

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département Génie Electrique

Mémoire de Fin d'études

En vue de L'obtention du Diplôme de Master en Automatique

Spécialité : Automatique Informatique Industrielle

Thème :

Commande Adaptative Indirecte Robuste d'un Système Photovoltaïque

Réalisé par :

M^{lle}: BENMESSAOU D Ouardia

M^{lle}: BOUKEROUI Dina

Examineurs :

Prof. BELKAID Abdelhakim

Dr. NAIT MOHAND Nacim

Encadrées par :

Dr. LEHOUCHE Hocine

M^{lle}: HADDOUFI Lamia

Année Universitaire

2019/2020

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à nos promoteurs Dr. LEHOUCHE Hocine et M^{elle} HADDOUFI Lamia pour l'encadrement qu'ils nous ont assuré et leurs précieux et judicieux conseils, leurs disponibilité et leurs qualité humaine. Ils trouvent ici notre gratitude et reconnaissance profonde.

Par ailleurs, nos vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants de département de génie électrique qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A Mes Parents

Mes plus profonds et sincères remerciements vont à vous, tout au long de mon cursus, vous m'avez toujours soutenu, aidé et encouragé sans conditions, vous m'avez donné toutes les chances pour réussir. Je souhaite que vous trouviez dans ce travail, l'aboutissement d'une toute petite partie de vos efforts car aucun remerciement ni aucun travail ne se compare à votre sacrifice pour mon confort et ma réussite.

A Toutes Ma Famille

Vous êtes la raison qui donne sens à mon existence, votre soutien me pousse à toujours avancer, En particulier mes sœurs et belles sœurs pour m'avoir fait partager leurs joies de vivre et m'avoir ainsi soutenue dans mes efforts, sans oublier mes adorables nièces et neveux que j'adore.

A Mon Fiancé

Pour votre Aide, votre Ecoute et Compréhension qui m'ont été essentielles durant toutes ces années, votre motivation m'a donné l'énergie et le courage pour finir ce travail.

A Tous Mes Plus Proches Amis

Pour tous les moments inoubliables qu'on a vécus ensemble, pour votre encouragement et votre soutien particulièrement Dina, Oumka & Lilouch. Je garderai toujours vos souvenirs dans ma mémoire.

Ouardia

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à
Leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.*

*Ma grand-mère que dieu lui prêter longue vie et beaucoup
de santé et de bonheur dans la vie.*

Mes très chers frères : Lyes et Hocine.

Ma belle-sœur Maazo et ma nièce Yasmine.

Ma très chère tante.

Ma très chère binôme Ouardia.

*A tous mes amis (es) avec qui j'ai partagé de très bons moments tout le long de
ces années.*

DINA

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude et simulation d'un panneau photovoltaïque.	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Contexte énergétique.....	3
I.2.1. Electricité PV dans le monde.....	3
I.2.2. Electricité PV en Algérie.....	4
I.3. Historique du Photovoltaïque.....	4
I.4. L'énergie Photovoltaïque.....	5
I.4.1. Principe de la conversion Photovoltaïque.....	5
I.4.2. Effet Photovoltaïque et principe de fonctionnement.....	6
I.4.3. Composition d'une cellule Photovoltaïque.....	7
I.4.4. Technologies des cellules solaires.....	8
I.4.4.1. Le silicium.....	8
I.4.4.2. Les couches minces.....	8
I.4.4.3. Cellules organiques et plastiques.....	9
I.5. Système Photovoltaïque.....	9
I.5.1. Eléments d'un système Photovoltaïque.....	9
I.5.2. Les différents types de systèmes Photovoltaïques.....	10
I.5.2.1. Système PV autonome.....	10
I.5.2.2. Système PV connecté directement au réseau.....	10
I.5.2.3. Système Photovoltaïque hybride.....	11
I.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	11
I.6.1. Les avantages de l'énergie Photovoltaïque.....	11

I.6.2. Les inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	11
I.7. Modélisation électrique d'une cellule Photovoltaïque.....	12
I.7.1. Modèle à deux diodes.....	12
I.7.1.1. Modèle à sept paramètres (2M7P)	12
I.7.1.2. Modèle à six paramètres (2M6P)	14
I.7.1.3. Modèle à cinq paramètres (2M5P).....	15
I.7.2. Modèle à une diode.....	15
I.7.2.1. Modèle à trois paramètres (L3P).....	16
I.7.2.2. Modèle à quatre paramètres (L4P).....	16
I.7.2.3. Modèle à cinq paramètres (L5P).....	17
I.8. Simulation de générateur Photovoltaïque.....	18
I.8.1. Etude de l'influence des paramètres de générateur.....	19
I.8.1.1. Influence de la résistance shunt.....	19
I.8.1.2. Influence de la résistance série.....	20
I.8.1.3. Influence de l'éclairement.....	20
I.8.1.4. Influence de la température.....	21
I.9. Conclusion.....	21
Chapitre II : Commande adaptative indirecte.	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Commande adaptative.....	22
II.2.1. Commande adaptative directe.....	23
II.2.2. Commande adaptative indirectes.....	24
II.3. Structure des régulateurs indirects (auto-ajustables).....	25
II.4. Identification du procédé.....	26
II.4.1. Modèle du procédé.....	26

II.4.2. Algorithme des moindres carrés récursifs.....	27
II.5. Mise à jours des paramètres des régulateurs.....	28
II.5.1. Définition et schéma de principe d'un système asservi par un régulateur RST.....	28
II.5.2. Equation du système bouclé.....	30
II.5.3. Synthèse de la loi de commande RST.....	30
II.5.3.1. Principe de la synthèse.....	30
II.5.3.2. Spécification des performances et choix des pôles en boucle fermée.....	31
II.5.3.3. Factorisation de la fonction de transfert du procédé	32
II.5.3.4. Rejet de perturbation.....	33
II.5.3.5. Calcul du correcteur RST.....	33
II.5.3.6. Résolution de l'équation diophantienne.....	34
II.5.3.7. Poursuite (calcul de $T(z^{-1})$).....	36
II.6. Exemple illustratif.....	37
II.6.1. Résultats de simulation.....	38
II.6.2. Interprétation des résultats.....	39
II.6.3. Application de la commande adaptative auto-ajustable.....	39
II.6.3.1. Initialisation.....	39
II.6.3.2. Résultats de simulation.....	40
II.6.3.3. Interprétation des résultats obtenus.....	41
II.7. Conclusion.....	41
Chapitre III : Application de la commande adaptative indirecte robuste au système PV.	
III.1. Introduction.....	42
III.2. Application de la commande indirect sur le GPV.....	42

III.2.1. Présentation de la commande sous Matlab Simulink.....	42
III.2.1.1. Partie identification.....	43
III.2.1.2. Partie mise à jour des paramètres.....	44
III.2.2. Réponse du générateur PV avec la commande auto-ajustable indirecte.....	45
III.2.3. Interprétation des résultats.....	49
III.3. Robustesse de la commande adaptative indirecte.....	49
III.3.1. Test des variations météorologique.....	49
III.3.2. Interprétation des résultats.....	52
III.3.3. Test des variations paramétriques.....	53
III.3.4. Interprétation des résultats.....	55
III.3.5. Test de rejet de perturbation.....	56
III.3.6. Interprétation des résultats.....	57
III.4. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58
Annexes.	
Bibliographie.	

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Évolution de la capacité des installations PV (GW).....	4
Figure I.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	5
Figure I.3 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.....	6
Figure I.4 : Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination.....	7
Figure I.5 : Structure basique d'une cellule solaire.....	7
Figure I.6 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.....	9
Figure I.7 : Installation photovoltaïque autonome.....	10
Figure I.8 : Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	10
Figure I.9 : Système hybride PV-Eolienne.....	11
Figure I.10 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.....	12
Figure I.11 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.....	14
Figure I.12 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.....	15
Figure I.13 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.....	16
Figure I.14 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.....	17
Figure I.15 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.....	17
Figure I.16 : Schéma de simulation de GPV SIEMENS SM 110-24.....	18
Figure I.17 : Caractéristique P(V) et I(V) du panneau PV.....	18
Figure I.18 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique I (V) et P(V) du panneau PV.....	19
Figure I.19 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique I (V) et P(V) du panneau PV.....	20
Figure I.20 : L'influence de l'éclairement G sur la caractéristique I(V) et P(V) du panneau PV.....	20
Figure I.21 : L'influence de la température T sur la caractéristique I(V) et P(V) du panneau PV.....	21
Figure II.1 : Principe d'un système de commande adaptative.....	22
Figure II.2 : Structure de la commande adaptative directe.....	24
Figure II.3 : Structure de la commande adaptative indirecte.....	24
Figure II.4 : Schéma bloc du régulateur Auto-Ajustable.....	25
Figure II.5 : Principe de l'identification des modèles.....	26
Figure II.6 : Schéma classique d'un système asservi numérique avec élément correcteur.....	28
Figure II.7 : Schéma de principe d'un système asservi par un régulateur RST.....	29

Figure II.8 : Principe de la synthèse de régulateur RST.....	31
Figure II.9 : Génération de la trajectoire désirée $y^*(t)$	36
Figure II.10 : Schéma de l'ensemble chariot pendule inversé.....	37
Figure II.11 : Schéma Simulink du l'ensemble chariot pendule inversé.....	38
Figure II.12 : Réponse impulsionnelle du système pour conditions initial [0, 0, 0, 0].....	38
Figure II.13 : Schéma bloc de la commande adaptative indirecte sur l'ensemble pendule-chariot.....	39
Figure II.14 : Evolution de l'angle de pendule par rapport à la consigne après l'implémentation de la commande adaptative.....	40
Figure II.15 : Représentation de l'évolution des paramètres du régulateur.....	40
Figure III.1 : Schéma de la commande adaptative indirecte appliqué sur le GPV.....	42
Figure III.2 : Représentation de l'évolution des coefficients du modèle identifié.....	44
Figure III.3 : Simulation pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	46
Figure III.4 : Simulation pour une variation de G de 900 W/m^2 a 1000 W/m^2	47
Figure III.5 : Simulation pour une variation de la température.....	48
Figure III.6 : Simulation pour plusieurs variations de l'ensoleillement.....	50
Figure III.7 : Simulation pour une variation de l'ensoleillement et de la température.....	51
Figure III.8 : Simulation pour une chute de la résistance série de 33.33%.....	53
Figure III.9 : Simulation pour une chute de la résistance parallèle de 13.33%.....	54
Figure III.10 : Simulation pour une surtension de 5V au niveau du signal de commande.....	56

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	4
Tableau III.1 : Série de simulations pour tester la réponse du générateur PV.....	45
Tableau III.2 : Série de tests à effectuer pour l'étude de la robustesse de la commande.....	49

Acronymes et Symboles : Selon leur ordre d'apparition dans ce travail.

Acronyme et symbole	Définition	Unité
PV	Photovoltaïque	
GPV	Générateur photovoltaïque	
IEA	International Energy Agency	
PVPS	Photovoltaic Power Systems	
ASA	Agence Spatiale Allemande	
AM	Air Masse	
I_s	Courants de saturation de la diode	A
n	Facteur d'idéalité	
I_{ph}	Courant photonique	A
I_{pv}	Courant photovoltaïque	A
I_d	Courant de diode	A
I_{sh}	Courant de la résistance de shunt	A
V_t	Tension thermique de la jonction	J/C
V_{pv}	Tension photovoltaïque	V
N_s	Nombre des cellule série	
K	Constante de Boltzmann	$1.38. 10^{-23} J/k$
q	Constante de charge d'électron	$1.602. 10^{-23} C$
R_s	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
G	L'éclairement réel	W/m^2
G_{ref}	L'éclairement à la condition de référence	W/m^2
I_{ph_ref}	Courant photonique sous condition de référence	A
μ_{cc}	Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	A/K
T_c, T_{c_ref}	la température de cellule, réelle et à la condition de référence.	K
E_{gap}	Energie de gap	eV
P_{max}	Puissance maximale	W

V_{max}	Tension maximale	V
I_{max}	Courant maximale	A
IP	Indice de performance	
MRAC	Commande adaptative à model de référence	
MIAC	Commande adaptative indirect	
λ	Facteur d'oubli	
MCR	Moindres carrés récurifs	
SBPA	Séquence binaire pseudo aléatoire	
ω	Pulsation propre	Rad/s
ζ	Coefficient d'amortissement	
PPM	Point de puissance maximale	
STC	Standard Test Conditions	
PIAT	Pôle Adrar – In Salah – Timimoune	
RIN	Réseau Interconnecté National	
RIS	Réseaux Isolés du Sud	
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida	
EnR	Energie Renouvelable.	

Introduction générale.

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) qu'est une énergie verte inépuisable qui représente une source d'énergie alternative qui peut être utilisée par l'humanité. Cette énergie est de plus en plus appliquée dans différents domaines allant des installations résidentielles et commerciales jusqu'aux systèmes spatiaux, en raison de nombreux avantages tels que l'absence de pollution, elle est sans bruit, facile à installer, et nécessite une courte période de construction [1-2]. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque.

Les stations solaires PV peut comprendre des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques, ou la stabilité et la qualité de la puissance générée sont en corrélation avec l'état de fonctionnement de chaque cellule. Le défi soulevé est d'amener les générateurs à leur point de fonctionnement unique au niveau duquel il peut fournir la puissance électrique maximale. Afin de pallier à ce défi, nous allons utiliser un régulateur robuste à caractère adaptatif.

Les développements récents indiquent que la commande robuste et la commande adaptative sont complémentaires et la clé pour cette complémentarité a été fournie par les progrès effectués dans l'identification des procédés en boucle fermée. Du point de vue de la commande robuste, la commande adaptative est une méthode pour réduire le niveau d'incertitude du modèle du procédé par l'utilisation d'un schéma d'identification en boucle fermée et en temps réel du modèle du procédé. La conception d'un régulateur robuste concerne le calcul d'un régulateur en présence d'incertitudes sur le modèle du procédé [3].

L'objectif assigné à ce travail est de concevoir une commande adaptative indirecte robuste appliquée au générateur photovoltaïque, afin d'optimiser l'exploitation de la puissance délivrée par ce dernier et d'avoir une bonne dynamique de poursuite de la trajectoire vis-à-vis les variations paramétriques et les perturbations.

Pour satisfaire les besoins de cette étude, le travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons commencé tout d'abord par présenter brièvement l'état actuel de l'énergie dans le monde et la part de l'Algérie en énergie solaire, ensuite nous avons présenté les enjeux et les développements actuels des cellules photovoltaïques, le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque ainsi que la modélisation et la simulation de générateur photovoltaïque qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Dans le second chapitre nous présentons l'aspect théorique de la commande adaptative indirecte auto-ajustable qui sera illustré par un exemple d'un pendule inversé sur chariot.

Le troisième chapitre sera consacré pour l'application de la commande adaptative auto-ajustable sur le générateur photovoltaïque. Ensuite nous effectuons une étude de robustesse vis-à-vis des variations métrologiques, paramétriques et le rejet des perturbations.

Le travail est clôturé par une conclusion générale ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre I

Etude et simulation d'un panneau
photovoltaïque.

I.1. Introduction

Dans un premier temps, nous abordons les enjeux actuels autour de l'énergie électrique et la place du photovoltaïque dans le contexte mondiale et en Algérie. Nous présenterons ensuite quelques généralités et définitions sur l'énergie solaire photovoltaïque et la constitution d'un générateur GPV en passant par le principe de la conversion photovoltaïque.

Dans un second temps, nous présentons la modélisation mathématique des cellules solaires, qui est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque, et nous terminons ce chapitre par une série de simulation en boucle ouverte faite sous l'environnement MATLAB/Simulink afin de comprendre le comportement électrique du générateur photovoltaïque.

I.2. Contexte énergétique

I.2.1. Electricité PV dans le monde

La demande mondiale d'énergie primaire a augmenté d'une moyenne annuelle d'environ 1,8% depuis 2011, bien que le rythme de croissance ait ralenti au cours des dernières années, avec de grandes variations par pays [4]. La croissance de la demande d'énergie primaire s'est accrue en grande partie dans les pays en développement, alors que dans les pays développés, elle a stagné ou même diminué.

À partir de 2015, les énergies renouvelables fournissaient environ 19,3% de la consommation finale mondiale d'énergie.

De tous les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque (PV) présente un intérêt particulier pour l'Afrique, puisqu'elle dispose d'un gisement solaire propice au développement de cette forme d'énergie. A la fin de l'année 2015, la capacité mondiale cumulée installée de solaire PV est estimée à 228 GW (figure 1.1) plus que le double de la capacité de 2012 selon l'Agence International de l'Energie [5]. Cette capacité a augmenté de 75 GW, ce qui fait une capacité de 303 GW installée à la fin de 2016. En outre, la part mondiale d'électricité produite par le solaire PV était estimée à 1,5% à la fin 2016 [6].

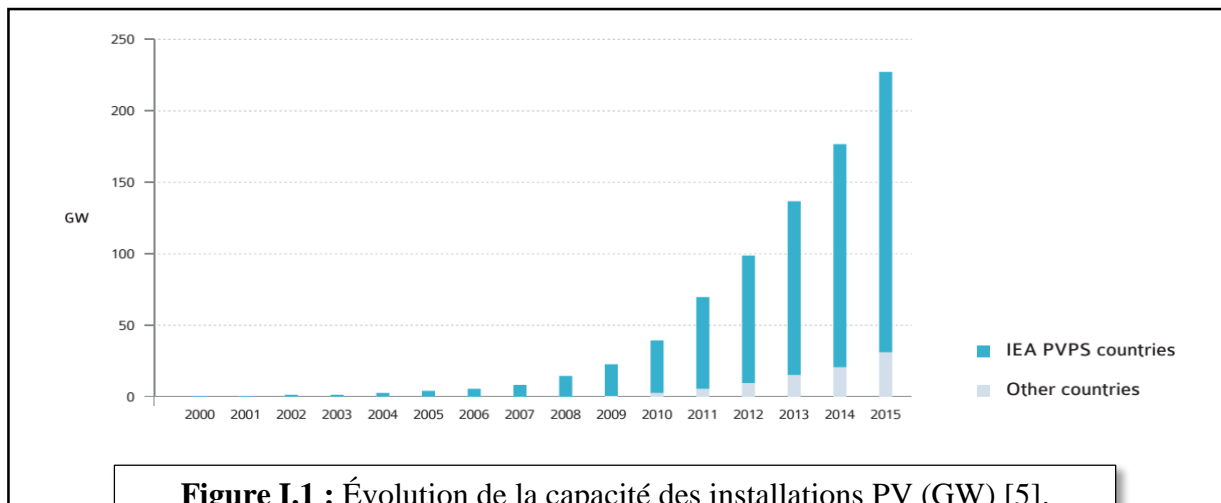


Figure I.1 : Évolution de la capacité des installations PV (GW) [5].

I.2.2. Electricité PV en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme, suite à une évaluation par l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. La répartition du potentiel solaire reçu annuellement sur les régions de l'Algérie est représentée dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [7].

Région	Région côtière	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue kWh/m ² /an	1700	1900	2650

Un tableau qui représente la puissance d'énergie photovoltaïque et éolienne installée en Algérie est met dans l'annexe A.

I.3. Historique du photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Antoine Becquerel dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Plus généralement, on qualifie de photoélectriques tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur la matière qui provoquent une éjection d'électrons du matériau : l'émission photoélectrique ; la photoconductivité ; l'effet photovoltaïque.

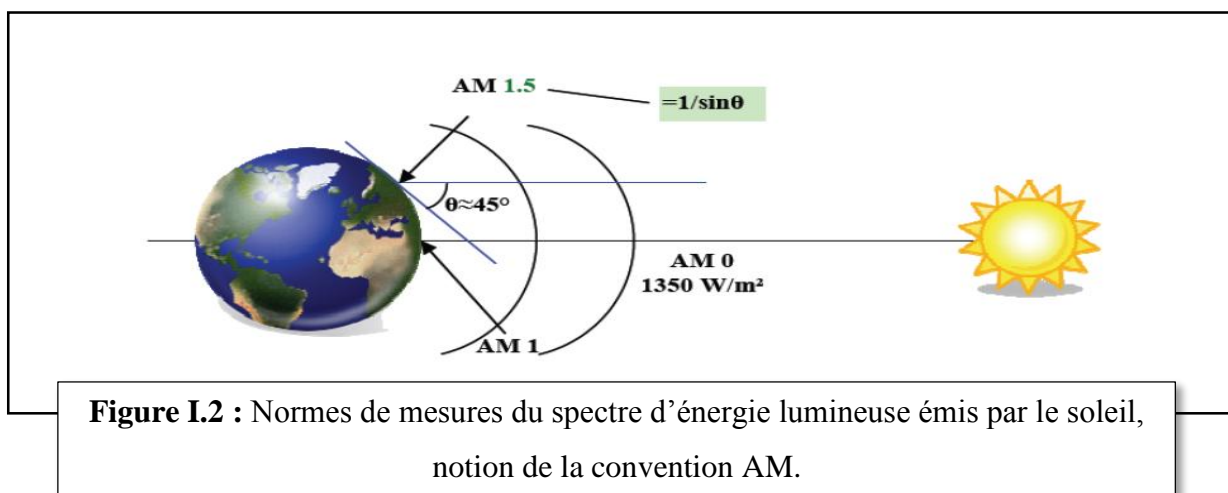
En 1905, Albert Einstein lève les difficultés posées par l'interaction entre lumière et matière, en introduisant les quanta de lumière pour interpréter la loi du rayonnement proposée en 1900 par Max Planck. Albert Einstein produit une théorie qui explique les phénomènes photoélectriques en introduisant le concept de photons, à la fois particule et onde. Dans cette théorie, on démontre que l'énergie d'un photon est entièrement transférée à un électron du matériau et que le courant photoélectrique est proportionnel au nombre de photons, donc au flux lumineux [8].

En 1954 avec la réalisation des premières cellules PV au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone Laboratoires, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie, les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard. Au cours des années 1980, la technique PV terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts [9].

I.4. L'énergie photovoltaïque

I.4.1. Principe de la conversion photovoltaïque [8]

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour « Air Mass ». Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 (Figure I.2). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000W/m^2 au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1).



La valeur du rayonnement global reçu au sol est déterminée en ajoutant à ce dernier le rayonnement diffus qui concerne le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , la Figure (I.3) correspondant à nos latitudes.

