

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Automatique
Laboratoire de commande des processus



Projet de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique

THEME

**Diagnostic d'une station de pompage
photovoltaïque**

Présenté par :

BOUDJATIT Amina

SAIDJ Sabah Hana

Proposé par :

M. Chakir

M. TADJINE

Enseignant à l'ENP

Professeur à l'ENP

Juin 2015

École Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger. Algérie

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Nous remercions nos parents, qui nous ont soutenus tout au long de nos études.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent particulièrement à Messieurs M.CHAKIR et M.TADJINE nos promoteurs à l'ENP d'avoir proposé ce sujet mais aussi pour leur aide et leur disponibilité.

Ce modeste travail, fruit de notre cursus, n'a été possible que grâce au concours de tous nos enseignants dont nous louons les efforts qu'ils ont consentis durant toutes ces années.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma chère mère qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour et son soutien et ses sacrifices,

A mon cher père qui a toujours été mon exemple de courage, pour son aide, ses précieux conseils et son amour,

A mes sœurs et mon frère que je chéris,

A mes oncles, mes tantes et mes cousins et toute ma famille,

A Sabah, mon binôme, et tous mes amis que j'aime,

Au CAP, Club des Activités Polyvalentes, socle de ma motivation.

Amina

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon père et à ma très chère mère qui m'ont toujours encouragé, soutenu et ont été et seront à jamais la source de mes forces,

A ma très chère sœur, à qui je souhaite tout le bonheur du monde,

A toute ma famille, mes tantes, mes oncles et mes cousins,

A tous mes amis, camarades d'études et ma compagne d'aventure Amina,

Enfin à ma deuxième famille, les membres du CAP, à qui je souhaite la réussite dans tout ce qu'ils entreprendront.

Sabah

Résumé

Notre projet de fin d'étude s'intitule, diagnostic d'une chaîne de pompage photovoltaïque. Notre travail consiste à modéliser l'installation sous environnement de simulation MATLAB et les différents défauts qui peuvent s'y introduire éventuellement dans les éléments la constituant, à savoir, un panneau photovoltaïque, le hacheur Cuk et la machine à courant-continu. En outre, nous formulerons par la suite les algorithmes de détection de défauts et de pannes, nécessaires pour la protection du système. Nous générons également les lois de commande de tolérance aux défauts requises pour la compensation des effets pervers provoqués, la poursuite des consignes préconisées et les performances souhaitées pour l'application d'irrigation aux régions isolées.

Mot clés : pompage photovoltaïque, diagnostic, défauts, détection, localisation, commande tolérante aux défauts.

Abstract

This thesis is dedicated to the diagnosis of pumping photovoltaic systems. The task allocated to us is to model the whole chain in MATLAB environment for simulation and to insert the different faults that may occur in each element of the system and which are, photovoltaic panel, Cuk DC inverter and also the DC motor that drives the pump in the back of the chain. Also, we will generate different approaches to localize and detect the faults in order to prevent the eventual breakdowns and damages. Finally, we will present the simulation of the fault tolerant control in the system studied. Effectively, this method is necessary to assure the pursuit of the references and the reach of performances required for the irrigation application.

Key words: photovoltaic pumping system, faults, localization, detection, diagnosis, fault tolerant control.

ملخص

في هذا العمل نهتم بدراسة محطة ضخ مياه موجهة للإستعمال في المناطق النائية والمعزولة عن الشبكة الكهربائية، وبالتالي فهي مزودة بالطاقة الشمسي. بعد عرض مختلف الأجزاء المكونة للمحطة ونماذجها الرياضية نقوم بمحاكاتها في ظروف عادية. بعد ذلك، نتطرق لدراسة مختلف العيوب المحتملة الظهور في المحطة واجزائها، من حيث تأثيرها على المردودية الاجمالية بغرض إقتراح طريقة لرصدها وتشخيصها. بعدها، نهتم بتطوير تحكم ملائم للاعطاب لكل جزء مشكل للسلسلة.

كلمات مفتاحية: اعطاب، عيوب، رصد، تشخيص، تحكم ملائم للاعطاب، محطة ضخ مياه، طاقة شمسية.

Table des matières

Chapitre 1 Description générale d'un système de pompage photovoltaïque

.....	15
I.1 Introduction.....	15
I.2 Description des compartiments.....	15
I.2.1 Générateur photovoltaïque :	16
1.1.2 Le convertisseur.....	23
1.1.3 L'onduleur	26
1.1.4 Choix du convertisseur	28
I.2.2 Choix de la Machine.....	29
1.1.5 Pompe, batterie et réservoir	33
1.2 Modélisation et simulation de la chaîne.....	35
1.3 Conclusion.....	38

Chapitre 2 Défauts de la chaîne de pompage photovoltaïque40

2.1 Introduction.....	40
2.2 Classification des défauts	41
2.3 Défauts et anomalies d'un champ PV :.....	41
2.3.1 Classification des défauts du système PV.....	41
2.4 Défauts du convertisseur C _{uk} (hacheur).....	48
2.4.1 Les défaillances d'un transistor :.....	49
2.4.2 Simulation des défaillances dans le hacheur C _{uk}	51
2.5 Les défauts des machines électriques à courant continu	52
2.5.1 Les pannes d'ordre mécanique.....	52
2.5.2 Les pannes d'ordre électrique :.....	52
2.5.3 Simulation des défauts de la machine.....	55
2.6 Défauts combinés de la chaîne photovoltaïque.....	56
2.7 Conclusion.....	57

Chapitre 3 Diagnostic de la chaîne de pompage59

3.1 Introduction.....	59
-----------------------	----

3.2 Le diagnostic des défauts	60
3.2.1 Principe du diagnostic des défauts	60
3.3 Diagnostic du panneau photovoltaïque	65
3.3.1 Méthodes de diagnostic du PPV	65
3.3.2 Choix de la méthode de diagnostic : caractéristique statique	66
3.3.3 Simulations.....	66
3.4 Diagnostic du hacheur Cùk.....	67
3.4.1 Choix de la méthode du diagnostic : par observateur.....	67
3.4.2 Les simulations	70
3.4.3 Le résidu.....	72
3.5 Diagnostic de la machine DC.....	73
3.5.1 Choix de la méthode du diagnostic par observateur.....	74
3.5.2 Simulation de l'observateur	75
3.5.3 Calcul du résidu.....	77
3.6 Diagnostic de la chaîne	79
3.7 Conclusion.....	80
Chapitre 4 Commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques .82	
4.1 Introduction.....	82
4.2 Stratégie de la commande tolérante aux défauts.....	83
4.2.1 Approche passive.....	83
4.2.2 Approche Active.....	83
4.3 Commande tolérante aux défauts du panneau photovoltaïque	84
4.3.1 Reconfiguration de puissance dans la littérature	84
4.3.2 Choix d'approche : reconfiguration modulaire	86
4.3.3 Résultats de simulation	87
4.4 Commande tolérante aux défauts du hacheur.....	88
4.4.1 Résultats de simulation	89
4.5 Commande tolérante aux défauts de la machine DC.....	90
4.5.1 Commande passive	90

4.6 Conclusion.....	92
Conclusion générale et perspectives	94
Bibliographie	96
Annexe A Définitions et notions générales	99
Annexe B Résultats de simulation des défauts combinés	103
Annexe C Fiches techniques	107

Table des figures

Figure I.2-1 Schéma de la chaîne de pompage photovoltaïque	16
Figure I.2-2 Dopage des matériaux semi-conducteurs et effet photovoltaïque.....	16
Figure I.2-3 Constitution d'un générateur photovoltaïque	17
Figure I.2-4 Placement des diodes bypass anti-retour	17
Figure I.2-5 Les modes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure I.2-6 Modèle d'une cellule PV à une seule diode	19
Figure I.2-7 Modèle de Bishop d'une cellule PV.....	20
Figure I.2-8 Caractéristique I V de notre panneau photovoltaïque bp_sx150s	22
Figure 1.2-1 Principe de fonctionnement du MPPT	23
Figure 1.2-2 Topologie à onduleur central et Figure 1.2-3 Onduleur à string.....	27
Figure 1.2-4 Configuration onduleur multi-string.....	27
Figure 1.2-5 Le schéma électrique du Cuk sous Simscape	28
Figure 1.2-6 Tensions d'entrée et de sortie du Cuk.....	29
Figure 1.2-7 Schéma électrique d'une machine à courant continu.....	31
Figure 1.2-8 Schéma de la machine DC sous Simscape	33
Figure 1.2-9 Réponse en courant et en vitesse de la MCC en BO.....	33
Figure 1.3-1 Chaîne complète du système de pompage PV sous Simscape de Matlab	35
Figure 1.3-2 Le graphe $P=f(V)$ et la caractéristique statique du panneau PV.....	36
Figure 1.3-3 La puissance produite par le PPV.....	36
Figure 1.3-4 Réponse en vitesse et en courant de la machine à courant continu.....	37
Figure 1.3-5 Réponse en courant et en tension du hacheur Cuk	37
Figure 1.3-2 Influence de la variation de la résistance série R_s	45
Figure 1.3-3 Influence de la variation de la résistance série R_p	45
Figure 1.3-4 Influence de la variation de la température.....	46
Figure 1.3-5 Les types d'ombrage.....	47
Figure 1.3-6 Ombrage homogène.....	47
Figure 1.3-7 Ombrage partiel	48
Figure 1.4-1 Défaut survenant au niveau Cuk.....	49
Figure 1.6-1 Défaillance de type "haute impédance" d'un transistor	49
Figure 1.7-1 Défaillance de type "basse impédance" d'un transistor.....	50
Figure 1.8-1 Défaillance de type "asymétrique croisé" ($u = 0$ ou $u = 1$)	50
Figure 1.8-2 Simulation de défaillance haute impédance.....	51
Figure 1.8-3 Simulation de défaillance basse impédance.....	51
Figure 1.9-1 Simulation de court-circuit au niveau du stator en cas de PID.....	55
Figure 1.2-1 Schéma des étapes du diagnostic des systèmes.....	60
Figure 1.2-2 Schéma représentant le processus FDI	60

Figure 1.3-1 Schéma représentant la redondance matérielle.....	61
Figure 1.3-2 Schéma représentant les différentes méthodes de diagnostic.....	62
Figure 1.3-3 Visualisation du retard dans la procédure FDI	63
Figure 1.4-1 Caractéristique statique et points critiques du modèle de Sandia	65
Figure 1.4-2 Comparaison des caractéristiques IV en cas d'ombrage.....	66
Figure 1.4-3 Comparaison des caractéristiques IV en cas de défauts au niveau de R_s et R_p	67
Figure 1.5-1 Erreur de l'estimation de l'observateur et sa réponse en courant.....	70
Figure 1.5-2 La réponse de l'observateur en tension.....	71
Figure 1.5-3 Test de robustesse de l'observateur.....	72
Figure 1.5-4 Le résidu en cas de défaut au niveau du Cuk.....	73
Figure 1.6-1 Réponse de l'observateur en courant avec régulation PID en cas de panne de court-circuit au niveau de l'inducteur	75
Figure 1.6-2 Réponse de l'observateur en vitesse avec régulation PID en cas de panne de court-circuit au niveau de l'inducteur.....	76
Figure 1.6-3 Réponse en vitesse de l'observateur de la machine DC en boucle ouverte avec défaut de court-circuit au niveau du stator.....	76
Figure 1.6-4 Réponse en courant de l'observateur de la machine DC en boucle ouverte avec défaut de court-circuit au niveau du stator.....	77
Figure 1.6-5 Graphe des résidus dans le cas de la panne de court-circuit au stator.....	78
Figure 1.3-1 La cellule reconfigurable et les interrupteurs de commande.....	86
Figure 1.3-2 Structure du module PV reconfigurable.....	87
Figure 1.3-3 Puissance électrique et caractéristique statique en cas d'ombrage partiel.....	87
Figure 1.3-4 Puissance électrique et caractéristique statique après isolation du modulé ombré	88
Figure 1.4-1 Hacheur Cuk et les interrupteurs d'isolation et de redondance.....	89
Figure 1.4-2 Commande de la FTC du hacheur	89
Figure 1.5-1 Courant et vitesse de la machine DC avec une variation paramétrique de 20%	90
Figure 1.5-2 Courant et vitesse de la machine DC en régulation cascade courant vitesse.....	91

Introduction Générale

Les applications de l'énergie solaire prennent de l'ampleur peu à peu à tel point qu'on fit appel à elle dans divers domaines.

Des installations Non Autonomes ou « grid-connected » produisant de l'électricité à grande échelle, avec de grandes installations PV industrielles ou domestiques rattachées au réseau de distribution électrique où le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public.

Des installations Autonomes ou « stand-alone », non connectées au réseau, mais qui doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps et l'autonomie du système en stockant l'énergie. On en trouve dans les alimentations domestiques des foyers en zones rurales ou isolées du réseau, moyen de loisir et tourisme (bateaux et voitures solaires), signalisation routière et ferroviaire, alimentation des systèmes de pompage pour l'irrigation, le breuvage, ou la consommation humaine. La plupart de ces installations concernent des consommateurs relativement modestes, leur puissance photovoltaïque installée varie entre quelques dizaines et quelques centaines de watts, et le stockage s'effectue généralement avec des batteries ou des réservoirs dans le cas du pompage.

La situation géographique dont jouit l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement des installations solaires. En effet, vu l'importante intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois [1], notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie via le solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées particulièrement dans les applications telles que le pompage photovoltaïque.

Cette dernière est assurément l'une des applications les plus prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Notamment, pour l'alimentation des foyers ou fermes en zones rurales ou isolés du réseau. D'où l'importance de l'étude d'un tel système en vue d'en assurer un bon fonctionnement en temps normal mais aussi lors d'éventuels défauts.

Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe. Il est donc, comme tout système comportant des éléments susceptibles de manifester des pannes, sujets à des défaillances peu prévisibles. Ceci, en plus de l'aspect autonome et isolé du système justifie l'intérêt de disposer d'un moyen de détection et de localisation des défauts qui y surgissent afin d'éviter davantage la détérioration en l'arrêtant à temps opportun ou à fin d'assurer la continuité du service en agissant sur certains paramètres.

L'objet de notre mémoire porte sur le diagnostic et la commande tolérante aux défauts d'une station de pompage photovoltaïque utilisée pour l'irrigation d'une zone isolée déconnectée du réseau électrique.

Pour ce faire, nous envisageons de construire une plateforme logicielle permettant d'étudier le comportement sain et défaillant de chaque composant de la chaîne seul et en interaction avec les autres composants. Grâce à une telle approche, il sera possible de tester plusieurs configurations en variant les types de composants (PV, Convertisseurs, machines ...) et leur niveau de puissances. Il va sans dire que dans la pratique il est impossible d'accéder « physiquement » à toutes les configurations/situations envisageables ; la plateforme logicielle constitue donc un moyen très utile permettant de mener une large étude pour caractériser le fonctionnement de la chaîne, déterminer les 'test points' ainsi que les signaux utiles mais surtout de pouvoir tester plusieurs techniques de commandes FTC.

Nous présentons dans le premier chapitre le système en entier, commençant par rappeler ce qu'est le pompage photovoltaïque puis par l'introduction de chaque compartiment accompagnée de sa modélisation mathématique ainsi que son modèle sous MATLAB/SIMILINK.

Dans le second chapitre, nous aborderons l'étude des défauts (éventuels) de la chaîne de pompage. Nous traiterons chaque entité à part et nous exposerons les défauts dont elle peut être sujette. Par la suite nous en choisirons quelques-uns pour construire le scénario de notre étude.

Un troisième chapitre est dédié aux méthodes de diagnostic et de localisation des défauts, ainsi qu'aux techniques de commande tolérante aux défauts en relation avec les compartiments du système.

Nous concluons avec les résultats et constats que nous avons tirés du travail élaboré, les difficultés rencontrées et enfin les perspectives et horizons que peut avoir sujet traité.

Description générale d'un système de pompage photovoltaïque

Chapitre 1 Description générale d'un système de pompage photovoltaïque

I.1 Introduction

Près de 0,6 % des ressources en eau douce se trouve sous forme d'eau souterraine, alors que seulement 0,014% se trouve à l'état d'eau de surface [2]. Ces ressources primordiales pour la survie de l'homme, doivent être ramenées en surface moyennant un système de pompage et une source fiable d'énergie.

Un système de pompage photovoltaïque est un ensemble de maillons dont chacun joue un rôle important dans le bon fonctionnement de la chaîne. Deux types de systèmes peuvent être utilisés : un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe ou un générateur PV couplé à une motopompe DC ou AC via un convertisseur. [1]

L'application faisant l'objet de notre étude est une chaîne de pompage photovoltaïque à base d'une machine à courant continu. Nous exposons dans ce chapitre la description de chaque entité, sa modélisation ainsi que son fonctionnement en état sain. Davantage d'informations sur les différents éléments seront jointes (si besoin) en annexe.

I.2 Description des compartiments

Dans une chaîne de pompage photovoltaïque, si la machine utilisée est continue, le PV sera couplé à travers un convertisseur continu-continu, le hacheur, piloté par des algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking). Si la machine est alternative, le générateur PV sera couplé à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT, qui à son tour, est couplé à un convertisseur continu-alternatif, l'onduleur.

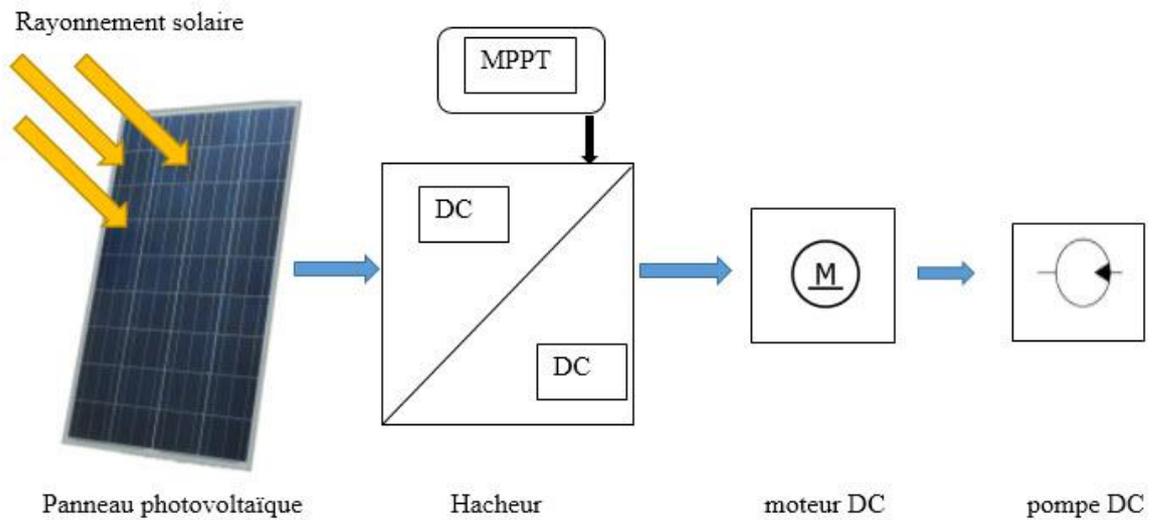


Figure I.2-1 Schéma de la chaîne de pompage photovoltaïque

I.2.1 Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est l'entité qui produit de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire sous forme de courant continu. L'unité élémentaire du générateur est la cellule photovoltaïque (ou photo-galvanique) qui permet de convertir la lumière du soleil en électricité, grâce à l'effet photoélectrique.

Silicium dopé

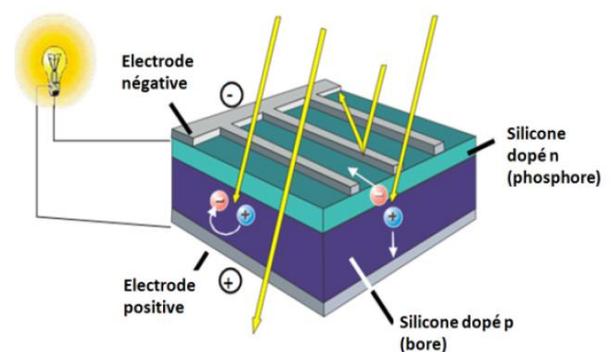
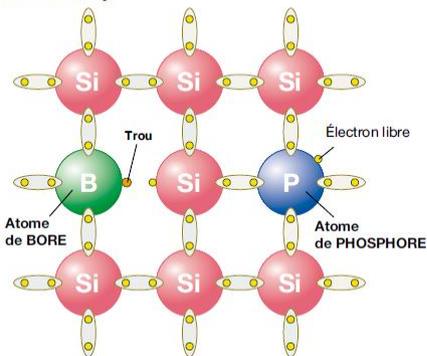


Figure I.2-2 Dopage des matériaux semi-conducteurs et effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques transformant directement la lumière solaire en électricité sont réalisées à base de matériaux semi-conducteurs, la tension générée par une cellule photovoltaïque est donc limitée à la valeur du gap du matériau dont elle est issue, soit 0.6 V pour les cellules de type cristallin et amorphe. Le courant en revanche, est fonction de la surface de la cellule mais

dépend aussi de son rendement. Le rendement des cellules monocristallines est de l'ordre de 15 à 22%, tandis que celui des cellules multi cristallines est de l'ordre de 10 à 15%. [3]

Les cellules sont regroupées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque (de 36 à 72 Cellules) délivrant la puissance finale désirée et reflétée par un courant et une tension caractérisant le point de fonctionnement du module.

Dans le but d'augmenter davantage la puissance, plusieurs modules sont raccordés en série pour constituer des rangées (strings) qui à leur tour, rassemblées en parallèle, forment un champ ou un générateur PV.

En plus des protections mécaniques (châssis en aluminium, encapsulage en verre ...) contre les

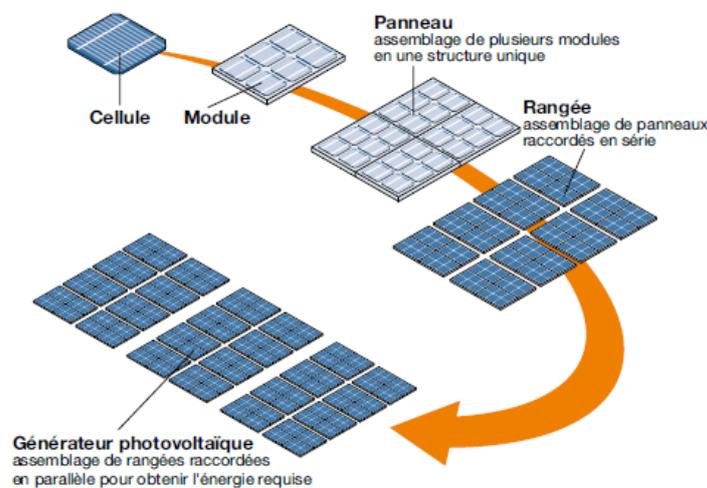


Figure I.2-3 Constitution d'un générateur photovoltaïque

conditions météorologiques, des diodes bypass et des diodes anti-retour sont utilisées pour protéger les groupes de cellules et modules contre les effets de dissipation et les courants inverses causés entre autre par la dissymétrie des éléments et l'ombrage.

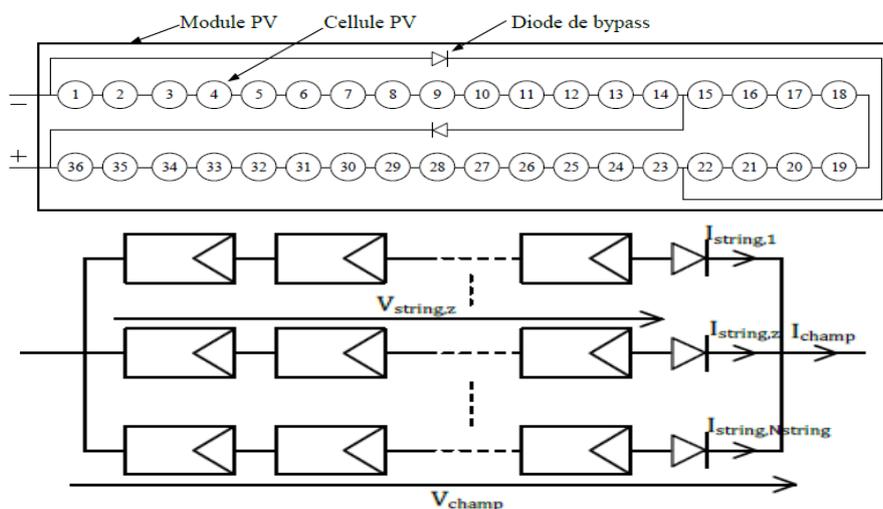


Figure I.2-4 Placement des diodes bypass et anti-retour

1.1.1.1 Caractéristiques d'un PV

La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).

La caractéristique $I=f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide, V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ". Elle est égale à 0.6 V pour la cellule cristalline

Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée, il est proportionnel à la surface qui reçoit le rayonnement et de l'intensité de ce dernier.

Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$: Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m * I_m$

Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$

1.1.1.2 Les modes de fonctionnement de la cellule PV

Sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque on peut distinguer trois modes de fonctionnement

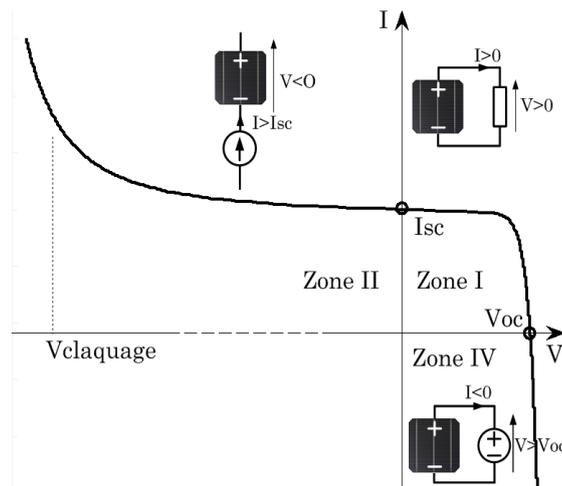


Figure I.2-5 Les modes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.1.2.1 Zone une :

Fonctionnement générateur avec un $0 \leq I \leq I_{cc}$ et $0 \leq V \leq V_{oc}$, c'est le fonctionnement normal et permet d'alimenter une charge.

1.1.2.2 Zone deux :

Fonctionnement récepteur avec un $I_{cc} \leq I$ et $V \leq 0$. Le croisement de l'intensité provoquera l'endommagement de la cellule si la tension aux bornes de la cellule atteint la valeur limite de claquage.

1.1.2.3 Zone trois :

Un autre mode de fonctionnement en récepteur mais avec $I \leq 0$ et $V_{oc} \leq V$. Lorsque la tension est forcée à dépasser sa borne de court-circuit, un courant inverse circule dans la cellule, si ce courant inverse dépasse une certaine valeur limite, la cellule est irréversiblement endommagée. Ce seuil dépend de plusieurs facteurs : la technologie et les phénomènes dans la cellule.

1.1.1.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque

1.1.3.1 Modèle à une seule diode

Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, celui à une seule diode est communément utilisé grâce à sa simplicité et également la précision requise pour la majorité d'applications comme le dimensionnement d'une chaîne photovoltaïque. Il permet de représenter l'éclairement et la conversion PV par une source de courant parfaite qui délivre un courant constant I_{ph} , une diode qui reprend le comportement de la cellule PV, une résistance parallèle R_{sh} qui représente les différents courants de fuite et une résistance connectée en série R_s qui modélise les pertes dans les pistes connectiques, les câbles et les contacts.

