panneaux directement intégrés à leur structure.

✓ Pour les appareils autonomes

Voici quelques exemples d'applications de l'énergie solaire : Pompes à eau, appels d'urgence, parcomètres, etc.

✓ Pour les satellites

La recherche sur la conception de grands panneaux solaires sur satellites est menée depuis des décennies. Cette idée a été proposée par Peter Glaser puis D. Little. La NASA a mené une série d'études de faisabilité technique et économique dans les années 1970, renouant

avec l'intérêt au début du 21^e siècle. D'un point de vue économique, la principale préoccupation de ces satellites semble être le coût de lancement.

I.5 Les avantages et inconvénients du photovoltaïque

L'énergie solaire présente une liste indéfinie d'avantages. Ce faisant, nous avons sélectionné ceux qui nous semblent les plus pertinents.

I.5.1 Les principaux avantages de l'énergie solaire

- **Le photovoltaïque est une énergie renouvelable**

Le premier avantage du photovoltaïque résulte du fait qu'il soit une énergie renouvelable et inépuisable. L'énergie du soleil peut avoir une durée de vie limitée toutefois, rien ne prédit que sa clarté et sa chaleur vont disparaître dans 1 an ou dans 100 ans. Mais, c'est en quelque sorte la solution énergétique la plus fiable et la plus respectueuse de l'environnement, car ne provoquant aucune pollution.

- **Une solution économique**

Recourir à l'énergie solaire, c'est aspirer à une certaine indépendance vis-vis des fournisseurs énergétiques. Le soleil est gratuit, ce qui suppose une autoconsommation sans facturation.

- **Donne plus de confort aux habitats**

L'un des synonymes que l'on utilise pour faire référence au photovoltaïque, c'est le terme énergie du futur. Cela signifie produire soi-même l'énergie.

I.5.2 Les principaux inconvénients de l'énergie solaire

Sans remettre en cause tous ses bienfaits, il est de bon augure qu'on présente aussi quelques faiblesses du photovoltaïque.

- **Le coût élevé de production**

Opter pour l'énergie solaire c'est dire adieu aux factures électriques certes, mais il faut s'attendre à une contrepartie. En effet, le coût des matériaux sont très élevés.

- **Une efficacité en dent de scie**

L'une des zones d'ombre qui pourrait donner plus de crédit aux autres sources d'énergie, c'est la faible efficacité énergétique du photovoltaïque. Si l'on prend seulement l'énergie nucléaire, on comprend vite à quel point l'énergie solaire peut être limitée en termes

de rendement et de couverture. Il faut aussi savoir que la performance est intimement liée au temps. Autrement dit, la climatologie influence beaucoup la qualité de cette énergie.

- **La nécessité de posséder un grand espace**

. Pour une bonne production de nature à satisfaire efficacement tous les besoins en énergie, il faudrait que l'habitat dispose d'une superficie importante.

I.6 Le photovoltaïque

I.6.1 Les différents types de systèmes photovoltaïques

- **Système isolé ou autonome**

Le système photovoltaïque alimente l'utilisateur sans se connecter au réseau. C'est souvent le seul moyen d'alimentation lorsque le secteur n'est pas disponible : Zones reculées, îles, maisons de montagne, etc. Ce type de système nécessite l'utilisation d'une batterie pour le stockage de l'énergie.

- **Système raccordé au réseau**

Un système PV connecté au réseau est un système qui est directement connecté au réseau électrique via un onduleur. Ce type de système apporte beaucoup de confort aux producteurs/consommateurs car le réseau se charge d'équilibrer la production et la consommation d'électricité.

Dans un système connecté au réseau, il est essentiel de convertir le courant continu généré par le système PV en courant alternatif synchronisé avec le réseau. Un onduleur est utilisé pour effectuer cette conversion. Le rendement général d'un onduleur est d'environ 95 %. Il existe différentes sorties et onduleurs spécialement conçus pour les applications photovoltaïques. L'onduleur dispose également d'un découplage du réseau et d'une protection contre les surtensions pour empêcher l'alimentation du réseau lorsque le réseau est inactif.[7]

I.6.2 Durée de vie d'un système photovoltaïque

S'ils sont correctement installés, les modules PV standard en silicium cristallin peuvent durer au moins 20 ans. Si elles sont bien choisies, les piles peuvent durer de cinq à douze ans. La durée de vie dépend du type de système et également de la température de fonctionnement. Les régulateurs de tension ont une durée de vie de 10 ans ou plus, ce qui est typique pour les composants électroniques. De plus, si l'on considère une période de 20 ans, il faut prévoir un budget pour le remplacement de la batterie et du régulateur. La durée de vie normale des

batteries dans un système photovoltaïque dépend de la conception du système et des soins et de la maintenance apportés tout au long de son utilisation. Il existe une relation entre le prix d'une batterie et sa durée de vie annoncée. Mais la batterie la plus durable n'est pas toujours la batterie la plus chère.

I.6.3 L'effet photovoltaïque

I.6.3.1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairement solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure (II.3). Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants sont les mêmes ou inversement des jonctions traditionnelles et sont sensibles à la température de la jonction. La différence de potentiel qui en résulte à travers la structure caractérise l'effet photovoltaïque et dépend du matériau et de la structure de la jonction [8].

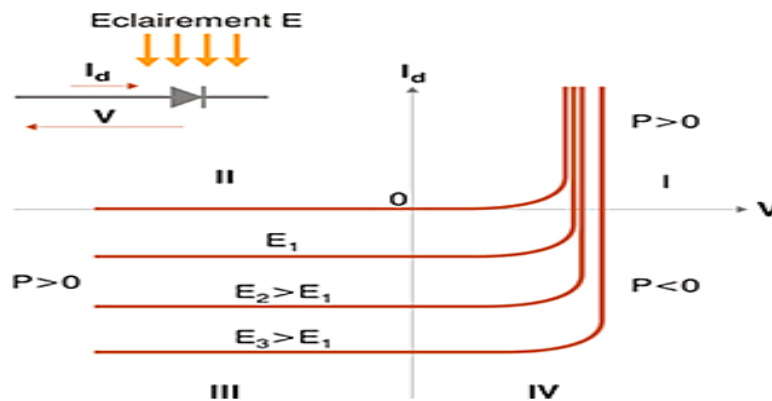


Figure I.3 Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

I.7 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

La modélisation des cellules solaires nécessite inévitablement une sélection rigoureuse des circuits électriques équivalents. La conception d'un circuit équivalent exact d'une cellule solaire nécessite une compréhension détaillée de la composition physique des éléments de la cellule et des propriétés électriques de chaque élément à savoir : les paramètres impliqués dans le calcul de la tension et du courant du module de cellule solaire [7, 8].

I.7.1 Model d'un générateur photovoltaïque

I.7.1.1 Model idéal d'un générateur photovoltaïque

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

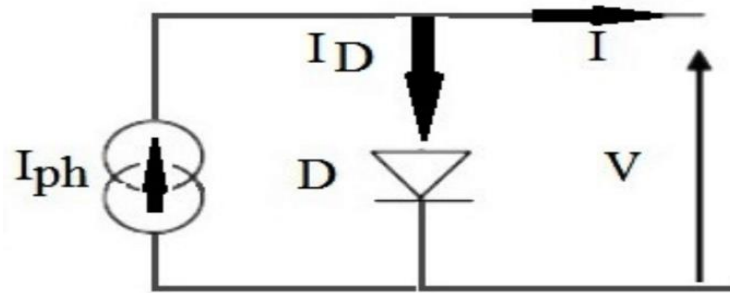


Figure I.4 circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

I.7.1.2 Model réel d'un générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis combinées sous verre afin d'obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

Le schéma équivalent d'une cellule PV est montré dans la figure. Le modèle considéré est constitué d'un générateur de courant continu I_{ph} qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique avec une diode parallèle modélisant la jonction P-N, ainsi que des résistances série R_s et parallèle R_{sh} afin de tenir compte des phénomènes de dissipation au niveau de la cellule [9, 10].

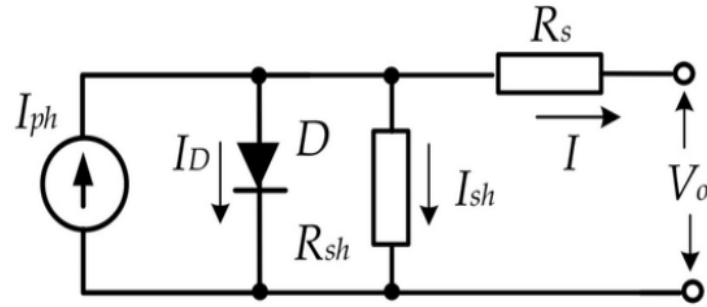


Figure I.5 circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.1)$$

Avec :

I : Le courant délivré par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant

I_D : Le courant aux bornes de la diode.

I_{sh} : Le courant à la borne de la résistance shunt R_{sh} .

La relation (1.1) peut être reformulée mathématiquement comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{\alpha V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

I_0 : Le courant de saturation.

Quand

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (I.3)$$

Le courant de saturation :

$$I_0 = \frac{I_{cc} + kT}{\exp\left(\frac{V_{oc} + kT}{\alpha N_s V_t}\right)} \quad (I.4)$$

Le courant de la diode est comme suit :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_d}{\alpha kT} \right) - 1 \right] \quad (I.5)$$

Où :

I_{cc} : Courant de court-circuit de la cellule ;

V_{c0} : Tension de circuit ouvert.

E : Irradiation solaire ;

E_{ref} : Irradiation de référence 1000 W/m² ;

T : Température de fonctionnement ;

T_{ref} : Température de référence 25°C.

K_i : Coefficient d'I_{cc}.

K : Constante de Boltzmann (1.38064852*10⁻²³).

n : Facteur de non idéalité de la diode généralement entre 1 et 2.

q : Charge de l'électron (1.602. 10⁻¹⁹ °c).

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule. Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = \alpha N_s V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} - 1 \right) \quad (I.6)$$

Sachant que :

V_t : Tension thermique.

N_s : le nombre de cellule en série.

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle. Son expression approchée est donnée par :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I.7)$$

I.7.2 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter l'énergie électrique à un récepteur donné. Selon le type de machine à commander et la nature de l'alimentation électrique, il existe plusieurs familles de convertisseurs statiques (convertisseurs DC/DC et convertisseurs AC/DC). Sauf qu'en raison du système étudié, on ne prendra en considération que les convertisseurs DC/DC (hacheurs). Ces derniers ont pour rôle de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie est réalisée par "coupe" à haute fréquence caractérisée par un rendement élevé. Il en existe plusieurs types :

I.7.2.1 Convertisseur baisseur de tension (hacheur série)

Un convertisseur hacheur série ou un hacheur série convertit la tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure.

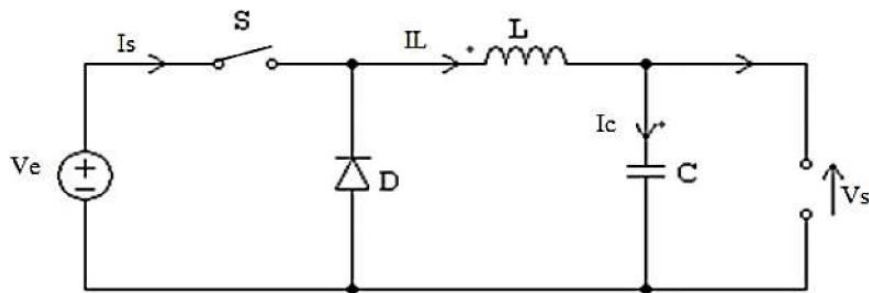


Figure I.6 Schéma de principe de l'hacheur Buck

Les composantes L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation provoquée par le hachage de la tension et du courant de sortie.

➤ Fonctionnement

- L'interrupteur S est fermé pendant une fraction αt de la période de découpage T .
- La source énergétique primaire alimente en énergie l'inductance L .
- Lorsque S est bloqué, la diode de roue libre D garantit la continuité et la décharge L .

I.7.2.2 Convertisseur Buck Boost

Un convertisseur Buck Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue avec une valeur inférieure ou supérieure et une polarité opposée. L'inconvénient de ce convertisseur est que le commutateur n'a pas de limite de connexion nulle; compliquant ainsi sa commande.

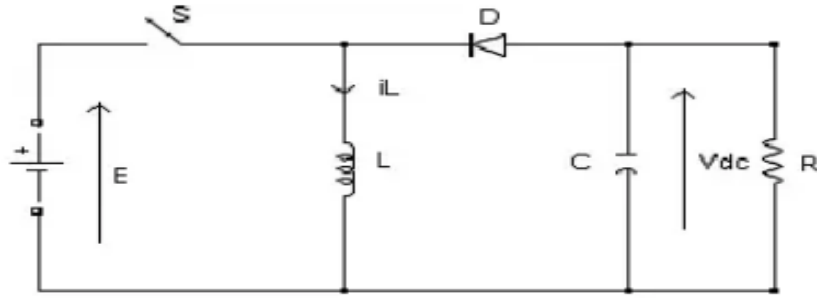


Figure I.7 Schéma de principe de l'hacheur Buck Boost.

➤ Fonctionnement

Le fonctionnement du convertisseur BuckBoost peut être divisé en deux configurations selon l'état de l'interrupteur S. Lorsque l'interrupteur est activé, l'interrupteur S se ferme et l'énergie stockée dans l'inductance augmente. A l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est liée à la fois à la charge et à la capacité. Cela transfère l'énergie stockée dans l'inductance à la capacité et à la charge.

➤ Modélisation

L'expression mathématique du fonctionnement de ce type de convertisseur doit être effectuée en tenant compte de l'état de l'interrupteur S. Lorsque l'interrupteur est en état passant, alors $T_{on} = \alpha * T_s$. Comme résultat, l'énergie stockée dans l'inductance augmente.

Quand S est bloqué, alors $T_{off} = (1-\alpha) * T_s$ et l'énergie accumulée dans l'inductance se transfère vers la capacité et la charge.

$$L \frac{di_L}{dt} = uE + V_{dc} (1 - u) \quad (I.10)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L (1 - u) \quad (I.11)$$

La procédure de dérivation des équations dynamiques dans un régime de conduction continue est la même que pour un hacheur parallèle. Lorsqu'il est allumé, S est égal à 1 et la diode est bloquée, dans ce cas l'équation est :

$$L \frac{di_L}{dt} = uE \quad (I.12)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R} \quad (I.13)$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{dc} \quad (\text{I.14})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_l - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{I.15})$$

La représentation d'état du système sera ainsi exprimée :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1-u}{L} \\ \frac{1-u}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{u}{L} \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (\text{I.16})$$

Les paramètres du système sont toujours les mêmes que dans le cas du hacheur parallèle.

I.7.2.3 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur élevée.

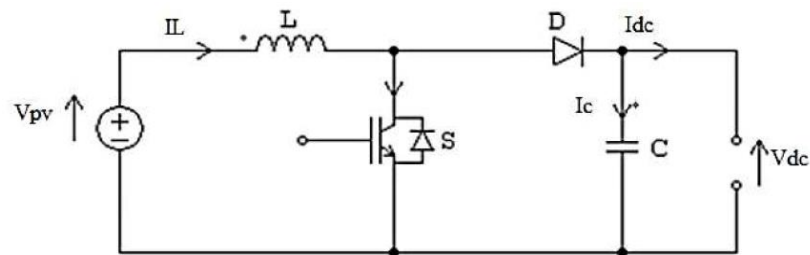


Figure I.8 Schéma de principe du hacheur Boost.

L'inductance permet de lisser le courant provenant de la source. Tandis que la capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

➤ Fonctionnement scientifique

- L'interrupteur S est fermé pendant le temps αT .
- L'énergie est stockée dans L, la diode D est bloquée.
- Le blocage de S entraîne la décharge de l'inductance.

➤ Modélisation

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff au schéma d'hacheur représenté précédemment et en relation avec le régime de fonctionnement et l'état de l'interrupteur S.

$$L \frac{di_L}{dt} = uE + V_{dc} (1 - u) \quad (\text{I.17})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{I.18})$$

L'équation du hacheur dynamique est dérivée pour le courant d'inductance et la tension aux bornes du condensateur dans un état conducteur continu et est exprimée en (1).

Avec :

i_L : Courant de l'inductance L.

E : Tension d'entrée.

V_{dc} : Tension de sortie

u : la commande.

On pose $x_1 = i_L$ Et $x_2 = V_{dc}$, par conséquent les équations deviennent :

$$\dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{x_2(1-u)}{L} \quad (\text{I.19})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1(1-u)}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (\text{I.20})$$

En exprimant l'équation (2) en représentation d'état :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1-u}{L} \\ \frac{1-u}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (\text{I.21})$$

Les variables d'état sont le courant dans la bobine et la tension aux bornes du condensateur.

Le signal de commande u est contenu dans la région discrète de {0 ; 1} et indique l'état du commutateur S : Si c'est 0, il s'ouvre, et si c'est 1, il se ferme. Cela peut être remplacé par la valeur moyenne pendant la période de découpage α . Cette dernière représente le rapport cyclique : $\alpha = T_{on} / T_s$

Avec :

T_{on} : Temps de conduction

T_s : Période de découpage.

I.8 L'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristique P_V et I_V d'un générateur PV

Les figures suivantes présentent les caractéristiques I_V et P_V d'un générateur PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{ W/m}^2$.

