



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ÉLECTECHNIQUE

**THÈSE DE DOCTORAT**  
**3<sup>ème</sup> Cycle LMD**  
SPÉCIALITÉ : ÉLECTROTECHNIQUE

Présenté par

**M. Rabah ROUAS**

Sujet

**Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque**

Soutenue publiquement le : --/--/2018, devant le jury d'examen composé de :

M. MANSOURI Rachid	Professeur, UMMTO	Président
M. HADDAD Salah	Professeur, UMMTO	Rapporteur
M. BENAMROUCHE Nacereddine	Professeur, UMMTO	Co-Rapporteur
M. REKIOUA Toufik	Professeur, UAM Bejaïa	Examineur
M. OTMANE-CHERIF Tahar	Professeur, UMMTO	Examineur
M. BOUTORA Youcef	MCA, UMMTO	Examineur

Directeur de thèse : Professeur Salah HADDAD

Codirecteur de thèse : Professeur Nacereddine BENAMROUCHE

Laboratoire de Technologies Avancées en Génie Electrique (LATAGE), Département d'Electrotechnique, Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Université Mouloud Mammerrri de Tizi-Ouzou.

## *Remerciements*

*Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été réalisés au Laboratoire des Techniques Avancées du Génie Electrique (LATAGE) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.*

*C'est pour moi autant de plaisir qu'un devoir d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur Salah HADDAD, professeur à l'UMMTO, d'avoir assumé la lourde responsabilité d'être mon directeur de thèse, avec qui j'avais le plaisir de travailler tout au long de cette thèse, pour ses efforts fournis, ses conseils, sa patience et sa persévérance dans le suivi de mon travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur Nacereddine BENAMROUCHE, professeur à l'UMMTO pour son aide, sa disponibilité et pour la patience dont il a fait preuve à mon égard.*

*Je voudrai aussi témoigner ma reconnaissance à Monsieur Madjid SI BRAHIM pour son aide précieuse qu'il m'a apportée.*

*J'exprime mes vifs remerciements et ma reconnaissance à mes enseignants qui ont participé d'une grande part dans mon parcours scientifique.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à tous les membres du laboratoire LATAGE pour leur disponibilité et leur aide.*

*Merci pour Monsieur Rachid MANSOURI, professeur à l'UMMTO d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. C'est pour moi un honneur qu'il préside mon jury.*

*Que Monsieur Toufik REKIOUA, professeur à l'UAM de Bejaia, trouve ici, l'expression de ma profonde reconnaissance. C'est avec un grand plaisir que je le vois prendre part à ce jury.*

*Je remercie vivement Monsieur Youcef BOUTOURA, maître de conférence classe A à l'UMMTO d'avoir accepté de participer à ce jury.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur Tahar OTMANE-CHERIF, professeur à l'UMMTO d'accepter de prendre part au jury de ma thèse.*

Ces remerciements ne sauraient être complets si je ne citais les personnes qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes ces années :

*Je tiens en premier lieu à remercier mes chers parents qui ont éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenu, c'est grâce à leurs encouragements que j'ai pu mener ce travail à son aboutissement, qu'ALLAH les protège et les garde aussi longtemps parmi nous et pour nous.*

*Je tiens aussi à remercier mon frère Ghiles, mes sœurs et toute ma famille qui m'ont vivement aidé durant la préparation de cette thèse.*

*Je remercie vivement ma femme pour toute l'aide précieuse qu'elle m'a apportée, sa patience, son soutien dans les moments les plus difficiles et son encouragement permanent.*

*Je remercie enfin toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	1
 <b>Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE RENOUELEBLE ET LES SYSTÈMES HYBRIDES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE</b>	
I Introduction.....	3
II Les énergies renouvelables.....	3
II.1 L'hydraulique .....	4
II.2 Le solaire .....	4
II.3 L'éolienne .....	5
II.4 La biomasse .....	6
II.5 La géothermie .....	6
II.6 Les énergies marines .....	7
II.7 L'hydrogène .....	7
III Définition d'un système hybride.....	8
IV Architectures d'un système hybride.....	8
IV.1 Architecture série.....	8
IV.1.1 Configuration à bus à courant continu.....	8
IV.1.2 Configuration à bus à courant alternatif.....	9
IV.2 Architecture parallèle.....	10
V Les principaux composants d'un système hybride.....	10
V.1 Le générateur éolien .....	10
V.2 Le générateur photovoltaïque .....	11
V.3 Les sources conventionnelles .....	12
V.4 Les batteries de stockage .....	13
V.5 Le système de supervision .....	13
V.6 Les convertisseurs .....	14
VI Etude des Structures de systèmes hybrides .....	15
VI.1 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle.....	15

VI.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle.....	15
VI.1.2 Systèmes éoliens/source conventionnelle.....	18
VI.1.3 Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel.....	18
VI.2 Systèmes hybrides sans source d'énergie conventionnelle.....	19
VI.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	19
VI.2.2 Système hybride éolien/stockage.....	20
VI.2.3 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage.....	21
VI.2.4 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage.....	22
VII Classification des systèmes hybrides .....	22
VIII Conclusion .....	23

## **Chapitre II : MODÉLISATION DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE**

I Introduction.....	24
II Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	24
III Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	25
IV Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	26
IV.1. Courant de court circuit .....	26
IV.2 Tension de circuit ouvert.....	26
IV.3 Facteur de forme.....	27
IV.4 Rendement.....	27
V Module photovoltaïque.....	27
IV.1. Mise en série.....	28
IV.1. Mise en parallèle.....	28
VI Caractéristiques du module photovoltaïque.....	29
VII Système de conversion photovoltaïque.....	31
VIII Résultats de simulation.....	33
IX Conclusion .....	35

**Chapitre III : MODÉLISATION DU GÉNÉRATEUR ÉOLIEN**

I Introduction .....	36
II Modélisation de la génératrice asynchrone.....	36
II. 1 Modèle linéaire de la machines asynchrone.....	37
II.2 Modèle de la machines asynchrone en tenant compte de la saturation.....	41
II.3 Choix du référentiel de travail .....	45
II.4 Modèle de la machines asynchrone en tenant compte des pertes fer.....	46
II.4.1 Schéma équivalent de la GAAE .....	46
II.4.2 Modèle dynamique conventionnel de la GAAE avec prise en compte des pertes fer .....	48
II.4.3 Modèle dynamique simplifié de la GAAE avec prise en compte des pertes fer .....	49
II.5 Le processus d'auto-amorçage .....	52
II.5.1 Description du phénomène d'auto-amorçage.....	52
II.5.2 Modélisation du phénomène d'auto-amorçage.....	54
II.6. Résultats et discussions.....	54
III Commande en puissance du générateur éolien.....	59
III.1 Modélisation du redresseur à MLI.....	59
III.1.1 Modélisation dans le repère abc coté alternatif.....	60
III.1.2 Modélisation dans le repère abc coté continu.....	63
III.2 La commande directe de puissance DPC.....	63
III.2.1 Calcul des puissances instantanées.....	64
III.2.2 Comparateur à hystérésis.....	65
III.2.3 Détection de secteur.....	66
III.2.4 Table de commutation.....	67
IV Résultats de simulation.....	67
V Conclusion.....	71

<b>Chapitre IV : ÉTUDE ET COMMANDE DU SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN- PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
I Introduction.....	73
II Présentation du système global.....	73
III Chaîne de conversion éolienne.....	75
III.1 Présentation de la chaîne de conversion éolienne.....	75
III.2 Commande du hacheur série.....	75
III.3 Résultats de simulation de la chaîne éolienne et discussions.....	78
IV Chaîne de conversion photovoltaïque.....	81
IV.1 Résultats de simulations de la chaîne photovoltaïque et discussions.....	81
V Chaîne de stockage.....	83
V.1 Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel.....	84
V.2 Commande du système de stockage.....	85
V.3 Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel.....	85
V.3.1 Mode charge.....	85
V.3.2 Mode décharge.....	85
V.4 Résultats de simulations du système de stockage et discussions.....	86
VI Stratégies de gestion du système hybride.....	87
VI.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion.....	88
VI.2 Résultats de simulations et discussions.....	91
VII Conclusion.....	96
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXE</b>	
Annexe A.....	i
Annexe B.....	ii
Annexe C.....	iii

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Actuellement, la plus grande part des gisements énergétiques mondiaux est consacrée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [Lop 08]. En troisième place nous trouvons le nucléaire. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité à partir des barrages et aux cours d'eau. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle nous le trouvons avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie [Ben 12].

Dans le monde entier les chercheurs incitent à changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Dans ce contexte, ces énergies sont appelées à remplacer les autres ressources fossiles et le nucléaire afin de répondre aux exigences actuelles [Bor 96]. En effet, leur utilisation est une solution inépuisable, non polluante et bien adaptée à la production décentralisée.

Cependant les énergies solaire et éolienne présentent un inconvénient commun défini par leur caractère aléatoire et leur dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps [Yan 08]. Afin de pallier à cet inconvénient, les chercheurs approuvent l'utilisation des systèmes hybrides dans le but de combiner plusieurs sources d'énergies renouvelables pour assurer une alimentation continue quel que soient les conditions climatiques et météorologiques.

Le système hybride que nous proposerons dans cette thèse combinera deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien-photovoltaïque servira d'alimentation en énergie électrique des zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. En cas d'absence de soleil et de vent,

des batteries de stockage et un générateur diesel seront prévus pour l'alimentation de secours.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres traitant respectivement les thèmes suivants :

Le premier chapitre est consacré à la définition du système hybride, ses différents composants, ses différentes architectures ainsi qu'au développement d'un état de l'art sur ses différentes structures.

Le second chapitre porte sur le développement sous l'environnement « Matlab » du modèle d'un panneau photovoltaïque muni d'un dispositif de commande lui permettant de fonctionner en site isolé dans les conditions optimales pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre traite dans un premier temps du développement de modèles dynamiques de la génératrice asynchrone auto excitée (GAAE) en tenant compte de la saturation et des pertes fer et leur comparaison en termes de précision et de consommation de temps. Puis dans un second temps, il traite de l'application de la commande directe de puissance DPC, au générateur asynchrone auto-excité débitant sur une charge à travers un redresseur à MLI.

Le quatrième chapitre est dédié d'une part, à l'étude du système hybride global d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage. Nous dimensionnerons les trois chaînes de sources d'énergie composant le système que nous connecterons par la suite vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge et des conditions climatiques.

D'autre part, ce chapitre est aussi dédié à la commande du système hybride en proposant un algorithme de gestion pour déterminer les modes de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant autant que possible les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries).

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs, mettant en relief les principaux enseignements et dressant une liste de travaux jugés intéressants à réaliser dans l'avenir.

## Chapitre I

### GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET LES SYSTÈMES HYBRIDES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE

#### I. Introduction

Afin de changer la vision ancienne dans la production de l'électricité, les chercheurs appellent aux ressources d'énergies renouvelables.

Cependant, ces dernières présentent un inconvénient commun par leur caractère aléatoire et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps.

Pour cela les systèmes hybrides combinés entre plusieurs formes d'énergie font l'axe principal de plusieurs travaux de recherches pour les sites éloignés du réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différents types d'énergies renouvelables, puis nous définirons le système hybride ainsi que ses différents composants. Ensuite, nous donnerons les différentes architectures des systèmes hybrides, à savoir l'architecture série et parallèle. Enfin, nous développerons un état de l'art sur les différentes structures des systèmes hybrides.

#### II. Les énergies renouvelables

Plusieurs types d'énergies sont classées comme suit (figure I.1) :

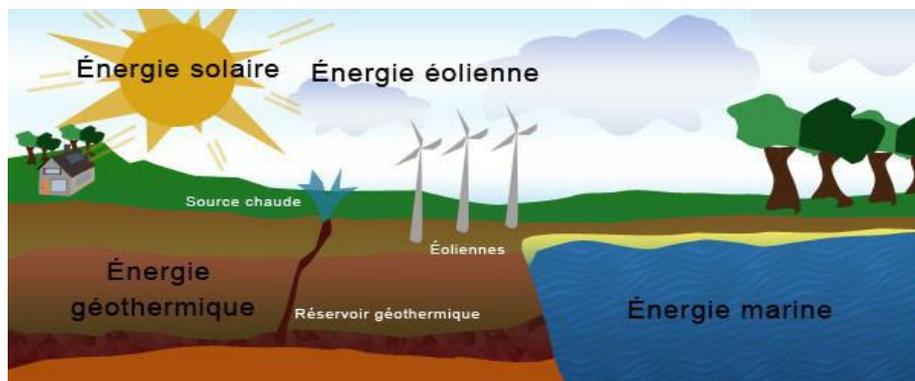


Figure I.1 Les énergies renouvelables.

## II.1 L'hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (figure I.2). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [Dar 11].

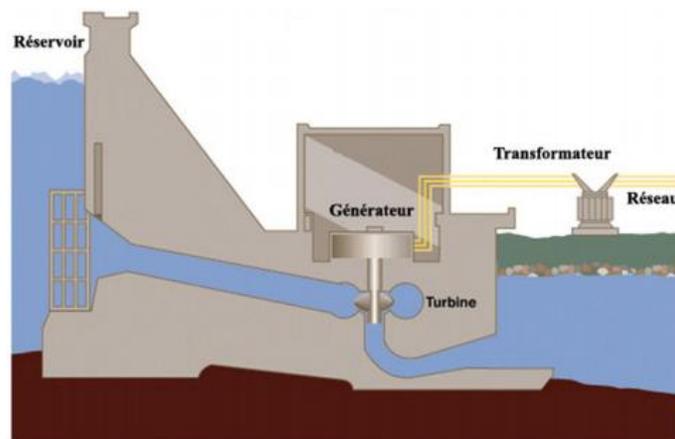


Figure I.2 Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.

## II.2 Le solaire

Cette catégorie est connue par deux grands types d'énergies. La première, thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [Ger 02]. La deuxième, photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire (figure I.3).



Figure I.3 Énergie solaire thermique.

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production énergétique à partir des modules photovoltaïques n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie, puisque le rendement des panneaux photovoltaïques est relativement faible [Dar 11].

### II.3 L'éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté. [Ken 11]

Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou axe horizontal (figure I.4)

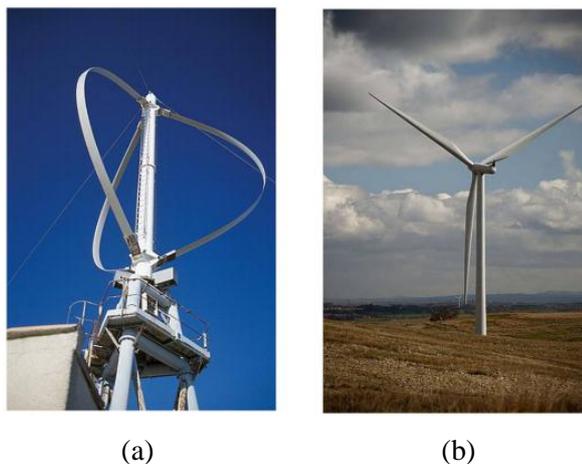


Figure I.4 Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b).

## II.4 La biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [Mir 05]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, ce qui est bien montré par la (figure I.5). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [Dar 11].

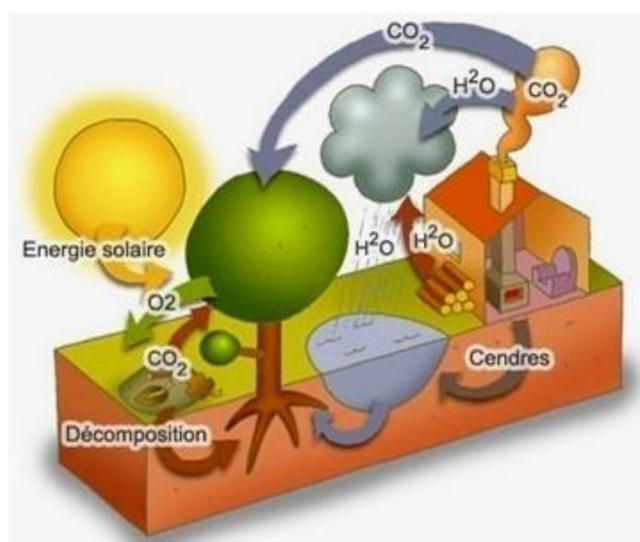


Figure I.5 Énergie Biomasse.

## II.5 La géothermie

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels [Haf 12]. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie

entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [Mir 05].

## II.6 Les énergies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Toute comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir.

## II.7 L'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme étant une énergie très abondante, plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel. Il n'est ni polluant, ni toxique, tant dis qu'il pourrait répondre à tous nos besoins grâce à ses avantages :

- L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre (eau, hydrocarbures,...etc).
- L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées, la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [Zho 09].

### **III. Définition d'un système hybride**

Un système hybride est un système qui fait intervenir au moins deux sources d'énergie renouvelable comme un panneau photovoltaïque, une éolienne, une pompe hydraulique,... etc.

Souvent, ces sources renouvelables sont associées à une source conventionnelle comme un générateur diesel, nécessaire pour délivrer une puissance en continue. En plus des sources d'énergies renouvelables, les systèmes hybrides associent des dispositifs de stockage comme les batteries, les super condensateurs, les piles à combustible,...etc. Les systèmes hybrides dits "isolés" fonctionnent en autonomie par rapport aux réseaux de distribution électriques.

L'objectif principal d'un système hybride est de répondre à la demande de la charge en favorisant l'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à celle fournie par les sources auxiliaires comme le groupe Diesel.

La performance d'un système hybride en termes de rendement et de durée de vie, est influencée d'une part par la conception, c'est-à-dire par le dimensionnement des différentes composantes qui le constitue, la technologie de ces composantes, l'architecture,...etc. D'autre part, cette performance dépend aussi du choix de la stratégie de gestion considérée.

### **IV. Architectures d'un système hybride**

Afin de présenter les différentes architectures d'un système hybride autonome, nous considérons dans ce travail, un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne, de batteries de stockage et d'un groupe diesel. Les différentes architectures d'un système hybride se divisent en deux grandes familles : l'architecture série et l'architecture parallèle.

#### **IV.1 Architecture série**

##### **IV.1.1 Configuration à bus à courant continu**

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées à un même bus à courant continu (CC) comme l'indique la figure (I.6). Pour cette architecture, les tensions délivrées par les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension continue grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC).

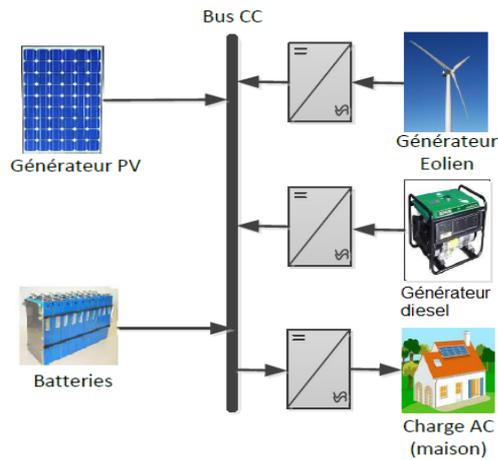


Figure I.6 Configuration d'un système hybride à bus CC.

#### IV.1.2 Configuration à bus à courant alternatif

L'architecture à bus à courant alternatif (CA) s'est développée grâce à l'émergence de l'électronique de puissance et de l'apparition des onduleurs plus performants. Cette architecture dispose d'un seul bus CA sur lequel sont connectés tous les modules du système hybride (figure I.7).

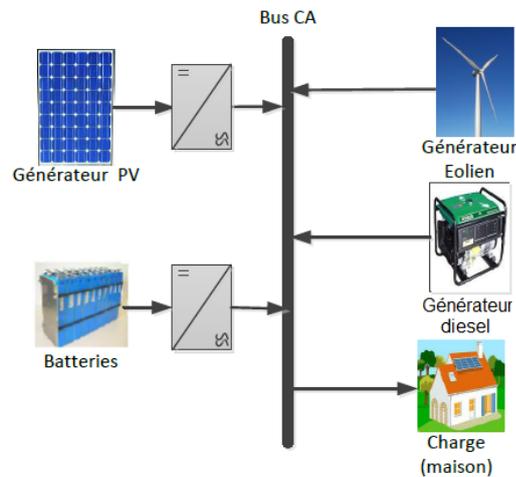


Figure I.7 Configuration d'un système hybride à bus CA.

Le choix de cette structure est judicieux car celle-ci fournit directement une tension alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Le groupe électrogène démarre automatiquement dès qu'un manque de puissance apparaît au niveau du bus. Néanmoins, l'inconvénient réside dans la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus. [Cro 14]

## IV.2 Architecture parallèle

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément [Ash 99]. L'architecture d'un tel système est représentée par la figure (I.8).

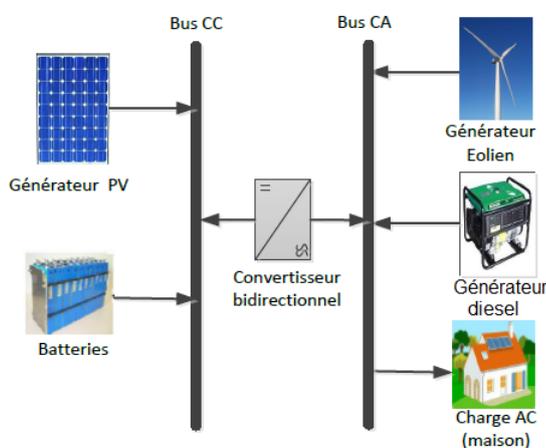


Figure I.8: Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.

## V. Les principaux composants d'un système hybride

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis.

### V.1 Le générateur éolien

L'éolienne occupe un rôle important parmi les différentes sources d'énergie renouvelable. Elle est l'une des plus prometteuses en termes de potentiel, d'écologie, de champs d'application, ...etc.

Différentes topologies de connexion d'éolienne aux systèmes hybrides isolés sont proposées dans la littérature. Le choix du convertisseur se fait selon l'architecture du système hybride et le bus sur lequel l'éolienne est connectée, mais aussi selon les objectifs que l'on souhaite réaliser. Néanmoins, deux configurations figurent parmi les plus utilisées dans les systèmes hybrides isolés. L'architecture de ces deux topologies est illustrée par la figure (I.9).

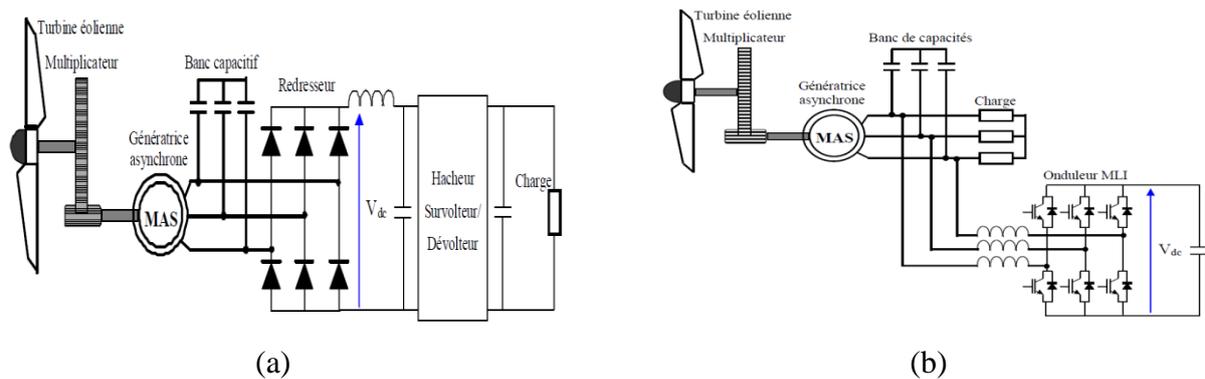


Figure I.9 Convertisseurs utilisés en étage d'adaptation : (a) Redresseur à diodes + hacheur, (b) Redresseur MLI.

Ces architectures permettent d'adapter la forme de l'onde produite par la génératrice éolienne au bus auquel elle est connectée. Ici en l'occurrence pour une connexion au bus CC deux solutions sont possibles : l'association d'un redresseur à diodes et un hacheur (architecture (a)) permettant d'avoir une seule variable de commande à gérer [Ahm 06], ou le redresseur MLI permettant d'utiliser un seul convertisseur [Dan 04].

## V.2 Le générateur photovoltaïque

L'énergie solaire est une énergie très abondante sur la surface de la terre. De ce fait, le photovoltaïque est considéré comme la plus importante source d'énergie renouvelable et la plus prometteuse avec un potentiel inépuisable. Un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Ces cellules convertissent la lumière (les photons) qu'elles captent du rayonnement solaire en électricité. En effet, sous des conditions de tests standards (Eclairement =  $1000\text{W/m}^2$ , température =  $25^\circ\text{C}$ ), la puissance maximale délivrée par une cellule est d'environ  $2.3\text{W}$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Cette puissance reste, en effet, faible et insuffisante pour la plupart des applications. De ce fait, une association en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules permet d'obtenir un générateur photovoltaïque avec une puissance adaptée aux besoins de l'utilisation [Pet 09].

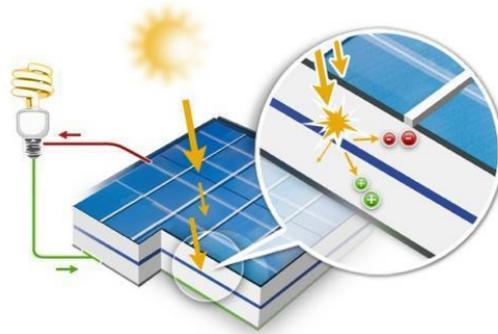


Figure I.10 Principe du fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque.

### V.3 Les sources conventionnelles

Les énergies dites conventionnelles sont des formes d'énergie massivement employées pour répondre aux besoins de production et consommation humaines. Parmi ces énergies, les plus utilisées sont l'énergie nucléaire et l'énergie issue des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel).

Parmi les systèmes de production d'électricité, largement utilisés dans des systèmes hybride et qui est à base de ces énergies, on trouve le générateur Diesel.

Le générateur Diesel est un dispositif capable de produire de l'électricité en brûlant le gasoil. Ce dispositif utilise donc une source primaire supposée accessible partout et tout le temps. L'utilisation de ce dispositif dans les systèmes hybrides a pour but de pallier à une éventuelle insuffisance de production ou une coupure d'alimentation électrique due à un quelconque problème technique. Effectivement, la présence d'un générateur Diesel dans certains cas de figure, notamment dans le cas des systèmes hybrides, s'avère très importante dans la mesure où une interruption de l'alimentation électrique peut entraîner des conséquences graves et/ou des pertes importantes.



Figure I.11 Générateur Diesel.

#### V.4 Les batteries de stockage

Un dispositif de stockage est un élément essentiel dans un système multi-sources. Sans lui, la garantie de l'autonomie du site ne peut pas être assurée. Ce dispositif sert de réservoir d'énergie lorsque les sources produisent en excédent et la restitue lorsque les sources ne produisent pas assez. Mais au-delà de cet aspect de réservoir d'énergie, un dispositif de stockage est essentiel pour l'équilibre des puissances dans un réseau.

Il existe plusieurs technologies et types de stockage qui peuvent être utilisés dans un système hybride autonome, nous citons : les batteries électrochimiques, les super condensateurs, les piles à combustible. [Cro 14]

#### V.5 Le système de supervision

La commande d'un système hybride nécessite l'application d'un système de supervision. Un système de supervision est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer d'une manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, il décide de l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries, générateur diesel) en fonction de la demande de la charge et en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables.

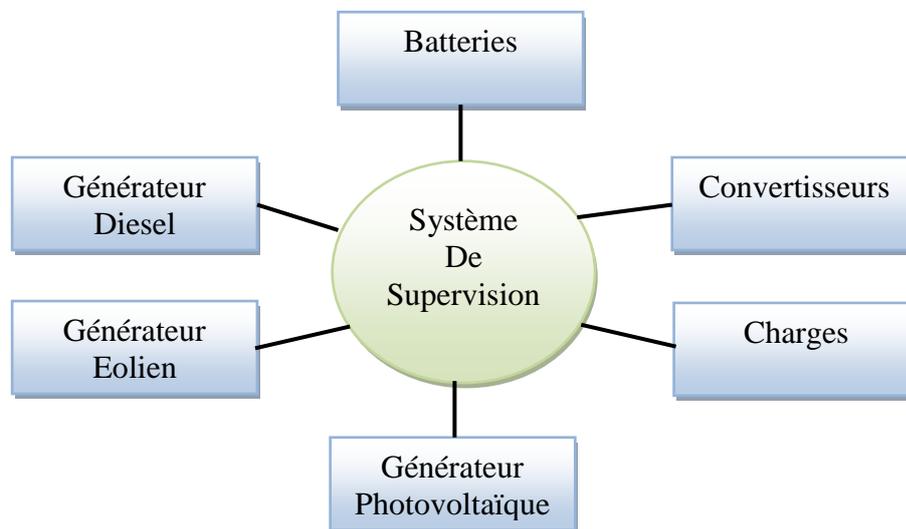


Figure I.12 Système de supervision.

Plusieurs stratégies de gestion et de supervision sont proposées dans la littérature pour traiter les différentes problématiques propres aux différents systèmes multi-sources.

Dans [Jer 09], le système considéré est un système multi-sources composé de panneaux PV, un banc de batteries et d'une pile à combustible montés sur un bus continu à travers des convertisseurs adéquats. Le principe de fonctionnement de ce système consiste à charger les batteries lorsque la production des panneaux PV est supérieure à la consommation de la charge. À l'inverse, lorsque la consommation est plus élevée que la production, les batteries se déchargent pour compenser le manque d'énergie.

Dans [Val 05], un autre algorithme de gestion et de supervision pour un système hybride éolienne/photovoltaïque a été présenté dans le cadre d'une application isolée. Les auteurs ont défini dans ce travail trois modes opératoires principaux qui permettent d'inclure tous les états et les scénarios auxquels le système hybride peut être amené à faire face. Le premier mode consiste à utiliser une seule source pour satisfaire la demande de la charge, en l'occurrence ici la source éolienne. Le deuxième mode consiste à utiliser la source photovoltaïque en complément du premier mode. Le dernier mode utilise les deux sources au maximum et sollicite la batterie si besoin. Par conséquent, les auteurs n'ont pas prévu de source de secours pour pallier une éventuelle panne des sources ou des conditions météorologiques très défavorables.

## V.6 Les convertisseurs

Les convertisseurs servent en premier lieu à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique en deuxième lieu (CA/CC ou inversement). Dans la structure des systèmes hybrides, on trouve trois types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA, ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.
- Les onduleurs sont des convertisseurs CC/CA. Ils sont souvent utilisés pour alimenter des charges à CA.
- Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC /CC pour adapter la tension entre deux sources [Vic 17].

## **VI. Etudes des structures de systèmes hybrides**

### **VI.1 Système hybride avec source d'énergie conventionnelle**

C'est une structure dotée d'une source d'énergie conventionnelle définie généralement par un générateur diesel et une autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne,...etc).

#### **VI.1.1 Système photovoltaïque/source conventionnelle**

C'est un système doté d'une source photovoltaïque et un générateur diesel défini comme source conventionnelle. Il est utilisé très souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud où le potentiel solaire est important.

Le principe de ces systèmes a été décrit dans les travaux de [Sha 03]et [ Sha 04] qui ont cité le cas de l'Arabie saoudite. Le cas du Maroc a été cité par [Mun 04], le cas des Maldives a été abordé par [Van 06] et la Corse par [Mus 00].

En mode de fonctionnement autonome, l'objectif de ces systèmes est d'alimenter sans interruption une maison [Mus 00], un bâtiment de logements [Sha 03] ou administratif [Sha 04][Aja 03] ou un village [Ran 98][Old 04][Sup 06][Kli 06]. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche [Tin 05] où sont également connectés au réseau électrique [Ash 01][Van 06].

Dans [Ash 99][Mun 04][Old 04], ces systèmes autonomes contiennent souvent des batteries et d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entrainer des générateurs continus ou alternatifs. Les consommateurs demandent souvent du courant alternatif ; on distingue alors différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel. Dans les travaux de [Wic 99] ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques.