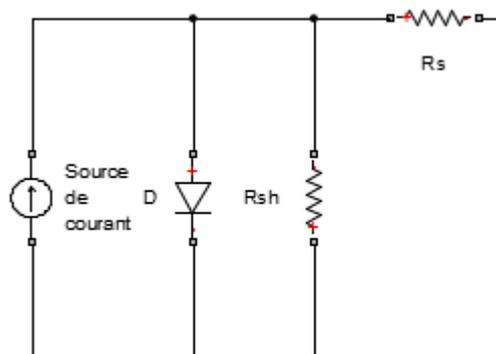


Figure I.2-6 Modèle d'une cellule PV à une seule diode

I_{cell}	Le courant en sortie [A]
I_{ph}	Photo-courant [A]
I_0	Courant d'obscurité de la diode [A]
R_{se}	La résistance série [Ω]
R_{sh}	La résistance parallèle [Ω]
K	Constante de Boltzmann [1.38046×10^{-23} J/K]
Q	Charge d'un électron [1.602×10^{-19} C]
T	Température [K]
n	Coefficient d'idéalité de la diode

L'expression du courant est donnée alors par l'équation

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q}{n \cdot A \cdot K T} (V_{cell} + R_{se} \cdot I_{cell})} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_{se} \cdot I_{cell}}{R_{sh}} \quad I.2-1$$

1.1.3.2 Modèle de Bishop

En plus de celui à une seule, il y a le modèle à double diode reproduisant fidèlement l'allure de la zone non-linéaire pour mieux représenter le mode de fonctionnement '**générateur**' de la cellule PV. Cependant, ils ne prennent pas en compte l'effet d'avalanche de la cellule. Ainsi, l'étude du champ photovoltaïque en mode défaillant nécessite un modèle qui peut décrire les phénomènes et reproduire la totalité de la caractéristique dans tous les modes possibles. La mise au point du multiplicateur non linéaire $M(V)$ en série avec la résistance parallèle comme le montre la figure ci-dessous permet de prendre en considération l'effet d'avalanche de la cellule PV. Ce multiplicateur est modélisé par le dernier terme dans l'équation du courant électrique.

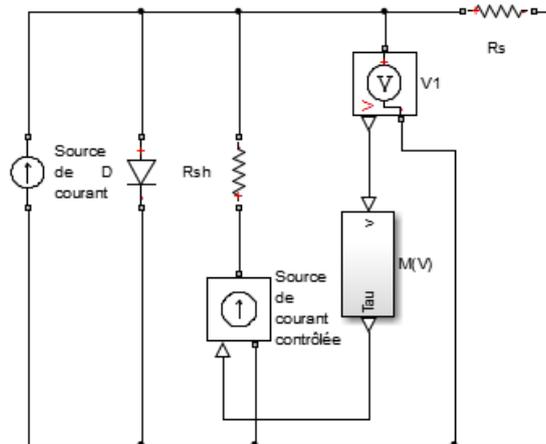


Figure I.2-7 Modèle de Bishop d'une cellule PV

I_{ph}	Courant équivalent de la cellule
I_0	Courant de saturation de la diode
$V_t = \frac{a.kb.Tc}{q}$	Tension thermique de la diode
k	Coefficient de réglage de Bishop (3.4-4)
n	Coefficient de réglage de Bishop ~ 0.1
V_b	Tension de claquage de la cellule (-10V à -30V)

Ainsi le courant est régi par l'équation suivante

$$I = I_{cc} - I_0 \times \left(e^{\frac{q}{n.K.T} \left(\frac{V+R_s.I}{V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s.I}{R_{sh}} \right) \left(1 + k \times \left(1 - \frac{V + R_s.I}{V_b} \right)^{(-m)} \right) \quad \text{I.2-2}$$

1.1.1.4 Modèle équivalent d'un module photovoltaïque

Pour obtenir le modèle équivalent à un module, les résistances série et parallèle du modèle de la cellule prennent les valeurs suivantes :

$$\mathbf{R_{she} = N.R_{sh}} \quad \text{I.2-3}$$

Et $\mathbf{R_{se} = N.R_s}$ I.2-4

De la même manière, le facteur de qualité de la diode équivalente est déduit de la relation :

$$\mathbf{N_e = N.n} \quad \text{I.2-5}$$

Pour un panneau électrique composé de N_s cellules en série et N_p modules en parallèle, le courant débité dans le circuit générateur est déterminé par la formule qui suit :

$$\mathbf{I_{cell} = N_p.I_{ph} - N_p.I_0 \cdot \left(e^{\frac{q}{n.A.K.T.N_s} (V_{cell} + R_{se}.I_{cell})} - 1 \right) - N_p \cdot \frac{V_{cell} + R_{se}.I_{cell}}{R_{sh}}} \quad \text{I.2-6}$$

Où R_{se} et R_{pe} sont les résistances équivalentes du module et sont définies par :

$$\mathbf{R_{se} = n \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s} \quad \text{I.2-7}$$

Et $\mathbf{R_{she} = n \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sh}}$ I.2-8

Ainsi la caractéristique statique du panneau photovoltaïque étudié est la suivante

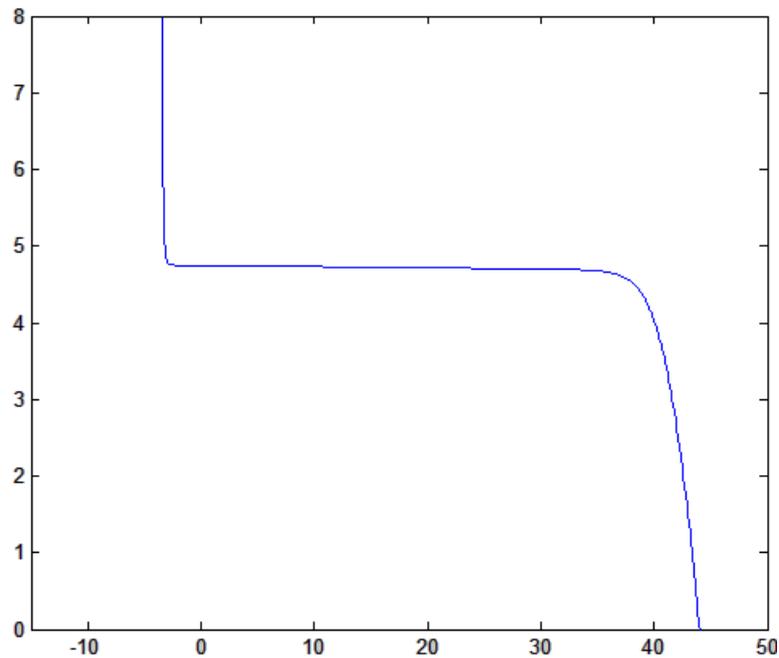


Figure I.2-8 Caractéristique I V de notre panneau photovoltaïquebp_sx150s

1.1.1.5 Avantages et désavantages d'une installation PV

1.1.5.1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.1.5.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

1.1.2 Le convertisseur

Le compartiment du convertisseur se compose de deux éléments essentiels : le hacheur ou éventuellement l'onduleur et le hacheur. Ce dernier est un composant électrique et a pour rôle d'assurer l'extraction du maximum de la puissance MPPT dans la partie continue par le biais de l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracker). En d'autres termes, afin de maximiser le rendement de l'installation (le point de fonctionnement correspond toujours au maximum) on adapte le générateur à la charge en calculant les paires courant-tension propices. Le maximum de la puissance correspond au point de tangence entre la courbe $I \cdot V = \text{constante}$ et la caractéristique (I, V) s'étendant entre la tension V_{oc} (circuit-ouvert) et le courant CC (court-circuit).

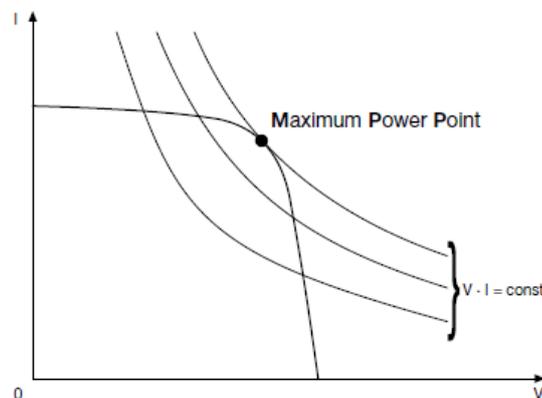


Figure I.2-9 Principe de fonctionnement du MPPT

Il existe différents algorithmes MPPT, ces derniers se différencient entre eux en terme de :

- Vitesse de convergence de l'algorithme
- Capacité de trouver le vrai MPPT
- Grandeurs et données requises
- Implémentation

1.1.2.1 Incremental inductance

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI . Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [4].

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V.I \quad \text{I.2-9}$$

La dérivée partielle $\frac{dP}{dV}$ donnerait :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= I + V \cdot \frac{dI}{dV} \\ \frac{1}{V} \frac{dP}{dV} &= \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \end{aligned} \quad \text{I.2-10}$$

On définit la conductance $G = \frac{I}{V}$ de la source et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

Etant donné que la tension V du panneau est toujours positive, les relations qui suivent expliquent que le point de puissance maximale MPP est atteint à condition que la conductance de la source G soit égale à l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe négatif, et qu'elle soit à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG et vice-versa:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{cases} \quad \text{I.2-11}$$

Les tensions et courants du panneau sont récupérés, ainsi nous pourrions calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. L'algorithme est repris en diagramme en annexe et nous pouvons remarquer qu'il implique un bon nombre de calculs de dérivées.

1.1.2.2 Perturb& Observe

Comme son nom l'indique, la méthode P&O « perturbation et d'observation » agit par la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. C'est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de la tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et de la température et possède un rendement d'environ 85%. [4].

Le principe de l'algorithme est le suivant :

A chaque cycle, nous calculons $P_{pv}(k)$ à partir des mesures faites de $V_{pv}(k)$ et $I_{pv}(k)$, la valeur de $P_{pv}(k)$ est ensuite comparée à celle calculée au cycle précédent $P_{pv}(k-1)$.

Si la puissance a augmenté, la tension serait variée dans le même sens que le cycle précédent, sinon elle devrait être variée dans le sens inverse.

Nous dirons alors que la tension est perturbée suite à cette justification à chaque cycle du MPPT. Une fois le point de puissance maximale atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Causant évidemment une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentement de la perturbation.

Plus le pas d'incrémentement est large, plus l'algorithme du MPPT répond rapidement aux variations soudaines des conditions de fonctionnement.

En revanche si le pas est petit, ces pertes diminueront mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements climatiques rapides, à savoir les variations en température ou en éclairement. Le pas adéquat est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [4].

1.1.3 L'onduleur

L'onduleur, assure à son tour la conversion de l'énergie électrique continue générée par le PV et adaptée par le hacheur, en énergie électrique alternative. Les transistors de l'onduleur constituent des commutateurs statiques commandés par des signaux pour l'ondulation du courant. La technique la plus sophistiquée et généralement la plus utilisée est la MLI (modulation de largeur d'impulsion) ; elle permet une meilleure allure sinusoïdale et la régulation de la fréquence.

Dans les installations PV autonomes, les onduleurs doivent assurer une tension AC constante malgré la variation de la production de l'énergie au niveau du PV. Cependant, dans les installations raccordées au réseau électrique, ils doivent fournir à leur sortie un signal de tension fidèle à la tension du réseau en termes d'amplitude et de fréquence.

1.1.3.1 Configurations

Les différentes architectures d'installations PV dépendent du raccordement des strings qui forment les champs solaires de l'installation

- Un onduleur pour toute l'installation, onduleur central
- Un seul onduleur pour un seul string
- Un onduleur pour plusieurs strings

1.3.1.1 Topologie à onduleur central :

Cette architecture est la plus répandue et se constitue d'un seul convertisseur (un seul hacheur et un seul onduleur) opérant entre le générateur et le réseau électrique. Cette architecture présente des avantages économiques comme un coût réduit, simplicité d'entretien et de surveillance. Cependant, la défaillance du convertisseur entraîne l'arrêt de toute l'installation. De plus, l'onduleur est régulé par le MPPT en tenant compte des paramètres moyens de tous les strings, par conséquent, l'ombrage ou les défaillances partielles des strings entraînent une réduction accrue des performances par rapport aux autres configurations.

1.3.1.2 Onduleur à string :

Dans les installations de taille moyenne, chaque string est raccordé à un hacheur et un onduleur, ce qui lui permet de fonctionner selon son propre MPPT. La présence de cette configuration pallie le problème de couplage entre les modules et les onduleurs et limite ceux liés à un problème d'ombrage partiel qui provoque la réduction de performance de l'installation.

Cependant, le coût total de l'installation augmente et le rendement diminue lorsque la source d'énergie est diffuse. Les fusibles ou des disjoncteurs thermodynamiques et les diodes sont des dispositifs de protection contre les surtensions et les courants inverses respectivement. Dans cette architecture, le diagnostic est réalisé par un système de supervision qui vérifie la production de chaque string.

1.3.1.3 Configuration onduleur et multi-strings :

Dans les grandes installations, le champ PV est divisé en plusieurs parties (sous-champs) dont chacune se raccorde à un seul onduleur auquel différents strings sont connectés en parallèle. Cette architecture assure une grande performance et réduit les coûts d'investissements et d'entretien. Elle limite aussi les effets d'ombrage partiel et des défaillances des strings.

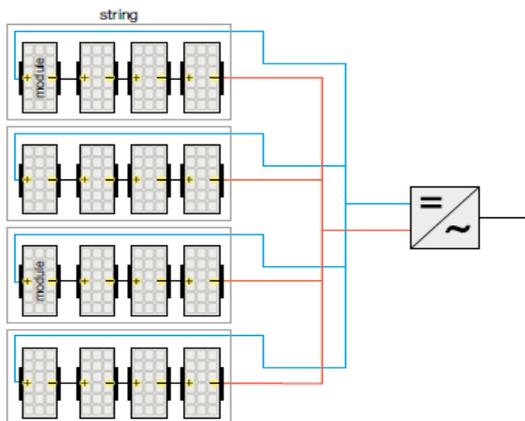


Figure I.2-10 Topologie à onduleur central

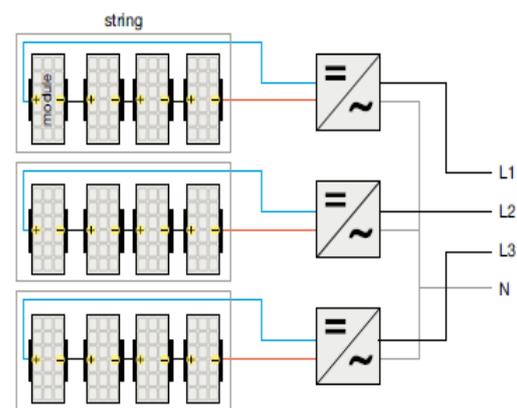


Figure I.2-11 Onduleur à string

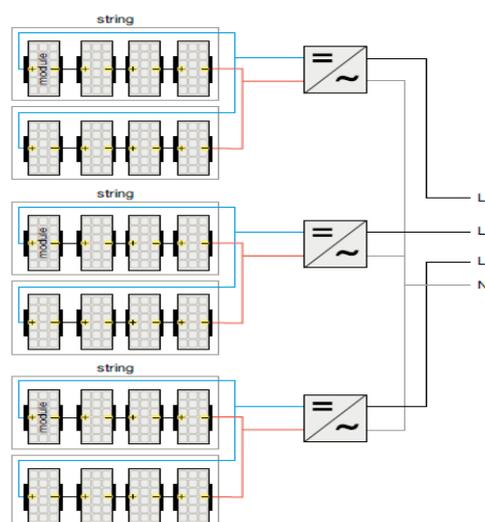


Figure I.2-12 Configuration onduleur multi-string

1.1.4 Choix du convertisseur

L'application qui fait l'objet de notre étude, exploite une machine à courant continu. Nul besoin donc d'un onduleur, mais seulement d'un hacheur [5]

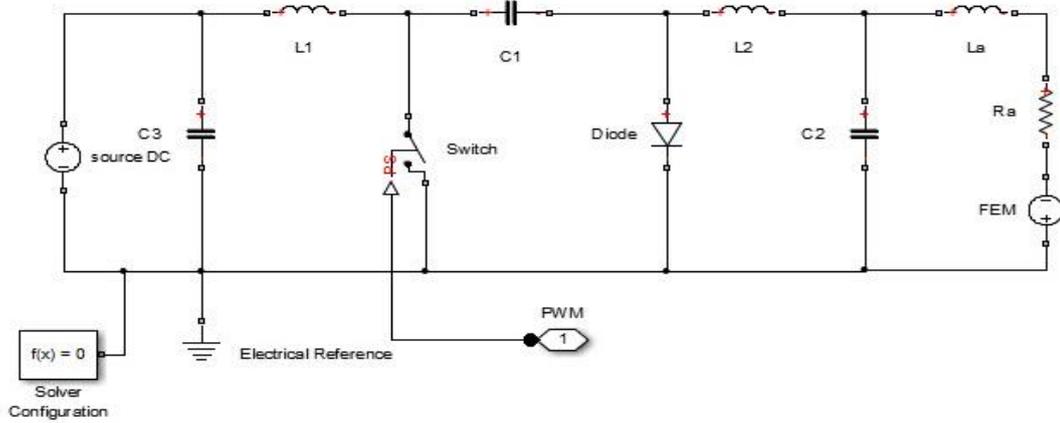


Figure I.2-13 Le schéma électrique du Cuk sous Simscape

Lors de l'intervalle de conduction, à savoir $0 < t < dT$ et le switch fermé « on »	Mais lorsque le switch s'ouvre « off » les équations deviennent :
$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} \cdot (E) \\ \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot (-i_2) \\ \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} \cdot (-v_s + v_{C2}) \\ \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot (i_{L2} - \frac{v_{C2}}{v_s}) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} \cdot (E - v_s) \\ \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot (i_{L1}) \\ \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} \cdot (-v_s) \\ \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot (i_{L2} - \frac{v_{C2}}{R}) \end{array} \right.$

Tableau 1 Modélisation mathématique du Cuk [6]

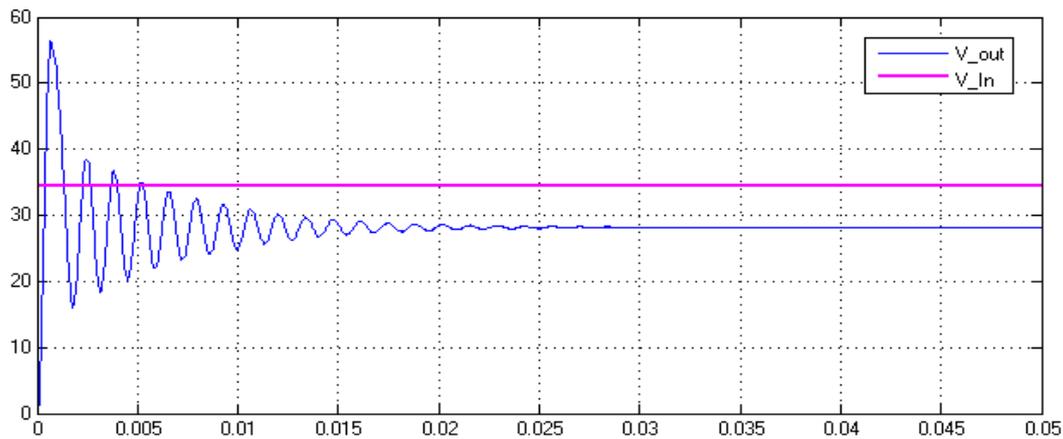


Figure I.2-14 Tensions d'entrée et de sortie du Cuk

I.2.2 Choix de la Machine

Afin d'entraîner la pompe, un moteur doit être mis en place pour lui fournir l'énergie mécanique nécessaire. Trois types de moteurs sont généralement utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïques : les moteurs à courant continu, les moteurs DC sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnet DC motors) et les moteurs à courant alternatif (asynchrone). Les critères à l'aune desquels on établit le choix du moteur le plus adéquat sont :

- Un bon rendement
- Souplesse de fonctionnement
- Robustesse et coût d'entretien et réparation
- Fiabilité et autonomie
- Faible puissance de démarrage (un courant de démarrage qui ne dépasse pas les $4 \cdot I$ nominal)

Moteur	Avantages	Désavantages
Asynchrone	<p>Disponible pour une large plage de charge avec un faible coût d'achat</p> <p>Entretien quasiment nul étant donné qu'il ne comporte pas de pièces de frottement</p>	<p>Nécessité d'utiliser un onduleur solaire, ce qui engendre un coût supplémentaire</p> <p>Chute de rendement en faibles puissances</p>

	<p>Son choix augmente l'autonomie de la chaîne</p> <p>Rapport puissance / poids est élevé</p>	<p>Un courant de démarrage élevé, voire 5*courant nominal</p>
CC	<p>Simplicité de commande et régulation (vitesse et couple moteur)</p> <p>Il est directement lié au générateur (pas besoin d'un onduleur)</p> <p>Son rendement est élevé pour les faibles charges</p>	<p>Comporte un balais et un collecteur qui il faut vérifier périodiquement</p> <p>Il est plus coûteux et plus lourd</p>
Brushless	<p>Rendement élevé pour une large plage de vitesse</p> <p>Il est directement connecté au générateur photovoltaïque</p> <p>Ne nécessite pas fréquemment la maintenance et a une bonne fiabilité</p>	<p>Nécessite un système de commutation et donc son coût est relativement élevé</p>

Tableau 2 Récapitulation des avantages et désavantages de chaque type de moteur

La machine à courant continu a été longtemps le type d'entraînement le plus utilisé pour les applications à vitesse variable grâce principalement à la simplicité de sa commande, ce qui a une incidence directe sur le niveau des performances, que ce soit en termes d'asservissement ou en termes économiques. Pour une puissance allant de 500 [W] à 50 [kW], la machine DC est désormais fortement concurrencée et souvent remplacée par des entraînements AC sans balais, de types synchrones auto-commutés ou asynchrones. Néanmoins, l'étude de la commande des servo-entraînements DC garde tout son intérêt car il est très facile de commander en couple un tel entraînement ce qui influence directement les performances obtenues.

1.4.1.1 Modélisation mathématique

Le moteur DC à collecteur est constitué d'un stator ou inducteur muni d'un circuit électrique ou d'un aimant permanent qui crée un flux magnétique d'excitation Φ_f dans lequel sera plongé le rotor ou l'induit. Le schéma technologique d'un entraînement DC à excitation séparée est représenté sur la figure suivante

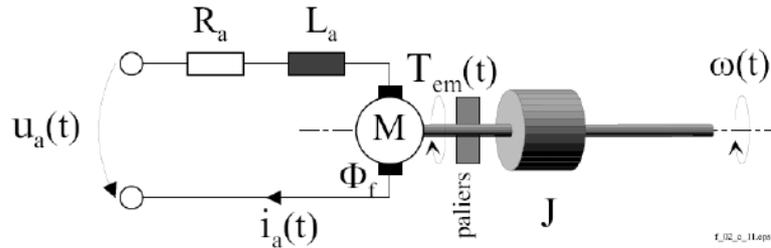


Figure I.2-15 Schéma électrique d'une machine à courant continu

Les signaux intervenants
<ul style="list-style-type: none"> - la tension aux bornes de l'induit $U_a(t)$ - le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître : la résistance et l'inductance de l'induit R_a, L_a ; - la Force Electromotrice $e_m(t)$ proportionnelle à la vitesse angulaire $\omega(t)$; - le courant traversant le circuit d'induit $i_a(t)$; - le couple électromagnétique instantané $T_{em}(t)$ produit ; - l'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation Φ_f ; - la charge mécanique : inertie J, frottement visqueux, élasticité de la transmission, ...etc)
la vitesse $\omega(t)$ du rotor du moteur.

Tableau 3 Signaux intervenants dans le fonctionnement d'une machine DC

1.1.4.2 L'usure du MCC

La transmission de la puissance $P_a(t) = U_a(t) \cdot I_a(t)$, doit en effet s'effectuer en faisant passer le courant d'induit $I_a(t)$ de la partie fixe à la partie mobile au moyen d'un dispositif mécanique relativement complexe, le collecteur. Celui-ci est constitué de balais solidaires du stator et néanmoins en contact mécanique par frottement avec la partie mobile afin de conduire le courant électrique $I_a(t)$ entre le stator et le rotor. L'usure en résultant fait que les balais doivent être plus ou moins fréquemment remplacés, selon les conditions de travail du moteur. Cette même usure entraîne l'apparition de poussières et dégrade le contact électrique, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance du circuit d'induit, un échauffement supplémentaire voire des arcs électriques. En effet, les microcoupures du contact électrique peuvent provoquer des chutes de tension inductive $L_a \frac{dI_a}{dt}$ importantes, sachant que $I_a(t)$ est typiquement un courant constant.

1.4.2.1 Equations caractéristiques

Prenant en compte la résistance R_a et l'inductance L_a du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension de l'induite s'écrit :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e_m(t) \quad \text{I.2-12}$$

La tension induite $e_m(t)$, est proportionnelle à la vitesse angulaire $\omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_f(t)$ suivant une constante k dépendant de la construction de la machine.

$$e_m(t) = k \cdot \phi_f(t) \cdot \omega(t) \quad \text{I.2-13}$$

La première équation montre que $e_m(t)$ s'oppose à $u_a(t)$, ceci est du fait que le moteur réagit en créant une FEM $e_m(t)$ tendant à équilibrer $u_a(t)$.

Le couple électromagnétique $T_{em}(t)$ développé est proportionnel au courant d'induit $i_a(t)$ et a pour expression

$$T_{em}(t) = k \cdot \phi_f(t) \cdot i_a(t) \quad \text{I.2-14}$$

Les trois équations ci-dessus, complétées par l'équation de la dynamique,

$$J_t \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - R_{jt} \cdot \omega(t) - T_{res} \quad \text{I.2-15}$$

Où J_t est l'inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_{ch}), décrit complètement le comportement dynamique de la machine DC. Aucun des signaux n'est supposé constant, ce qui permettra l'étude du régime transitoire.

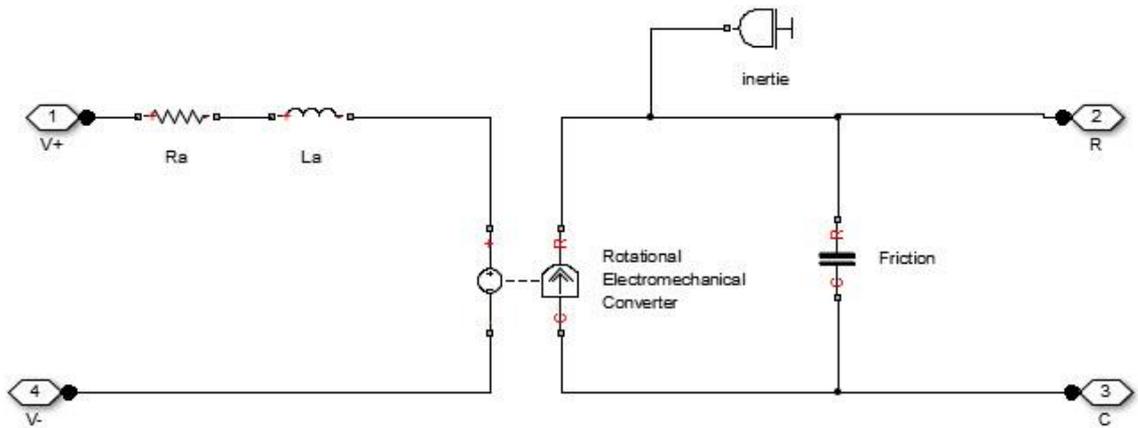


Figure I.2-16 Schéma de la machine DC sous Simscape

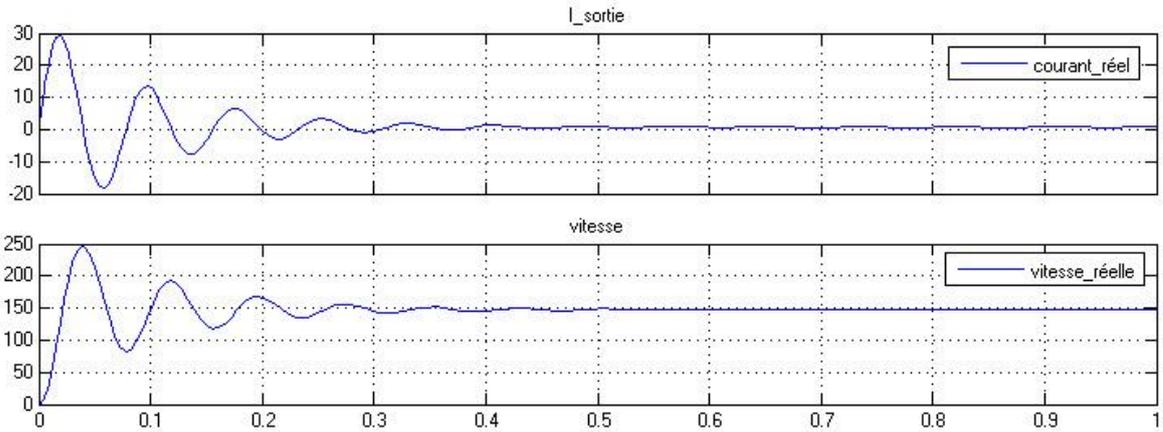


Figure I.2-17 Réponse en courant et en vitesse de la MCC en BO

1.1.5 Pompe, batterie et réservoir

Une pompe solaire opère principalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. La batterie est utilisée pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïques, ce qui permet de s'affranchir des aléas de l'éclairement du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe, mais aussi d'assurer un service à la demande. En l'absence de batterie, la « pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Néanmoins, l'utilisation de batteries requiert davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système de notre application, qui, rappelons-le, vise une certaine classe d'utilisateurs à moyens financiers réduits. D'une part, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. De plus, elles nécessitent un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Mais aussi, les contrôleurs

utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries peuvent s'avérer non fiables de par leur vieillissement. Et enfin, un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie peut être introduit par ces batteries.