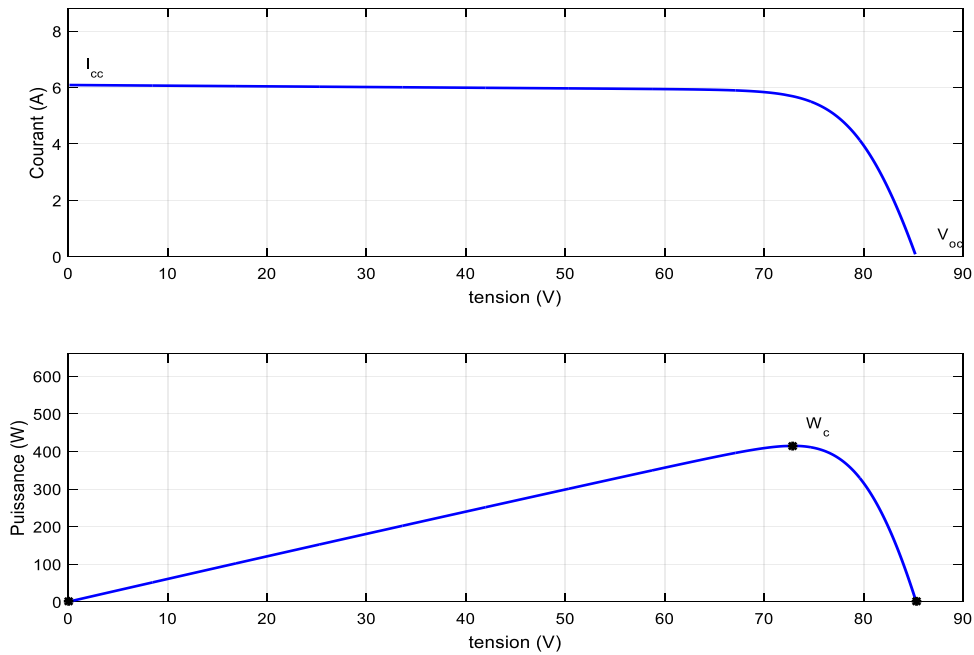


Figure 1.9 Caractéristiques I_V et P_V d'un générateur PV

On remarque trois points très importants qui donnent les grandeurs électriques de système en court-circuit ($I = 3.8\text{ A}$, $V = 0$), en circuit ouvert ($I = 0$, $V = 21.1\text{ V}$) et le point de puissance maximale $P_{max} = 59.85\text{ W}$ qui correspond à ($I_{mp} = 3.5\text{ A}$, $V_{mp} = 17.1\text{ A}$).

I.8.1 L'influence de la température

Les figures représentent les courbes I(V) et P(V) pour différentes températures à un éclairement constant.

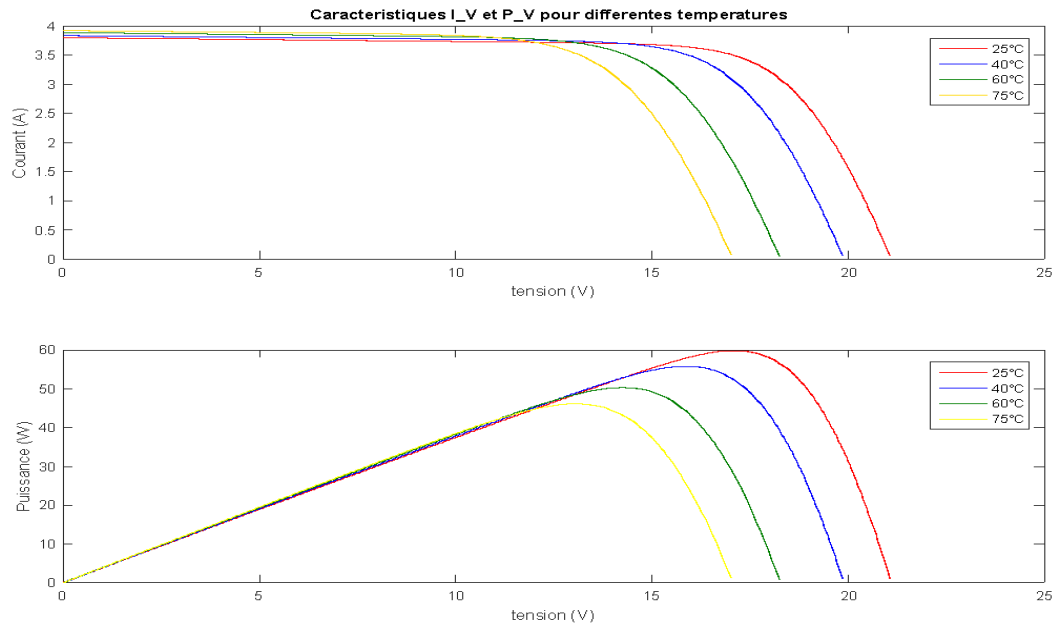


Figure I.10 Caractéristiques I_V et P_V pour différentes températures

On remarque que :

- La tension à vide V_{oc} baisse très rapidement quand la température chute, et le courant de court circuit diminue dans des proportions moindres.
- La tension à vide et la puissance maximale diminue quand la température monte.

I.8.2 L'influence de l'éclairement

La figure suivante, illustre des caractéristiques I_V et P_V , pour différents éclairagements et sous une température ambiante constante de 298,15 K.

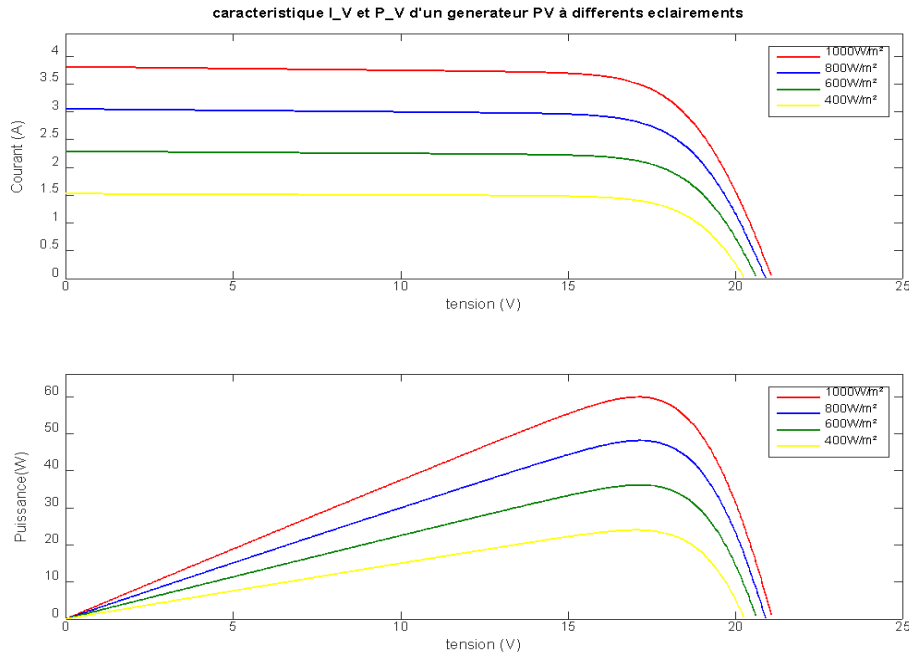


Figure I.11 Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'un générateur PV sous effet d'éclairement.

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, et engendrent une croissance moins prononcée de la tension à vide, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

Les courbes $I - V$ se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante.

En intensifiant l'éclairement, la puissance optimale augmente proportionnellement avec l'intensité lumineuse.

I.9 La commande MPPT (maximum power point tracking)

MPPT signifie Maximum Power Point Tracking. Le régulateur MPPT scanne la tension électrique produite par le panneau photovoltaïque plusieurs fois par jour.

En bref, le régulateur de charge MPPT tire du panneau la puissance maximale. Les algorithmes MPPT sont habituellement rencontrés dans les contrôleurs pour systèmes PV.

Dernièrement, la technique MPPT est devenue le centre d'intérêt d'un nombre important de recherches afin d'améliorer les performances dynamiques du système PV, principalement en termes d'aptitude à poursuivre rapidement le point de puissance global en présence d'autres

maximums locaux durant l'OP, cette commande sera l'objet du chapitres suivants avec les différentes approches de la commandes prédictive.

I.10 Conclusion

La performance d'un générateur solaire est grandement affectée par les conditions climatiques, en particulier rayonnement solaire et température des modules solaires. Dans cette étude, nous avons simulé à l'aide d'un modèle empirique à une seule diode. Afin de concevoir le fonctionnement des modules optiques avec différents ensoleillement et la température ainsi que les différents branchements des cellules séries/parallèles. Le principal souci de ce modèle est sa simplicité et sa légèreté. Mise en œuvre basée sur les spécifications techniques fournies par le fabricant.

II.1 Introduction

De toutes les commandes dites « Avancée », la commande prédictive est la plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour les qualités techniques auxquelles elle doit ses performances que pour sa facilité de mise en œuvre. Son champ d'application s'étend à tous les domaines industriels, surtout pour des systèmes pour lesquels la trajectoire à suivre est connue à l'avance, comme des robots ou bras de robots, des machines-outils, et particulièrement des applications dans l'industrie pétrolière, biochimique ou chimique. Notamment aux cas où la régulation PID n'est pas efficace.

Ce chapitre a pour but d'introduire les principes généraux de la commande prédictive et d'analyser les structures les plus utilisées en l'occurrence la commande prédictive généralisée (GPC), la commande prédictive fonctionnelle (PFC). Pour chacune de ces formulations, la représentation des solutions sous la forme d'une loi de commande est représentée dans les deux cas avec et sans contraintes.

II.2 Concepts fondamentaux de la commande prédictive

La commande prédictive est une méthode qui repose sur l'utilisation d'un modèle interne, afin de prédire le comportement du système à commander sous un certain nombre de contraintes. Pour cela, elle se repose sur certains points essentiels :

- ✓ Connaissance de la structure du processus à piloter sur un horizon fini.
- ✓ Formaliser la prédiction des signaux (entrée/sortie) par des modèles mathématiques.
- ✓ Le projet du comportement désiré du processus sera exprimé sous forme d'une trajectoire de référence.
- ✓ D'éventuelles modifications du modèle interne du système de commande.
- ✓ Utilisation d'un modèle dynamique du processus à l'intérieur d'un contrôleur en temps réel.

II.3 Principe de la Commande Prédictive

La technique prédictive permet de reproduire de façon théorique le comportement intuitif naturellement prédictif ou anticipatif de l'être humain, La différence entre la commande prédictive et les autres techniques réside dans le fait que les actions de ces dernières sont fonction des erreurs passées entre la sortie et la consigne, alors que la commande prédictive est une fonction des erreurs prédites à des instants futurs.

Cette conception consiste à prendre en compte à l'instant présent, le comportement futur, en utilisant un modèle numérique afin de prédire la sortie dans le futur sur un horizon fini.

Il existe un ensemble de méthodes de commande prédictive bâties autour de même principes, avec néanmoins quelques différences dans l'interprétation des concepts clés.

Pour une consigne connue ou pré calculée, il est possible d'exploiter les informations de trajectoires prédéfinies situées dans le futur car l'objectif de cette commande est de relier la sortie du processus avec cette consigne dans le futur sur un horizon fini en accord avec le diagramme temporel.

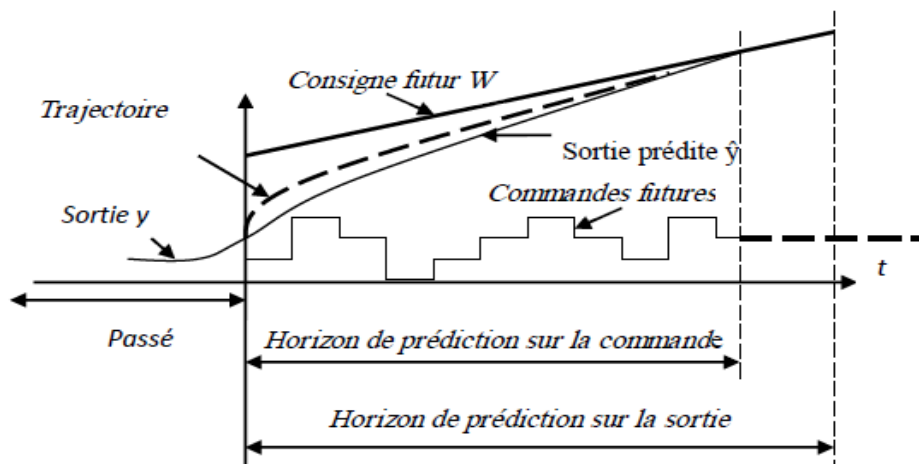


Figure II.1 Evolution temporelle de la prédiction

II.3.1 Différentes techniques de commande prédictive

Comme énoncé précédemment, la commande prédictive est utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PID est insuffisant. Et vue de la diversité de son utilisation dans les différents domaines (l'industrie chimique et agro-alimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale), plusieurs techniques ont été mises en œuvre afin de développer les méthodes de contrôle, et toutes partagent le même principe, bien que leurs interprétations soient différentes. Ces stratégies sont connues sous le nom de :

- DMC par Cutler et al
- PFC par J. Richalet
- GPC par D.W. Clarke

II.4 Algorithme de la commande prédictive

On énonce ci-dessous l'algorithme généralisée de la commande prédictive, sur lequel se reposent les différentes techniques de cette commande :

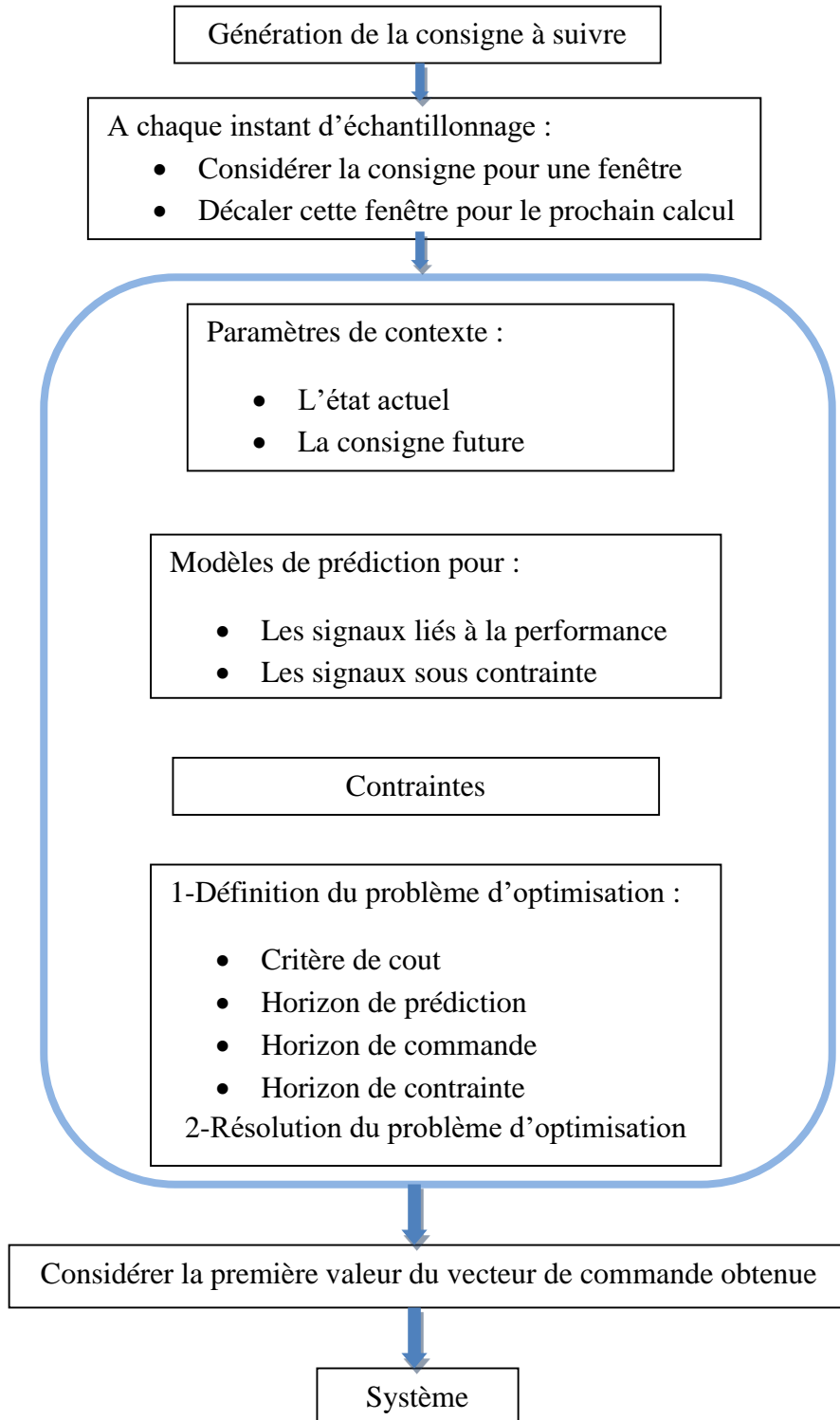


Figure II.2 Algorithme de la commande prédictive

Comme énoncé précédemment, il existe de différentes méthodes pour la commande prédictive, mais en vue de l'objectif de notre mémoire, nous nous intéresserons qu'à la commande prédictive généralisée et fonctionnelle.