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur.

Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système

hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie. Des systèmes de ce type ont été étudiés par différents chercheurs [Tin 05][Mus 00][Ash 99].

Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure (I.13).

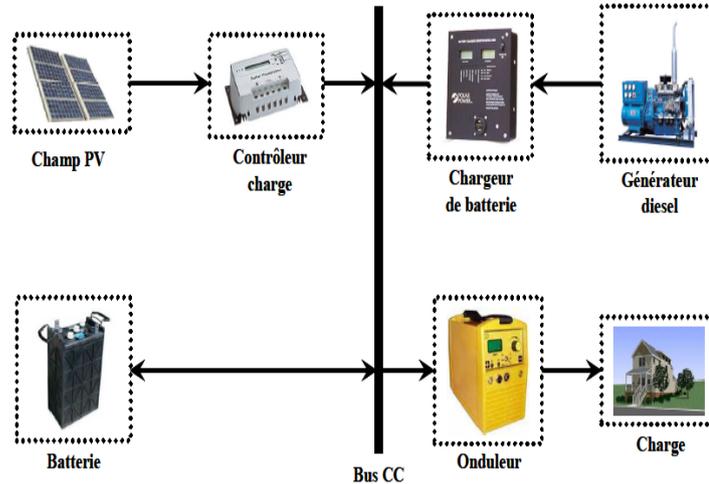


Figure I.13 Système hybride avec connexion série.

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride. Un tel système fut étudié par [Mun 04]. Le schéma du système est présenté sur la Figure (I.14).

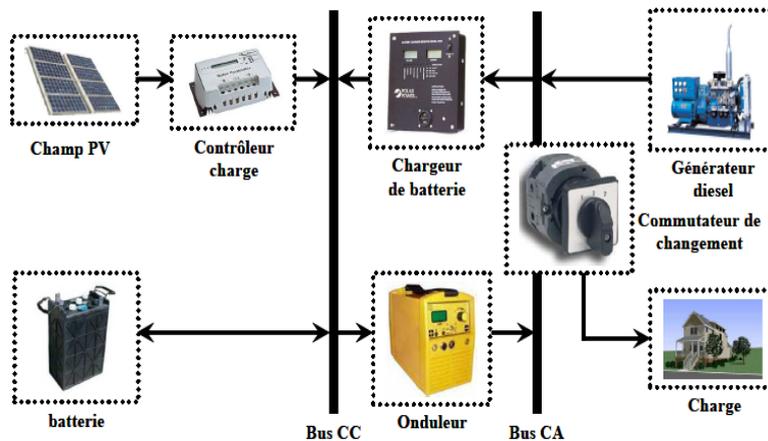


Figure I.14 Système hybride à commutation.

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure (I.15).

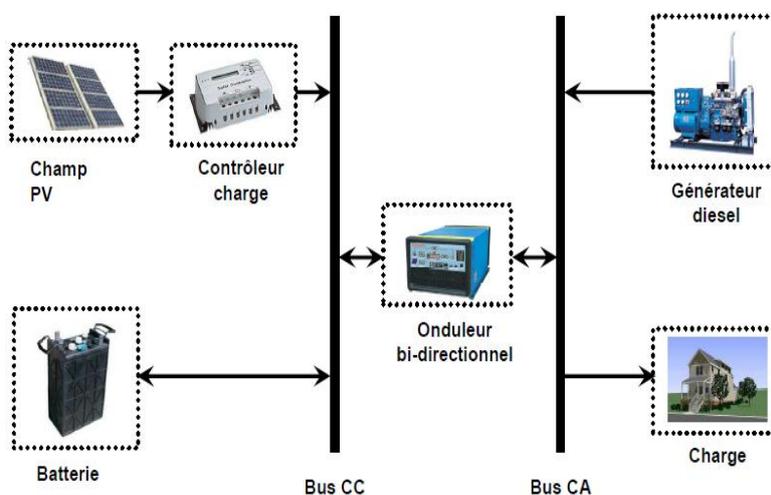


Figure I.15 Système hybride à connexion parallèle.

Des systèmes hybrides avec une telle structure ont été étudiés par [Ash 99][Wic 01][Aja 03][Sha 03][Old 04][Kli 06].

Les travaux de [Kli 06][Tin 05][Mun 04] sont consacrés aux résultats issus de systèmes existants et installés hybrides photovoltaïques/source conventionnelle.

D'autres chercheurs examinent la possibilité d'implantation de panneaux photovoltaïques comme source d'énergie supplémentaire dans des installations existantes avec une source conventionnelle [Aja 03][Ran 98][Old 04][Kli 06].

Dans [Sha 03]et [Wic 01], des études théoriques sur l'analyse des processus qui prennent place au sein du système, par contre [Sup 06]et [Mus 00] ont consacré leurs travaux sur l'optimisation du dimensionnement du système hybride et [Ash 01] sur celle de la stratégie de gestion de l'énergie.

### VI.1.2 Système éolien/source conventionnelle

C'est un système doté d'une source éolienne et un générateur diesel défini comme source conventionnelle.

Les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel, c'est pour cela que les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïque. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride.

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité, des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles : petites comme les îles Canari [Car 03], en passant par des îles moyennes comme la Corse [Not 01], jusqu'aux grandes îles comme l'Angleterre [Bow 01].

Dans [Bow 01], les travaux de recherche se sont focalisés sur des systèmes hybrides existants et ils ont présenté des résultats de mesures. Dans leurs travaux, [Ull 02] ont utilisé un générateur éolien comme source d'énergie supplémentaire pour diversifier les modes de production. On peut citer également des travaux sur les aspects politiques des systèmes hybrides publiés par [Lun 00][Lun 02], sur l'analyse des flux d'énergie [Mul 03][Elh 04] ou sur l'optimisation de sa structure [Hon 99][Gar 06][Not 01].

Il existe différents types de charges alimentées par le système hybride: des habitations isolées [Not 01], des bâtiments de logements [Elh 05], des bâtiments publics [Elh 04], des villages [Bow 01] ou même des îles [Car 03]. Dans ces cas, le système hybride fonctionne en régime autonome. Dans leurs travaux [Lun 03] étudient un système connecté au réseau.

### VI.1.3 Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergies renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie.

Une partie des travaux existants dans la littérature est orientée vers des systèmes installés [Pin 04][Khe 05][Phu 07][Bri 04][McG 99] et l'autre partie vers la conception de nouveaux systèmes [McG 96].

On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York [Bag 02] ou en Arabie saoudite [Elh 99][Elh 02].

D'autres auteurs ont consacré leurs travaux à l'optimisation de la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charge [El-Tam 06], combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles [Ber 06] auxquels s'ajoutent la charge non satisfaite minimale [Duf 08].

Pour trouver le système optimal, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes : [Ber 06] ont utilisé les algorithmes de Pareto, [Duf 08] des algorithmes génétiques et évolutifs et [El-Tam 06] de la logique floue.

Ces systèmes sont conçus pour alimenter des maisons et des refuges [Elh 02][Ste 04] ou des villages [Pin 04]. Ils peuvent être autonome [Elh 99][Khe 05][Ber 06] ou interconnectés avec le système électrique du pays [Bha 99][El-Tam 06].

Le stockage peut être sous forme de batteries [Bri 04][Rot 06][McG 96][Ber 06], de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible [Ste 04] ou d'une combinaison des deux [Duf 08]. Dans leurs travaux, [Rot 06] développent une stratégie optimale de gestion du dispositif de stockage.

## **VI.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle**

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage sont présentées.

### **VI.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage**

Dans ces systèmes, l'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, afin de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

Ces systèmes alimentent soit des maisons [Mul 10][Isl 04], soit des villages [Vos 04].

Les travaux de [Zah 98] traitent la modélisation et l'analyse de ces systèmes, ceux de [Mul 10][Kau 05] traitent le dimensionnement et optimisent les composants de ces systèmes.

Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation développé par [Fra 08][Kau 05] dans leurs contributions.

Dans [Vos 04], les résultats de six systèmes d'une puissance totale de 86,3 kWc ont été présentés.

Dans [Bus 04], les résultats de systèmes hybrides implantés dans des centres de recherche ont été présentés.

La stratégie de gestion de l'énergie a été étudiée par [Uzu 09][Kau 05].

Des algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale ont été développés à partir de la logique floue par [El-Sha 02].

La production photovoltaïque d'hydrogène par électrolyseur est également étudiée par [McC 05] et par différentes technologies par [Con 07].

[Mul 10] étudient un système hybride alimentant un ensemble d'habitations en parallèle avec le réseau électrique. Il surmonte ainsi les surtensions en bout de lignes électriques et les manques d'alimentation lors des coupures du réseau.

### **VI.2.2 Système hybride éolien/stockage**

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : d'une part, il peut jouer le rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne [Nou 07][Zho 09], d'autre part il peut jouer le rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent [Zin 10][Ntz 05].

Les recherches se distinguent par l'intervalle de temps considéré. Dans le cas d'étude de processus à variation lente, les auteurs [Kor 03][Nou 07] s'intéressent à l'énergie obtenue par chacune des sources. D'autres études sont réalisées sur les processus de courte durée [Iqb 03a][Shi 08].

Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage [Iqb 03b], soit un bâtiment ou un hôtel [Bec 06] et même un village [Nou 07].

Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie [Nou 07], un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène [Ntz 05][Bec 06], une combinaison des deux [Zin 10], un

stockage par air comprimé [Den 06], une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super condensateur [Zho 09].

Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important [Ntz 05][Kas 07].

### VI.2.3 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs inconvénients comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie [Dia 08][Bit 06][Kra 04].

Les chercheurs ont basé leurs études sur : les systèmes existants [Sop 09][Bit 06], des bancs d'essais [Laz 02][Dal 10] et des travaux théoriques.

Dans le cas des travaux théoriques, [Lew 97] ont étudié l'influence de l'ajout d'une seconde source d'énergie dans un système déjà existant et [Azb 06] ont élaboré un nouveau système hybride.

La plupart des travaux concernent l'optimisation de la configuration du système hybride selon divers critères : probabilité minimale de perte de charge [Ai 03][Kaa 06][Ekr 08][Nels 06], cout minimal du kilowattheure produit [Kra 04][Nan 10], ou combinaison de ces deux critères [Ekr 09][Dia 08]. D'autres, [Pra 06] combinent plusieurs critères d'optimisation tels que la minimisation de la probabilité de manque d'alimentation, de l'énergie produite non utilisée et du cout du kilowattheure produit.

Les procédures d'optimisation utilisent soit des algorithmes génétiques [Kou 06], soit des méthodes heuristiques [Ekr 09] ou de surfaces [Ekr 08] ou encore des logiciels commerciaux tels que HOMER [Iqb 02][Lew 97][Nan 10], Hybrid 2 [Lew 97], Matlab [Nels 06], PSCAD/EMTDC [Azb 06] et ARENA v10 [Ekr 08] ou v12 [Ekr 09].

Comme pour les autres systèmes hybrides, ils peuvent assurer l'alimentation des cellules 3G d'opérateurs mobiles [Bitt 06], des ménages [Iqb 02][Dia 08][Lew 97][Kra 04] ou des villages [Ham 04].

Ce système est installé sur tous les continents : en Afrique - Algerie [Dia 06] [El-Kha 04][Kaa 06] et Syrie [Ham 04]; en Asie - Chine [Lew 97], Inde [Pra 06], Bangladesh [Nan 10], Malaisie [Sop 09] et Turquie [Ekr 08][Ekr 09]; en Europe - Royaume uni [Bit 06] et France - Corse [Dia 08]; en Amérique de Sud - Brésil [Kra 04]; en Amérique du Nord - Canada [Iqb 02] et Etats-Unis [Ham 04].

Ces systèmes fonctionnent souvent en régime autonome [Diaf et al. 2006][Dia 08] [Azb 06][Kou 06][Kaa 06][Nel 06], mais il existe des travaux sur des systèmes connectés au réseau électrique [Nan10][Ekr 08][Ekr 09][Dal 10].

Les dispositifs de stockage sont plus souvent des batteries [Ai 03][Dia 08][Dal 10] [Kaa06][Pra 06][Nan 10][Ham 04][Ekr 08][Ekr09], parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène [Nel 06][Ned 05] ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène [Sop 09].

#### VI.2.4 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares. On a pu trouver des travaux sur un système existant [Pec 04] utilisé dans un but éducatif en Northern Iowa, Etats-Unis ; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une ile Croate [Url 98]; une estimation des performances [Tin 06].

Dans [Url 98], l'hypothèse d'une complémentarité des énergies du vent et soleil est considérée. De cette façon, le système fournira toujours de la puissance dans le réseau électrique insulaire. Son argumentation est d'ordre économique.

### VII. Classification des systèmes hybrides

Le champ d'application des systèmes hybrides est trop vaste à cause des multiples structures, on peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance selon le tableau suivant [Bag 11].

<b>Puissance du SH en KW</b>	<b>Application</b>
<b>Faible &lt; 5</b>	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau, autres applications isolées.
<b>Moyenne entre 10 et 250</b>	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
<b>Grande &gt; 500</b>	Grand réseaux isolés

Tableau I.1 Classification des SH par gamme de puissance.

### **VIII. Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables existantes. Dans la seconde partie nous avons étalé la définition et les différentes structures des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique, où nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques sur l'environnement, en particulier l'émission de gaz à effet de serre.

## Chapitre II

### MODÉLISATION DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

#### I. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons un système de conversion photovoltaïque muni d'un dispositif de commande lui permettant de fonctionner en site isolé, l'ensemble est modélisé sous environnement « Matlab ». La commande permet de faire fonctionner le générateur photovoltaïque dans les conditions optimales, une meilleure exploitation de l'énergie solaire peut être ainsi obtenue.

Nous commençons par la modélisation du panneau photovoltaïque, puis, nous montrerons comment optimiser la puissance fournie par le générateur photovoltaïque par le biais d'un étage d'adaptation avec fonction de recherche du point de puissance maximale MPP.

#### II. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On rencontre dans la littérature technique plusieurs modèles du générateur photovoltaïque (à une, à deux ou à trois diodes) [Eck 90]. Ils diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle à une seule diode est le plus cité dans la littérature. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent représenté sur la figure (II.1). Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt  $R_{sh}$  caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la jonction PN et des impuretés près de la jonction. Une résistance série  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexions [Pan 04].

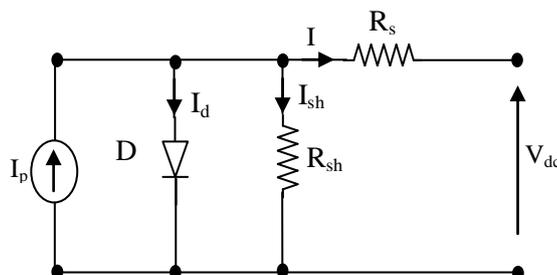


Figure II.1 Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

### III. Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

A partir de la figure (II.1) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Le courant de jonction  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_0 \left( e^{q \left( \frac{V + R_s I}{n k T} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Le courant dans la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

A partir de l'équation (II.1), on obtient l'expression de courant  $I$  :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.4})$$

En remplaçant dans (II.4) les courants  $I_d$  et  $I_{sh}$  par leurs expressions respectivement dans (II.2) et (II.3) on obtient :

$$I = I_p - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V + R_s I}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$I$  : Le courant de cellule [A].

$V$  : La tension de cellule [V].

$I_p$  : Le photo-courant de la cellule [A].

$R_s$  : La résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].

$R_{sh}$  : La résistance shunt de la cellule [ $\Omega$ ].

$T$  : La température de la cellule [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$q$  : La charge de l'électron  $e = 1.6 * 10^{-19}$  [C].

$I_0$  : Le courant de saturation [A].

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.3854 \cdot 10^{-23}$  [JK<sup>-1</sup>])

$n$  : Le facteur de non idéalité de la diode.

#### IV. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique (II.5). Les plus usuels sont les suivantes [Ger 02][Vec 05] :

##### IV.1 Courant de court circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  est nulle et  $R_{sh}$  est infinie), ce courant se confond avec le photo courant  $I_p$ . Dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (II.5), on obtient:

$$I_{cc} = I_p - I_0 \left( e^{q \left( \frac{R_s I_{cc}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_0 \left( e^{q \left( \frac{R_s I_{cc}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \text{ devant } I_p .$$

L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_p}{\left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.7})$$

##### IV.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension  $V_{c0}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_p - I_0 \left( e^{q \left( \frac{V_{c0}}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{c0} = \left( \frac{q}{nKT} \right) * \ln \left( \frac{I_p}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

### IV.3 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite (  $V_{pm} * I_{pm}$  ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit (  $I_{cc} * V_{c0}$  ).

Où :  $I_{cc}$  intensité de court-circuit et  $V_{c0}$  tension de circuit ouvert

$$FF = \left( \frac{I_{pm} V_{pm}}{I_{cc} V_{c0}} \right) \quad (\text{II.10})$$

### IV.4 Rendement

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \left( \frac{FF V_{c0} I_{cc}}{P_{in}} \right) \quad (\text{II.11})$$

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

## V. Module photovoltaïque

En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, on peut construire un module (générateur) photovoltaïque selon le besoin des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est donnée par :

$$P_{pv} = N_s * V_{pv} * N_p * I_{pv} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$N_s$  : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série.

$N_p$  : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

### V.1 Mise en série

Une association de  $N_s$  cellules permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (figure II.2). L'équation (II.13) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules.

$$\begin{aligned} I_{cc,ns} &= I_{cc} \\ V_{c0,ns} &= N_s * V_{c0} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

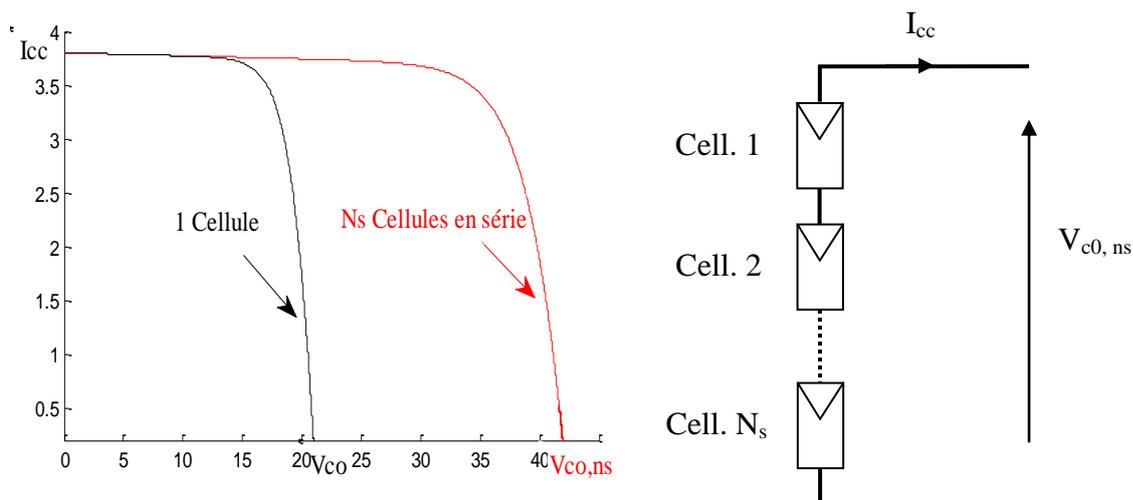


Figure II.2 Caractéristiques résultant d'un groupement de  $N_s$  cellules en série.

### V.2 Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Figure II.3). L'équation (II.14) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules.

$$I_{cc,np} = N_p * I_{cc} \tag{II.14}$$

$$V_{c0,np} = V_{c0}$$

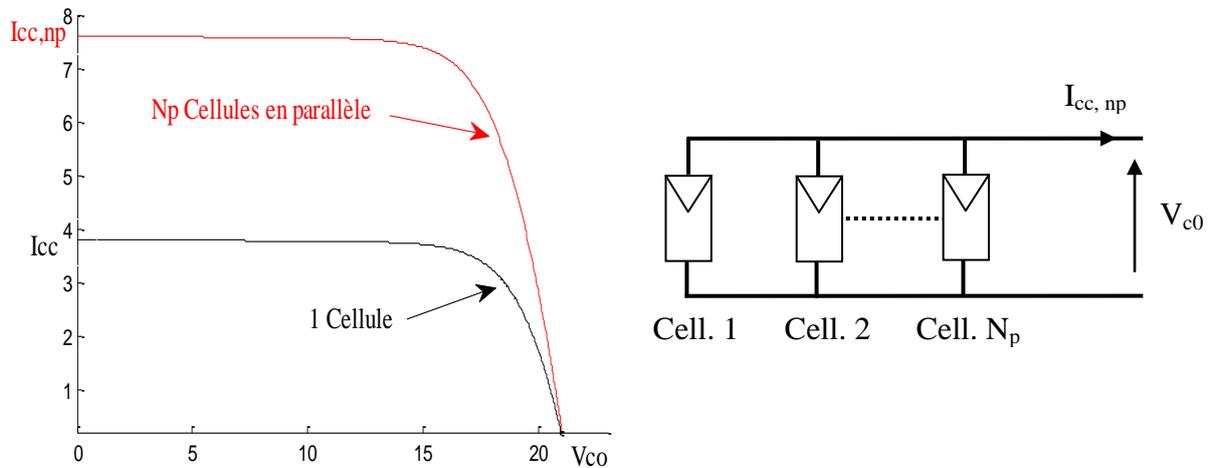


Figure II.3. Caractéristiques résultant d'un groupement de N<sub>p</sub> cellules en parallèle.

### VI. Caractéristiques du module photovoltaïque

Les figures (II.4 - II.7) montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température.

Les paramètres caractérisant le panneau photovoltaïque sont donnés dans l'annexe A.

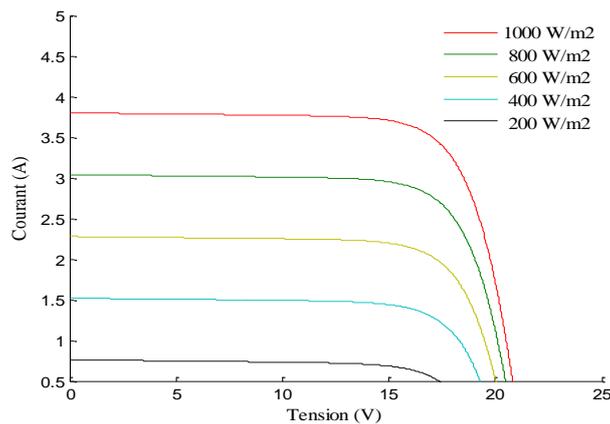


Figure II.4 Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairiments à température constante 25°C

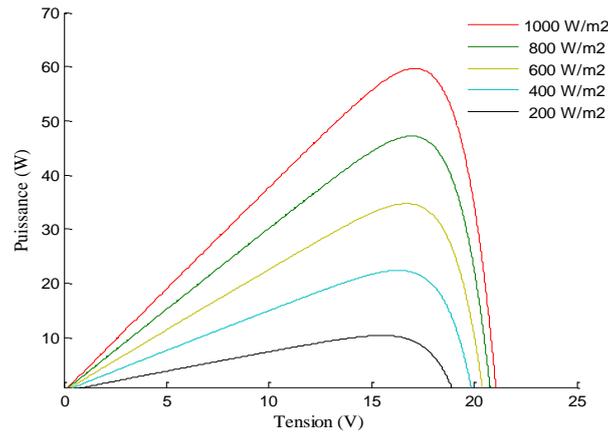
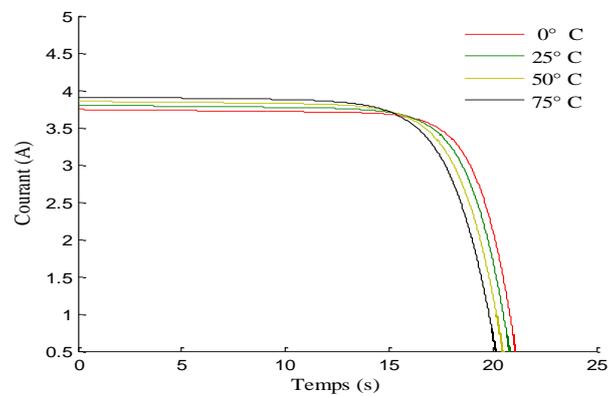
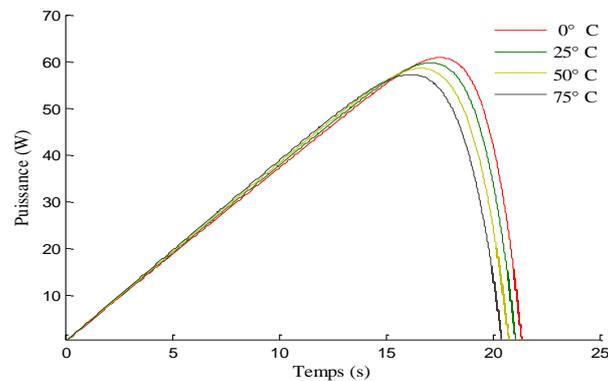


Figure II.5 Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C

Figure II.6 Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m<sup>2</sup>Figure II.7 Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m<sup>2</sup>

Nous observons que l'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant  $I_{pv}$  du générateur que la tension  $V_{pv}$ . La température quant à elle, influe beaucoup plus sur la tension que sur le courant. L'ensoleillement augmente la puissance fournie par le module, alors que la température l'abaisse.

## VII. Système de conversion photovoltaïque

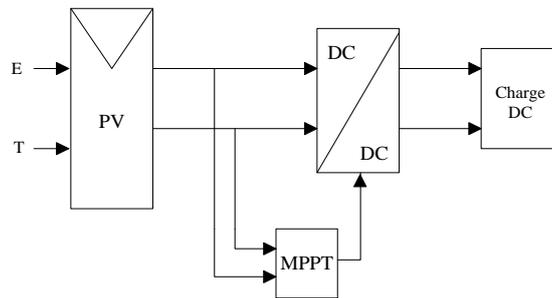


Figure II.8 Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT.

La figure (II.8) présente le schéma synoptique d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...). [Ang 06]

Cet étage d'adaptation utilise un algorithme MPPT qui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque [Xia 91].

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Parmi ces algorithmes de recherche du point à puissance maximale, existant dans la littérature technique, nous citons : la méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O), de l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [Teu 93][Sal 06]. Dans notre travail nous avons opté pour la commande P&O, qui est aujourd'hui largement utilisée par sa facilité d'implémentation. Cette procédure présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi puisqu'elle doit être répétée périodiquement. Son principe et son algorithme de commande sont respectivement illustrés sur les figures (II.9 et II.10) [Thi 12].

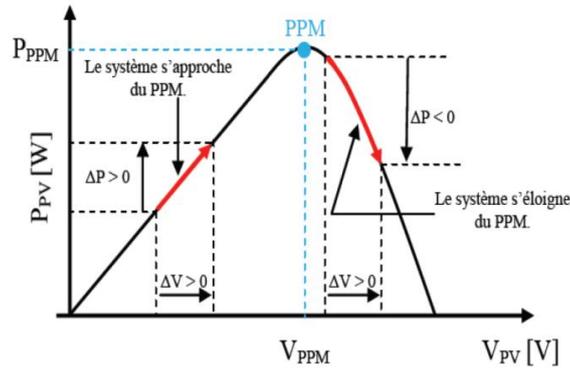


Figure II.9 Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par P&O

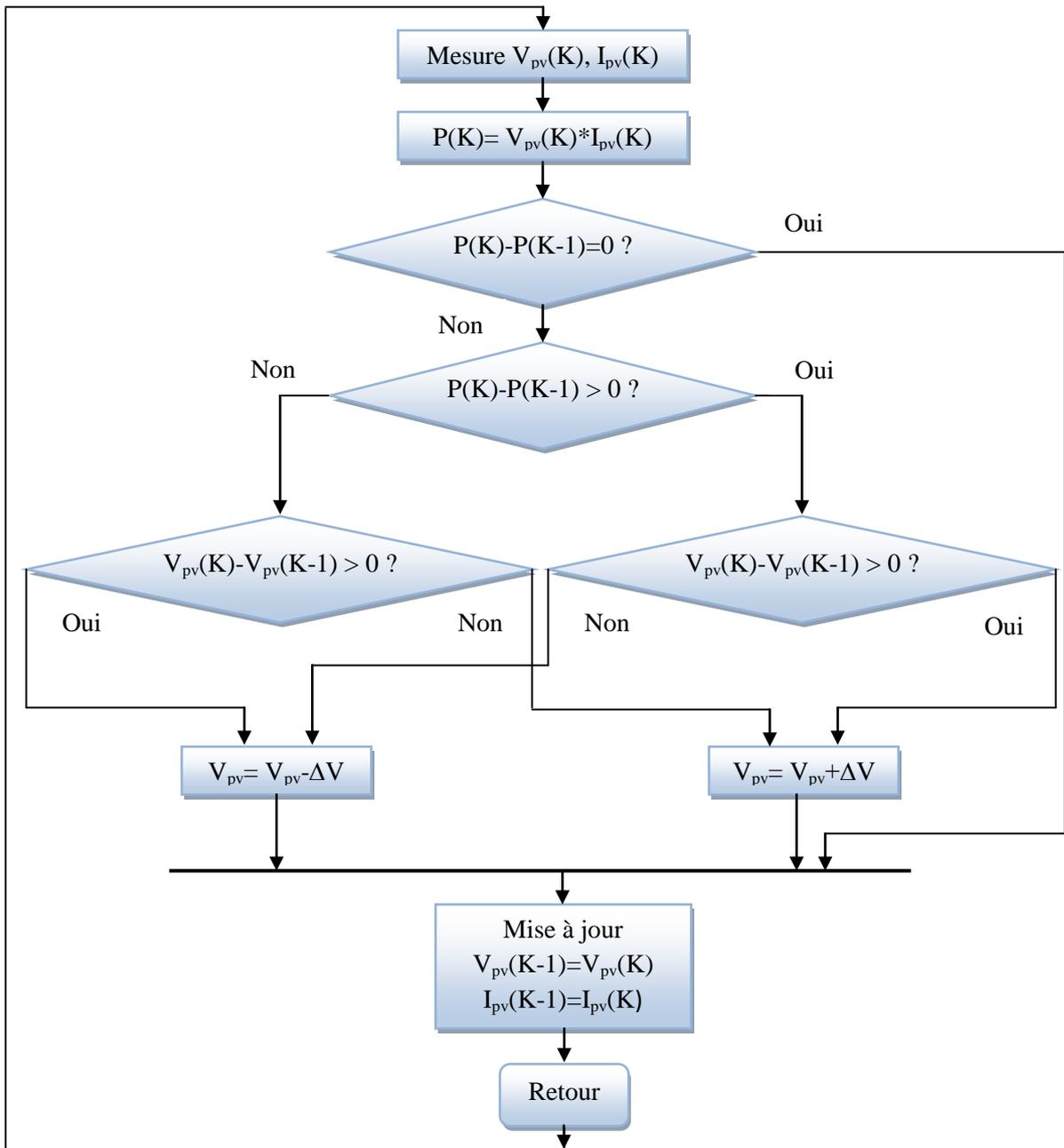


Figure II.10 Organigramme de la méthode P&O.

Le convertisseur utilisé dans cette étude est de type DC/DC élévateur (boost). Son schéma électrique équivalent est présenté par la figure (II.11).