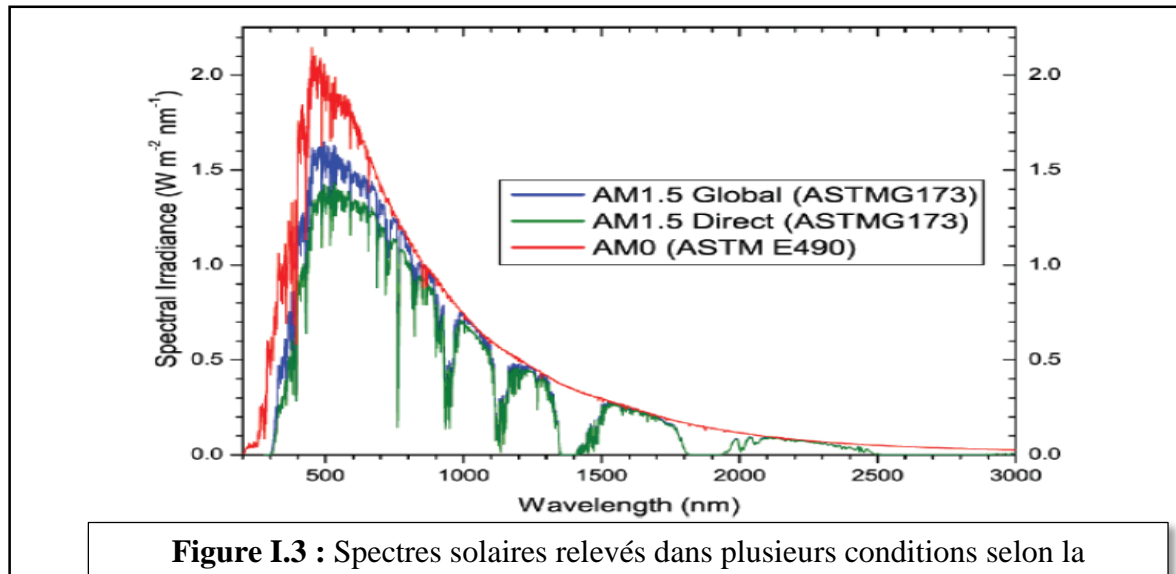


Figure I.3 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM [10].

I.4.2. Effet photovoltaïque et principe de fonctionnement [11]

Le principe de fonctionnement d'une cellule PV repose sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ce dernier permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de production et de transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur comme le silicium. Ce matériau est composé de deux couches, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit, dites respectivement dopée de type "**n**" et dopée de type "**p**". Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**. La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. La mise en contact des deux couches à dopages opposés dans ce semi-conducteur en y ajoutant des contacts métalliques constitue un élément connu : la diode. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, comme représentée sur la figure I.4, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure, donnant

naissance à une différence de potentiel, le courant électrique circule. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique, sous illumination, avec l'apparition d'un photo-courant indépendant de la tension et proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule.

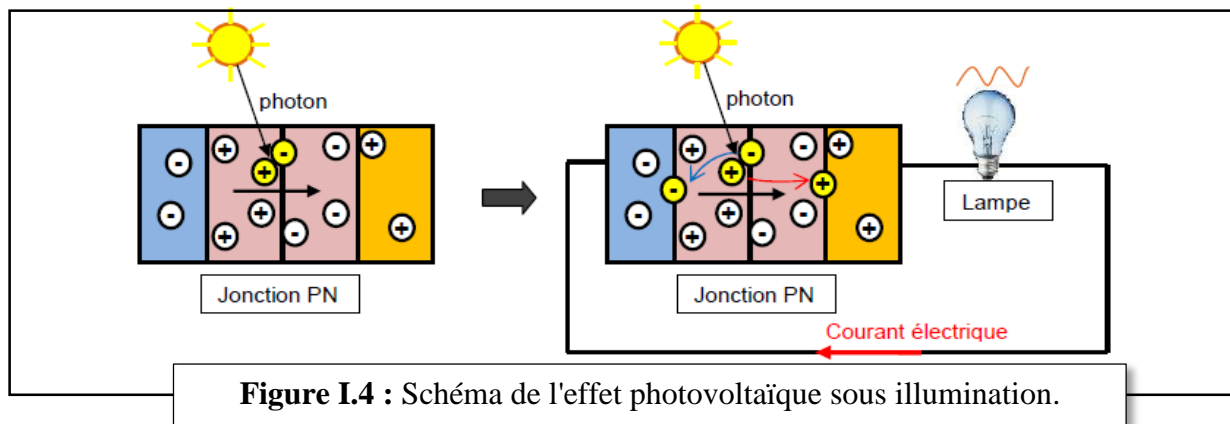


Figure I.4 : Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination.

I.4.3. Composition d'une cellule photovoltaïque [12]

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- d'une couche anti-reflet 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.

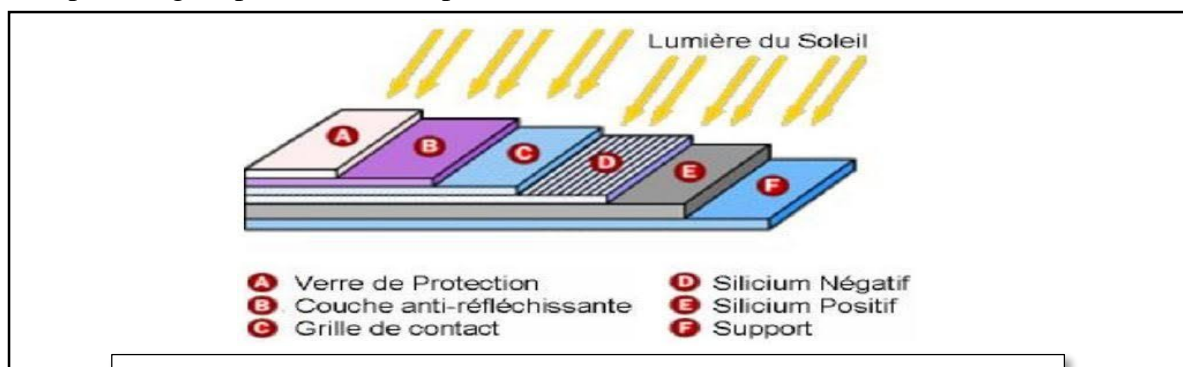


Figure I.5 : Structure basique d'une cellule solaire.

I.4.4. Technologies des cellules solaires [13-14-15]

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

I.4.4.1. Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies :

- **Le silicium monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

- **Le silicium multicristallin (Polycristallin)**

Le silicium multicristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple et les coûts de production sont donc plus faibles.

I.4.4.2. Les couches minces

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.

I.4.4.3. Cellules organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%).

I.5. Système photovoltaïque [2]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

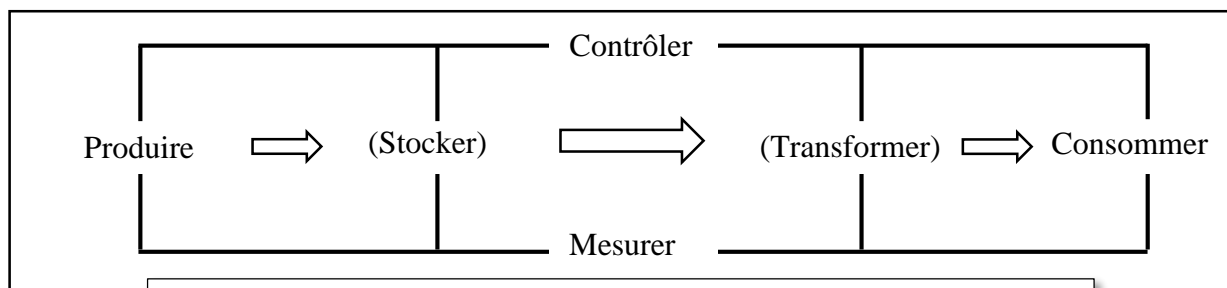


Figure I.6 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.

I.5.1. Eléments d'un système photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou à proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Les cellules solaires ou panneau solaires qui forment le champ photovoltaïque
- Les régulateurs de charge qui ont pour rôle de transférer le maximum de charge aux batteries.
- Les convertisseurs, soit des convertisseurs DC/DC ou bien DC/AC.
- Les batteries de stockage comme leurs noms l'indiquent, ont pour rôle de stocker l'énergie afin de l'utiliser ultérieurement.

I.5.2. Les différents types de systèmes photovoltaïques

I.5.2.1. Système PV autonome

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge. Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie.

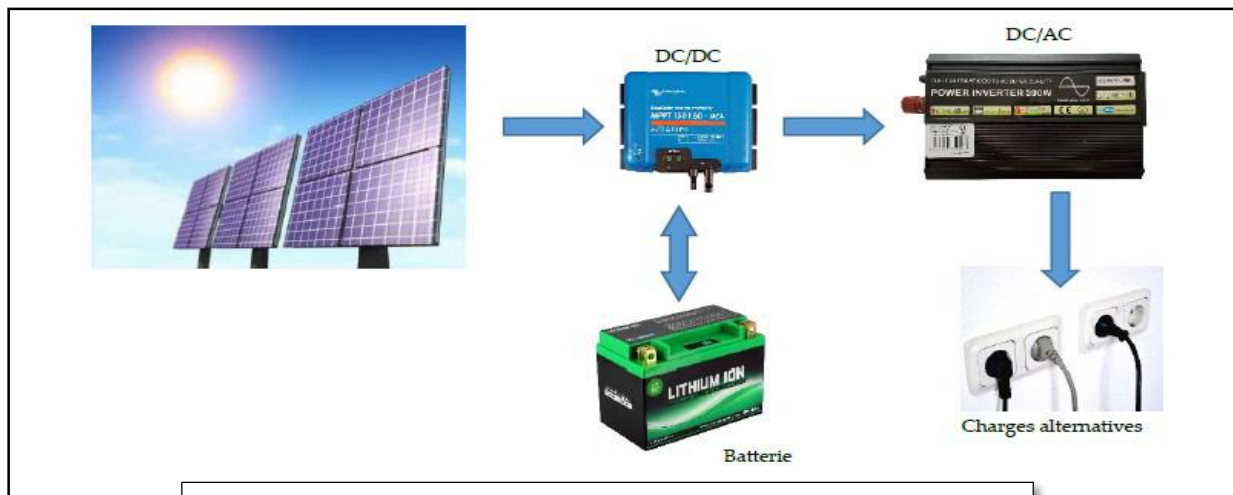


Figure I.7 : Installation photovoltaïque autonome.

I.5.2.2. Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

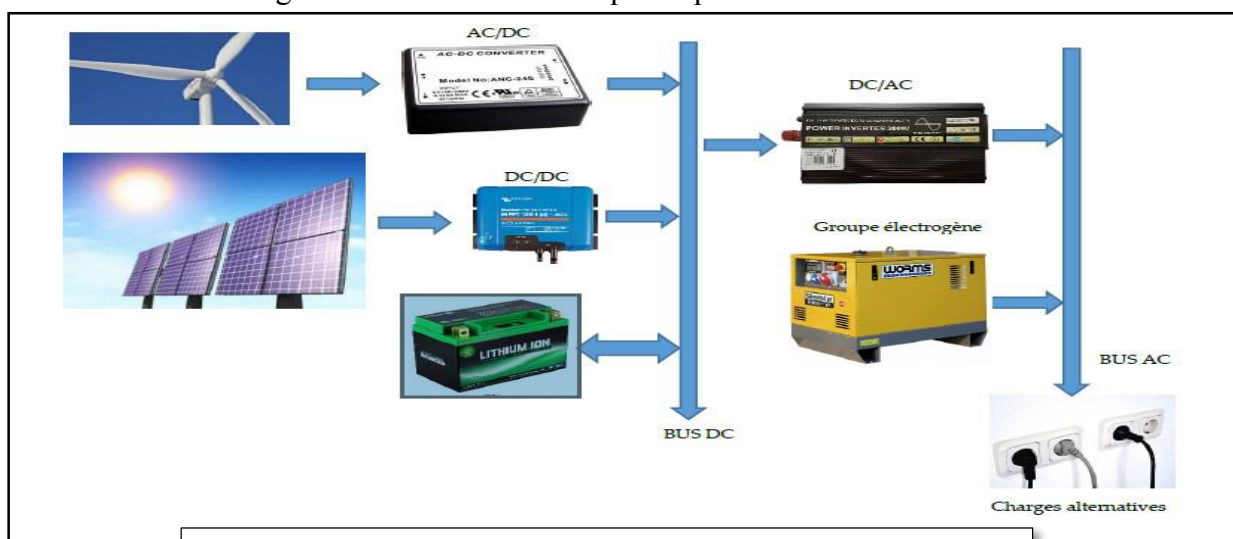
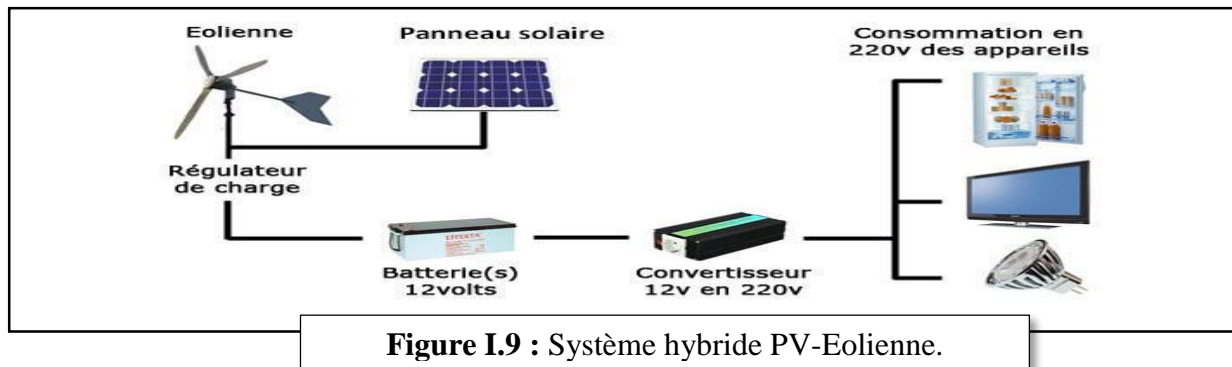


Figure I.8 : Installation photovoltaïque couplée au réseau.

I.5.2.3. Système photovoltaïque hybride [16]

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.



I.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [1]

I.6.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques.
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

I.6.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication.

I.7. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques qui se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque [1].

I.7.1. Modèle à deux diodes

I.7.1.1. Modèle à sept paramètres (2M7P) [1-2]

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (I.10). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire.

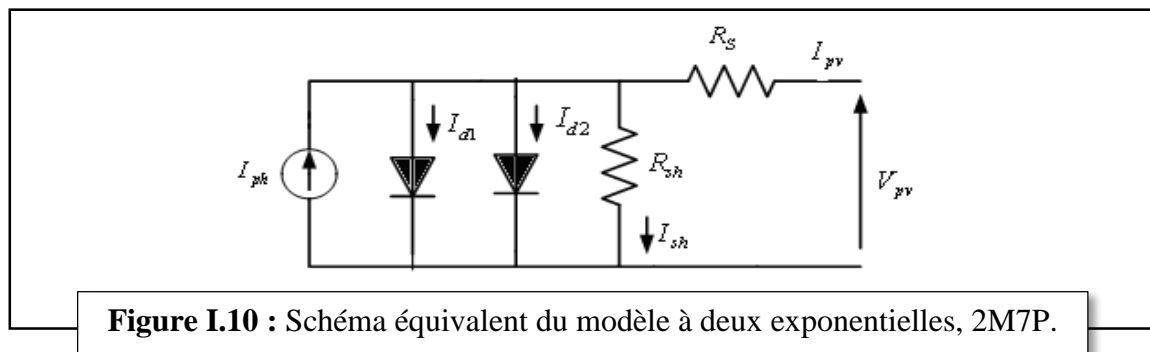


Figure I.10 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{I.1})$$

Avec:

I_{ph} : Courant photonique

I_{d1} : Courant de diode 1

I_{d2} : Courant de diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I(V) est donnée par la relation :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique ;

T_c : est la température absolue ;

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$;

K : la constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/k}$;

I_{sh} : est le courant de résistance de shunt.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.5})$$

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

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph_{ref}} - \mu_{cc} (T_c - T_{c_{ref}}) \right) \quad (\text{I.6})$$

Avec:

$I_{ph_{ref}}$: le courant photonique sous condition de référence [A] ;

μ_{cc} : coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K] ;

G, G_{ref} : l'éclairement réels et à la condition de référence [W/m^2] ;

$T_c, T_{c_{ref}}$: la température de cellule, réelle et à la condition de référence.

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = C_{s1}.T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap}.q}{n_1.T.K}\right) \quad (I.7)$$

$$I_{s2} = C_{s1}.T_c^{5/2} \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap}.q}{n_2.T.K}\right) \quad (I.8)$$

Les constantes C_{s1} et C_{s1} sont généralement comprises respectivement entre $150 \sim 180 A.K^{-3}$ et $1.3 \sim 1.7. 10^{-2} A.K^{-5/2}$ pour une cellule de 100 cm^2 .

Une valeur du facteur d'idéalité n différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$: La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$: Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation.
- $n = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$ Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface.

E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

I.7.1.2. Modèle à six paramètres (2M6P) [1]

Si la résistance shunt est considérée infinie ($R_{sh} = \infty$), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters). Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (I.7)) et I_{s2} (équation (I.8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} (équation (I.6)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R_s .

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure (I.11).

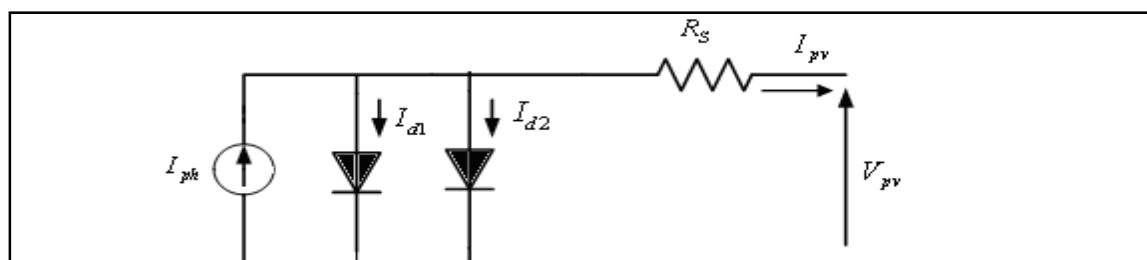


Figure I.11 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (I.9)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.10)$$

I.7.1.3. Modèle à cinq paramètres (2M5P) [1]

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (I.11) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters). Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle.

Le circuit équivalent sera représenté comme suit, figure (I.12).

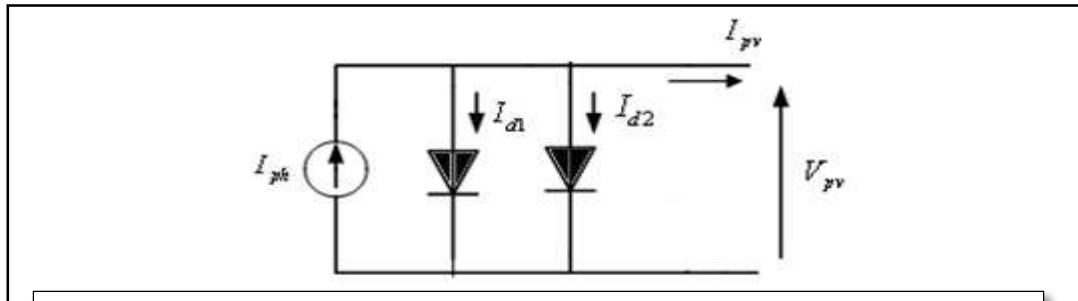


Figure I.12 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (I.7)) et I_{s2} (équation (I.8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} (équation (I.6)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (I.11)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donnée par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{n_1 V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{n_2 V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.12)$$

I.7.2. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shocky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle [1].

I.7.2.1. Modèle à trois paramètres (L3P) [1-2]

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} (équation (I.6)) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent pour ce modèle est représenté par la figure (I.13) :

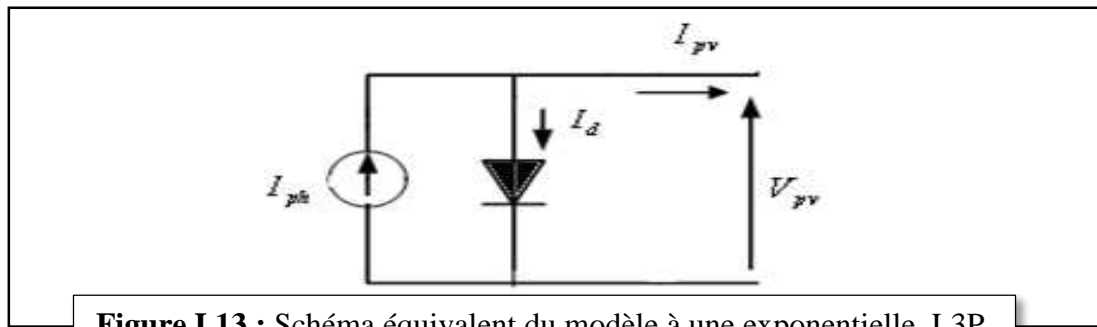


Figure I.13 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.13})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I(V) est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.14})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.15})$$

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

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (\text{I.16})$$

I.7.2.2. Modèle à quatre paramètres (L4P) [1]

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (I.14) :

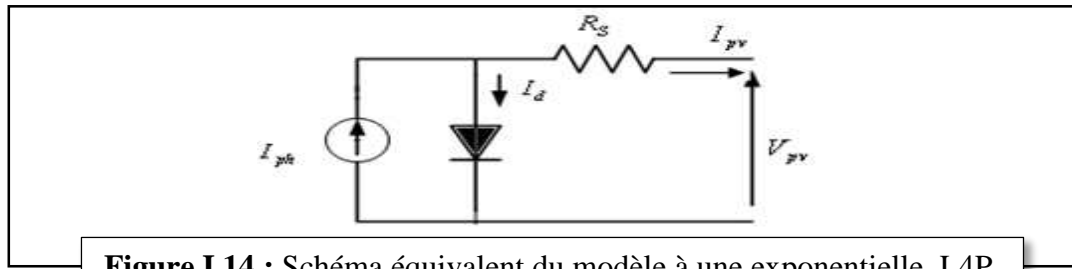


Figure I.14 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.17})$$

I.7.2.3. Modèle à cinq paramètres (L5P) [1-2]

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (I.15) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants : n , I_{ph} (équation (I.6)), R_s , R_{sh} et I_s (équation (I.16)). Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, 5 Parameters).