Le pompage au fil du soleil permet en revanche d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux que celui avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau est pompée dans un réservoir au-dessus du sol lors d'un assez bon ensoleillement. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut être construit localement et sa capacité de stockage varie d'un à plusieurs jours selon le besoin de l'agriculteur. Pour finir, ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

1.1.5.1 Classification des pompes

Pour notre application d'irrigation, plusieurs types peuvent être mis en œuvre dans les systèmes de pompage photovoltaïque. On distingue parmi ses types de pompes, les turbos-pompes où l'énergie cinétique est transmise non uniformément au liquide via le rotor (pompes centrifuges, pompe à hélice, pompe hélico-centrifuges) et les pompes volumétriques dont l'écoulement du liquide qui la traverse est proportionnel au déplacement d'un organe mobile du corps de la pompe (**pompes alternatives, pompes rotatives**)

Pompe Centrifuge	
Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteuse et donc plus accessible à l'agriculteur • Simple de conception du fait qu'il n'y ait que le rotor comme seule pièce en mouvement • Entretien à coût réduit • D'une large flexibilité d'utilisation et réduction d'encombrement • Le débit est automatiquement ajusté à la pression 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la viscosité, ce qui entraîne une diminution du débit du fluide. Cependant, étant donné que l'application est dédiée au pompage d'eau, il n'aurait probablement aucun dépassement de limite de viscosité. • Débit légèrement variable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler ce dernier.

<ul style="list-style-type: none"> • Un large jeu permettant de ce fait, une facilité de manipuler les liquides contenant des solides en suspension • L'absence de risques suite à la limitation de la puissance absorbée • Garde de bonnes performances en cas d'usures car la corrosion influe peu ses caractéristiques 	
--	--

Tableau 4 Avantages et désavantages d'une pompe centrifuge

1.2 Modélisation et simulation de la chaine

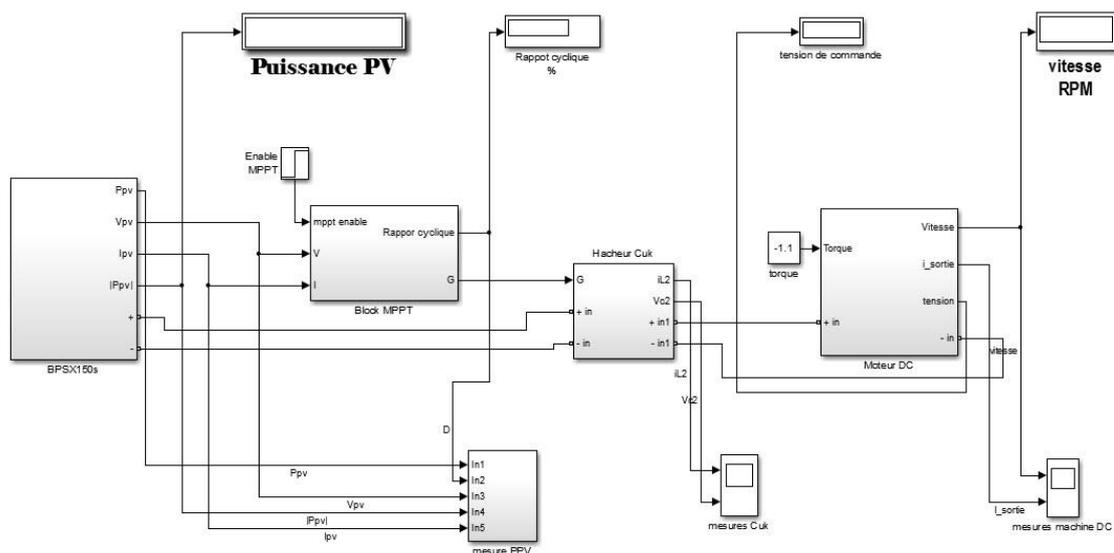


Figure 1.2-1 Chaîne complète du système de pompage photovoltaïque sous Simscape de Matlab

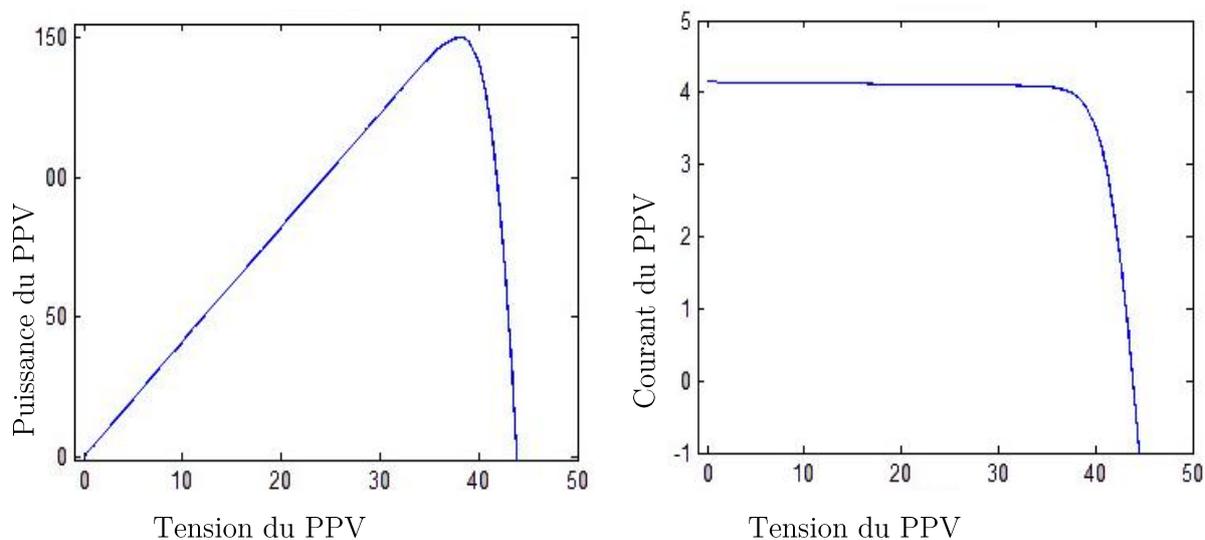


Figure 1.2-2 Courbe de puissance et caractéristique du PPV

Les résultats de la simulation en mode sain furent comme suit

Nous remarquons que le panneau photovoltaïque a un maximum de puissance de 150 Watt et qu'il la délivre en entrée du hacheur après un laps de temps d'environ 0.01s.

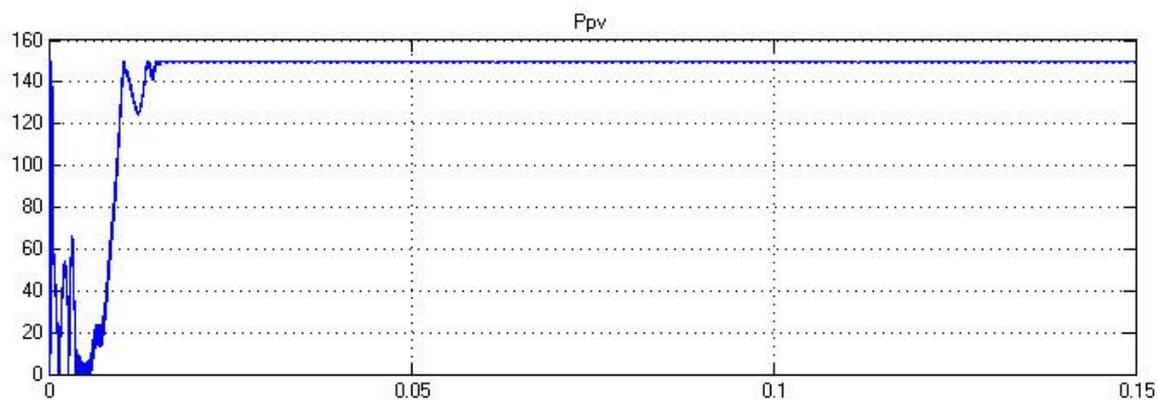
Figure 1.2-3 Le graphe $P=f(V)$ et la caractéristique statique du panneau PV

Figure 1.2-4 La puissance produite par le PPV

Nous constatons lors de ce deuxième point de mesure, la sortie du hacheur, qu'une tension de 28 Volt est produite à partir d'une tension de 34.5 Volt délivrée par le panneau photovoltaïque. En effet, au point de maximum de puissance le PPV a une tension de 34.5 V et un courant de 4.75 A (voir caractéristiques du PPV bp_sx150sen annexe)

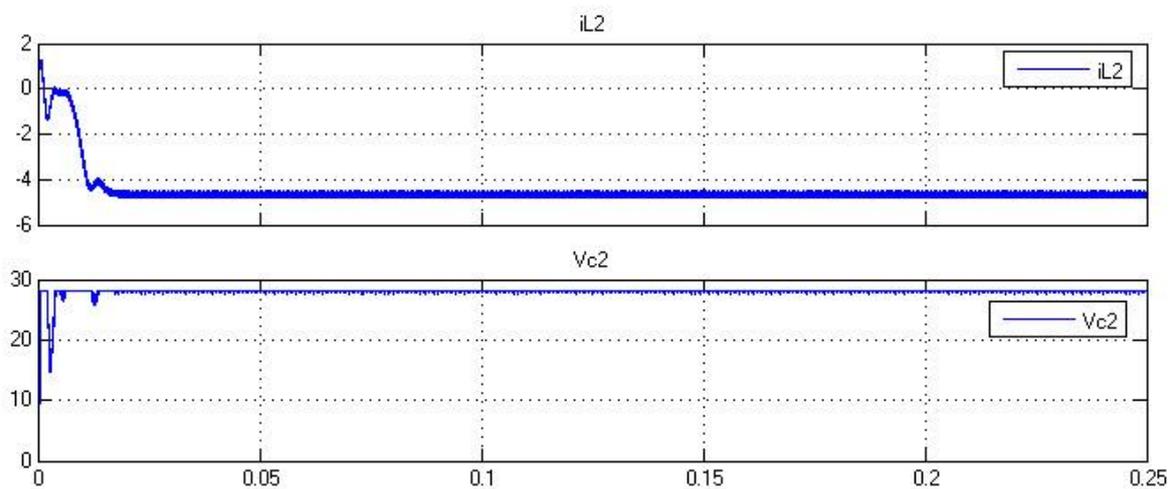


Figure 1.2-6 Réponse en courant et en tension du hacheur Cuk

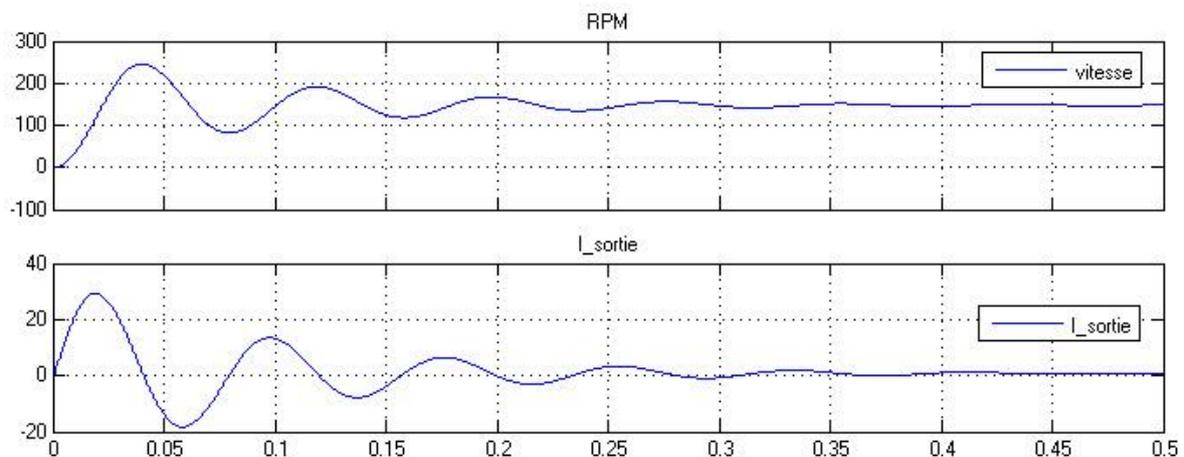


Figure 1.2-5 Réponse en vitesse et en courant de la machine à courant continu

En sortie du système, nous rencontrons les réponses de la machine en vitesse et en courant. Ces dernières sont régies par des équations du second ordre ce qui explique ces allures de réponses.

En régime permanent, la vitesse se stabilise à 157 rad/s l'équivalent de 1500tr/min.

De ces faits, nous pouvons donc valider notre modèle de chaîne en mode sain.

1.3 Conclusion

Nous venons d'exposer dans ce premier chapitre une description des différents compartiments d'une chaîne de pompage photovoltaïque connectée à une machine à courant continu. Nous avons abordé notamment la modélisation analytique et sous Matlab de chaque entité, son mode de fonctionnement et sa commande s'il y a lieu d'un contrôle.

Ceci permet la connaissance de la dynamique du système en entier en mode sain qui s'avère d'une grande nécessité lors de l'introduction des défauts car c'est le premier maillon d'un processus de diagnostic.

En effet, nous avons réalisé la première plateforme d'une station de pompage photovoltaïque sous *Simscape* de Matlab qui serait le socle des futurs travaux dédiés au diagnostic et commande tolérante aux défauts grâce sa flexibilité et son effigie au système réel.

Défauts de la chaîne de pompage photovoltaïque

Chapitre 2 Défauts de la chaîne de pompage photovoltaïque

2.1 Introduction

Un système de pompage photovoltaïque est composé de plusieurs entités : le générateur photovoltaïque, un convertisseur Cuk et une machine à courant continu, la combinaison de ces organes est destinée à fournir la puissance qu'il faut pour entraîner la pompe.

Cependant, ces éléments sont sujets à des défauts qui peuvent altérer le bon fonctionnement de la chaîne, voire même la détériorer. D'où l'intérêt de la connaissance de la nature de ces défauts, leur répercussion sur le rendement ainsi que le comportement de chaque entité et enfin leur diffusion tout au long de l'installation.

Pour ce faire, nous établirons lors de ce chapitre une base de connaissances qui pourra servir de répertoire tablant la manière dont se manifestent ces différents défauts au niveau de leurs compartiments respectifs ainsi que leur propagation dans la chaîne entière.

Ce genre de travaux rentre dans le cadre des banques de données d'apprentissage qui sont d'une efficacité éminente lors de la reconnaissance des pannes [7], parfois même lorsque des défauts ne sont pas répertoriés peuvent être déduits ou extraits des résultats déjà obtenus.

2.2 Classification des défauts

On peut classifier les défauts selon les parties affectées dans la chaîne du système [8] :

- **Défaut capteur** : se manifeste par une fausse projection des grandeurs physiques à mesurer. On peut y remédier à ce défaut via la redondance matérielle qui sert à augmenter la tolérance aux défauts du système d'acquisition d'informations. Cependant, les coûts supplémentaires occasionnés remettent souvent en cause la mise au point de cette solution.
- **Défaut actionneur** : ce type de défauts altère le signal d'entrée du système, il peut provoquer la perte totale ou partielle de ce dernier. On peut citer maints exemples comme les fuites hydrauliques ou la défaillance d'un interrupteur de commande d'un onduleur.
- **Défaut système (composants internes)** : c'est un défaut qui atteint les composants internes constituant le système. En d'autres termes, ils représentent les variations paramétriques et donc introduisent la modification de la dynamique. On peut regrouper ces défauts sous deux catégories : des défauts additifs qui influent sur la moyenne du signal de sortie et les défauts multiplicatifs qui influent sur la variance et les corrélations du système de sortie.

Par ailleurs, on peut aussi procéder à une classification suivant la caractéristique temporelle :

- **Défaut abrupt** : se traduit par l'arrêt total ou partiel de l'élément et provoque une discontinuité de l'évolution de la variable temporelle.
- **Intermittent** : caractérise les défauts de faux contacts. On peut le définir comme un cas particulier des défauts abrupts qui varient aléatoirement.
- **Graduel ou progressif** : c'est un défaut difficile du fait qu'il agit de la même manière que les changements paramétriques lents. Un exemple caractérisant cette catégorie est l'usure du dispositif.

2.3 Défauts et anomalies d'un champ PV :

2.3.1 Classification des défauts du système PV

2.3.1.1 Les défauts du générateur PV:

- Ombrage: causé par les feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige...etc.
- Détérioration des cellules à cause des fissures et de l'échauffement.
- Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions et corrosion des liaisons entre les cellules.

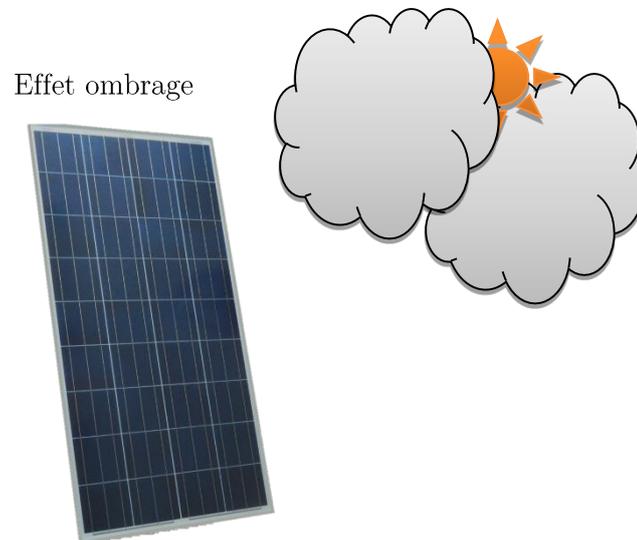


Figure 2.3-1 Effet ombrage sur un panneau PV

Ces trois premiers défauts font partie des défauts mismatch, qui consistent en une variation dans la caractéristique I-V d'un groupement de cellules.

Ainsi par exemple l'ombrage cause la réduction d'ensoleillement reçu par certaines cellules.

Défauts au niveau des modules :

- Performances différentes
- Modules arrachés ou cassés
- Modules court-circuités ou modules inversés

Afin d'adapter la puissance des cellules aux applications, il est impératif de les associer en modules. De plus, leur fragilité impose leur encapsulation.

Généralement la connexion se fait en série pour imposer le même courant et une tension multipliée au nombre de cellules, cet agencement est avantageux et permet d'amplifier la puissance du générateur PV.

2.3.1.2 Les défauts des câblages et connecteur:

Le câblage :

La mise en série de plusieurs modules pour constituer un string est assurée par des câbles. Pour minimiser les risques de défaut à la terre ou de court-circuit après l'installation, il est recommandé d'utiliser des câbles à simple conducteur avec double isolation.

Les connecteurs :

Des connecteurs débrochables peuvent être utilisés pour simplifier la procédure d'installation. Ces connecteurs renforcent la protection contre les risques de choc électrique.

- Circuit-ouvert
- Court-circuit
- Mauvais câblage (module inversé)
- Corrosion des contacts
- Rupture du circuit électrique

2.3.1.3 Les défauts de la boîte de jonction:

Le système PV est constitué de plusieurs strings et c'est la boîte de jonction qui permet leur mise en parallèle. Elle peut contenir des éléments de protection tels que des fusibles, des interrupteurs et des sectionneurs. Les défauts qui puissent y apparaître sont :

- Rupture du circuit électrique
- Court-circuit
- Destruction de la liaison
- Corrosion des connexions

2.3.1.4 Les défauts des diodes de protection:

Se rapportant avec la diode bypass et la diode anti-retour dont l'utilité et le rôle furent expliqués en chapitre I, on énumère les défauts suivants :

- Destruction des diodes
- Absence ou non fonctionnement de diodes
- Inversion de la polarité des diodes au montage, diode mal connectée

Compartiment du défaut	Dénomination du défaut	Caractéristiques
Cellule	Défaut mismatch et ombrage	Module déconnecté ou cassé et fissure. Echauffement. Altération des interconnexions et corrosion des liaisons entre cellules. Dégradation d'isolant et pénétration d'humidité.
Groupe de cellule	Défaut de diode Bypass	Destruction des diodes. Diode mal-connectée, inversée ou court-circuitée.
Module	Défaut module	Modules court-circuités. Inversion de modules. Modules shuntés.
String	Défaut de connectique	Modules déconnectés. Court-circuit. Corrosion des contacts et des connexions. Destruction des liaisons.
Champs	Défaut des diodes anti-retour	Destruction ou absence des diodes. Diodes mal-connectées, inversées ou court-circuitées.

Tableau 5 Récapitulatif des défauts du générateur PV

3.1.4.1 Défauts modélisés par la résistance série R_s :

Cette résistance représente les pertes joules de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les mauvais contacts dans la cellule. Les contacts entre les électrodes du semi-conducteur à résistance élevée abaissent considérablement le rendement de conversion électrique.

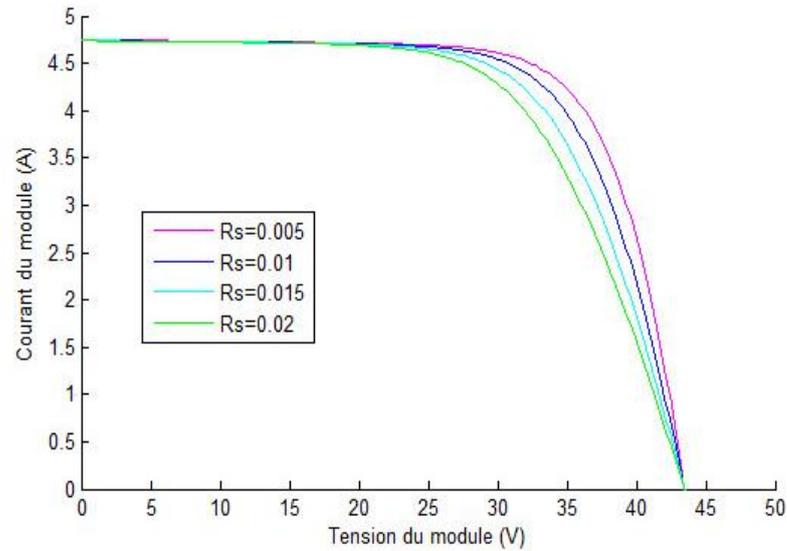


Figure 2.3-2 Influence de la variation de la résistance série R_s

3.1.4.2 Défauts modélisés par la résistance parallèle R_p :

Cette résistance caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et la zone charge de l'espace.

L'existence des fissures et les défauts de structure sont assimilables à la résistance R_p .

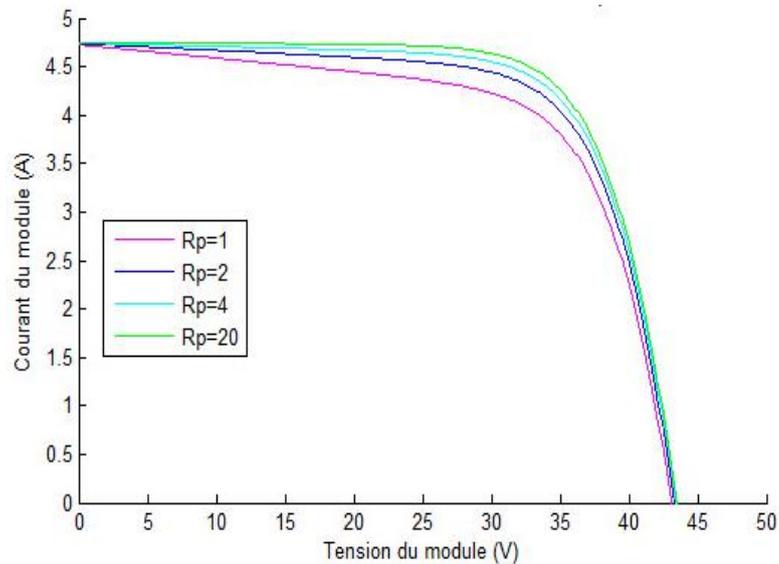


Figure 2.3-3 Influence de la variation de la résistance série R_p

3.1.4.3 Défauts et influence de la température :

L'augmentation de la température entraîne une augmentation du photo-courant I_{ph} à cause de la diminution de la bande interdite du matériau. Le courant direct de la jonction augmente plus rapidement et entraîne alors une diminution de la tension du circuit-ouvert de l'ordre de 2mV pour une variation de 0.1% par degré C° est ainsi la diminution de la puissance fournie en sortie est estimée à 0.5% par degré par un module. Un ombrage partiel peut créer un hot spot au niveau de cette dernière et donc peut réduire sévèrement son rendement !

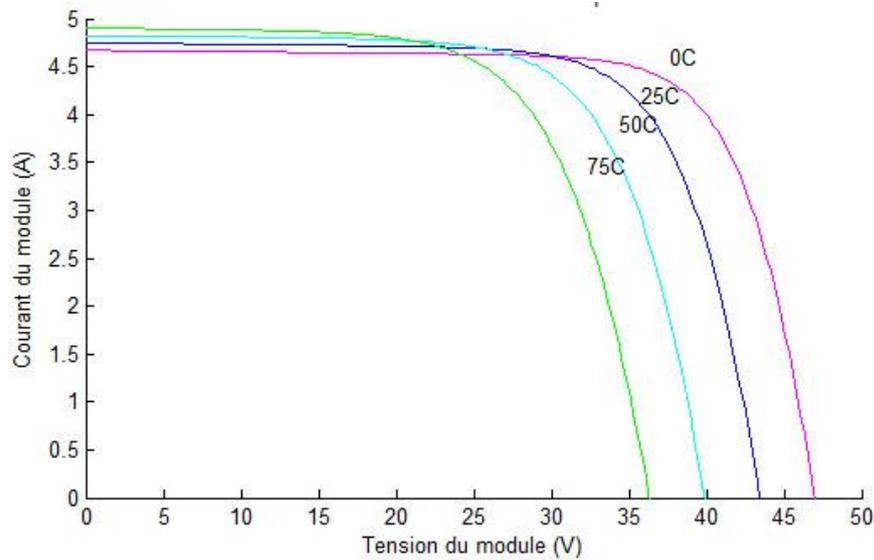


Figure 2.3-4 Influence de la variation de la température

La simulation fournit les résultats prévus évoqués dans le paragraphe précédent, nous constatons que l'augmentation de la température engendre une augmentation du courant photoélectrique et en même temps une diminution de la tension de circuit-ouvert.

3.1.4.4 Influence de l'éclairement et l'effet de l'ombrage

L'augmentation d'ensoleillement se traduit par une augmentation du courant électrique dans la caractéristique $I=f(V)$. Le courant à court-circuit est plus important étant donné qu'il suit linéairement l'éclairement alors que la variation de la tension à circuit-ouvert est algorithmique.