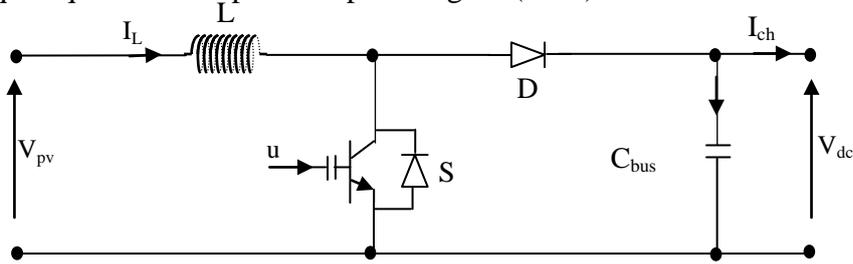


Figure II.11 : Schéma électrique du convertisseur élévateur DC/DC

Le convertisseur est représenté par le système d'équation (II.15)

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1-u) \quad (II.15)$$

$$(1-u)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch}$$

Où

u : représente le rapport cyclique

## VIII. Résultats de simulation

### A) Réponse à un profil d'éclairement

Les figures (II.13 - II.15) montrent respectivement la puissance, la tension et le courant en sortie du panneau photovoltaïque, en réponse à une variation en créneau de l'éclairement, dont le profil d'éclairement est représenté sur la figure (II.12). La température ambiante reste constante et égale à 25°C.

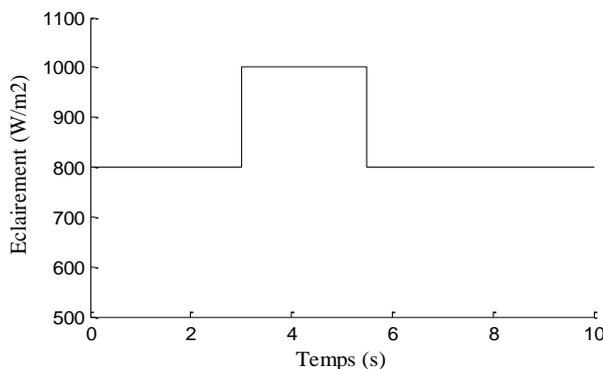


Figure II.12 Eclairement en fonction du temps

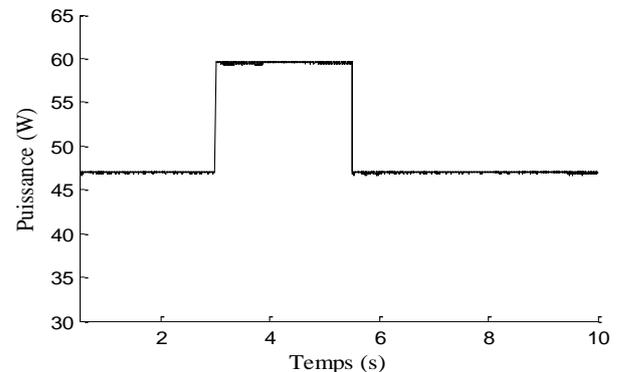


Figure II.13 Puissance  $P_{pv}$  en fonction du temps

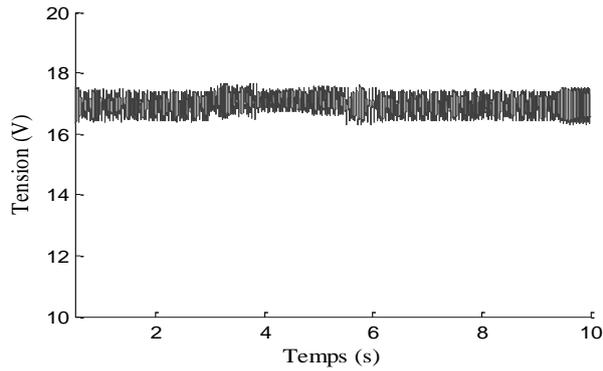


Figure II.14 Tension  $V_{pv}$  en fonction du temps

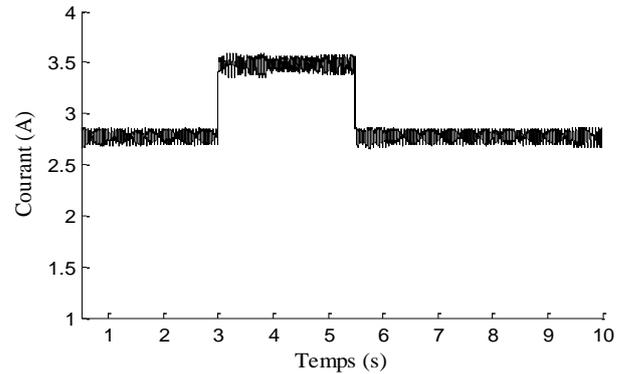


Figure II.15 Courant  $I_{pv}$  en fonction du temps

### B) Réponse à un profil journalier de l'éclairement

Pour tester l'efficacité de l'algorithme MPPT adopté, nous avons proposé l'image d'un profil réel de l'éclairement d'une journée ensoleillée représentée dans la figure (II.16), la température est constante égale à 25°C.

Les paramètres caractérisant le panneau photovoltaïque sont donnés dans l'annexe A.

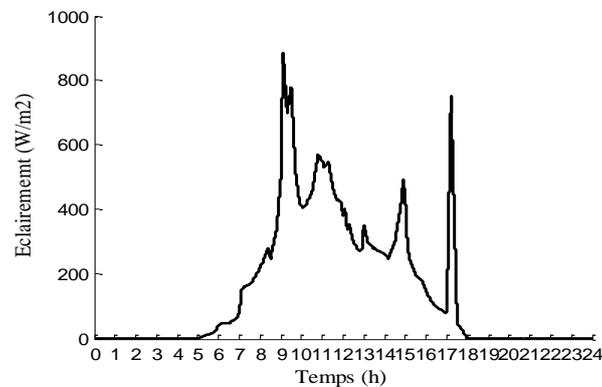
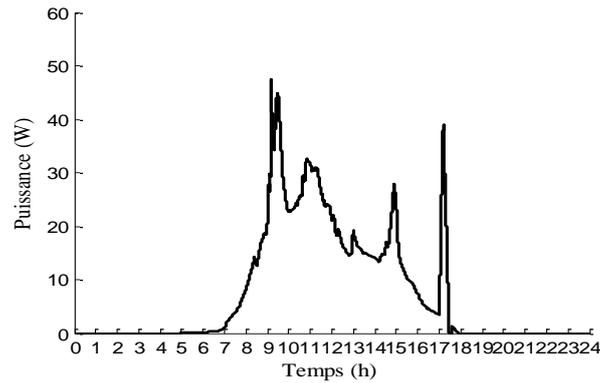
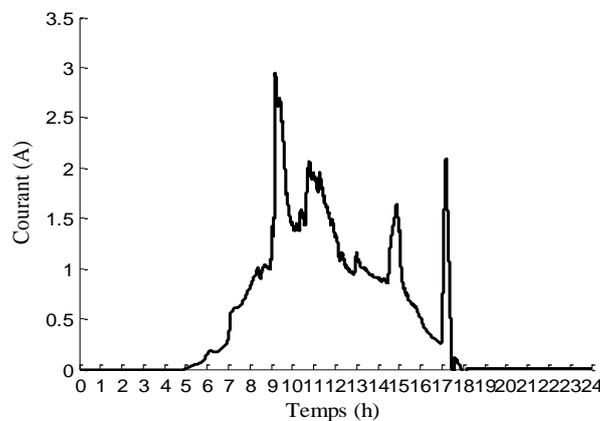


Figure II.16 Eclairement en fonction du temps

Figure II.17 Puissance  $P_{pv}$  en fonction du tempsFigure II.18 Courant  $I_{pv}$  en fonction du temps

Les essais en ensoleillement réel ont permis de valider l'efficacité de l'algorithme MPPT adopté. La figure (II.17) montre que la puissance  $P_{pv}$  produite par le module photovoltaïque suit exactement le profil d'éclairement représenté sur la figure (II.16).

## IX. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle du panneau photovoltaïque, et nous avons discuté des différents paramètres influençant les principales caractéristiques, à savoir la caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  en fonction de l'ensoleillement et de la température.

Nous avons enfin présenté les résultats de simulation sous Matlab d'un panneau doté d'une commande MPPT.

## Chapitre III

### MODÉLISATION DU GÉNÉRATEUR ÉOLIEN

#### I. Introduction

Dans ce chapitre, nous développons le modèle du générateur utilisé pour la conversion de l'énergie éolienne. Il s'agit d'une génératrice asynchrone à cage entraînée par une turbine éolienne et excitée par un banc de condensateur. Ce genre de génératrice est appelée Génératrice Asynchrone Auto-Excitée (GAAE), en anglais Self Excited Induction Generator (SEIG).

Nous allons développer le modèle de la génératrice asynchrone auto-excitée (GAAE) à partir des équations électriques et magnétiques de la machine dans le repère naturel (a,b,c), auxquelles on applique la transformation de Park.

Le modèle construit tient compte de la saturation et des pertes fer. Ce dernier aspect a son importance surtout dans le cas des machines de faible puissance.

Nous expliquerons brièvement le processus d'auto-amorçage de la génératrice asynchrone par un banc triphasé de condensateurs. Nous présenterons le modèle du phénomène d'auto-amorçage et nous donnerons les conditions nécessaires à son enclenchement.

Nous nous intéressons aussi dans ce chapitre à la modélisation du redresseur MLI, puis nous associerons ce dernier à la génératrice asynchrone auto-excitée et nous appliquerons la commande directe de puissance DPC. Le but est bien sûr de faire suivre à la génératrice une référence de puissance active donnée tout en maintenant une tension en sortie du redresseur constante.

#### II. Modélisation de la génératrice asynchrone

La machine asynchrone fonctionne en génératrice lorsque son glissement change de signe (glissement négatif en convention générateur). La pulsation électrique du rotor est alors supérieure à celle des grandeurs statoriques, c'est-à-dire que le rotor tourne à une vitesse plus élevée que celle du champ tournant statorique.

Contrairement à la machine synchrone, la génératrice asynchrone ne possède pas d'inducteur séparé. Par conséquent, elle nécessite un apport de puissance réactive pour sa magnétisation. Lorsqu'elle est reliée au réseau, ce dernier fournit la puissance réactive requise. Par contre, en fonctionnement autonome, il faut lui apporter cette énergie par une batterie de condensateurs.

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une modélisation analytique de la machine asynchrone, d'abord du modèle linéaire de la machine asynchrone en négligeant l'effet de la saturation des matériaux et l'effet des pertes fer puis, dans un deuxième temps, en introduisant ces effets dans le modèle. [Idj 10]

### II.1 Modèle linéaire de la machines asynchrone

Les équations électriques de la machine asynchrone dans un repère triphasé s'écrit sous la forme suivante :

➤ Equations électriques statoriques

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

➤ Equations électriques rotoriques

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (III.2) devient :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = 0 = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

$R_s$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$[T_{em}] = \frac{1}{2} [i_{sabc}, i_{rabc}]^t \cdot \left( \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}] \right) \quad (\text{III.4})$$

Sachant que les flux statorique et rotorique de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$\begin{aligned} [\varphi_{sabc}] &= [L_s][i_{sabc}] + [L_m(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \\ [\varphi_{rabc}] &= [L_r][i_{rabc}] + [L_m(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont en fonction de la position rotorique  $\theta$ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$[T_{em}] = [i_{sabc}]^t \cdot \left( \frac{d}{d\theta} [L_m] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{III.6})$$

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé « dq0 ». Dans ce cas, on utilise la transformation de Park.

En choisissant un repère dq0 diphasé, l'axe d peut être repéré par :

$\theta_s$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «  $A_s$  » du stator.

$\theta_r$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «  $A_r$  » du rotor.

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = P \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{III.7})$$

Où

$\Theta$  : Représente la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique.

$P$  : Le nombre de paires de pôles ;

$\theta$  : L'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Les différents axes utilisés sont illustrés sur la figure (III.1)

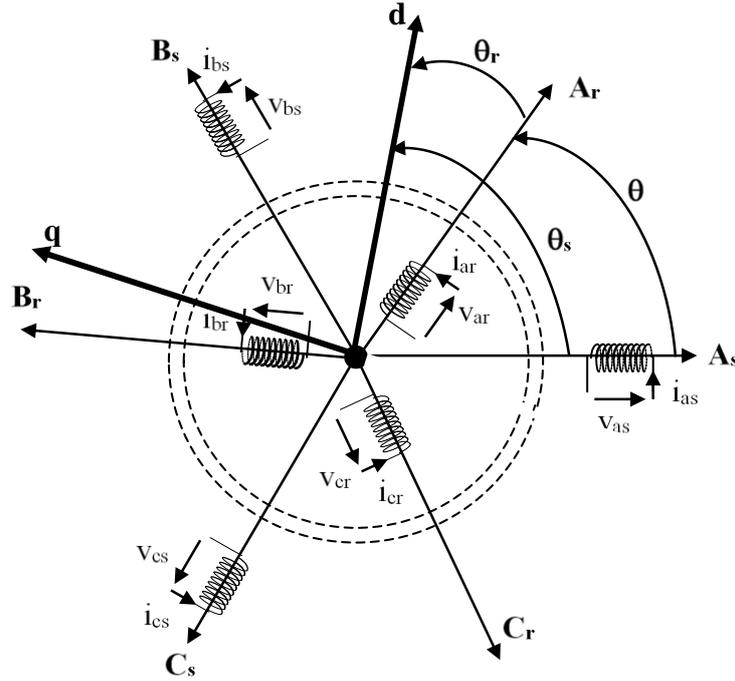


Figure III.1 : Représentation de la Machine asynchrone dans les différents systèmes d'axes utilisés.

La matrice de Park et son inverse s'expriment comme suit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$p(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = p(\theta)^t \quad (\text{III.9})$$

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation  $\theta_s$ , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$\begin{aligned}
v_{ds} &= \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + R_s i_{ds} \\
v_{qs} &= \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + R_s i_{qs} \\
V_{0s} &= \frac{d\varphi_{0s}}{dt} + R_s i_{0s}
\end{aligned} \tag{III.10}$$

De même, en appliquant aux équations rotoriques avec un angle de rotation  $\theta_r$ , on obtient les expressions suivantes dans le repère dq :

$$\begin{aligned}
v_{dr} &= \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + R_r i_{dr} \\
v_{qr} &= \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + R_r i_{qr} \\
V_{0r} &= \frac{d\varphi_{0r}}{dt} + R_r i_{0r}
\end{aligned} \tag{III.11}$$

Notons que le système d'équations (III.10 et III.11) correspond à un système d'axes d et q où l'axe q est en avance par rapport à l'axe d (voit figure III.1).

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations qui correspondent aux composantes homopolaires ( $V_{0s}, V_{0r}$ ), sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de Park en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \tag{III.12}$$

Avec :

$L_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

En partant des équations (III.10), (III.11), et en utilisant la relation (III.12) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\frac{d\theta_s}{dt}.L_s & 0 & -\frac{d\theta_s}{dt}.L_m \\ \frac{d\theta_s}{dt}.L_s & R_s & \frac{d\theta_s}{dt}.L_m & 0 \\ 0 & -\frac{d\theta_r}{dt}.L_m & R_r & -\frac{d\theta_r}{dt}.L_r \\ \frac{d\theta_r}{dt}.L_m & 0 & \frac{d\theta_r}{dt}.L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

La transformation de Park, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante :

$$T_{em} = P.L_m (i_{dr}.i_{qs} - i_{qr}.i_{ds}) \quad (\text{III.14})$$

## II.2 Modèle de la machines asynchrone en tenant compte de la saturation

A travers l'illustration donnée à la figure (III.2), nous montrons clairement la nécessité de la prise en compte de la saturation dans le cas du fonctionnement générateur de la machine asynchrone. Sur cette figure sont tracées la caractéristique à vide  $L_m(i_m)$  de la machine, ainsi que la droite de charge de capacité  $V_c = \frac{1}{C\omega} |i_m|$ . Comme on peut le constater, une intersection à lieu ce qui détermine un point de fonctionnement stable à vide. Si l'inductance magnétisante est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente pas de coude de saturation, et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique du condensateur. L'auto-amorçage est alors possible et la tension statorique augmente jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de saturation pour étudier la machine asynchrone en génératrice auto-excitée.

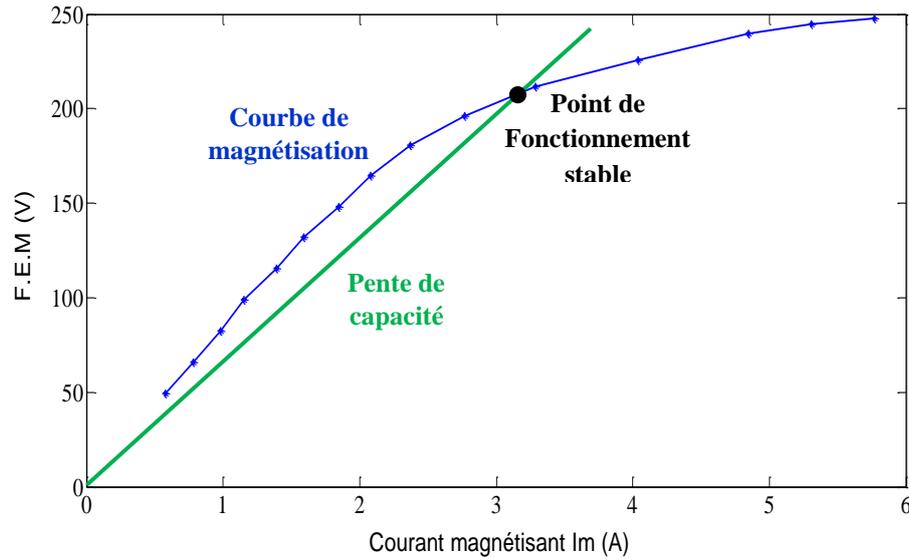


Figure III.2 F.é.m magnétisante en fonction du courant magnétisant.

Nous constatons que dans les équations électriques (III.10), (III.11), nous avons besoin des expressions des flux et de leurs dérivées. L'inductance diminue avec la saturation et pour modéliser ce phénomène, nous devons considérer que les inductances varient avec les courants magnétisants.

Si nous considérons le système d'équations (III.12), nous trouverons qu'il fait appel aux inductances suivantes :  $L_s$ ,  $L_r$  et  $L_m$ .

Sachant que les inductances cycliques statoriques et rotoriques s'expriment en fonction de l'inductance magnétisante comme suit :

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + l_{s\sigma} \\ L_r &= L_m + l_{r\sigma} \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Les inductances  $l_{s\sigma}$  et  $l_{r\sigma}$  désignent à présent les inductances de fuites statorique et rotorique respectivement.

Il faut donc réexprimer les flux en fonction des courants statoriques et des courants magnétisants et éliminer les courants rotoriques du système (III.12) en procédant comme suit :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot (i_{dm} - i_{ds}) = (L_s - L_m) \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} = l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot (i_{qm} - i_{qs}) = (L_s - L_m) \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} = l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \\ \varphi_{dr} &= L_r \cdot (i_{dm} - i_{ds}) + L_m \cdot i_{ds} = (L_m - L_r) \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qr} &= L_r \cdot (i_{qm} - i_{qs}) + L_m \cdot i_{qs} = (L_m - L_r) \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \end{aligned} \quad (\text{III. 16})$$

Avec:

$$i_{dr} = i_{dm} - i_{ds} \quad ; \quad i_{qr} = i_{qm} - i_{qs}$$

On obtient donc les équations magnétiques suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qs} &= l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \\ \varphi_{dr} &= -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qr} &= -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \end{aligned} \tag{III.17}$$

Les dérivées des flux passent toutes par le calcul suivant :  $\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt}$

Car :

$$L_s = L_m + l_{s\sigma} \quad ; \quad L_r = L_m + l_{r\sigma}$$

$$\Rightarrow \frac{dL_s}{dt} = \frac{dL_r}{dt} = \frac{dL_m}{dt} \quad ; \quad \frac{dl_{s\sigma}}{dt} = \frac{dl_{r\sigma}}{dt} = 0 \tag{III.18}$$

Finalement la prise en compte de la saturation passe obligatoirement par le calcul du terme  $\frac{dL_m}{di_m}$ , ce qui nous oblige à connaître comment varie l'inductance magnétisante en

fonction du courant magnétisant. Ceci ne peut se faire qu'expérimentalement en relevant la caractéristique de magnétisation  $L_m(i_m)$  et en l'approximant par la fonction adéquate. Cette opération est montrée en annexe B [Sib 14]. En connaissant la fonction  $L_m(i_m)$  on déduit par

dérivation  $\frac{dL_m}{di_m}$

Il reste à calculer le terme  $\frac{di_m}{dt}$ . Le courant magnétisant s'exprime par la relation :

$$i_m = (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{2} \left( 2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \left( 2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{\left( i_{dm}^2 + i_{qm}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\frac{1}{2} \left( 2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{i_m}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{III.19})$$

La dérivée de l'inductance magnétisante par rapport au temps devient :

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \left( \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \quad (\text{III.20})$$

Il faut donc réexprimer les flux en fonction des courants statoriques et des courants magnétisants et éliminer les courants rotoriques du système (III.12) en procédant comme suit :

Les dérivées des flux s'expriment par :

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left( \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} &= l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left( \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} &= -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left( \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} &= -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left( \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm} \end{aligned} \quad (\text{III. 21})$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} &= l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qm}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} &= -l_{r\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mdr} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} &= -l_{r\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{qm}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III. 22})$$

Avec :

$$L_{md} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \quad \text{Représente inductance magnétisante dynamique d'axe d}$$

$$L_{mq} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} \quad \text{Représente inductance magnétisante dynamique d'axe q}$$

$$L_{dq} = \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^* i_{qm}}{i_m} \quad \text{Représente inductance magnétisante dynamique croisée. Cette}$$

inductance s'appelle en anglais « cross coupling transient inductance », elle symbolise l'effet croisé de la saturation, c'est-à-dire l'effet de l'axe d sur l'axe q et vice versa.

Remplaçant les équations magnétiques (III.22) dans les équations électriques (III.10, III.11), on le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & -\frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} L_m \\ \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & R_s & \frac{d\theta_s}{dt} L_m & 0 \\ -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & R_r & -\frac{d\theta_r}{dt} L_r \\ -\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} L_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 23})$$

Pour construire le schéma Matlab Simulink de ce modèle, il faut inverser la matrice inductance, soit manuellement, soit en utilisant un logiciel dédié tel que MatWorks qui permet l'inversion littérale des matrices. (Les détails des calculs sont donnés dans l'annexe C).

### II.3 Choix du référentiel de travail

Nous constatons ici que nous n'avons pour l'instant pas choisi de référentiel, c'est-à-dire que nous n'avons pas donné de valeur particulière aux dérivées des angles  $\frac{d\theta_s}{dt}$  et  $\frac{d\theta_r}{dt}$ .

En pratique, trois référentiels peuvent être utilisés :

- Référentiel lié au stator :  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$  et  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$ .

- Référentiel lié au rotor :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$  et  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$ .

- Référentiel lié au champ tournant :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$  et  $\frac{d\theta_r}{dt} = g.\omega$ .

## II.4 Modèle de la machines asynchrone en tenant compte des pertes fer

La prise en compte des pertes fer se fait habituellement par l'insertion d'une résistance appelée  $R_m$  représentant les pertes fer, dans le schéma équivalent de la GAAE [Mat 11] [Gra 02][Rou17]. Dans les machines de faible puissance, le courant parcourant la résistance  $R_m$  n'est plus négligeable devant le courant magnétisant [Gra 02]. La prédiction du comportement dynamique de la GAAE peut être faussée par cette hypothèse.

A cet effet, nous allons d'abord donner des équations qui vont nous permettre de construire le schéma équivalent de la GAAE. A partir de ce schéma, nous insérerons la résistance  $R_m$ , aux emplacements voulus pour construire les modèles tenant compte des pertes fer.

### II.4.1 Schéma équivalent de la GAAE

Pour mieux expliquer comment obtenir le modèle qui prend en compte les pertes fer, nous nous servons des schémas équivalents dans les axes d et q de la GAAE.

Pour établir ces deux schémas équivalents, il faut faire apparaître les courants magnétisants dans les équations magnétiques.

$$\begin{aligned}
 \varphi_{ds} &= l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \\
 \varphi_{qs} &= l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \\
 \varphi_{dr} &= l_{r\sigma} \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{dm} \\
 \varphi_{qr} &= l_{r\sigma} \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qm}
 \end{aligned} \tag{III.24}$$

En remplaçant (III.24) des équations électriques (III.10 et III.11) on obtient :

$$\begin{aligned}
 p \cdot L_m \cdot i_{dm} &= v_{ds} - p \cdot l_{s\sigma} \cdot i_{ds} - R_s \cdot i_{ds} \\
 p \cdot L_m \cdot i_{dm} &= -p \cdot l_{r\sigma} \cdot i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} - R_r \cdot i_{dr} \\
 p \cdot L_m \cdot i_{qm} &= v_{qs} - p \cdot l_{s\sigma} \cdot i_{qs} - R_s \cdot i_{qs} \\
 p \cdot L_m \cdot i_{qm} &= -p \cdot l_{r\sigma} \cdot i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} - R_r \cdot i_{qr}
 \end{aligned} \tag{III.25}$$

Sachant que le terme  $p$  désigne l'opérateur de dérivation  $\frac{d}{dt}$  :

Le système d'équations (III.25) permet d'établir les schémas équivalents dans les axes d et q de la GAAE. Les figures (III.3) et (III.4) représentent ces deux schémas équivalents.

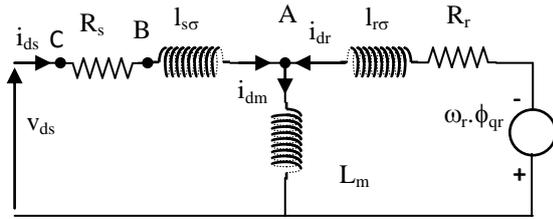


Figure III.3 Schéma équivalent d'axe d de la GAAE

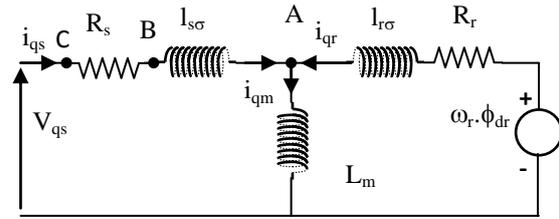


Figure III.4 Schéma équivalent d'axe q de la GAAE

Trois emplacements de la résistance  $R_m$  aboutissent à trois modèles différents de la GAAE avec prise en compte des pertes fer :

a) Si nous insérons la résistance  $R_m$  en parallèle avec l'inductance de magnétisation  $L_m$  ; c'est-à-dire au point A de la figure (III.3), nous obtiendrons un premier modèle de la GAAE tenant en compte les pertes fer. Nous appellerons ce modèle « modèle conventionnel ». Ce modèle aboutira à des équations différentielles de second ordre. Il nécessitera un pas de calcul réduit (ne devant pas excéder  $10^{-5}$ s) et le temps de calcul deviendra très long.

b) L'insertion de la résistance  $R_m$  en amont de l'inductance de fuites statoriques  $l_{s\sigma}$  (point B de la figure III.3) mènera à un deuxième modèle de la GAAE tenant compte des pertes fer. Nous appellerons ce modèle : « modèle simplifié ». Contrairement au modèle conventionnel, le modèle simplifié ne fait appel qu'à des équations différentielles de premier ordre. Il ne nécessite donc pas un pas de calcul réduit et le programme issu de ce modèle est très rapide.

c) L'insertion de la résistance  $R_m$  en amont de la résistance statorique (point C de la figure III.3) reviendrait à utiliser le modèle sans pertes fer et à considérer la résistance  $R_m$  comme une charge supplémentaire connectée en parallèle avec la charge alimentée.

Dans ce qui suit nous développerons les deux modèles conventionnel et simplifié.

### II.4.2 Modèle dynamique conventionnel de la GAAE avec prise en compte des pertes fer

Il suffit de rajouter dans les figures (III.3) et (III.4) la résistance  $R_m$  associée aux pertes fer en parallèle avec la réactance magnétisante.

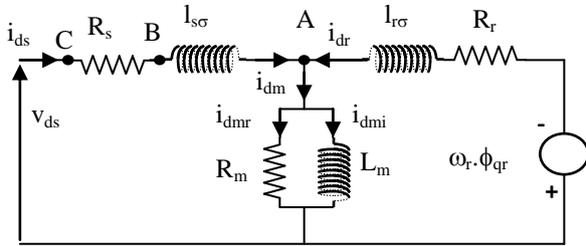


Figure III.5 Schéma équivalent conventionnel d'axe d tenant compte des pertes fer.

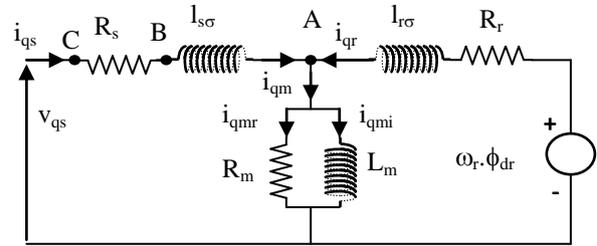


Figure III.6 Schéma équivalent conventionnel d'axe q tenant compte des pertes fer.

Le courant magnétisant  $i_m$  se trouve ainsi divisé en deux composantes ; une composante active appelée  $i_{ma}$  qui circule dans la résistance  $R_m$  et une composante réactive  $i_{mr}$  qui circule dans l'inductance magnétisante  $L_m$ .

Les expressions des flux se trouvent modifiées comme suit (le développement est effectué pour un seul flux et le même résultat s'applique aux autres flux).

$$\varphi_{ds} = l_{fs} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dmi} \quad (III.26)$$

$$i_{dmi} = \frac{R_m}{R_m + L_m \cdot p} i_{dm} \quad (III.27)$$

$$\varphi_{ds} = l_{fs} \cdot i_{ds} + \frac{L_m \cdot R_m}{R_m + L_m \cdot p} i_{dm} \quad (III.28)$$

Si l'on compare l'équation (III.28) avec la première équation du système d'équations (III.20) on constate que pour tenir compte des pertes fer, on peut garder les mêmes équations que dans le modèle sans pertes fer, il suffit uniquement de remplacer dans les expressions des

flux le terme  $L_m$  par  $\frac{L_m \cdot R_m}{R_m + L_m \cdot p}$ .

Où :  $p$  désigne l'opérateur de dérivation  $\frac{d}{dt}$

On obtient ainsi les équations suivantes permettant de construire le modèle conventionnel de la GAAE prenant en compte les pertes fer.

$$p^2 \cdot i_{ds} = \frac{1}{l_{fs}} p \cdot v_{ds} + \frac{R_m}{l_{fs} \cdot L_m} v_{ds} - \left( \frac{R_s}{l_{fs}} + \frac{R_m}{l_{fs}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot p \cdot i_{ds} - \frac{R_m}{l_{fs}} \cdot p \cdot i_{dr} - \frac{R_s}{l_{fs}} \cdot \frac{R_m}{L_m} \cdot i_{ds} \quad (\text{III.29})$$

$$p^2 \cdot i_{qs} = \frac{1}{l_{fs}} p \cdot v_{qs} + \frac{R_m}{l_{fs} \cdot L_m} v_{qs} - \left( \frac{R_s}{l_{fs}} + \frac{R_m}{l_{fs}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot p \cdot i_{qs} - \frac{R_m}{l_{fs}} \cdot p \cdot i_{qr} - \frac{R_s}{l_{fs}} \cdot \frac{R_m}{L_m} \cdot i_{qs} \quad (\text{III.30})$$

$$p^2 \cdot i_{dr} = \frac{R_m}{l_{fr} \cdot L_m} K_{dr} - \frac{R_m}{l_{fr}} p \cdot i_{ds} - \left( \frac{R_r}{l_{fr}} + \frac{R_m}{l_{fr}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot p \cdot i_{dr} - \omega_r \cdot p \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot \frac{R_r}{l_{fr}} \cdot i_{qs} - \frac{R_r}{l_{fr}} \cdot \frac{R_m}{L_m} \cdot i_{dr} - \omega_r \left( \frac{R_m}{l_{fr}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot i_{qr} \quad (\text{III.31})$$

$$p^2 \cdot i_{qr} = \frac{R_m}{l_{fr} \cdot L_m} K_{qr} - \frac{R_m}{l_{fr}} p \cdot i_{qs} - \left( \frac{R_r}{l_{fr}} + \frac{R_m}{l_{fr}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot p \cdot i_{qr} + \omega_r \cdot p \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot \frac{R_r}{l_{fr}} \cdot i_{ds} - \frac{R_r}{l_{fr}} \cdot \frac{R_m}{L_m} \cdot i_{qr} + \omega_r \left( \frac{R_m}{l_{fr}} + \frac{R_m}{L_m} \right) \cdot i_{dr} \quad (\text{III.32})$$

### II.4.3 Modèle dynamique simplifié de la GAEE avec prise en compte des pertes fer :

Le modèle précédent a abouti à des équations différentielles faisant appel à des dérivées de courant de second ordre. Le programme issu de ces équations nécessite un pas de calcul réduit (le pas maximum d'intégration ne doit pas excéder  $10^{-5}$ s autrement le programme divergerait). Il existe un deuxième modèle dynamique tenant en compte les pertes fer et ne nécessitant pas un temps de calcul aussi réduit. Il suffit de placer la résistance  $R_m$  symbolisant les pertes fer non pas en parallèle avec l'inductance magnétisante  $L_m$ , mais plutôt en amont de l'inductance de fuites statoriques.