II.5 La commande prédictive généralisée (GPC)

Le contrôle prédictif est basé sur des idées relativement anciennes et intuitives, mais n'est vraiment devenu une technologie de contrôle avancée qu'au milieu des années 1980. Par exemple, comme le montre le travail de Clarke, le "contrôle prédictif" démontre une structure suffisamment complète pour résoudre un problème très général, fournissant un système d'asservissement stable pour un ensemble donné de paramètres de réglage. Cette stratégie permet de contrôler des procédés avec des déphasages non minimaux, des pôles instables ou fortement amortis, des temps morts, des modèles d'ordre constants ou inconnus ou inconnus. Il a démontré son efficacité, sa flexibilité et son application réussie dans les applications industrielles, même pour les systèmes avec de courtes périodes d'échantillonnage.

L'idée de base de GPC consiste à prendre en compte, à l'instant présent, le comportement futur du processus, en utilisant explicitement un modèle numérique du système afin de prédire la sortie future sur un horizon fini. Le contrôleur calcule une séquence de commandes à appliquer au système pour minimiser la fonction de coût définie sur l'horizon de prédiction. Cette fonction se construit à partir de deux pénalités, la première reposant sur l'écart entre la sortie prédite du système et les consignes futures ; la seconde mesurant l'effort de commande. Cette technique de commande comprend plusieurs approches, identiques par rapport au principe général de base de la commande GPC :

- Approche algorithmique
- Approche polynomiale synthèse RST
- Recherche automatique des paramètres
- Extension en structure cascade multi-échantillonnée et en δ
- Approche sous contraintes terminales
- Approche multi-variable.

De l'ensemble des techniques proposées ci-dessus, la structure cascade garantit la rejection des perturbations, tandis que la commande prédictive permet de prendre en compte la connaissance de la trajectoire future. L'auto-calibrage, permettant la recherche automatique

des paramètres de réglage, est le garant de l'implantation réelle et effective de ce type de commande dans un secteur industriel, ce qui met en évidence que toutes les méthodes prédictives sont simples et efficaces en milieu industriel [11, 12].

II.5.1 Principe de la commande prédictive approche polynomiale (RST)

La commande prédictive polynomiale va être présentée dans le cadre de l'élaboration de l'algorithme de la commande prédictive généralisée simple. Il sera donc question de reprendre les points phares de l'algorithme de cette dernière afin d'en conclure les trois polynômes R, S et T du régulateur équivalent [13].

II.6 Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée

La commande prédictive généralisée repose sur quatre idées principales :

- ✓ Création des effets prédictifs en utilisant des trajectoires qui seront suivies dans le futur.
- ✓ Définition du modèle de prédiction numérique.
- ✓ Minimisation des critères quadratiques avec un horizon fini.
- ✓ Principe de l'horizon fuyant.

Le schéma fonctionnel de la commande prédictive généralisée est présenté comme suit :

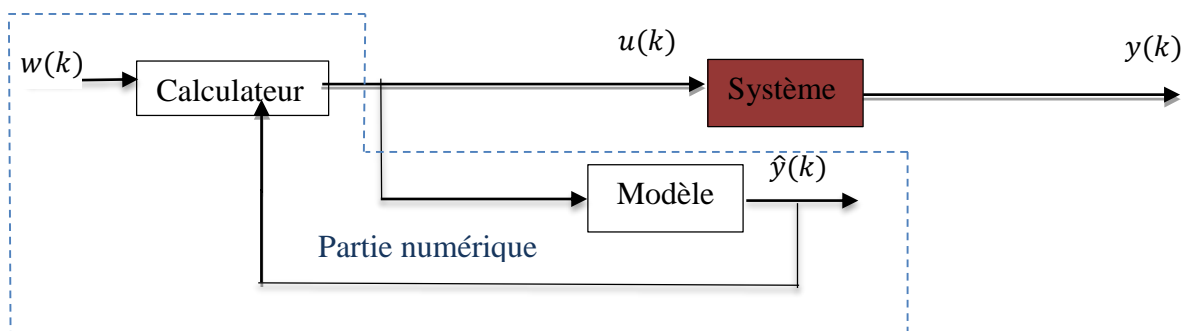


Figure II.3 Principe fonctionnement de GPC

Où :

$w(k)$: La consigne.

$y(k)$: La sortie du processus.

$\hat{y}(k)$: La sortie prédite.

II.6.1 Principe de l'algorithme de la commande prédictive généralisée

Nous pouvons résumer la synthèse de la commande prédictive généralisée dans l'algorithme suivant :

1. Obtention des coefficients A et B du modèle de processus de type CARIMA ;
2. Calcul du polynôme $\tilde{A} = A\Delta$
3. Définir les horizons de prédictions N_1 et N_2 , l'horizon de commande N_u , et le facteur de pondération λ .
4. Résolution des deux équations de diophantiennes
5. Formation de la matrice G.
6. Définition des matrices I_f et I_h .
7. Calcul de la matrice $M[G^T G + \mathbb{I}_{N_u}]^{-1} G^T$.
8. Calcul de l'horizon fuyant.
9. Synthèse du correcteur RST

II.7 Synthèse de la loi de commande GPC sans contrainte

II.7.1 Modèle du système

Les algorithmes de commande prédictive se distinguent que par le modèle utilisé pour représenter le procédé et par la fonction du coût à minimiser. En ce qui concerne, le système est représenté sous la forme CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average). Cette dernière est représentée comme suit :

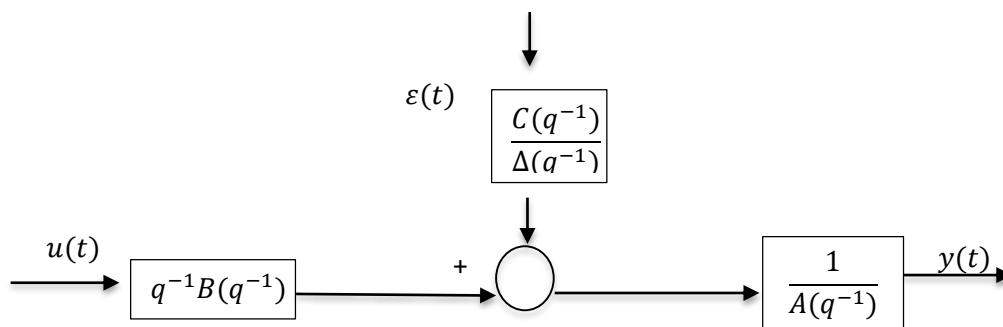


Figure II.4. Modèle CARIMA.

L'équation du système est donnée par :

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) + \frac{C(q^{-1})\varphi(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})} \quad (II.1)$$

Les polynômes $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, et $C(q^{-1})$ ainsi que de $\Delta(q^{-1})$, sont définis par :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (II.2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad (II.3)$$

$$C(q^{-1}) = c_0 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (II.4)$$

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (II.5)$$

Où :

$\Delta(q^{-1})$: Opérateur de différence.

$\varphi(k)$: Bruit blanc centré.

L'introduction d'un intégrateur a pour but d'éliminer les erreurs statiques par rapport à certains réglages ou perturbations. Pour cette raison, il est préférable de choisir $C(q^{-1}) = 1$.

II.7.2 Expression du critère quadratique

L'un des points essentiels de la Commande prédictive généralisée (GPC) est la mise en place d'une équation prédictive du comportement des systèmes dans leurs contextes opératoires futurs où il sera primordial de faire tendre vers zéro l'erreur de sortie future, effort minimum de la commande. Le calcul de la commande GPC est le résultat d'un critère quadratique minimisé portant sur les erreurs futures avec un terme de pondération sur les incréments de commande [14].

$$J(N_1, N_2, u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} [w_{t+j} - \hat{y}_{t+j}]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} [\Delta u_{t+j-1}]^2 \quad (II.6)$$

Où :

$w(t+j)$: La consigne appliquée à l'instant $(t+j)$.

$\hat{y}(t+j)$: La sortie prédite à l'instant $(t+j)$.

$\Delta u(t+j-1)$: L'incrément de commande à l'instant $(t+j-1)$.

N_1 : L'Horizon de prédiction minimal sur la sortie.

N_2 : L'Horizon de prédiction maximal sur la sortie avec $N_2 \geq N_u$.

N_u : L'horizon de prédiction sur la commande.

λ : Le coefficient de pondération sur la commande.

L'hypothèse suivante est faite sur la commande : $\Delta(\mathbf{t} + \mathbf{j}) = 0$ pour $j \geq N_u$. Le coefficient λ permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité.

II.7.3 Choix des paramètres GPC

➤ Choix de l'horizon minimal de prédiction N_1

Généralement, le produit $N_1 T_e$ (T_e période d'échantillonnage) est choisi égal au retard pur du système. Ainsi, pour un système ne présentant pas de retard ou un retard mal connu ou variable, N_1 est choisi égal à 1.

➤ Choix d'horizon maximal de prédiction N_2

N_2 est choisi de sorte que le produit $N_2 T_e$ soit limité par la valeur du temps de réponse souhaité. En effet augmenter la prédiction au-delà du temps de réponse n'apporte aucune information supplémentaire et complexifie la résolution. Par ailleurs, plus N_2 est grand, plus le système corrigé est stable et lent.

➤ Choix d'horizon de prédiction sur la commande N_u

L'horizon de commande conditionne les dimensions des matrices et vecteurs impliqués pour le calcul de la loi de commande : Plus ce paramètre est choisi petit plus le volume de calcul diminue. En plus si $N_u = 1$, ceci permet d'éviter des inversions de matrices lors des calculs de la loi de commande. D'où l'intérêt de choisir ce paramètre le plus petit possible (égal à 1 ou 2 selon les performances exigées) [15,16].

➤ Choix du facteur de pondération de la commande λ

C'est l'un des paramètres les plus ardues à régler car il influe directement sur la stabilité du système bouclé. On peut ainsi le désigner comme étant 'l'équilibre de la balance' :

- Plus il est élevé, plus la commande optimale fournie est douce.
- S'il est nul, la minimisation du critère est effectuée sans tenir compte des mouvements de la commande. Il peut donc en résulter une commande très forte pouvant faire diverger le processus réel.

Une relation permettant de déterminer rapidement la valeur de apportant au système le maximum de stabilité est donnée ci-dessous :

$$l = \text{trace}(G^T G) \quad (II. 7)$$

II.7.4 Prédicateur optimal sous forme matricielle

Un prédicateur peut être construit sous la forme :

$$y_{t+j} = F_j(q^{-1})y_t + H_j(q^{-1})\Delta u_{t-1} + G_j(q^{-1})\Delta u_{t+j-1} + J_j(q^{-1})\varepsilon_{t+j} \quad (II. 8)$$

Avec : F_j, G_j, H_j et J_j Sont les polynômes solutions uniques des équations diophantiennes suivantes :

$$\Delta(q^{-1})A(q^{-1})J_j(q^{-1}) + q^{-1}F_j(q^{-1}) = 1 \quad (II. 9)$$

$$G_j(q^{-1}) + q^{-1}H_j(q^{-1}) = B(q^{-1}) + J_j(q^{-1}) \quad (II. 10)$$

Le meilleur prédicateur est dérivé de la considération que la meilleure estimation du futur signal d'interférence est égale à la moyenne nulle supposée ici, sa forme est donc formulée ainsi :

$$y_{t+j} = F_j(q^{-1})y_t + H_j(q^{-1})\Delta u_{t-1} + G_j(q^{-1})\Delta u_{t+j-1} \quad (II. 11)$$

Pour cela, nous posons :

$$I_f = [F_{n_1}(q^{-1}) \dots F_{n_2}(q^{-1})]^T \quad (II. 12)$$

$$I_h = [H_{n_1}(q^{-1}) \dots H_{n_2}(q^{-1})]^T \quad (II. 13)$$

$$I_{\hat{y}} = [\hat{Y}_{n_1}(q^{-1}) \dots \hat{Y}_{n_2}(q^{-1})]^T \quad (II. 14)$$

$$u = [\Delta u(t)\Delta u(t+1) \dots \Delta u(t+N_u-1)]^T \quad (II. 15)$$

Où : \tilde{u} est la séquence des incréments de commandes futures.

De façon similaire, la matrice \mathbf{G} formée des coefficients $\{g_j^i\}$ qui correspondent aux valeurs des coefficients $\{g_i\}$ de la réponse indicielle du modèle. G_j est donné ainsi :

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1}^{N_1} & \dots & g_{N_1-N_u+1}^{N_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2}^{N_2} & \dots & g_{N_2-N_u+1}^{N_2} \end{bmatrix} \quad (II. 16)$$

Avec ces notations, le prédicteur optimal à j -pas peut s'écrire sous forme matricielle :

$$J = G\tilde{u} + I_f y(t) + I_h \Delta u(t - 1) \quad (II.17)$$

II.7.5 Critère quadratique sous forme matricielle

Afin d'obtenir l'expression matricielle de du critère quadratique, on combine les équations II.15 et II.17 :

$$J = [G\tilde{u} + I_f y(t) + I_h \Delta u(t - 1) - w]^T [G\tilde{u} + I_f y(t) + I_h \Delta u(t - 1) - w] + \lambda \tilde{u}^T \tilde{u} \quad (II.18)$$

Sachant que : $w = [w(t + N_1) \dots \dots w(t + N_2)]^T$ (II.19)

II.7.6 Minimisation de la fonction du coût

L'obtention de la séquence optimale de commandes futures s'effectue par minimisation analytique du critère sous forme matricielle $\frac{\partial J}{\partial \tilde{u}} = 0$. Il en résulte :

$$\tilde{u} = M[w - I_f y(t) - I_h \Delta u(t - 1)] \quad (II.20)$$

La matrice M est de dimension $N_u(N_2 - N_1 + 1)$ où :

$$M = [G^T G + \lambda I_{N_u}] = \begin{pmatrix} m_1 \\ \dots \\ m_{nu} \end{pmatrix} \quad (II.21)$$

D'après le principe de l'horizon fuyant, on ne prend que la première valeur de la séquence afin de l'appliquer sur le système :

$$\tilde{u}_{opt} = \tilde{u}_{opt}(t - 1) - m_1 [I_f y(t) + I_h \Delta u(t - 1) - w] \quad (II.22)$$

Enfin, la représentation polynomiale du régulateur peut être dérivée de la relation ci-dessus. Cette structure RST classique permet d'implémenter la loi de commande à l'aide d'une simple équation aux différences :

$$\Delta u_{opt}(t) = -m_1 I_f y(t) - m_1 I_f y(t) + I_h \Delta u(t - 1) + m_1 w \quad (II.23)$$

$$\Delta u_{opt}(t) [1 + m_1 I_h q^{-1}] = m_1 I_f y(t) + m_1 [q^{N_1} \dots q^{N_2}]^T w(t) \quad (II.24)$$

Cette relation doit correspondre d'après la figure II.5 à l'équation suivante :

$$S(q^{-1}) \Delta(q^{-1}) u(t) = -R(q^{-1}) y(t) + T(q^{-1}) w(t) \quad (II.25)$$

Cela produit trois polynômes R, S et T qui forment un contrôleur linéaire équivalent par identification :

$$S(q^{-1}) = (1 + m_1 I_h q^{-1}) \quad (II.26)$$

$$R(q^{-1}) = m_1 I_f \quad (II.27)$$

$$T(q^{-1}) = m_1 [q^{N_1} \dots q^{N_2}]^T \quad (II.28)$$

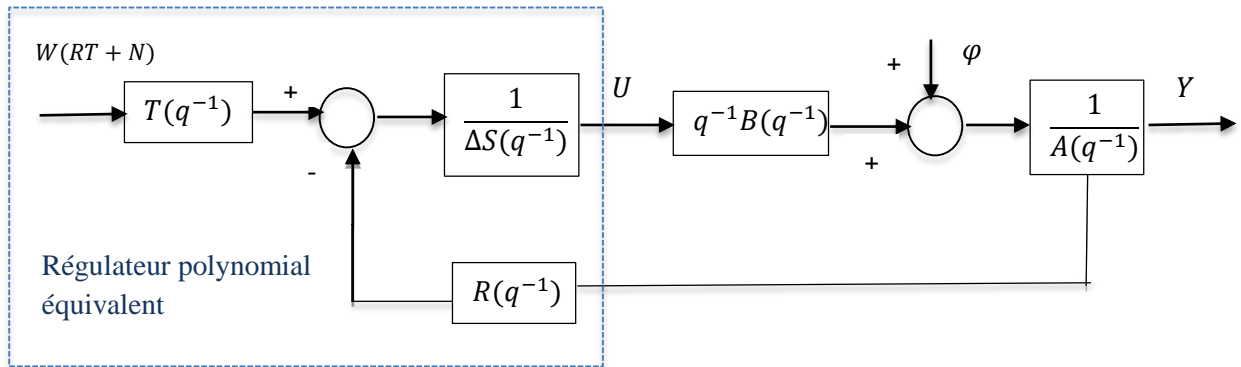


Figure II.5 Schéma du régulateur RST.