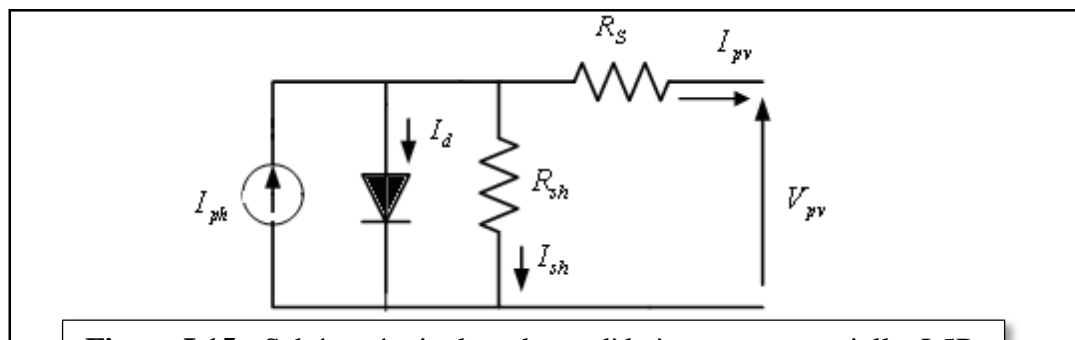


Figure I.15 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{I.18})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{I.19})$$

I.8. Simulation de générateur photovoltaïque

Dans le reste de ce travail, nous allons opter pour le modèle une seule diode (L5P) de type SIEMENS SM 110-24, qu'est disponible dans le laboratoire de recherche de notre université, dont les caractéristique sont mentionnées dans l'annexe B.

En prenant compte toutes les équations citées précédemment, et en utilisant la librairie Simulink de MATLAB on obtient le schéma bloc, qui nous permet de simuler le fonctionnement de notre GPV (le schéma bloc détaillé est met dans l'annexe C).

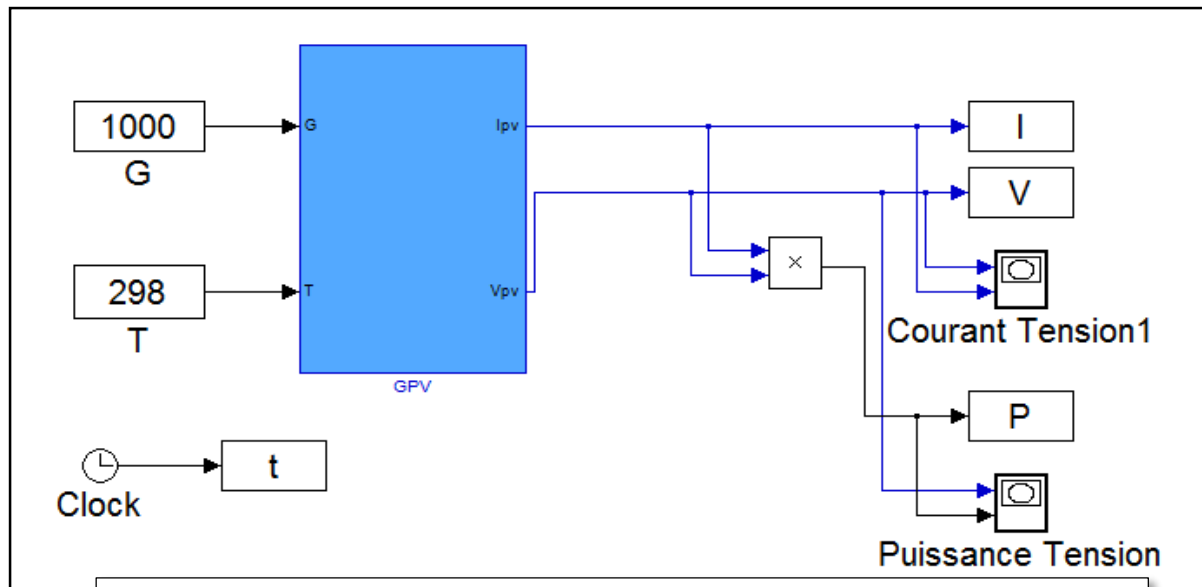


Figure I.16 : Schéma de simulation de générateur PV SIEMENS SM 110-24.

Résultats de simulation :

Après avoir simuler le panneau en boucle ouverte, on obtient les allures suivantes :

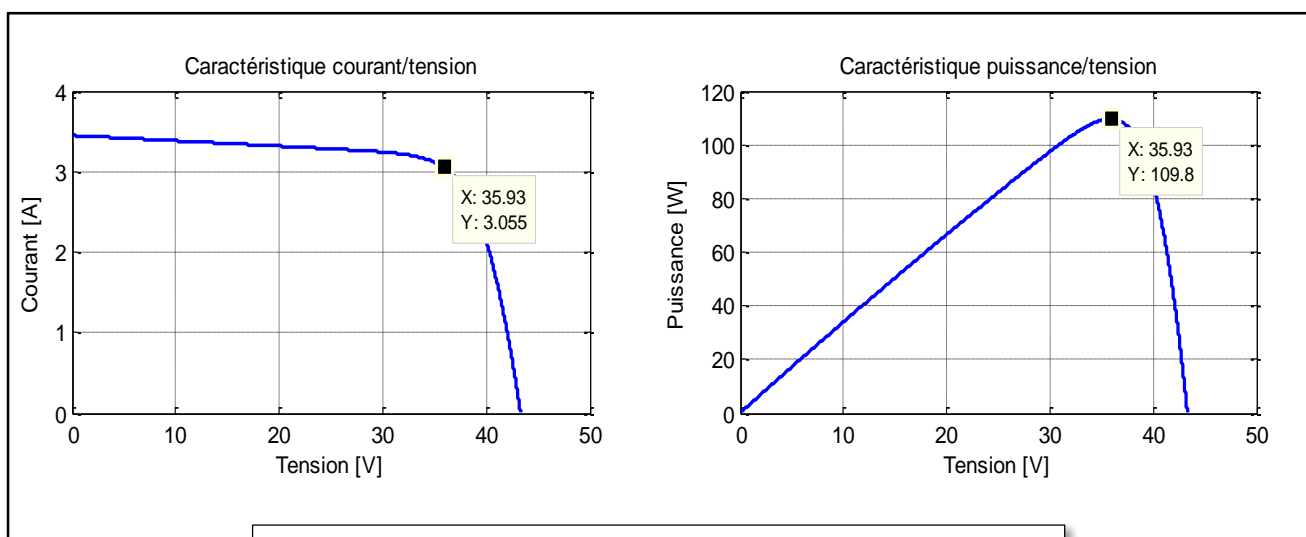


Figure I.17 : Caractéristique P(V) et I(V) du panneau PV.

La figure précédente est utilisée pour extraire les valeurs de puissance, tension et courant au point de puissance maximale, qui vont nous servir dans les prochaines études.

$$P_{MPP} = 109.8 \text{ W.}$$

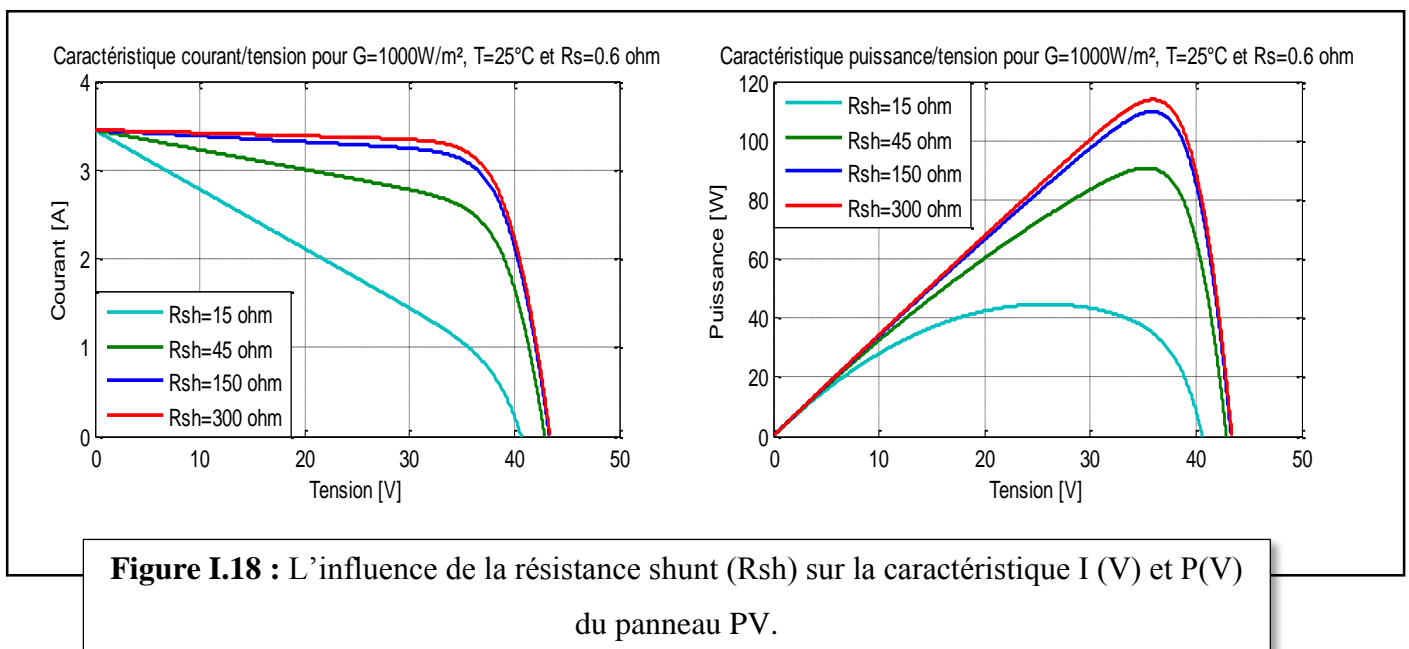
$$V_{MPP} = 35.93 \text{ V.}$$

$$I_{MPP} = 3.055 \text{ A.}$$

I.8.1. Etude de l'influence des paramètres de générateur

I.8.1.1. Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée [16], son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.



L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe $I(V)$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante [1].

I.8.1.2. Influence de la résistance série

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance [1].

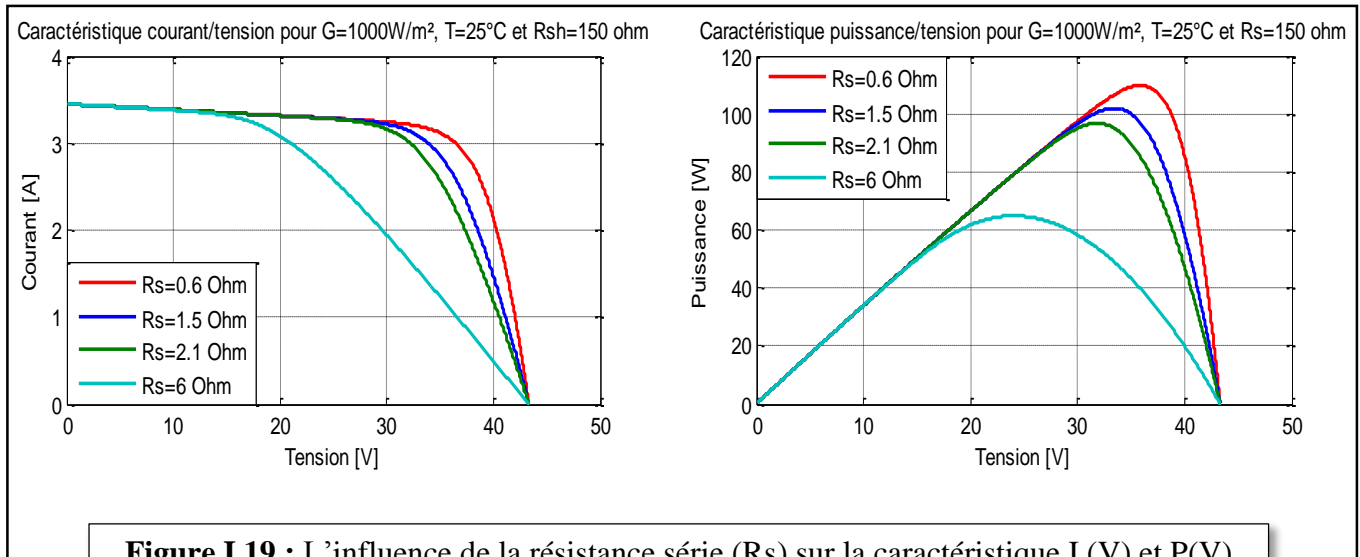


Figure I.19 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du panneau PV.

I.8.1.3. Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. La figure I.20 présente les courbes $I(V)$ et $P(V)$ simulées pour une température constante de 25°C et un ensoleillement variable. Cette figure montre que le courant de court-circuit est proportionnel à la valeur de l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

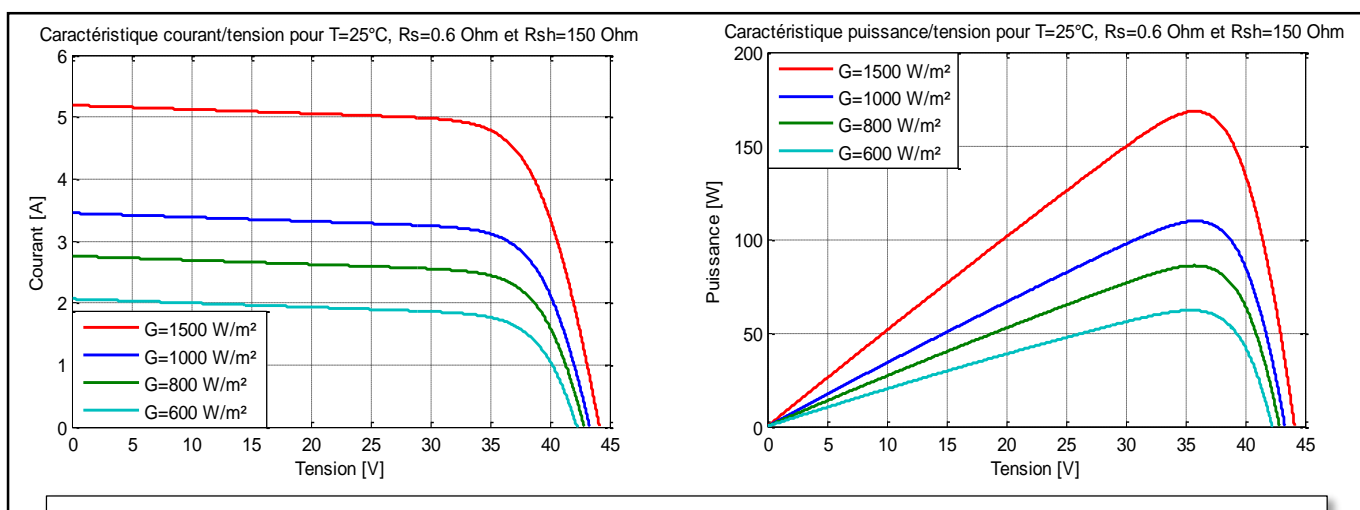


Figure I.20 : L'influence de l'éclairement G sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du panneau PV.

I.8.1.4. Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des modules photovoltaïques à cause de leur exposition au flux énergétique solaire. En effet, la température de la cellule peut parfois augmenter d'une manière importante. Cette augmentation de la température va engendrer une diminution de la largeur de la bande interdite de la jonction PN qui se traduit par une légère augmentation du courant, et une diminution significative de la tension dû à une forte augmentation du courant direct de la diode. La figure I.21 illustre les courbes I(V) et P(V) simulées pour une température variable de 0°C à 75°C avec un ensoleillement constant de 1000 W/m^2 [8].

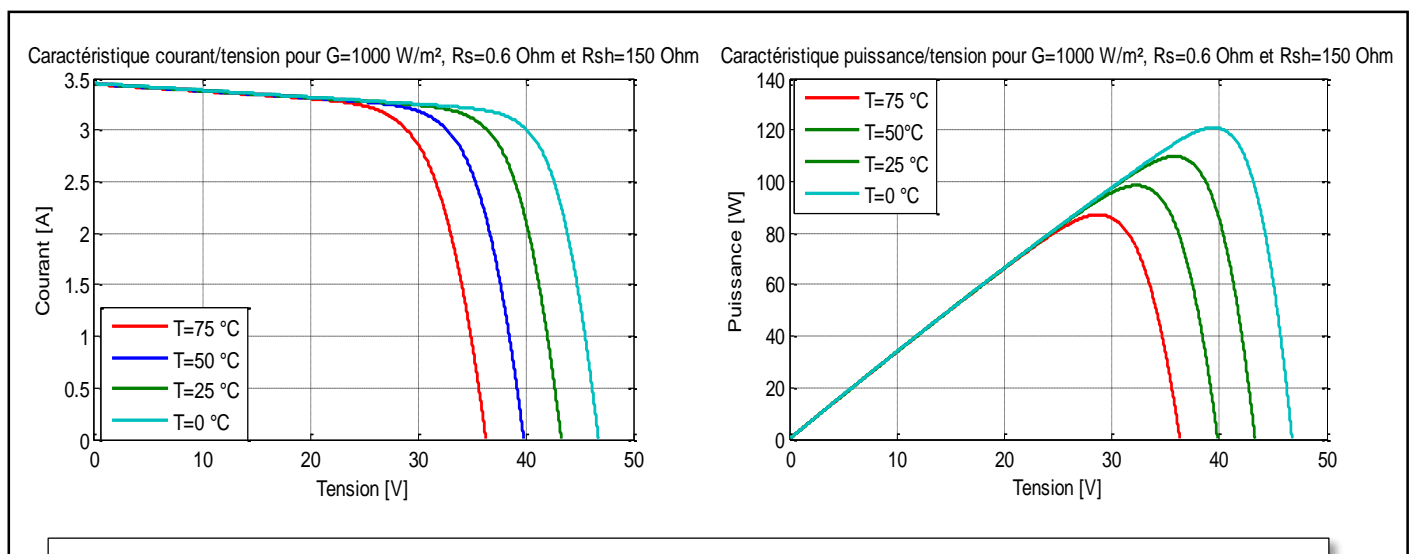


Figure I.21 : L'influence de la température T sur la caractéristique I(V) et P(V) du panneau PV.

I.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de notions générales sur l'énergie photovoltaïque, et la conversion de l'énergie lumineuse des rayons solaires.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudiés la modélisation du générateur photovoltaïque. Puis nous nous sommes attachés à établir le modèle mathématique.

Un modèle à cinq paramètres a été utilisé afin d'effectuer la simulation en boucle ouverte du module PV (PW110 de Siemens) pour différentes variations de ses paramètres, ce qui montre la nécessité d'appliquer la commande adaptative afin d'assurer la poursuite et le maintien de la puissance maximale. La synthèse de cette loi de commande fera l'objet de chapitre suivant.

Chapitre II

Commande adaptative indirecte.

II.1. Introduction

La commande adaptative joue un rôle très important dans les applications industrielles, qui est comme son nom l'indique, elle consiste à adapter le régulateur en ligne aux variations du processus régulé pour assurer une qualité constante des performances, quand les paramètres du procédé à commander sont inconnus ou variant dans le temps [17].

Dans ce chapitre, nous détaillerons l'aspect théorique et le principe de la commande adaptative, nous donnerons un aperçu sur ses différentes classes et types d'approches, notamment la commande adaptative indirecte qu'est l'objet de notre travail. En fin, nous étudions un exemple illustratif de la synthèse de cette commande.

II.2. Commande Adaptative

La commande adaptative est un ensemble de concepts et de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en ligne, et en temps réel des régulateurs mise en œuvre dans la commande d'un processus, afin de réaliser ou maintenir un certain niveau des performances désirées lorsque les paramètres de ce processus sont inconnus ou variant dans le temps [18]. En principe, un système de commande adaptative mesure un certain indice de performance (IP) du système à commander à partir de l'écart entre la sortie de système désirée et la sortie mesurée. Le mécanisme d'adaptation commande certains paramètres du système ajustable ou introduit un signal supplémentaire de commande d'après une certaine stratégie afin de minimiser l'IP. La figure II.1 représente le principe général d'un système de commande adaptative [17].

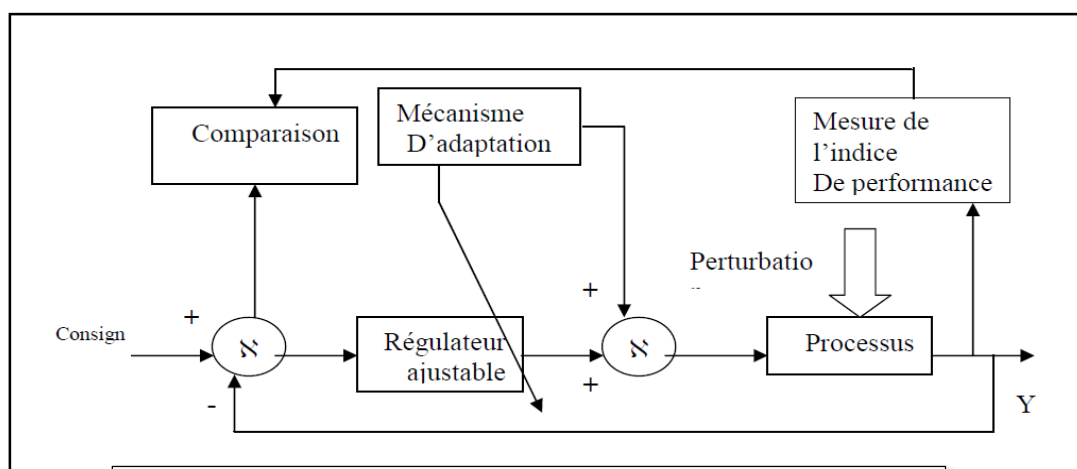


Figure II.1 : Principe d'un système de commande adaptative.

Trois approches ont été essentiellement considérées pour le développement des stratégies de la commande adaptative destinées aux procédés à paramètres inconnus et/ou variables dans le temps :

- Approximation des stratégies de commande optimale stochastique.
- Système de commande auto-ajustable (self-tuning control).
- Commande adaptative à modèle de référence (MRAC).