Les courants statoriques  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  se partagent en deux termes chacun : les courants parcourant l'inductance de fuites statoriques  $i_{dsL}$  et  $i_{qsL}$  et les courants dérivant dans la résistance des pertes fer  $i_{dsR}$  et  $i_{qsR}$  (Voir figure III.7 et III.8):

$$\begin{aligned} i_{ds} &= i_{dsL} + i_{dsR} \\ i_{qs} &= i_{qsL} + i_{qsR} \end{aligned} \quad (\text{III.33})$$

Les courants parcourant les inductances de fuites statoriques peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} i_{dsL} &= i_{ds} - i_{dsR} \\ i_{dsR} &= \frac{V_{ds} - R_s i_{ds}}{R_m} \Rightarrow i_{dsL} = i_{ds} - \frac{V_{ds} - R_s i_{ds}}{R_m} = i_{ds} \left( 1 + \frac{R_s}{R_m} \right) - \frac{V_{ds}}{R_m} \\ i_{dsL} &= i_{ds} \left( \frac{R_s + R_m}{R_m} \right) - \frac{V_{ds}}{R_m} \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

Les mêmes équations se répètent dans l'axe q :

$$i_{qsL} = i_{qs} \left( \frac{R_s + R_m}{R_m} \right) - \frac{V_{qs}}{R_m} \quad (\text{III.35})$$

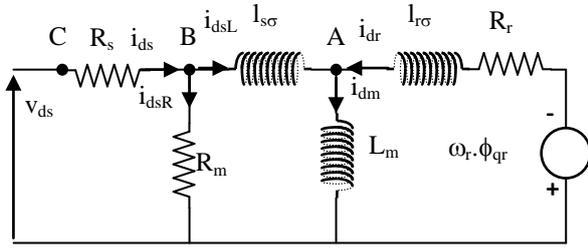


Figure III.7 Schéma équivalent simplifié d'axe d tenant compte des pertes fer.

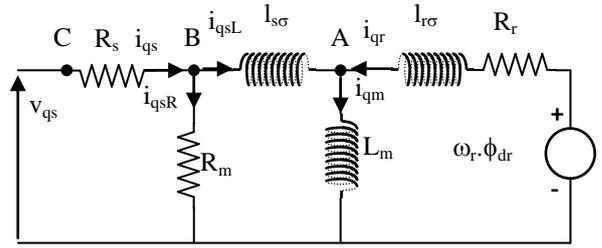


Figure III.8 Schéma équivalent simplifié d'axe q tenant compte des pertes fer.

Dans ce cas les équations magnétiques précédentes doivent être réécrites comme suit :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{dsL} + L_m \cdot i_{dr} \\ \varphi_{ds} &= L_s \cdot \frac{R_s + R_m}{R_m} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{ds} \\ \varphi_{ds} &= L_{sT} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{ds} \end{aligned} \quad (\text{III.36})$$

$$\begin{aligned} \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qsL} + L_m \cdot i_{qr} \\ \varphi_{qs} &= L_{sT} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{qs} \\ \varphi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{dsL} \\ \varphi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot \left( \frac{R_s + R_m}{R_m} \cdot i_{ds} - \frac{V_{ds}}{R_m} \right) = L_r \cdot i_{dr} + L_{mT} \cdot i_{ds} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qsL} \\ \varphi_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_{mT} \cdot i_{qs} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{qs} \end{aligned} \quad (\text{III.37})$$

Les équations électriques doivent maintenant être réécrites en fonction de ces nouveaux flux.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \frac{d}{dt} \left( L_{sT} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{ds} \right) - \frac{d\theta_s}{dt} \left( L_{sT} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{qs} \right) + R_s \cdot i_{ds} \\ v_{ds} + \frac{L_s}{R_m} \frac{dV_{ds}}{dt} - \frac{L_s}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \cdot V_{qs} &= L_{sT} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + R_s \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} L_{sT} \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{qr} \\ v_{qs} &= \frac{d}{dt} \left( L_{sT} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{qs} \right) + \frac{d\theta_s}{dt} \left( L_{sT} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} - \frac{L_s}{R_m} \cdot V_{ds} \right) + R_s \cdot i_{qs} \\ v_{qs} + \frac{L_s}{R_m} \frac{dV_{qs}}{dt} + \frac{L_s}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \cdot V_{ds} &= L_{sT} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} L_{sT} \cdot i_{ds} + R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{dr} \end{aligned} \quad (\text{III.38})$$

$$\begin{aligned}
K_{dr} &= \frac{d}{dt} (L_r \cdot i_{dr} + L_{mT} \cdot i_{ds} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{ds}) - \frac{d\theta_r}{dt} (L_r \cdot i_{qr} + L_{mT} \cdot i_{qs} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{qs}) + R_r \cdot i_{dr} \\
K_{dr} + \frac{L_m}{R_m} \cdot \frac{dV_{ds}}{dt} - \frac{L_m}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot V_{qs} &= L_{mT} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - L_{mT} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{qs} + R_r \cdot i_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{III.39}) \\
K_{qr} &= \frac{d}{dt} (L_r \cdot i_{qr} + L_{mT} \cdot i_{qs} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{qs}) + \frac{d\theta_r}{dt} (L_r \cdot i_{dr} + L_{mT} \cdot i_{ds} - \frac{L_m}{R_m} \cdot V_{ds}) + R_r \cdot i_{qr} \\
K_{qr} + \frac{L_m}{R_m} \cdot \frac{dV_{qs}}{dt} + \frac{L_m}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot V_{ds} &= L_{mT} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + L_{mT} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot L_r \cdot i_{dr} + R_r \cdot i_{qr}
\end{aligned}$$

Les deux constantes  $K_{dr}$  et  $K_{qr}$  représentent le magnétisme rémanent du rotor.

On aboutit au système d'équations suivant :

$$(V_1) = [R_1] \cdot (i) + [L_1] \cdot \frac{d(i)}{dt} \quad (\text{III.40})$$

Avec :

$$(i) = \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix}; (V_1) = \begin{pmatrix} v_{ds} + \frac{L_s}{R_m} \frac{dV_{ds}}{dt} - \frac{L_s}{R_m} \frac{d\theta_s}{dt} \cdot V_{qs} \\ v_{qs} + \frac{L_s}{R_m} \frac{dV_{qs}}{dt} + \frac{L_s}{R_m} \frac{d\theta_s}{dt} \cdot V_{ds} \\ K_{dr} + \frac{L_m}{R_m} \frac{dV_{ds}}{dt} - \frac{L_m}{R_m} \frac{d\theta_r}{dt} \cdot V_{qs} \\ K_{qr} + \frac{L_m}{R_m} \frac{dV_{qs}}{dt} + \frac{L_m}{R_m} \frac{d\theta_r}{dt} \cdot V_{ds} \end{pmatrix}; [L_1] = \begin{pmatrix} L_{sT} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{sT} & 0 & L_m \\ L_{mT} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{mT} & 0 & L_r \end{pmatrix}$$

$$[R_1] = \begin{pmatrix} R_s & -L_{sT} \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & -L_{mT} \frac{d\theta_s}{dt} \\ L_{sT} \frac{d\theta_s}{dt} & R_s & L_{mT} \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ 0 & -L_{mT} \frac{d\theta_r}{dt} & R_r & -L_r \frac{d\theta_r}{dt} \\ L_{mT} \frac{d\theta_r}{dt} & 0 & L_r \frac{d\theta_r}{dt} & R_r \end{pmatrix}$$

L'inversion de la matrice  $L_1$  donne :

$$L_1^{-1} = \frac{1}{L_{sT} \cdot L_r - L_{mT} \cdot L_m} \begin{pmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_{mT} & 0 & L_{sT} & 0 \\ 0 & -L_{mT} & 0 & L_{sT} \end{pmatrix} \quad (\text{III.41})$$

Les quatre équations suivantes permettent de construire le schéma Matlab Simulink du modèle dynamique simplifié de la GAAE avec prise en compte de pertes fer.

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} = & \frac{1}{L_{sT} \cdot L_r - L_{mT} \cdot L_m} (L_r \cdot v_{ds} - L_m \cdot K_{dr} + (\frac{L_m^2}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} - \frac{L_s \cdot L_r}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt}) \cdot v_{qs} + \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{R_m} \frac{dv_{ds}}{dt} - L_r \cdot R_s i_{ds} \\ & + (L_{sT} \cdot L_r \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - L_{mT} \cdot L_m \cdot \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{qs} + L_m \cdot R_r i_{dr} + L_m \cdot L_r \cdot (\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{qs}}{dt} = & \frac{1}{L_{sT} \cdot L_r - L_{mT} \cdot L_m} (L_r \cdot v_{qs} - L_m \cdot K_{qr} + (\frac{L_s \cdot L_r}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{L_m^2}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot v_{ds} + \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{R_m} \frac{dv_{qs}}{dt} - L_r \cdot R_s i_{qs} \\ & - (L_{sT} \cdot L_r \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - L_{mT} \cdot L_m \cdot \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{ds} + L_m \cdot R_r i_{qr} - L_m \cdot L_r \cdot (\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{dr} \end{aligned} \quad (\text{III.43})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{dr}}{dt} = & \frac{1}{L_{sT} \cdot L_r - L_{mT} \cdot L_m} (-L_{mT} \cdot v_{ds} + L_{sT} \cdot K_{dr} + (\frac{L_{mT} \cdot L_s}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{L_{sT} \cdot L_m}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot v_{qs} + (\frac{L_{sT} \cdot L_m - L_{mT} \cdot L_s}{R_m}) \cdot \frac{dv_{ds}}{dt} \\ & + L_{mT} \cdot R_s i_{ds} - L_{mT} \cdot L_{sT} (\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{qs} - L_{sT} \cdot R_r i_{dr} + (L_{sT} \cdot L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} - L_{mT} \cdot L_m \cdot \frac{d\theta_s}{dt}) \cdot i_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.44})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{qr}}{dt} = & \frac{1}{L_{sT} \cdot L_r - L_{mT} \cdot L_m} (-L_{mT} \cdot v_{qs} + L_{sT} \cdot K_{qr} - (\frac{L_{mT} \cdot L_s}{R_m} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{L_{sT} \cdot L_m}{R_m} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot v_{ds} + (\frac{L_{sT} \cdot L_m - L_{mT} \cdot L_s}{R_m}) \cdot \frac{dv_{qs}}{dt} \\ & + L_{mT} \cdot R_s i_{qs} + L_{mT} \cdot L_{sT} (\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}) \cdot i_{ds} - L_{sT} \cdot R_r i_{qr} - (L_{sT} \cdot L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} - L_{mT} \cdot L_m \cdot \frac{d\theta_s}{dt}) \cdot i_{dr} \end{aligned} \quad (\text{III.45})$$

## II.5 Le processus d'auto-amorçage

### II.5.1 Description du phénomène d'auto-amorçage

Initialement, le magnétisme résiduel du rotor produit par la rotation une force électromotrice (f.é.m) dans le bobinage statorique. Cette f.è.m appliquée à la branche statorique en série avec la capacité d'auto-amorçage (circuit RLC) produit dans chaque phase du stator un courant magnétisant qui produit à son tour un flux d'entrefer qui vient s'ajouter au flux résiduel pour créer par rotation une force électromotrice plus grande. Celle-ci s'amplifie jusqu'à atteindre un point d'équilibre. Ce dernier est spécifique à une vitesse, à une

capacité et à une caractéristique de magnétisation données (intersection de la caractéristique  $L_m(i_m)$  avec la droite de l'impédance capacitive, point A de la figure III.9). Malheureusement cet équilibre n'est atteint que dans la zone de saturation de la courbe  $L_m(i_m)$ . Avec une inductance magnétisante constante ou une courbe  $L_m(i_m)$  linéaire, cet équilibre ne sera jamais atteint et la tension continuera d'augmenter indéfiniment. C'est le résultat logiquement divergent du modèle linéaire de la GAEE.

Pour une vitesse donnée, quand la capacité est trop basse (courbe 2 de la figure III.9), cela produit un courant capacitif négligeable et la génératrice ne s'amorce pas. Dans autre côté, pour une trop grande capacité (courbe 3 de la figure III.9), la machine s'amorce mais la branche statorique s'apparente à un court-circuit (impédance capacitive faible) et la tension se met à diminuer.

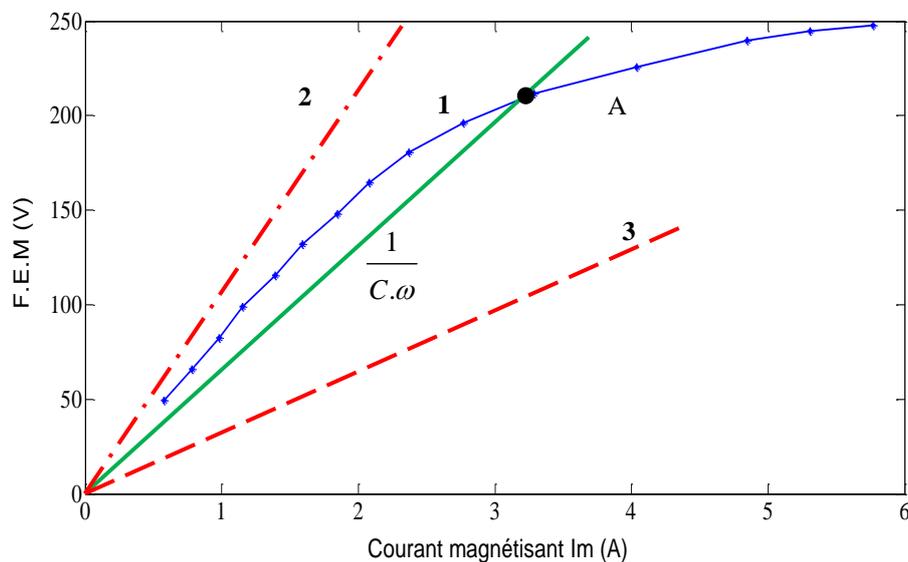


Figure.III.9 F.é.m magnétisante en fonction du courant magnétisant.

Le magnétisme rémanent du rotor peut être représenté soit en assignant une valeur initiale à l'un des deux intégrateurs des courants magnétisants (une très faible valeur suffit), soit en assignant une valeur non nulle (mais très faible) à l'une des deux composantes (d'axe d ou d'axe q) des tensions rotoriques ou statoriques.

### II.5.2 Modélisation du phénomène d'auto-amorçage

Le processus d'auto-amorçage décrit précédemment est modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
\frac{d(v_s)}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot (i_s) \\
\frac{d(p(\theta_s)^{-1} \cdot v_{ps})}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps}) \\
p(\theta_s)^{-1} \cdot \frac{dv_{ps}}{dt} + \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} &= -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps}) \\
\frac{dv_{ps}}{dt} + p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} &= -\frac{1}{C} \cdot i_{ps} \\
\frac{dv_{ps}}{dt} = -p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} - \frac{1}{C} \cdot i_{ps} \\
p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} &= - \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{pmatrix} \\
\frac{dv_{ds}}{dt} &= v_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{ds} \\
\frac{dv_{qs}}{dt} &= -v_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{qs} \\
\frac{dv_{0s}}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot i_{0s}
\end{aligned} \tag{III.46}$$

### II.6 Résultats et discussions

#### a) Essai expérimental

Afin de valider les modèles dynamiques développés de la GAAE en tenant compte des pertes fer, une plate-forme de tests expérimentaux est réalisée. Elle se compose d'une machine asynchrone à rotor bobiné de puissance 3 kW, d'un moteur à courant continu d'égale puissance, d'un banc triphasé capacitif variable connecté en étoile pour assurer la magnétisation de la machine asynchrone et une charge résistive triphasée variable.

Les tests de simulation et expérimentaux effectués dans cette section concernent un générateur asynchrone avec les paramètres de circuit équivalents donnés dans l'annexe A [Sib 14]. La figure (III.10) montre la mise en place du dispositif de test expérimental



Figure III.10 Une photo de la plate-forme d'essai expérimental.

Les figures (III.11, III.12 et III.13) représentent respectivement les courbes de la tension statorique, du courant statorique et du courant rotorique obtenues par un test expérimental réalisé dans les conditions suivantes:

Initialement la GAAE est magnétisée sans charge, puis à  $t = 25\text{s}$ , une charge résistive triphasée de  $220\Omega$  est connectée. La vitesse de rotation est fixée à  $1400\text{ tr / min}$  et la valeur de la capacité est fixée à  $60\ \mu\text{F}$ .

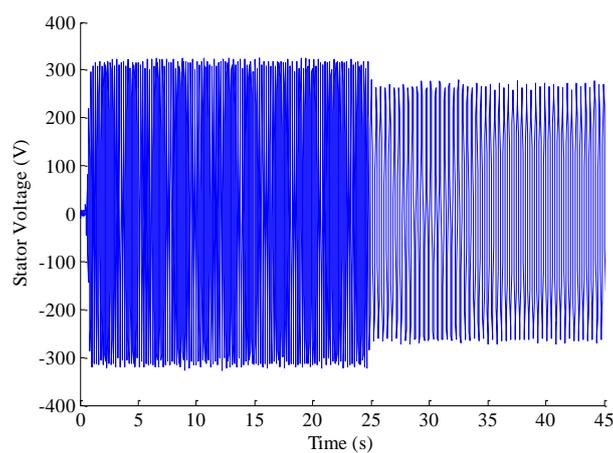


Figure III.11 Tension statorique expérimentale.

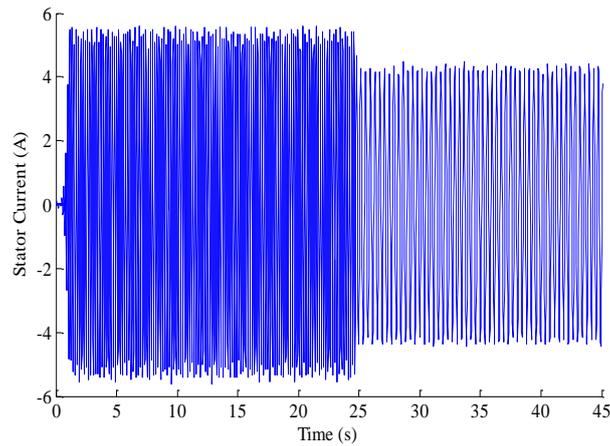


Figure III.12 Courant statorique expérimental.

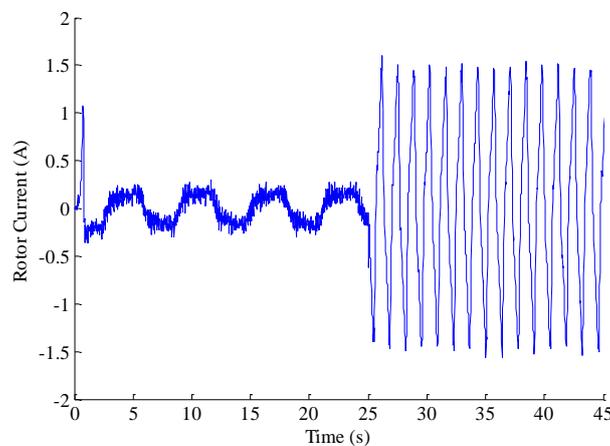


Figure III.13 Courant rotorique expérimental.

Ces courbes expérimentales serviront de base de validation et de comparaison des modèles théoriques tenant compte des pertes fer.

Il faut donc comparer à chaque fois, une courbe expérimentale et quatre courbes théoriques représentant les résultats des tests par simulation réalisés dans les mêmes conditions que l'expérience. En effet, ces quatre courbes définissent quatre modèles, à savoir : un modèle sans pertes fer indiqué par  $No R_m$  et trois modèles avec des pertes fer indiquées respectivement par:  $R_m // L_m$ ,  $R_m // I_{s\sigma}$  et  $R_m // R_s$ .

Dans les figures (III.14, III.15 et III.16), on présentera respectivement trois graphes contenant les résultats théoriques et expérimentaux de la tension statorique, du courant statorique et du courant rotorique.

Les résultats seront analysés dans ce qui suit en considérant deux aspects fondamentaux de la GAAE: le processus d'auto-excitation sans charge et la connexion d'une charge.

b) *Processus d'auto-excitation sans charge*

La figure (III.14) montre les enveloppes supérieures de la tension statorique de la GAEE. En tenant compte de la différence entre les quatre résultats de simulation que montre la figure (III.14), on constate que la négligence des pertes fer implique une surestimation de la tension statorique. Logiquement, le modèle sans perte fer est celui qui donne la tension la plus élevée. Le fait d'introduire la résistance des pertes fer  $R_m$  provoque une chute de tension du stator. Plus nous déplaçons la position de  $R_m$  vers la gauche dans le diagramme équivalent, moins on surestime la tension du stator. Par conséquent, la courbe théorique la plus proche de l'expérimentale est celle du troisième modèle ( $R_m // R_s$ ).

Ce résultat peut être expliqué en considérant le courant traversant la résistance des pertes fer  $R_m$ . En utilisant le théorème de Thevenin, ce courant peut être exprimé comme suit:

$$i_{Rm1} = i_m \frac{X_m}{\sqrt{R_m^2 + X_m^2}} \quad (\text{III.47})$$

$$i_{Rm2} = i_m \frac{X_m + X_{s\sigma}}{\sqrt{R_m^2 + (X_m + X_{s\sigma})^2}} = i_m \frac{X_s}{\sqrt{R_m^2 + X_s^2}} \quad (\text{III.48})$$

$$i_{Rm3} = i_m \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{R_m^2 + R_s^2 + X_s^2}} = i_m \frac{Z_s}{\sqrt{R_m^2 + Z_s^2}} \quad (\text{III.49})$$

Où:  $i_{Rm1}$ ,  $i_{Rm2}$ ,  $i_{Rm3}$  sont les courants qui circulent dans la résistance des pertes fer  $R_m$ , fournis respectivement par le premier, le deuxième et le troisième modèle. D'après les équations (III.47), (III.48) et (III.49), il est clair que  $i_{Rm3} > i_{Rm2} > i_{Rm1}$ , on peut en déduire donc que le déplacement de la position de la résistance  $R_m$  vers la gauche dans le diagramme équivalent est synonyme d'une augmentation des pertes fer qui provoque ainsi une augmentation de la chute de tension. Par conséquent, le troisième modèle ( $R_m // R_s$ ) est celui qui donne l'amplitude de la tension statorique la plus basse. Des remarques similaires peuvent être tirées sur le courant du stator de la figure (III.15). Un impact plus important des pertes fer peut être vu dans la figure (III.16) représentant le courant rotorique. On peut noter que l'introduction des pertes fer provoque une augmentation significative du courant rotorique. Cela s'explique par le fait qu'une augmentation des pertes globales, en raison des pertes fer, provoque une augmentation de la valeur de glissement, qui à son tour réduit la résistance du rotor équivalente  $R'_r / g$  puis une augmentation du courant rotorique est ainsi obtenue. Comme prévu, le troisième modèle qui fournit le plus grand courant de résistance des pertes fer est

celui qui donne le courant rotorique le plus élevé à l'état stationnaire et le modèle sans pertes fer est le seul à sous-estimer le courant rotorique. On peut également noter à partir de la figure (III.16) que le courant rotorique sans charge est surestimée par les modèles prenant en compte les pertes fer. Cela résulte du fait que la résistance des pertes fer  $R_m$  est supposée constante.

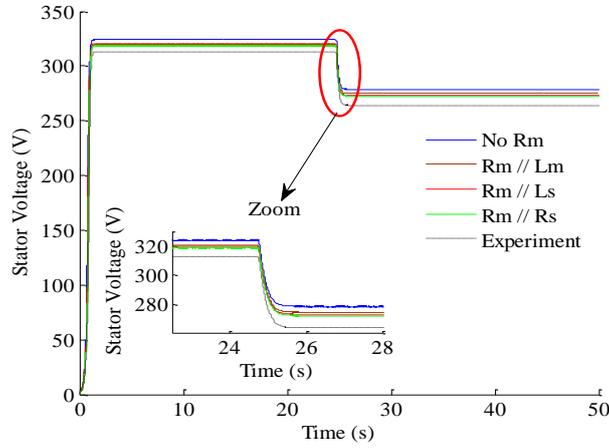


Figure III.14 Enveloppe supérieure de la tension statorique.

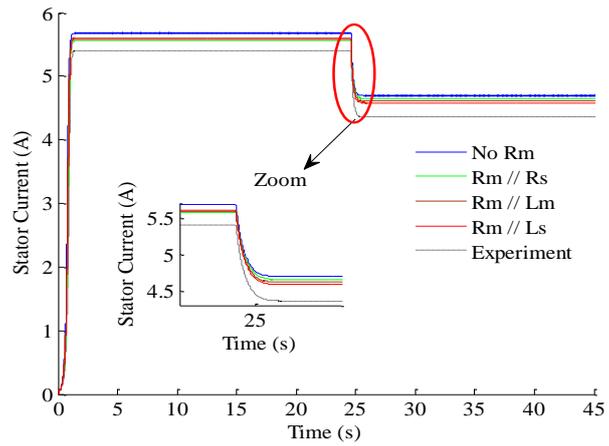


Figure III.15 Enveloppe supérieure du courant statorique.

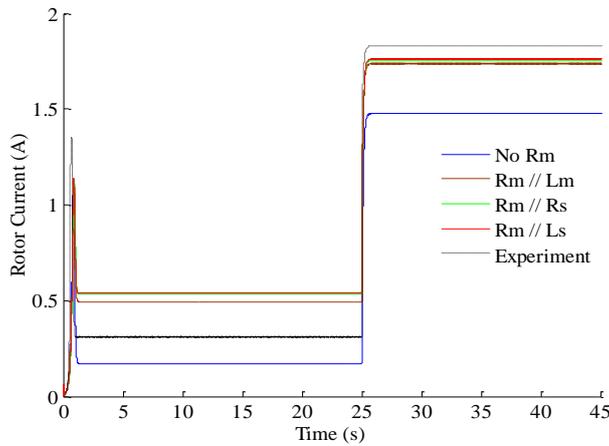


Figure III.16 Enveloppe supérieure du courant rotorique.

### *c) Influence de la charge*

La figure (III.14) montre que la tension statorique diminue une fois qu'une charge est connectée. Ce résultat souligne l'inconvénient principal de la GAEE, dans des conditions de fonctionnement autonomes, une régulation de la tension statorique est requise.

La tension statorique de la GAEE peut être réglée via un redresseur triphasé contrôlé par MLI [Bar 13][Abb 11]. La chute de tension statorique peut également être compensée par la connexion de capacités supplémentaires en série avec la charge [Sub 11].

La figure (III.15) montre que lorsque la charge est connectée, le courant statorique diminue au lieu d'augmenter, cela est dû à la chute de tension statorique.

La figure (III.16) montre que la connexion de la charge entraîne une augmentation notable du courant rotorique. Le courant rotorique est la véritable image de la charge. Comme prévu, en comparant les courbes théoriques et expérimentales, nous concluons que tous les modèles sous-estiment le courant rotorique. Ceci est dû au fait que ces modèles ne tiennent pas compte de toutes les pertes, comme par exemple les pertes supplémentaires.

## **III. Commande en puissance du générateur éolien**

Nous nous intéressons dans un premier temps à la modélisation du redresseur MLI, puis nous associerons ce dernier à la génératrice asynchrone auto-excitée puis lui appliquer la commande directe de puissance DPC. Le but est bien sûr de faire suivre à la génératrice des références de puissance active et réactive tout en maintenant une tension en sortie du redresseur constante.

### **III.1 Modélisation du redresseur à MLI**

Le redresseur à MLI de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, représenté sur la figure (III.17). Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de par sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [Fad 08]. Il alimente alors une charge en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal, et éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante. Ce redresseur à MLI permet ainsi d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité.

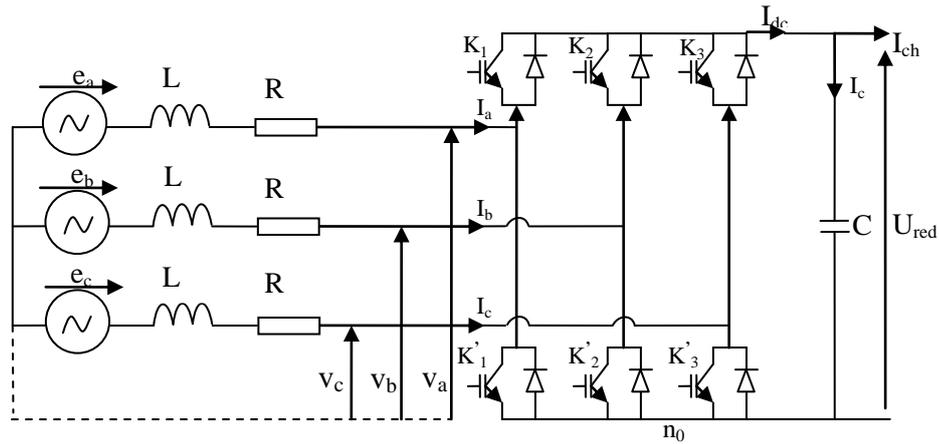


Figure III.17 Schéma d'un redresseur à MLI.

### III.1.1 Modélisation dans le repère abc coté alternatif

La source est composée d'une f.é.m. triphasée parfaitement sinusoïdale en série avec une résistance  $R$  et une inductance  $L$  sur chaque phase. Le réseau est supposé parfaitement équilibré, les impédances des trois phases sont identiques. Les trois tensions du réseau sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 e_a &= e_{\max} \sin(\omega t) \\
 e_a &= e_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 e_a &= e_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{III.50}$$

Avec :

$\omega$  : La pulsation du réseau.

$e_{\max}$  : L'amplitude maximale de la tension de source

En appliquant la loi de Kirchhoff du côté alternatif, on obtient :

$$\begin{aligned}
 -e_a + R.I_a + L \frac{d}{dt} I_a + V_a &= 0 \\
 -e_b + R.I_b + L \frac{d}{dt} I_b + V_b &= 0 \\
 -e_c + R.I_c + L \frac{d}{dt} I_c + V_c &= 0
 \end{aligned}
 \tag{III.51}$$

Où  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les tensions simples à l'entrée du redresseur.

Le système d'équations (III.51) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{R}{L} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_a & -V_a \\ e_b & -V_b \\ e_c & -V_c \end{pmatrix} \quad (\text{III.52})$$

Après avoir calculé les courants d'entrée au redresseur, on cherche maintenant les tensions d'entrée.

Les tensions composées à l'entrée du redresseur s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_a - V_b \\ U_{bc} &= V_b - V_c \\ U_{ca} &= V_c - V_a \end{aligned} \quad (\text{III.53})$$

Pour passer des tensions composées aux tensions simples, étant donné que la somme instantanée des courants  $I_a + I_b + I_c$  est nulle, et que le réseau est équilibré et sinusoïdal impliquant la somme des forces électromotrices nulle ( $e_a + e_b + e_c = 0$ ).