II.8 Identification de système

L'identification de système ou identification paramétrique est une technique consistant à obtenir un modèle mathématique d'un système à partir de mesures. Autrement dit, L'identification consiste à appliquer ou observer des signaux de perturbation à l'entrée d'un système et en analyser la sortie dans le but d'obtenir un modèle purement mathématique. Son principe se repose sur le fait d'extraire un modèle mathématique du système à partir d'observations [17]. Pour cela, il sera évident de mettre en œuvre une méthodologie d'identification directe de ces modèles dynamiques qui sont sous deux types :

- ✓ Les modèles non paramétriques (réponse fréquentielle, réponse à un échelon, etc.).
- ✓ Les modèles paramétriques (fonction de transfert, équation différentielle ou aux différences, etc.)

Expérimentalement, l'identification comporte quatre étapes :

- ✓ Acquisition des entrées/sorties sous protocole d'expérimentation.
- ✓ Choix d'une structure de modèle.
- ✓ Estimation des paramètres du modèle.
- ✓ Validation du modèle identifié.

Il en existe plusieurs algorithmes d'identification dans le cadre de « l'identification pour la commande ». Mais en vue de l'objectif de notre mémoire, nous optons pour les moindres carrés récurrents.

II.9 Mise en œuvre de l'algorithme de moindres carrés récurrent

La méthode des moindres carrés récurrents permet d'obtenir une représentation discrète d'un système continu pour permettre la synthèse directe de contrôleurs discrets. Cette approche consiste à minimiser les critères d'erreur pour le système invariant discret univarié décrit par l'équation ci-suit :

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \lambda^{(t-i)} [y(i) - \tilde{\theta}^T(t)\phi(i-1)]^2 \quad (II.29)$$

Le terme $\tilde{\theta}^T(t)\phi(i-1)$ correspond à la sortie du modèle prédite :

$$\tilde{\theta}^T(t)\phi(i-1) = -\tilde{a}_1(i-1) + \tilde{b}_1(i-1) \quad (II.30)$$

Avec λ le facteur d'oubli, comme son nom l'indique, « d'oublier » les anciennes mesures et de se concentrer sur les mesures les plus récentes. Pour choisir ce paramètre (sachant qu'il est compris entre 0.95 et 0.99) il faut trouver un compromis entre la qualité d'identification et la poursuite rapide. La forme générale de l'algorithme d'adaptation paramétrique (PAA) est la suivante :

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t)\phi(t)\varepsilon(t+1) \quad (II.31)$$

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1(t)F(t)^{-1} + \lambda_2(t)\phi(t)\phi(t)^{-1} \quad (II.32)$$

$$0 \leq \lambda_1 < 1$$

$$0 \leq \lambda_2 < 2$$

$$F(0) > 0$$

$$\varepsilon(t+1) = \frac{\varepsilon^0(t+1)}{1 + \phi(t)^T F(t)\phi(t)} \quad (II.33)$$

Où : $\varepsilon(t+1)$ est l'erreur d'adaptation.

Les erreurs d'adaptation correspondent toujours à des erreurs de prédiction ou à des erreurs de performances ou à des erreurs de filtrage. Si $i = t$, l'erreur d'ajustement dépend de

$\hat{\theta}(i)$. La PAA contient généralement une approximation d'une matrice de temps variable, et la matrice inverse donne une forme récursive de F.

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi(t)^T F(t)}{\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} + \phi(t)F(t)\phi(t)^T} \right] \quad (II.34)$$

On note que $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$ ont l'effet inverse. $\lambda_1(t) < 1$ tend à augmenter le gain d'adaptation (le gain inverse diminue) tandis que $\lambda_2(t) > 1$ tend à diminuer le gain d'adaptation (le gain inverse augmente). Pour chaque choix de séquence $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$ correspond à un profil de variation du gain d'adaptation et une interprétation en fonction du critère d'erreur, qui est minimisé par le PPA.

II.10 La commande prédictive fonctionnelle (PFC)

Mise en place par Jacques RICHALET en 1978 sur le groupe Shell, cette commande est un système industriel complexe qui utilise un modèle dynamique du processus à l'intérieur d'un contrôleur en temps réel. A pour but d'anticiper le futur. Cette méthode repose sur quatre principes essentiels qui lui sont propre pour sa mise en œuvre :

1. Modèle interne.
2. Trajectoire de référence.
3. Structure et séquence future de la commande.
4. Horizon fuyant.

II.10.1 Principe de la commande prédictive fonctionnelle

On considère le système à réguler comme un système modélisable sous la représentation 'équation aux différences finies discrète' (ARMA: Auto Regressive Moving Average):

$$y_m(k) = \sum_{i=1}^n a_m y_p(k-i) + \lambda \sum_{j=1}^m b_m u(k-1) \quad (II.35)$$

Avec : $b_m = 1 - a_m$ (II.36)

Où les paramètres désignent :

a_m : Le décrement du modèle d'ordre 1.

y_m : La sortie modèle.

y_p : La sortie Processus.

u : L'entrée.

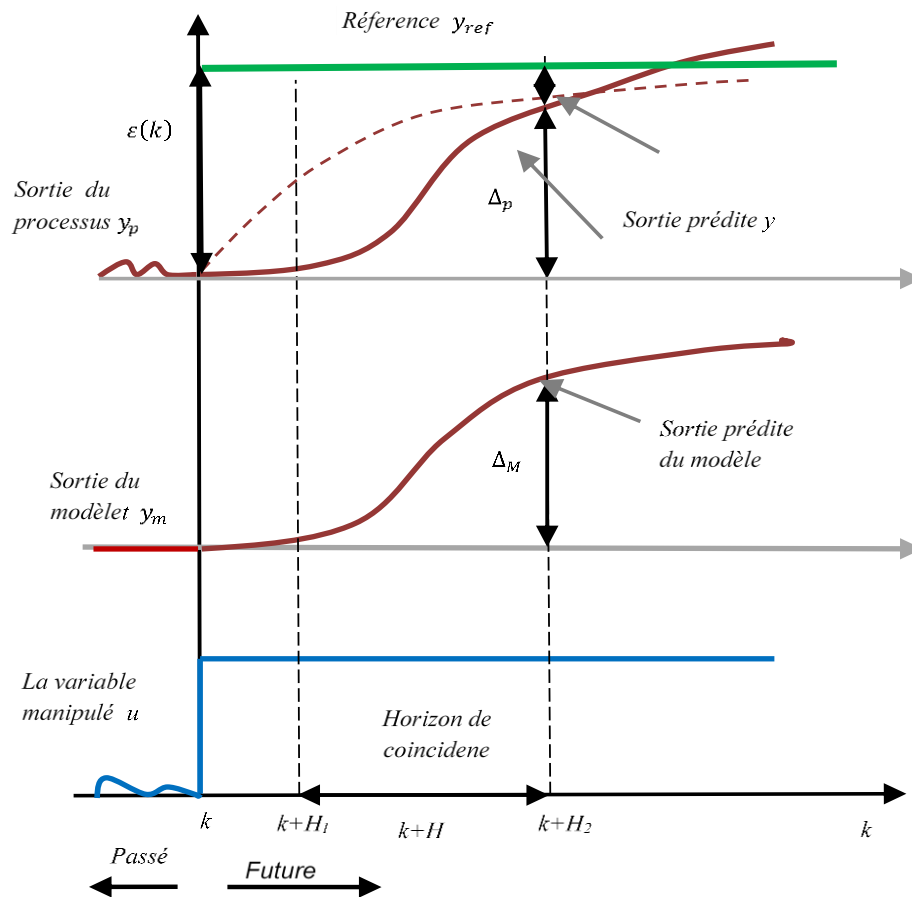


Figure II.6 Principe de la commande prédictive

II.10.1.1 Le modèle interne

Le comportement d'un processus sera simulé par un modèle interne. Il est dit interne car il est inclus dans la commande. Cette approche reproduit une stratégie d'identification et d'estimation des paramètres du modèle. L'objectif est de comprendre le comportement futur du processus compte tenu de certaines entrées.

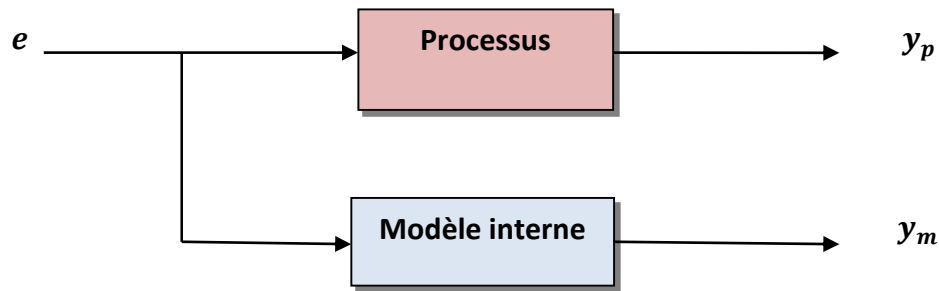


Figure II.7 Modèle interne.

Le modèle est implanté sous forme discrète : équation aux différences finies, où les variables continues issues des capteurs physiques sont échantillonnées à une cadence T_{ech} . En supposant que le procédé est linéaire, le modèle peut être considéré du premier ordre retardé. Dans ce cas, la fonction de transfert en continu du processus modélisé $G(p)$ est donnée par la relation suivante :

$$G(p) = \frac{\text{Sortie procédé}}{\text{Entrée procédé}} = \frac{k_p e^{-r_p p}}{1 + \tau_p p} = \frac{y_p}{u_p} \quad (II.37)$$

Où p désigne la variable de Laplace, K_M représente le gain statique, r le retard pure et t_r la constante de temps du modèle.

II.10.2 Trajectoire de référence

La consigne est l'objectif que l'on souhaite atteindre, mais cette spécification n'est pas suffisante et il convient de définir comment atteindre cette consigne. La trajectoire de référence est le chemin idéal à suivre par la sortie du processus afin d'atteindre la consigne imposée. Elle va donc imposer la dynamique de la boucle fermée.

On choisit la trajectoire de référence prise sous forme d'un modèle exponentielle de décrétement λ , qui relie la sortie du processus à la consigne future, selon la relation suivante :

$$C(t + j) - y_r(t + j) = l^j [C(t) - y_p(t)] \quad (II.38)$$

Avec :

C : La consigne.

y_r : La trajectoire de référence.

y_p : La sortie réelle du processus.

Ainsi que la variable λ est définie par :

$$\lambda = \exp\left(-\frac{T_{ech}}{T}\right) \quad (II.39)$$

Où T_{ech} est la période d'échantillonnage et T représente la constante de temps.

Dans le cas général, on cherche un ou plusieurs points qui fait coïncider le futur prédit et la trajectoire de référence, ce qu'on appelle points de coïncidences.

II.10.3 Horizon de coïncidence

En ce qui concerne la PFC, et contrairement aux autres commandes, on parle de points de coïncidence et non d'horizon de prédiction. En ces points de coïncidence, la sortie prédite du système est sensée coïncider avec la trajectoire de référence. Bien qu'il n'existe pas encore d'indication précise pour fixer ces points, néanmoins ils doivent se trouver après une toute partie délicate de la réponse des systèmes en boucle ouverte, et avant la valeur définie du temps de réponse de la boucle fermée [18].

II.10.4 Horizon fuyant

Seul le 1er élément de la séquence « optimale » est appliqué sur le système. Tous les autres éléments peuvent être oubliés car à la période d'échantillonnage suivante, les séquences sont décalées, une nouvelle sortie est mesurée et la procédure complète est répétée. Ce procédé repose sur le principe de l'Horizon fuyant.

- Le 1er élément de la séquence « optimale » est appliqué sur le système.
- Les séquences sont décalées
- Une nouvelle sortie est mesurée.
- La procédure complète est répétée

II.11 Calcul de la commande prédictive fonctionnelle

L'une des caractéristiques de la régulation PFC est la loi de régulation. Cela revient à sélectionner le type de signal de valeur de consigne à partir des fonctions de base telles que les pas, les rampes et les paraboles. Ces fonctions de base sont utilisées dans la partie prédictive du contrôle prédictif. Comme déjà mentionné, le contrôle prédictif découle de l'équivalence entre la trajectoire de référence et la sortie prédite du processus au point de coïncidence H Ce point correspond également au point B du modèle. Donc, par la relation (II.18), on peut trouver l'expression de la commande. Pour ce faire, on utilise la transformée en z [19].

Soit le modèle :

$$G(p) = \frac{\text{Sortie procédé}}{\text{Entrée procédé}} = \frac{k_p e^{-r} p^p}{1 + \tau_p p} = \frac{y_p}{u_p} \quad (\text{II.40})$$

On utilise un bloqueur d'ordre zéro :

$$B_0(p) = \frac{1 - e^{-T_e} p}{p} \quad (\text{II.41})$$

Par conséquent, on pourra écrire :

$$G_p(z^{-1}) = \frac{K_M (1 - e^{-T_e/\tau}) z^{-1}}{1 - e^{-T_e/\tau} z^{-1}} z^{-n_r} = \frac{y_p(z^{-1})}{u_p(z^{-1})} \quad (\text{II.42})$$

Où :

T_e : La période d'échantillonnage.

n_r : L'entier correspondant au nombre entier des périodes comprises dans le retard.

τ : La constante de temps.

Du modèle échantillonné, en tenant en compte que z^{-1} est le retard d'un échantillon et finalement en notant $\alpha = e^{-T_e/\tau}$, il convient :

$$y_p(k) = \alpha y_p(k-1) + K_M (1 - \alpha) u(k-1 - n_r) \quad (\text{II.43})$$

Cette sortie du monde réel est transférée au modèle mathématique, qui est invité à trouver les futures variables instrumentales qui produisent la sortie $y_M(k+H)$ à l'instant $k+H$. Nous pouvons formuler :

$$y_M(k) = \alpha y_M(k-1) + K_M (1 - \alpha) u(k-1) \quad (\text{II.44})$$

En considérant la commande comme étant constante égale à une valeur $u(k)$ après son application à l'instant $k+H$, on aura :

$$u(k+1) = u(k+2) = \dots = u(k+H) = u(k) \quad (\text{II.45})$$

Il sera donc possible d'obtenir la sortie à l'instant $k+H$ en incrémentant la relation (II.22).

Pour commencer, nous incrémentons de 2 la relation (II.22) :

$$y_M(k+2) = \alpha y_M(k+1) + K_M (1 - \alpha) u(k+1) \quad (\text{II.46})$$

Autrement écrite :

$$y_M(k + 2) = \alpha[\alpha \cdot y_M(k) + K_M(1 - \alpha)u(k)] + K_M(-\alpha)u(k) \quad (II.47)$$

$$= \alpha^2 \cdot y_M(k) + (\alpha + 1) \cdot K_M(1 - \alpha) \cdot u(k) \quad (II.48)$$

$$= \alpha^2 \cdot y_M(k) + K_M(1 - \alpha^2) \cdot u(k) \quad (II.49)$$

Il en conclut l'équation du prédicateur :

$$y_M(k + H) = \alpha^H \cdot y_M(k) + K_M(1 - \alpha^H)u(k) \quad (II.50)$$

La trajectoire de référence peut être définie en spécifiant le temps de réponse en boucle fermée (TRBF) souhaité et en sélectionnant la décroissance exponentielle de la déviation. On précise que le temps de réponse en boucle fermée est de 95 % de la valeur finale.

On pourra écrire :

$$\varepsilon(k) = C(k) - y_p(k) \quad (II.51)$$

Où :

$\varepsilon(k)$: L'écart entre la consigne et la sortie

$C(k)$: la trajectoire de référence ($\equiv y_p(k)$) à l'instant k.

Sachant que la trajectoire de référence est choisie au format exponentiel, la diminution de l'écart entre la valeur de consigne et la sortie au cours du temps (k + H) est exprimée comme suit :

$$\varepsilon(k + H) = \varepsilon(k)e^{-\frac{T_e H}{\tau_{rbf}}} = \varepsilon(k)\lambda^H \quad (II.52)$$

Avec :

$$\lambda = e^{-T_e/\tau_{rbf}} \quad (II.53)$$

Où :

τ_{rbf} : La constante de temps de la trajectoire de référence.