Dans cette partie nous présenterons les effets de l'ombrage partiel et également ceux de l'ombrage homogène qui agit au niveau du module. Les figures ci-dessous illustrent les différents types d'ombrage qui puissent affecter le générateur.

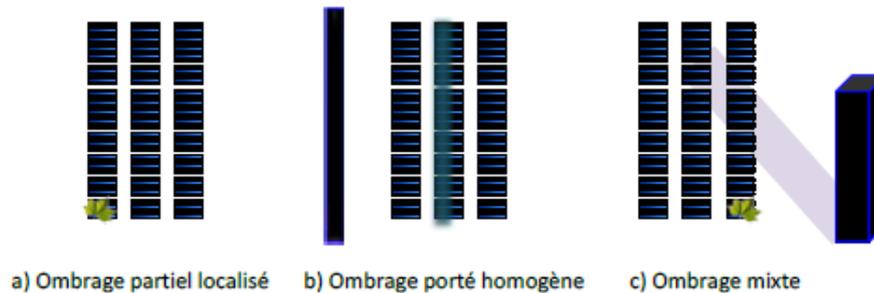


Figure 2.3-5 Les types d'ombrage

Nous avons réalisé des tests en variant l'ombrage de 10 à 75% et nous avons prélevé les différentes caractéristiques I(V) de la chaîne constituée de 72 cellules en série, ayant chacune une tension V_{oc} de circuit-ouvert de 0.6V.

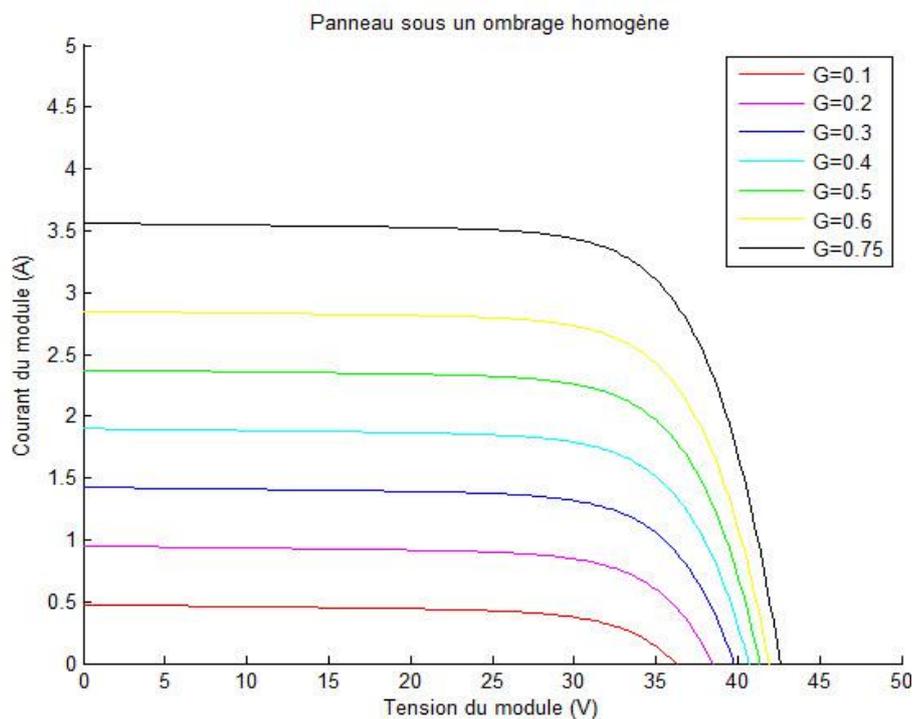


Figure 2.3-6 Ombrage homogène

Dans le cas d'un ombrage porté homogène, la chaîne agit de la même manière si l'éclairement global est diminué. Sous ses conditions spécifiques, la perte en puissance ne se manifeste pas au niveau des cellules mais plutôt au niveau des module lorsque les diodes de protection court-circuitent ces derniers.

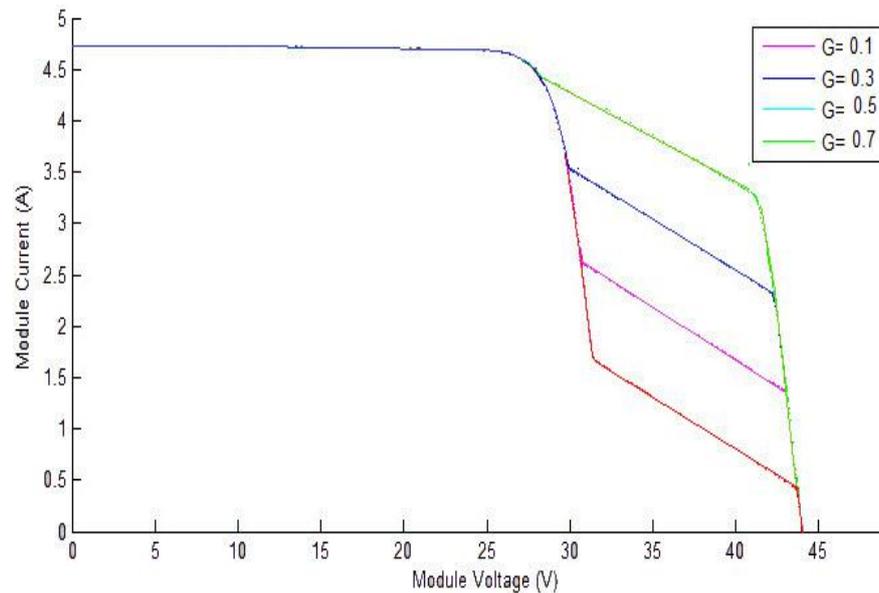


Figure 2.3-7 Ombrage partiel

Dans le cas d'un ombrage localisé affectant uniquement une seule cellule du panneau PV, une feuille par exemple, la cellule photovoltaïque atteinte par l'ombrage joue le rôle d'un récepteur. Nous projetons l'effet des cellules connectées en série dans la figure ci-dessus. Cet ombrage est plus critique, étant donné que l'effet se traduit non seulement au niveau de la cellule qui devient réceptrice et emmagasine par conséquent l'énergie produite par les cellules saines mais aussi au niveau du module via les diodes bypass.

2.4 Défauts du convertisseur Cùk (hacheur)

Les différents convertisseurs sont constitués d'éléments actifs à semi-conducteurs (diodes, MOSFET, IGBT, GTO) et d'éléments de stockage d'énergie passifs (inductances et condensateurs). L'étude menée sur le fonctionnement des convertisseurs a montré que les interrupteurs commandés sont les plus sujets aux défaillances.

Les défaillances physiques sont dues à plusieurs raisons mais essentiellement à l'augmentation de la température interne de l'interrupteur de puissance liée à un problème thermique provoqué par une surcharge qui est liée à un empiètement de commande ou une surtension provoquant une avalanche.

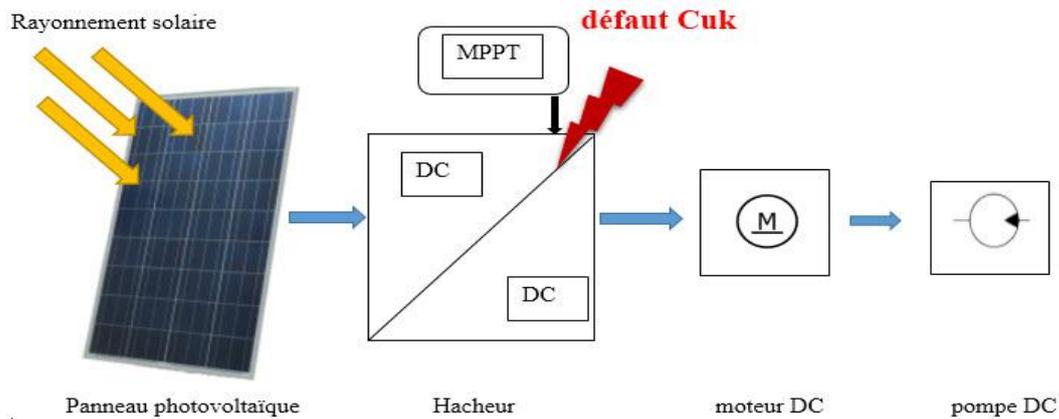


Figure 2.4-1 Défaut survenant au niveau Cuk

2.4.1 Les défaillances d'un transistor :

Afin de modéliser les défauts qui surgissent dans une cellule de commutation à base d'un transistor, on propose ici quelques types de défaillances dans ces derniers.

2.4.1.1 Les Types de défaillance dans un transistor

4.1.1.1 Défaillance de type haute impédance

La tenue à l'état ouvert d'un transistor entraîne une perte de réversibilité en courant de l'interrupteur.

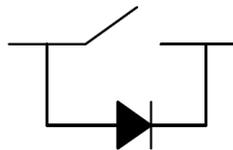


Figure 2.4-2 Défaillance de type "haute impédance" d'un transistor

4.1.1.2 Défaillance de type "basse impédance" d'un transistor

Ce défaut est critique et se manifeste par le maintien de la cellule en état bloqué (court-circuit), cet état est engendré par une défaillance physique ou une imperfection de commande d'un transistor résultant en un état de basse impédance.

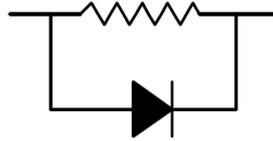


Figure 2.4-3 Défaillance de type "basse impédance" d'un transistor

4.1.1.3 Défaut asymétrique croisé (convertisseur multicellulaire)

Ce défaut apparaît lors de la défaillance de type "basse impédance" de deux transistors de niveaux différents dans un convertisseur multicellulaire. La cellule de commutation reste bloquée sur un état c'est-à-dire l'actionneur prendra une valeur de commande fixe soit $u = 0$ ou $u = 1$. Dans cette thèse on aborde les défauts qui se produisent au niveau des cellules dans un hacheur de type **C \dot{u} k**, un convertisseur à un seul niveau, et donc ce défaut ne sera pas évoqué.

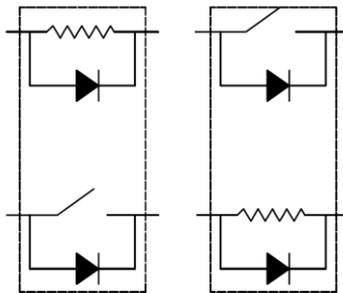


Figure 2.4-4 Défaillance de type "asymétrique croisé" ($u = 0$ ou $u = 1$)

2.4.2 Simulation des défaillances dans le hacheur Cùk

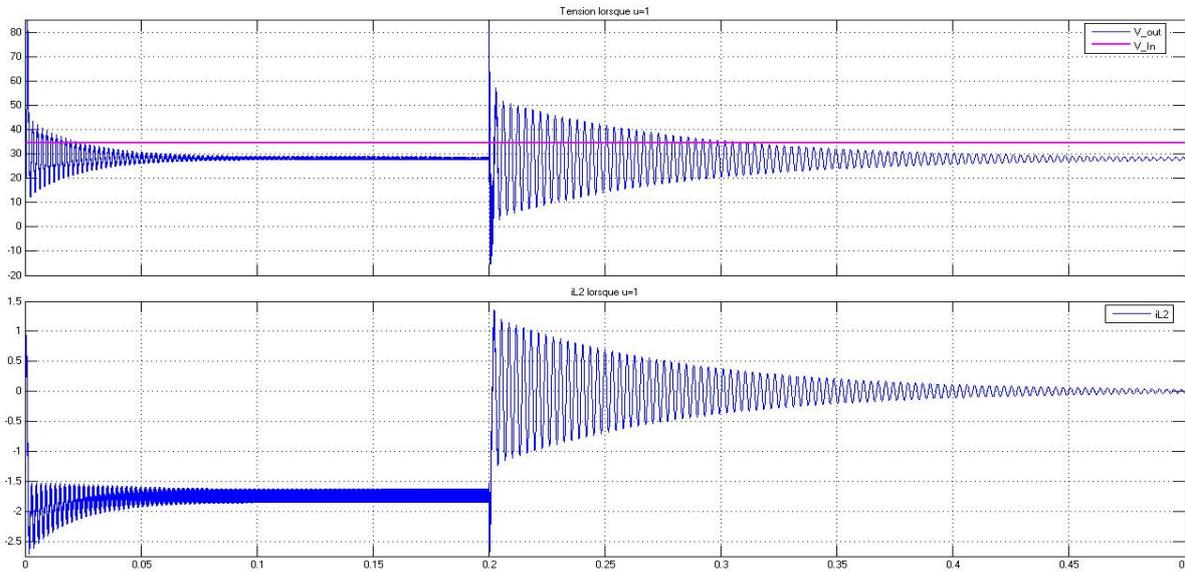


Figure 2.4-5 Simulation de défaillance haute impédance, réponse en tension et courant

La figure ci-dessus illustre le comportement du hacheur lors de l'injection de la défaillance de haute impédance. Nous remarquons que l'introduction du défaut altère la réponse en tension qui se stabilise et atteint une valeur finale très proche de celle en état sain, cela étant dû à la source de tension E de la charge connectée en sortie qui représente le moteur. Cependant, la réponse en courant a été considérablement perturbée ce qui est interprété par les oscillations ainsi que la convergence vers une valeur finale éloignée de celle de référence.

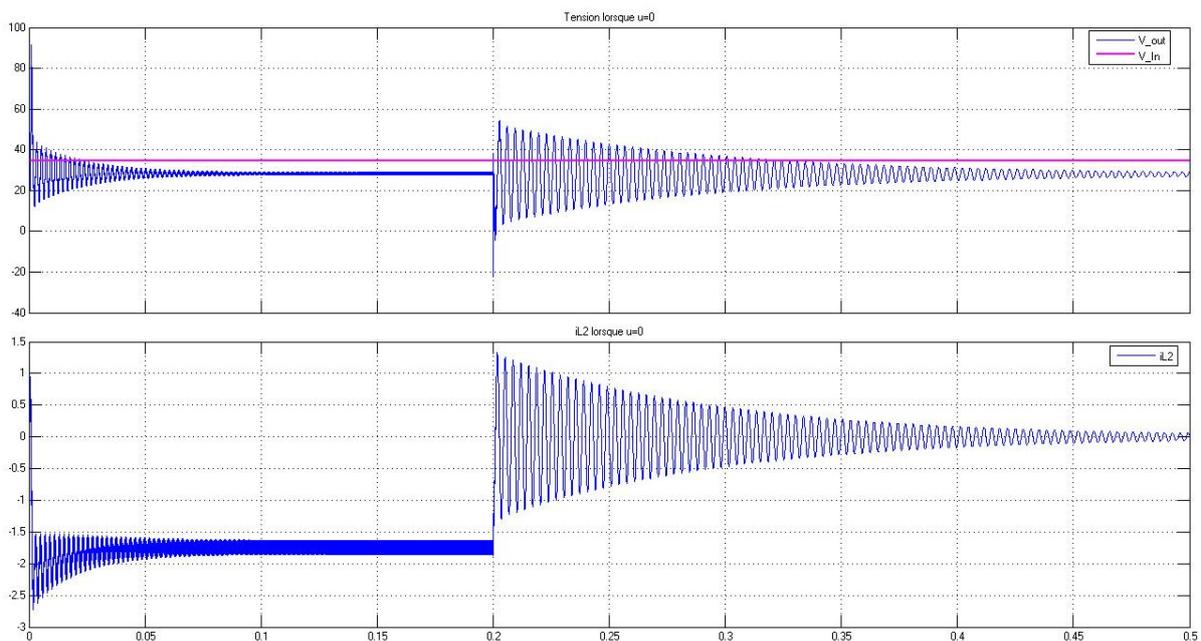


Figure 2.4-6 Simulation de défaillance basse impédance, réponse en tension et courant

De la même manière nous avons établi la même simulation avec le deuxième type de défaut qu'est la basse impédance. Nous constatons que les résultats de simulation sont pratiquement similaires, exemptés des pics en courant nettement élevés lors du défaut de basse impédance.

Par ailleurs nous constatons que les deux défauts se démarquent avec des dérivées opposées, tel que l'on peut utiliser cette particularité pour la génération de résidus sensibles uniquement à l'un d'eux, permettant ainsi leur identification.

2.5 Les défauts des machines électriques à courant continu

Les pannes d'une machine électrique à courant continu peuvent avoir deux origines, à savoir mécanique et électrique [10].

2.5.1 Les pannes d'ordre mécanique

Ce genre de pannes diverses surgit rarement et on en cite :

2.5.1.1 Echauffement des coussinets

Ceci est dû à un manque d'huile, un blocage de la bague de graissage, une tension excessive de la courroie ou à un mauvais alignement de l'accouplement.

2.5.1.2 Echauffements des roulements :

Causés par leur mauvais état ou par un manque de graissage, la tension excessive de la courroie mais aussi par un mauvais alignement de l'accouplement ou par un jeu interne insuffisant du roulement.

2.5.1.3 Vibrations et bruit divers :

Provenant d'un manque de rigidité du socle, d'un mauvais état des roulements, balourd dans le rotor mais également son frottement contre le stator, celui du ventilateur, ou même d'un corps étranger dans l'entrefer.

2.5.2 Les pannes d'ordre électrique :

Un moteur à courant continu peut être sujet à plusieurs dérangements que nous résumerons dans le tableau suivant :

Effet observé	Origine du défaut	Vérification et résolution
Le moteur ne démarre pas	Absence de tension aux bornes du moteur	Vérification du courant
	Fonte des fusibles	Vérification des fusibles
	Coupure dans l'induit	Déplacer l'induit légèrement et remettre le courant ceci devrait provoquer un démarrage accompagné avec de fortes étincelles sous les balais. Pour y remédier, il faudra réparer ou changer le bobinage.
	Coupure ou mauvais contact (rhéostat à titre d'exemple)	Vérification visuelle ou avec appareils de mesures (voltmètres, ohmmètre...).
Le moteur démarre mal	Mauvais contact à une borne du moteur	Vérification du serrage.
	Mauvais calage des balais	Recherche de la bonne position.
	Coupure dans l'induit	Visiblement, ce défaut se manifeste sur le collecteur où deux lames noircissent suite aux étincelles.
	Courroie trop tendue	Essai sans courroie ou bien la détendre
	Couple résistant trop élevé au démarrage	La vérification se fait par un essai à vide du moteur au démarrage. Quant à la résolution serait que le moteur est trop faible.
Le moteur s'emballe	Dans le cas d'un moteur série	Un moteur série s'emballe toujours à vide, c'est pourquoi il faut toujours le faire tourner en charge.
	Coupure dans une excitation dérivée du circuit inducteur	Vérification successive du rhéostat de champs puis les inducteurs.

	Mauvais branchement de l'excitation	Comparaison des connexions à la plaque à bornes avec un schéma.
	Tension d'alimentation trop élevée	Vérification sur la plaque à bornes la bonne tension.
Les balais produisent trop d'étincelles	Court-circuit ou coupure dans le bobinage de l'induit	Un rebobinage partiel ou complet est envisageable.
	Use du collecteur, émergence des lamelles de mica	Rectification au tour le collecteur et grattage des micas en retrait des lames.
	Charbons trop durs ou trop tendres	Se référer à la notice du constructeur.
	Surcharge du moteur	Vérification du courant par un ampèremètre et le comparer à celui inscrit sur la plaque du moteur
Les fusibles fondent	Coupure du circuit d'excitation	Rupture du contact et vérification de l'existence d'une étincelle ou bien par le biais d'un ohmmètre.
	Court-circuit dans l'installation du moteur	Branchement d'un voltmètre au lieu d'un fusible et débranchement du moteur à la plaque à bornes. En fermant l'interrupteur, s'il y a lieu d'une déviation au niveau du voltmètre alors le court-circuit n'est pas dans le moteur mais dans la ligne ou l'appareillage.

Tableau 6 Répertoire des pannes électriques d'une machine à courant continu

2.5.3 Simulation des défauts de la machine

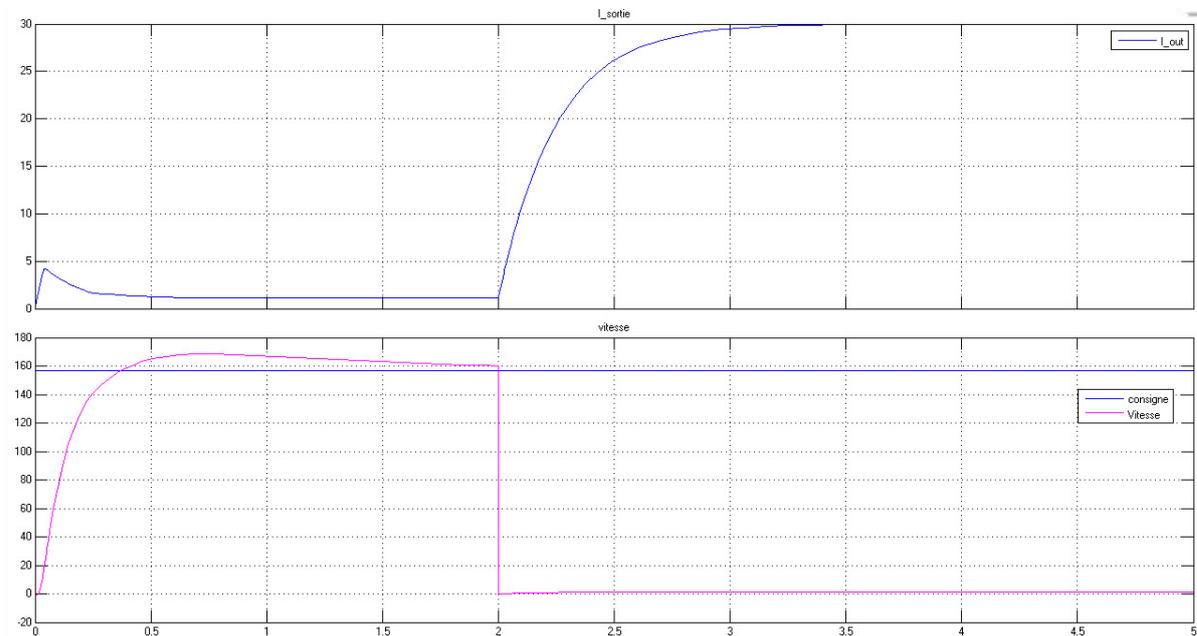


Figure 2.5-1 Simulation de court-circuit au niveau du stator en cas de PID

Cette figure affiche les résultats de simulation de la panne injectée au stator à l'instant 2s, nous constatons que la réponse en courant atteint des valeurs très élevées ce qui est prévisible vu qu'il s'agit d'un courant de court-circuit. Aussi nous remarquons que la réponse en vitesse image du couple moteur et donc du champ électromagnétique s'annule naturellement en cas de court-circuit de l'inducteur.

La réponse en courant s'avère en l'occurrence utile pour la génération de résidu et la prise de décision sur la panne en question du court-circuit. En effet, nous constatons que le courant débité diverge et rend la tâche de détection commode en instaurant une valeur limite dont le dépassement déclenche le signal d'un état d'alarme.

2.6 Défauts combinés de la chaîne photovoltaïque

Nous avons effectué plusieurs essais en combinant les défauts présentés précédemment et nous avons prélevé les mesures des différentes grandeurs affectées de chaque élément de la chaîne. Les figures de simulation sont attachées en annexe et nous ont permis de formuler les hypothèses suivantes

- Un défaut d'ombrage au niveau du générateur PV, peut handicaper le restant de la chaîne si la tension délivrée ne répond pas à la marge imposée par le hacheur utilisé, en ce qui concerne notre système, le hacheur reste opérant dans une plage de tension variant entre 20-48V.
- Un défaut affectant le hacheur occasionnerait une chute de puissance du générateur, le motif étant l'incapacité du MPPT à adapter la charge au générateur étant donné que le hacheur ne répond ou n'exécute plus la commande générée par l'algorithme du MPPT, aussi ce défaut provoquerait une réduction considérable du couple moteur et donc de la vitesse en sortie de la machine utilisée.
- Un défaut surgissant au niveau de la machine entraînerait une réduction de la vitesse ou un emballement et donc provoquerait une chute en puissance en amont de l'installation.

2.7 Conclusion

Ce deuxième chapitre avait pour objectif de répertorier les différents défauts, à maints niveaux de la chaîne. Ainsi nous avons reproduit quelques défauts de chaque compartiment de l'installation et observé leur répercussion sur les signaux recueillis à plusieurs étages.

Pour le panneau photovoltaïque, nous avons manipulé les résistances série et parallèle ainsi que l'effet ombrage qui s'avèrent tous comme facteurs limitatifs du rendement d'un PPV.

Quant au hacheur, nous avons généré un défaut d'actionneur au niveau de son interrupteur de commande à haute ainsi qu'à basse impédance.

A l'égard de la machine, nous avons introduit des variations paramétriques et simulé une panne de court-circuit au niveau de l'inducteur, ces défauts sont très récurrents et nécessitent leur détection.

Enfin, nous avons combiné les défauts pour essayer d'établir une loi de propagation de défauts ou du moins formuler des constatations sur l'accumulation des effets des défauts sur l'ensemble chaîne.

Diagnostic de la chaîne de pompage

Chapitre 3 Diagnostic de la chaîne de pompage

3.1 Introduction

La conception, la construction et la mise en route d'une machine sont des actions ayant la création d'un produit fini comme finalité, ainsi une chaîne de pompage photovoltaïque résultant de l'association de plusieurs compartiments à savoir : un générateur photovoltaïque, un convertisseur continu/continu (Hacheur) ainsi qu'une machine électrique à courant continu, aboutissent à la production d'un couple moteur dont la pompe aura besoin pour aspirer l'eau d'une profondeur déterminée.

Le diagnostic a pour mission d'accroître la disponibilité et la rentabilité de l'installation. En effet, les défauts qui peuvent surgir à n'importe quel compartiment, à titre d'exemple l'ombrage au PV, le blocage des interrupteurs au convertisseur ainsi que les phénomènes d'usure et autre au niveau de la machine, sont des phénomènes qui vont être observés et analysés en permanence afin de décider s'il y a lieu d'un défaut et définir le mode de fonctionnement dans lesquels le système devrait opérer.

Grâce au diagnostic, des économies peuvent être faites si le défaut est rapidement pris en charge et même amorti et permet d'éviter un plus grand investissement si le défaut n'est pas détecté et ses dégâts occasionneraient des coûts supplémentaires.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différentes approches de diagnostic des éléments de la chaîne en l'occurrence.

3.2 Le diagnostic des défauts

Le diagnostic désigne l'analyse des modes de fonctionnement étranges ou défectueux en vue de déterminer la nature et la cause de ces derniers. Le diagnostic des systèmes passe par deux étapes essentielles qui sont : la *localisation* et l'*isolation* du défaut dans la chaîne du système.

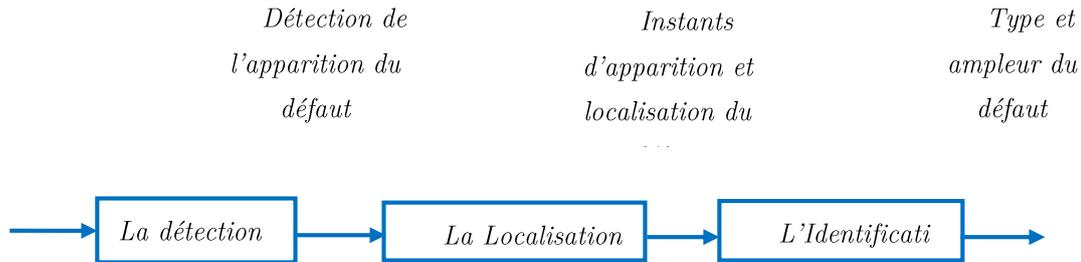


Figure 3.2-1 Schéma des étapes du diagnostic des systèmes

La logique du diagnostic fait référence à la précise décision résultant directement de l'analyse des résidus calculés $r(t)$. Le résidu est généré à partir de la comparaison du comportement sain déduit à partir du modèle du système et le comportement réel du système.