Alors :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{III.54})$$

A partir des équations (III.53) et (III.54) on trouve :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3} \\ V_b &= \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \\ V_c &= \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3} \end{aligned} \quad (\text{III.55})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{pmatrix} \quad (\text{III.56})$$

Le tableau ci-dessous représente toutes les configurations possibles du convertisseur en fonction des ordres de commande ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) ainsi que les tensions simples à l'entrée du

pont, pour une tension constante du bus continu  $V_{dc}$ . Notons que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commande complémentaire.

$K$	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$
0	1	0	0	$U_{dc}$	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	$U_{dc}$	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	$U_{dc}$
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$
5	1	0	1	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau III.1 Les différents états des interrupteurs et les tensions correspondantes.

De cette table, On cherchera alors une expression reliant la tension  $U_{dc}$  aux tensions  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  qui soit une fonction de l'état des interrupteurs. On commencera d'abord par trouver l'expression des tensions composées en fonction de l'état des interrupteurs.

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= U_{dc}(S_a - S_b) \\
 U_{bc} &= U_{dc}(S_b - S_c) \\
 U_{ca} &= U_{dc}(S_c - S_a)
 \end{aligned}
 \tag{III.57}$$

On remplace (III.57) dans (III.55) on trouve :

$$\begin{aligned}
 V_a &= U_{dc} \left( \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \right) \\
 V_b &= U_{dc} \left( \frac{2S_b - (S_c + S_a)}{3} \right) \\
 V_c &= U_{dc} \left( \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.58}$$

Le système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (\text{III.59})$$

### III.1.2 Modélisation dans le repère abc coté continu

Pour compléter le modèle de redresseur dans le repère triphasé abc on écrit l'équation électrique du bus continu comme suit :

$$I_{dc} = I_c + I_{ch} \quad (\text{III.60})$$

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{III.61})$$

$I_c$  : le courant dans la capacité (C).

$I_{ch}$  : le courant dans la charge ( $R_{ch}$ ).

De l'équation (III.57), on obtient :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{dc} - I_{ch} \quad (\text{III.62})$$

Du tableau (III.1.), on déduit que :

$$I_{dc} = I_a S_a + I_b S_b + I_c S_c \quad (\text{III.63})$$

## III.2 La commande directe de puissance DPC

La structure globale de la *DPC*, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliquée au pont redresseur à *MLI* triphasé est illustrée sur la figure (III.18). Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (*DTC*) des machines à induction.

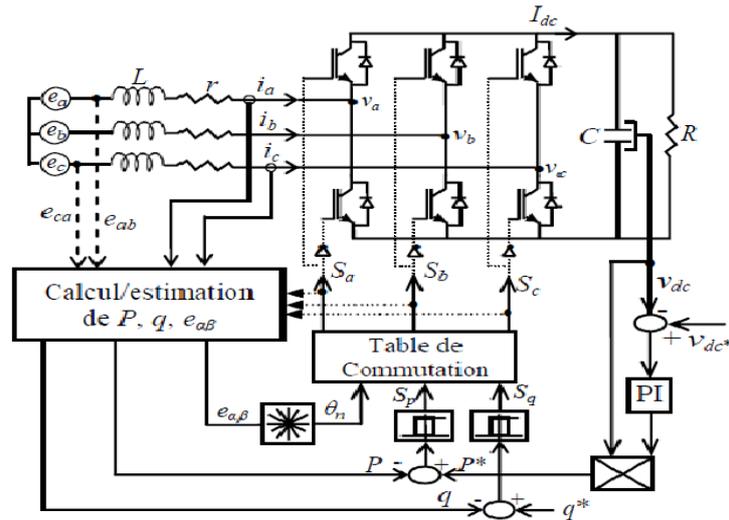


Figure III.18 Schéma synoptique de la DPC avec table de commutation prédéfinie appliquée au redresseur triphasé à MLI. [Bou 10]

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande à partir d'une table de commutation. La sélection du vecteur de commande est fondée sur les erreurs numérisées ( $S_p, S_q$ ) des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, ainsi que sur la position angulaire du vecteur tension calculé [Mon 09].

En fonction de cette position, le plan ( $\alpha$ - $\beta$ ) est divisé en douze secteurs égaux de  $30^\circ$ , on doit alors associer à chaque secteur un état logique du redresseur. La référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire, la référence de la puissance réactive est fixée à zéro.

### III.2.1 Calcul des puissances instantanées

Basée sur la mesure des tensions et courants injectés, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

$$P = \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c \quad (\text{III.64})$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ (e_a - e_b) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c \right]$$

Les puissances instantanées active et réactive peuvent être estimées sans mesure des tensions du réseau. Les expressions permettant cette estimation sont basées sur la mesure des courants absorbés, la mesure de la tension du bus continu, et sur les états des interrupteurs. Elles sont données par comme suit [Nog 98]:

$$\begin{aligned}\hat{P} &= L \left( \frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \\ \hat{q} &= \sqrt{3} L \left( \frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} U_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)]\end{aligned}\quad (\text{III.65})$$

Pour calculer la position du vecteur des tensions dans le plan  $\alpha$ - $\beta$ , les valeurs des composantes  $e_\alpha$  et  $e_\beta$  peuvent être aussi estimées à partir des puissances instantanées et des courants absorbés, en utilisant la relation ci-après:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix}\quad (\text{III.66})$$

### III.2.2 Comparateur à hystérésis

L'implémentation du comparateur à hystérésis est plutôt simple, dans notre cas nous utilisons deux comparateurs à deux niveaux (0 ou 1) afin de comparer l'erreur obtenue auparavant avec un seuil défini. Les sorties du comparateur à hystérésis étant des variables booléennes  $S_p$ ,  $S_q$ , leurs valeurs vont dépendre du dépassement de ces erreurs par rapport au seuil. Si celui-ci est inférieur alors la sortie prendra la valeur 0, au contraire si le dépassement est supérieur alors la sortie sera égale à 1.

Si  $P^* - P > h_p$  alors  $S_p=1$  et Si  $P^* - P < -h_p$  alors  $S_p=0$

Si  $q^* - q > h_q$  alors  $S_q=1$  et Si  $q^* - q < -h_q$  alors  $S_q=0$

Avec :

$P^*$  : puissance active de référence

$P$  : la puissance active mesurée

$q^*$  : puissance réactive de référence

$q$  : la puissance réactive mesurée

$h_p$  et  $h_q$  : désignent les bandes d'hystérésis des puissances active et réactive

### III.2.3 Détection de secteur

Le calcul de la position angulaire du vecteur des tensions du réseau dans le plan stationnaire  $\alpha$ - $\beta$  nécessite la connaissance des composantes  $e_\alpha$  et  $e_\beta$ , qui peuvent être soit calculées à partir des mesures des tensions du réseau, soit estimées à partir de l'estimation des puissances instantanées et des courants absorbés. Cette position est définie par la relation suivante:

$$\theta = \arctan\left(\frac{e_\beta}{e_\alpha}\right) \tag{III.67}$$

A son tour, le numéro du secteur où se trouve le vecteur des tensions est déterminé en comparant l'angle  $\theta$  avec les bornes de chacun des douze secteurs (figure III.19), qui sont définies par la formule ci-dessous :

$$(n-2)\frac{\pi}{6} < \theta_n < (n-1)\frac{\pi}{6} \quad n=1,2,3,\dots,12$$

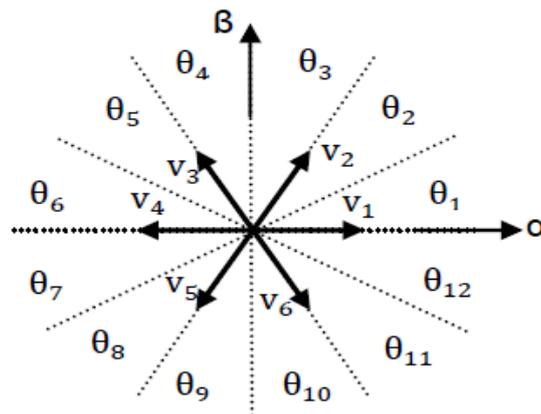


Figure III. 19 Secteurs et vecteurs de commande du redresseur.

Le schéma sous Matlab-simulink de détermination du secteur est donné comme suit :

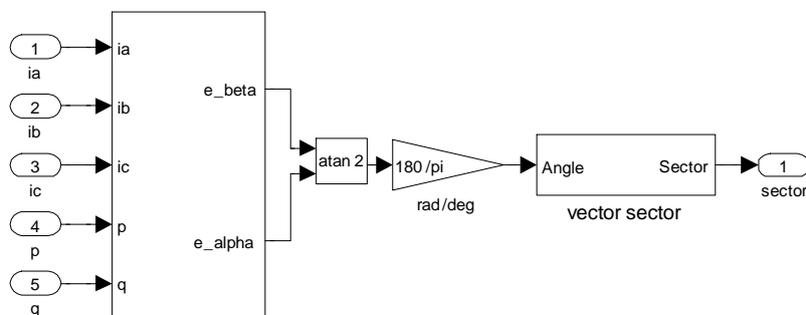


Figure III.20 Schéma Matlab simulink de détermination du secteur.

### III.2.4 Table de commutation

Une fois les sorties booléennes  $S_p$ ,  $S_q$  des comparateurs à hystérésis établies, et suivant le numéro du secteur où se trouve le vecteur  $\alpha\beta$ , le vecteur des tensions à appliquer à l'entrée du redresseur est sélectionné à partir de la table de commutation donnée dans le tableau III.2, Sachant qu'un redresseur de tension à deux niveaux génère huit vecteurs de tension pour huit combinaisons différentes [Che 08].

L'état optimal de commutation du redresseur est calculé de sorte que l'erreur de la puissance active et réactive instantanée puisse être restreinte dans une bande désirée.

$S_p$	$S_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
1	0	$V_6$	$V_7$	$V_1$	$V_0$	$V_2$	$V_7$	$V_3$	$V_0$	$V_4$	$V_7$	$V_5$	$V_0$
	1	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$
0	0	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$
	1	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$

$$V_1 (100), V_2 (110), V_3 (010), V_4 (011), V_5 (001), V_6 (101), V_7 (111), V_0 (000)$$

Tableau III.2: Table de commutation. [Bou 10]

## IV. Résultats de simulation

### a) Suivi d'une tension de référence

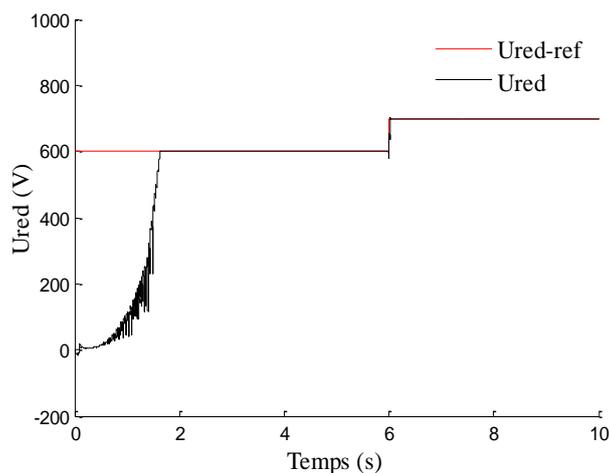


Figure III.21 Allure de la tension du bus continu du redresseur MLI avec sa référence en fonction du temps.

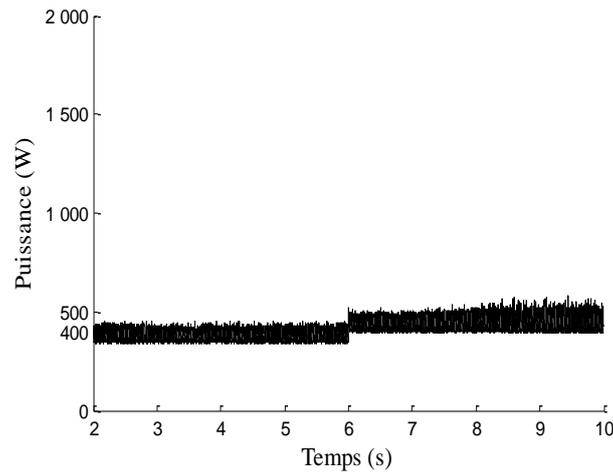


Figure III.22 Allure de la puissance active de la machine en fonction du temps.

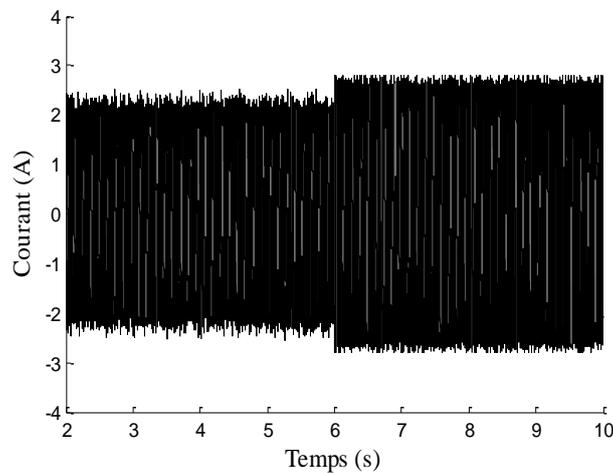


Figure III.23 Allure du courant  $i_{as}$  d'une phase statorique en fonction du temps.

### Interprétation des résultats

La figure (III.21) montre la variation de la tension de bus continu. Un profil de tension donné qui est initialement fixé à 600V, passe à 700V à l'instant  $t=6s$ . On remarque que la tension de sortie de redresseur à MLI répond bien à la référence de tension qui lui est imposée.

La charge étant fixée à  $300\Omega$ , ce qui donne un courant de charge de 0.5 A. On remarque que lorsque la tension du bus continu atteint la nouvelle référence (figure III.21), la figure (III.22) montre que la puissance active augmente aussi.

La figure (III.23) montre le courant statorique  $i_{as}$  qui répond bien à la variation imposée par  $V_{dc}$ , il s'établit rapidement après une courte durée.

*b) Influence de la charge*

Ce test est effectué en imposant un profil d'une charge résistive  $R_{ch}$  de valeurs  $750 \Omega$ ,  $1200 \Omega$ ,  $600 \Omega$  et  $1200 \Omega$ . Cette charge est représentée par son courant  $I_{ch}$ , dont la tension de bus continu est réglée à sa valeur de référence de  $V_{dc} = 600 \text{ V}$ . Nous montrons l'influence de cette charge sur l'évolution de la puissance active, des courants statoriques et de la tension du bus continu  $V_{dc}$ .

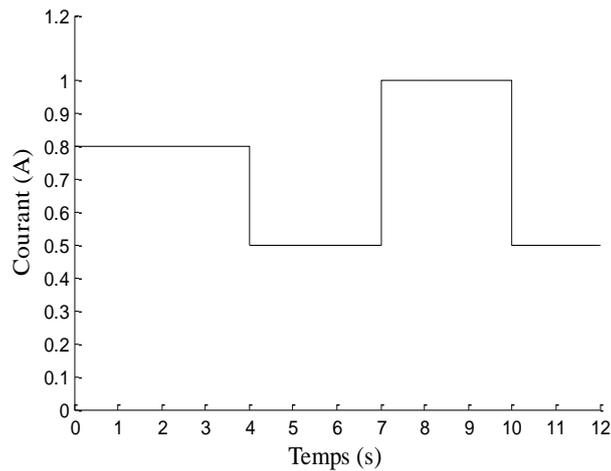


Figure III.24 Allure du profil du courant de charge appliqué.

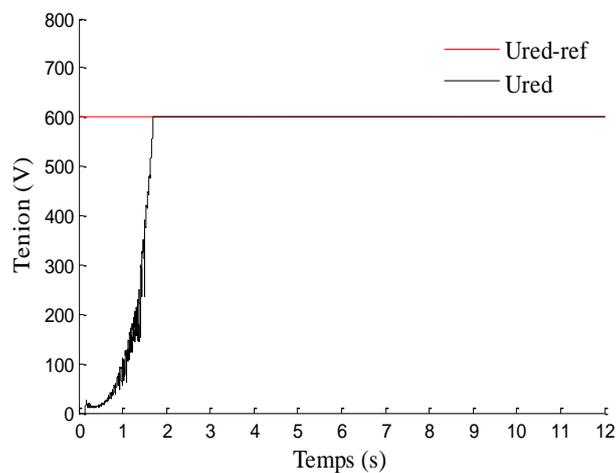
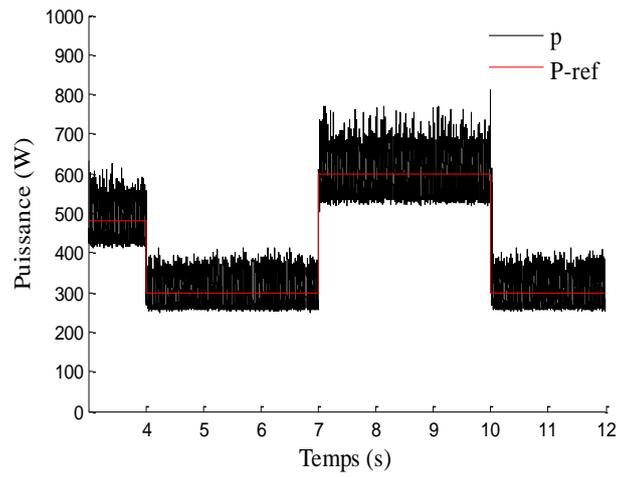
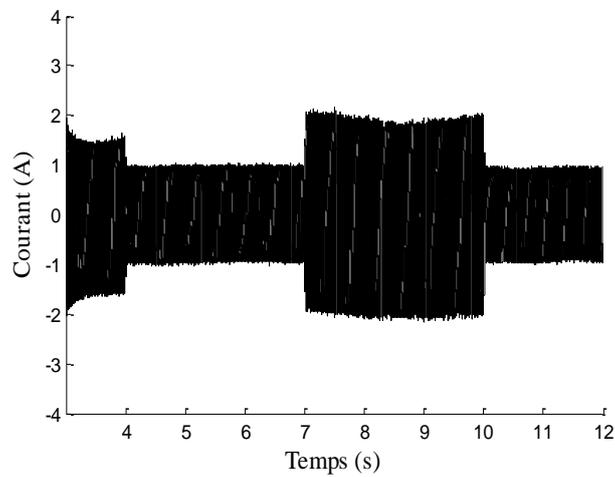
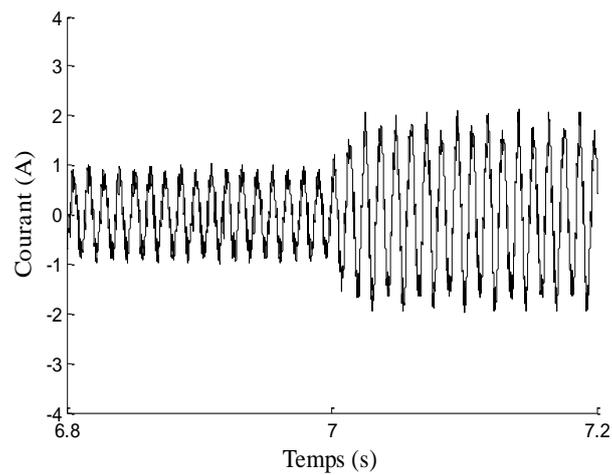


Figure III.25 Tension  $U_{red}$  aux bornes du redresseur MLI avec sa référence en fonction du temps.

Figure III.26 Allure de la puissance active  $P$  en fonction du temps.Figure III .27 Allure du courant  $i_{as}$  d'une phase statorique en fonction du temps.Figure III.28 Zoom sur le courant statorique  $i_{as}$ .

La figure (III.24) montre la variation de la charge résistive représentée par son courant.

La variation de la charge n'a pratiquement aucune influence sur la tension du bus continu  $V_{dc}$  régulée comme montre par la figure (III.25), la tension  $V_{dc}$  est restée fixe. La tension  $V_{dc}$  est rapidement ramenée à sa valeur de référence après de petits écarts enregistrés aux instants d'application de la charge.

La figure (III.26) illustre l'évolution de la puissance active statorique en variant la valeur de la résistance de charge. Nous remarquons que la puissance varie en fonction de la variation de la charge et suit bien sa référence.

L'allure du courant de phase statorique est représentée sur la figure (III.27). A la variation de la charge à  $t=4s$  le courant statorique  $i_{as}$  diminue à la diminution du courant de charge ( $R_{ch}$  augmente). A l'instant  $t=7s$ , nous augmentons le courant de charge ( $R_{ch}$  diminue), le courant statorique  $i_{as}$  augmente car la machine est appelée à fournir le courant actif demandé par la charge. Le même raisonnement permet d'expliquer l'évolution de ce courant et les valeurs prises à partir des instants  $t=10s$ . La figure (III.28) montre un zoom sur le courant de phase statorique.

## V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré d'une part au développement de modèles dynamiques de la GAEE en tenant compte des pertes fer et à leur comparaison en termes de précision et de consommation de temps. D'autre part à l'application de la commande directe de puissance DPC, au générateur asynchrone auto-excité débitant sur une charge à travers un redresseur à MLI.

Le développement de modèles dynamiques de la GAEE révèle que les modèles prenant en compte les pertes fer tirent partie de l'addition d'une résistance équivalente aux pertes fer dans le schéma équivalent du GAEE.

Trois modèles sont couramment utilisés: le premier est complexe, il consiste à placer la résistance  $R_m$  en parallèle avec l'inductance magnétisante, elle repose sur des équations différentielles de second ordre et nécessite un pas de résolution réduit (pas plus de  $10^{-5}$  s). Le programme résultant de ce modèle est donc très lent et est sujet à des instabilités numériques.

Le second consiste à placer la résistance  $R_m$  avant l'inductance de fuite du stator. Il est basé sur des équations différentielles de premier ordre et ne nécessite pas un de calcul réduit

( $5 * 10^{-4}$  s). Le programme résultant de ce modèle est donc aussi rapide que le programme sans pertes fer et offre une précision équivalente au premier modèle.

Le troisième est le plus simple et consiste à placer la résistance  $R_m$  avant la résistance du stator. Ce modèle équivaut à utiliser le modèle sans perte fer et à considérer la résistance  $R_m$  comme une résistance supplémentaire à connecter en parallèle à la charge.

A partir de ces trois modèles, on conclut que les pertes fer ont le même effet que celles données par la charge.

Pour l'application de la commande directe de puissance DPC au générateur asynchrone auto-excité débitant sur une charge à travers un redresseur à MLI, un régulateur de tension est inséré afin de maintenir la tension continue à la sortie du redresseur constante et pallier ainsi aux inconvénients des variations de la charge ou de la vitesse de rotation. Ce régulateur permet d'utiliser l'ensemble générateur asynchrone-redresseur à MLI dans un système autonome. La commande directe de puissance permet d'imposer une référence quelconque de puissance et donc d'insérer cet ensemble dans un projet plus vaste.

Des tests par simulation menés dans ce chapitre ont montré que le régulateur de tension est capable de suivre une référence de tension donnée et de la garder constante. Ils ont également montré que la commande directe de puissance adoptée a permis au système de répondre à une variation de la charge.

## Chapitre IV

### ÉTUDE ET COMMANDE DU SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

#### I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'étude et la commande du système hybride éolien-photovoltaïque. Pour ce faire, dans un premier temps, nous présenterons le système global hybride à étudier, puis nous dimensionnerons chaque chaîne qui constitue ce système, à savoir ; la chaîne éolienne, la chaîne photovoltaïque et la chaîne de stockage pour qu'on puisse les connecter ensemble vers un même bus continu à travers des convertisseurs. Par la suite, nous proposerons une stratégie de gestion du système global pour générer des références de puissance pour chacune des sources (éolien, photovoltaïque, batterie et le générateur diesel) dans le but d'assurer d'une façon optimale, une alimentation sans interruption de la charge.

#### II. Présentation du système global

L'objectif du travail que nous proposons est de développer un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien-photovoltaïque sert à alimenter en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. En cas d'absence de soleil et de vent, des batteries de stockage et un générateur diesel sont prévus pour l'alimentation de secours.

Ces trois sources d'énergie sont connectées vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

Ce système global est illustré dans la figure (IV.1) suivante :

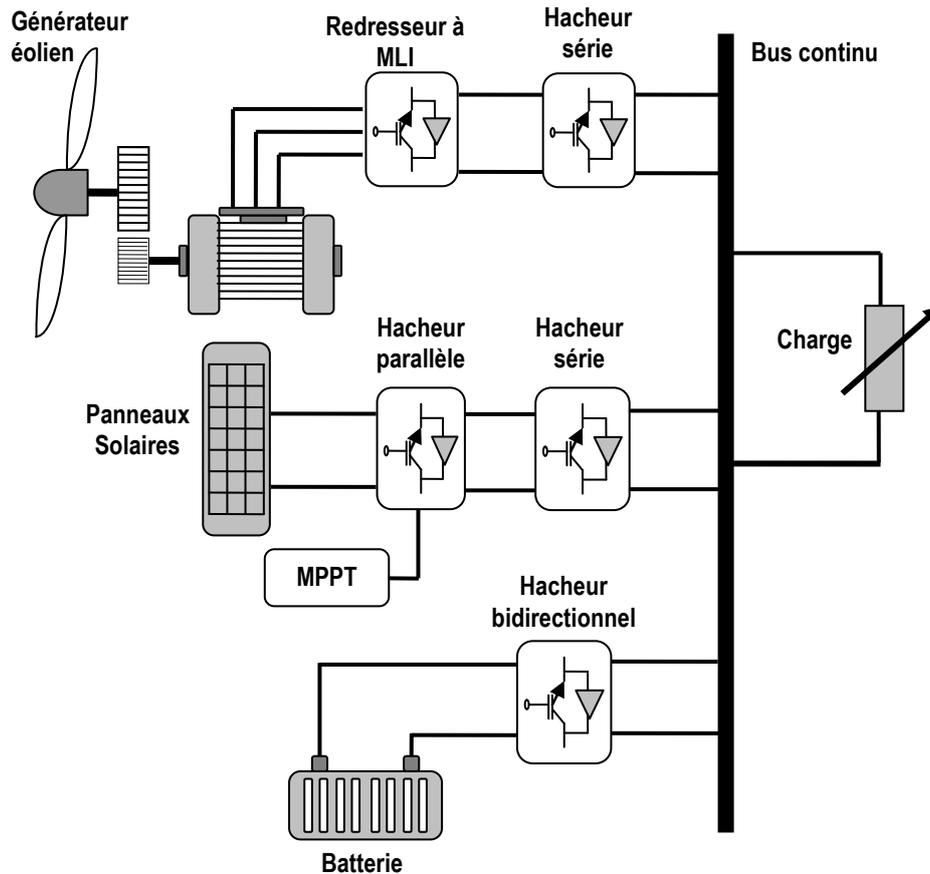


Figure IV.1. Schéma du système global à énergies renouvelables.

Dans ce qui suit, nous allons procéder à la présentation des trois chaînes du système hybride ainsi que le système global.

En effet, la première chaîne est une chaîne de conversion éolienne, qui a été développée dans le chapitre trois, pour laquelle nous rajouterons un hacheur série afin d'obtenir la tension du bus continu désirée.

La deuxième chaîne est une chaîne de conversion photovoltaïque elle a été développée dans le chapitre deux, pour laquelle nous rajouterons un hacheur série afin d'obtenir la même tension désirée que la chaîne précédente.

La troisième chaîne est définie comme étant un système de stockage, elle s'agit d'une batterie qui joue aussi le rôle d'une source d'énergie dans le cas où la première et la deuxième chaîne ne satisfont pas la demande de la charge.

Concernant le système global, nous le développerons par la connexion des deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque vers un même bus continu avec le système de stockage et l'ensemble débitera sur une charge résistive variable.

### III. Chaîne de conversion éolienne

#### III.1. Présentation de la chaîne de conversion éolienne

La chaîne de conversion éolienne illustrée dans la figure (IV.2) est composée de :

- Une génératrice asynchrone de puissance 3kW auto-excitée par un banc triphasé de condensateurs, permettant la conversion de l'énergie du vent en une énergie électrique.
- A noter que la génératrice peut nous fournir un tiers de sa puissance maximale dans les conditions optimales.
- Un redresseur MLI muni d'une commande (DPC) qui permet de faire suivre à la génératrice asynchrone une puissance active donnée tout en maintenant une tension en sortie du redresseur constante.
  - Un hacheur série DC/DC muni d'une régulation, permettant d'avoir une tension désirée afin de le raccorder au bus continu.
  - Une charge résistive variable.

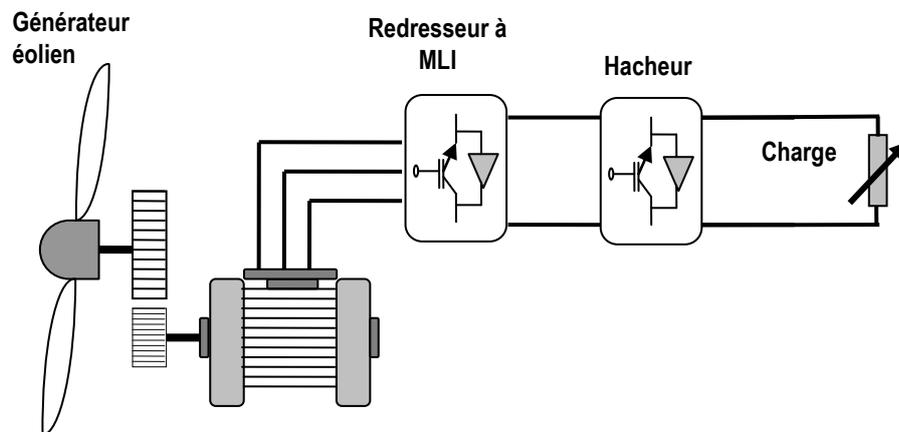


Figure IV.2. Schéma du système éolien débitant sur une charge résistive à travers un convertisseur DC/DC.

#### III.2. Commande du hacheur série

Le convertisseur DC/DC proposé est de type hacheur série ou dévolteur (Buck). Ce hacheur est modélisé par le schéma électrique équivalent de la figure (IV.3). Lors du fonctionnement en régime continu de ce hacheur série, les valeurs moyennes des tensions de sortie  $V_{dc}$  et d'entrée  $U_{red}$  sont proportionnelles, telle que  $V_{dc} = u U_{red}$ . Le coefficient de proportionnalité  $u$ , étant le rapport cyclique de valeurs comprises entre 0 et 1.

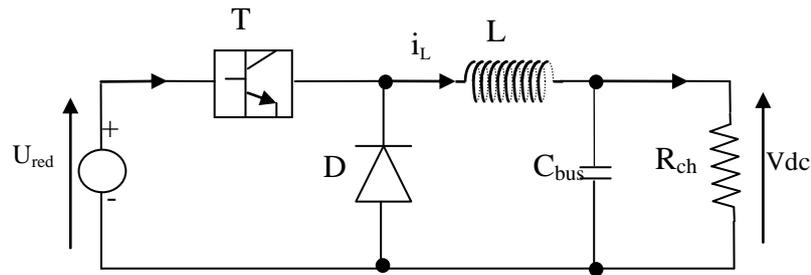


Figure IV.3. Circuit électrique du hacheur série avec sa charge.

Le convertisseur peut être représenté par le système d'équations suivant :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(U_{red} - V_{dc}) \quad (\text{IV. 1})$$

$$C_{bus} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{IV. 2})$$

Où :

$i_L$  : Le courant qui traverse l'inductance.

$U_{red}$  : La tension d'entrée du convertisseur.

$V_{dc}$  : La tension de sortie du convertisseur.

La figure (IV.4) illustre le principe de la commande en boucle fermée, qui consiste en l'intégration de la boucle de courant en cascade avec la boucle de tension.

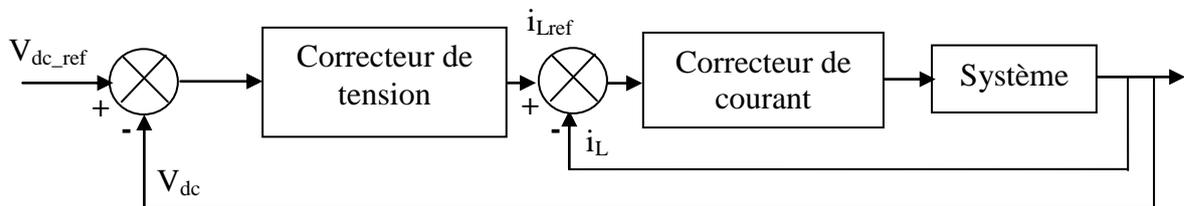


Figure IV.4. Schéma d'un système de commande en boucle fermée.