Les stratégies résultantes conduisent à deux grandes techniques adaptatives à mettre en œuvre et largement utilisées à ce jour en pratique [19]. Ces deux grandes techniques sont :

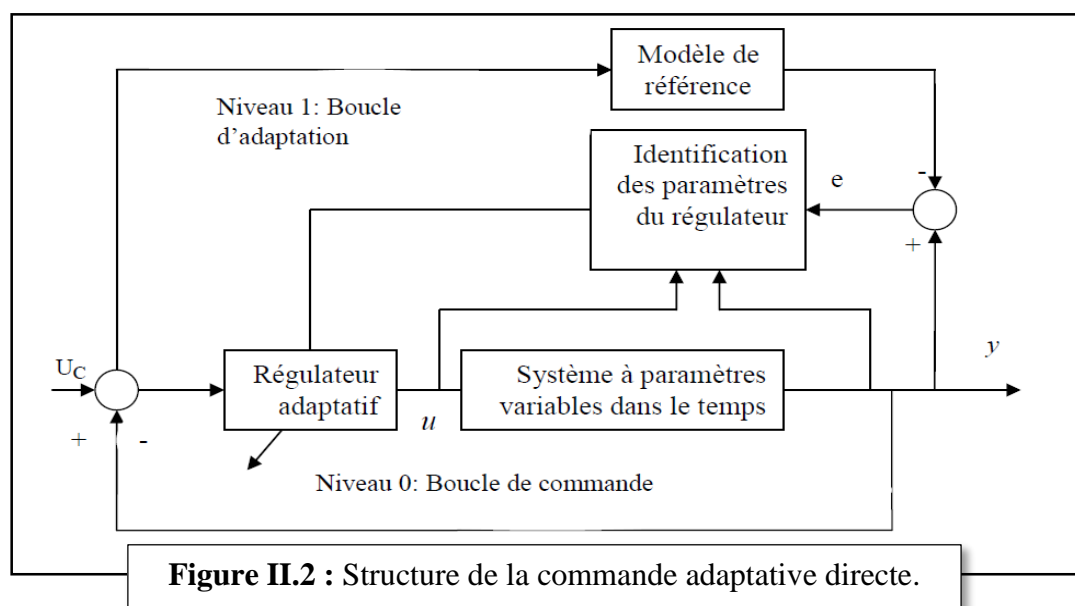
- Commande adaptative directe.
- Commande adaptative indirecte.

II.2.1. Commande adaptative directe

L'idée consiste à calculer les paramètres du régulateur, mais sans identifier explicitement les paramètres du système, donc en une seule étape, justifiant ainsi la terminologie de commande directe. Cette technique utilise souvent des algorithmes plus rapides et favorise une application en temps réel. Sa facilité d'implantation la rend relativement attractive, citons ainsi de façon non exhaustive des applications réalisées sur de grandes structures flexibles, des robots manipulateurs, des commandes de conduite de bateaux, des moteurs à courant continu, en aéronautique, sur des missiles et des servomécanismes non linéaires avec des incertitudes variant dans le temps [17].

La grande technique adaptative directe à mettre en œuvre et largement utilisée à ce jour en pratique, est la commande adaptative directe à modèle de référence (CAMR).

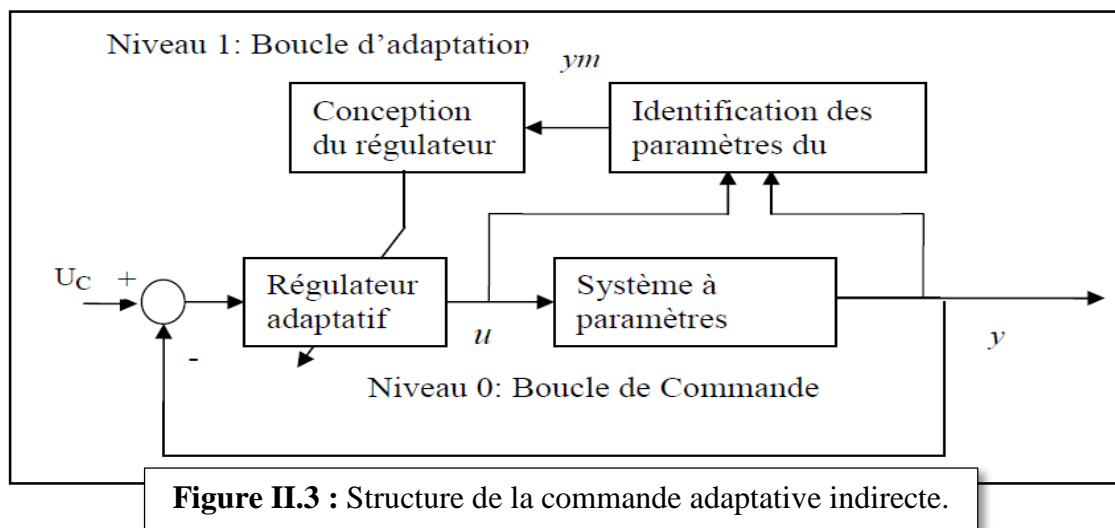
Le schéma de la figure II.2 illustre ce type de commande, pour laquelle les performances de la boucle fermée sont spécifiées par l'intermédiaire d'un modèle de référence choisi par l'utilisateur de façon cohérente avec les possibilités intrinsèques du système [17].



II.2.2. Commande adaptative indirecte [17]

La commande indirecte MIAC, encore appelée la commande auto-ajustable, a été introduite en 1958 par Kalman, cette stratégie se base sur les principes de séparation et d'équivalence.

Un régulateur adaptatif est conçu selon ce principe de séparation. Le schéma synoptique de la commande indirecte MIAC est représenté par la figure II.3.



Le principe de cette méthode consiste à estimer les paramètres du modèle dynamique utilisé lors de la synthèse de la loi de commande. L'estimation du modèle du système est effectuée séparément de la conception du régulateur ; c'est-à-dire seul le critère sur la commande intervient pour la synthèse de ce dernier sans considération de performances de l'estimation. Autrement dit toute erreur d'identification nécessairement présente n'est pas prise en compte

pour la phase de synthèse de la loi de commande (séparation totale des deux étapes), justifiant ainsi la terminologie de commande adaptative indirecte.

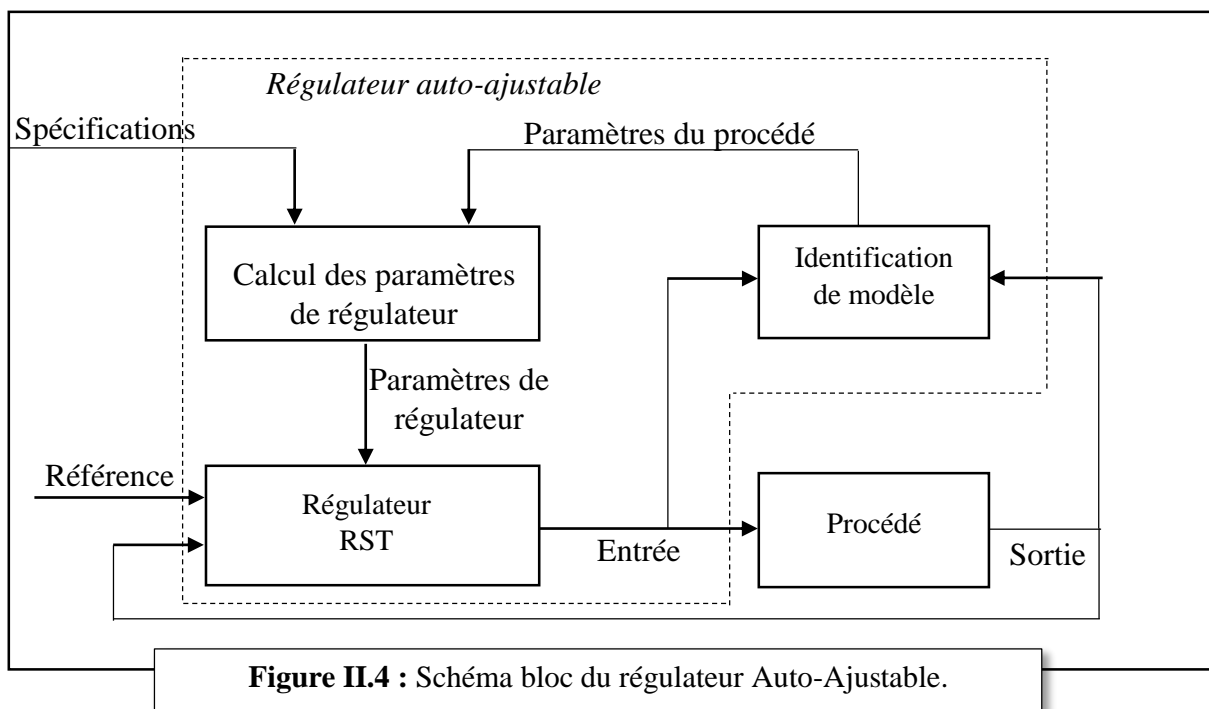
II.3. Structure des régulateurs indirecte (auto-ajustables) [20]

Le schéma-bloc de la figure II.4 présente le principe de fonctionnement de ces régulateurs. Nous pouvons y distinguer 2 boucles :

- Une boucle principale, représentant la boucle de réglage conventionnelle ;
- Une boucle superposée à la boucle principale, composée d'un bloc d'identification du processus et d'un bloc de calcul des paramètres du régulateur.

La réalisation d'une commande adaptative par l'utilisation d'un régulateur auto-ajusté se divise ainsi en deux étapes distinctes :

- Identification du processus ;
- Mise à jour des paramètres du régulateur.



Lorsque les paramètres du processus ont été identifiés, ils sont alors transmis au bloc de calcul des paramètres du régulateur. Ce dernier, en fonction des paramètres reçus et de spécifications définies par le cahier de charges (rapidité, amortissement, ...) va mettre à jour automatiquement les nouveaux paramètres du régulateur et les lui transmettre, permettant ainsi une mise à jour de ce dernier. Le cycle ainsi décrit va se répéter durant tout le temps de fonctionnement de la boucle de réglage.

II.4. Identification du procédé

L'identification est l'opération de détermination des caractéristiques dynamiques d'un procédé dont la connaissance est nécessaire pour la conception et la mise en œuvre d'un système performant de régulation. En termes plus proche de la pratique, l'identification est une approche expérimentale qui permet, à partir des mesures effectuées sur la variable souhaitée, d'obtenir un modèle reliant les entrées aux sorties et dont l'erreur avec les valeurs mesurées est minimale.

Le processus d'identification comporte les étapes suivantes :

- ✓ Acquisition des entrées/sorties sous un protocole d'expérimentation.
- ✓ Choix du modèle à adopter.
- ✓ Estimation des paramètres du modèle.
- ✓ Validation du modèle identifié (structure et valeur des paramètres).

Un grand nombre d'algorithmes d'identification performants, ayant une formulation récursive adaptée, ont été développés. Le principe de l'estimation des paramètres des modèles échantillonnés est illustré dans la figure II.5 où $u(k)$ et $y(k)$ représentent respectivement l'entrée et la sortie du système à l'instant k [20-21].

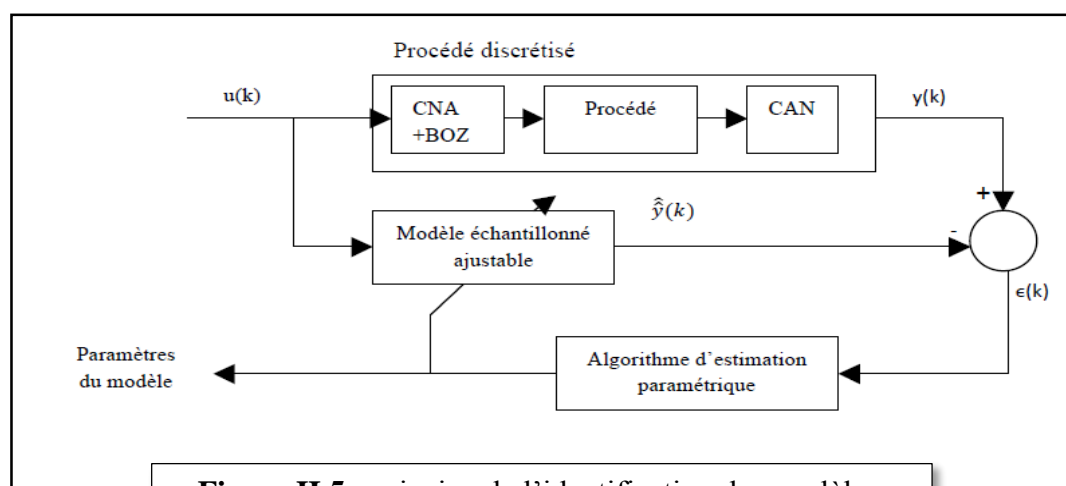


Figure II.5 : principe de l'identification des modèles.

II.4.1. Modèle du procédé [22]

Nous supposons que le système est un modèle mono-variable. L'entrée du système sera notée par $u(k)$, la sortie du système par $y(k)$.

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})[u(k-d) + v(k-d)] \quad (\text{II. 1})$$

Où

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \quad (\text{II. 2})$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m} \quad (\text{II. 3})$$

$d = n - m$: retard pur.

v : effet de bruit de mesure.

II.4.2. Algorithme des moindres carrés récurrents [22-23]

Le concept de cette méthode est basé sur la régression linéaire.

$$y(k) = \phi^T(k)\theta + \varepsilon(k) \quad (\text{II. 4})$$

L'objectif est de minimiser un critère quadratique correspondant à la somme des carrés de l'écart entre la sortie réelles du processus à identifier et celle du modèle obtenu à chaque instant d'échantillonnage.

$$J(\theta) = \|\varepsilon(k)\|^2 = \varepsilon(k)^T \varepsilon(k) \quad (\text{II. 5})$$

$$J(\theta) = (y(k) - \phi(k)\theta)^T (y(k) - \phi(k)\theta) \quad (\text{II. 6})$$

Le minimum du critère à minimiser $J(\hat{\theta}, k)$ est obtenu en annulant sa dérivée. L'estimateur des moindres carrés peut donc se mettre sous la forme suivante :

$$\hat{\theta}(k) = (\phi^T(k)\phi(k))^{-1} \phi^T(k)y(k) \quad (\text{II. 7})$$

Voici la forme générale de l'algorithme RLS (MCR) avec un facteur d'oubli :

Le critère à minimiser a pour expression

$$J(\hat{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} [y(i) - \phi^T(i)\hat{\theta}]^2 \quad (\text{II. 8})$$

Avec :

λ : facteur d'oubli tel que : $0 < \lambda \leq 1$.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (\text{II. 9})$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\hat{\theta}(k-1)}{[\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)]} \quad (\text{II. 10})$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left\{ P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)P(k-1)}{\lambda + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)} \right\} \quad (\text{II. 11})$$

$$y(k) = -a_1(k)y(k-1) - \dots - a_n(k)y(k-n) + b_0(k)u(k-d) + \dots + b_m(k)u(k-m-d) \quad (\text{II. 12})$$

$$\theta = [a_1 \dots a_n, b_0 \dots b_m] \quad (\text{II. 13})$$

$$\phi^T(k-1) = [-y(k-1) \dots -y(k-n), u(k-d) \dots u(k-m-d)] \quad (\text{II. 14})$$

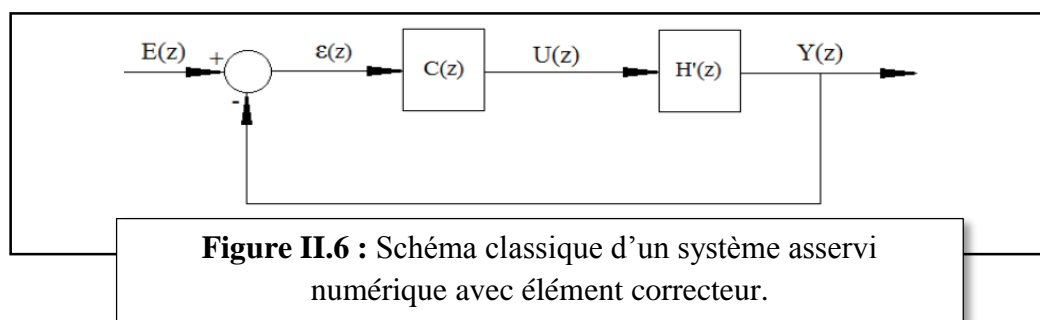
$$y(k) = \phi^T(k-1)\theta \quad (\text{II. 15})$$

II.5. Mise à jour des paramètres du régulateur

On va présenter ici la méthode de placement de pôles (régulateur RST). L'intérêt de ce type de commande contrairement à beaucoup d'autres régulateurs est de spécifier la loi de rejection des perturbations (régulation) indépendamment de celle de la poursuite du signal de consigne. Pour cette raison, ce régulateur est dit à poursuite et régulation indépendantes [20].

II.5.1. Définition et schéma de principe d'un système asservi par un régulateur RST

Le schéma général d'un asservissement numérique avec correcteur est représenté sur la figure suivante :



Où $H'(z)$ représente le processus $F(s)$ associé à un bloqueur d'ordre zéro [24] :

$$H(z) = (1 - z^{-1})TZ \left[\frac{F(s)}{s} \right]$$

Les fonctions de transferts du correcteur et du processus peuvent se mettre sous la forme de fonctions rationnelles propres :

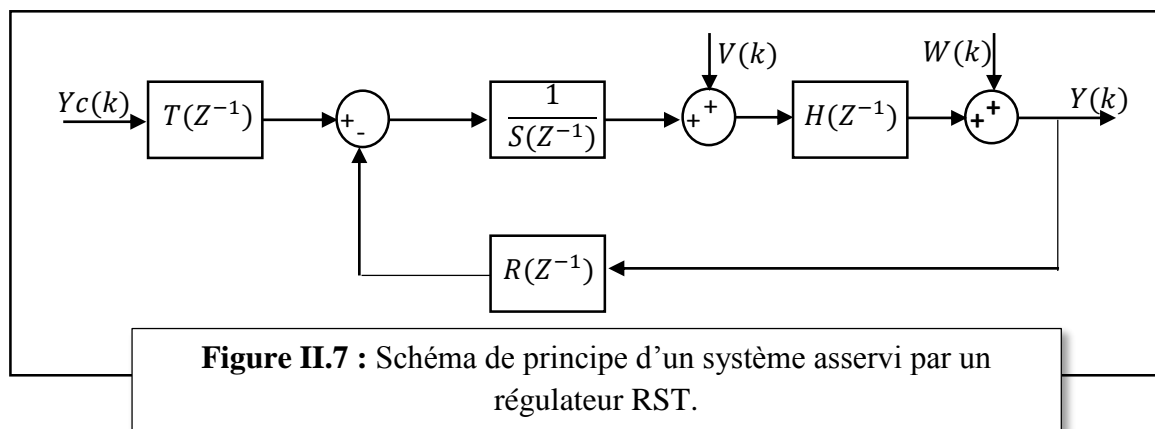
$$C(z) = \frac{R(z)}{S(z)} \quad \text{et} \quad H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}$$

Ce qui nous emmène à déduire une structure plus détaillée du correcteur et du système appelé la structure RST [25].

La structure RST est la structure de régulateur linéaire la plus générale qui a pour but d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système automatique.

Le régulateur RST est fondé sur une décomposition suivant trois polynômes qui conduisent à une structure de commande dont le schéma bloc est représenté sur la figure II.7 ces trois polynômes qui sont calculés à partir d'une stratégie de placement de pôles pour des systèmes stable ou instable [24] :

- Sans restriction sur les degrés des polynômes $B(z^{-1})$ et $A(z^{-1})$;
- Sans restriction sur le retard du procédé ;
- Sans restriction sur les zéros du procédé (stables ou instables).



On note que le procédé est définie par $B(z^{-1})/A(z^{-1})$ et Y_c représente la consigne, Y est la sortie et deux types de perturbations sont prise en compte : la séquence $\{w(k)\}$ appliqué à la sortie du procédé et qui représente ce que l'on appelle les perturbations de mesures. La séquence $\{v(k)\}$ appliqué à l'entrée du procédé et qui représente les perturbations de charge, avec :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (\text{II. 16})$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} = z^{-d} B(z^{-1}) \quad (\text{II. 17})$$

Dans cette commande, la forme générale de la loi de commande est [26] :

$$S(z^{-1})U(z) = T(z^{-1})Y_c(z) - R(z^{-1})Y(z) \quad (\text{II. 18})$$

Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$U(z) = \frac{T(z^{-1})}{S(z^{-1})} Y_c(z) - \frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} Y(z) \quad (\text{II. 19})$$

La sortie du système bouclé vaut, compte à elle, d'après la figure précédente est :

$$Y = \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} U(z) - \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} V(z) + W(z) \quad (\text{II. 20})$$

II.5.2. Equation du système bouclé

Réécrivons l'équation (II.19) et (II.20) sous une forme allégée, leurs arguments étant implicite [26] :

$$SU = TY_c - RY \quad (II.21)$$

$$AY = BU + BV + AW \quad (II.22)$$

En multipliant (II.21) par A , puis en y incorporant (II.22), il vient :

$$ASU = ATY_c - ARY = ATY_c - BRU - BRV - ARW$$

$$(AS + BR)U = ATY_c - BRV - ARW$$

$$U = \frac{AT}{AS + BR}Y_c - \frac{BR}{AS + BR}V - \frac{AR}{AS + BR}W \quad (II.23)$$

En multipliant cette fois (II.22) par S , puis en y incorporant (II.21), on aura :

$$ASY = BSU + BSV + ASW = BTY_c - BRY + BSV + ASW$$

$$(AS + BR)Y = BTY_c + BSV + ASW$$

$$Y = \frac{BT}{AS + BR}Y_c - \frac{BS}{AS + BR}V - \frac{AS}{AS + BR}W \quad (II.24)$$

II.5.3. Synthèse de la loi de commande RST

II.5.3.1. Principe de la synthèse

On cherche la loi de commande $u(k)$ de la forme RST ci-dessus tel que le système bouclé ait une fonction de transfert modèle [26] :

$$H_m(z^{-1}) = \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (II.25)$$

On supposant que $v=w=0$ dans l'équation (II.24), on aura :

$$Y(z) = \frac{BT}{AS+BR}Y_c(z) \quad (II.26)$$

$$\frac{Y(z^{-1})}{Y_c(z^{-1})} = \frac{z^{-d}B(z^{-1})T(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1})} \quad (II.27)$$

Il faut donc réaliser :

$$\frac{z^{-d}B(z^{-1})T(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1})} = \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (\text{II. 28})$$

Où z^{-d} est le retard pur du procédé.

Voici une figure qui montre ce principe :

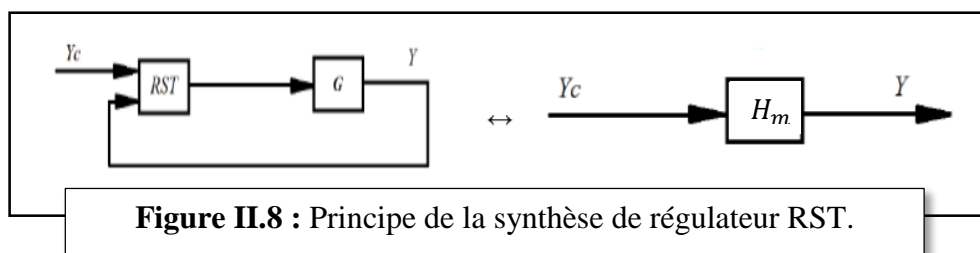


Figure II.8 : Principe de la synthèse de régulateur RST.

L'ordre du système bouclé étant d'ordinaire supérieur à celui du modèle, on va chercher à compenser des pôles par des zéros dans la fonction de transfert du premier membre de (II.28).