En supposant qu'il existe une correspondance réelle entre la sortie du processus et la trajectoire de référence au temps k + H, dans ces conditions, l'incrément de sortie du processus (Δp) peut être déterminé comme suit :

$$\Delta_p(k) = y_{ref}(k + H) - y_p(k) = C(k) - \varepsilon(k + H) - y_p(k) \quad (II.54)$$

L'expression de l'incrément de la sortie devient :

$$\Delta_p(k) = (1 - \lambda^H) (C(k) - y_p(k)) \quad (II.55)$$

Étant donné la correspondance entre les trajectoires de $k + H, y_p$ peut être remplacé par une mesure de la sortie de référence dans l'équation (3.18). Comme pour le processus, l'incrément de sortie du modèle peut être déterminé à l'aide de l'équation (3.14).

$$\Delta_M(k) = y_M(k + H) - y_M(k) \quad (II.56)$$

$$\Delta_M(k) = (1 - \alpha^k) K_M \cdot u(k) - y_M(k)(1 - \alpha^k) \quad (II.57)$$

Comme l'objectif est l'obtention de $\Delta_p(k) = \Delta_M(k)$, on peut à partir des équations (3.18) et (3.19) obtenir l'expression de la commande u :

$$u(k) = \frac{(1 - \lambda^H) \cdot (C(k) - y_p(k))}{(1 - \alpha^H) K_M} \quad (II.58)$$

La commande obtenue correspond à la figure II.6 représentée ci-suit :

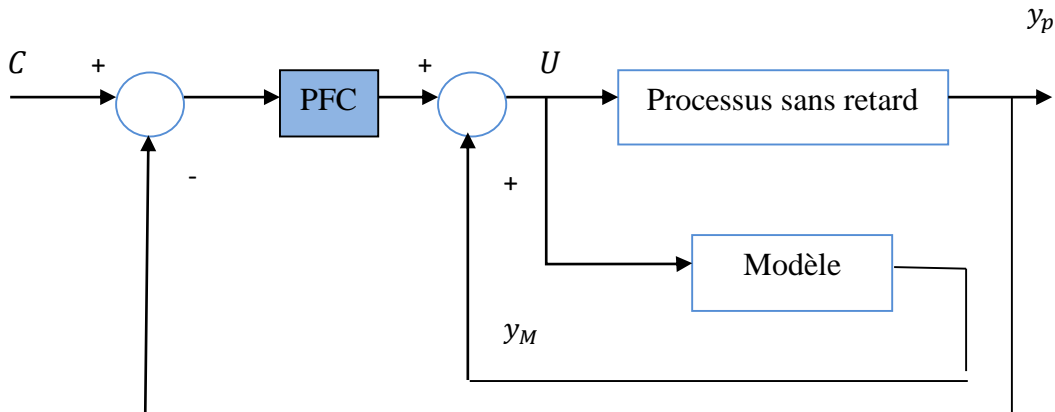


Figure II.8 Schéma bloc de la PFC sans retard pur

Si on compte prendre en considération les retards, il est nécessaire de les considérer, en plus du modèle, comme étant en série avec les sorties. En supposant une identification correcte du retard pur, la sortie retardée du procédé (y_{pret}) peut être exprimée par la relation suivante :

$$y_{pret}(k) = y_p(k) - (y_M(k) - y_M(k - r)) \quad (II.59)$$

Une fois que le signal $y_p(k)$ est estimé, le schéma bloc représenté précédemment en figure (II.6) devient :

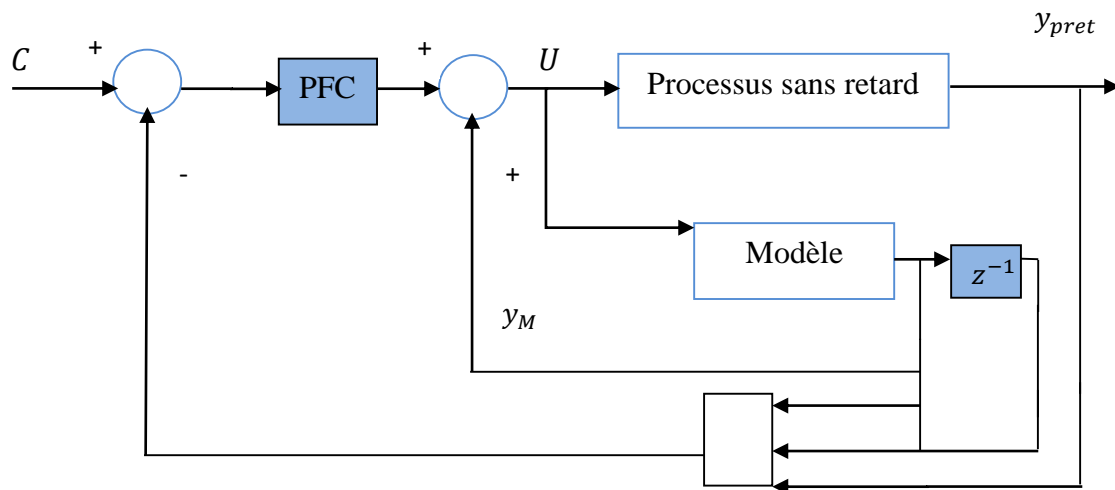


Figure II.9 Schéma bloc de la PFC avec retard pur

II.11.1 Choix des paramètres pour la commande PFC

En tableau joint, la modalité paramétrique nécessaire pour la mise en œuvre d'un programme en commande PFC :

Paramètres	Relation de calcul
Le temps de réponse en boucle ouverte TRBO	$TRBO = 3\tau$
Un facteur d'accélération de la réponse F_accel	$1 \leq fast_accel \leq 3$
Le temps de réponse en boucle fermée TRBF	$TRBF = \frac{TRBO}{fast_accel}$
La constante de temps en boucle fermée τ_{BF}	$\tau_{BF} = \frac{TRBF}{3}$
La période d'échantillonnage (T_e)	$r = nT_e$

Tableau II. 1 Paramètres utilisés dans le calcul de la PFC

II.12 Application à un ordre quelconque à partir de sa réponse indicielle

Soit un système asymptotique stable défini par sa représentation de convolution sur N coefficients a_i . La réponse indicielle peut avoir une allure quelconque :

$$y_p(k) = \sum_{i=1}^N a_i^P \cdot u(k-i) \quad (II.60)$$

Afin de déterminer la commande on suppose que la consigne varie en échelon et que la trajectoire de référence est l'exponentielle définie précédemment. La fonction de base est l'échelon, ce qui amène un seul coefficient μ_0 inconnu qui peut être déterminé par une coïncidence limitée en un seul point.

Soit donc le modèle associé :

$$y_M(k) = \sum_{i=1}^N a_i^M \cdot u(k-i) \quad (II.61)$$

A l'instant $(k+H)$, le modèle devient :

$$y_M(k+H) = \sum_{i=1}^N a_i^M \cdot u(k-i+H) \quad (II.62)$$

Et comme pour le futur $u(k+i+H) = u(k)$, $\forall i \in [1; H]$, on obtient donc le résultat ci-après pour le modèle :

$$y_M(k+H) = u(k) \cdot \sum_{i=1}^H a_i^M + \sum_{i=H+1}^N a_i^M \cdot u(k-i+H) \quad (II.63)$$

Avec :

$$A_H^M = \{a_{H+1}^M \dots a_N^M\} \quad (II.64)$$

$$A^T = \{a_1^M \dots a_N^M\} \quad (II.65)$$

$$U^T = \{u(k-1), \dots, u(k-N+H)\} \quad (II.66)$$

L'équation de commande pour un système asymptotiquement stable défini par sa représentation de convolution s'obtient naturellement :

$$(k+H) = (1-\lambda^H) (C(k) - y_{ref}(k)) + y_M(k) \quad (II.67)$$

$$\Delta(H) = (C(k) - y_P(k)) \cdot (1-\lambda^H) = y_L(k+H) + y_F(k+H) - y_M(k) \quad (II.68)$$

$$(C(k) - y_P(k)) \cdot (1-\lambda^H) = u(k) \cdot \sum_{i=1}^H a_i^M + \sum_{i=H+1}^N A_i^M \cdot u(k) - A^T u(k) \quad (II.68)$$

$$u(k) = \frac{(c(k) - y_p(k)) \cdot (1 - \lambda^H) - A_H^M \cdot u(k) - A^T u(k)}{\sum_{i=1}^H a_i^M} \quad (II.69)$$

II.12.1 Commande PFC du processus d'ordre élevé

II.12.1.1 Modèle interne sous forme parallèle

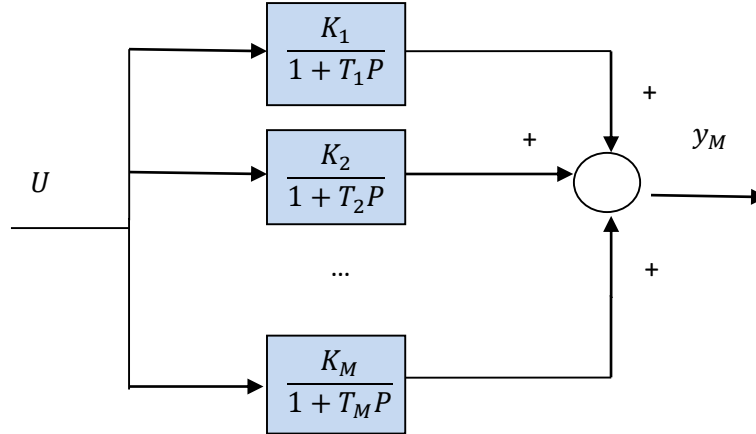


Figure II.10 Modèle parallèle d'ordre élevé de degré m .

Pour un processus interne d'ordre élevé, la représentation fonction de transfert basée sur une décomposition parallèle est donnée par :

$$G_M(p) = \sum_{i=1}^m \frac{K_j}{1 + \tau_i p} \quad (II.70)$$

II.12.1.2 Prédiction de la sortie

La sortie du modèle (k) est donnée par :

$$y_M(k) = y_1(k) + y_2(k) + \dots + y_m(k) \quad (II.71)$$

L'équation à la différence obtenue avec BOZ équivalent à l'équation précédente est donnée par :

$$Y_i(k) = \alpha_i y_i(k-1) + K_i(1 - \alpha_i)u(k-1), \quad 1 \leq i \leq m \quad (II.72) \text{D'où :}$$

$$\alpha_i = e^{-\frac{\tau_p}{\tau_i}} \quad (II.73)$$

Avec T_e : la période d'échantillonnage

En remplaçant 2 dans 1 on obtient la sortie du modèle suivante :

$$y_M(p) = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i(k-1) + \sum_{i=1}^m K_i (1 - \alpha_i) u(k-1) \quad (II.74)$$

II.12.1.3 Formulation de la trajectoire de référence

La trajectoire de référence est donnée par une fonction de la consigne C et la sortie de processus y_p :

$$y_{ref}(k+H) = C(k) - \lambda^H (C(k) - y_p(k)) \quad (II.75)$$

Où :

$$\lambda = e^{\frac{-T_e}{\tau_{bf}}} \quad (II.76)$$

Sachant que τ_{bf} Est la constante de temps de la trajectoire de référence.

La sortie du processus estimée \hat{y}_p à l'instant $k+H$ est donnée par :

$$\hat{y}_p(k+H) = \sum_{i=1}^m y_i(k+H) + \left(y_p(k) - \sum_{i=1}^m y_i(k) \right) \quad (II.77)$$

Au point de coïncidence, $y_{ref}(k+H) = \hat{y}_p(k+H)$, en utilisant un échelon d'entrée comme fonction de base, en plus des fonctions obtenues juste ci-dessous, il en résulte :

$$C(k)(1 - \lambda^H) - y_p(k)(1 - \lambda^H) + y_1(k)(1 - \alpha_1^H) + \dots + y_M(k)(1 - \alpha_M^H) = (K_1(k)(1 - \alpha_1^H) + K_M(k)(1 - \alpha_M^H))u(k) \quad (II.78)$$

Nous concluons avec la loi de commande $u(k)$:

$$u(k) = \frac{((C(k) - y_p(k))(1 - \lambda^H))}{\sum_{i=1}^M K_i(k)(1 - \alpha_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^M y_i(k)(1 - \alpha_i^H)}{\sum_{i=1}^M K_i(k)(1 - \alpha_i^H)} \quad (II.79)$$

II.13 Conclusion

La commande prédictive s'enrichit de différents avantages qui confèrent une excellente applicabilité aux convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Compte tenu du nombre limité de combinaisons de topologies possibles pour ces convertisseurs de puissance, ce type de commande est facile à mettre en œuvre. Ainsi, en fonction de critères prédéfinis, il est possible déterminer quelle configuration est la meilleure à imposer.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande prédictive et ses deux différentes formes : Nous avons commencé en premier lieu par la commande prédictive généralisée, pour ensuite finir par la commande prédictive fonctionnelle.

Nous avons abordé leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs algorithmes d'élaboration adaptés à notre système. Nous avons mentionné leurs paramètres de mise en œuvre ainsi que leurs lois de commande.

III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons appliquer les algorithmes de commandes prédictive à savoir la commande GPC et la commande PFC présenté dans le chapitre précédent sur le système global qui est composé du générateur photovoltaïque lié à un convertisseur boost et une charge résistive, et cela pour répondre à notre objectif qui est la poursuite de puissance au point maximale et d'optimiser la conversion d'énergie du système PV.

Le travail est présenté en trois sections, La première section décrit l'identification du système PV par l'algorithme des moindres carrés récursif (MCR), la seconde aborde l'application des deux commandes GPC et PFC sur le système, enfin la dernière section consiste aux résultats de simulation des algorithmes ainsi que leurs analyses.

III.2 Paramètres du système photovoltaïque utilisés

Les paramètres du système utilisé sont fixés par le type du module photovoltaïque SunPower SPR 415E, sur lequel s'appuie notre étude [20]. Les différents paramètres utilisés sont illustrés dans le tableau suivant :

Entrées	Valeurs
P_{max}	414 W
V_{oc}	85.3 V
I_{cc}	6.09 A
V_{mp}	72.9 V
I_{mp}	5.69 A
N_p	1
N_s	1
E	1000 W/m^2
T_a	25 °C

Tableau III.1. Les paramètres de simulation.

Les résultats de simulation du panneau solaire, avec les paramètres cités dans le tableau ci-dessus, sont illustrés dans la figure suivante :

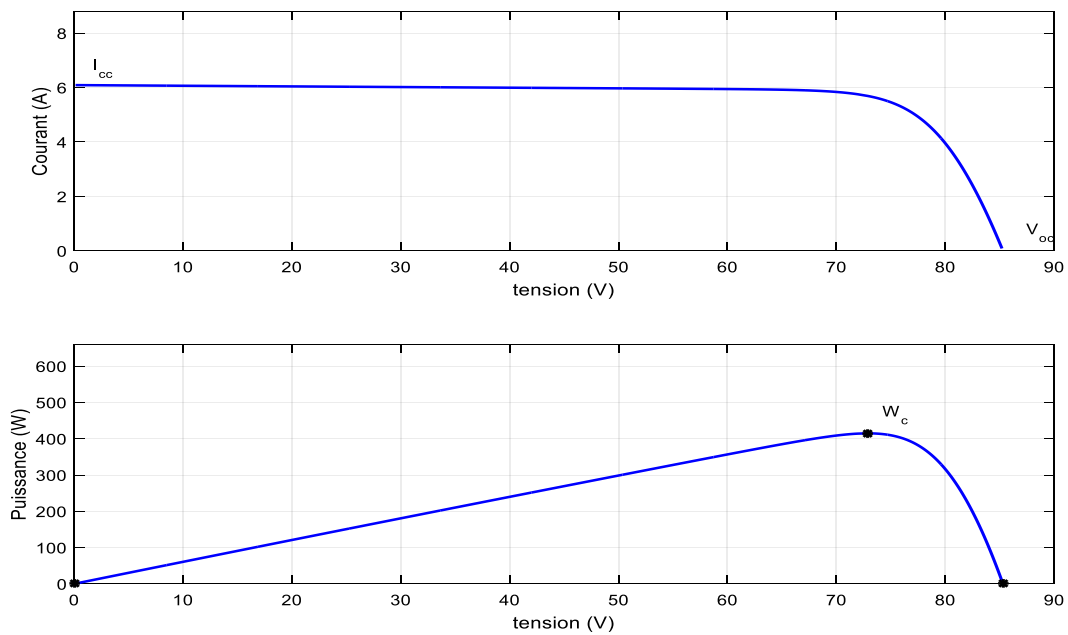


Figure III.1 : évolution des caractéristiques d'un panneau SunPower.

La puissance crête est de 414.801, qu'on va comparer par la suite avec la puissance maximale à la sortie du panneau et celle du convertisseur DC-DC.