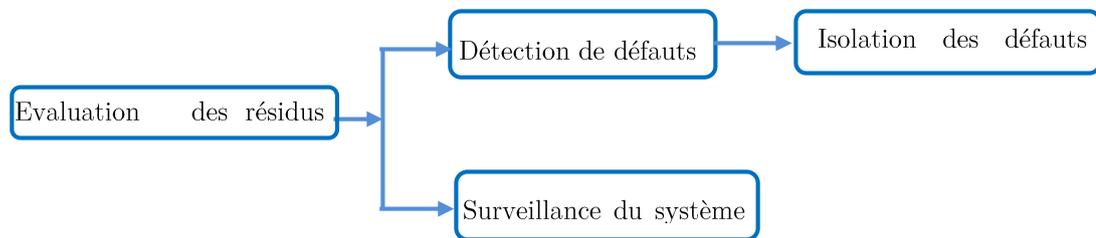


Figure 3.2-2 Schéma représentant le processus FDI

3.2.1 Principe du diagnostic des défauts

La notion fondamentale du diagnostic des défauts repose essentiellement sur la notion de redondance qui est subdivisée en deux catégories, matérielle (ou physique) et analytique.

2.1.1.1 Redondance matérielle :

Consiste à joindre des capteurs afin de recueillir des informations supplémentaires sur l'état du système.

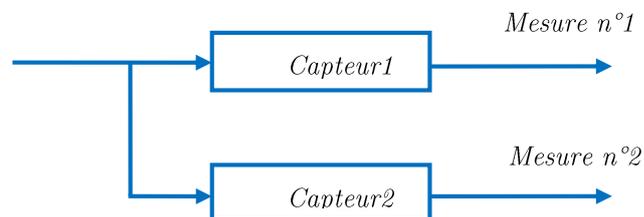


Figure 3.2-3 Schéma représentant la redondance matérielle

Cette méthode par redondance physique offre l'avantage d'être conceptuellement simple à réaliser, cependant, elle est coûteuse et rend les installations plus encombrantes. De ce fait, on fait recours à cette méthode uniquement pour la surveillance des sous-ensembles critiques ou sensibles du système. De surplus, elle présente également un autre inconvénient de la dégradation et même la défaillance des composantes mises en place pour la surveillance.

2.1.1.2 Redondance analytique

Cette deuxième approche consiste à mettre au point des algorithmes de détection et de localisation de défauts en se basant sur la donnée et les mesures disponibles sur le système. Cette méthode requiert la connaissance du modèle dynamique du système à examiner. Afin d'éviter les fausses alarmes ou les manques de détection qui remettent en question l'efficacité de l'algorithme de détection ou même la commande FTC, ces algorithmes doivent tenir compte des bruits de mesure, des perturbations ainsi que des erreurs et incertitudes de modélisation.

L'approche de redondance matérielle est plus simple, plus flexible, moins coûteuse et plus écologique que la redondance analytique.

La figure schématise les différentes méthodes utilisées du diagnostic. Ces dernières sont répertoriées en deux catégories selon la connaissance ou non du modèle.

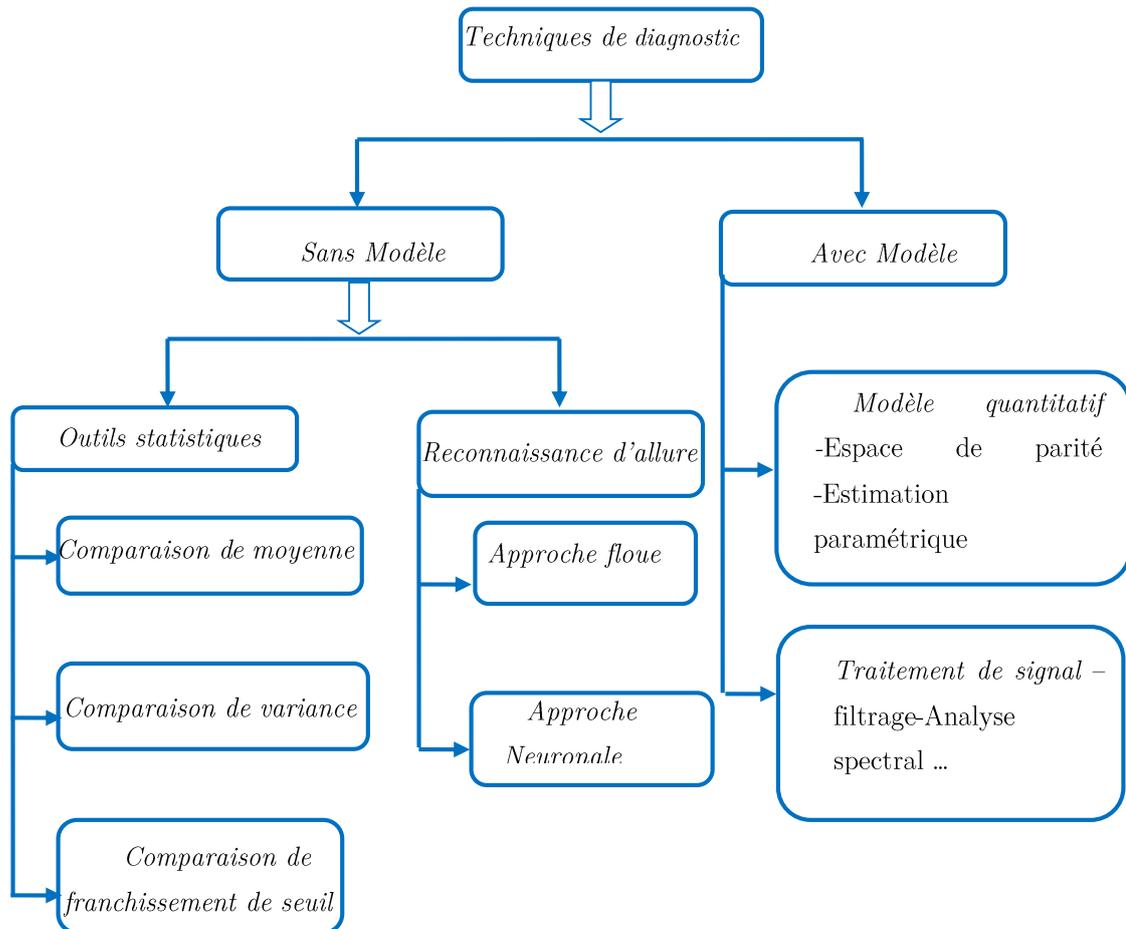


Figure 3.2-4 Schéma représentant les différentes méthodes de diagnostic

3.2.1.2 Les résidus

Les résidus sont conçus pour être égaux ou pour converger vers zéro en état ordinaire et quitter de manière significative la valeur zéro voire diverger après l'apparence d'un défaut. Et donc, en somme, les résidus nuls, indiquent le bon fonctionnement du système, ce qui implique une poursuite de la tâche de surveillance du système en temps réel, tandis que les résidus non nuls reflètent le dysfonctionnement du système et suscitent une intervention ou la mise en vigueur d'un mode dégradé après l'identification des causes à travers les méthodes du FDI. Par conséquent, il est important d'obtenir une *structure de résidus* permettant son évaluation correcte

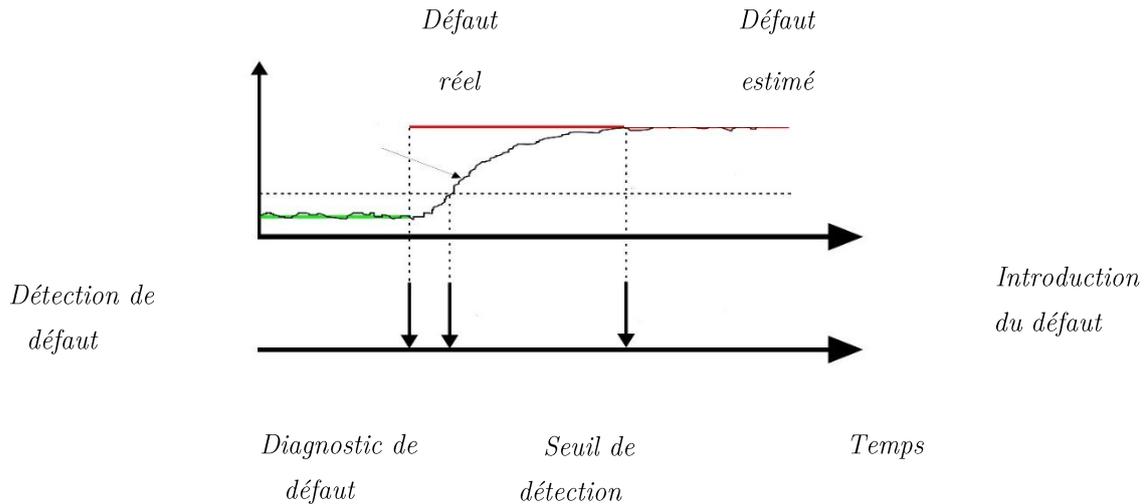


Figure 3.2-5 Visualisation du retard dans la procédure FDI

La figure visualise le processus de détection où le signal du résidu change à l'instant de l'apparition du défaut. En effet, Après son introduction, le bloc *FDI* prend un temps de réponse pour le détecter suite à un test de seuil. Le bloc de commande requiert davantage de temps pour que le diagnostic soit effectif et ce via la collection des données entrées-sorties suffisantes pour prendre une décision.

On note ici, que le niveau de variation doit être significatif par rapport aux effets des signaux de bruit et de perturbation et encore, un bon diagnostic doit minimiser l'intervalle entre le moment de l'apparition du défaut et celui de la prise de décision.

2.1.2.1 Technique de génération de défauts

Les méthodes de génération de résidus se regroupent en trois catégories : *à base de l'espace parcouru*, *les observateurs* et *l'estimation paramétrique*.

Les méthodes non fondées sur un modèle mathématique reposent sur l'ensemble de données de mesures intrinsèques sensibles aux défauts du système, à l'instar de sa moyenne ou sa variance en cas du traitement des données avec les *outils statistiques*. D'autres approches sont envisagées comme l'analyse et la comparaison de la dynamique du système et sa dérivée première ou secondaire, il s'agit donc des méthodes basées sur la reconnaissance de formes.

Les méthodes basées sur la connaissance du modèle mettent généralement en vigueur le principe de la redondance matérielle et analytique, plusieurs manières d'aborder la problématique

de surveillance s'affichent, telles que, les méthodes de l'espace de parité, l'estimation paramétrique, les observateurs, le traitement de signal...En l'occurrence, on s'intéresse aux méthodes de diagnostic à base d'observateurs.

Espace de parité :

Dans cette méthode, les résidus sont générés à partir de la différence entre la sortie mesurée et estimée à partir du modèle sain ainsi que les dérivées associées à chacune. Le résidu produit est pondéré par une matrice de transformation afin de le rendre robuste vis-à-vis les perturbations qui affectent le système et en même temps accroître ses capacités d'identification des défauts.

Observateurs

Le principe des méthodes à base d'observateurs consiste à observer les paramètres du système et donc le vecteur d'état. Elles sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées issues de l'observateur. L'erreur d'estimation des différents paramètres est considérée comme résidu de l'algorithme.

Les nouveaux développements des filtres de *Kalman* distincts placés en parallèle permettent d'isoler les défauts qui affectent le système, et ainsi la configuration d'observateur en nombre et structure permet de définir la nature des défauts à détecter et à les isoler dans le système dynamique. Cette technique se voit donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles. De très nombreux travaux ont été développés concernant la synthèse d'observateurs pour le diagnostic des systèmes physiques.

Estimation des paramètres

Cette technique repose sur l'estimation des paramètres en se basant sur le principe que les défauts affectent particulièrement les paramètres physiques du système. Dans ce cas-là, les erreurs d'estimation constituent les résidus. Pour pouvoir isoler les défauts, la connaissance de relations qui lient les coefficients du modèle du système aux paramètres physiques réels, est requise. Il existe plusieurs méthodes d'estimation paramétriques : estimation par minimisation de l'erreur d'équation, estimation par minimisation de l'erreur en sortie, estimation par mode glissant ...

3.3 Diagnostic du panneau photovoltaïque

3.3.1 Méthodes de diagnostic du PPV

3.3.1.1 Approches industrialisées courantes

On peut énumérer deux catégories d'approches de diagnostic qui sont communément utilisées dans l'industrie : les méthodes basées sur l'étude des réponses en tension et courant du système dites électriques, et des méthodes basées sur l'étude d'autres grandeurs non électriques. Pour de plus amples détails voir annexe A.

3.3.1.2 Méthode de sandia[15]

La méthode de Sandia consiste à reconstituer la caractéristique d'un panneau photovoltaïque en cas de défauts par l'extrapolation, et ce, en se basant sur des points spécifiques. Ces derniers sont obtenus grâce à un modèle mathématique illustré par un système d'équation dont la résolution nous procure les valeurs des six paramètres C_i , permettant ainsi l'identification des cinq points qui apparaissent sur la figure ci-dessous et qui permettent de conclure de la performance du panneau photovoltaïque via la régénération de la courbe (I, V) du module photovoltaïque.

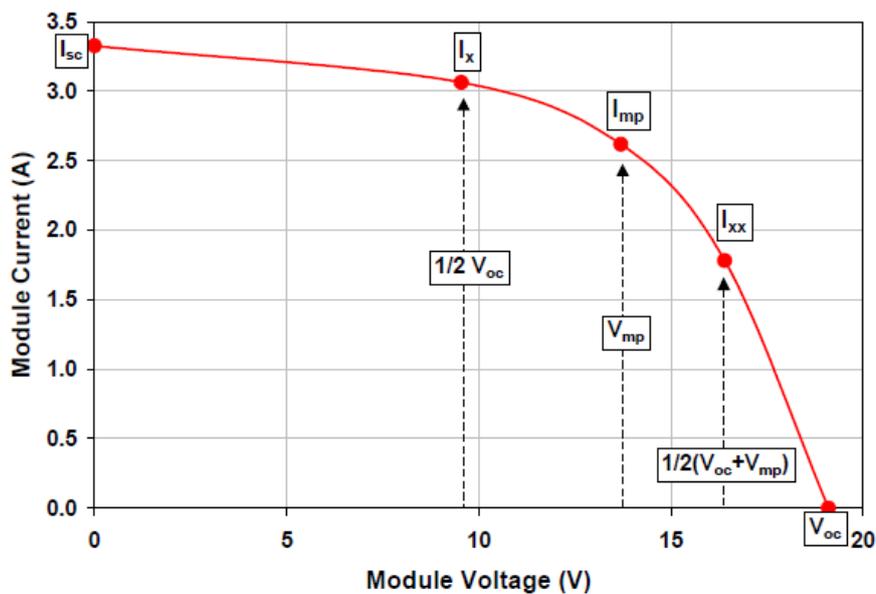


Figure 3.3-1 caractéristique statique et points critiques du modèle de Sandia

3.3.2 Choix de la méthode de diagnostic : caractéristique statique

Le champ photovoltaïque peut être décrit par la caractéristique statique de courant/tension électriques. L'altération de l'allure de cette dernière n'est qu'une traduction du défaut affectant le système de production PV. Chaque paramètre et chaque défaut influe de façon particulière la caractéristique (I, V). La comparaison des caractéristiques avec celle du mode sain permet de déduire les conditions dans lesquelles le système opère. Les informations fournies par la caractéristique et utilisées dans la littérature sont :

- La pente de la tangente tout au long de la caractéristique permet d'identifier les défauts de type ombrage.
- L'obtention des paramètres comme la résistance série, la température et le point de puissance maximale fourni par l'algorithme du MPPT permet de détecter les défauts dans le module et le string.

3.3.3 Simulations

Nous n'avons pris que trois cas des défauts PPV, pour davantage scénario, se référer à [2011]

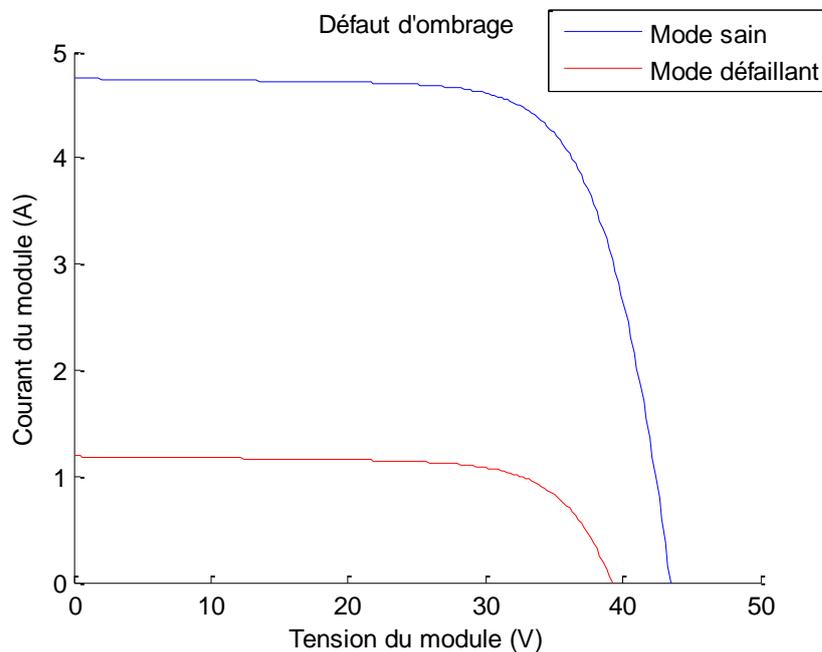


Figure 3.3-2 Comparaison des caractéristiques IV en cas d'ombrage

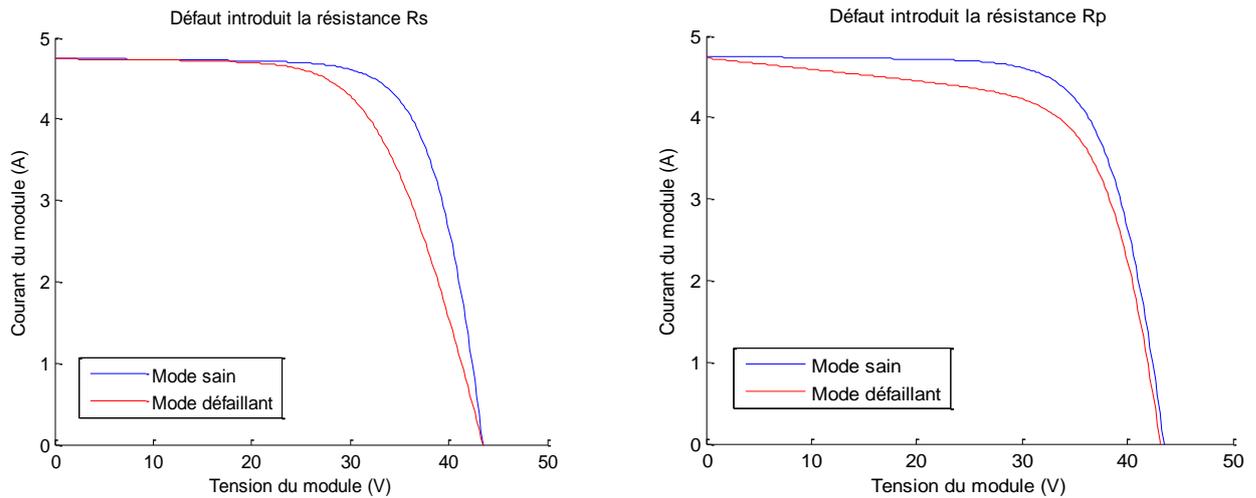


Figure 3.3-3-comparaison des caractéristiques IV en cas de défauts au niveau des résistances série et shunt

3.4 Diagnostic du hacheur C_ùk

3.4.1 Choix de la méthode du diagnostic : par observateur

Le choix de diagnostic de défauts par le biais de la méthode d'observateur se veut judicieux. En effet, cette catégorie requiert la reconnaissance du modèle d'état du système étudié et consiste à établir une comparaison comportementale entre sa réponse réelle et celle prédite par l'observateur soumis aux mêmes conditions expérimentales. Ainsi, et dans ce cas précis, on mènera notre étude sur le hacheur en se basant sur l'observateur à grand gain vu que le modèle du convertisseur le C_ùk est non linéaire.

3.4.1.1 Les observateurs

Dans le cas des convertisseurs, l'observation consiste à observer en temps réel les courants traversant les inductances et les tensions aux bornes des condensateurs. Dans l'étude de cette partie du diagnostic, on se focalisera sur l'observation du courant débité par l'inductance L₂ du fait que le système reste non observable si l'on impose un vecteur de sortie dépendant des autres courants ou tensions.

3.4.1.2 Etude d'observabilité du hacheur

Le modèle d'état non linéaire du hacheur en question est donné ci-dessus :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1-d}{L_1} \cdot x_2 + \frac{1}{L_1} \cdot E \\ \dot{x}_2 = \frac{1-d}{C_1} \cdot x_1 - \frac{d}{C_1} \cdot x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{d}{L_2} \cdot x_2 - \frac{1}{L_2} \cdot x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{C_1} \cdot x_1 - \frac{1}{R \cdot C_1} \cdot x_4 \end{cases} \quad 3.4-1$$

Avec x_i comme variables d'état représentant les courants aux bornes des inductances et tensions aux bornes des condensateurs.

Tels que

- x_1 représente i_{L1}
- x_2 représente v_{c1}
- x_3 représente i_{L2}
- x_4 représente v_{c2}

Le modèle d'état non linéaire est mis sous la forme suivante afin d'étudier son observabilité :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(X) + g(X, U) \\ Y &= C \cdot X \end{aligned} \quad 3.4-2$$

Où la matrice A, représente la partie linéaire du système

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{R \cdot C_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Et C représente le vecteur de sortie.

Pour l'étude de l'observabilité de ce dernier, nous avons utilisé la fonction `obsv` de Matlab

`>> Ob= obsv (A, C)`, nous obtenons ainsi la matrice d'observabilité du système dont nous calculerons le rang par la fonction `>> r= rank (Ob)`.

Nous choisissons à chaque fois une nouvelle variable d'état en sortie du système.

Par conséquent, et après avoir essayé les 4 variables, seule la sortie x_3 qui représente le courant traversant l'inductance L_2 reste observable en donnant $r=4$. De ce fait, dans l'étude d'observateur et la génération de résidus, nous utiliserons ce courant d'observateur.

3.4.1.3 Dimensionnement de l'observateur

Soit le système non linéaire suivant :

$$\dot{X} = f(X, U) \quad 3.4-3$$

L'observateur à grands gains est défini avec la structure suivante :

$$\dot{\hat{X}} = f(\hat{X}, U) - L.(X - \hat{X}) \quad 3.4-4$$

Où

- \hat{X} est l'estimé du vecteur état X
- $f(\hat{X}, U)$ représente l'estimée de la fonction $f(X, U)$ à l'aide de \hat{X}
- L_i sont les gains d'observateurs et sont considérés comme des correctifs
- $e = (X - \hat{X})$ est l'erreur d'estimation

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \frac{1-d}{L_1} \cdot \hat{x}_2 + \frac{1}{L_1} \cdot E - L_1 \cdot (x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{1-d}{C_1} \cdot \hat{x}_1 - \frac{d}{C_1} \cdot \hat{x}_3 - L_2 \cdot (x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \frac{d}{L_2} \cdot \hat{x}_2 - \frac{1}{L_2} \cdot \hat{x}_4 - L_3 \cdot (x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 = \frac{1}{C_1} \cdot \hat{x}_1 - \frac{1}{R \cdot C_1} \cdot \hat{x}_4 - L_4 \cdot (x_3 - \hat{x}_3) \end{cases} \quad 3.4-5$$

Afin d'estimer ces gains d'observateurs nous voulions procéder par un placement de pôles, mais n'ayant pas les valeurs qu'il faut afin de stabiliser le système d'état, nous les avons identifiés par la loi de Bühler stipulant, que la valeur minimale d'un gain permettant d'établir la stabilité du modèle est donnée par :

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{N} \cdot |A|^{3.4-6}$$

Où

- N représente la dimension du système et donc celle de la matrice A
- $|A|$ représente la trace de la matrice du système

N=4 et d'où le L devrait avoir un ordre de grandeur mais surtout une valeur inférieure à $-5,6818 \cdot 10^{-4}$

Après quelques essais, nous avons réalisé que la valeur $-5,6818 \cdot 10^{-4}$ est la plus adéquate et montre des résultats assez satisfaisants.

3.4.2 Les simulations

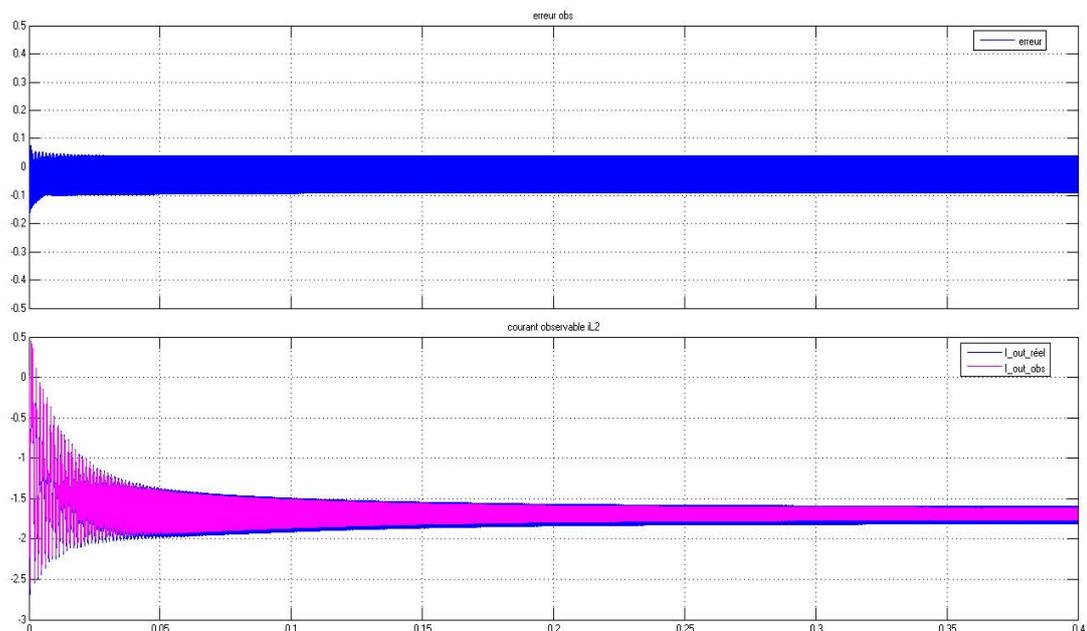


Figure 3.4-1 Erreur de l'estimation de l'observateur et sa réponse en courant

La figure ci-dessus projette le courant traversant l'inductance et son estimé fourni par l'observateur à grand gain. Nous constatons que les signaux présentent une grande corrélation dans la phase transitoire et convergent simultanément vers la même valeur moyenne.

De surplus, nous remarquons que l'observateur incarne le comportement dynamique avec une grande précision chose qu'on ne peut dénier si l'on examine l'erreur entre les deux signaux qui oscille dans un intervalle d'une longueur inférieure à 10% et qui possède une moyenne pratiquement nulle.

En somme, nous pouvons conclure que l'observateur est performant et que les gains utilisés ont permis de reproduire la dynamique avec fiabilité ce qui est de bon aloi pour la prise de décision lors du diagnostic du hacheur après la génération de résidus. Moins sont les incertitudes de modélisation meilleure est la détection de défaut.