On voit apparaître explicitement les deux boucles à savoir :

- Boucle interne rapide : Commande à hystérésis donnée par la boucle du courant qui permet d'assurer la trajectoire du courant en délivrant le rapport cyclique.
- Boucle externe lente : Boucle de tension contrôlant en PI la tension en sortie du hacheur lors des variations de la charge et de la vitesse.

A partir de l'équation (IV.2), et en considérant que les variations du courant de charge  $\frac{V_{dc}}{R_{ch}}$  sont négligeables devant les variations du courant  $i_L$ , on obtient la fonction de transfert en

$$\text{boucle ouverte : } FTBO = \frac{V_{dc}(p)}{i_L(p)} = \frac{1}{C_{bus} \cdot p} \quad (\text{IV. 3})$$

Le régulateur proportionnel intégral noté PI est composé de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mises en parallèle. Sa fonction de transfert est :

$$C(p) = k_i + \frac{k_p}{p} \quad (\text{IV. 4})$$

Où :

$k_i$  : est le gain intégral.

$k_p$  : est le gain proportionnel.

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale.

La fonction de transfert en boucle fermée est donc :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot p + 1}{1 + \left(\frac{K_p}{K_i}\right) \cdot p + \left(\frac{C_{bus}}{K_i}\right) \cdot p^2} \quad (\text{IV. 5})$$

Cette fonction de transfert peut être mise sous la forme canonique suivante :

$$FTBF = \frac{(\tau \cdot p + 1)}{1 + 2\xi \cdot \left(\frac{p}{\omega}\right) + \left(\frac{p}{\omega}\right)^2} \quad (\text{IV. 6})$$

Où  $\xi$  : la constante d'amortissement.

$\omega$  : la pulsation propre.

Par identification on obtient :

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{C_{bus}}{K_i} \quad \text{et} \quad \frac{2\xi}{\omega} = \frac{K_p}{K_i} \quad \Rightarrow \quad K_p = \frac{2\xi}{\sqrt{\frac{1}{K_i * C_{bus}}}} \quad \text{et} \quad K_i = \omega^2 * C_{bus}$$

### III.3. Résultats de simulation de la chaîne éolienne et discussions

Nous présenterons dans ce qui suit les résultats de simulation lors de l'utilisation de la chaîne éolienne en s'appuyant sur les tests de suivi de consigne et de sensibilité aux perturbations afin de valider notre commande et comprendre le comportement de notre chaîne de conversion.

#### a) Suivi de consigne

Les tests du principe de suivi de consigne consistent à entrainer la machine à une vitesse constante, fixer la tension du hacheur, dans le but de valider la commande de la chaîne de conversion éolienne lorsque la tension du hacheur suit sa référence.

Les figures (IV.5 - IV.14) montrent les résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne (figure IV.2). Les paramètres de simulation sont comme suit :

- La génératrice est entraînée avec une vitesse de 1500 tr/min, et une capacité d'excitation de  $60 \mu\text{F}$ .
- La tension de référence du redresseur MLI est fixée à 600 V,
- La tension de référence du hacheur set fixée à 48 V.
- La valeur de la résistance est de  $100 \Omega$ .

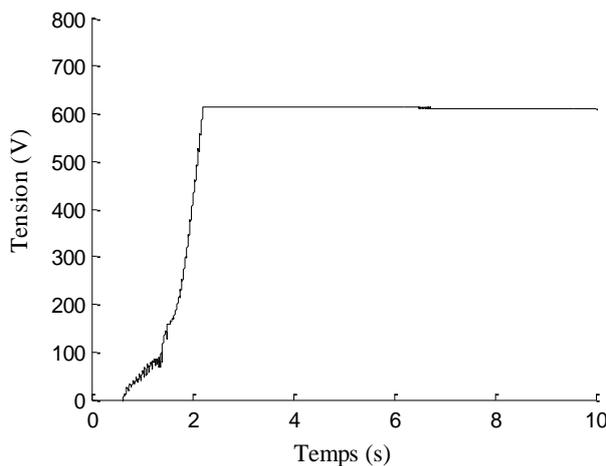


Figure IV.5 Tension  $U_{\text{red}}$  aux bornes du redresseur MLI.

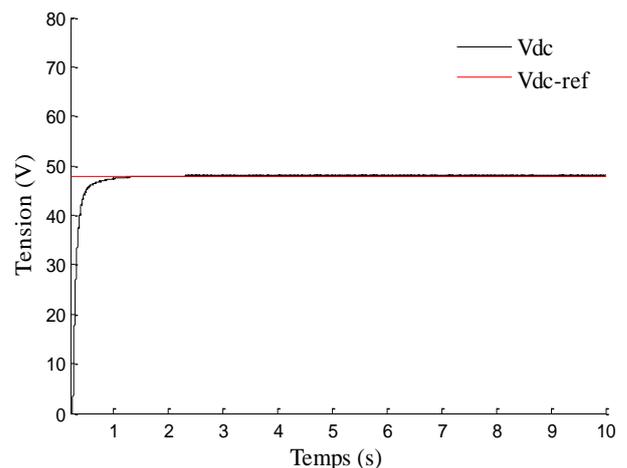


Figure IV.6 Tension  $V_{\text{dc}}$  aux bornes du hacheur série.

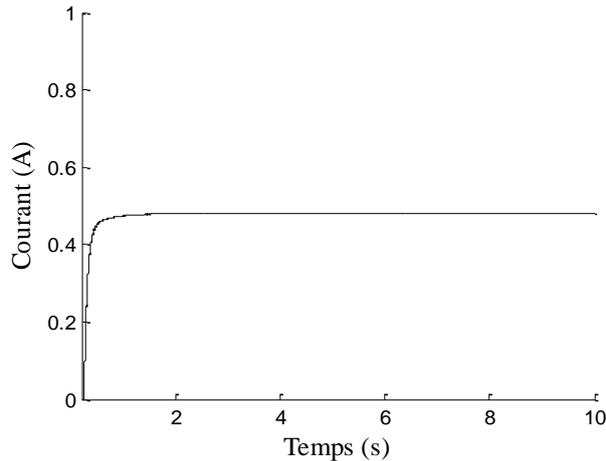


Figure IV.7 Courant de charge  $i_{ch}$  du hacheur série.

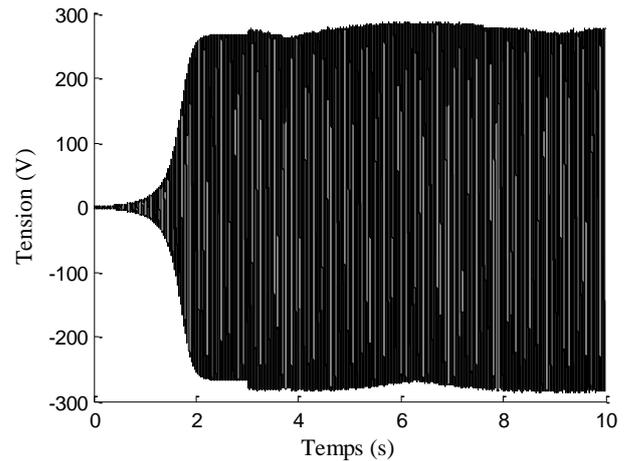


Figure IV.8 Tension d'une phase statorique  $V_{as}$  de la GAAE.

### b) Sensibilité aux perturbations

Pour tester l'efficacité de la commande du hacheur, nous avons effectué des perturbations au système qui consistent, en premier lieu à varier la tension de référence puis à varier la charge en deuxième lieu en gardant les mêmes conditions pour la machine. En effet, la tension a été augmentée de 48 V jusqu'à 60 V à l'instant  $t=5$  s et de même pour la charge qui passe de  $100\Omega$  jusqu'à  $120\Omega$  à l'instant  $t=5$  s.

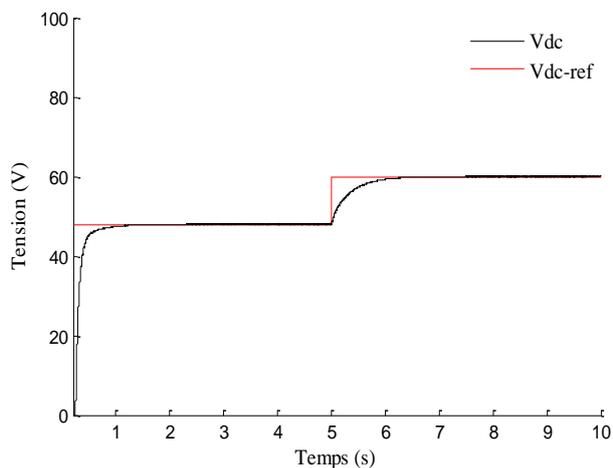


Figure IV.9 Tension  $V_{dc}$  aux bornes du hacheur série qui passe de 48 V à 60 V.

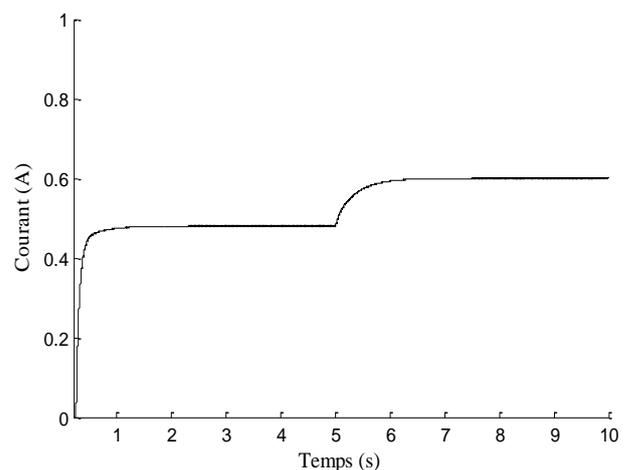


Figure IV.10 Courant de charge  $i_{ch}$  du hacheur série.

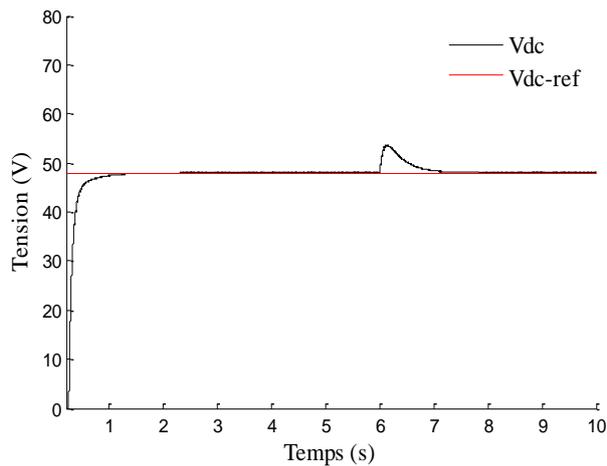


Figure IV.11 Tension  $V_{dc}$  aux bornes du hacheur série avec variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

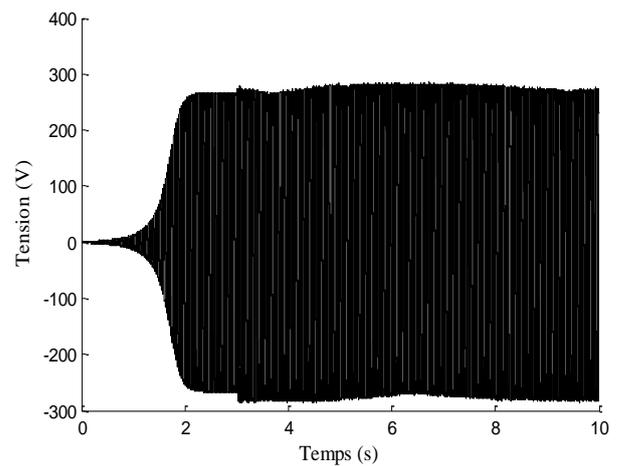


Figure IV.13 Tension d'une phase statorique  $V_{as}$  de la GAAE pour une variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

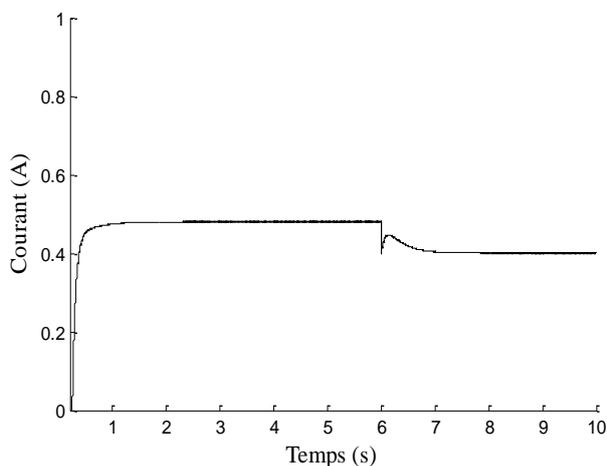


Figure IV.12 Courant de charge  $i_{ch}$  du hacheur série avec variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

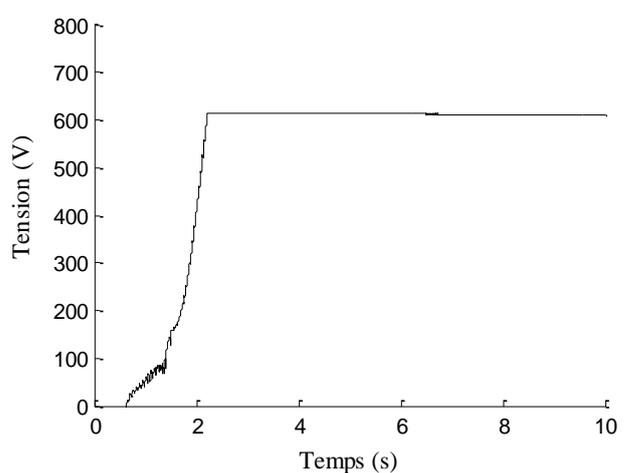


Figure IV.14 Tension  $U_{dc}$  en sortie du redresseur MLI pour une variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

Les résultats des deux tests par simulation effectués ont montré que la tension à la sortie est maintenue constante, ce qui nous permet de constater que la commande du système par un régulateur PI est efficace, dans les deux cas de variation soit de la charge ou bien de la tension de référence.

#### IV. Chaîne de conversion photovoltaïque

La chaîne de conversion photovoltaïque illustrée dans la figure (IV.15) est composée de :

- Une association de cinq (5) panneaux solaires ayant chacun une puissance de 60 W, permettant la conversion de l'énergie solaire en une énergie électrique.

Pour optimiser les conditions de fonctionnement de l'ensemble de ces panneaux, ces derniers sont connectés à un convertisseur DC/DC (élevateur) muni d'une commande MPPT.

Les paramètres caractérisant les panneaux solaires sont donnés dans l'annexe A.

- Un hacheur série DC/DC muni d'une régulation, permettant d'avoir une tension désirée afin de le raccorder au bus continu.
- Une charge résistive.

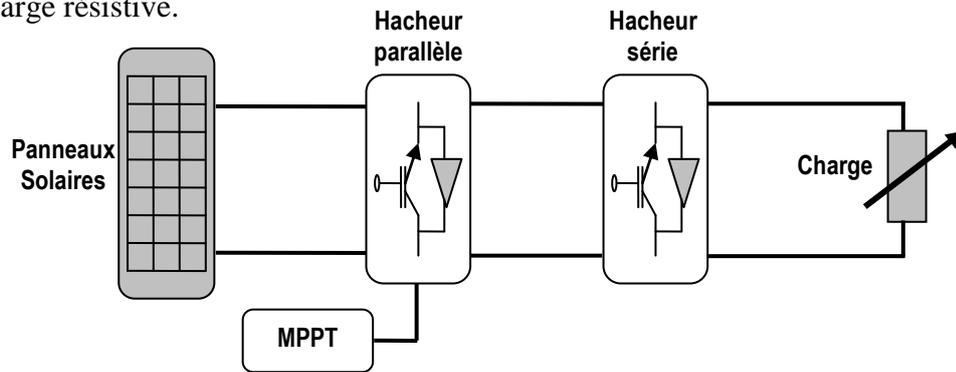


Figure IV.15 Schéma du système photovoltaïque débitant sur une charge résistive à travers un convertisseur DC/DC.

##### IV.1. Résultats de simulation de la chaîne photovoltaïque et discussions

Nous nous intéressons aussi dans cette chaîne à la commande de la tension du hacheur, afin de la maintenir constante pour la connecter au bus continu. Et pour cela nous avons effectué les mêmes perturbations, qui consistent en premier lieu à faire varier la tension de référence puis à varier la charge en deuxième lieu.

Les figures (IV.16, IV.17 et IV.19, IV.20) montrent respectivement les résultats de variation de tension de référence du hacheur et de variation de charge de la chaîne de conversion photovoltaïque (figure IV.15). Les paramètres de simulation sont comme suit :

- Un profil d'éclairement constant, qui est égal à  $1000 \text{ W/m}^2$ .
- Un profil de température constant, qui est égal à  $25^\circ\text{C}$ .

- La tension de référence du hacheur qui passe de 48 V à 60 V à l'instant  $t = 5s$ .
- La valeur de la résistance passant de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$  à l'instant  $t = 6s$ .

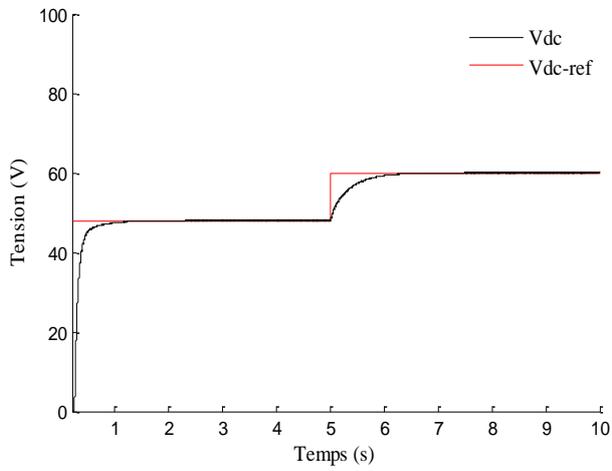


Figure IV.16 Tension  $V_{dc}$  aux bornes du hacheur série qui passe de 48 V à 60 V.

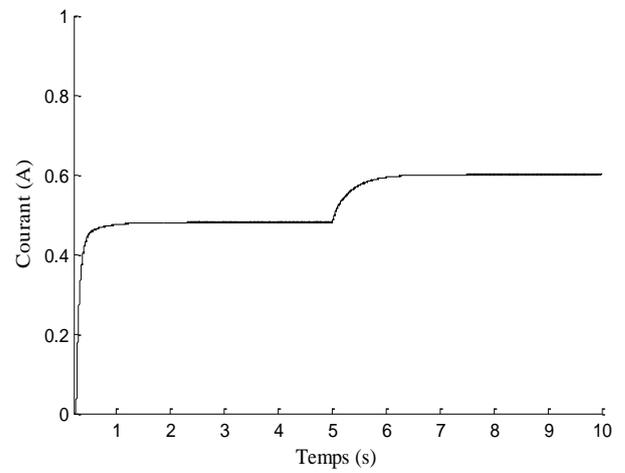


Figure IV.17 Courant de charge  $i_{ch}$  du hacheur série.

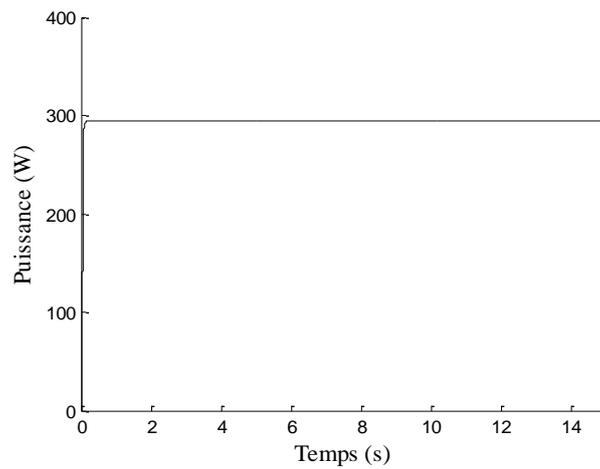


Figure IV.18 Puissance photovoltaïque  $P_{pv}$  des panneaux solaires.

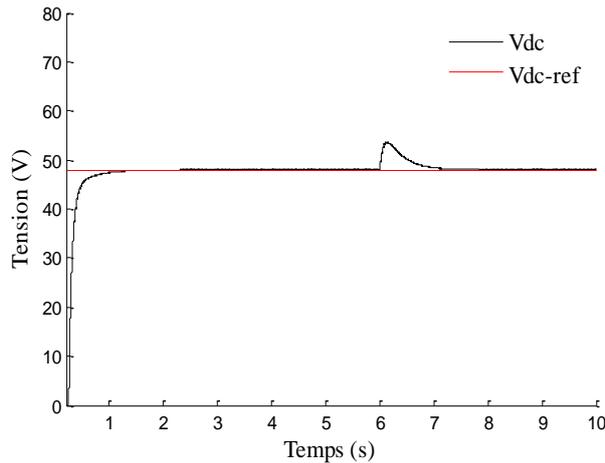


Figure IV.19 Tension  $V_{dc}$  aux bornes du hacheur série série avec variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

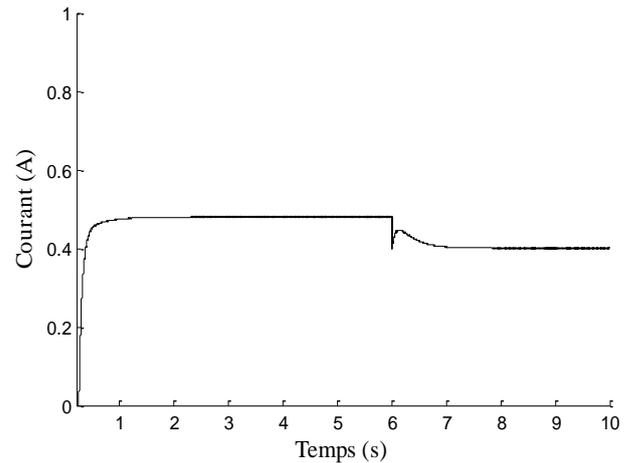


Figure IV.20 Courant de charge  $i_{ch}$  du hacheur série avec variation de charge qui passe de  $100 \Omega$  à  $120 \Omega$ .

Les résultats des deux tests par simulation effectués dans le cas de la chaîne photovoltaïque ont aussi montré que la tension à la sortie est maintenue constante, ce qui nous permet de constater une autre fois que la commande du système est efficace, dans les deux cas de variation soit de la charge ou bien de la tension de référence.

## V. Chaîne de stockage

La chaîne de stockage illustrée dans la figure (IV.21) est composée de :

- Une batterie de type **LITHIUM-ION** que nous avons initialement chargée.
- Un convertisseur DC/DC bidirectionnel qui permet la charge et la décharge de la batterie.

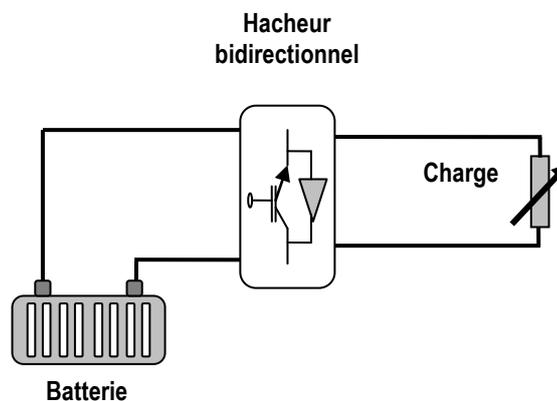


Figure IV.21 Schéma du système de stockage.

### V.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le hacheur utilisé pour réaliser la charge et la décharge de la batterie ainsi que le transfert de puissance (courant) doit être réversible. Son schéma électrique équivalent est donné par la figure (IV.22). Afin de réaliser la réversibilité du flux de puissance, les commutateurs du convertisseur doivent idéalement transférer le courant dans les deux directions. La première direction correspond au mode décharge. Le convertisseur transfère l'énergie de la batterie vers le bus CC lorsque la production d'énergie renouvelable est déficitaire. Le second représente le mode charge. Quand il y a un excès de production d'énergie renouvelable, le convertisseur bidirectionnel transfère l'excès de puissance du bus CC vers la batterie. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur (buck) pendant la charge de la batterie. Dans les deux modes de fonctionnement (charge et décharge), le convertisseur bidirectionnel régule la tension du bus CC et contrôle le flux de puissance [Jun 08].

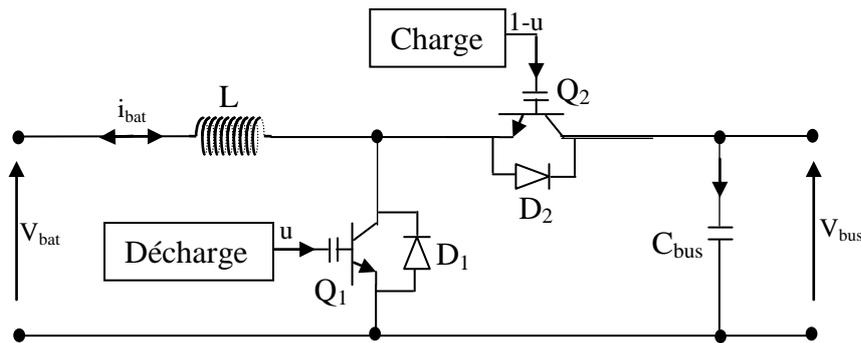


Figure IV.22 Schéma électrique du convertisseur DC/DC bidirectionnel.

À noter que la commande des interrupteurs Q1 et Q2 est réalisée simultanément avec deux signaux (rapports cycliques) complémentaires ( $u$ ) et ( $1-u$ ). Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations (IV.12). [Gom 07]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} [V_{bat} - (1-u)V_{bus}] \\ \frac{d}{dt} V_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} [(1-u)i_L - i_0] \end{cases} \quad (IV.7)$$

Où :  $i_L = i_{Bat}$

## V.2. Commande du système de stockage

La stratégie de commande du convertisseur bidirectionnel comporte deux objectifs : le premier est le contrôle du sens du flux de puissance. C'est-à-dire décider quand la batterie va jouer le rôle d'une source d'énergie, et lorsqu'elle est plutôt en mode charge (stockage d'énergie) tout cela en fonction de l'évolution de l'état du système Hybride. Cet objectif est dicté en réalité, par l'algorithme de gestion qui décide dans quelle configuration la batterie doit fonctionner. Le deuxième objectif est de régler la tension  $V_{bus}$  du bus CC. Le principe de la commande du convertisseur bidirectionnel est illustré dans schéma la figure (IV.23).

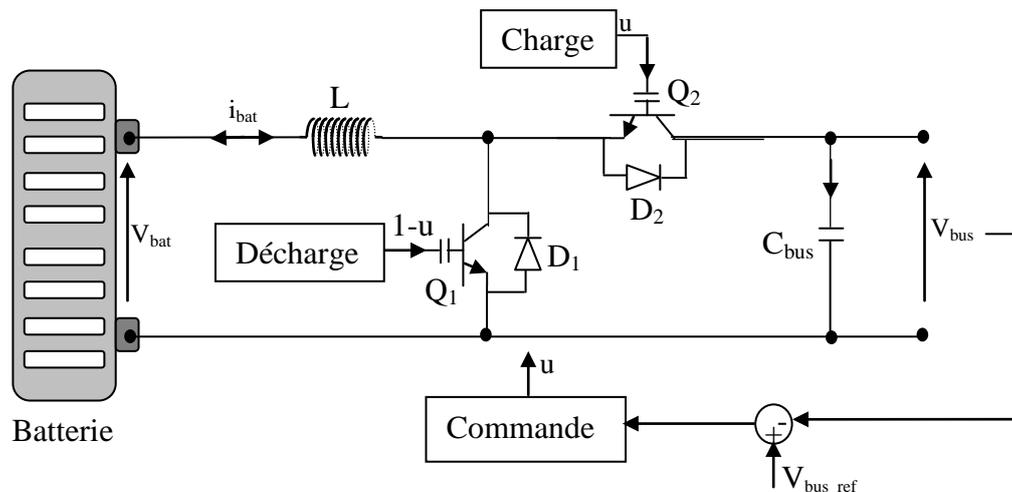


Figure IV.23 Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel.

## V.3. Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel

Le convertisseur bidirectionnel joue le rôle d'interface entre la batterie et le bus à CC, il admet deux modes de fonctionnements : charger et décharger la batterie.

### V.3.1 Mode charge

Pour le mode charge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur Q2. En effet, avec l'interrupteur Q2 et la diode D1, on retrouve la dynamique d'un convertisseur abaisseur (buck).

### V.3.2 Mode décharge

Pour la décharge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur Q1. Dans ce cas, l'état de l'interrupteur Q1 ainsi que la diode D2 permet d'avoir la dynamique d'un convertisseur élévateur (boost).

Le mode de fonctionnement du convertisseur (charge ou décharge) est régi par le sens du courant. En effet, pour le mode charge, le courant de la batterie est considéré positif alors que pour le mode de décharge il est négatif. Le tableau (IV.1) résume le fonctionnement du convertisseur bidirectionnel.

	<b>Commande</b>	<b>Q1</b>	<b>D1</b>
<b>Mode charge (<math>i_{bat} &gt; 0</math>)</b>	$u_1 = 1, u_2 = 0$	ON	OFF
	$u_1 = 0, u_2 = 0$	OFF	ON
	<b>Commande</b>	<b>Q2</b>	<b>D2</b>
<b>Mode décharge (<math>i_{bat} &lt; 0</math>)</b>	$u_1 = 0, u_2 = 1$	ON	OFF
	$u_1 = 0, u_2 = 0$	OFF	ON

Tableau IV.1 Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes.

#### V.4 Résultats de simulation du système de stockage et discussions

Pour tester la commande du convertisseur bidirectionnel en mode décharge, nous avons considéré une variation du courant (figure IV.24) de la charge d'une part et une variation de la tension de référence du bus continu qui passe de 48V à 60 V d'autre part.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus.

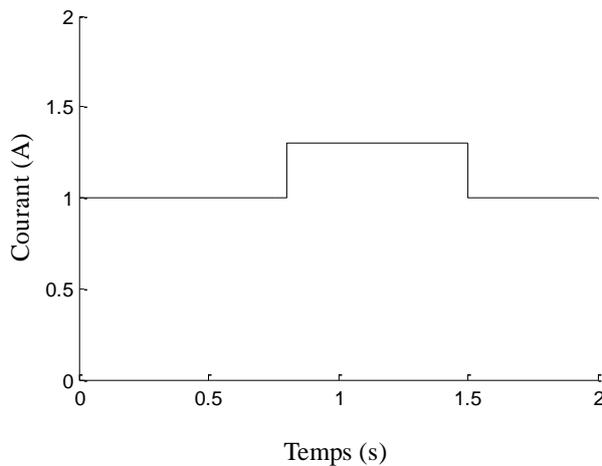


Figure IV.24 Profil du courant de charge  $i_{ch}$ .

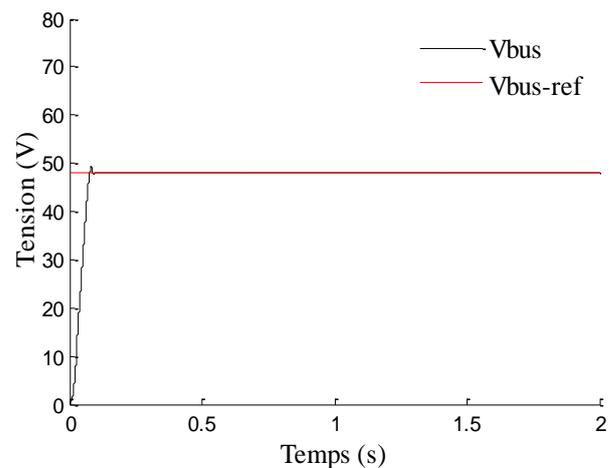


Figure IV.25 Tension  $V_{bus}$  aux bornes du convertisseur bidirectionnel.