III.3 Identification du système

Le système PV est un système non linéaire difficilement commandable et ajustable, ce qui rend nécessaire d'identifier un modèle à partir des entrées/sorties, ayant un même comportement que le système dynamique qui sera utilisé pour l'application des algorithmes PFC et GPC. Le modèle paramétrique linéaire utilisé pour approximer l'ensemble du système est un modèle de deuxième ordre qui est sous la forme suivante :

$$G(z) = Z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2}}{1 - \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}} \quad (\text{III.1})$$

Après avoir simulé l'algorithme d'identification, La fonction de transfert du modèle identifié est comme suit :

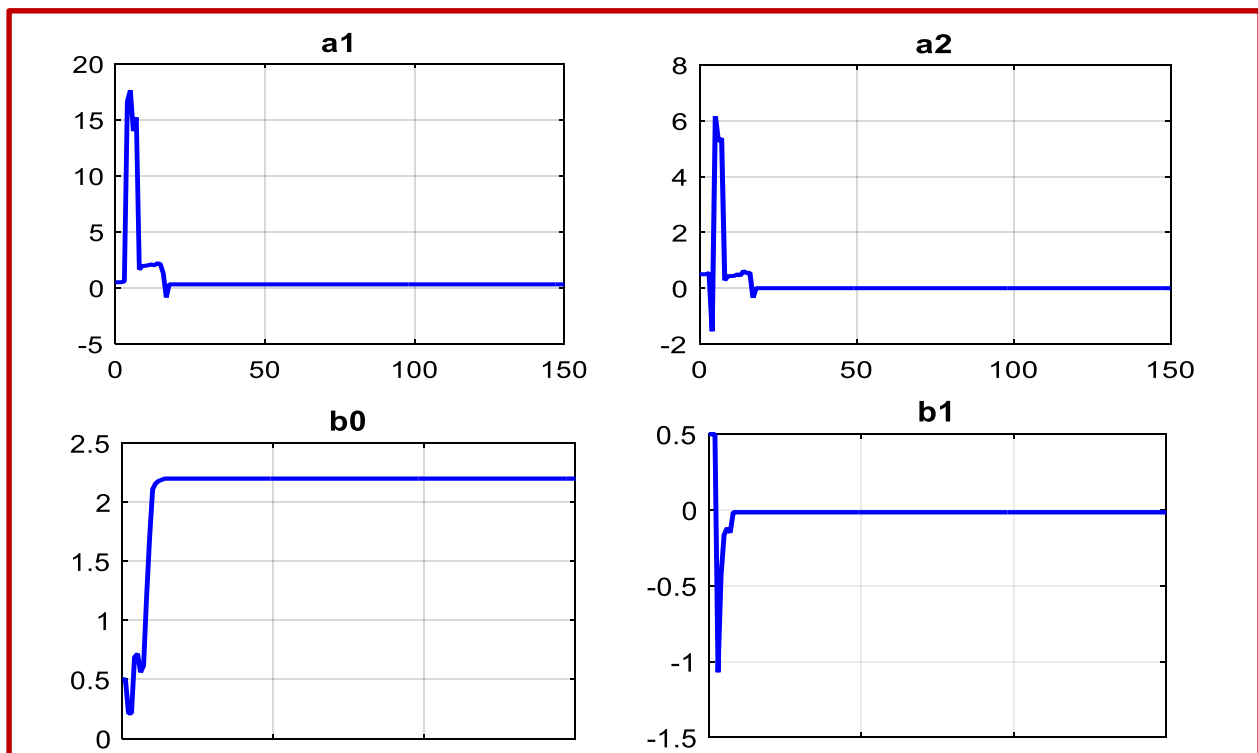
$$G(z) = \frac{2.198893960662574z^{-1} - 0.014978985796400z^{-2}}{1 - 0.312186407291608z^{-1} + 8.695567055988773e-04 z^{-2}} \quad (\text{III.2})$$

Le tableau ci-dessous résume les différentes valeurs des paramètres de l'algorithme d'identification (MCR) utilisé pour identifier notre modèle :

Tableau III.2. les paramètres d'identification.

<p>1. Initialisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A(q^{-1}) = 1 + 0.5q^{-1} + 0.5q^{-2}$ • $B(q^{-1}) = 0.5q^{-1} + 0.5q^{-2}$ <p>2. Paramètres de l'algorithme d'identification :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $P(0) = 10^5 * I_{4*4}, \lambda = 0.99$ • La période d'échantillonnage $T_e = 1 \text{ e-}6 \text{ sec}$ <p>3. Durée de simulation: 0.1 sec</p> <p>4. Les polynômes de la fonction de transfert :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A(q^{-1}) = 1 - 0.312186407291608z^{-1} + 8.695567055988773e - 04 z^{-1}$ • $B(q^{-1}) = 2.198893960662574z^{-1} + -0.014978985796400z^{-2}$

La figure suivante illustre les paramètres de la fonction de transfert $G(z)$ Du modèle identifié



III.4 Application de l'algorithme GPC approche RST sur le système

La présence du model numérique est une condition nécessaire pour le fonctionnement du GPC, afin de pouvoir calculer la sortie prédite sur un horizon fini. Puisque dans notre application on ne dispose pas de la fonction de transfert du processus, on a donc utilisé la méthode d'identification du système. L'algorithme GPC est appliqué à la commande de courant de sortie d'un générateur PV, dont le principe de fonctionnement est rappelé dans la figure ci-dessous :

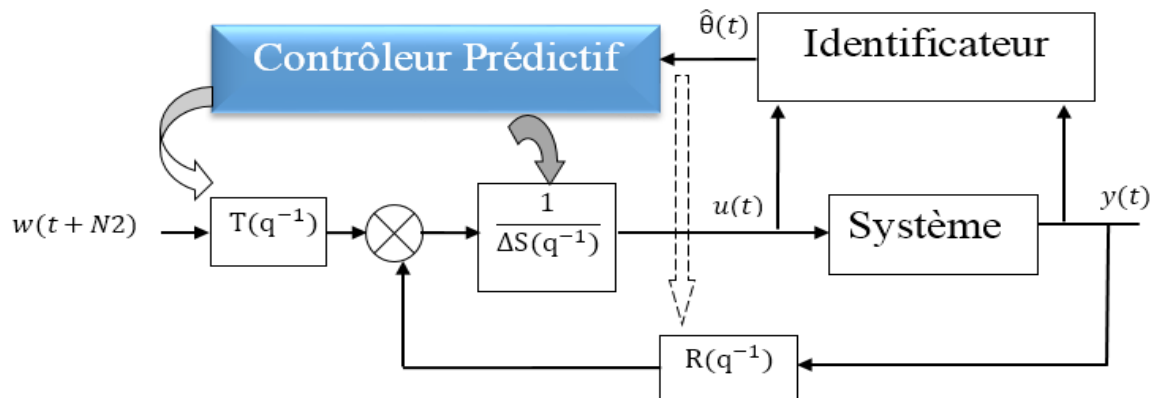


Schéma. III.3 : Schéma blocs de la commande GPC .

Après l'identification des paramètres, l'approche récursive adaptera simultanément les paramètres du régulateur RST, et les paramètres sont mis à jour à chaque instant t. Ci-dessous les résultats de simulation d'un régulateur RST :

1. Initialisation :

- $R(q^{-1}) = 1 + q^{-1} + q^{-2}$
- $S(q^{-1}) = 1 + q^{-1} + q^{-2}$
- $T(q^{-1}) = 1 + q^{-1} + q^{-2} + q^{-3} + q^{-4} + q^{-5} + q^{-6}$

2. Polynômes RST après simulation

- $R(q^{-1}) = -0.286594895314 + 0.408364099989 q^{-1} + 0.000439171232317 q^{-2}$
- $S(q^{-1}) = 1 - 0.0432738527921 q^{-1}$
- $T(q^{-1}) = 0.0623281838325 + 0.0484836531818 q^{-1} + 0.0393127114318 q^{-2}$

Tableau III.3. Résultats des paramètres du régulateur.

III.4.1 Résultats de simulation pour un éclairage fixe

Dans cette partie, nous avons appliqué une consigne qui convient à une irradiations et température fixé à 1000 W/m² et 25°C respectivement.

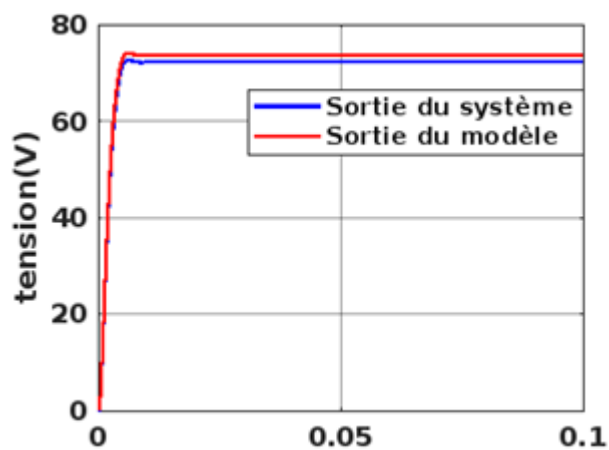


Figure III.4 Allure de la sortie du modèle et la sortie du système.

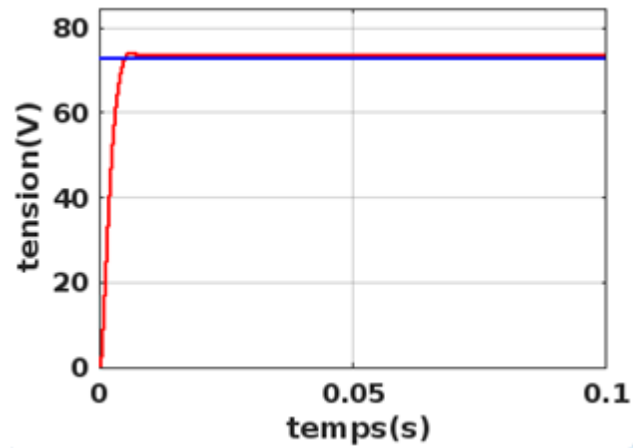


Figure III.5 Allure de la consigne et la sortie du système.

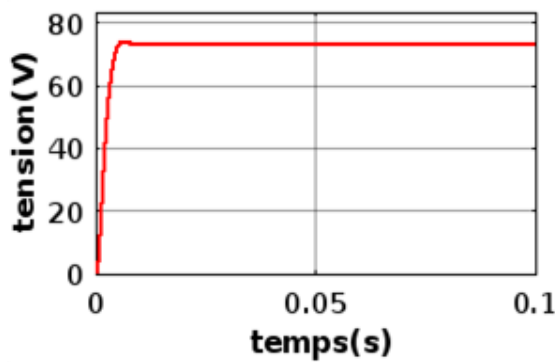


Figure III.6 Allure de tension

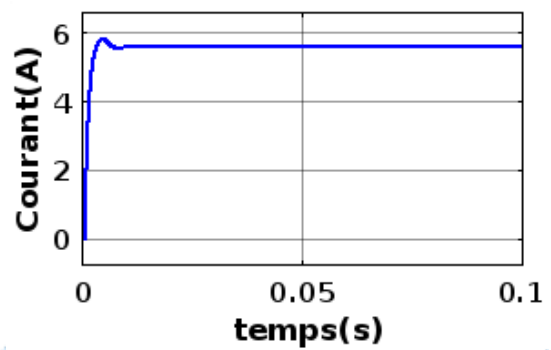


Figure III.7 Allure de courant.

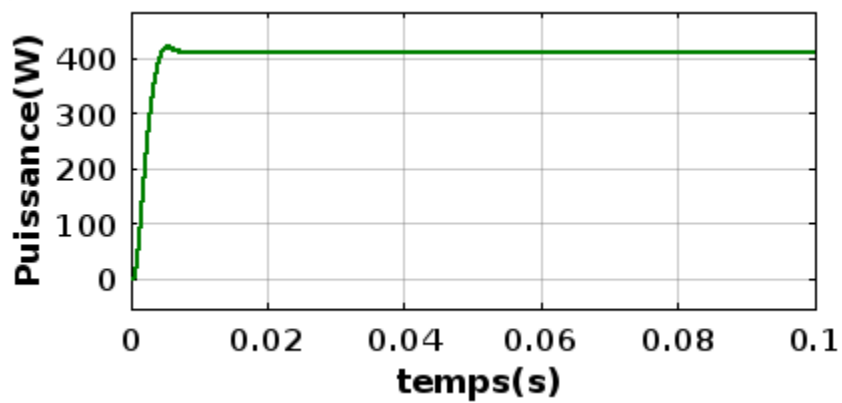


Figure III.8 Allure de puissance.

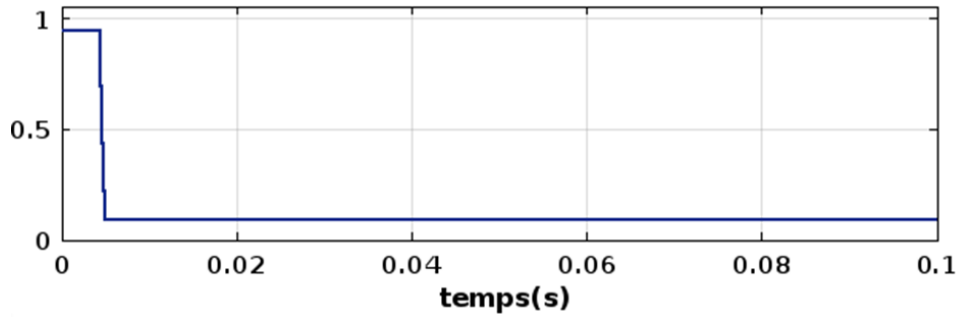


Figure III.9 Allure de l'écart type.

D'après les résultats de la simulation, on remarque que les allures se composent de deux phases. La première phase, dès la mise en service de la MPPT, les allures tension, courant et puissance croient, et convergent vers leurs valeurs optimales après un certain temps où la puissance atteinte est 414W soit 99.98% de la puissance maximale.

III.4.2 Résultats de simulation pour un éclairement variable :

Pour mieux tester l'efficacité de la commande, nous allons appliquer un éclairement variable, tout en fixant la température à 25°C. Les résultats de simulation sont représentés ci-dessous :

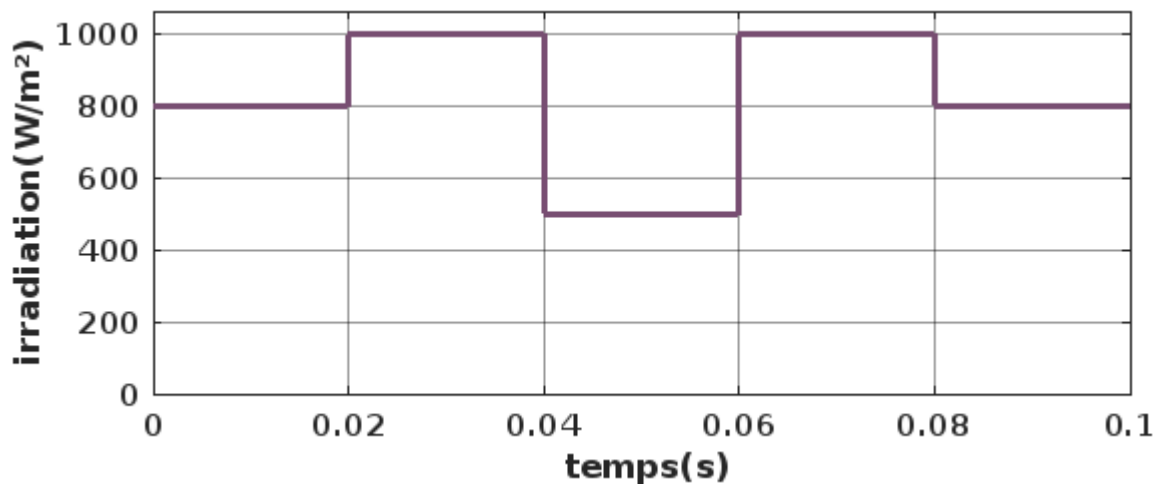


Figure III.10 Profil de l'éclairement variable.

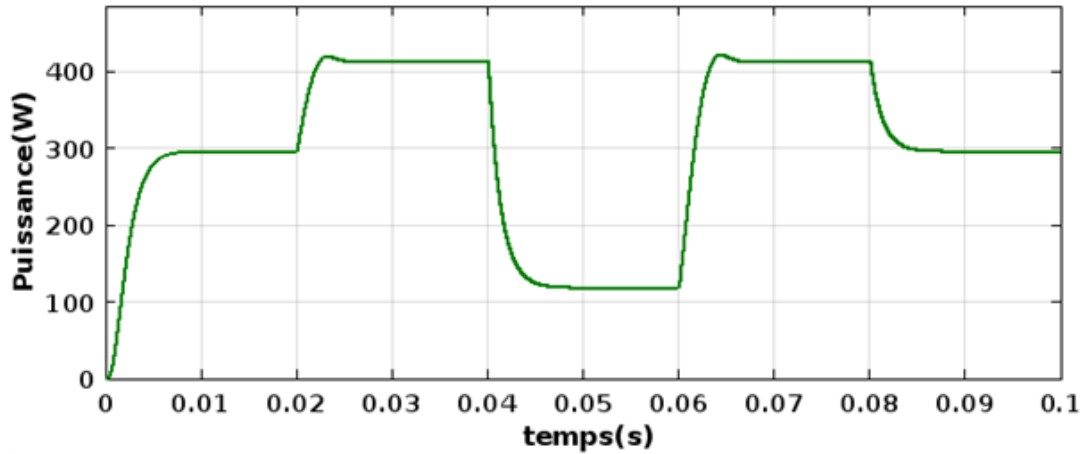


Figure III.11 Allure de puissance à éclairement variable.

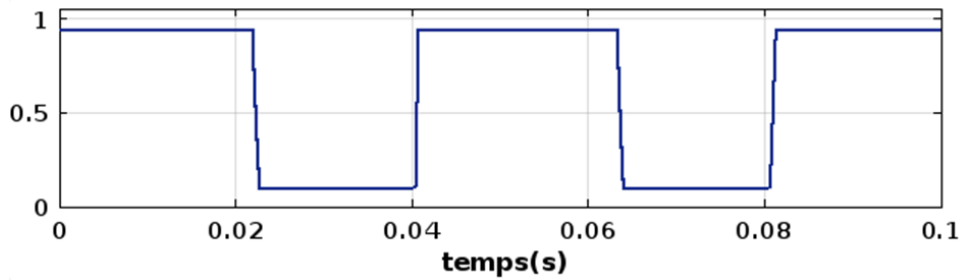


Figure III.12 Allure de l'écart type.

Dans cette simulation, nous avons effectué une variation d'irradiation répartie sur cinq intervalles de temps comme le montre la figure Fig. III.10.

Les résultats de la simulation, montrent que les différentes grandeurs de sortie du PV, suivent parfaitement les grandeurs de fonctionnements optimales, pendant la variation de l'irradiation. Il a été vérifié qu'avec l'application de cette régulation, pour chaque variation d'irradiation, la puissance maximale est atteinte.