II.5.3.2. Spécification des performances et choix des pôles en boucle fermée

En règle générale, on peut exprimer les performances désirées du système en boucle fermée en termes de paramètre d'une fonction de transfert échantillonnée [27] :

$$H_{BF} = \frac{z^{-d}B(z^{-1})T(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1})} = \frac{B_m(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad (\text{II. 29})$$

On choisit, pour commencer, le polynôme caractéristique de la boucle fermée $P(z^{-1})$ de la forme suivante :

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} \quad (\text{II. 30})$$

D'après l'équation (II.29) on a :

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} = A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1}) \quad (\text{II. 31})$$

Résoudre une équation polynômiale implique que les coefficients des diverses puissances de z soient égaux dans les deux membres.

En générale, pour compenser l'ordre de polynôme, on va choisir :

$$\begin{aligned} P(z^{-1}) &= (1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} + p_3z^{-3} + p_4z^{-4}) = (1 + p_1'z^{-1} + p_2'z^{-2})(1 + \alpha_1z^{-1})(1 + \alpha_2z^{-2}) \\ &= P_d(z^{-1})P_a(z^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{II. 32})$$

- $P_d(z^{-1})$ contient les pôles dominants du système.
- $P_a(z^{-1})$ contient les pôles auxiliaires du système.

Calcul du $P_d(z^{-1})$:

Les coefficients p_1' et p_2' résultent de la discrétisation d'un modèle de 2^{ème} ordre avec ω_n et ζ respecte les deux conditions suivantes [24]:

- $0.25 \leq \omega_n T_e \leq 1.5$;
- $0.7 \leq \zeta \leq 1$.

D'où

$$p_1' = -2e^{-\zeta\omega_n T_e} \cos(\omega_n T_e \sqrt{1 - \zeta^2}) ;$$

$$p_2' = e^{-2\zeta\omega_n T_e} .$$

Calcul du $P_a(z^{-1})$:

α_1, α_2 correspondent à des pôles auxiliaires apériodiques, $-\alpha_1$ et $-\alpha_2$ situés sur l'axe réel (à l'intérieur du cercle unité) et ils sont plus rapides et permet d'améliorer la robustesse du régulateur, les valeurs typiques sont : $-0.05 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq -0.5$ [24].

II.5.3.3. Factorisation de la fonction de transfert du procédé

Décomposant la fonction de transfert du procédé comme suit [26] :

$$H(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{B^+(z^{-1})B^-(z^{-1})}{A^+(z^{-1})A^-(z^{-1})} \quad (\text{II. 33})$$

Où $B^+(z^{-1}), B^-(z^{-1}), A^+(z^{-1}), A^-(z^{-1})$ sont des polynômes en z^{-1} tels que :

- $B^-(z^{-1})$ et $A^-(z^{-1})$ contiennent tous les zéros de $G(z)$, respectivement tous les pôles, que l'on décide de ne pas compenser.
- $B^+(z^{-1})$ et $A^+(z^{-1})$ contiennent, quant à eux, respectivement, tous les autres termes de numérateur et de dénominateur, ceux que l'on choisit de compenser à l'aide du correcteur RST.

Vu que B^- contient des zéros instable on ne peut pas se permettre de le laisser apparaître dans le dénominateur du système bouclé alors [28] :

$$B_m = B^- B_m' \quad (\text{II. 34})$$

Le B^+ et le A^+ peuvent respectivement être facteur de chaque côté de la somme $AS + BR$ on déduit que :

$$S = B^+ S_0 = (1 - z^{-1})^l B^+ S_0 \quad (\text{II. 35})$$

$$R = A^+ R_0 \quad (\text{II. 36})$$

$$T = A^+ T_0 \quad (\text{II. 37})$$

Donc (II.24) devient :

$$Y = \frac{z^{-d} B^- T_0}{A^- S_0 + z^{-d} B^- R_0} Y_c - \frac{z^{-d} B S_0}{A^+ (A^- S_0 + z^{-d} B^- R_0)} V - \frac{A^- S_0}{(A^- S_0 + z^{-d} B^- R_0)} W \quad (\text{II. 38})$$

II.5.3.4. Rejet de perturbation

Pour rejeter une perturbation d'ordre n il faut que la fonction de transfert entre la sortie du comparateur et les points d'application de la perturbation possède $n+1$ intégrateur donc on va ajouter des parties fixes à ces fonctions de transfert [27-28] :

$$\text{Rejet de perturbation d'entrée : } -\frac{BS}{AS+BR} V$$

- Pour une perturbation constante : $S(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) S_1(z^{-1})$
- Pour une perturbation rampe : $S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 S_1(z^{-1})$

$$\text{Rejet de perturbation de sortie : } -\frac{AS}{AS+BR} W$$

- Pour une perturbation constante : $A(z^{-1}) S(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) A(z^{-1}) S_1(z^{-1})$
- Pour une perturbation rampe : $A(z^{-1}) S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 A(z^{-1}) S_1(z^{-1})$

Donc le rejet de perturbation se résume avec des parties fixes à ajouter :

$$\text{Quel que soit } p \text{ tel que : } S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^p S_1(z^{-1})$$

II.5.3.5. Calcul du correcteur RST

Pour un suivi de consigne on doit avoir [27] :

$$\frac{B^- T_0}{A^- S_0 + z^{-d} B^- R_0} = \frac{B_m}{A_m} \quad (\text{II. 39})$$

En remplaçant l'équation (II.34) on aura :

$$\frac{T_0}{A^-S_0 + z^{-d}B^-R_0} = \frac{B'_m}{A_m} \quad (\text{II. 40})$$

On déduit que :

$$T_0(z^{-1}) = B'_m(z^{-1})A_0(z^{-1}) \quad (\text{II. 41})$$

$$(1 - z^{-1})^i A^-(z^{-1})S_2(z^{-1}) + z^{-d}B^-(z^{-1})R_0(z^{-1}) = A_m(z^{-1})A_0(z^{-1}) \quad (\text{II. 42})$$

On multiplie (II.42) par A^+ et B^+ :

$$AS + BR = A^+B^+A_0A_m \quad (\text{II. 43})$$

On notera donc que le polynôme caractéristique du système bouclé contient les deux termes compensés, A^+ et B^+ , mais que ces termes disparaissent de la fonction de transfert Y/Y_c .

$A_0(z^{-1})$ est un polynôme Monique et stable il sert à filtrer les perturbations.

L'équation (II.43) est de la forme :

$$AX + BY = C \quad (\text{II. 44})$$

Avec A , B et C des polynômes donnés, tandis que X et Y sont inconnues. Une telle équation est appelée équation diophantienne [26].

II.5.3.6. Résolution du l'équation diophantienne

L'équation du type (II.44) possède une solution si, et seulement si, le PGCD de A et B divise également C ; en d'autres termes, toutes simplifications éventuelles effectuées, A et B doivent être premiers entre eux.

Pour résoudre cette équation on utilise une méthode de résolution matricielle qui permet de calculer les paramètres de polynômes R et S [26]

$P(z^{-1})$ étant spécifié pour calculer $S(z^{-1})$ et $R(z^{-1})$ [27] :

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})S(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1}) \quad (\text{II. 45})$$

$$A(z^{-1}) = a_0 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$$

$$S'_1(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_l z^{-l} \quad (\text{II.46})$$

$$R'(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_q z^{-q} \quad (\text{II.47})$$

$$P(z^{-1}) = A_m(z^{-1})A_0(z^{-1}) = p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_p z^{-p} \quad (\text{II.48})$$

En définissant :

$$n_p = \deg P(z^{-1})$$

Si $n_p \leq n + m + d - 1$ alors cette équation polynômiale à une solution de degré minimale unique telle que :

- $n_s = \deg S(z^{-1}) = m + d - 1$ et $n_R = \deg R(z^{-1}) = n - 1$

Si $n_p \geq n + m + d - 1$ alors il existe deux solutions d'ordre minimale telles que :

- $n_s = \deg S(z^{-1}) = m + d - 1$ et $n_R = \deg R(z^{-1}) = n_p - (m + d)$
- $n_s = \deg S(z^{-1}) = n_p - n$ et $n_R = \deg R(z^{-1}) = n - 1$

Pour effectivement résoudre l'équation (II.26), celle-ci se met sous la forme matricielle :

$$Mx = p \quad (\text{II.49})$$

Où : $x^T = [1, s_1, \dots, s_{n_s}, r_0, \dots, r_{n_R}]$

$$p^T = [1, p_1, \dots, p_i, \dots, p_{n_p}, 0, \dots, 0]$$

On aura la forme matricielle suivante :

$$\begin{array}{c}
 n + m + d \\
 \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 a_0 & 0 & \dots & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 a_1 & a_0 & \dots & \dots & \vdots & b_1 & b_0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 a_2 & a_1 & \dots & \dots & \vdots & b_2 & b_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 \vdots & a_2 & \dots & \dots & 0 & \vdots & b_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \dots & \dots & a_0 & b_m & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 a_n & \vdots & \dots & \dots & a_1 & 0 & b_m & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & a_n & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_0 \\
 \vdots & 0 & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_1 \\
 \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_2 \\
 0 & \dots & \dots & \dots & a_n & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & b_m
 \end{array} \right]
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c}
 s_0 \\
 \vdots \\
 s_l \\
 r_0 \\
 \vdots \\
 r_q
 \end{array} \right] =
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c}
 p_0 \\
 \vdots \\
 p_p \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (\text{II.50})$$

$n_s + 1$
 $n_R + 1 + d$

La solution de l'équation (II.49) s'exprime :

$$x = M^{-1} p \quad (\text{II. 51})$$

Où M^{-1} est la matrice inverse de M . Pour que cet inverse existe, il faut que le déterminant de la matrice M soit différent de zéro. On peut montrer que ceci est assuré si et seulement si $A(z^{-1})$ et $B(z^{-1})$ sont des polynômes premières entre eux (pas de simplification de pôles et zéros) [6].

Pour des raisons variées les polynômes $S(z^{-1})$ et $R(z^{-1})$ doivent contenir en général des parties spécifiées avant de résoudre l'équation (II.26). Par exemple, la nécessité d'avoir une erreur statique nulle pour une consigne ou une perturbation en échelon implique la présence d'un intégrateur numérique dans la voie directe, respectivement la présence d'un terme $(1 - q^{-1})$ dans le polynôme $S(z^{-1})$ [27].

C'est pour prendre en compte ces parties fixes pré spécifiées que les polynômes $S(z^{-1})$ et $R(z^{-1})$ sont factorisés sous la forme suivante :

$$S(z^{-1}) = S'(z^{-1})H_S(z^{-1}) \quad (\text{II. 52})$$

$$R(z^{-1}) = R'(z^{-1})H_R(z^{-1}) \quad (\text{II. 53})$$

Où $H_S(z^{-1})$ et $H_R(z^{-1})$ sont des polynômes pré spécifiés et :

$$S'(z^{-1}) = 1 + s'_1 z^{-1} + \dots + s'_{n_{S'}} z^{-n_{S'}} \quad (\text{II. 54})$$

$$R'(z^{-1}) = r'_{n_R} z^{-n_R} + \dots + r'_1 z^{-1} + r'_0 \quad (\text{II. 55})$$

Le choix des polynômes $H_S(z^{-1})$ et $H_R(z^{-1})$ dépend de type de perturbation à éliminer.

II.5.3.7. Poursuite (calcul de $T(z^{-1})$)

Dans le cas idéal, lors d'un changement de consigne, on souhaite faire suivre à la sortie du procédé $y(t)$ une trajectoire $y^*(t)$. Cette trajectoire peut être mémorisée ou engendrée à chaque changement de consigne à l'aide d'un modèle de référence [28].

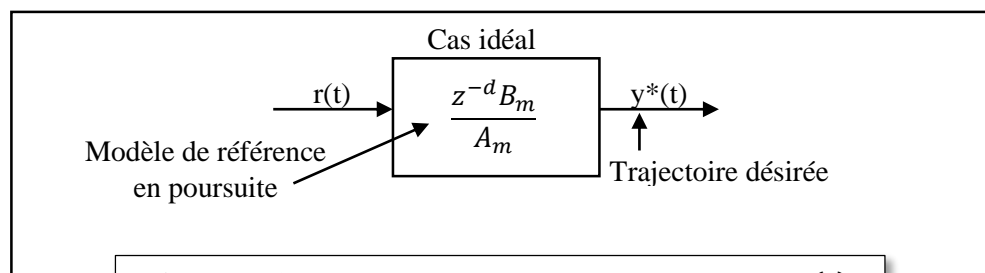


Figure II.9 : Génération de la trajectoire désirée $y^*(t)$.

Le cas idéal ne peut pas être atteint, donc notre objectif étant d'approcher au maximum la trajectoire désirée [27] :

$$y^*(t) = \frac{z^{-(d+1)}B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})}r(t) \quad (\text{II.56})$$

Pour ceci, on engendre d'abord $y^*(t + d + 1)$ à partir de $r(t)$:

$$y^*(t + d + 1) = \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})}r(t) \quad (\text{II.57})$$

On choisit $T(z^{-1})$ pour assurer :

- Un gain unitaire entre y^* et y
- Compensation de la dynamique de régulation $P(z^{-1})$

$$T(z^{-1}) = GP(z^{-1}) \quad G = \begin{cases} 1/B(1) & \text{si } B(1) \neq 0 \\ 1 & \text{si } B(1) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

Dans le cas où la dynamique de la régulation et la dynamique de poursuite sont identiques il n'y a plus besoin du modèle de référence et le polynôme $T(z^{-1})$ est remplacé par un gain :

$$T(z^{-1}) = G = \begin{cases} P(1)/B(1) & \text{si } B(1) \neq 0 \\ 1 & \text{si } B(1) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

II.6. Exemple illustratif

On prend le système pendule inversé sur chariot, représenté sur la figure suivante. Les paramètres du pendule inversé sont mentionnés dans l'annexe A.

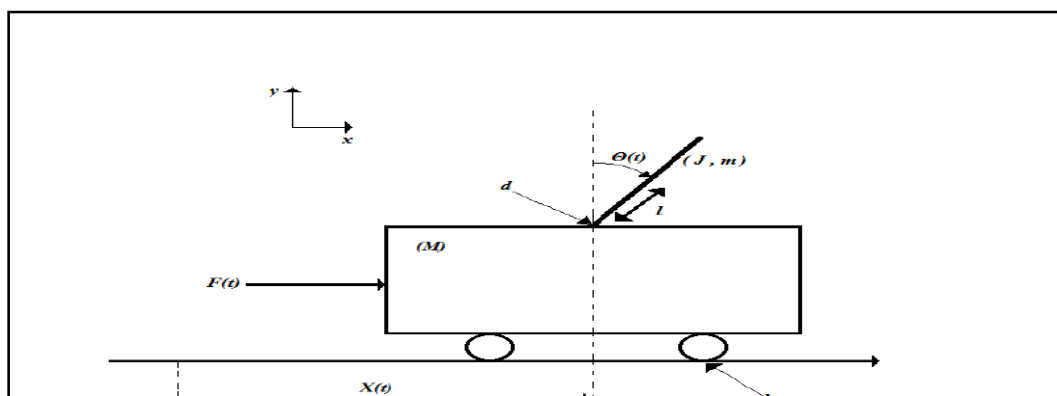


Figure II.10 : Schéma de l'ensemble chariot pendule inversé.

La fonction de transfert de l'ensemble pendule chariot, après linéarisation, est la suivante :

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-m l s}{[(M + m)(m l^2 + J) - m^2 l^2] s^3 + [(M + m)d + (m l^2 + J)b] s^2 + [-(M + m)m g l + db] s - m g l b} \quad (\text{II. 60})$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{(m l^2 + J) s^2 + d s - m g l}{[(M + m)(m l^2 + J) - m^2 l^2] s^4 + [(M + m)d + (m l^2 + J)b] s^3 + [-(M + m)m g l + db] s^2 - m g l b s} \quad (\text{II. 61})$$

Le but est de stabiliser le pendule dans sa position instable $\theta = 0$, quel que soit la position du chariot.

Le schéma block suivant représente la simulation du système en boucle ouverte :

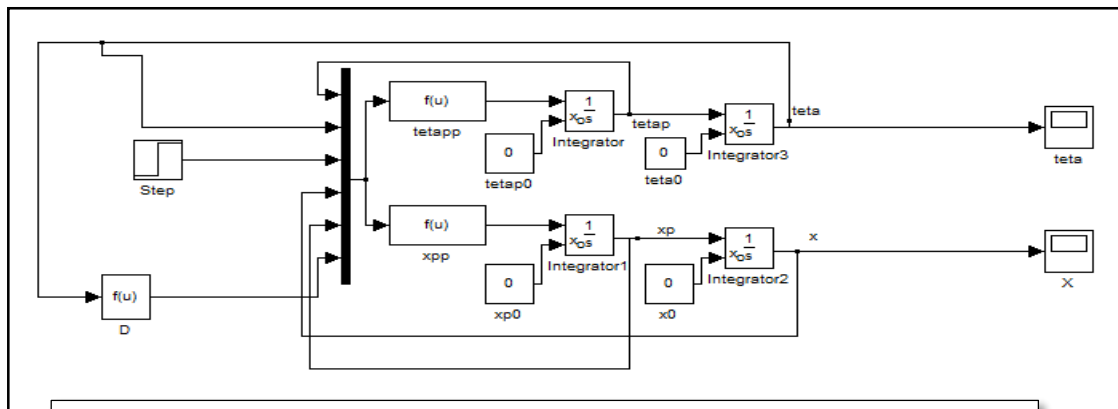


Figure II.11 : Schéma Simulink du l'ensemble chariot pendule inversé.

II.6.1. Résultats de simulation

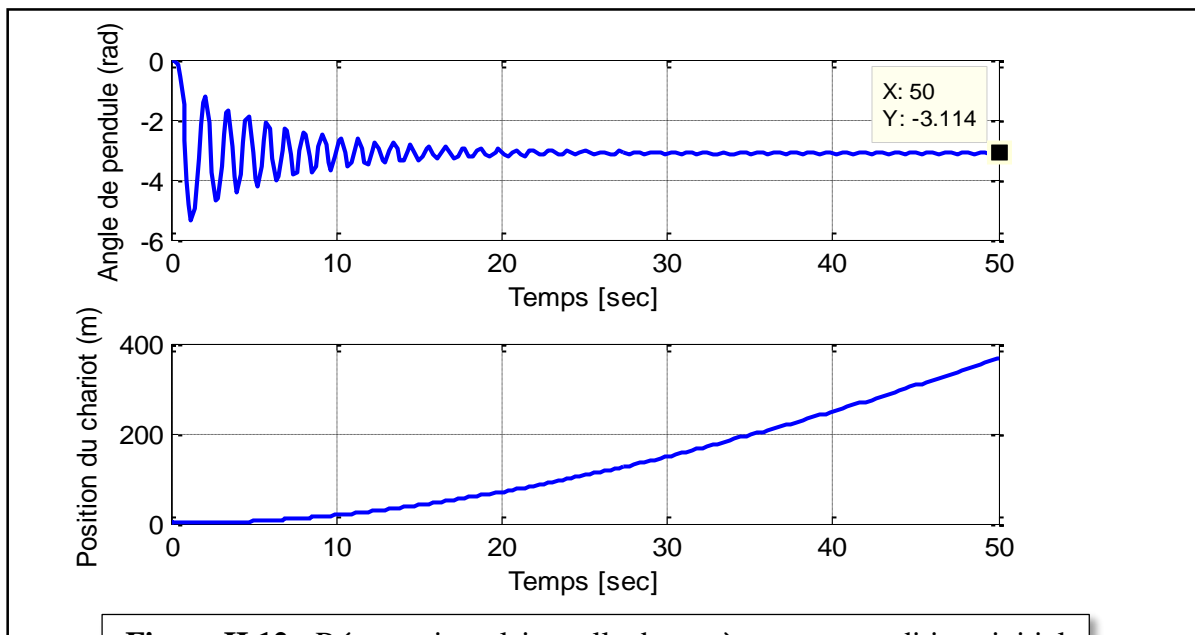


Figure II.12 : Réponse impulsionnelle du système pour conditions initial $[0, 0, 0, 0]$.

II.6.2. Interprétation des résultats

On remarque d'après les résultats obtenus en figure II.12 que lorsque le pendule est initialement en position inversé ($\theta = 0$) il effectue plusieurs oscillations autour de son point d'équilibre, ces dernières se diminuent au fur et à mesure pour se stabiliser autour du point d'équilibre ($\theta = \pi$) et le chariot continue à avancer ce que est dû à la force d'entrée.

II.6.3. Application de la commande adaptative auto ajustable

Afin de maintenir le pendule stable dans la position inverse ($\theta = 0$) on va appliquer la commande adaptative auto-ajustable, comme le montre la figure suivante :

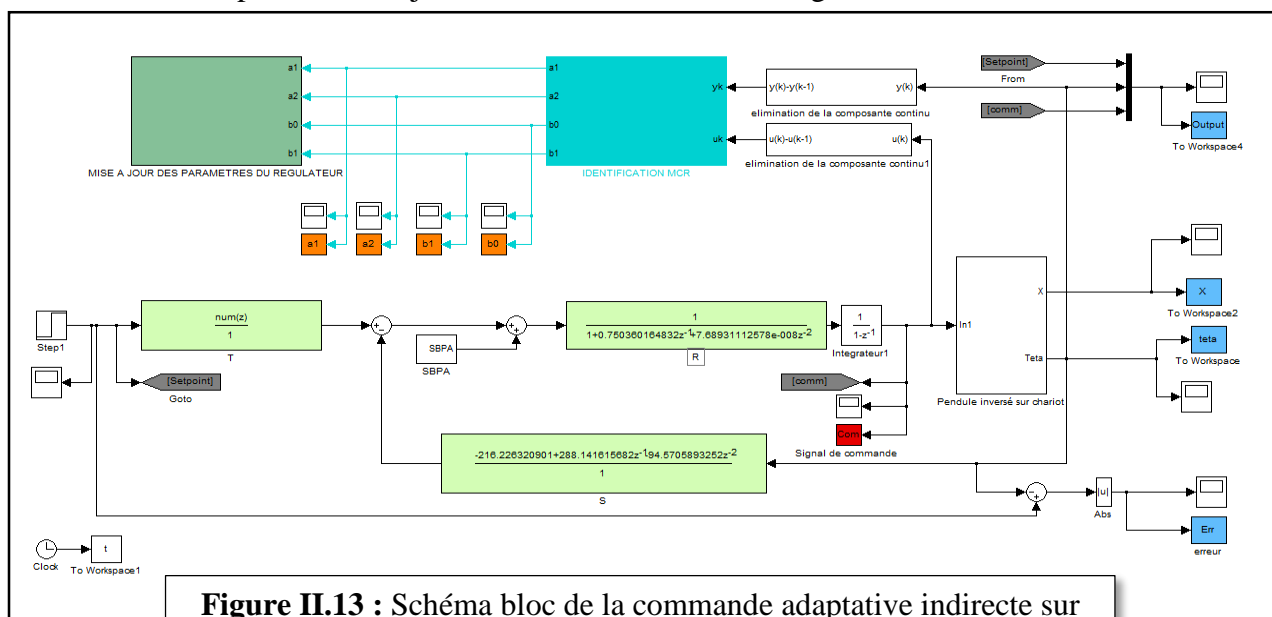


Figure II.13 : Schéma bloc de la commande adaptative indirecte sur l'ensemble pendule-chariot.