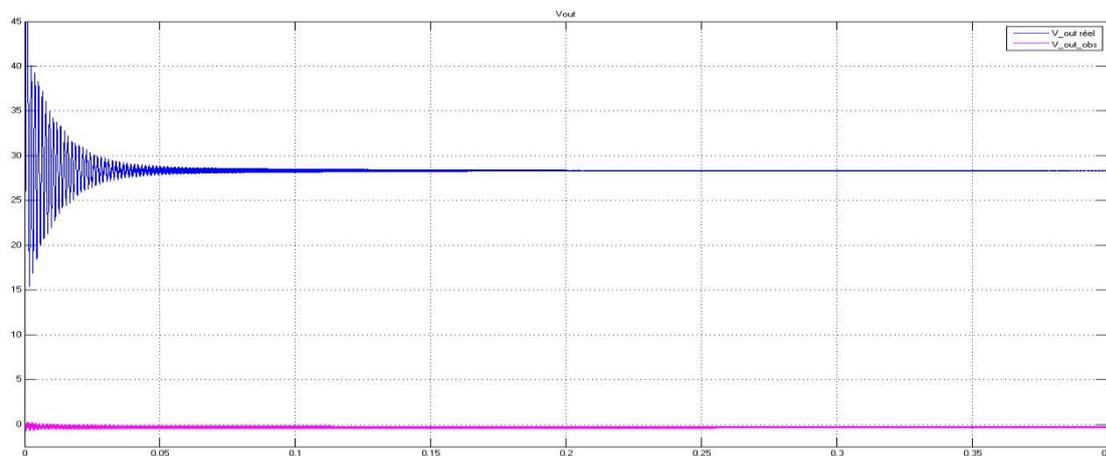


Figure 3.4-2 La réponse de l'observateur en tension

La figure précédente traduit les résultats aux quelles avait abouti l'étude d'observabilité du hacheur en question. Le capteur mis en lieu permet de lire la tension délivrée en sortie. Cependant, l'utilisation de l'observateur ne permet pas d'estimer la tension de sortie aux bornes de la capacité C2 ce qui concorde avec ce qu'a été prouvé théoriquement, et donc les résultats théoriques sont bel et bien identiques aux résultats expérimentaux et seul le courant débité par l'inductance L2 reste perçu.

3.4.2.1 Tests de robustesse de l'observateur

Afin d'évaluer la robustesse de l'observateur utilisé, on introduit des variations paramétriques engendrant le changement du comportement dynamique du système étudié. La reproduction de la dynamique réelle avec une erreur d'estimation faible en dépit des modifications apportées permet d'attester de l'efficacité et de la robustesse de l'observateur en question.

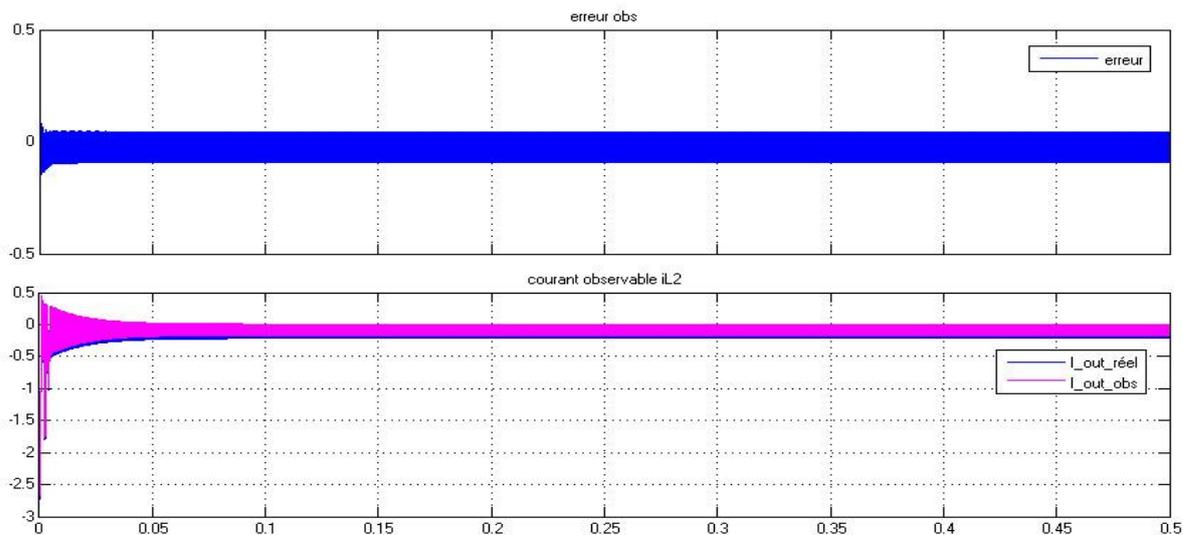


Figure 3.4-3 Test de robustesse de l'observateur

Les résultats de simulations montrent qu'en dépit des variations paramétriques apportées, avec les mêmes gains, l'observateur reprend fidèlement la dynamique de sortie et fournit des signaux qui sont indéniablement similaires au signal réel de courant. Le système se compose d'éléments électriques dont les caractéristiques et les valeurs de paramètres restent sensibles aux différents facteurs internes et même exogènes liés au milieu environnant, ainsi, la robustesse de l'observateur, vis-à-vis les variations paramétriques, reste fortement préconisée pour un diagnostic efficace et fiable.

3.4.3 Le résidu

Le résidu est une variable dont l'évolution traduit l'état du système. Dans la génération de résidus de l'étude menée sur le hacheur, nous avons exploité l'estimé du courant fourni par l'observateur à grand gain et le courant de référence traversant l'inductance L2. L'analyse de ce dernier en se basant sur un algorithme de décision nous permettra de conclure de l'occurrence d'un défaut.

La figure ci-dessous illustre l'évolution du résidu suite à l'injection d'un défaut au niveau de l'interrupteur.

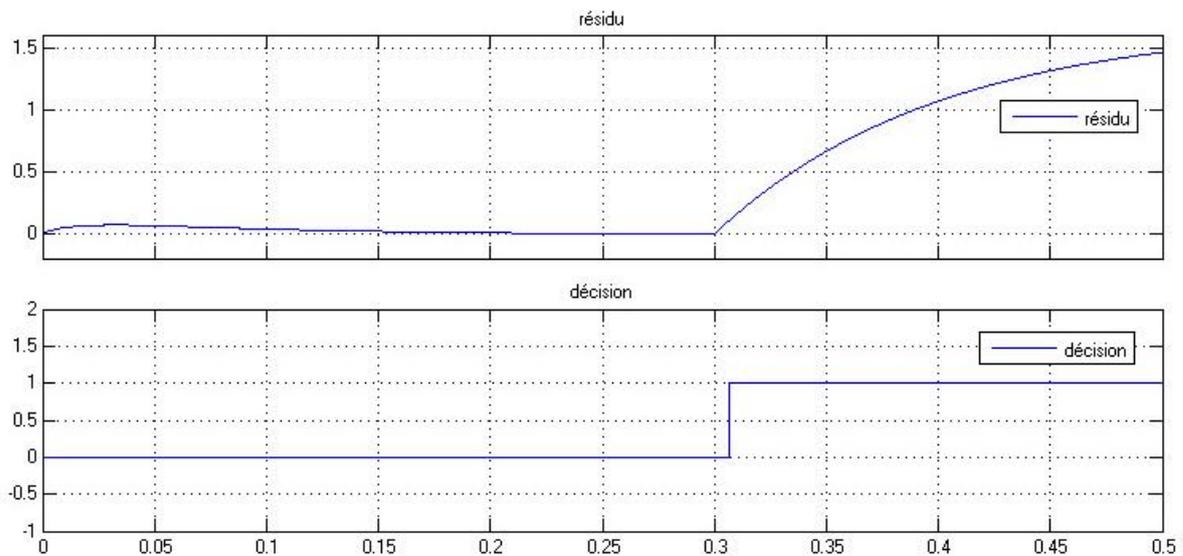


Figure 3.4-4 Le résidu en cas de défaut au niveau du Cuk

Sus dit, on peut nettement percevoir la sensibilité du résidu aux défauts affectant le hacheur, en effet, le résidu s'annule en absence de défauts et s'accroît considérablement en présence de ces derniers. Concrètement, l'observateur estime les états du système en mode sain suivant le modèle mathématique du hacheur qui a servi de base pour son dimensionnement, ainsi, lors de l'injection du défaut, la commande change et l'erreur d'estimation entre les deux mesures réelle et observée du courant se tonifie ce qui rend la détection de défauts aisée.

Nous remarquons aussi que la réponse est imminente avec un retard estimé à moins d'un millièmme de seconde séparant la réponse et l'apparition du défaut qui est dû au temps de réponse de l'algorithme de la prise de décision.

3.5 Diagnostic de la machine DC

Une machine à courant continu ou à courant alternatif est une machine électrique qui est soumise aux aléas de son fonctionnement, de l'environnement immédiat et de l'utilisation qui en est faite.

Ainsi, son omniprésence dans de nombreuses applications tel que le pompage photovoltaïque nécessite la mise en œuvre de processus de supervision afin d'assurer un bon fonctionnement.

3.5.1 Choix de la méthode du diagnostic par observateur

Les méthodes les plus récentes développées en matière de diagnostic de défaut comprennent les méthodes basées sur les équations de redondance analytique [16], celles utilisant une approche stochastique [17, 18], et les méthodes basées sur les observateurs [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Généralement, les modèles mathématiques des dynamiques des machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone ou asynchrone) comportent des termes non linéaires. Par conséquent, pour des fins de commande ou bien pour le diagnostic des défauts, synthétiser des observateurs non linéaires s'avèrent d'une utilité indéniable.

Ainsi, l'observateur est utilisé comme générateur de résidus. Le vecteur d'état estimé qu'il fournit servira à calculer une erreur d'estimation. Cette erreur sera ensuite utilisée comme résidu afin de détecter les défauts.

3.5.1.1 Etude d'observabilité de la machine

En exploitant les équations régissant le fonctionnement d'une machine à courant continu, exposées lors du premier chapitre, nous obtenons le système d'équations différentielles suivant [27]:

$$\begin{cases} Lai = -Ra - KmLf.\Omega + u \\ J\dot{\Omega} = -D\Omega - KmLf.i^2 - Tl \\ y = [i, \Omega] \end{cases} \quad 3.5-1$$

Tels que La et Ra sont respectivement l'inductance ainsi que la résistance de la machine. J est le facteur d'inertie et D celui de la friction, quant à Tl c'est l'entrée du système.

L'observabilité fut vérifiée autour d'un point de fonctionnement.

3.5.1.2 Dimensionnement de l'observateur

Le système d'état de l'observateur

$$\begin{cases} L\dot{\hat{i}} = -Ra - KmLf.\hat{\Omega} + u - K1(i - \hat{i}) \\ J\dot{\hat{\Omega}} = -D\hat{\Omega} - KmLf.\hat{i}^2 - Tl - K2(\Omega - \hat{\Omega}) \\ \hat{y} = [\hat{i}, \hat{\Omega}] \end{cases} \quad 3.5-2$$

Les gains K_i furent choisis assez grands pour garantir la convergence du système.

3.5.2 Simulation de l'observateur

3.5.2.1 Simulation de l'observateur de la machine avec régulation PID

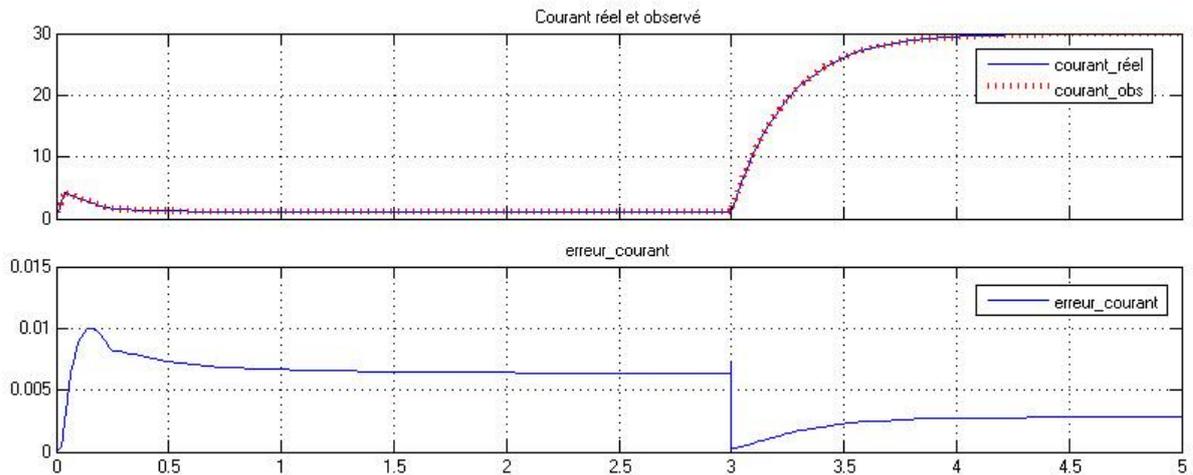


Figure 3.5-1 Réponse de l'observateur en courant avec régulation PID en cas de panne de court-circuit au niveau de l'inducteur

La figure ci-dessus projette les résultats de simulation de l'observateur et l'erreur en courant. Nous constatons que les résultats fournis attestent de la précision de l'observateur utilisé d'autant plus que l'erreur est de l'ordre 1% et donc l'observateur à grand gains et les gains choisis, suivant le lemme de Buhler, sont propices.

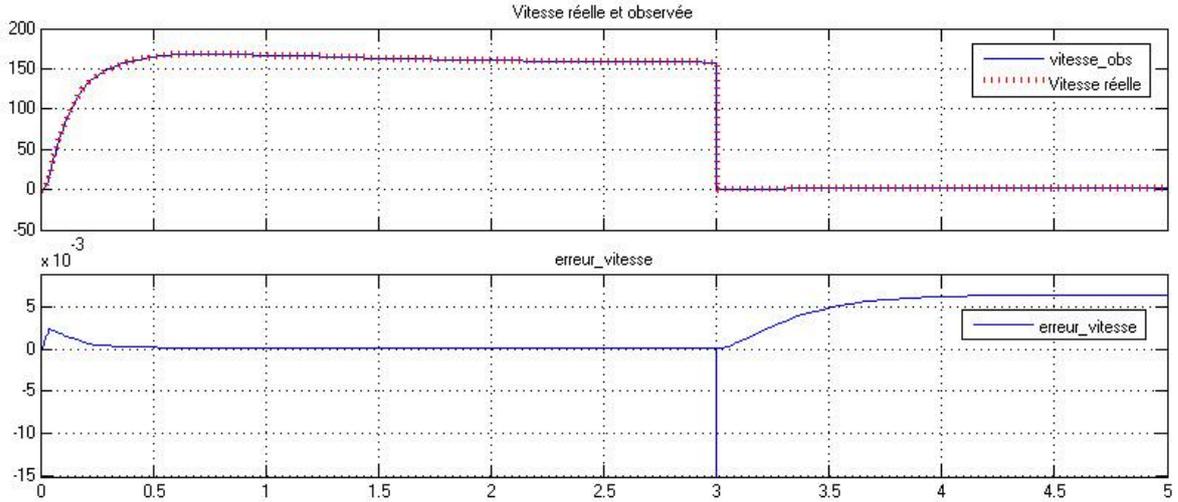


Figure 3.5-2 Réponse de l'observateur en vitesse avec régulation PID en cas de panne de court-circuit au niveau de l'inducteur

De même, les figures montrent la similarité des dynamiques réelle et estimée de l'observateur reflétée par une erreur minimale qui prouve que l'observateur reprend fidèlement le comportement de la machine liée à la chaîne de régulation PID.

3.5.2.2 Simulation de l'observateur de la machine sans régulation PID

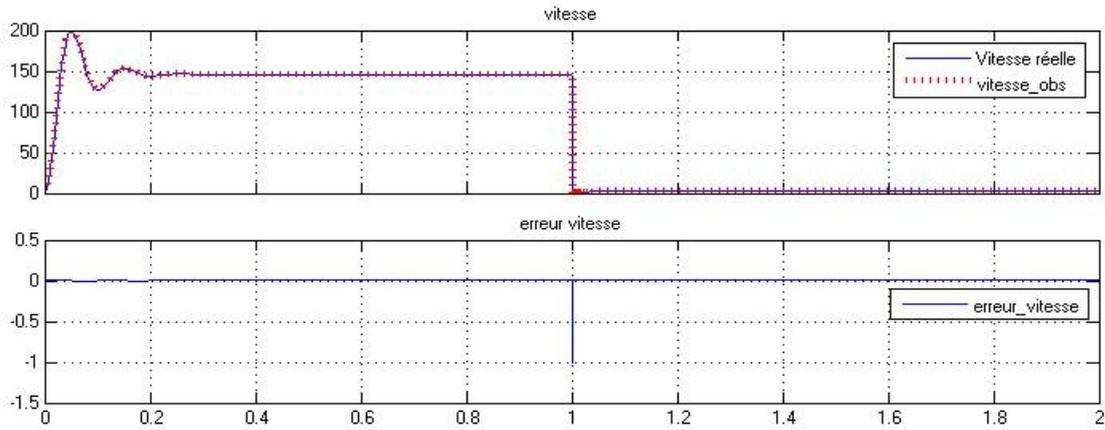


Figure 3.5-3 Réponse en vitesse de l'observateur de la machine DC en boucle ouverte avec défaut de court-circuit au niveau du stator

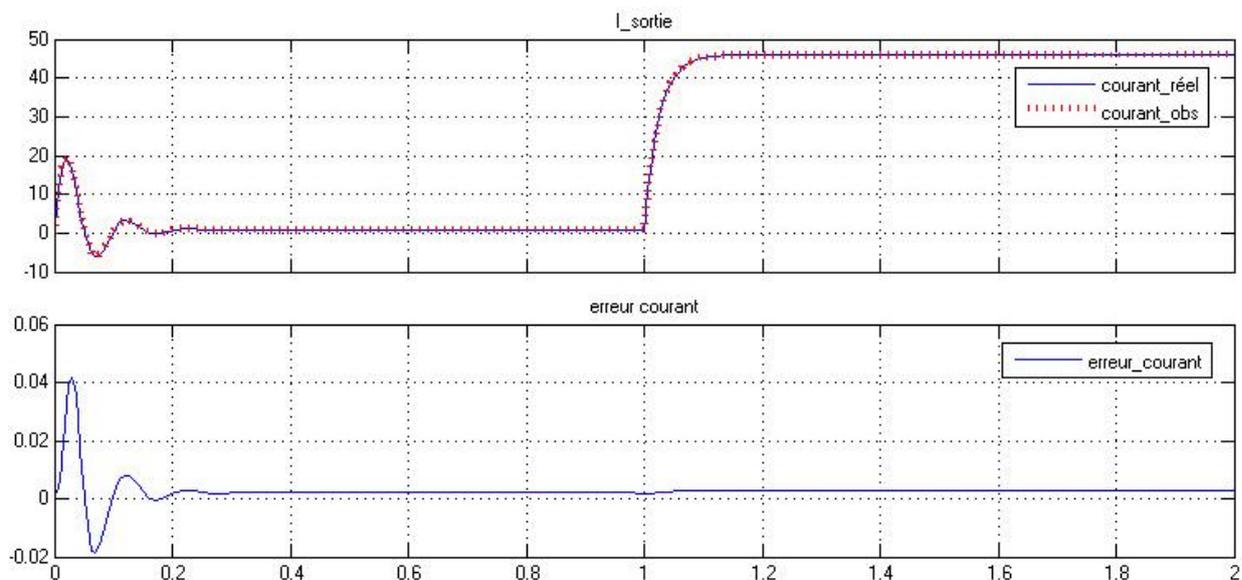


Figure 3.5-4 Réponse en courant de l'observateur de la machine DC en boucle ouverte avec défaut de court-circuit au niveau du stator

Pareillement, et comme montre la figure ci-dessus, nous avons repris la même approche afin de valider le modèle d'observateur. Cependant, nous avons élaboré les simulations sur une machine DC en boucle ouverte et nous avons également introduit la panne de court-circuit au niveau de l'inducteur. D'autre part, nous remarquons que l'efficacité de l'observateur reste invariable.

3.5.3 Calcul du résidu

3.5.3.1 Panne de court-circuit :

Le court-circuit génère un courant très élevé nettement supérieur à la valeur nominale. De ce fait, on utilise cette singularité afin de générer le résidu permettant de détecter cette panne.

Dans ce cas critique, il est impératif de détecter ce genre d'anomalie vu qu'il nuit non seulement à la machine mais aussi à toutes les entités constituant la chaîne de pompage. La détection permettra de déclencher l'alarme et de neutraliser la machine sans la moindre intervention humaine.

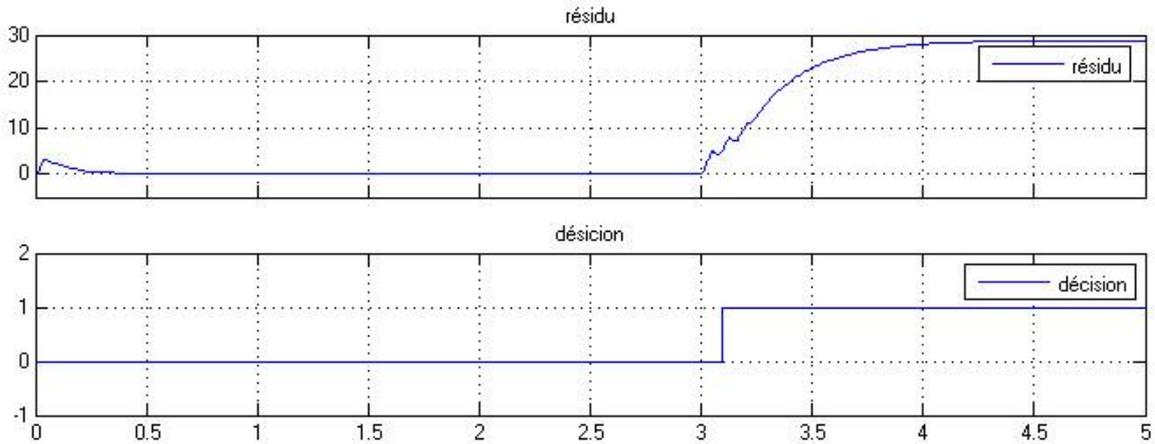


Figure 3.5-5 Graphe des résidus dans le cas de la panne de court-circuit au stator

Le graphe ci-dessus montre le comportement du résidu lors de l'injection du défaut à la 3^{ème} seconde. L'algorithme de détection est efficace et repère le défaut après environ 0.1 seconde.

Ce temps de réponse peut être diminué via la diminution du seuil imposée qui permet de signaler le défaut si le résidu le dépasse, cependant, nous préférons maintenir cette valeur minimale afin d'éviter un signal prévenant à tort de l'imminence d'un défaut.

3.5.3.2 Variations paramétriques

Les variations paramétriques dans les différentes machines électriques sont inéluctables, elles lui sont inhérentes et traduisent par exemple des changements de température et même des saturations magnétiques [70]. Cependant, et lorsque ces variations dépassent des seuils imposés par le constructeur en général, ne refléteraient plus des aléas du fonctionnement normal mais plutôt des défauts qu'on ne peut ignorer ou négliger la sévérité.

Les variations paramétriques, qui dans notre cas présenteraient un éventuel défaut dû aux variations de températures ne sont percevables qu'en cas d'absence du PID.

3.6 Diagnostic de la chaîne

La combinaison des différents défauts et les résultats de simulations permettent de voir l'effet de leur répercussion et propagation dans la chaîne.

Nous n'avons pas eu le temps d'établir la loi de commande permettant de localiser le défaut dans les différents étages de l'installation, néanmoins, nous pouvons dire que le recueil d'informations fourni par les signaux de : puissance du générateur PV, courant et tension du hacheur, couple moteur ou vitesse et courant électrique de la machine s'avèrent indispensables pour la mise au point de n'importe quel algorithme d'identification ou de localisation. Le meilleur exemple qui illustre l'importance des signaux susnommés est celui du hacheur dont l'incidence affecte la puissance du panneau photovoltaïque et également la vitesse en sortie de la machine DC.

Plusieurs méthodes de découplage des défauts électrique et perturbation dans un système donné ont été développées dans la littérature. En effet, le découplage se fait par une transformation appliquée au système avec des défauts et des perturbations pour séparer les deux sous-systèmes, l'un d'eux étant sensible à un seul défaut et insensible aux autres défauts et perturbations.

Cependant, le découplage parfait est difficile à établir et encore plus particulièrement pour les systèmes industriels non linéaires, là où la mise en vigueur des algorithmes de séparation est peu plausible.

3.7 Conclusion

Lors de ce chapitre nous avons établi les différentes méthodes de détection et de localisation du défaut s'il y a lieu ainsi que des algorithmes de prise de décision qui préconisent le mode de fonctionnement de chaque élément à l'aune de l'information recueillie sur l'état du système.

Ce travail s'inscrit dans le cadre des travaux dédiés au diagnostic de différents systèmes ayant en commun des composants avec notre chaine de pompage photovoltaïque.

Egalement, cette étude pourrait servir de plateforme aux prochains travaux ayant pour objectif l'élaboration d'un algorithme global pour le diagnostic de l'intégralité de la chaine et des défauts combinés émanant des compartiments susmentionnés.

Commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques

Chapitre 4 Commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques

4.1 Introduction

La commande tolérante aux défauts permet de maintenir un fonctionnement en mode nominal malgré l'occurrence des anomalies et de s'y accommoder automatiquement. Et donc cette commande maintient la stabilité du système et permet l'obtention des performances exigées dans les modes dégradés ou défaillants.

En mode sain, la commande classique permet seulement de garantir la stabilité du système dynamique et d'amener le comportement à répondre aux performances exigées. Cependant, un seul défaut peut entraîner des réponses non désirées voire même l'instabilité. La commande tolérante aux défauts vient pallier ces insuffisances, cette dernière tient en compte l'effet des défauts pour préserver les performances de l'installation.

Dans le domaine d'aéronautique et du nucléaire, le problème de défaillance est souvent résolu par la redondance matérielle. Néanmoins, cette technique s'avère dispendieuse et requiert de grands moyens de maintenance. D'où l'utilité de la commande tolérante aux défauts qui permet d'alléger les coûts d'investissement et d'entretien. Ainsi, la commande tolérante synthétise la loi de pilotage dans des occurrences précises lorsque les composants du système sont opérationnels ou même défaillants, et ce afin de garantir la stabilité et les performances souhaitées sous n'importe quelle condition.

4.2 Stratégie de la commande tolérante aux défauts

La commande FTC permet de commander un système défaillant pour conserver certaines performances et mener à bien les missions qui lui ont été assignées. Cette commande a deux stratégies de parvenir aux objectifs :

- **Accommodation** : modification de la loi de commande en tenant en compte la défaillance
- **Reconfiguration** : changement la loi de commande en fonction du défaut

Les méthodes de synthèse de la loi de commande tolérante aux défauts sont regroupées suivants deux différentes approches : **une approche passive** et **une approche active** [29].

4.2.1 Approche passive

Cette méthode n'implique aucun dispositif ou schéma de détection de défauts dans la chaîne. Elle garantit en boucle fermée la stabilité et les performances tout en assurant la robustesse vis-à-vis les incertitudes et uniquement quelques défauts. En conclusion, le système défaillant continue à fonctionner avec les mêmes requis d'un système sain en mode nominal. Pour ce faire, le contrôleur reçoit et compare les signaux de référence et les réponses en sortie des outils d'instrumentations pour élaborer la commande qui régit la poursuite du signal de référence et l'adoucissement des perturbations et des défauts prédéfinis.

4.2.2 Approche Active

Contrairement à la commande passive, cette approche amène le système à réagir en fonction des défauts surgissant, et ce, en reconfigurant les lois de commande en temps-réel en réservant la stabilité et la conformité aux finalités exigées. Un mode défaillant avec des performances limitées peut être favorisé sous certaines circonstances, il s'agit d'un mode de fonctionnement dégradée où le principe qui régit la commande est le mécanisme de reconfiguration. Le contrôleur reconfigurable s'adapte automatiquement aux défauts.

4.3 Commande tolérante aux défauts du panneau photovoltaïque

Le générateur PV est le premier élément de la chaîne du système de pompage PV et donc les défauts affectant l'amont de l'installation se propagent tout au long de la chaîne et atteignent le restant des compartiments. D'où la nécessité de la mise au point d'un système de compensation dits de reconfiguration ou de backup permettant de combler les insuffisances en terme de tension ou de puissance fournis au hacheur et donc au hacheur.

Plusieurs architectures de reconfiguration de puissance des panneaux photovoltaïques ont été abordées et citées dans la littérature, ces techniques permettent l'optimisation de l'énergie fournie par les générateurs solaires, et ce en présence des défauts réduisant le rendement et exposant les composants de la chaîne au péril.