La puissance diminue quand l'irradiation diminue et augmentent lorsque l'irradiation augmente.

III.4.3 Résultats de simulation pour une température variable

Tout comme l'ensoleillement, un générateur PV dépend aussi de la température. Pour être plus précis, c'est la température interne qui dépend de la température ambiante, qui transformera par la suite une partie en photo-courant, et le reste en chaleur. D'où la nécessité d'une simulation à température variable, dont les résultats sont représentés ci-dessous :

Une variation de température a été simulée, à une irradiation fixée à 1000 W/m^2 , l'allure de la commande est représentée sur le tracé de la figure III.13.

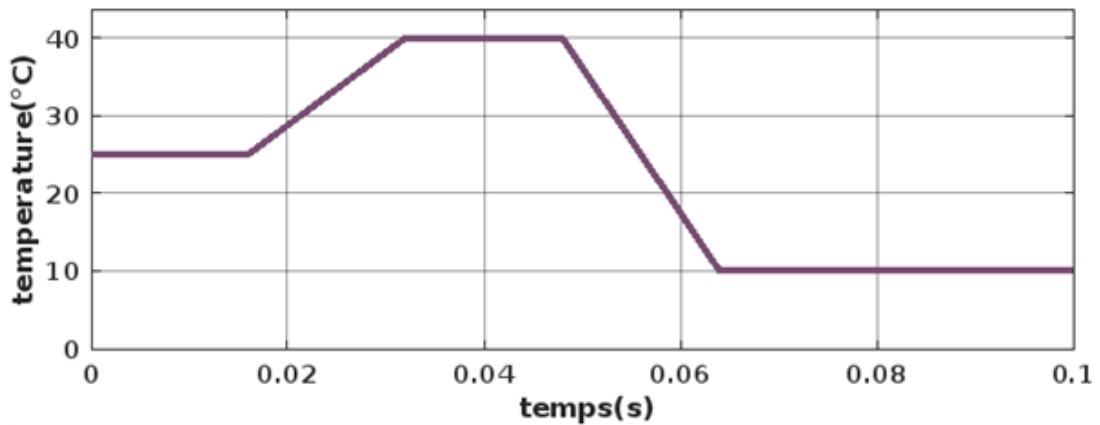


Figure III.13 Allure de la variation de la température.

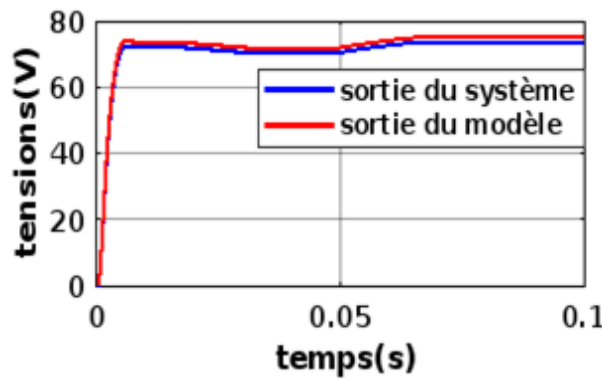


Figure III.14 Allure de sortie du modèle et système.

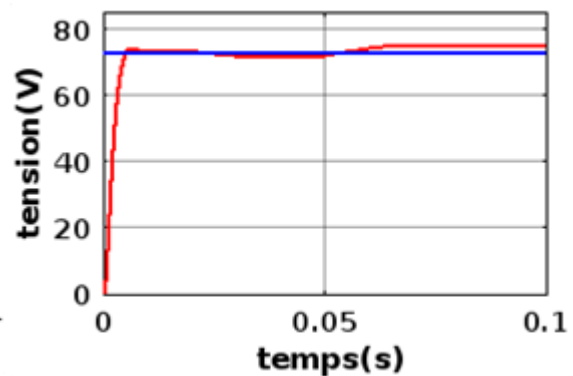


Figure III.15 Allure de la sortie du système et de la consigne.

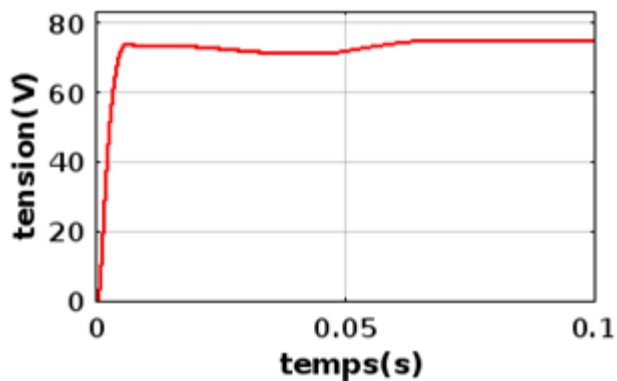


Figure III.16 Allure de la tension.

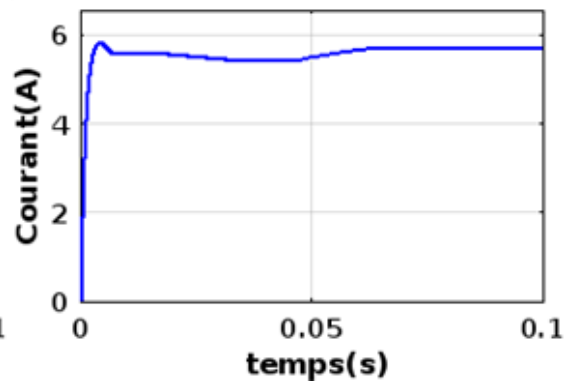


Figure III.17 Allure de la variation de courant.

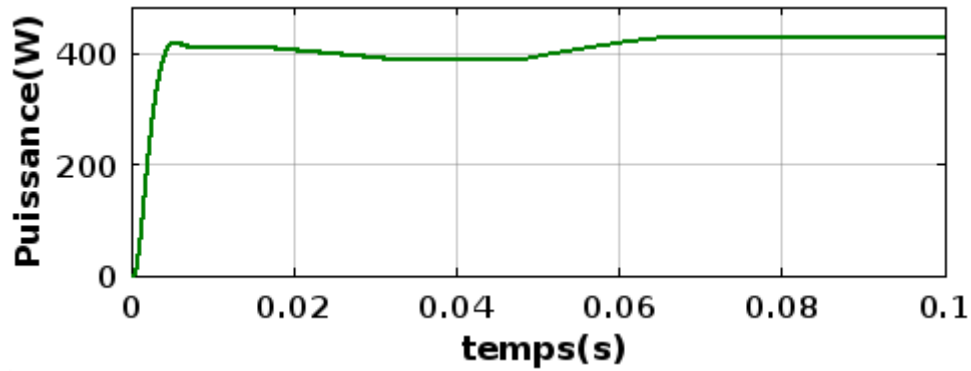


Figure III.18 Allures de puissance du générateur.

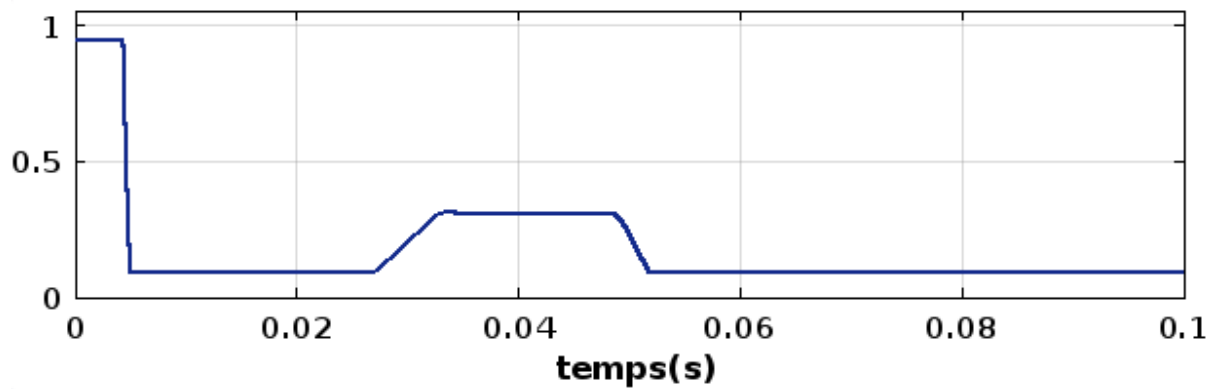


Figure III.19 Allure de l'écart type.

Lors de la variation de température, la puissance de sortie du générateur PV, diminue de 0.35% environ quand la température augmente de 1°C, Ceci est dû au fait que la tension de fonctionnement des cellules PV diminue de manière importante avec l'élévation de la température, On constate que la diminution de la température du module entraîne une augmentation de la tension de sortie (de 6.25%), mais n'a quasiment pas d'impact sur l'intensité (2%) [21, 22].

III.5 Application de l'algorithme PFC

L'objectif de cette approche consiste à améliorer le courant/tension de sortie du système, et pour cela il faut donc être capable de piloter le processus en respectant ses contraintes, ce qui impose de réaliser une prédiction de sa sortie. Nous représentons ci-dessous le schéma-bloc fonctionnel de la commande prédictive, comportant le model paramétrique (processus) non soumis à une perturbation

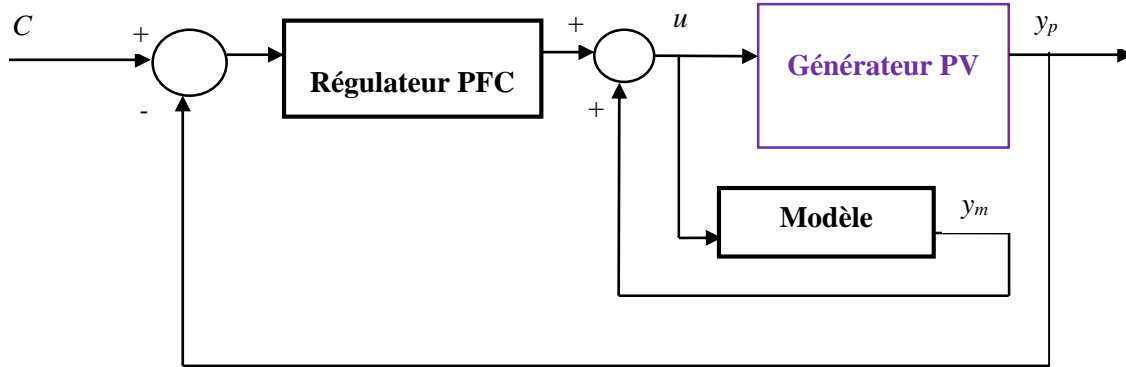


Figure III.20 Schéma bloc de la commande PFC

Afin de pouvoir réguler les processus instables, on a décomposé le modèle identifié en deux modèles de premier ordre $M1$ Et $M2$, qui permettant d'évaluer la sortie du processus à piloter sous l'effet de la variable à manipuler. Nous avons obtenu les deux fonctions suivantes :

$$M1 = \frac{K_1(1-\alpha_1)Z^{-1}}{1-\alpha_1Z^{-1}} \quad (III.1)$$

$$M2 = \frac{K_2(1-\alpha_2)Z^{-1}}{1-\alpha_2Z^{-1}} \quad (III.2)$$

Où : $\alpha_1 = e^{-\frac{T_e}{T_1}}$, $\alpha_2 = e^{-\frac{T_e}{T_2}}$

Avec :

$$K_1 = 3.1686 ; K_2 = 0.023558 ; T_e = 1e - 6 ; T_1 = 8.525 ; T_2 = 1.702417 e - 7$$

III.5.1 Premier cas :

Dans cette partie, notre système est exposé à une irradiation constante, à température ambiante, les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures suivantes :

Afin de quantifier la qualité du régulateur PFC, l'écart type de l'erreur de niveau (consigne-mesure) a été déterminé, son allure est visualisée dans la figure ci-dessous :

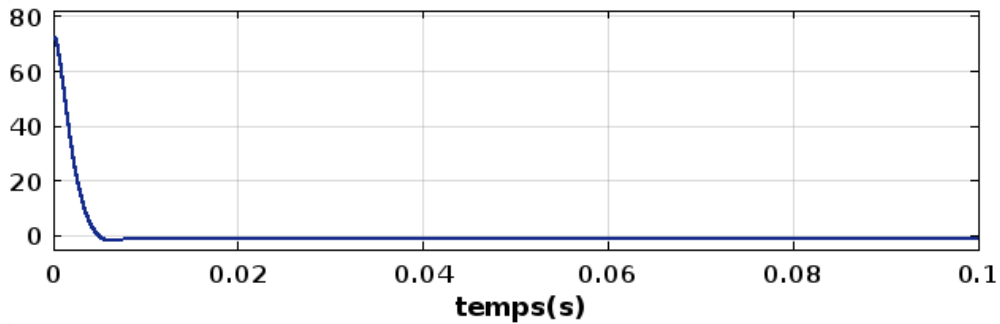


Figure III.21 Allure de l'erreur consigne-système.

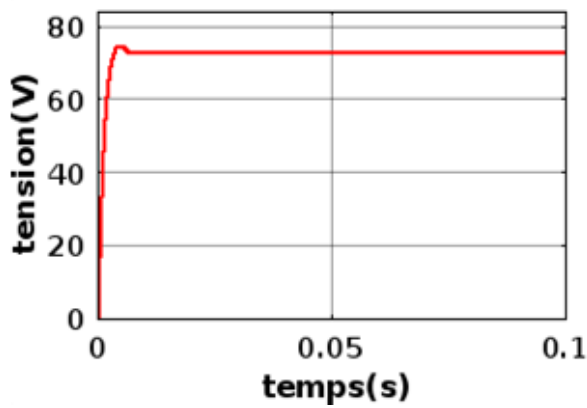


Figure III.22 Allure de la tension.

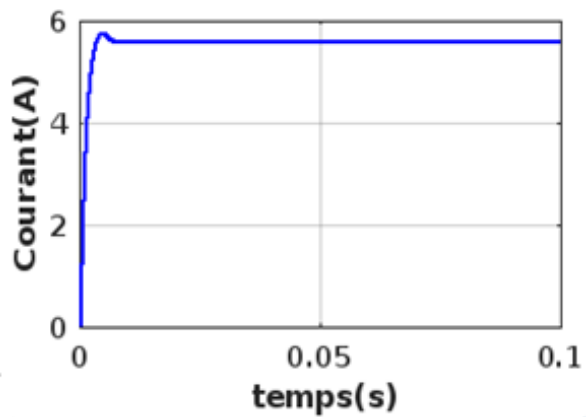


Figure III.23 Allure de courant.

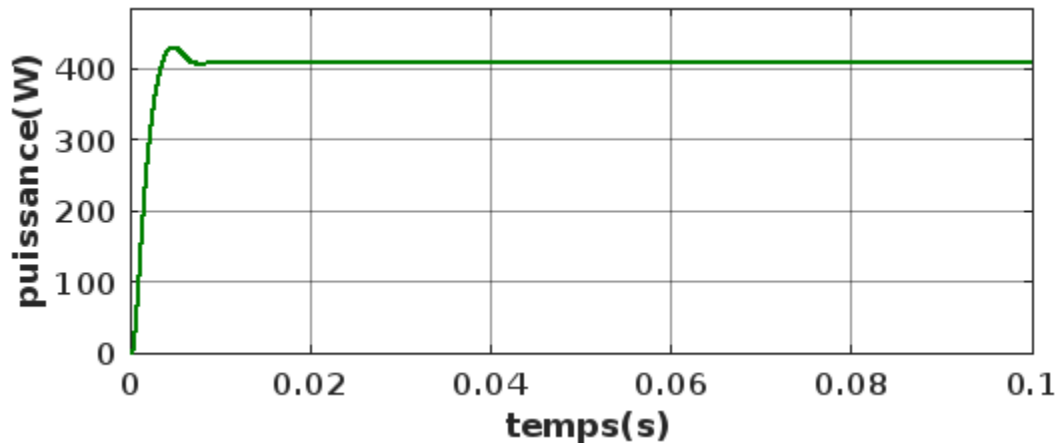


Figure III.24 Allure de la puissance.

III.5.1.1 Interprétation des résultats

Un régulateur est qualitatif lorsque l'erreur entre la sortie et la consigne est minimal, comme le montre la figure III.21. On remarque que les deux figures consigne-sortie du modèle se confondent parfaitement. Grâce à la décomposition du modèle du processus en deux modèles physiques, et à la régulation des paramètres de PFC, les sorties du système se rapprochent de leurs valeurs maximales.

La puissance maximale fournie par le panneau coïncide avec la puissance maximale théorique, ($P_{max} = 414 \text{ W}$).