II.6.3.1. Initialisation

❖ **Bloc Identification MCR :** utilisé pour identifier les paramètres a_1, a_2, b_0, b_1

On a pris comme paramètres pour le bloc d'identification MCR :

- $\lambda = 0.956$;
- $P(0) = 10^6$.

❖ **Bloc SBPA (séquence binaire pseudo aléatoire) :** on l'utilise pour exciter tous les modes du processus, ces séquences sont des successions d'impulsions rectangulaires modulées en largeurs, qui approchent un bruit blanc discret, et donc qui ont un contenu riche en fréquence [20]. On a pris comme paramètres pour le SBPA :

- $N=11$;
- Amplitude=0.0001 (0.1% par rapport au point de fonctionnement 0.1).

II.6.3.2. Résultats de simulation

➤ Résultats graphiques

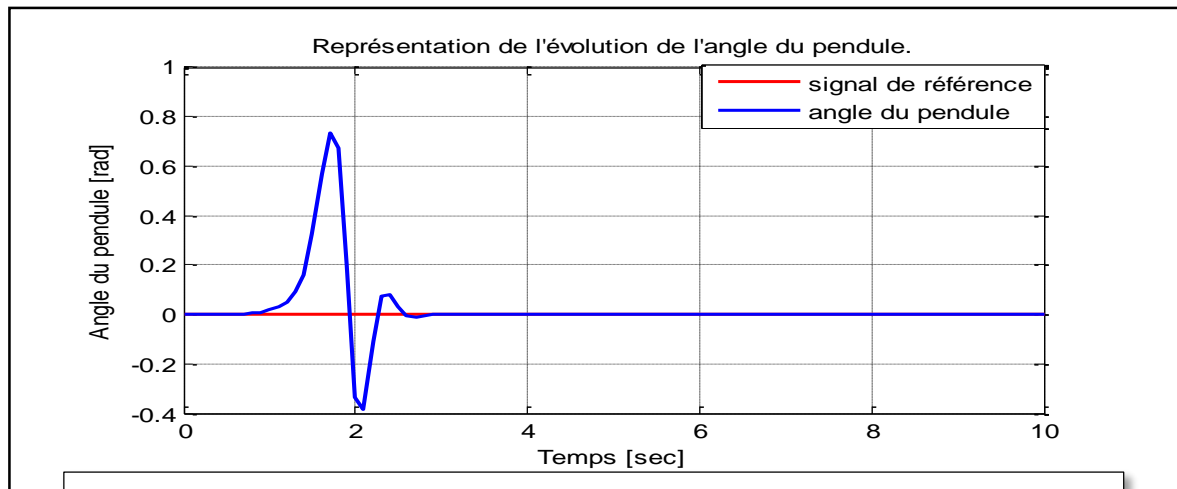


Figure II.14 : Evolution de l'angle de pendule par rapport à la consigne après l'implémentation de la commande adaptative.

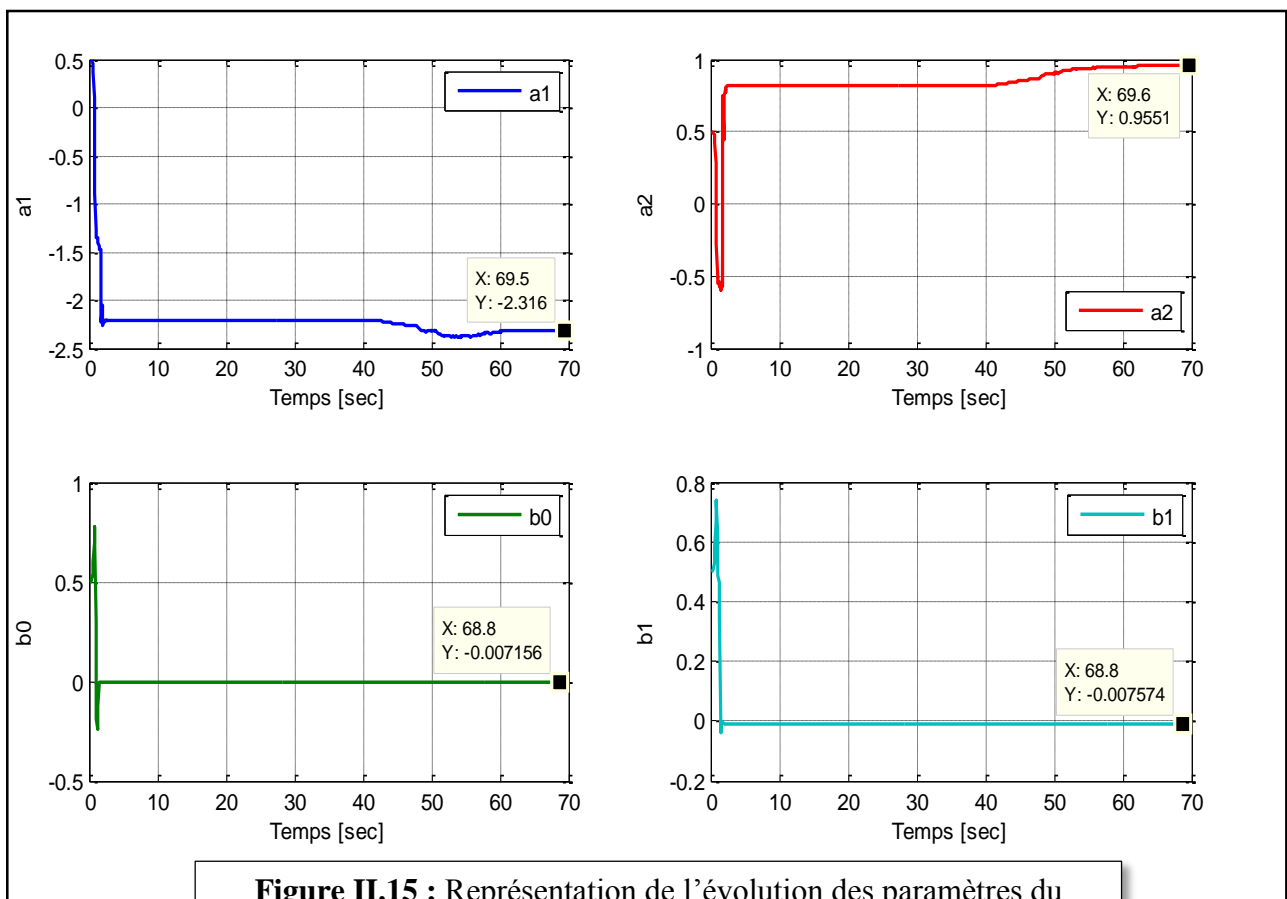


Figure II.15 : Représentation de l'évolution des paramètres du régulateur.

➤ **Résultats numériques :**

Après avoir initialisé les paramètres de modèle à identifier et les paramètres du régulateur nous avons obtenus les résultats suivants :

La fonction de transfert du procédé après simulation :

- $A(q^{-1}) = 1 - 2.3156q^{-1} + 0.9544q^{-2}$
- $B(q^{-1}) = -0.0071q^{-1} - 0.0075q^{-2}$

Le régulateur RST après la simulation :

- $R(q^{-1}) = 1 + 0.7503q^{-1} + 7.6893e^{-8}q^{-2}$
- $S(q^{-1}) = -216.2263 + 288.1416q^{-1} - 94.5705q^{-2}$
- $T(q^{-1}) = -23.0680 + 0.4152q^{-1} - 0.0024q^{-2} + 4.9826e^{-6}q^{-3}$

II.6.3.3. Interprétation des résultats obtenus :

D'après la figure II.14 on remarque une bonne poursuite de la consigne, ainsi qu'un régime transitoire rapide autour de cette dernière, le pendule se stabilise dans la position inverse ($\theta = 0$) en moins de 3s.

En observant les variations des paramètres identifier montrés dans la figure II.15, on remarque que ces derniers convergent vers des valeurs constantes d'une manière rapide ce qu'est dû à une bonne identification et un facteur d'oubli λ proche à 1.

D'après la figure II.16 et en tenant compte de la figure II.14, on constate que le signal de commande ramène le pendule à l'angle désiré, tout en ayant une erreur très proche de zéro.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description de la commande adaptative en général puis on a porté notre attention sur la commande indirecte. Après avoir détaillé cette approche de commande nous avons étudié un exemple illustratif, les résultats de simulation obtenus pour ce dernier montrent l'apport de cette technique de commande dans l'amélioration des performances en qualité de stabilité, rapidité et précision.

Le dernier chapitre, qui est l'objectif de notre travail, sera consacré pour l'application de cette stratégie de commande sur le générateur photovoltaïque.

Chapitre III

Application de la commande
adaptative indirecte robuste au
système PV.

III.1. Introduction

Afin d'optimiser l'exploitation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale. Cependant pour pallier aux variations des paramètres du système et aux différentes perturbations nous allons appliquer la commande adaptative indirecte robuste présentée dans le chapitre précédent, qui permet l'ajustement automatique en temps réel de régulateur.

Dans ce chapitre on propose l'étude et la réalisation d'une commande adaptative indirecte robuste, ensuite nous effectuons une étude de robustesse vis-à-vis plusieurs variations.

III.2. Application de la commande indirecte sur le GPV

III.2.1. Présentation de schéma bloc de la commande

Conformément à ce qui a été présenté dans le second chapitre, notre schéma de commande est régi par deux parties, une partie pour l'identification et une autre pour la mise à jour des paramètres.

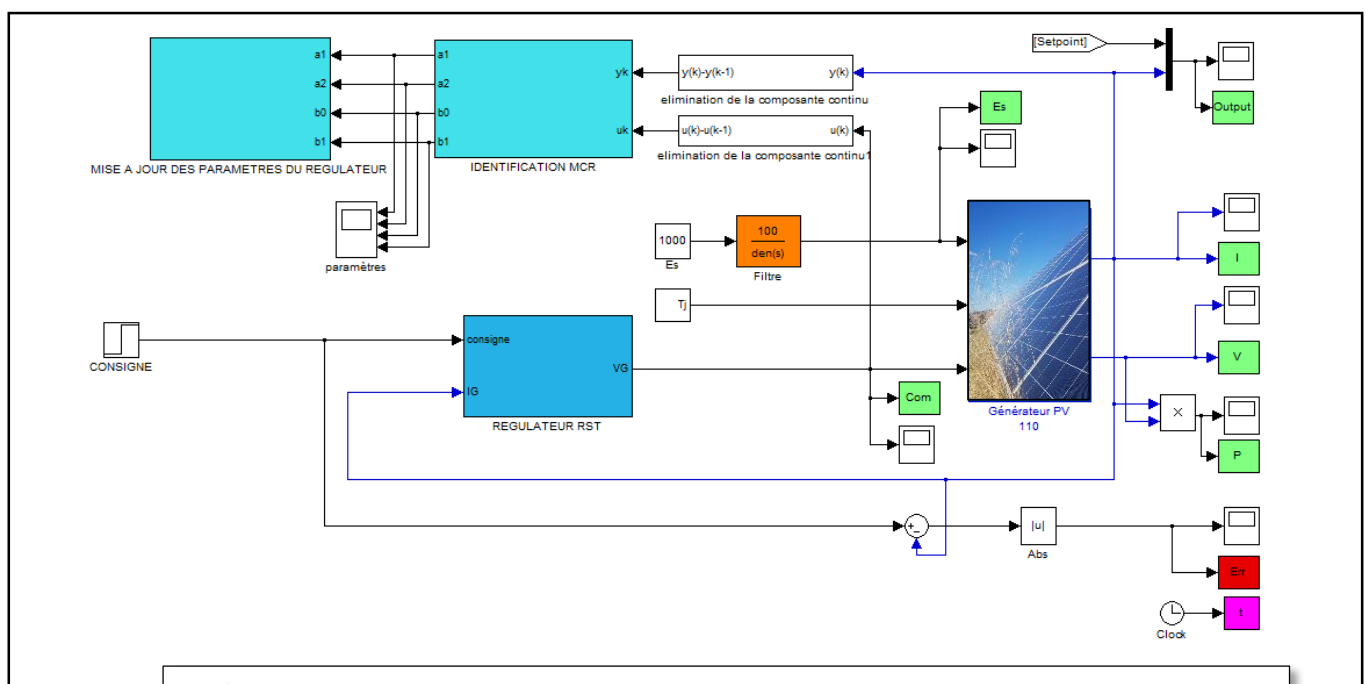


Figure III.1 : Schéma de la commande adaptative indirecte appliquée sur le GPV.

III.2.1.1. Partie identification

Quelle que soit l'approche de commande, il est impératif d'identifier le procédé. C'est la partie la plus délicate, ou l'automaticien devra bien définir les signaux d'excitation SBPA du processus et veiller à la bonne qualité des mesures [30]. La mise en œuvre de l'algorithme des moindres carrés récursif présentée dans le chapitre précédent est utilisée pour approximer le système par un modèle du deuxième ordre donnée par la fonction de transfert suivante :

$$H(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

La procédure à suivre est récapitulée ci-dessous :

Données : l'entrée et la sortie du système $u(k)$, $y(k)$

Initialisation: degré des polynômes A et B

$$\lambda = 0.956, P(0) = 10^6, T_e = 0.1$$

$$\theta(0) = [0.5, 0.5, 0.5, 0.5].$$

Etape 1 : on extrait les valeurs de θ et P , puis on calcule :

$$\hat{y}(k) = \phi^T(k-1)\theta(k-1)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)P(k-1)}{\lambda + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)}$$

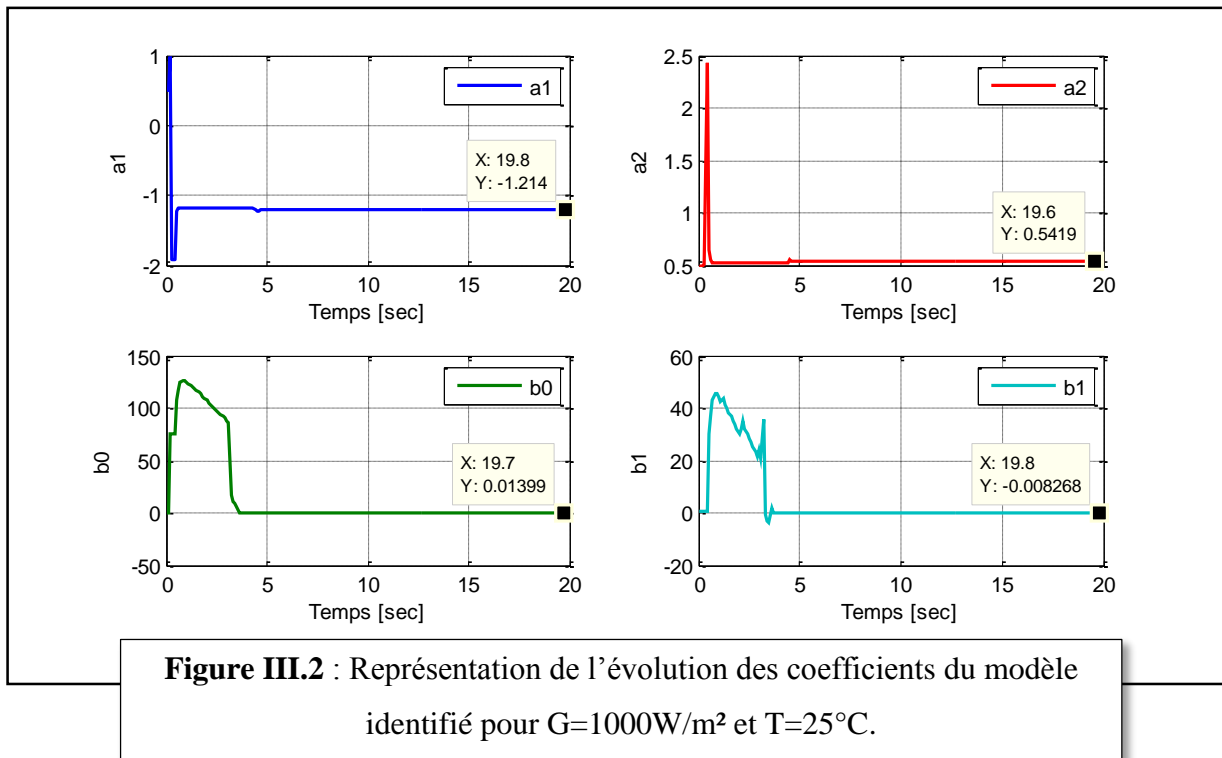
Etape 2 : on fait l'acquisition de $y(k)$ et on calcule :

$$\varepsilon(k) = (y(k) - \hat{y}(k));$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + P(k)\phi(k-1)\varepsilon(k)$$

Le modèle identifié dans ce cas est sans retard ($d = 0$), d'où sa fonction de transfert est donnée par la formule :

$$H(z^{-1}) = \frac{0.0140q^{-1} - 0.0083q^{-2}}{1 - 1.2143q^{-1} + 0.5419q^{-2}}$$



D'après la figure (III.), on constate que les coefficients de la fonction de transfert du modèle identifié convergent vers des valeurs constantes, ce qui montre la validité de l'identification.

III.2.1.2. Partie mise à jour des paramètres du régulateur

La procédure à suivre est récapitulée ci-dessous :

Données : polynômes A et B

Spécifications : A_m, B_m

$$A_m = 1 - 1z^{-1} + 0.3398z^{-2}$$

$$B_m = 0.2005z^{-1} + 0.1393z^{-2}$$

Etape 1 : effectuer la factorisation $B = B^+B^-$, $A = A^+A^-$

Etape 2 : Résoudre l'équation diophantienne $AS + BR = A^+B^+A_mA_0$

Etape 3 : calculer la loi de commande $Ru = Tu_c - Sy$

Répéter l'étape 2 de la partie 1 pour le calcul des paramètres de modèle et les étapes 2 et 3 de cette partie pour chaque période d'échantillonnage.

Après la convergence des paramètres du régulateur RST, on aura :

- $S(q^{-1}) = 161.0739 - 172.1449q^{-1} + 69.3370q^{-2}$
- $R(q^{-1}) = 1 - 1.0579q^{-1} + 1.3543e^{-7}q^{-2}$
- $T(q^{-1}) = 59.3275 - 1.0678q^{-1} + 0.0064q^{-2} - 1.2814e^{-5}q^{-3}$

III.2.2. Réponse du générateur PV avec la commande adaptative indirecte

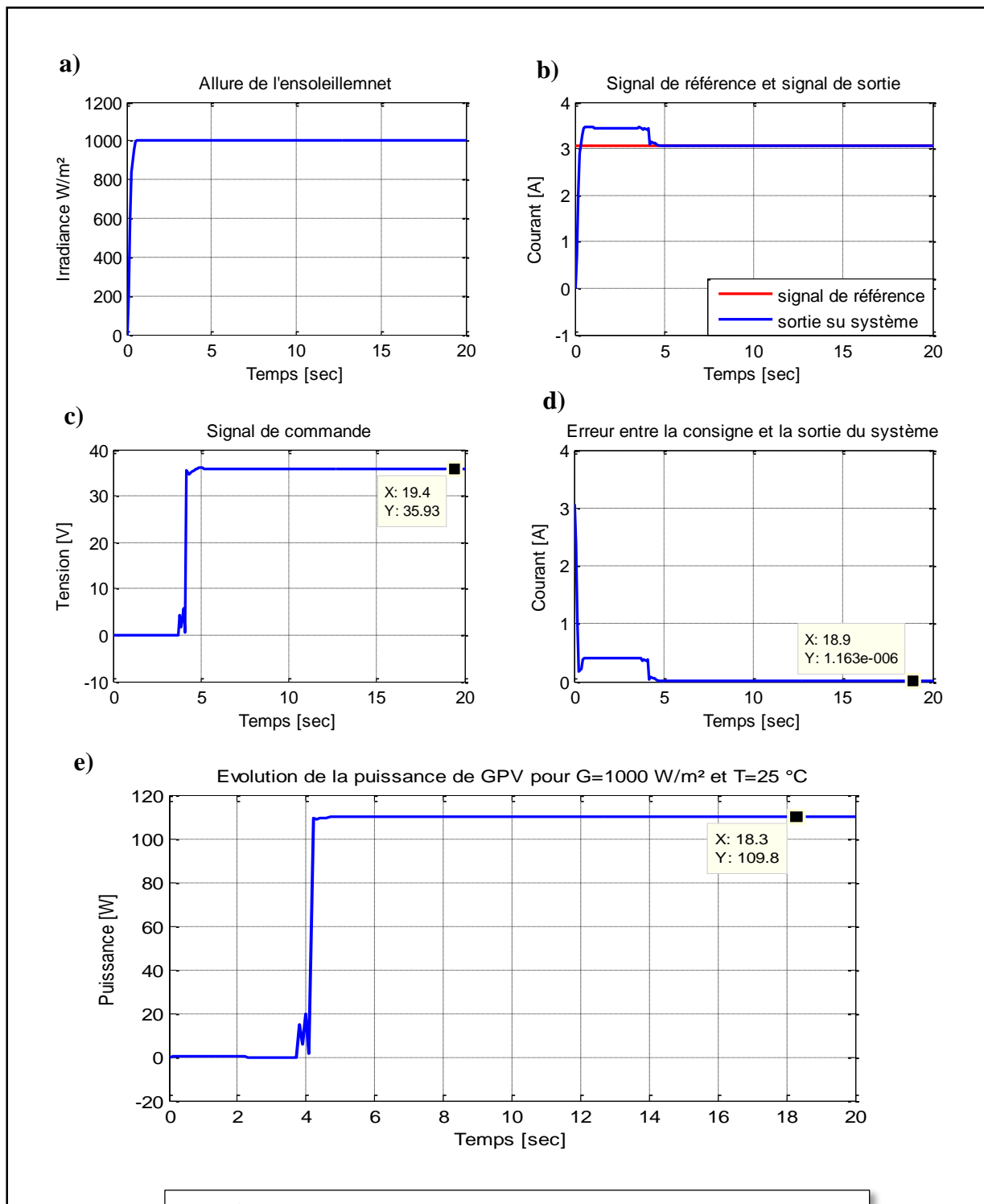
Afin d'avoir une meilleure connaissance sur les performances de la commande auto-ajustable, nous allons effectuer les simulations selon le tableau suivant :

Tableau III.1 : Série de simulations pour tester la réponse du générateur PV.