4.3.1 Reconfiguration de puissance dans la littérature

Il existe plusieurs types de reconfiguration possible pour compenser les pertes occasionnées par les défauts dans un panneau PV comme l'ombrage solaire qu'il soit partiel ou total [30].

4.3.1.1 Architecture de la NASA : Réagencement de cellules PV

L'algorithme est régi par une matrice de commutateurs programmables dédiés aux cellules photovoltaïques. Cette méthode dote le système d'une autonomie et d'une grande flexibilité vis-à-vis les grandes variations de température et d'irradiation dans l'espace étant donnée l'évolution du satellite dans son orbite et la variation de distance qui le sépare du soleil et donc l'évolution de la température. Cette reconfiguration, permet un réagencement des cellules via la commande des interrupteurs, l'objectif étant d'établir essentiellement deux modes de fonctionnement :

- Mode de chaîne longue : un agencement série des cellules
- Mode de chaîne courte: un agencement parallèle des cellules.

En somme, cette méthode consiste à ré-agencer les cellules ou même les groupements de cellules dans le but d'ajuster la tension globale produite par le générateur PV en fonction des conditions de conversion et donc de l'éclairement et de la température. Le réseau de SASU dédié

aux applications spatiales où les contraintes thermiques sont très accentuées, n'offre qu'un avantage très modeste dans les applications terrestres, le coût et la complexité sont considérablement élevés à cause de l'introduction d'un grand nombre d'interrupteurs commandables.

4.3.1.2 Architecture de l'université de Waterloo : Réarrangement de modules PV et banc supplémentaires

Cette institution a conçu une structure assurant le réagencement des modules photovoltaïques, sa singularité réside dans la mise en place d'un nouveau banc de modules fixes. En d'autres termes, une partie des cellules constituant le générateur PV est non reconfigurable et le restant des cellules doit s'adapter afin de réduire les pertes et le déséquilibre engendrés en courant et en tension. Cette structure est relativement optimale et peu coûteuse vu qu'elle requiert un nombre restreint d'interrupteurs et réduit considérablement la complexité du système.

4.3.1.3 Architecture de LAAS-CNRS et TOTAL SA : Reconfiguration de convertisseur DC-DC

Le concept de cette reconfiguration est basé sur la modification de la connexion des micro-convertisseurs des groupements de cellules ou de modules en fonction de leur ombrage afin d'accommoder leur sortie à la charge et d'y remédier aux insuffisances occasionnées par l'ombrage. L'ensemble des convertisseurs micro-statiques est connecté à la charge via une matrice d'interrupteurs qui assure leur réagencement. L'architecture propose deux avantages majeurs, le premier étant de garantir une production optimale d'énergie en mode dégradé lors de l'ombrage partiel du fait que chaque groupement a son propre MPPT et le second étant la flexibilité de la connexion via les interrupteurs mis en place, qui permet l'agencement des convertisseurs en série ou en parallèle en fonction des besoins requis. Ainsi, et dans l'occurrence d'un défaut repéré au niveau d'un convertisseur statique, les interrupteurs permettent de le déconnecter de la chaîne et de l'isoler en le court-circuitant.

4.3.2 Choix d'approche : reconfiguration modulaire

La technique de reconfiguration des cellules du panneau PV apparaît comme l'approche la plus rentable en matière d'optimalité énergétique. Cependant, elle présente le désavantage majeur d'être relativement onéreuse. Afin d'alléger les coûts supplémentaires occasionnés par la mise au point des interrupteurs de reconfiguration [31], nous avons réduit la structure de l'algorithme de reconfiguration de cellules en un algorithme de réagencement de modules afin d'isoler les différents défauts d'ombrage, fissure ou même connectique et augmenter la performance du générateur PV.

4.3.2.1 Structure du système de reconfiguration au panneau photovoltaïque

Afin de pouvoir établir la technique de reconfiguration et l'algorithme de détection de défauts, on utilise un panneau PV flexible ou plus précisément reconfigurable comme montre la figure ci-dessus. Pour cela, on introduit trois interrupteurs au niveau de chaque i ème cellule, excepté la dernière.

Malgré le fait que les cellules sont étiquetées ou numérotées par indice croissant de gauche vers droite allant jusqu'à $N \times M$, ces indices ne reflètent pas la localisation physique, la configuration ne suit pas nécessairement un ordre de gauche à droite, la configuration dépend essentiellement des états d'interrupteurs dans la chaîne des cellules.

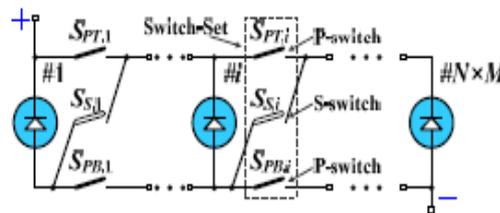


Figure 4.3-1 La cellule reconfigurable et les interrupteurs de commande

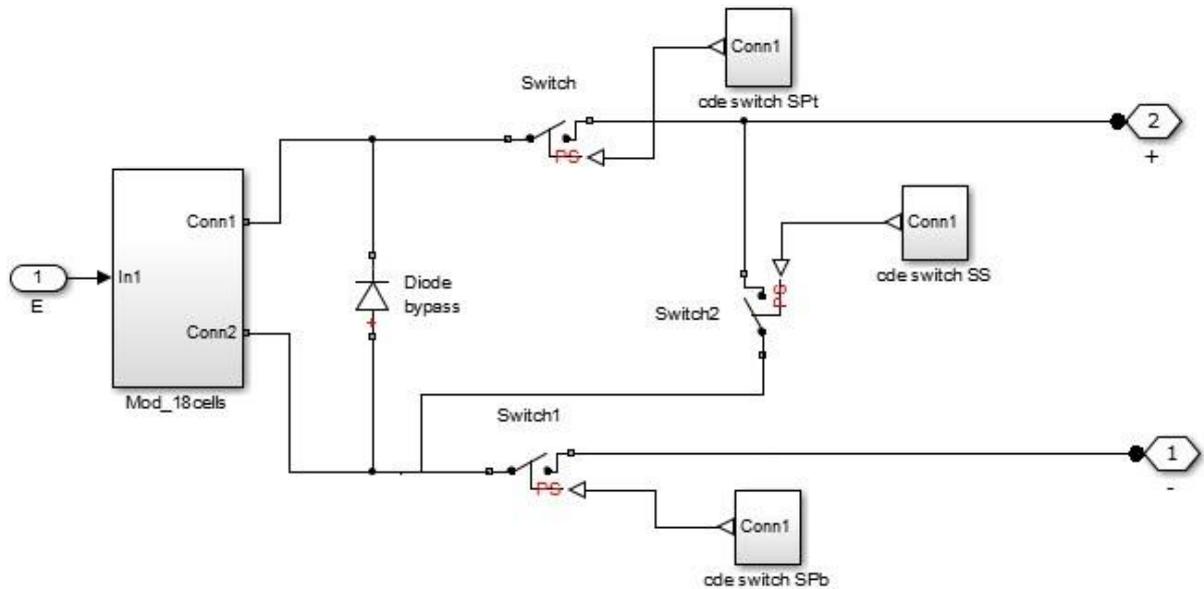


Figure 4.3-2 Structure du module PV reconfigurable

La nouvelle structure du panneau photovoltaïque est très utile pour l’algorithme de détection de défauts, en effet, le PV est subdivisé en plusieurs parties afin de déterminer et comparer les caractéristiques de chacune avec la caractéristique saine. On dénote chaque cellule par l’indice $A = \{1, 2, 3 \dots N \cdot M\}$, lors des essais de détection, la cellule prend un indice de $K \cdot M$ où $K \leq N$ et K prend des valeurs consécutives sélectionnées.

4.3.3 Résultats de simulation

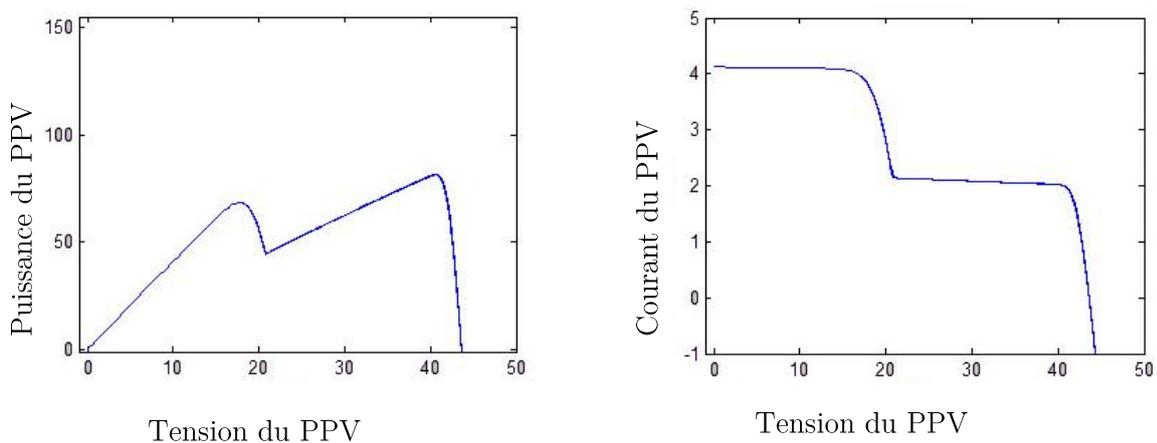


Figure 4.3-3 Puissance électrique et caractéristique statique en cas d’ombrage partiel

La figure précédente représente les graphes de puissance et de la caractéristique statique en cas d'ombrage partiel. Nous remarquons que la puissance a été considérablement réduite.

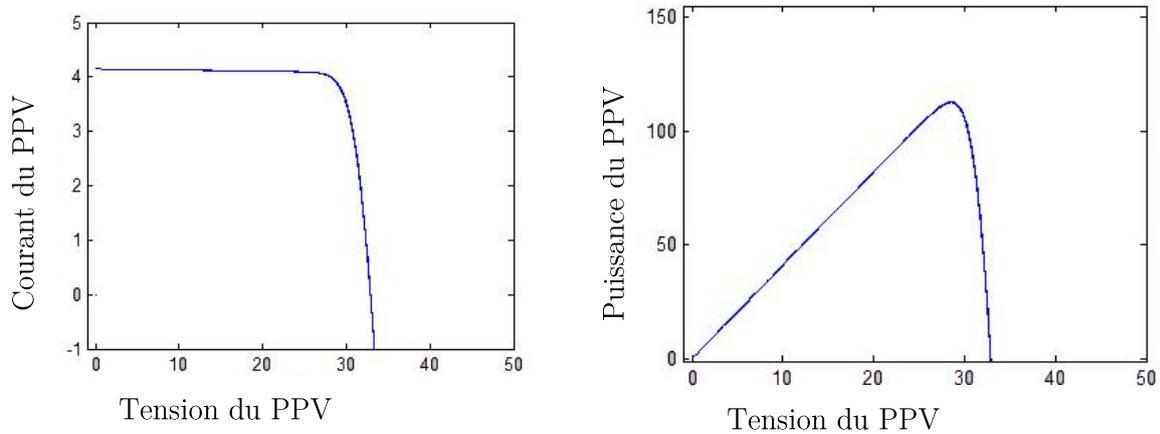


Figure 4.3-4 puissance électrique et caractéristique statique après isolation du module ombré

La figure illustre les résultats de simulation de la reconfiguration de modules. En effet, nous avons isolé le module ombré des trois autres connectés en série afin de maintenir la tension requise par le hacheur. Nous constatons que la puissance a augmenté d'environ 25% et cela représente une augmentation nettement perceptible.

4.4 Commande tolérante aux défauts du hacheur

Nous avons franchi l'étape de diagnostic lors du chapitre précédant et nous entamerons la partie de la FTC dans cette étape afin de pallier les défauts affectant les interrupteurs du hacheur C_{ùk} en question.

Pour ce faire, nous avons mis au point deux autres interrupteurs qui se connectent en série et en parallèle avec l'interrupteur principal comme le montre la figure ci-dessous. Le premier, dit isolant, permet de mettre à l'écart l'interrupteur principal en cas de défaillance et le second, dit redondant, permet d'assurer la commande de l'étage du hacheur en remplaçant l'interrupteur défaillant.

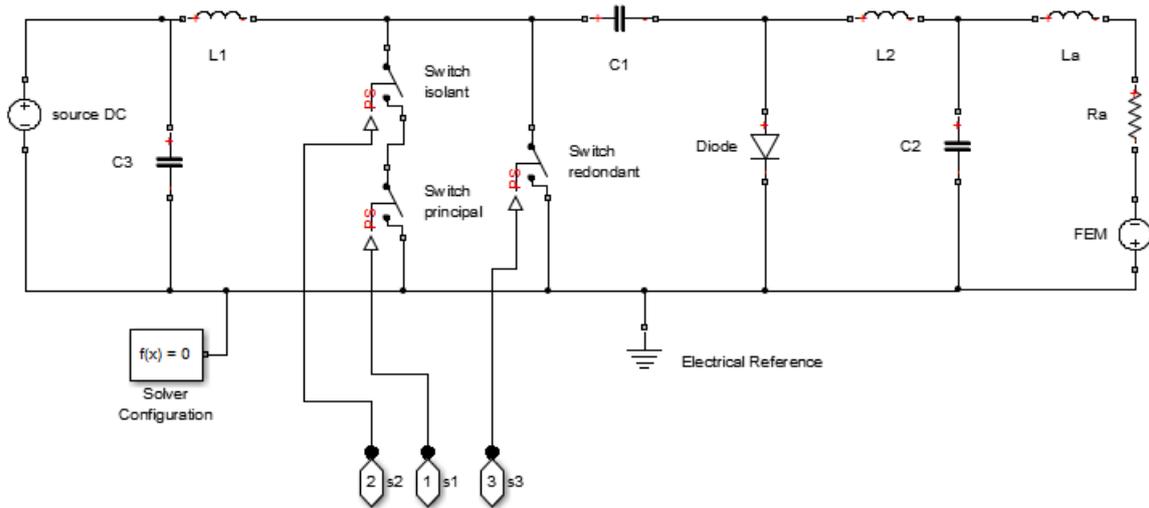


Figure 4.4-1 Hacheur Cuk et les interrupteurs d'isolation et de redondance

4.4.1 Résultats de simulation

Nous avons établi la simulation de ces commandes et nous avons projeté les résultats sur les graphes de la figure suivante.

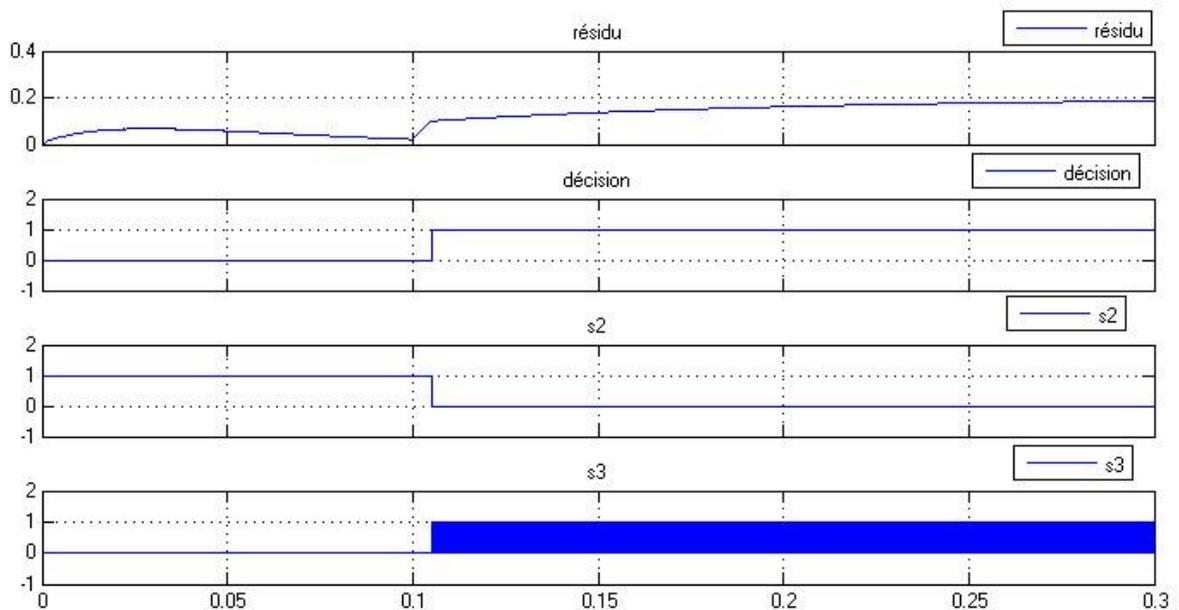


Figure 4.4-2 Commande de la FTC du hacheur

La figure illustre la réponse de l'algorithme de compensation dans le convertisseur DC-DC en cas de défaillance haute ou basse impédance de l'interrupteur.

Nous remarquons que la commande est active et réussit à détecter le défaut en un laps de temps d'environ 0.005 seconde qui représente le temps de réponse de l'algorithme et qui s'affiche idéal pour le redressement du signal après l'apparition du défaut.

4.5 Commande tolérante aux défauts de la machine DC

Dans l'occurrence, on peut éventuellement appliquer une commande active ou une passive afin d'y remédier aux contingences affectant le moteur de la chaîne de pompage à savoir les variations paramétriques [34].

La première approche consiste à une commande PID régie à son tour par une commande de validation dépendant du résidu généré lors de l'étape du diagnostic traitée dans le chapitre précédent. Il s'agit d'une commande active tolérante aux défauts.

La seconde approche est passive et se résume à une commande PID jointe au système qui accomplit son action quels que soient les conditions ou les défauts apparents.

4.5.1 Commande passive

Comme susmentionné dans le paragraphe précédent, la commande passive ne nécessite aucune détection de défauts et agit en permanence sur le système.

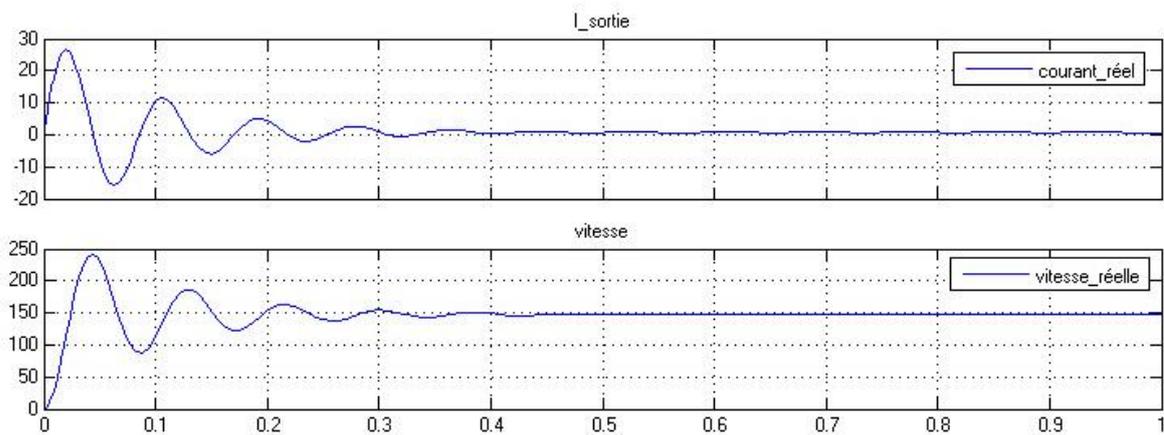


Figure 4.5-1 Courant et vitesse de la machine DC avec une variation paramétrique de 20%

Les variations paramétriques inférieures à 10% sont communément considérées comme étant normales, cependant, lorsque ces variations dépassent ce seuil, elles ne reflètent plus un état sain mais plutôt anormal raison pour laquelle nous avons établi les simulations pour un écart paramétrique de 20%.

Nous remarquons que les variations paramétriques des composantes électriques dans le modèle équivalent de la machine étendent les oscillations dans le mode transitoire étant donné que le modèle est du second ordre et est fonction des constantes du temps dépendantes de l'inductance et la résistance qui influent sur l'allure des graphes.

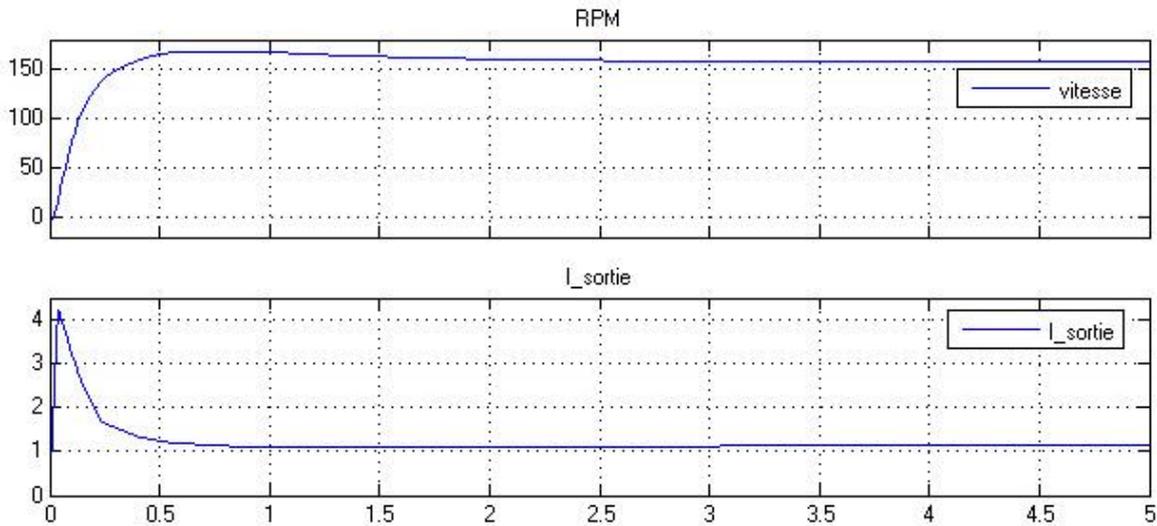


Figure 4.5-2 Courant et vitesse de la machine DC en régulation cascade courant vitesse

Après insertion des régulateurs PID idéaux auto-adaptatifs en cascade, dont l'un est dédié au contrôle de la vitesse et l'autre à la régulation du courant, nous constatons que le correcteur permet de réduire l'ordre du système et donc d'éviter les fluctuations qui nuisent au régime et les dépassements oiseux qui pourraient mettre le système en danger.

Cette commande est robuste et reste opérante dans le mode sain ainsi que le mode défaillant et ne nécessite pas la détection de défauts lorsqu'il s'agit de variations paramétriques dans des marges prédéfinies.

4.6 Conclusion

En ce dernier chapitre nous avons proposé une commande tolérante pour chaque compartiment de la chaîne de pompage photovoltaïque et exposé les résultats de simulation de chaque partie.

Les aboutissements de ce chapitre pourraient être exploités pour la mise en vigueur d'une commande tolérante aux défauts pour le système en entier.

C'est en fait la base d'un travail complémentaire qui sera d'un grand intérêt pour la résolution des problèmes d'autonomie rencontrés dans les zones isolées.

De surplus, le traitement de chaque partie à part sera de bonne usure pour tous systèmes comportant une des entités de la chaîne en question, à savoir, le panneau photovoltaïque, le hacheur Cuk ainsi que la machine à courant continu.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

La présente thèse est le fruit de nos efforts conséquents fournis en dépit des contraintes et des difficultés que nous avons rencontrées dans les différents échelons de la concrétisation de ce projet de fin d'étude.

D'emblée, le premier obstacle fût de concevoir un modèle réel de la chaîne regroupant les différents paramètres requis pour l'éclater sous Matlab et pouvoir y introduire les défauts par la suite.

D'autre part, la lenteur des simulations de la chaîne entière due à la complexité du système consistait une vraie entrave d'autant plus qu'on était tenu des délais impartis.

Enfin, malgré la modélisation ardue sous Simscape nécessitant une compatibilité restreinte entre les différentes bibliothèques, nous avons pu surmonter cette difficulté en adaptant l'environnement de simulation à notre faveur via l'utilisation de la bibliothèque fondamentale compatible avec toutes ses semblables, ainsi, notre modélisation jouit d'une souplesse dont les prochains étudiants peuvent en tirer un grand avantage.

Nous consacrons cette partie à la mise en exergue du bilan de résultats aux quelles notre étude aboutit et nous exposerons les différentes perspectives dont la réalisation au futur permettrait aux applications de pompage photovoltaïque de franchir les obstacles actuels d'autonomie en un seul élan.

En un premier lieu, nous avons modélisé une chaîne de pompage photovoltaïque dotée d'une machine à courant continu sous Simscape de Matlab, le modèle élaboré est flexible étant donné la possibilité d'y introduire les défauts dans n'importe quel compartiment de l'installation, à savoir, le panneau PV, le hacheur Cuk et la machine DC.

Egalement, cette effigie constitue un principal ingrédient pour les modélisations d'autres stations de pompage, éventuellement, elle permet l'insertion d'une machine asynchrone et d'un convertisseur DC-AC à l'évidence pour les applications nécessitant une puissance accrue et en cas échéant l'introduction des systèmes de stockage ou de backup comme des batteries qui pourraient compenser le déficit énergétique au niveau du générateur photovoltaïque si besoin.

D'autre part, nous avons introduit les défauts dans la structure et nous avons projeté les résultats de simulations permettant de les démarquer les uns des autres, et ce, par le biais de l'analyse faite des signaux de mesures des différentes grandeurs.

En outre, nous avons instauré des algorithmes permettant la détection de défaut dans chaque entité à part, cette étape s'avère primordiale dans le diagnostic de l'installation photovoltaïque ainsi que pour n'importe quel système comprenant les éléments diagnostiqués.

Les lois générées de tolérance aux défauts permettront, si la nécessité l'exige, de couper l'alimentation de la chaîne et donc d'empêcher sa dislocation ou même sa perte dans certains cas critiques comme un court-circuit. Aussi, ces règles régissant le comportement du système assureront les performances requises moyennant la correction mise en vigueur suite à la détection de défaut, ces méthodes augmenteront le rendement de la chaîne opérante même sous conditions déplorable.

Cette modeste ébauche s'avère prometteuse étant donnée la multitude d'opportunités offertes au secteur économique et énergétique.

Les prochains travaux peuvent porter sur le finlage des algorithmes élaborés afin de définir des lois de commande globale de tolérance aux défauts qui permettent de régir le comportement de l'installation en fonction des sévérités des défauts récurrents.

La possibilité d'implémenter les commandes utilisées en pratique, et ce, étant donnée l'option proposée par Matlab de convertir les commandes et modèles dans ce dernier vers l'environnement réel.

En somme, cette étude se voit comme la première esquisse du diagnostic d'une chaîne entière de pompage photovoltaïque. Les prochains travaux étendront l'horizon d'études de l'installation qui adviendra à l'évidence inébranlable sous n'importe quelle condition.