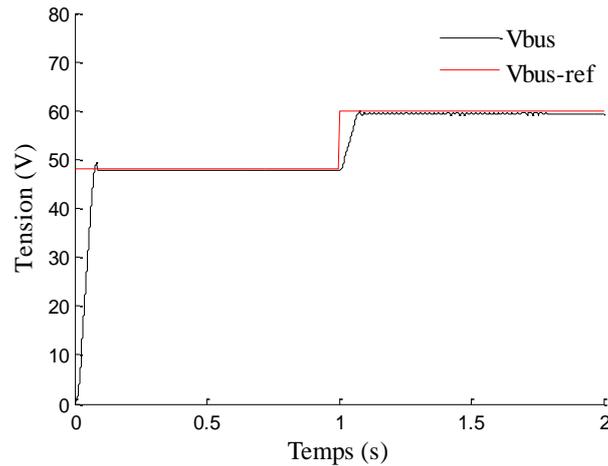


Figure IV.26 Tension  $V_{bus}$  aux bornes du convertisseur bidirectionnel que varie de 48V à 60V

Les résultats obtenus des deux tests par simulation effectués ont montré que la tension du bus continu  $V_{bus}$  suit sa référence, ce qui nous a permis de constater que la commande du convertisseur bidirectionnel est efficace, dans les deux cas de variation soit du courant de charge ou bien de la tension de référence.

## VI. Stratégies de gestion du système hybride

L'objectif principal de la stratégie de gestion proposée dans cette thèse est de générer des références de puissance pour les sources (éolien, photovoltaïque, batterie et le générateur diesel) dans le but d'assurer d'une façon optimale, une alimentation sans interruption de la charge. Pour cela nous avons proposé un algorithme pour gérer les flux de puissances entre les différentes sources. Il est à base de règle logique "tout ou rien", avec objectif d'activer ou non les sources selon l'évolution de l'état du système hybride.

La figure IV.27 illustre le rôle de cet algorithme qui se situe au cœur du système hybride

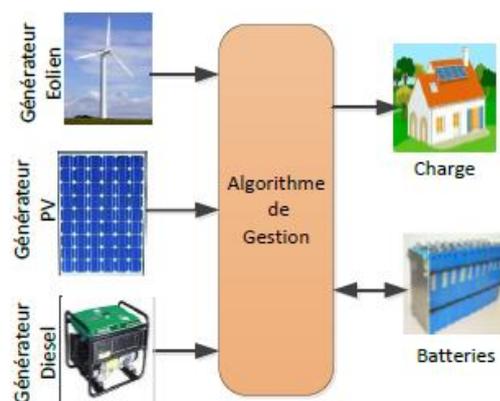


Figure IV.27 Schéma de principe de la stratégie de gestion

L'objectif de l'algorithme de gestion est en fait, de déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries). Une autre tâche que l'algorithme de gestion doit remplir consiste à exploiter d'une façon optimale la batterie de stockage dans le but de rallonger sa durée de vie. En effet, une bonne estimation de son état charge/décharge (SoC) est nécessaire. Il est évident que pour préserver la batterie, il faut réduire sa sollicitation et ainsi favoriser l'énergie provenant des sources renouvelables. En outre, dans les situations critiques où les sources renouvelables ne suffisent pas et que le SoC de la batterie est trop faible, le générateur diesel doit se mettre en marche afin de venir au secours au système hybride et alimenter la charge.

### **VI.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme de gestion**

Nous avons proposé deux stratégies de gestion : la première consiste à considérer le système de conversion éolien comme étant la source principale pour alimenter la charge, puis la deuxième considère plutôt le système de conversion photovoltaïque comme étant la source principale pour alimenter la charge.

Pour ces deux stratégies, lorsqu'un système de conversion (éolien ou photovoltaïque) est considéré comme étant la source principale pour alimenter la charge, l'autre système servira de source d'à point et s'activera dès que le premier ne répond pas à la demande de la charge.

La batterie est utilisée à la fois comme source dans le cas d'un manque de production, et comme système de stockage dans le cas d'une surproduction. Le générateur Diesel est considéré comme source de secours.

Du fait que les deux sources de production énergétique opèrent en mode MPPT, et que le système hybride est isolé, nous avons prévu une charge dissipative qui sert de "trop-plein" aux éventuelles surproductions.

Le principe de fonctionnement de ces deux stratégies de gestion est donné par deux algorithmes représentés par les organigrammes donnés par les deux figures (IV.28) et (IV.29).

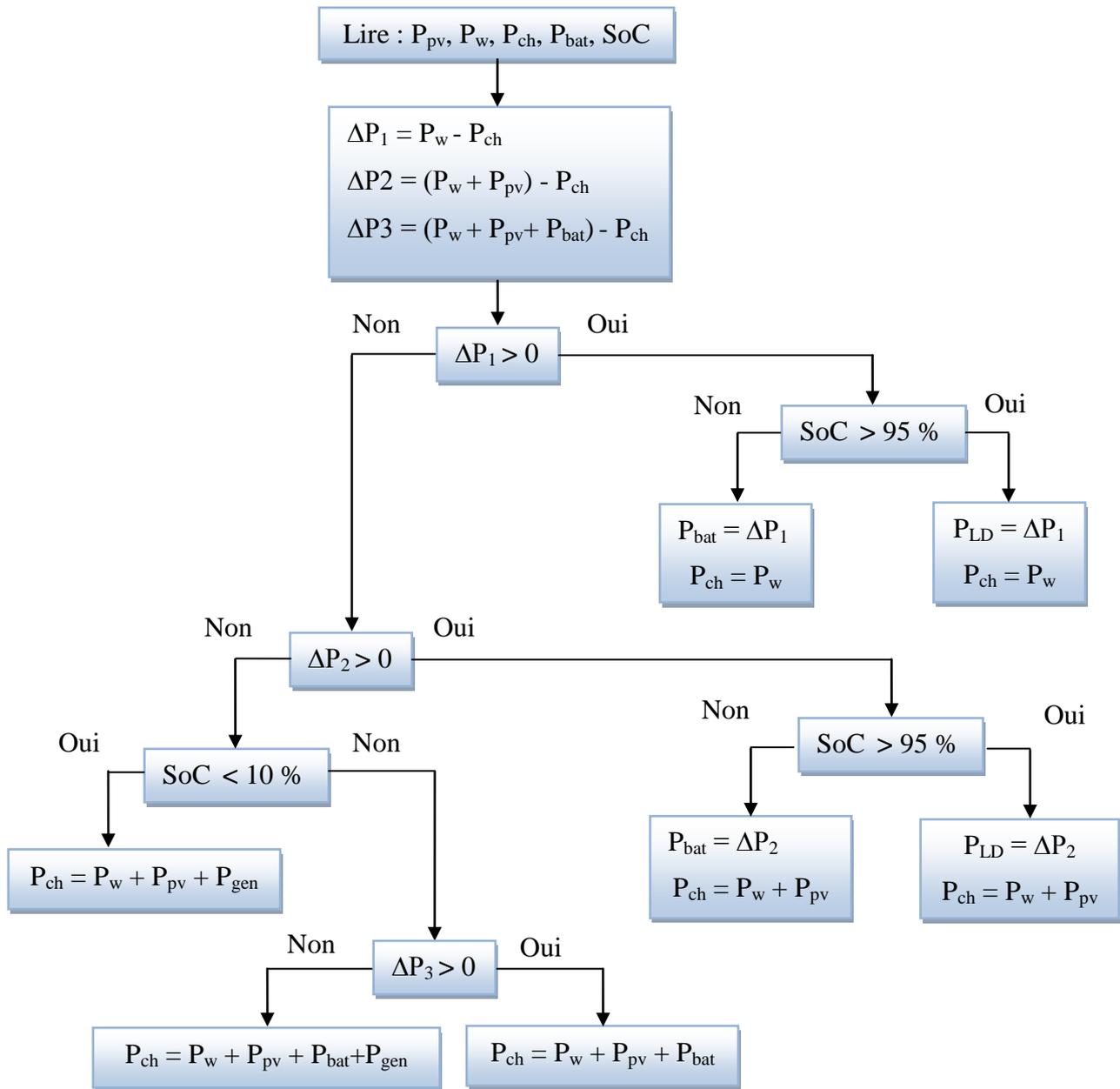


Figure IV.28 Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien comme étant la source principale.

Les différentes puissances sont désignées comme suit :

$P_w$  : La puissance éolienne.

$P_{pv}$  : La puissance photovoltaïque.

$P_{ch}$  : La puissance demandée par la charge.

SoC : L'état de charge et de décharge de la batterie (State of charge).

$\Delta P_1$  : La différence entre la puissance éolienne et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_1 = P_w - P_{ch}$

$\Delta P_2$  : La différence entre la somme des deux puissances, à savoir l'éolienne et la photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_2 = (P_{pv} + P_w) - P_{ch}$

$\Delta P_3$  : La différence entre la somme des trois puissances, à savoir l'éolienne, la batterie ainsi que la puissance photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_3 = (P_w + P_{pv} + P_{bat}) - P_{ch}$

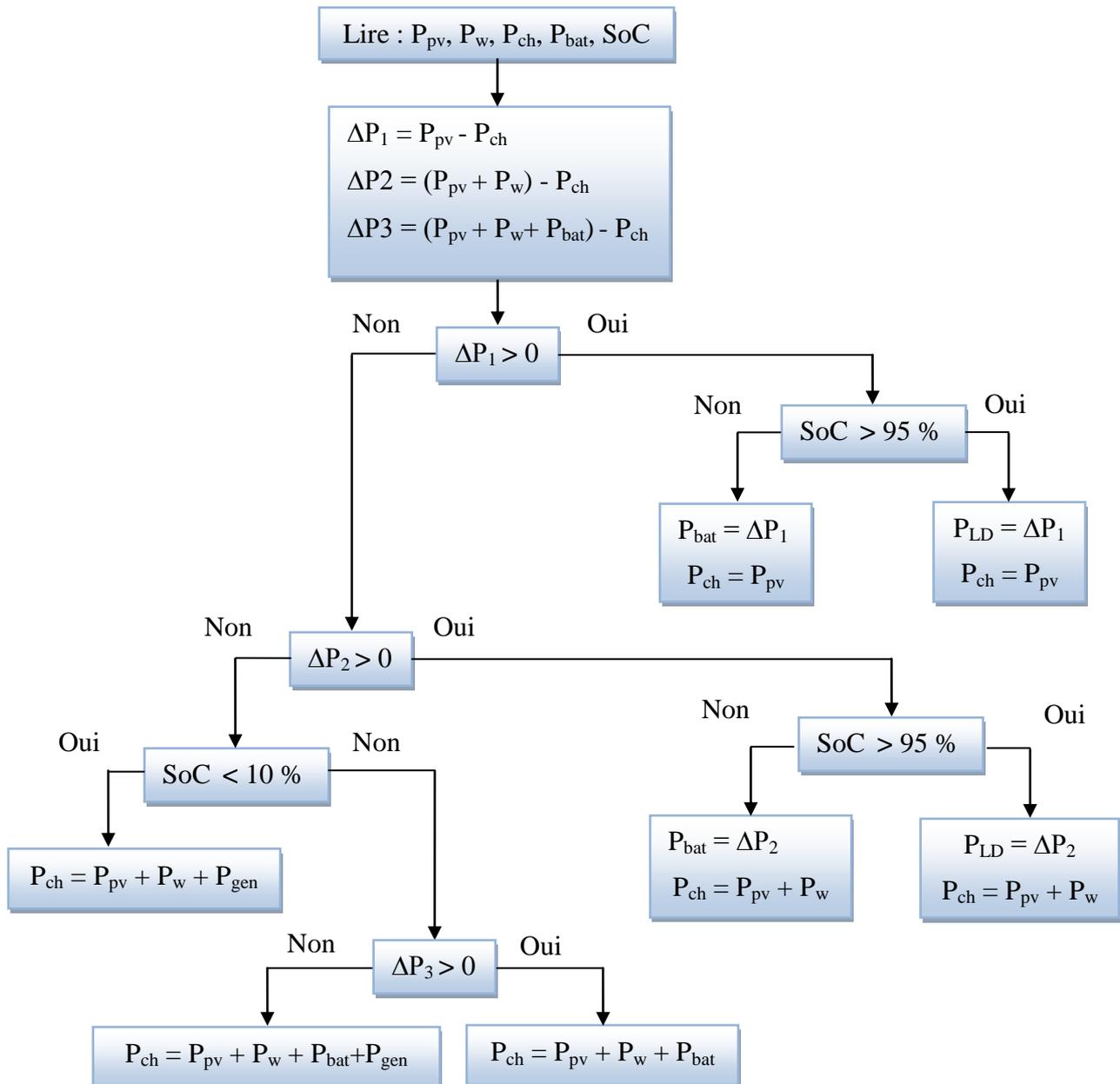


Figure IV.29 Organigramme de la stratégie de gestion qui considère le système de conversion photovoltaïque comme étant la source principale.

$\Delta P_1$  : La différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_1 = P_{pv} - P_{ch}$

Chaque organigramme reprend toutes les situations possibles auxquelles le système hybride peut-être amené à faire face. En fonction de la situation, chaque algorithme prend la décision d'activer ou désactiver les sources du système. Dans le cas d'une surproduction d'énergie, l'algorithme ordonne la charge de la batterie. L'éventuel surplus de puissance ( $P_{LD}$ ) sera dissipé avec la charge auxiliaire.

## VI.2 Résultats de simulation et discussions

Pour valider en simulation ces deux algorithmes de stratégies de gestion, nous avons considéré pour chaque stratégie quelques scénarios de simulation que le système hybride est amené à rencontrer.

➤ Les résultats de simulations pour la stratégie de gestion qui considère le système de conversion éolien comme étant la source principale sont donnés par les figures ci-dessous.

- Cas où  $\Delta P_1 > 0$ ,  $\Delta P_2 > 0$  et  $SoC \in [10\% - 95\%]$

Ce cas illustre une simulation du système global, où nous avons fait une variation de la puissance de charge qui augmente de 600W à 1300 W à  $t = 5s$ , puis elle diminue à 800 W à  $t = 10s$ . Dans ce cas la batterie est chargée à 50%.

Ce scénario nous permettra de voir la réaction de l'algorithme face à cette situation.

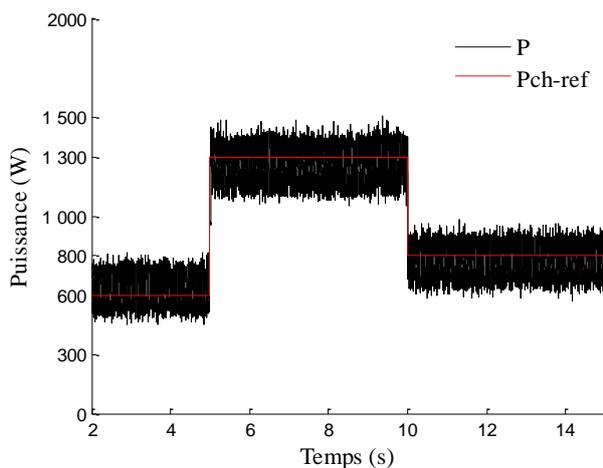


Figure IV. 30 Allure de la puissance produite par le système global.

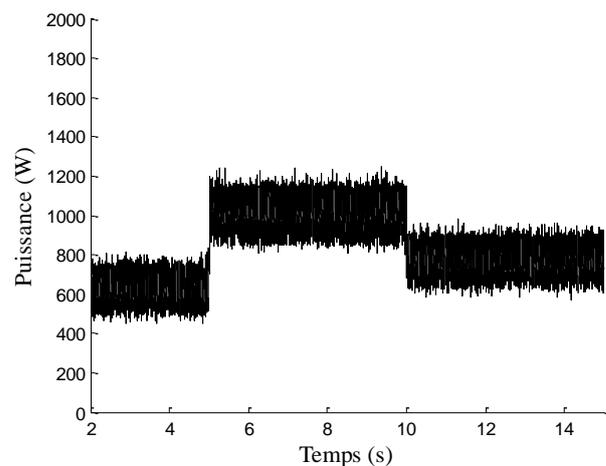


Figure IV. 31 Allure de la puissance du générateur éolien.

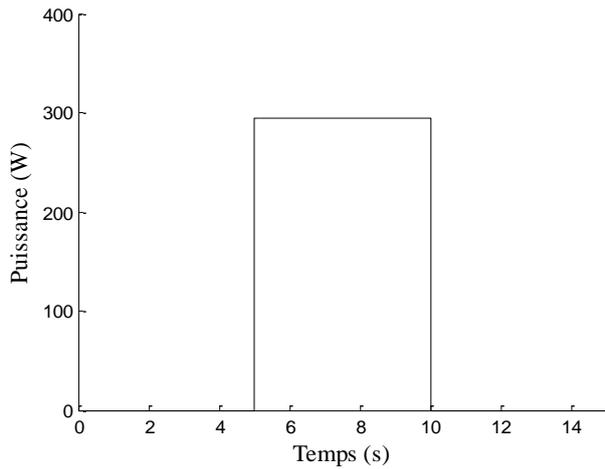


Figure IV. 32 Allure de la puissance du générateur photovoltaïque.

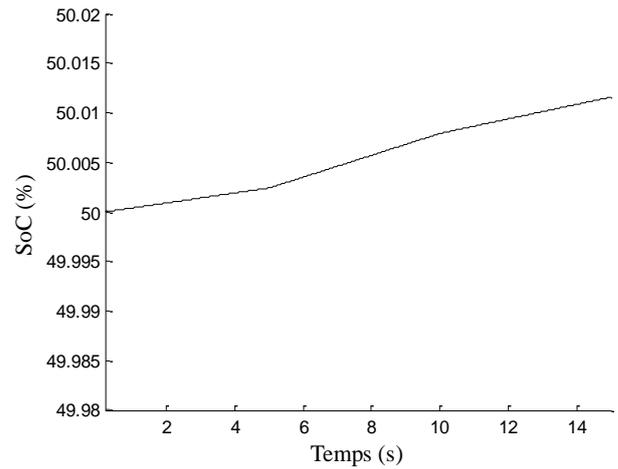


Figure IV.33 Allure du SoC de la batterie.

Les résultats de simulation montrent que lorsque la source éolienne peut seule couvrir la demande de la charge, la source photovoltaïque est déconnectée (0s – 5s).

De  $t=05s$  à  $t=10s$ , lorsque nous avons varié la puissance de charge de référence, l'algorithme fait intervenir le générateur photovoltaïque pour satisfaire la charge.

La figure (IV.33) illustre l'évolution de l'état de charge (SoC) de la batterie.

- **Cas où  $\Delta P_1 > 0$ ,  $\Delta P_2 > 0$  et  $SoC > 95\%$**

Dans ce cas, nous avons refait la même expérience précédemment citée mais la batterie est chargée à plus de 95%. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures (IV.34, IV.35 et IV.36).

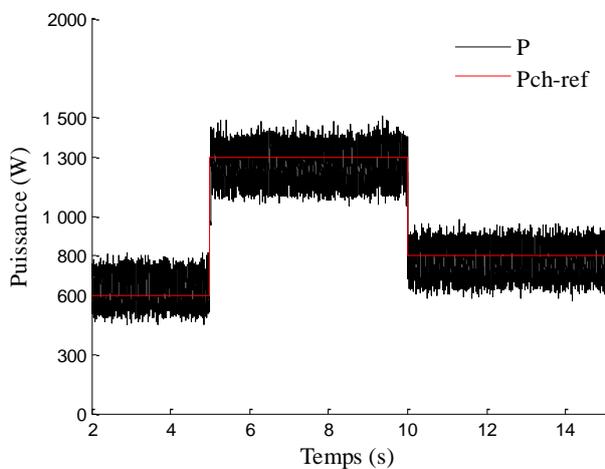


Figure IV.34 Allure de la puissance produite par le système global.

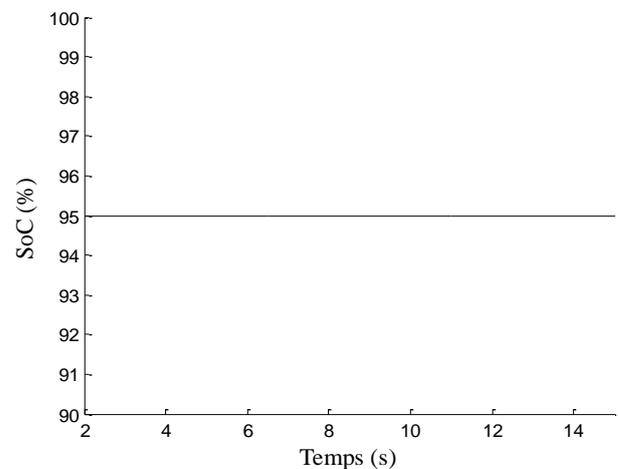


Figure IV.35 Allure du SoC de la batterie.

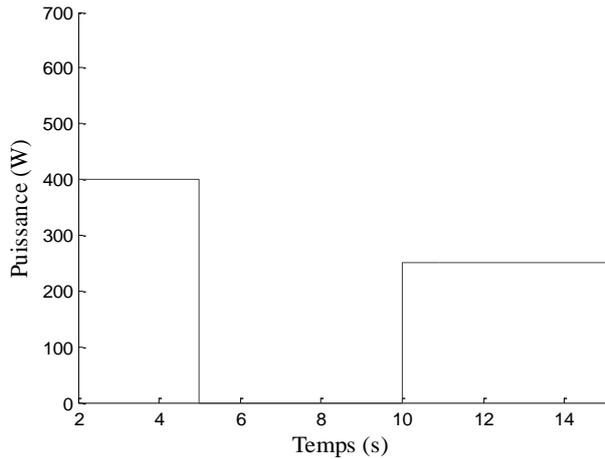


Figure IV.36 Allure du surplus de puissance.

Les résultats de simulation montrent que lorsque la batterie est chargée, le surplus de puissance est dissipé vers la charge auxiliaire (figure IV.36).

- **Cas où  $\Delta P_1 < 0$ ,  $\Delta P_2 < 0$ ,  $\Delta P_3 < 0$  et SoC < 10%**

Dans le dernier scénario considéré, nous avons effectué une variation de puissance jusqu'à ce que les deux sources n'arrivent plus à satisfaire la charge sachant que la batterie est à son état de charge minimal. Cette situation impose le déclenchement du générateur Diesel qui devra subvenir à la demande de la charge. A noter que le générateur est supposé comme une source constante.

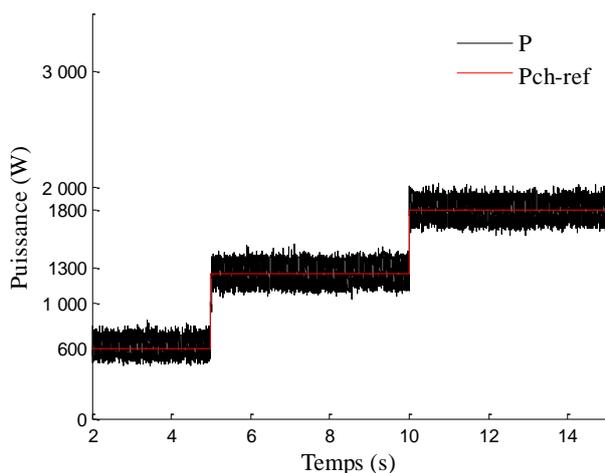


Figure IV.37 Allure de la puissance produite par le système global.

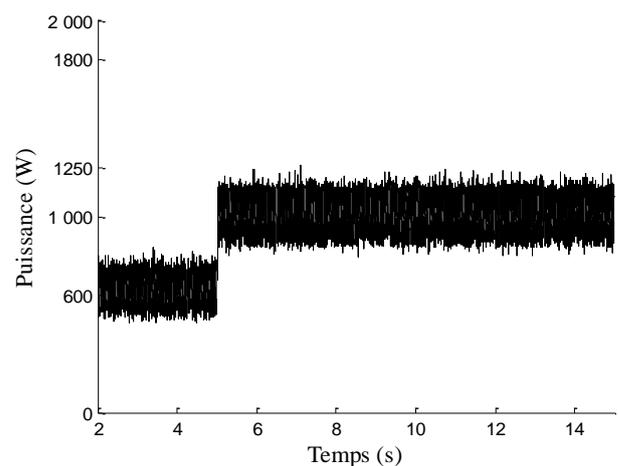


Figure IV.38 Allure de la puissance du générateur éolien.

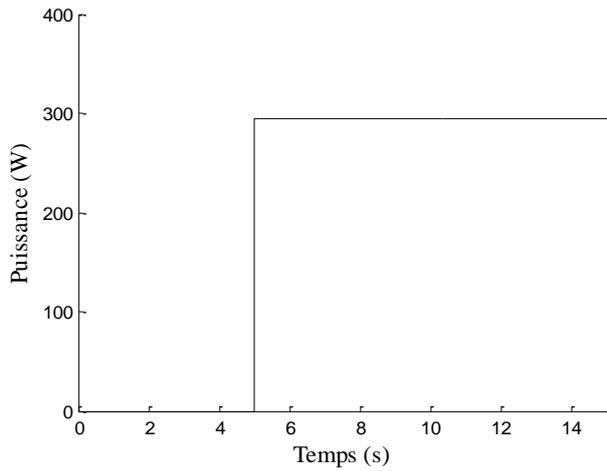


Figure IV.39 Allure de la puissance du générateur photovoltaïque.

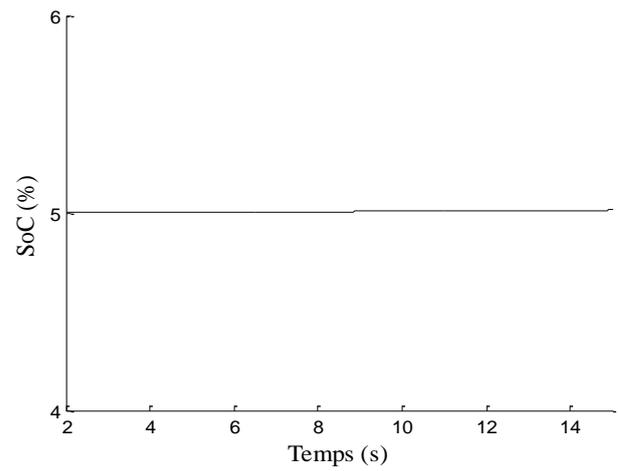


Figure IV.40 Allure du SoC de la batterie.

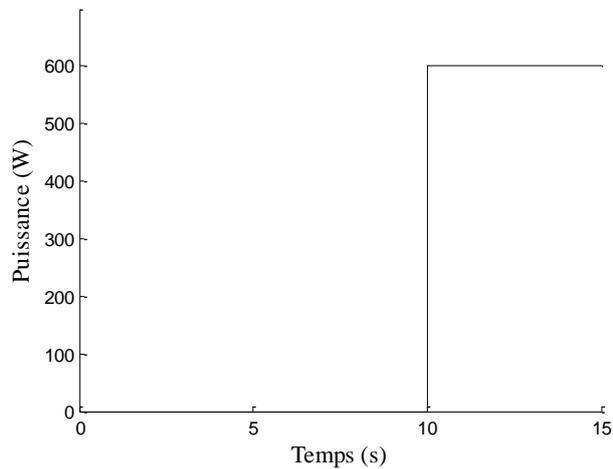


Figure IV.41 Allure de la puissance du générateur diesel.

- Les résultats de simulations pour la stratégie de gestion qui considère le système de conversion photovoltaïque comme étant la source principale sont donnés par les figures ci-dessous.

Pour ce cas, nous avons considéré un profil d'éclairement variable pour le système photovoltaïque en fixant la puissance de la charge du système global à 300 W.

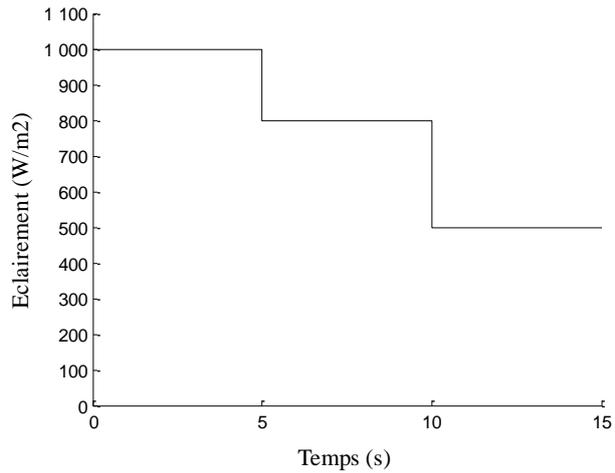


Figure IV.42 Eclairement en fonction du temps.

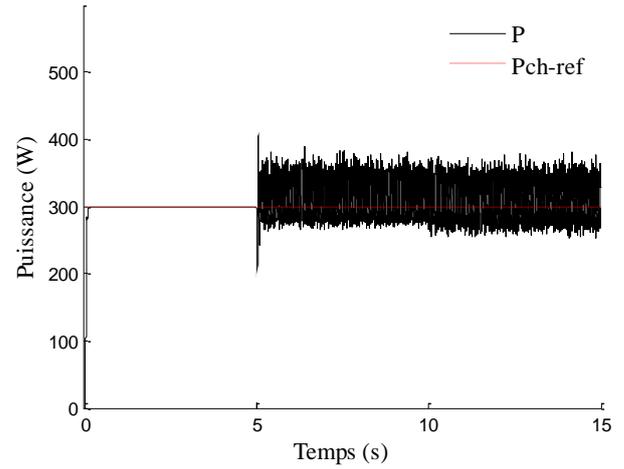


Figure IV.44 Allure de la puissance produite par le système global.

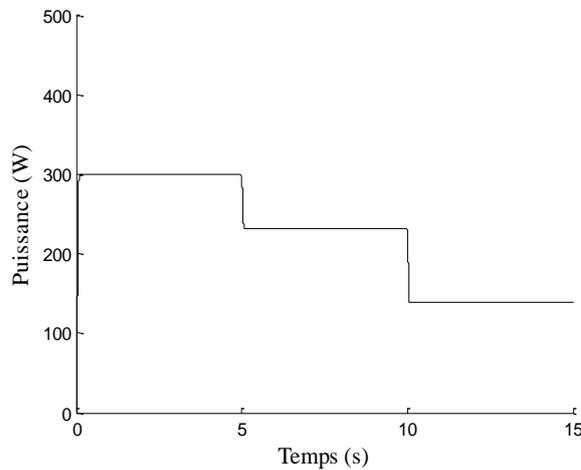


Figure IV.43 Allure de la puissance du générateur photovoltaïque.

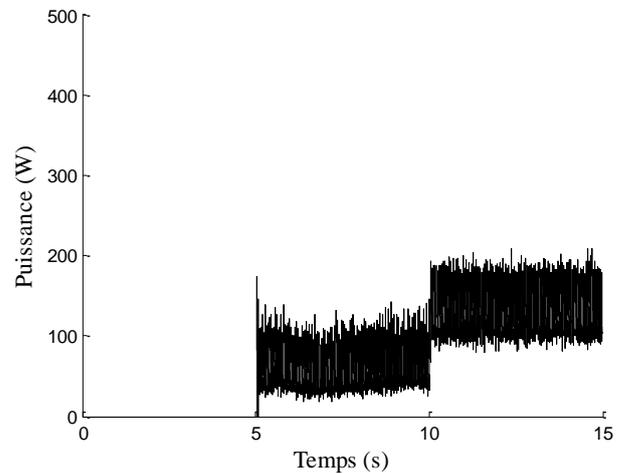


Figure IV.45 Allure de la puissance du générateur éolien

Ces résultats montrent que notre algorithme a répondu fidèlement à la raison principale de sa conception qui est de satisfaire la demande de la charge en considérant que le système de conversion (éolien ou photovoltaïque) joue le rôle de la source principale, l'autre système (éolien ou photovoltaïque) le complète en cas de besoin et la batterie est utilisée comme système de stockage dans le cas d'une surproduction. Ainsi que le générateur Diesel est considéré comme source de secours.