	Eclairement (W/m ²)	Température (K)
Simulation n°1	1000	298
Simulation n°2	Varie de 900 à 1000	298
Simulation n°3	1000	Varie de 298 à 308 à 295

Nous avons rajouté un filtre pour l'ensoleillement avec $\omega = 10 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0.9$, dans le but d'éviter les variations brusques de l'irradiation et pour réaliser un ensoleillement proche de réel.

1) Ensoleillement et température fixes :

Figure III.3 : Simulation pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

2) Ensoleillement variable et température fixe :

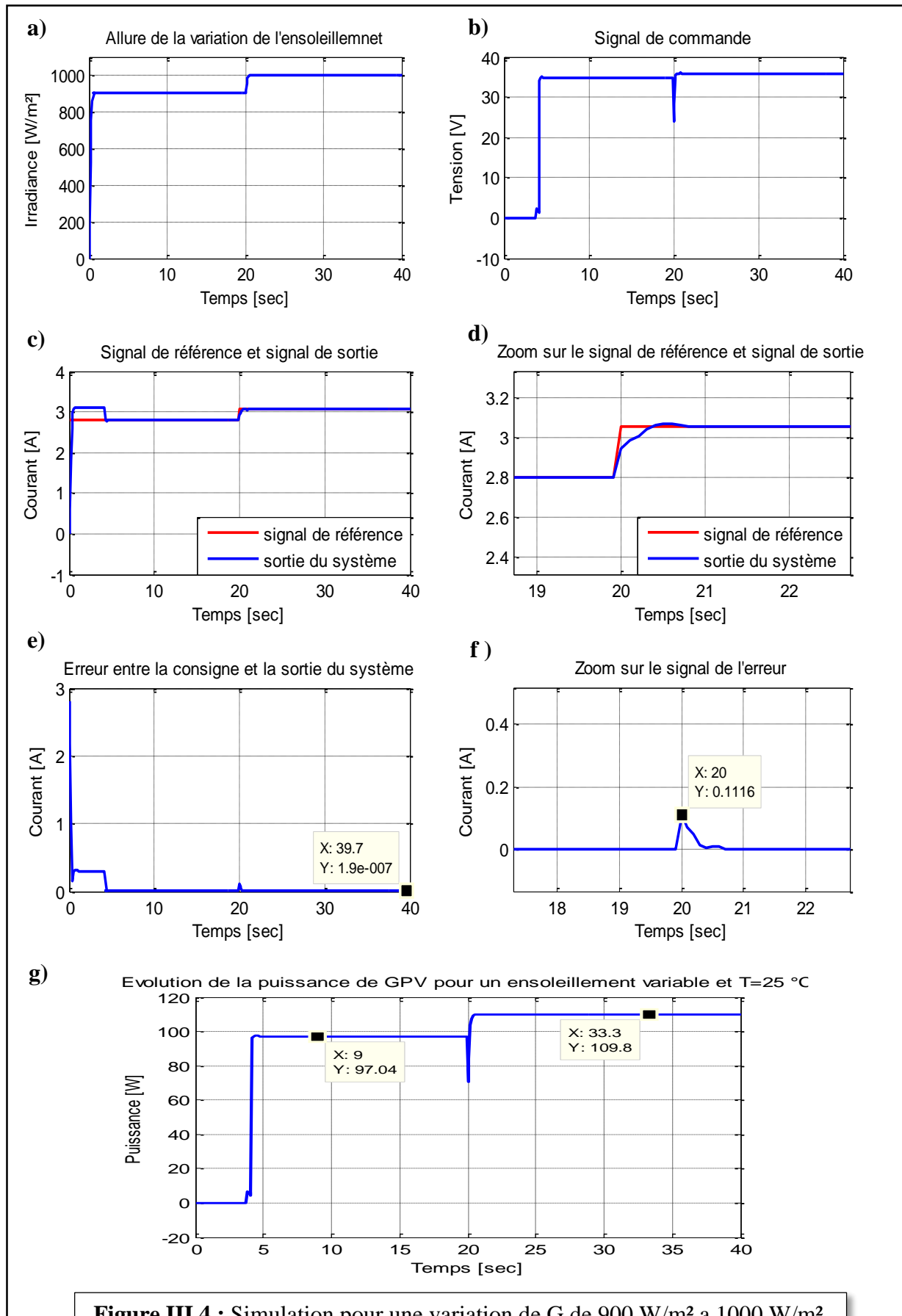


Figure III.4 : Simulation pour une variation de G de 900 W/m² a 1000 W/m².

3) Ensoleillement fixe et température variable :

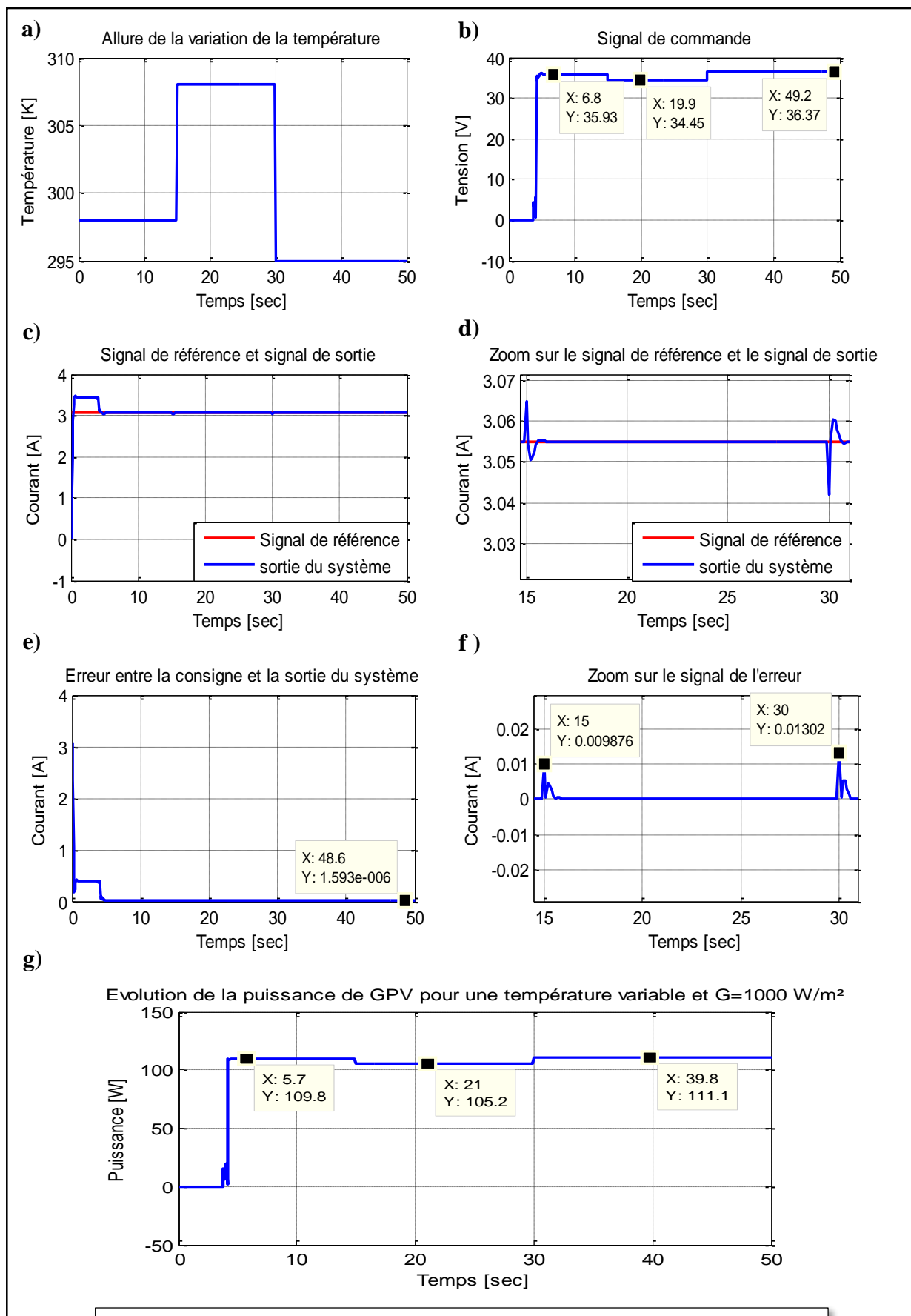


Figure III.5 : Simulation pour une variation de la température.

III.2.3. Interprétation des résultats

Dans le premier test nous avons fixé l'ensoleillement et la température selon les conditions STC et nous avons obtenu les mêmes résultats qu'en simulation en boucle ouverte tout en maintenant le point de puissance maximal (PPM) (figure III.3.e) avec une très bonne poursuite de la consigne (figure III.3.b) et une erreur très proche de 0 (d'ordre 10^{-6}).

Dans le deuxième et le troisième test, nous avons effectué des variations de l'ensoleillement et la température comme le montre le tableau III.1, nous constatons que le générateur PV répond conformément à ce qui a été étudié dans le chapitre 1. A chaque fois que l'ensoleillement augmente la puissance délivrée augmente (figure III.4.g), contrairement à la température, plus elle augmente et plus le rendement diminue. Une augmentation de la température entraîne une chute de la tension (figure III.5.b), donc elle influence inversement sur la puissance du GPV (figure III.5.g).

Nous remarquons au moment de variation de l'ensoleillement ou de la température une augmentation de l'erreur (figure III.4.f et figure III.5.f) et un petit décalage de courant PV par rapport à la consigne (figure III.4.d et figure III.5.d), ce qui est normale car le régulateur s'adapte automatiquement pour calculer les nouveaux paramètres du modèle vis-à-vis les différentes variations.

III.3. Robustesse de la commande adaptative indirecte

La commande robuste est un type de commande qui vise à garantir les performances et la stabilité d'un système face à des perturbations du milieu et les incertitudes du modèle.

Dans le but d'étudier la robustesse de la commande adaptative auto-ajustable conçue, une série de tests sera étudié.

III.3.1. Test des variations météorologiques

Dans le but de vérifier le suivi de la consigne nous effectuons les tests suivants :

Tableau III.2 : Série de tests à effectuer pour l'étude de la robustesse de la commande.

	Eclairement (W/m ²)	Température (K)
Simulation n°1	Varie de 900 à 1000 à 950 à 930	298
Simulation n°2	Varie de 900 à 1000	290 à 298

1) Variation de l'ensoleillement pour une température fixe :

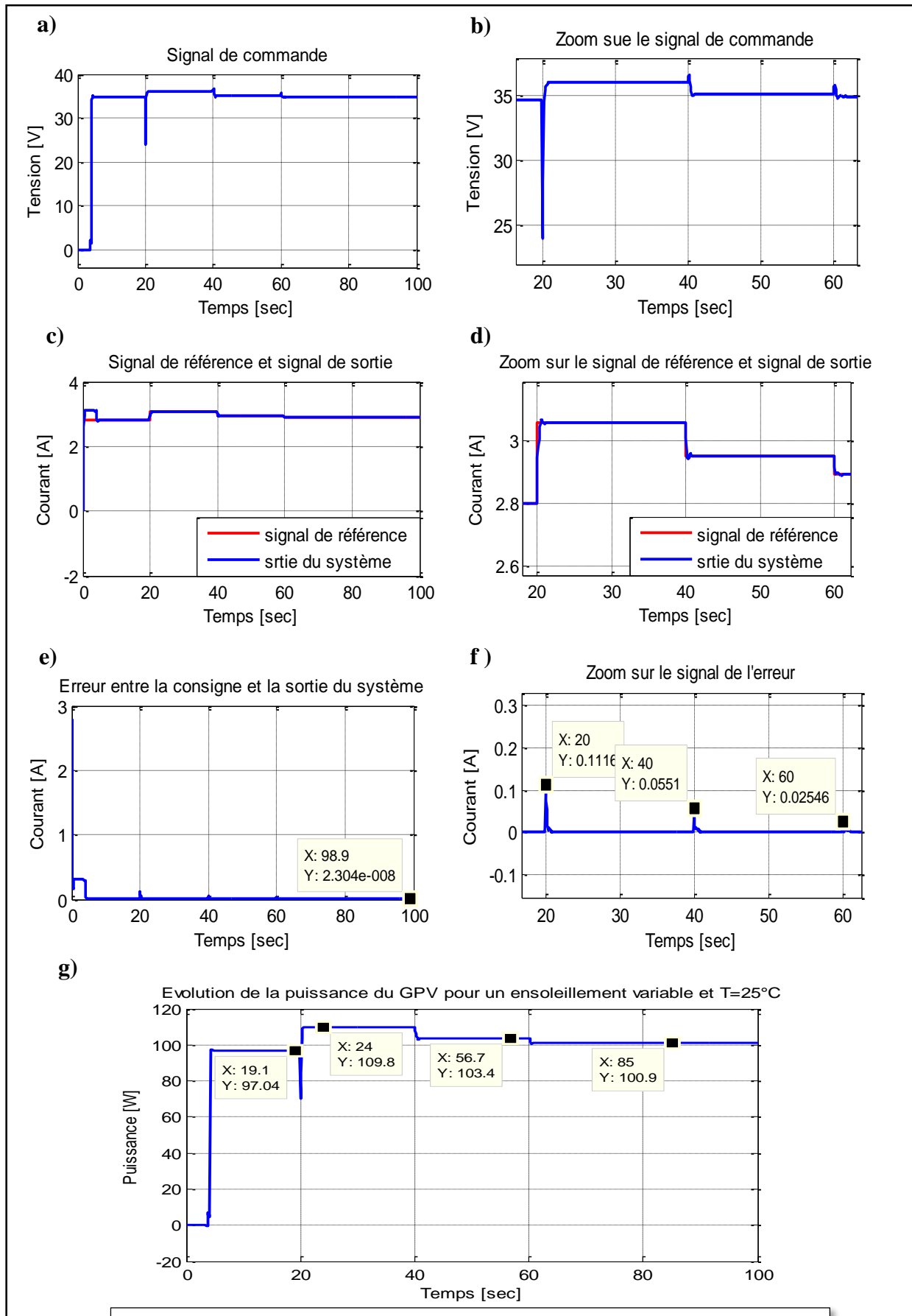


Figure III.6 : Simulation pour plusieurs variations de l'ensoleillement.

2) Variation de l'ensoleillement et de la température :

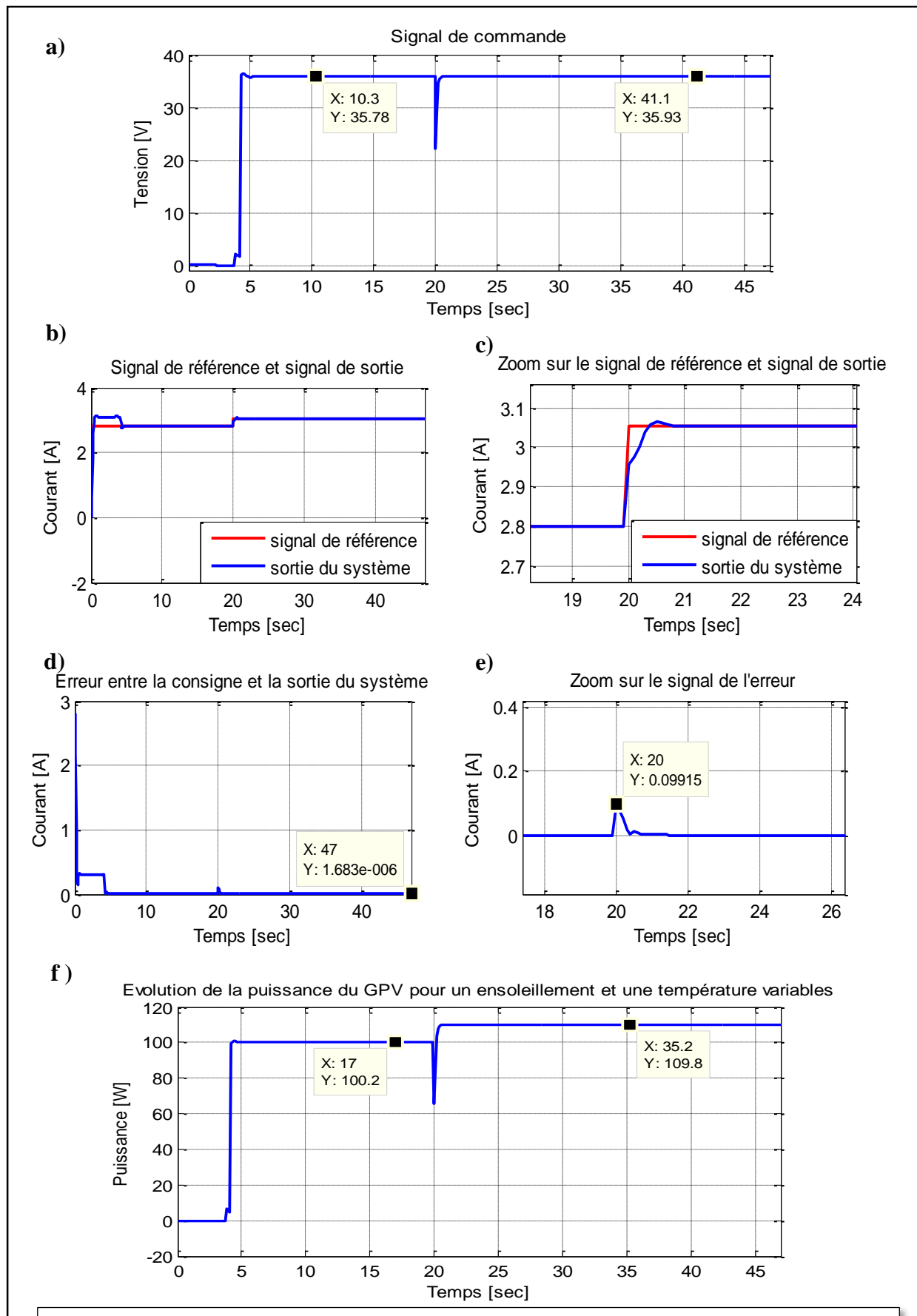


Figure III.7 : Simulation pour une variation de l'ensoleillement et de la température.

III.3.2. Interprétation des résultats

Les résultats de simulations obtenues dans les figures III.6 et III.7 montrent bien que le système est stable pour les variations de la température et/ou de l'ensoleillement, et le système atteint son état d'équilibre.

En analysant la figure III.6.c, nous constatons que le courant PV suit précisément la consigne avec des petites erreurs aux moments de variation de l'ensoleillement (voir figure III.6.f), en même temps nous remarquons des oscillations dans le signal de commande (voir figure III.6.a, b) où le régulateur s'adapte vis-à-vis les variations de l'ensoleillement.

De même pour la figure III.7, on a appliqué une variation de température en parallèle avec la variation de l'ensoleillement, l'erreur étant de 0.099 A au moment de variation (figure III.7.e) et quand le signal de sortie du système rejoint la consigne (figure III.7.b) l'erreur devient très faible (d'ordre 10^{-6}) voir la figure III.7.d.

Les figures III.6.g et III.7.f représentent la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque dont les résultats sont conformes avec l'étude effectuée en boucle ouverte.

III.3.3. Test des variations paramétriques

Nous vérifions la sensibilité de la commande dans le cas des variations des paramètres internes de générateur photovoltaïque (résistance série, et résistance parallèle).

1) Simulation pour une augmentation de la résistance série de 50% :

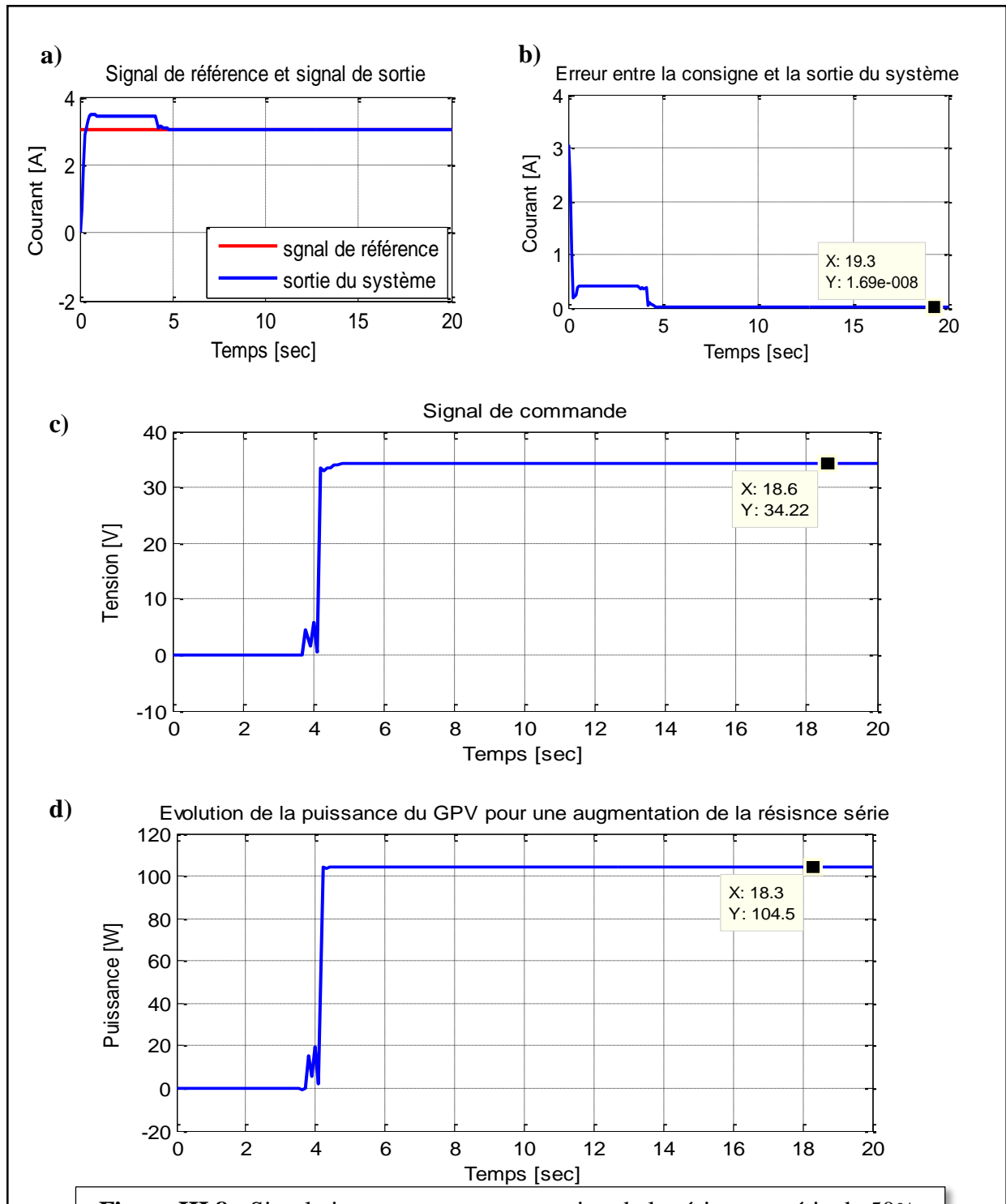


Figure III.8 : Simulation pour une augmentation de la résistance série de 50%.