III.5.2 Deuxième cas

Maintenant, nous allons fixer l'irradiation et faire varier la température, comme représenté sur la figure suivante :

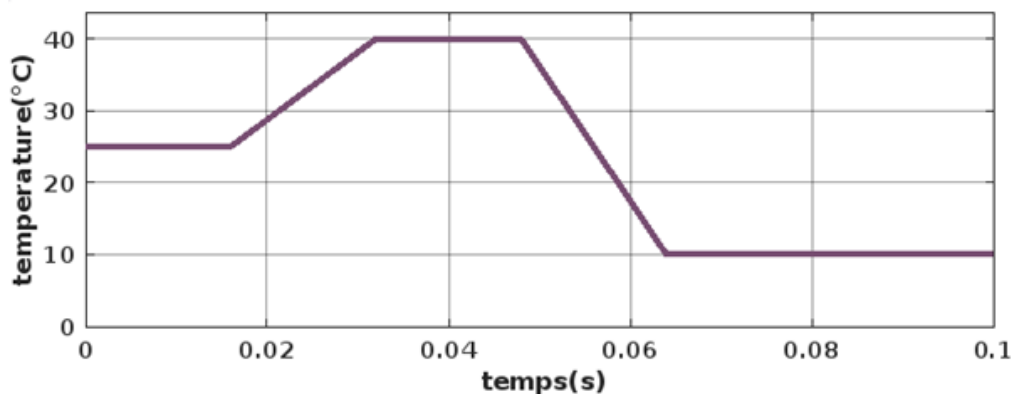


Figure III.25 Allure de la variation de la température.

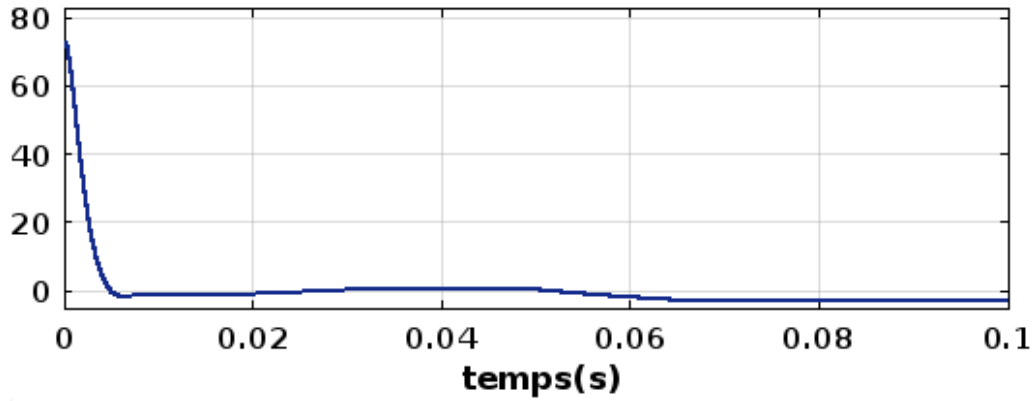


Figure III.26 Allure de l'erreur.

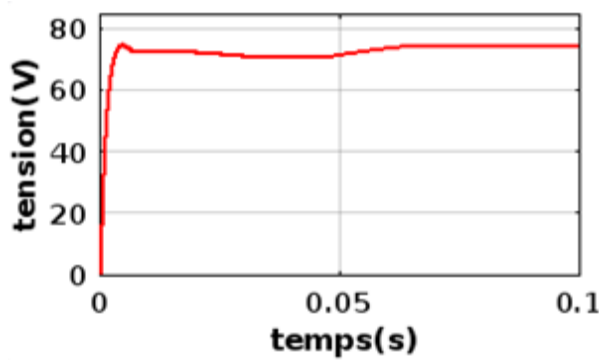


Figure III.27 Allure de la tension.

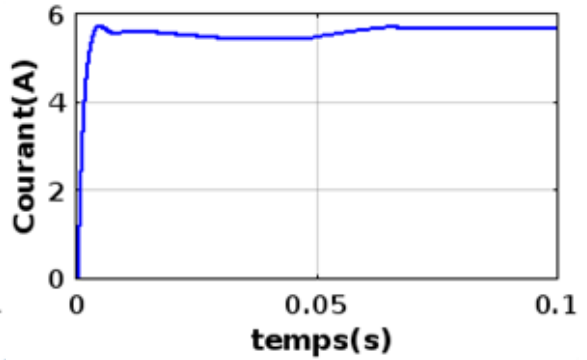


Figure III.28 Allure de la variation du

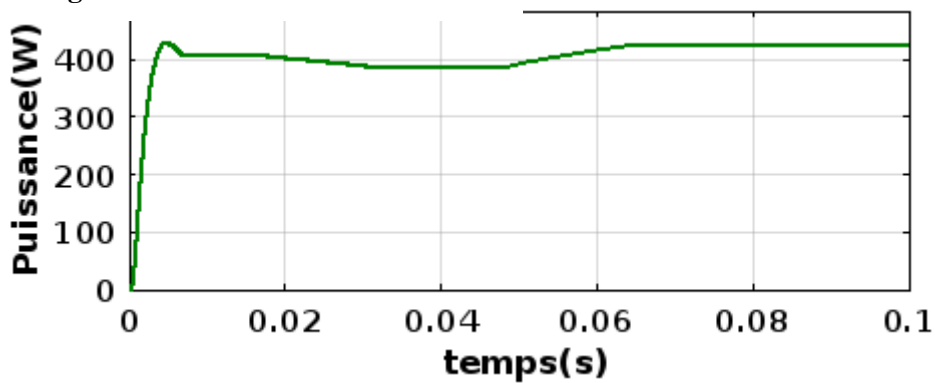


Figure III.29 Allure de puissance.

III.5.2.1 Interprétation des résultats

Une variation de température engendre une variation des caractéristiques du système, et comme la commande GPC, les résultats sont très proches des valeurs maximales du panneau.

III.5.3 Dernier cas

En dernier, nous allons faire varier l'irradiation à température ambiante, comme montré sur la figure suivante :

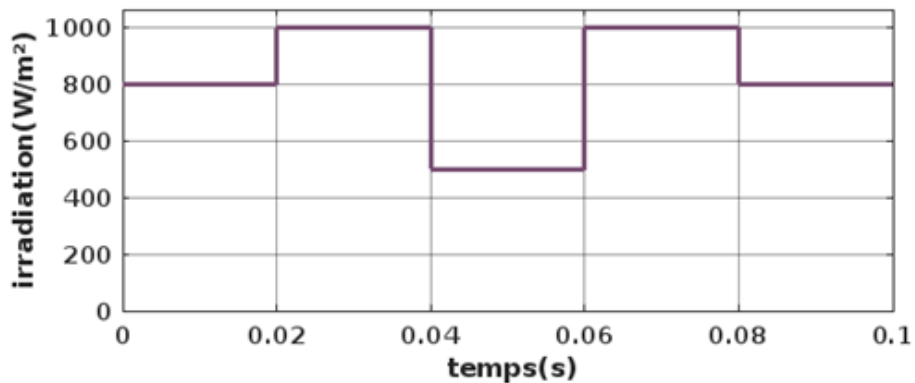


Figure III.30 Allure de la variation de l'irradiation

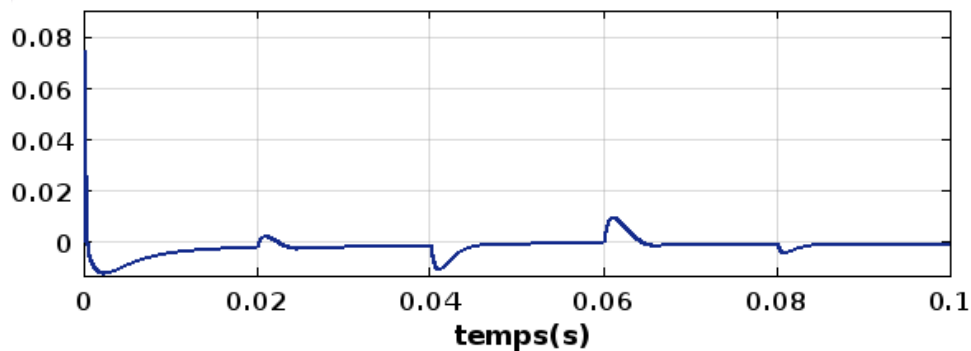


Figure III.31 Allure de l'écart type de l'erreur.

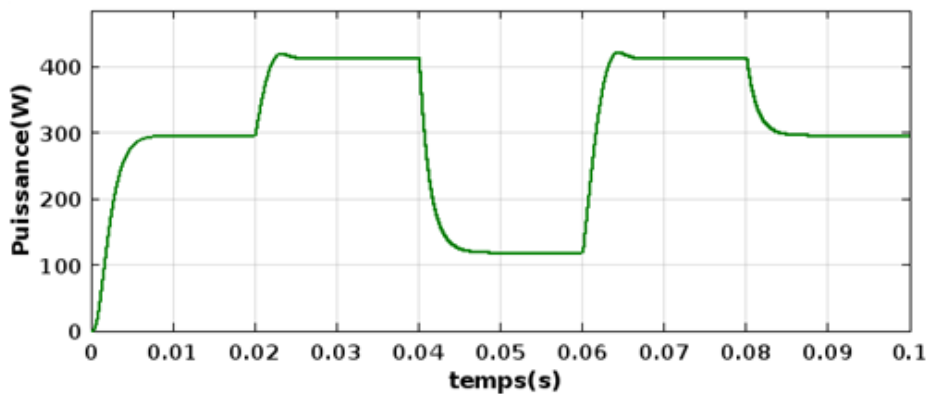


Figure III.32 Allure de puissance.

III.5.3.1 Interprétation des résultats

L'écart type de l'erreur subit une perturbation à la variation de l'irradiation, puis se stabilise et tourne autour de zéro, une perturbation dans le sens négative quand l'irradiation diminue et dans le sens positif quand E augmente (voir figure III.31). L'allure de la puissance de la figure (III.32), suit le comportement de l'irradiation, et atteint sa valeur maximale pour chaque variation.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé l'application de la commande prédictive sur le système PV, en premier lieu nous avons implémenté l'algorithme GPC en exploitant un modèle linéaire qui approxime notre système afin de calculer les polynômes du régulateur RST. Par la suite une autre approche de commande prédictive a été appliquée qui est la commande PFC et cela pour montrer l'efficacité de la commande prédictive.

Les résultats de simulation ont bien montré les performances de la commande prédictive pour la poursuite du signal de référence (la puissance maximal) et cela résulte dans le fait que la commande prédictive prend en compte la connaissance de la trajectoire future pour améliorer le système en termes de stabilité et de précision.

Les deux approches de commande prédictive sont simples et efficaces en milieu industriels cependant, le réglage du régulateur PFC est plus simple que celui de la GPC, particulièrement dans le choix de ses paramètres (λ par exemple), L'introduction de ces paramètres dans le réglage de la GPC est nécessaire afin d'éviter toute variations importantes du signal de commande, pour la durée de simulation, où elle est très longue à l'application du régulateur GPC.

Conclusion générale

Les systèmes photovoltaïques présentent des caractéristiques fortement non linéaires et leur production d'énergie dépend des conditions climatiques qui sont hautement aléatoires. Tout cela rend la conception d'un système photovoltaïque difficile. Le développement des techniques performantes telles que la commande avancée devient indispensable pour palier à ce problème.

L'objectif de ce travail consiste à appliquer les algorithmes de commandes prédictives notamment la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande prédictive fonctionnelle (PFC) sur un système photovoltaïque. Ce système est composé d'un panneau PV lié à un convertisseur d'adaptation en l'occurrence un convertisseur Boost (hacheur survolteur) et une charge résistive branchés en cascade, permettant d'optimiser le système photovoltaïque en extrayant la puissance maximale du panneau.

Dans le premier chapitre, nous avons fait une étude générale du système photovoltaïque afin d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement de la cellule PV, ensuite la modélisation du système photovoltaïque avec le convertisseur survolteur a été réalisé, en dernier, nous avons effectué une simulation du panneau PV qui nous a permis de faire une étude sur l'influence des variations des conditions météorologique, (l'irradiation et la température) sur le système.

La commande prédictive a été présentée dans le deuxième chapitre, en commençant par définir la commande prédictive et son principe de fonctionnement, ensuite nous nous sommes consacrées en premier lieu à la conception de la commande prédictive généralisée (GPC) et l'approche RST, ensuite nous avons passé à la technique de commande prédictive fonctionnelle (PFC) qui a été bien détaillée. Cela nous a permis d'élaborer la loi de commande pour les deux méthodes de contrôle.

Le troisième chapitre a pour but d'appliquer les algorithmes de commande prédictive afin de répondre à notre objectif qui est la poursuite du point de puissance maximal du système photovoltaïque. Toutefois la commande prédictive est basée sur l'utilisation d'un modèle du processus à contrôler, pour cela on a réalisé d'abord une identification en ligne du système photovoltaïque à l'aide de la méthode des moindres carrés récursifs (MCR) pour synthétiser le régulateur RST, ce modèle sera utilisé par la suite dans l'application de la PFC. la modélisation et la simulation a été effectuée sous Matlab/Simulink, avec plusieurs tests de

simulation sous différentes conditions de fonctionnement (variation d'irradiation et de température). Les résultats de la simulation prouvent un bon fonctionnement des algorithmes GPC et PFC et montrent l'efficacité de la stratégie de la commande prédictive pour le transfert d'énergie vers la charge en fonction des conditions extérieurs. Le but de notre travail est atteint, on peut donc valider les performances des deux algorithmes sur l'optimisation du système photovoltaïque.

Comme perspective de ce travail :

- ✓ L'extension du système PV à un système avec stockage (batterie).
- ✓ Implémentation de la commande proposée à un panneau photovoltaïque.
- ✓ Application des algorithmes de commande PFC et GPC à un système hybride (PV-éolienne)

Bibliographie

- [1] LABOURET Anne , CUMUNEL Pascal, FARRAGI Benjamin.(2010). Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque. Dunod.
- [2] GALLAUZIAUX Thierry & FEDULLO David. (2020). Panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. Le Moniteur.
- [3] J.Richalet, G.Laviolle, J.Mallet, La commande prédictive : Mise en œuvre et applications industrielles, bd Saint Germain Paris, Editions EXROLLES, 2005, pp.6-10.
- [4] P. Boucher, D. Dumur, La commande prédictive, Editions Technip,1996, pp.1-4.
- [5] ESSADKI Ahmed. L'énergie solaire. Tout savoir sur le photovoltaïque, 2013, pp.812.
- [6] LABOURET Anne & VILLOZ Michel. (2012). Installations photovoltaïques : conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau. Dunod.
- [7] FALK Antony, DURSCHNER Christian & REIMERS Karl-Heinz. (2010). Le photovoltaïque pour tous : conception et installation. Le Moniteur.
- [8] GHEBBACHE Mohamed. (2019, juillet). Stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité d'énergie (Mémoire). Université du Québec à Trois Rivières.
- [9] CORRION Jean Pierre. (2012). Commande des procédés. Lavoisier.
- [10] N. Priyadarshi, A. Bhoi, R. Bansal, A. Kalam. Energy système in electronical engineering : DC-DC Converters for future renewable Energy Systems. Springer.
- [11] RICHALET Jacques & DONOVAN Doland (2009). Predictive functional control : principal and industrial application. Springer.
- [12] LAUNDAU Ioan Doré, M'SAAD Mohamed, LOZANO Rogelio, & KARIMI Alireza. (2010). Adaptative control : Algorithms, analysis and applications. Springer.
- [13] HADOUFI Lamia et MECHROUH Meriem. Application de la commande adaptative indirecte sur un système photovoltaïque. Academia,2019, pp.1016.
- [14] RAMDANI Amar (Éd.). (2013b, novembre). Commande prédictive des systèmes dynamiques : étude comparative avec les régulateurs classiques (Mémoire). Faculté des hydrocarbures et de chimie, Université de Boumerdes.
- [15] RICHALET.J., LAVIOLLE.G. , MALLET.J., La commande prédictive : Mise en œuvre et applications industrielles, bd Saint Germain Paris, Editions EXROLLES, 2005, pp.6-10.

- [16] HELALI Kamélia. Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative. Énergie solaire photovoltaïque, 2012, pp.3032.
- [17] ESSADKI Ahmed. L'énergie solaire. Tout savoir sur le photovoltaïque, 2013, pp.812.
- [18] OUALI Nassima. Commande prédictive fonctionnelle pour la régulation thermique d'un chauffage bâtiment. Academia, Université A.Mira Béjaia, 2018. pp.23 -30.
- [19] A. HADJ Arab, ETTOUMI Fatiha Youcef, & BAKELLI Yahia. Etude comparatives des modèles du générateur photovoltaïque. Research gates. (2006, 17 novembre).
- [20] RICHALET Jacques. Commande prédictive. Techniques de l'ingénieur, Paris, (1997, 10 décembre).
- [21] P. GAYADHAR, S. MORRIS, N. NAYAK, Advances in Electrical Control and signal Systems, Springer, 2019.
- [22] Jacques RICHALET, Guy LAVIELLE, & Joëlle MALLET. Principes élémentaires : Commande prédictive. Techniques de l'ingénieur, (2017, 10 juin).
- [23] HADJ SAID S, & SAHLI Mohamed. (2003). Commande prédictive généralisée : APPROCHE LMI. Research Gate, pp.26.
- [24] BENYOUCEF Djillali. (2011, 1 janvier). Identification. ResearchGate.
- [25] DEBBEH Abdeslam. (2015). Commande prédictive généralisée robuste Etude et application. Commande prédictive généralisée robuste Etude et application, 48.
- [26] BOURDIER Tony. (2008). Méthode des moindres carrés. Dans Méthode des moindres carrés (p. 29).
- [27] SEBSI Nacira. (2017). Commande prédictive généralisée (GPC) d'une génératrice asynchrone appliquée d'une chaîne éolienne. Commande prédictive généralisée (GPC) d'une génératrice asynchrone appliquée d'une chaîne éolienne, pp. 6675.