Bibliographie

- [1] MEFLAH, A. (2011). Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque.
- [2] Royer, J., Djiako, T., Schiller, E., & Sy, B. S. (1998). Le pompage photovoltaïque. *Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA*.
- [3] BUN, L. Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV. Laboratoire G2ELAB dans l'École Doctorale EEATS. L'université de GRENOBLE.
- [4] MECHALIKH-HAMADA, M. N. C. E. (2013). *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau* (Doctoral dissertation).
- [5] Oi, A. (2005). *Design and simulation of photovoltaic water pumping system* (Doctoral dissertation, California Polytechnic State University, San Luis Obispo).
- [6] Jaafar, A. (2011). *Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance* (Doctoral dissertation, Supélec).
- [7] Arquès, P. (2009). *Diagnostic prédictif et défaillances des machines: théorie, traitement, analyse, reconnaissance, prédiction*. Editions Technip.
- [8] MOKRETARI, N. BENMERABET, M. (2013). *Commande et observation des convertisseurs multicellulaires. Projet de fin d'étude à l'École Nationale Polytechnique*.
- [9] ESRAM, T., & CHAPMAN, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion EC*, 22(2), 439.
- [10] MERLET, R. (1966). Technologie d'électricité générale et professionnelle. Tome III. Bobinage des machines électriques.
- [11] ABB. Installations photovoltaïques. Document d'application technique n°10.
- [12] BENMERABET, M, MOKRETARI, N. (2013). Diagnostic des convertisseurs multicellulaires. Master en automatique à l'École Nationale Polytechnique
- [13] Benzineb, O., Taibi, F., Laleg-Kirati, T. M., Seghir Boucherit, M., & Tadjine, M. (2013). Control and Fault Diagnosis Based Sliding Mode Observer of a Multicellular Converter: Hybrid Approach. *Journal of Electrical Engineering*, 64 (1), 20-30.
- [14] TAGHEZOUIT, B., CHOUDER, A., HADJARAB, A., BOUCHAKOUR, S., ABDELADIM, K., CHERFA, F., & KERKOUICHE, K. Surveillance d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau BT utilisant LabVIEW.
- [15] King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). Photovoltaic Array Performance Model, Sandia National Labs.
- [16] M. Staroswiecki and G. Comtet-Varga. *Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. Automatica*, 37 :687–699, 2001.
- [17] T. Boukhobza. *Contribution aux formes d'observabilité pour les observateurs à modes glissants et étude des commandes par ordres supérieurs. Thèse de doctorat, Paris-Sud, Orsay, novembre 1997*.
- [18] Q. Zhang, M. Basseville, and A. Benveniste. *Fault detection and isolation in nonlinear dynamics systems a combined input-output and local approach. Automatica*, 34(11):1359–1998, 1998.
- [19] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin. *State estimation of uncertain multiple model with unknown inputs. In IEEE CDC, December 14-17, volume 22, Bahamas, 2004*.

- [20] J. Aslund and E. Frisk. *An observer for nonlinear differential algebraic systems*. *Automatica*, 42 :959–965, 2006.
- [21] G. Besançon. *High-gain observation with disturbance attenuation and application to robust fault detection*. *Automatica*, 39 :1095–1102, 2003.
- [22] C. DePersis and A. Isidori. *A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation*. *IEEE Trans. On Autom. Contr.*, 46(6) :853–865, 2001.
- [23] H. Hammouri, P. Kaboré, and M. Kinnaert. *A geometric approach to fault detection and isolation for bilinear systems*. *IEEE Trans. On Autom. Contr.*, 46(9) :1451–1455, 2001.
- [24] B. Jiang and F. N. Chowdhury. *Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers*. *Journal of the Franklin Institute*, 342 :725–736, 2005.
- [25] T. F Lootsma. *Observer-based fault detection and isolation for nonlinear systems*. *Thèse de doctorat, Université d’Aalborg, Danemark, 2001*.
- [26] A. Xu and Q. Zhang. *Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation*. *Automatica*, 40(7) :1181–1193, 2004
- [27] Mahamoud, A. (2010). *Observation et diagnostic de processus industriels à modèle non linéaire: application aux machines électriques* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN)).
- [28] Yassine, B., Samir, L., & Khathir, K. (2013). *Commande Multi-modèle du moteur à courant Continu*.
- [29] Boussaid, B. (2011). *Contribution à la tolérance active aux défauts des systèmes dynamiques par gestion des références* (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy I).
- [30] El Basri, Y. (2013). *Architecture de puissance distribuée reconfigurable dédiée à l’optimisation de l’énergie photovoltaïque* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- [31] Lin, X., Wang, Y., Zhu, D., Chang, N., & Pedram, M. (2012, November). *Online fault detection and tolerance for photovoltaic energy harvesting systems*. In *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design* (pp. 1-6). ACM.
- [32] Bezzaoucha, S. (2013). *Commande tolérante aux défauts de systèmes non linéaires représentés par des modèles de Takagi-Sugeno* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [33] Ribeiro, E., Cardoso, A. J. M., & Boccaletti, C. (2013). *Fault-tolerant strategy for a photovoltaic DC-DC converter*. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(6), 3008-3018.
- [34] Bonivento, C., Isidori, A., Marconi, L., & Paoli, A. (2004). *Implicit fault-tolerant control: application to induction motors*. *Automatica*, 40(3), 355-371.
- [35] Houssein, A., Heraud, N., Souleiman, I., & Pellet, G. (2010, December). *Monitoring and fault diagnosis of photovoltaic panels*. In *Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International* (pp. 389-394). IEEE.
- [36] Marcos, A., Ganguli, S., & Balas, G. J. (2004). *New strategies for fault tolerant control and fault diagnostic*. In *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2003 (SAFEPROCESS 2003): A Proceedings Volume from the 5th IFAC Symposium, Washington, DC, USA, 9-11 June 2003* (Vol. 1, p. 269). Elsevier.

Annexes

Annexe A Définitions et notions générales

Une défaillance

Il s'agit de l'inaptitude d'un dispositif à remplir les exigences fonctionnelles imposées avec les performances requises. Le système est dit indisponible suite à une défaillance.

D'après la norme AFNOR : une défaillance est l'altération ou la cessation d'un ensemble (de composants) à accomplir sa fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques. Après la défaillance d'une entité, celle-ci est en état de panne.

Une dégradation

Elle s'explique par la détérioration progressive du dispositif en question. En, effet, il s'agit d'une diminution de performance des fonctions assurées. On parle de défaillance quand la perte de performance dépasse un seuil préétabli par le constructeur.

Un défaut

C'est comportement malsain qui correspond à un état anormal entraînant un écart de caractéristique entre la réponse observée et la référence prédite en conditions naturelles et normales.

Un défaut mineur

Nuisible au bon fonctionnement du dispositif et occasionne des dommages d'ordre négligeable, ce type de défaut n'empêche pas le système de remplir ses tâches requises.

Un défaut sévère (majeur)

C'est un défaut qui peut réduire à néant l'aptitude du système à assurer sa fonction requise. Il se manifeste au niveau d'éléments clés de l'installation quelle que soit la stratégie déployée et donc, le système devient matériellement incapable de répondre aux objectifs fixés.

Un défaut critique

Il s'agit d'un défaut occasionnant la suppression d'une fonction capitale du dispositif avec un impact sur l'environnement. Ce dernier se manifeste brutalement et entraîne un changement discontinu de la dynamique du système ou même la modification de la structure de l'installation en cas de perte d'un actionneur ou d'un capteur.

Un défaut catastrophique

Entraîne la perte d'une fonction essentielle du dispositif, et de surplus, altère le système, cause des dommages au milieu environnant et aux personnes.

L'isolation du défaut dans la chaîne du système

Il s'agit de la détection du défaut par le résidu, un signal généré qui permet en premier lieu d'identifier l'occurrence du défaut surgissant et de l'isoler dans la seconde étape. Les algorithmes qui aident à la mise en vigueur de ces approches sont le FDI (Fault Detection and Isolation).

La détection

C'est l'étape qui tranche si le système subit une défaillance ou pas. Généralement, elle consiste à générer le vecteur résidu, non nul en fonctionnement normal, et à le comparer en ligne aux signatures de pannes (caractéristique de chaque défaut). La détection en résulte de la vérification d'un dépassement de seuil par les résidus.

La localisation

C'est l'étape qui permet de localiser le défaut dans la chaîne du système et donc de déterminer quelle partie de ce dernier est affectée par l'anomalie détectée.

L'identification

C'est la dernière étape, elle consiste à déterminer les conjonctures ou les causes qui ont occasionné cette situation anormale. Ces causes cependant, peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie du système), ou bien externes au système.

La performance d'un système de diagnostic

On déduit la performance à l'aune des critères suivants :

- **La détectabilité du défaut :**

Un défaut est détectable si et seulement si, il a un effet sur au moins une sortie du système. Et donc un système doit détecter ou percevoir une défaillance particulière si elle apparaît.

- **La localisation :**

C'est l'aptitude de la procédure de détection à repérer (c'est à dire localiser) plusieurs défaillances à condition que ces défauts soient détectables.

- **La sensibilité :**

Elle se définit par la capacité à détecter des défauts d'une ampleur ou d'une amplitude donnée. Elle dépend en particulier de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

- **La robustesse**

C'est la capacité de la technique à détecter les défauts indépendamment des erreurs et imprécisions de modèle du système et des perturbations extérieures.

- **La rapidité de la détection**

Un critère impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel.

Une classification suivant les causes qui ont provoqué la défaillance :

- Mauvais emploi, exemple : une commande
 - Faiblesse inhérente
 - Usure normale
 - Défaillance seconde
- 
- Défaillance première

Une dernière classification selon les conséquences :

- Défaut mineur
- Défaut majeur
- Défaut critique
- Défaut catastrophique

Diagnostic du panneau photovoltaïque

Méthodes électriques

Ces méthodes sont très courantes et reposent sur l'analyse de la caractéristique du champ PV et donc, les grandeurs mesurées sont :

- Le courant débité par le module photovoltaïque
- La tension fournie par le module PV
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du champ PV

Ces approches peuvent faire appel à d'autres grandeurs physiques comme la température ambiante et l'irradiation qui influent directement la production énergétique. En l'occurrence, des capteurs doivent être mis en place et connectés à un automate connecté à un onduleur, cet automate regroupera les informations recueillies afin de les enregistrer et/ou les communiquer sur un serveur distant.

D'autres mesures peuvent être prélevées dans le côté alternatif de la chaîne de conversion, ces mesures sont importantes d'un point de vue économique du fait qu'elles sont liées à l'énergie commercialisée. Il s'agit de mesurer :

- Le courant AC
- La tension AC
- La fréquence du signal généré
- L'impédance du réseau

Les mesures obtenues en DC et en AC permettent respectivement de déterminer la puissance instantanée produite dans l'étage continu ainsi que dans l'étage alternatif de la chaîne PV.

Cependant, la maintenance curative ou préventive requiert généralement les mesures de tension et de courant du string PV afin d'identifier le déséquilibre engendré par un défaut au niveau de l'onduleur.

Méthodes non-électriques

Il existe plusieurs techniques de diagnostic de défauts surgissant au niveau de la cellule PV, on peut citer les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence, tests de thermographie qui sert essentiellement à diagnostiquer le défaut principal de la fissure de cellule. Cependant, la technique de l'imagerie par infrarouge reste indéniablement la plus utilisée pour le diagnostic de modules PV. Son concept repose sur le fait que chaque élément physique émet un rayonnement infrarouge d'une longueur d'onde mesurable qui dépend de la température du matériau. L'analyse de la répartition de chaleur au niveau de module permet de percevoir et localiser différentes anomalies comme la corrosion de la boîte de jonction, le hot-spot, une cellule court-circuitée et bien évidemment l'échauffement excédé de cellules.

Autres méthodes suggérées dans la littérature

Plusieurs méthodes de diagnostic ont été évoquées dans la littérature. On peut citer :

Les méthodes de réflectométrie

Elle repose sur l'analyse du signal transmis dans le système ou dans la chaîne à diagnostiquer. La diffusion du signal est régie par la loi de propagation dans les milieux. Le défaut dans la chaîne donne lieu à une discontinuité qui provoque le renvoi d'une partie du signal émis à la source d'injection. L'étude de ce signal réfléchi permet d'évaluer l'état du système en question à l'exemple des strings photovoltaïques. En effet, les signaux de types échelon et impulsion peuvent être utilisés pour diagnostiquer les modules PV et détecter des défauts de types : circuit-ouvert, court-circuit et même une augmentation d'impédance.

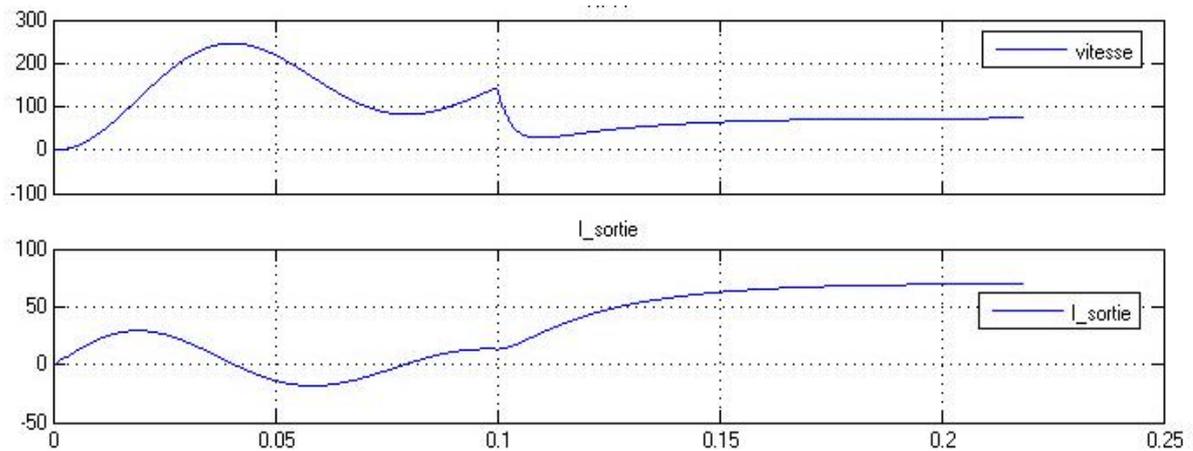
Analyse du point de fonctionnement

Le principe consiste à comparer la puissance instantanée et la puissance maximale dans les conditions d'éclairement et température ambiante. Cette comparaison entre les courants et les tensions permet de conclure sur l'état du générateur PV dans les groupements de défauts suivants :

- Modules ou strings défectueux
- Ombrages, défaut de commande MPPT et vieillissement

Annexe B Résultats de simulation des défauts combinés

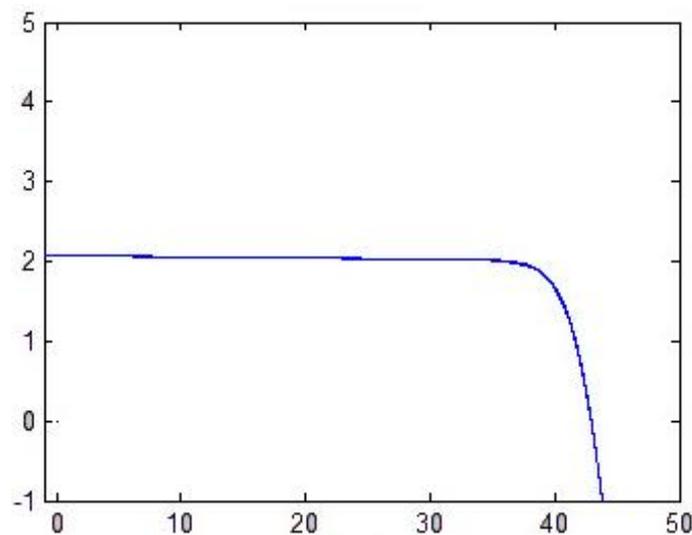
Panne de court-circuit au niveau de la machine DC



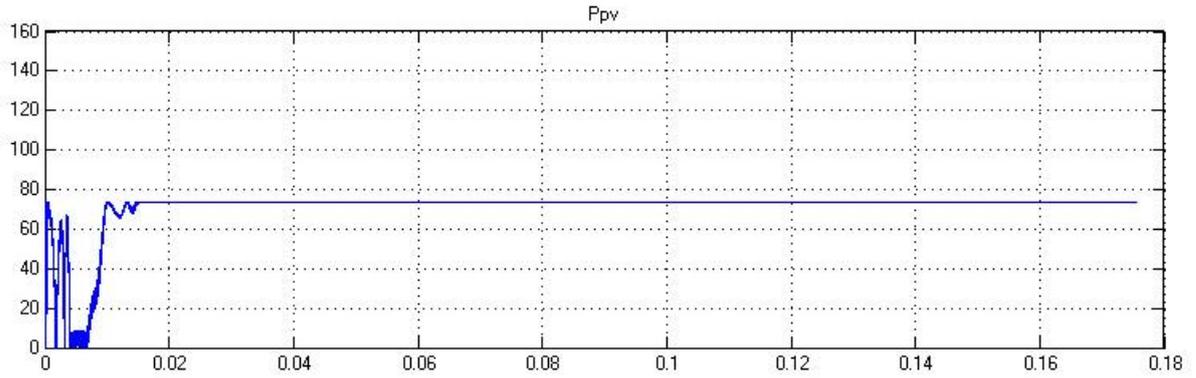
Graphe de la vitesse en cas de panne de court-circuit au niveau de la machine

Combinaison de variations paramétriques et d'un ombrage

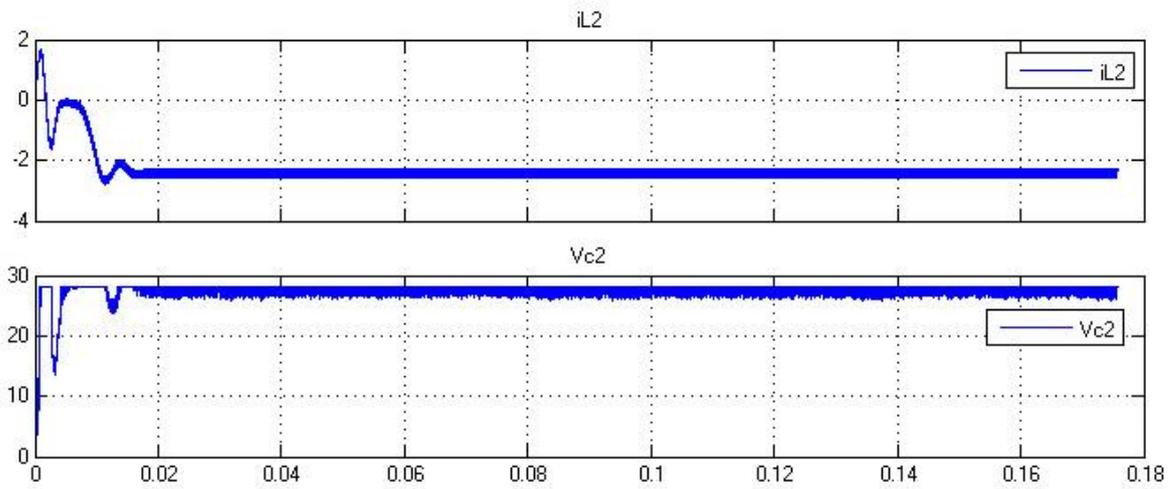
Nous avons établi les simulations des défauts combinés, pour cette partie, avec un ombrage de 50% et également une variation paramétrique introduite au niveau de la résistance R dans le modèle équivalent de la machine.



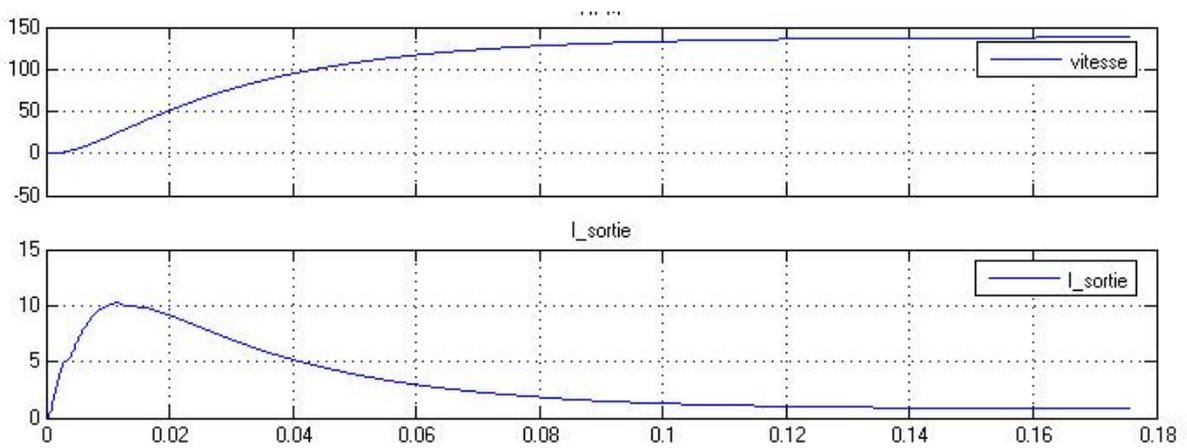
Caractéristique statique



Puissance électrique générée par le panneau PV



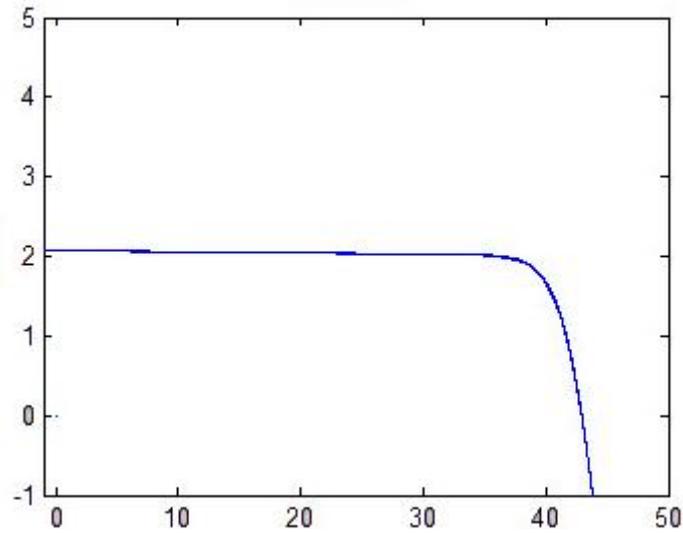
Courant et tension de sortie au hacheur



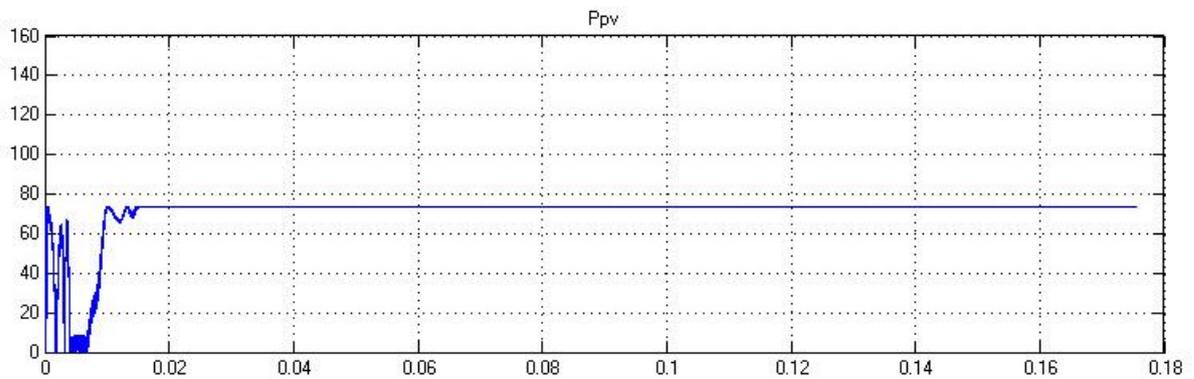
Vitesse et courant électrique de la machine DC

Défaillance au niveau du hacheur Cuk ainsi qu'une variation paramétrique de la résistance de la machine DC

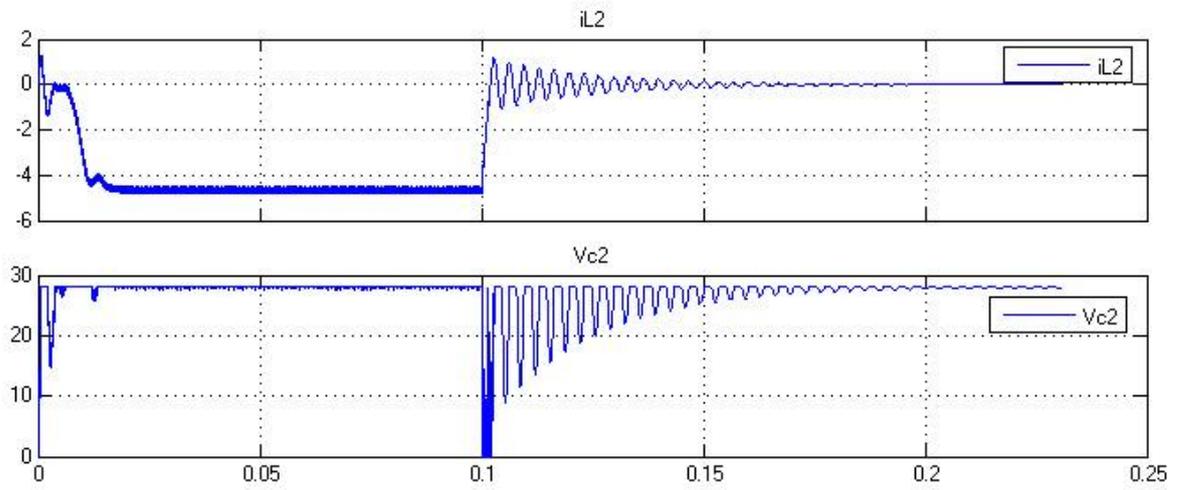
Lors de cette simulation nous avons introduit une défaillance de basse impédance au niveau du hacheur et nous avons également ajouté une variation paramétrique de la résistance de la machine, cette variation est estimée à 20%



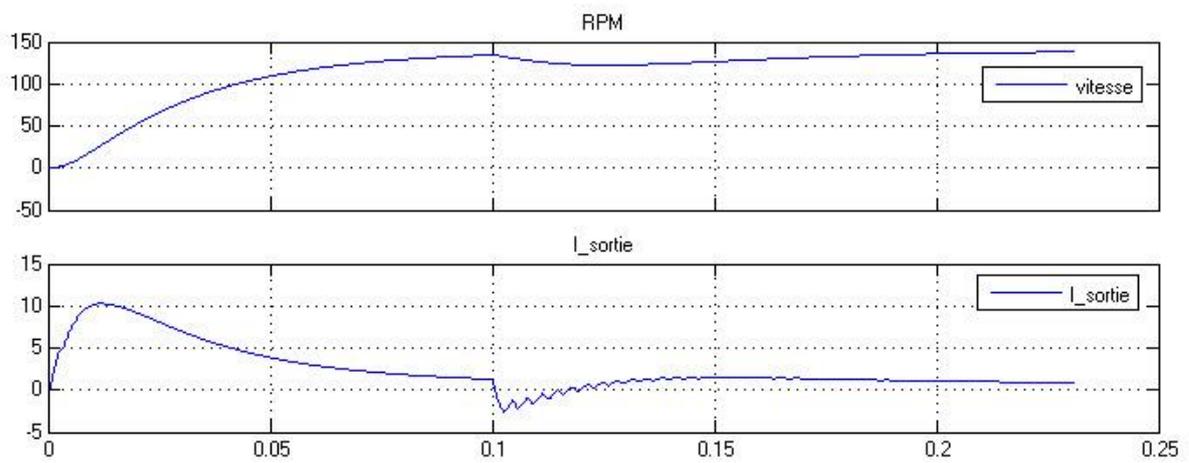
Caractéristique statique du panneau PV



Puissance du panneau photovoltaïque



Courant et tension au niveau du hacheur cuk



Vitesse et courant au niveau de la machine DC

Annexe C Fiches techniques

Le hacheur Cuk:

Spécification	
Tension d'entrée	20-48 V
Courant d'entrée	0-5A
Tension de sortie	12-30V
Courant de sortie	0-5 A
MPP	150W
Fréquence de commutation	50KHz
Rapport cyclique	$0.1 < D < 0.6$

Paramètres	valeur
C1	0.47 μ F
C2	22 μ F
L1	1.5 mH
L2	1.5 mH

Le Panneau PV

Le module utilisé est BP Solar BP SX 150S

Caractéristiques	
Nombre de cellules	72
Configuration	Série
Tension de circuit ouvert	43.5V
Courant de court-circuit	4.75A
Tension du point de fonctionnement	34.5V
Courant du point de fonctionnement	4.35A
Puissance maximale	150W

La machine à courant continu

Paramètres	valeurs
Ra	0.2 Ω
La	10 mH
Ke	1.8 v/ (rad/s)
J	0.05 kg*m ²
Fr	0.02 N*m/ (rad/s)