2) Simulation pour un vieillissement de la résistance shunt de 13.33% :

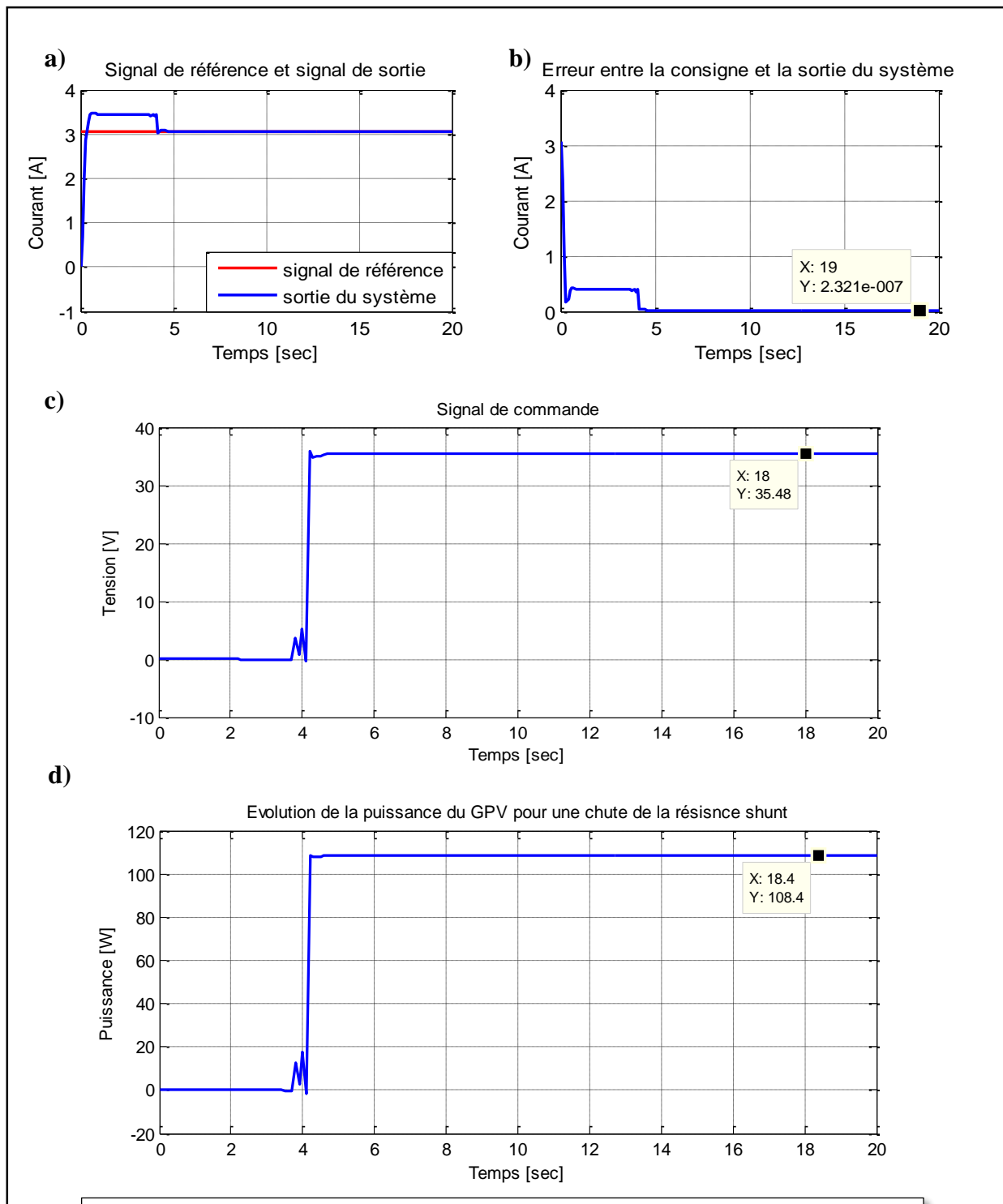


Figure III.9 : Simulation pour une chute de la résistance parallèle de 13.33%

III.3.4. Interprétation des résultats

Les figures III.8 et III.9 montrent la réponse du générateur photovoltaïque pour une augmentation de la résistance série avec 50% et une diminution de la résistance parallèle avec 13.33%.

Par cause d'humidité, la résistance série augmente, par conséquent la puissance du GPV diminue (figure III.8.d), ce qu'est due à la diminution de la tension photovoltaïque (figure III.8.c).

Contrairement à la résistance parallèle, plus sa valeur diminue plus la tension photovoltaïque diminue (figure III.9.c), par conséquent la puissance fournie par le générateur photovoltaïque diminue voir la figure III.8.d, (la diminution de la résistance shunt traduit souvent l'apparition de dégradation dans le module).

III.3.5. Test de rejet de perturbation

Nous testons le rejet de perturbation vis-à-vis une surtension de signal de commande avec 5V à l'instant 10s.

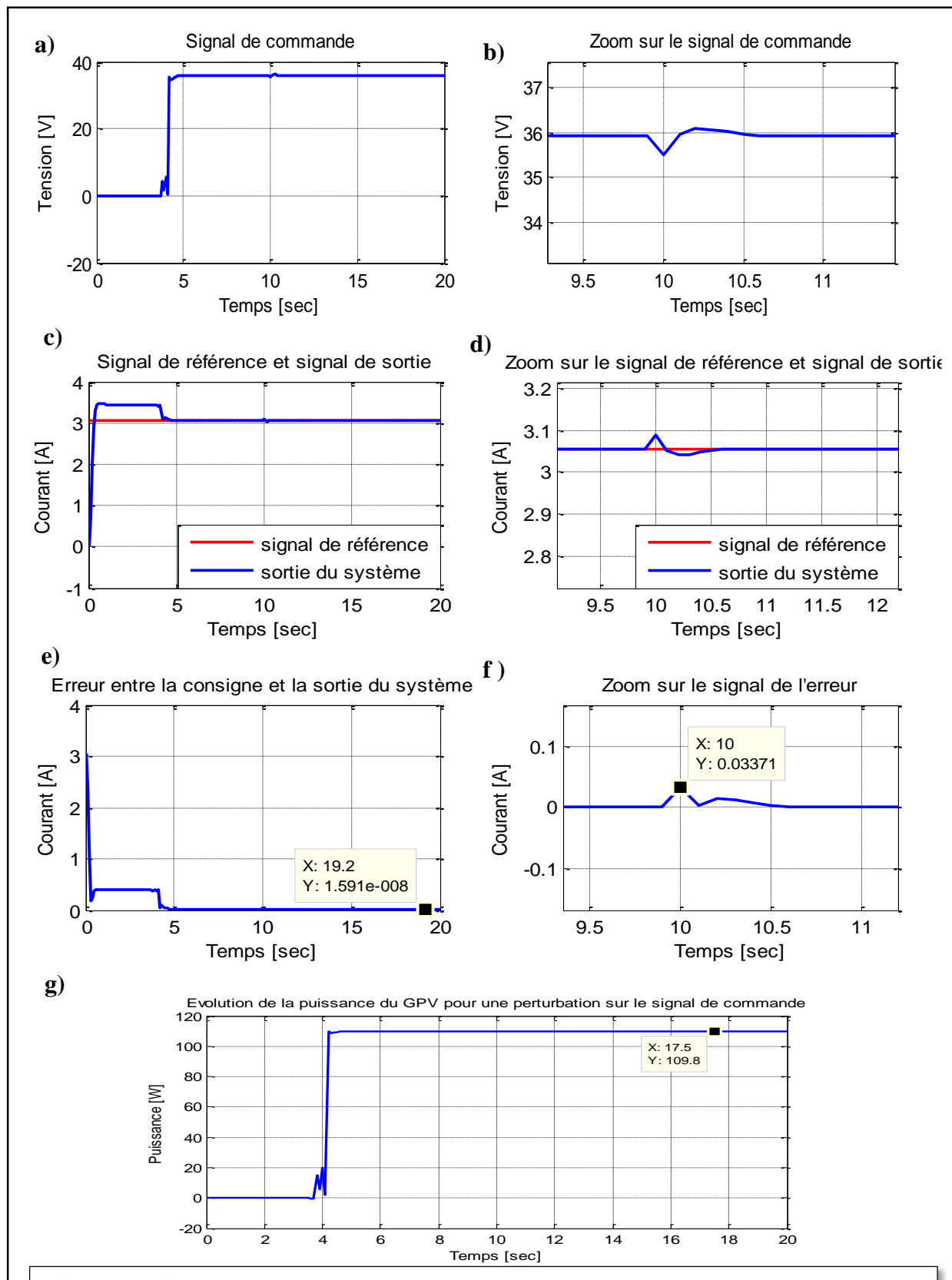


Figure III.10 : Simulation pour une surtension de 5V au niveau du signal de commande

III.3.6. Interprétation des résultats

La figure III.10 montre que pour le rejet de perturbation, le suivie de consigne est bien maintenu après deux petites oscillations autour de la consigne au moment d'application de la surtension (figure III.10.c, d) avec une erreur de 0.033 A (figure III.10.f) qui tend vers 0 (d'ordre 10^{-8} voir figure III.10.e) après que le courant photovoltaïque rejoint la consigne.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande adaptative indirecte sur le système photovoltaïque étudié dans le premier chapitre, dans le but de maintenir le point de puissance maximal (PPM).

Son implémentation a permis d'identifier le modèle du système en ligne et le calcul automatique des paramètres du régulateur malgré les différentes perturbations et variations paramétriques du system PV pour l'étude de la sensibilité et de la robustesse de cette commande.

Nous concluons d'après les résultats de simulations obtenus que cette approche de commande présente des performances satisfaisantes avec une bonne dynamique de poursuite vis-à-vis les différentes variations météorologiques et paramétrique ainsi qu'un rejet de perturbation appréciable.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire est une contribution à l'étude et à la conception de la commande adaptative indirecte robuste appliquée sur un générateur photovoltaïque.

La première étape de ce travail est consacrée aux généralités sur la filière photovoltaïque. Celles-ci ont porté dans un premier temps sur la ressource solaire et l'énergie photovoltaïque dans le monde et en Algérie, le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est présenté ainsi qu'une revue sur les principaux composants et éléments d'un système PV, les différentes technologies existantes ont abouti sur une classification en termes de rendement et de part de marché. En fin la modélisation mathématique des différentes cellules PV et l'influence des principaux paramètres métrologiques (ensoleillement, température) et paramétrique (résistance shunt et série) sur le comportement de module PV sont effectuées.

Dans un deuxième temps, nous avons abordé le principe de la commande adaptative indirecte robuste tout en détaillant ses algorithmes d'identifications (moindres carrés récursifs) et de mise à jour des paramètres du régulateur RST. Un exemple illustratif de cette approche de commande a été étudié.

La troisième partie a été consacrée pour la conception et l'application de la commande adaptative indirecte sur le panneau photovoltaïque dans le but de ramener le système à son point de fonctionnement unique duquel il fournit la puissance maximale et de le maintenir vis-à-vis les différentes variations métrologique, paramétriques et perturbations.

Les différentes simulations et tests effectuées dans cette partie ont montrées que la commande adaptative conçue est robuste par rapport à des variations climatiques (l'ensoleillement et/ou de la température), paramétriques ainsi qu'un rejet de perturbation avec une très bonne dynamique de poursuite de la trajectoire désirée où le système photovoltaïque atteint son état d'équilibre en un temps assez court.

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives de recherche intéressantes, nous pouvons citer quelque un :

- Etendre l'étude sur d'autres types de perturbations et de défauts, tels que les défauts d'ombrage.
- Connecter le générateur avec une charge par l'intermédiaire d'un convertisseur.
- Validation de la commande sur un banc d'essai.

Annexe A

Puissance installée en Algérie.

Centrales	P. installée (MWc)	Centrales	P. installée (MWc)
1. Réseau PIAT		1. Réseau RIN	
Eolienne Kabertène	10.2	Oued Nechou(Ghardaia)	1.1
Adrar	20	Sedret Leghzel (Naâma)	20
Kabertène	03	Oued El Kebrit (Souk Ahras)	15
In Salah	05	Ain Skhouna (Saida)	30
Timimoune	09	Ain El Bel (Djelfa) 1 et 2	53
Reggouen	05	Lekhneg (Laghout) 1et 2	60
Zaouiat Kounta	06	Telagh (Sidi-Bel-Abbes)	12
Aoulef	05	Labiodh sidi chikh (El-bayadh)	23
2. Réseau RIS		El Hdjira (Ouargla)	30
Tamanrasset	13	Ain-El-Melh (M'sila)	20
Djanet	03	Oued El Ma (Batna)	02
Tindouf	09	Totale SKTM (EnR)	354.3

Annexe B

Les paramètres et les caractéristiques de générateur photovoltaïque SIEMENS SM110-24 sont les suivants :

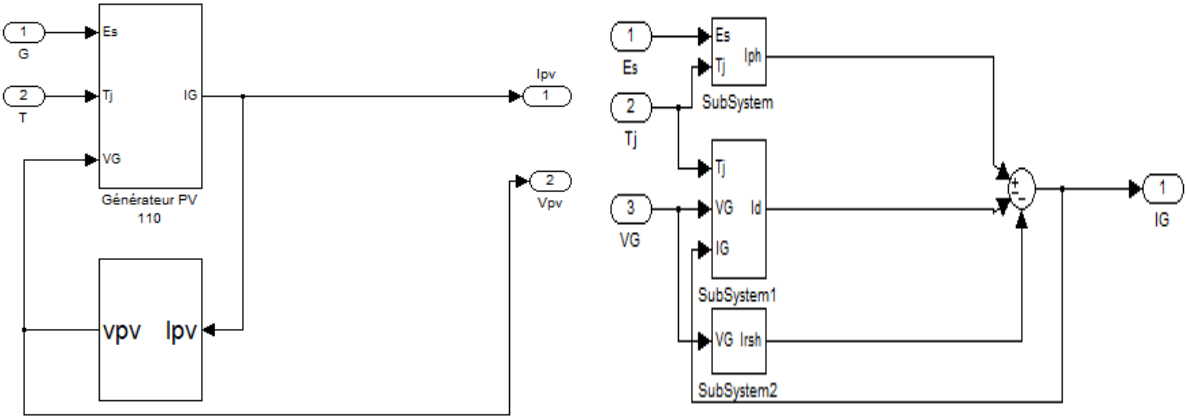
I_{cc}	Courant de court-circuit	3.45 A
V_{co}	Tension de circuit ouvert	43.5 V
I_{mp}	Courant au MPP	3.15 A
V_{mp}	Tension au MPP	35 V
P_{max}	Puissance nominale	110.25 W
μ_{co}	Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-152 mV/C
μ_{cc}	Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	1.4 mA/C
N_s	Nombre de cellules en série	72
G_n	Irradiation nominale	1000 W/m ² @ 25°C
T_n	Température nominale	25+273.15 K
R_s	Résistance série	0.6 Ω
R_p	Résistance parallèle	150 Ω

Les paramètres de l'ensemble pendule-chariot étudié dans le second chapitre sont les suivants :

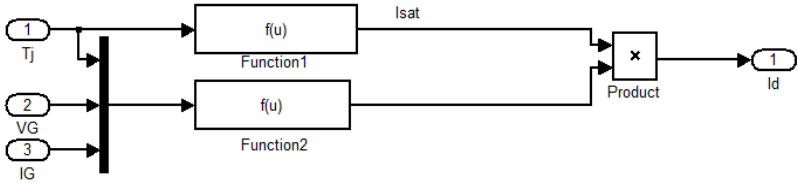
Paramètres	Valeurs	Description
F(t)	/	Force exercé sur le chariot (N)
X(t)	/	Position du chariot (m)
$\theta(t)$	/	Angle de rotation du pendule (rad)
M	2.3 kg	Masse du chariot
m	0.2 kg	Masse du pendule
b	0.05 Ns.m	Coefficient de frottement des roues du chariot
g	9.81 ms ²	La gravité
d	0.005 Nms/rad	Coefficient de frottement de la rotation du pendule
l	0.3 m	Demi-longueur du pendule

Annexe C

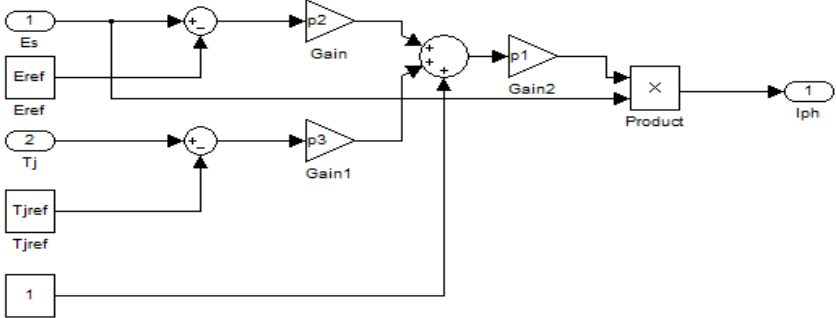
Schéma bloc de générateur PV :



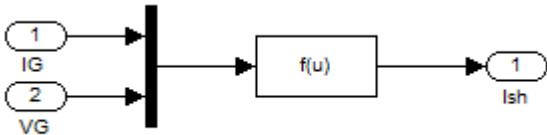
Bloc de l'équation de courant de la diode Q :



Bloc de l'équation de courant photonique :



Bloc de l'équation de courant qui traverse la résistance shunt :



Références bibliographiques :

- [1] Helali Kamelia. « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative. », Mémoire de MAGISTER en électrotechnique, université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou, 2012.
- [2] Khenfer Riad. « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. », Thèse de doctorat Université de Sétif, 2018.
- [3] Ioan Doré Landau. « De la commande robuste à la commande adaptative. », D. Popescu. Automatique Avancée et Informatique Appliquée, Académie Roumaine, 6p., 2009. hal-00384412
- [4] Data for 2010-2014 from International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2016* (Paris: 2016), <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2016/>.
- [5] IEA-PVPS, Trends 2016 in photovoltaic applications. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015. Report IEA -PVPS T1- 30: 2016.
- [6] Renewables 2017 global status report, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf .
- [7] Algerian ministry of energy and mining. Available: <http://mem-algeria.org/english/index.php> .
- [8] Abouda Salim. « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompages.», Thèse de doctorat, en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.
- [9] Stéphane Petibon. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. », Thèse de doctorat Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [10] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>
- [11] Michaël Bressan. « Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque. », Electronique. Université de Perpignan, 2014. Français. tel-01068025.

-
- [12] Angel Cid Pastor. « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques.», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [13] Vighetti Stéphane. « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion.», Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [14] Loïc Bailly « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface.», Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [15] José Miguel Navarro. « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible.», Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [16] Merahi Reda. « Modélisation D'un Dispositif Mppt Pour L'étude De L'augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateur Photovoltaïques. », Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [17] Bensafia Yassine. « Utilisation des filtres fractionnaires pour la conception de régulateurs adaptatifs robustes. », thèse doctorat en science, Université de Skikda, 2016.
- [18] I.D Landau, R. Lozano, M. M'Saad, A. karimi. « Adaptive control Algorithms, Analysis and applications » Edition Springer London 2011.
- [19] Åström K.J., Wittenmark. B. « Adaptive control. » NewYork: Addison-Wesley publishing company, 1995.
- [20] Hassani Walid. « Commandes adaptative auto-ajustable et multi modèles supervisée d'un réacteur chimique. », Mémoire de fin d'étude ingénieur. Université de Bejaia, 2007.
- [21] I. D. Landau. « Identification et commande des systèmes », Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, 2ème édition 'Hermes', 1993.
- [22] L. D. Landau. « Introduction to adaptive control. ». Edition Springer. London. 2011.
- [23] Guillaume Mercère. « Contribution à l'identification récursive des systèmes par l'approche des sous-espaces. », Automatique / Robotique. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2004. Français. tel-00007958.
- [24] Ioan Doré Landau « Commande des système conception, identification et mise en œuvre. » Lavoisier, 2002.

- [25] Jia-Jun Wang. « Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers. », ELSEVIER, 2010.
- [26] Etienne Dombre. « Analyse et modélisation des robots manipulateurs. », Lavoisier, 2001.
- [27] Andrew K. Stimac. « Standupand Stabilisation of inverted pendulum.», Bachelor of science at the M.I.T, 1999.
- [28] Emmanuel Godoy, Eric Ostertag. « Commande numérique des systèmes Approches fréquentielles et polynômiales. », ellipses, 2003.
- [29] Jacques Ganglaoff, Michel de Mathelin. « Commande numériques des systèmes. », article de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2013.
- [30] Haddoufi Lamia, Mechrouh Meriem. « Application de la commande adaptative indirecte sur un système photovoltaïque. », Mémoire de Master, université de Bejaia, 2019.

Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables a connu ces dernières années un développement considérable. L'élément de base de cette énergie est la cellule photovoltaïque qu'est l'objet de plusieurs études de plusieurs laboratoires de recherche.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est d'associer le système photovoltaïque à un régulateur adaptatif dans le but de l'amener à son point de fonctionnement unique duquel il fournit la puissance maximale. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'application de la commande adaptative robuste indirecte afin d'assurer une bonne dynamique de poursuite et un rejet de perturbation vis-à-vis les différentes variations des conditions climatiques et les paramètres internes de générateur photovoltaïque. Les résultats de simulation montrent l'efficacité et la robustesse de cette technique de commande pour le control du générateur photovoltaïque.

Mots clés

Générateur photovoltaïque, identification, commande adaptative robuste, commande adaptative indirect.

Abstract

The use of renewable energies has grown considerably in recent years. The basic element of this energy is the photovoltaic cell, which is the subject of various studies in a several research laboratories.

The objective of the work presented in this paper is to associate the photovoltaic system with an adaptive regulator in order to bring it to its unique operating point at his maximum power. In this context, we are interested to the application of the indirect robust adaptive control to ensure a good tracking dynamics and a rejection of disturbance with respect to the different variations of the climatic conditions and the internal parameters of the photovoltaic generator. The simulation results show the efficiency and robustness of this control technique for the control of the PV.

Keywords

Photovoltaic generator, identification, robust adaptive control, indirect adaptive control.