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage. Nous avons ainsi donné dans un premier temps une présentation du système global. Ensuite, nous avons dimensionné les trois sources d'énergie. Puis nous les avons connecté vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

Par la suite, nous avons proposé un algorithme de gestion pour déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries). Pour valider en simulation cette stratégie de gestion, nous avons considéré quelques scénarios de simulation que le système hybride est amené à faire. Puis, les résultats des différents scénarios réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette thèse était de proposer un système hybride combinant deux sources d'énergies renouvelables, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent.

En effet, ce système hybride éolien-photovoltaïque devait servir à l'alimentation en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. En absence du soleil et du vent, nous avons prévu un générateur diesel et des batteries de stockage pour l'alimentation de secours.

Nous avons consacré un premier chapitre à la définition du système hybride, ses différents composants et ses différentes architectures. Puis nous avons développé un état de l'art sur les différentes structures des systèmes hybrides.

Dans un second chapitre nous avons développé sous l'environnement « Matlab » le modèle d'un panneau photovoltaïque muni d'un dispositif de commande lui permettant de fonctionner en site isolé dans les conditions optimales pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre a été consacré d'une part au développement de modèles dynamiques de la GAAE en tenant compte de la saturation et des pertes fer et à leur comparaison en termes de précision et de consommation de temps de calcul. D'autre part à l'application de la commande directe de puissance DPC, au générateur asynchrone auto-excité débitant sur une charge à travers un redresseur à MLI.

Le développement de modèles dynamiques de la GAAE a révélé que les modèles prenant en compte les pertes fer tirent partie de l'addition d'une résistance équivalente aux pertes fer dans le schéma équivalent du GAAE. Trois modèles ont été utilisés : le premier est complexe, il consiste à placer la résistance  $R_m$  en parallèle avec l'inductance magnétisante, le second consiste à placer la résistance  $R_m$  en amont de l'inductance de fuite du stator, le troisième est le plus simple et consiste à placer la résistance  $R_m$  avant la résistance du stator. A partir de ces trois modèles, nous avons conclu que les pertes fer ont le même effet que celles induites par la charge.

En ce qui concerne la commande directe de puissance DPC appliquée au générateur asynchrone auto-excité débitant sur une charge à travers un redresseur à MLI, nous avons

inséré un régulateur de tension afin de maintenir la tension continue à la sortie du redresseur constante et pallier ainsi aux inconvénients des variations de la charge ou de la vitesse de rotation. Ce régulateur a permis d'utiliser l'ensemble générateur asynchrone-redresseur à MLI dans un système autonome. La commande directe de puissance a permis d'imposer une référence quelconque de puissance et donc d'insérer cet ensemble dans un projet plus vaste.

Des tests par simulation ont été menés dans ce chapitre, ils ont montré que le régulateur de tension est capable de suivre une référence de tension donnée et de la garder constante. Ils ont également montré que la commande directe de puissance adoptée a permis au système de répondre à une variation de la charge.

Le quatrième et dernier chapitre a eu comme objectif l'étude et la commande du système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage. Pour ce faire, nous avons commencé dans un premier temps par donner une présentation du système global. Puis nous avons dimensionné les trois sources d'énergie qui le compose. Ensuite nous les avons connecté vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

Par la suite, dans un second temps, nous avons proposé un algorithme de gestion pour déterminer les modes de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries).

Comme suite à notre travail, nous pouvons dresser une liste non exhaustive de quelques travaux que nous avons jugés intéressants, de réaliser dans un avenir immédiat :

- La validation expérimentale d'un système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage.
- La validation expérimentale de la commande en puissance du convertisseur MLI de la chaîne éolienne.
- La validation expérimentale du système de gestion.
- Proposition d'autres algorithmes de gestion du système hybride, à savoir la logique floue et les réseaux de neurones.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

- [Abd 11] Abbou .A, Akherraz .M, Mahmoudi .H, Barara .M. « *Control of Isolated Self-Excited Induction Generator with DTFC Strategy and DC Voltage Fuzzy Controller Used in Wind Turbin* » IREMOS, Vol 5, n.5, pp 2017, 2025, 2011.
- [Ahm 06] Ahmed, N.A and Miyatake, M. “*A stand-alone hybrid generation system combining solar photovoltaic and wind turbine with simple maximum power point tracking control* ». In CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, volume 1, pages 1–7, 2006.
- [ Ai 03] Ai, B., Yang, H., Shen, H., Liao, X. « *Computer-aided design of PV/wind hybrid system* ». Renewable Energy, vol. 28, pp. 1491–1512, 2003.
- [Aja 03] Ajan, C. W., Ahmed, S. S., Ahmad, H. B., Taha, F., Mohd Zin, A. A. B., (2003). « *On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an off-grid site: East Malaysian perspectives* », Solar Energy, vol. 74, pp. 453–467, 2003.
- [Ang 06] Angel, M. et Pastor Cid, « *Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques*”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 2006.
- [Ash 99] Ashari, M., Nayar, C. V., (1999). « *An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system* ». Solar Energy, vol. 66, Issue 1, pp 1-9, may 1999.
- [Ash 01] Ashari, M., Nayar, C.V., Keerthipala, W.W.L. « *Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply* ». Renewable Energy, vol. 22, pp. 247-254, 2001.
- [Ash 06] Azbe, V., Mihalic, R. « *Distributed generation from renewable sources in an isolated DC network* ». Renewable Energy, vol. 31, pp. 2370–2384, 2006.

**B**

- [Bag 02] Baghdadchi, J., Varmette, D.S. « *Wind-Based Hybrid Power Systems In Rural Western New York* ». WINDPOWER Conference Proceedings, Portland, Oregon June 2-5, 2002.
- [Bag 11] Baghdadi, F. « *Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables* », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [Bar 13] Barara .M, Abbou .A, Akherraz .M, Bennaser .A, Taibi .D. « *Comparative Study of PI and Fuzzy Voltage Control for a Wind Energy conversion System* ». IREMOS, Vol 6, 2013.
- [Bec 06] Bechrakis, D.A., McKeogh, E.J., Gallagher, P.D. « *Simulation and operational assessment for a small autonomous wind-hydrogen energy system* ». Energy Conversion and Management, vol. 47, pp.46–59, 2006.
- [Ben 12] Benreguia, S. « *Techniques de production de l'électricité en Algérie : Dominance des combustibles fossiles* », Portail Algérien des Energies Renouvelables, août 2012.
- [Ber 06] Bernal-Agustin, J.L., Dufo-Lopez, R., Rivas-Ascaso, D.M. « *Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions* ». Renewable Energy, vol. 31, pp. 2227–2244, 2006.
- [Bha 99] Bhave, A. G. « *Hybrid solar-wind domestic power generating system-a case study* ». Renewable Energy, vol. 17, pp. 355-358, 1999.
- [Bit 06] Bitterlin, I.F. « *Modeling a reliable wind/PV/storage power system for remote radio base station sites without utility power* ». Journal of Power Sources, vol. 162, pp. 906–912, 2006.

- 
- [Bor 96] Borowy, B.S. and Salameh, Z. M. « *Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996.
- [Bou 10] Bouafia .A. « *Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI* », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [Bow 01] Bowen, A.J., Cowie, M., Zakay, N., (2001). « *The performance of a remote wind-diesel power system* ».Renewable Energy, vol. 22, pp. 429–445, 2001.
- [Bri 04] Brito, A.U., Galhardo, M.A.B., Macedo, W.N., Pinho J.T. « *Power quality analysis of a small PV-wind-diesel hybrid system in the countryside of the state of PARA-BRASIL* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3515-3518, 2004.
- [Bus 04] Busquet, S., Leroux, P., Albuissou, M., Gatt, P., Menard, L., Mayer, D., Metkemeijer, R. « *PV/fuel cell hybrid systems performance analysis and possible improvements* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 2426-2429, 2004.
- C
- [Car 03] Carta, J.A., Gonzalez, J., Gomez, C. « *Operating results of a wind-diesel system which supplies the full energy needs of an isolated village community in the Canary Islands* ». Solar Energy, vol. 74, pp. 53–63, 2003.
- [Che 08] Chen B.S and Joos G. « *Direct power control of active filters with averaged switching frequency regulation* », IEEE Trans. Power Electron. Vol. 23, no.6 pp. 2729 - 2737, Novembre 2008.
- [Con 07] Conibeera, G.J., Richards, B.S. « *A comparison of PV-electrolyser and photoelectrolytic technologies for use in solar to hydrogen energy storage systems* ». International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 2703 – 2711, 2007.

**D**

- [Dal 10] Dali, M., Belhadj, J., Roboam, X. « *Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management – Experimental investigation* ». Energy, vol. 35, pp. 2587-2595, 2010.
- [Dan 04] Daniel, S.A. and Ammasaigounden, N. « *A novel hybrid isolated generating system based on pv fed inverter-assisted wind-driven induction generators* ». IEEE Transactions on Energy Conversion, 19(2) :416–422, 2004.
- [Dar 11] Darras, C. « *Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE* », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [Den 06] Denholm, P. « *Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage* ». Renewable Energy, vol. 31, pp. 1355–1370, 2006.
- [Dia 06] Diaf, S., Haddadi, M., Belhamel, M. « *Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/eolien) autonome pour le site d'Adrar* ». Revue des Energies Renouvelables, vol. 9, n 3, pp. 127-134, 2006.
- [Dia 08] Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., Louche, A. « *Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions* ». Applied Energy, vol. 85, pp. 968–987, 2008.
- [Duf 08] Dufo-Lopez, R., Bernal-Agustin, J.L. « *Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen– battery systems* ». Renewable Energy, vol. 33, pp. 2559-2572, 2008.

E

- [Eck 90] Eckstein, Jurgen Helmut, « *Detailed Modeling of Photovoltaic Components, PHD Thesis, Solar Energy Laboratory* », University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [Ekr 09] Ekren, B.Y., Ekren, O. « *Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions* ». *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1387–1394, 2009.
- [Ekr 08] Ekren, O., Ekren, B.Y. « *Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology* ». *Applied Energy*, vol. 85, pp.1086–1101,2008.
- [El-Had 02] El-Hadidy, M. A. « *Performance evaluation of hybrid wind/solar/diesel power systems* ». *Renewable Energy*, vol. 26, pp. 401–413, 2002.
- [El-Had 04] El-Hadidy, M.A., Shaahid, S.M. « *Role of hybrid (wind + diesel) power systems in meeting commercial loads* ». *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 109–118, 2004.
- [El-Had 05] El-Hadidy, M.A., Shaahid, S.M. « *Decentralized/stand-alone hybrid Wind–Diesel power systems to meet residential loads of hot coastal regions* ». *Energy Conversion and Management*, vol.46, pp. 2501–2513, 2005.
- [El-Had 99] El-Hadidy, M.A., Shaahid, S.M. « *Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia* ». *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 970-976, 1999.
- [El-Kha 04] El-Khadimi, A., Bchir, L., Zeroual, A. « *Dimensionnement et Optimisation Technico économique d'un Système d'Energie Hybride PV-WT avec Système de Stockage* ». *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 7, pp. 73-83, 2004.

---

[El-Sha] El-Shatter, Th.F., Eskandar, M.N., El-Hagry, M.T. « *Hybrid PV/fuel cell system design and simulation* ». *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 479-485, 2002.

[El-Tam] El-Tamaly, H.H., Mohammed, A.A.E. « *Impact of interconnection photovoltaic/wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme* ». *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2475–2491, 2006.

### F

[Fad 08] Fadat .J, Dorali .Y. « *Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux : commande dans le repère triphasé* », *Revue 3EI*, no. 52, pp. 46-59, Mars 2008.

[Fra 08] Fragaki, A., Markvart, T. « *Stand-alone PV system design- Results using a new sizing approach* ». *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 162–167, 2008.

### G

[Gar 06] Garcia, R.S., Weisser, D. « *A wind-diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch* ». *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2296–2320, 2006.

[Ger 02a] Gergaud, O. « *Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur* », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.

[Ger 02b] Gergaud, O, Multon, B.H. Ben Ahmed, « *Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models* », 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.

[Gom 07] Gomis-Bellmunt .O, Montesinos-Miracle .D, Galceran-Arellano .S and Rull-Duran .J. « *Sliding mode control based buck-boost bidirectional converter to drive piezoelectric loads* ». *Journal of Electrical Energy*, 90 :115–125, 2007.

- [Gra 02] Grantham. C, Rahman .MF, Seyoum .D. « *A novel analysis and modelling of an isolated self-excited induction generator taking iron loss into account* », Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2002), Melbourne, Australia 29 September - 2 October 2002.

### H

- [Haf 12] Haffen, S. « *Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d'Alsace* », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012.
- [Ham 04] Hamzeh, A., Kaadan, M., (2004). « *Schemes for Photovoltaic-wind electrification in rural areas of Syria* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp.3499-3502, 2004.
- [Hon 99] Hongwei, Z., Xuanfu, L., Yuzhao, F. « *Optimum operation of large scale wind-diesel generation systems* ». Renewable Energy, vol. 16, pp. 851-854, 1999.

### I

- [Idj 10] Idjdarene .K , « *Modélisation et simulation d'une chaine de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome* », Thèse de doctorat à l'université Abderrahmane MIRA – Bejaïa, 2010.
- [Iqb 03a] Iqbal, M.T. « *Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system* ». Renewable Energy, vol. 28, pp. 511–522, 2003a.
- [Iqb 03b] Iqbal, M.T. « *Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system* ». Renewable Energy, vol. 28, pp. 223–237, 2003b.
- [Ism 04] Islam, S., Belmans, R. « *Grid independent PV fuel-cell hybrid system-optimal design and control strategy* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3311-3314, 2004.

**J**

- [Jer 09] Jeremy, L. « *Modélisation, Dimensionnement et Optimisation des Systèmes d’Alimentation Décentralisés à Energie Renouvelables- Application des Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l’Energie* ». PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [Jun 08] Junhong Zhang, Jih-Sheng Lai and Wensong Yu. « *Bidirectional dc-dc converter modeling and unified controller with digital implementation* ». In Applied Power Electronics Conference and Exposition, pages 1747–1753, 2008.

**K**

- [Kaa 06] Kaabeche, A., Belhamel, M., Ibtouen, R., Moussa, S., Benhaddadi, M.R. « *Optimisation d’un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome* ». Revue des Energies Renouvelables, vol. 9, n. 3, pp. 199-209, 2006.
- [Kas 07] Kasseris, E., Samaras, Z., Zafeiris, D. « *Optimization of a wind-power fuel-cell hybrid system in an autonomous electrical network environment* ». Renewable Energy, vol. 32, pp. 57–79, 2007.
- [Kau 05] Kaushika, N.D., Gautam, N.K., Kaushik, K. « *Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array* ». Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 85, pp. 499–519, 2005.
- [Ken 11] Kendouli, F. Nabti, K. Abed, K. and Benalla, H. « *Modélisation, Simulation et Contrôle d’une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, 2011.
- [Khe 05] Khelif, A., Fatnassi, L. « *The hybrid power stations* ». 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2947-2951, 2005.

- [Kli 06] Klinghammer, W.; Norenberg, K. « *Wide-scale village electrification with PV hybrid power systems in western China-experience gained* ». 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3023-3026, 2006.
- [Kor 03] Korpaas, M., Holen, A.T., Hildrum, R. « *Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system* ». *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 25, pp. 599–606, 2003.
- [Kou 06] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., Kalaitzakis, K. « *Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms* ». *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1072–1088, 2006.
- [Kra 04] Krauter, S.C.W., Calvacante, F.S.A., Cunha, M.S., de Lima L.C. « *PV in combination with micro wind turbines for rural household electrification in the northeast of Brazil* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3531-3531, 2004.

### L

- [Laz 02] Lazarov V. D., Zarkov, Z. « *Monitoring of renewable energy sources hybrid system* ». *Proceedings of International Conference ICATE'2002*, Craiova/Baile Herculane, Romania, pp. 224-229, 2002.
- [Lew 97] Lew, D.J., Barley, C.D., Flowers, L.T. « *Hybrid Wind/Photovoltaic Systems for households in Inner Mongolia* ». *International Conference on Village Electrification through Renewable Energy*, New Delhi, 3-5 March, 1997.
- [Lil 14] Lila Croci, « *Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs* ». PhD thesis, UNIVERSITE DE POITIERS, 2014.

- 
- [Lop 08] Lopez, M. « *Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée* », Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [Lun 02] Lund, H., Clark, W.W. « *Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies* ». *Energy*, vol. 27, pp. 471-483, 2002.
- [Lun 03] Lund, H., Munster, E. « *Modeling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power* ». *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 2179-2193, 2003.
- [Lun 00] Lund, H., Ostergaard, P.A. « *Electric grid and heat planning scenarios with centralised and distributed sources of conventional, CHP and wind generation* ». *Energy*, vol. 25, pp. 299–312, 2000.

### M

- [Mat 11] Mateo Basic, Dinko Vukadinovic and Dusko Lukac, « *Novel dynamic model of self-excited induction generator with iron losses* », *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Volume 5, Issue 2, 2011
- [McC 05] McConnell, R.D., Lasich, J.B., Elam C. « *A hybrid solar concentrator PV system for the electrolytic production of hydrogen* ». 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6 –10 June 2005, Barcelona, Spain, pp 167-170, 2005.
- [McG 99] McGowan, J.G., Manwell, J.F. « *Hybrid wind/PV/diesel system experiences* ». *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [McG 96] McGowan, J.G., Manwell, J.F., Avelar, C., Warner, C.L. « *Hybrid wind/PV/diesel hybrid power systems modeling and South American applications* ». *Renewable Energy*, vol 9, Issues 1-4, pp. 836-847, 1996.

- [Mir 05] Mirecki, A. « *Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance* », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [Mts 11] Mtshali, T. R. Coppez, G. Chowdhury, S. and Chowdhury, S.P. « *Simulation and Modeling of PV-Wind-Battery Hybrid Power System* », July 2011.
- [Mul 10] Mulder, G., De Ridder, F., Six D. « *Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels* ». Solar Energy, vol. 84, pp. 1284-1293, 2010.
- [Mul 03] Muljadi, E., Bialasiewicz, J.T. « *Hybrid Power System with a Controlled Energy Storage* ». 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Roanoke, Virginia, November 2–6, 2003.
- [Mun 04] Munoz, J., Narvarte, L., Lorenzo, E., (2004). « *First operating year of two village PV-diesel plants in the south of Morocco* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3462-3465, 2004.
- [Mus 00] Muselli, M., Notton, G., Poggi, P., Louche, A., (2000). « *PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: analysis via simulation calculations* ». Renewable Energy, vol. 20, pp. 1-7, 2000.
- [Mon 09] Monteiro .J., Silva .J. F, Pinto .S.F, and Palma .J. « *Direct Power Control of matrix Converter based Unified Power Flow Controllers* », Industrial Electronics, IECON '09.35th Annual Conference of IEEE Digital Object Identifier, 2009.

## N

- [Nan 10] Nandi, S.K., Ghosh, H.R. « *Prospect of wind-PV–battery hybrid power system as an alternative to grid extension in Bangladesh* ». Energy, vol. 35, pp. 3040-3047, 2010.

- 
- [Ned 05] Nedeltcheva, S.I., Poggi, P., Muselli, M., Notton, G., Tchobanov, V. « *Modeling and simulation of a photovoltaic – wind turbine – fuel cells hybrid systems* ». OPEM 2005, Sozopol, Bulgaria, 2005.
- [Nel 06] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C. « *Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems* ». Renewable Energy, vol. 31, pp. 1641–1656, 2006.
- [Nog 98] Noguchi .T, Tomiki .H, Takahashi .S. « *Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors* ». IEEE Trans. on Industrial Application, vol 34, p. 473-479, 1998.
- [Not 01] Notton, G., Cristofari, C., Poggi, P., Musseli, M. « *Wind hybrid electrical supply system: behaviour simulation and sizing optimization* ». Wind Energy, vol. 4, pp. 43-59, 2001.
- [Nou 07] Nouni, M.R., Mullick, S.C., Kandpal, T.C. « *Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India* ». Energy Policy, vol. 35, pp. 2491–2506, 2007.
- [Ntz 05] Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., Pattas, K. « *A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid* ». Renewable Energy, vol. 30, pp. 1471–1487, 2005.

### Q

- [Old 04] Oldach, R., Bates, J., Derrick, A., Gantulga, D., Hasnie, S., Enebish, N. « *PV hybrid system for a remote village in Mongolia* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3540-3543, 2004.
- [Ole 05] Oleksiy, N. « *Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques à Contacts Arrières Interdigités* », Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

**P**

- [Pan 04] Pankow, Y. « *Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau basse Tension. Application au générateur photovoltaïque* », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [Pec 04] Pecen, R., Salim, M.D., Zora, A. « *A LabView Based Instrumentation System for a Wind-Solar Hybrid Power Station* ». Journal of Industrial Technology, vol. 20, n 3, 2004.
- [Pet 09] Petibon, S. « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques* ». PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [Phu 07] Phuangpornpitak, N., Kumar, S. « *PV hybrid systems for rural electrification in Thailand* ». Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, pp. 1530–1543, 2007.
- [Pin] Pinho, J.T., Araujo, R.G. « *Wind-PV-diesel hybrid system for the electrification of the village of Sao Tome-municipality of Maracana-Brazil* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3511-3514, 2004.
- [Pra 06] Prasad, A.R., Natarajan, E. « *Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage* ». Energy, vol. 31, pp. 1943-1954, 2006.

**R**

- [Ran 98] Rana, S., Chandra, R., Singh, S.P., Sodha, M.S., (1998). « *Optimal mix of renewable energy resources to meet the electrical energy demand in village of Madhya Pradesh* ». Energy Conversion and Management, vol 39, issues 3-4, pp 203-216, 1998.
- [Rou 17] Rouas .R, Si Brahim .M, Haddad .S, Benamrouche .N. « *Dynamic Models of a Self-Excited Induction Generator Taking Iron Losses Into Account: a*

---

*comparative study*». International Revue on Modelling and Simulations (IREMOS), Vol 10, N°4, August 2017, pp 239, 446.

- [Rot 06] Rotherth, M., Wollny, M. « *Optimized operation management in hybrid systems* ». 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 2335-2337, 2006.

### S

- [Sal 06] Salas, V. Olias, E. Barrado, A. Lazaro, A. « *Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, Solar Energy Materials & Solar Cells 90* », 2006, pp. 1555-1578.
- [Sha 03] Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A. « *Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in hot climates* ». Renewable Energy, vol. 28, pp. 1741–1753, 2003.
- [Sha 04] Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A., (2004). « *Prospects of autonomous stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in commercial applications in hot regions* ». Renewable Energy, vol. 29, pp. 165–177, 2004.
- [Shi 08] Shi, J., Tang, Y.J., Ren, L., Li, J.D., Chen, S.J. « *Application of SMES in wind farm to improve voltage stability* ». Physica C, vol. 468, pp. 2100-2103, 2008.
- [Sib 14] Si brahim .M, Haddad .S, Denoun .H, Benamrouche .N. « *Transient and steady state study of a self excited induction generator* ».International Revue on Modelling and Simulations (IREMOS), Vol 7, N°3, June 2014, pp 379, 386.
- [Sop 09] Sopian, K., Ibrahim, M.Z., Wan Daud, W.R., Othman, M.Y., Yatim, B., Amin, N. « *Performance of a PV–wind hybrid system for hydrogen production* ». Renewable Energy, vol. 34, pp.1973-1978, 2009.
- [Ste 04] Steinhuser, A., Kaiser, R., Kosack, F., Reich, N., Adelman, P. « *Photovoltaics and fuel cells for a decentralised power supply atn “Rappenecker Hof”* ». 19th

European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 2278-2280, 2004.

[Sub 11] Subramanian .K, Ray .KK. « *Evaluation of Capacitance Requirements for Constant Voltage Operation of a Self Excited Induction Generator In Stand Alone Mode* ». IREMOS, Vol 4, n.6, pp 2749, 2755, 2011.

[Sup 06] Suponthana, W., Ketjoy, N., Rakwichian W. « *Transforming solar home system to village grid system by using PV-farmer diesel hybrid system* ». 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3011-3015, 2006.

### T

[Teu 93] Teulings, W. J. A. J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O’Sullivan : « *A new maximum power point tracking system* », IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC’93, Jun. 1993, pp. 833-838.

[Thi 12] Thi Minh Chau LE, « *Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations* », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2012.

[Tin 05] Tina, G.M., Brunetto, C., Gagliano, S., Petino, S., Guerra, M., Schioppo, R., Candio, A. « *Monte Aquilone hybrid Photovoltaic-Diesel power generation system testing site-experimental tuning of subsystem models* ». 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6 –10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2319-2322, 2005.

### U

[Ull 02] Ulleberg, O., Pryor, T.L. « *Optimization of Integrated Renewable Energy Hydrogen Systems in Diesel Engine Mini-grids* ». 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, 9-14 June 2002.

- 
- [Url 98] Urli, N.B., Kamenski, M. « *Hybrid photovoltaic/wind grid-connected power plants in Croatian renewable energy program* ». *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 594-597, 1998.
- [Uzu 09] Uzunoglu, M., Onar, O.C., Alam, M.S. « *Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications* ». *Renewable Energy*, vol. 34, pp 509–520, 2009.
- V
- [Val 05] Valenciaga, F. and Puleston, P. F. « *Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy* ». *IEEE Transactions. Energy Conversion* pp.398–405, 2005.
- [Van 06] Van Sark, W.G.J.H.M., Lysen, E.H., Cocard, D., Beutin, P., Merlo, G.F., Mohanty, B., van den Akker, J., Razzak Idris, A., Firag, A., Waheed, A., Shaheed, A., Latheef, M., Wajeed, A. « *The first PV-diesel hybrid system in the Maldives installed at Mandhoo Island* ». 21st European 178 Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3039-3043,2006.
- [Vec 05] Vechiu Lionel, « *Modélisation et Analyse de l'intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome* », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.
- [Vic 17] Victron energy, « *Systèmes sites isolés Systèmes de secours* », Energie en tout temps en tout lieu.2017
- [Vos 04] Vosseler, I., Ramirez, E., Vallve, X., Carreras, J.M. « *PV hybrid village electrification in Spain-6 years experience with multi-user solar hybrid grids* ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3361-3364, 2004.

W

- [Wich 01] Wichert, B., Dymond, M., Lawrance, W., Friese, T. « *Development of a test facility for photovoltaic-diesel hybrid energy systems* ». *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 311-319, 2001.
- [Wic 99] Wickert, B., Nayar, C.V., Lawrance, W.B. « *Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification* ». *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 1, n. 1, pp. 7-17, 1999.

X

- [Xia 91] Xiao, W. « *A Modified Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems* », Master of science, Shenyang Polytechnic University, 1991.

Y

- [Yan 08] Yang, H. Zhou, W. Lu, L. and Fang, Z. « *Optimal Sizing Method for Stand Alone Hybrid Solar–Wind System with LPSP technology by using Genetic Algorithm* », *Solar Energy* vol.82, pp. 354-367, 2008.

Z

- [Zah 98] Zahedi, A. « *Development of an electrical model for a PV-battery system for performance prediction* ». *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 531-534, 1998.
- [Zho 09] Zhou, T. « *Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau* ». PhD thesis, Ecole Doctorale SPI 072, L2EP a l'Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [Zin 10] Zini, G., Tartarini, P. « *Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage: Modeling and simulation* ». *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2461-2467, 2010.

---

## ANNEXE A

### Paramètres de la génératrice asynchrone auto-excitée (machine à rotor bobiné)

Plaque signalétique :

- Rotor de type bobiné
- 2 paires de pôles
- Y/ $\Delta$  400V/230V-11A/6.3A-3KW-50Hz-1413 tr/min

Paramètres identifiés :

- Résistance d'une phase statorique :  $R_s = 1.65 \Omega$
- Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator :  $R_r = 3.93 \Omega$
- Inductance de fuites statorique :  $l_{fs} = 0.0126\text{H}$
- Inductance de fuites rotorique ramenée au stator :  $l_{fr} = 0.0126\text{H}$
- Inductance magnétisante (valeur initiale) :  $L_m = 0.2402\text{H}$

### Paramètres du panneau photovoltaïque

- Puissance maximale :  $P_{\max} = 60\text{W/m}^2$
- Tension à  $P_{\max}$  :  $V_{\text{mp}} = 17.2\text{V}$
- Courant à  $P_{\max}$  :  $I_{\text{mp}} = 3.4\text{A}$
- Tension de circuit ouvert :  $V_{c0} = 21.1\text{V}$
- Courant de court-circuit :  $I_{cc} = 3.8\text{A}$
- Coefficient de température de  $I_{cc} = 2.2 \cdot 10^{-3}$
- Coefficient de température de  $V_{c0} = 73 \cdot 10^{-3}$
- Nombre de cellules = 36

## ANNEXE B

## Variation de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant et son approximation polynomiale

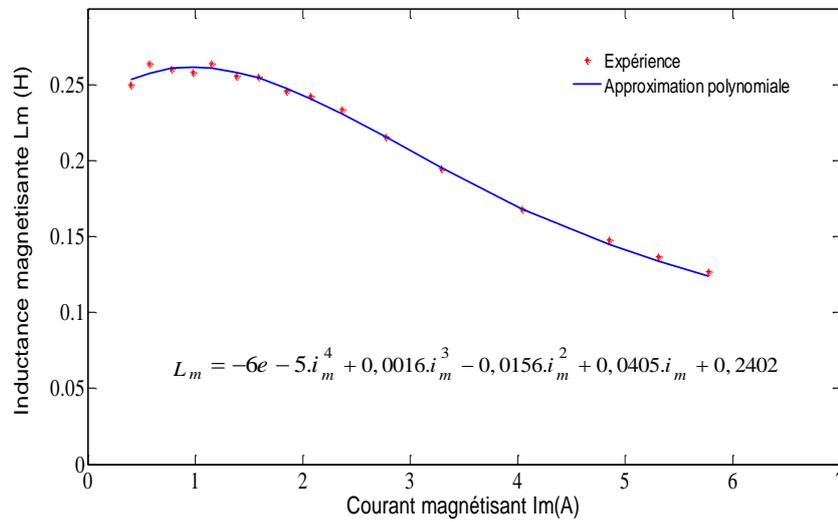


Figure B.1 Inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant.

## ANNEXE C

## Calcul de l'inverse de la matrice inductance

Ce calcul se fait manuellement ou en utilisant le logiciel Mat Works qui permet l'inversion littérale des matrices.

$$\begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$D = (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) \cdot (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{11} = L_{mdr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{12} = -l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{13} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{md} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{14} = -l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{21} = -l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{22} = L_{mqr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{23} = -l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{24} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{mq} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{31} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{32} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{33} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{34} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{41} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{42} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{43} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{44} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

## Construction du schéma Matlab Simulink de la GAAE

Expression des dérivées des courants :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{qm} \\ v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{dm} \\ R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{qm} \\ \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{dm} - R_r i_{qm} \end{pmatrix}$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{aligned} & \left( v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{qm} \right) \cdot x_{11} + \left( v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{dm} \right) \cdot x_{12} \\ & + \left( R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{qm} \right) \cdot x_{13} + \left( \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{dm} - R_r i_{qm} \right) \cdot x_{14} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} \cdot v_{ds} + x_{12} \cdot v_{qs} + \\ \left( -R_s x_{11} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} + R_r x_{13} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left( l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} - R_s x_{12} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} + R_r x_{14} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left( -L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} - R_r x_{13} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left( L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} - R_r x_{14} \right) \cdot i_{qm} \end{pmatrix}$$

Le calcul de la dérivée des autres courants ( $i_{qs}$ ,  $i_{dm}$  et  $i_{qm}$ ) se fait en remplaçant dans

l'expression de  $\frac{di_{ds}}{dt}$  le premier indice de  $x_{1j}$  à savoir 1 par respectivement 2,3 et 4.

## THÈSE DE DOCTORAT

### 3<sup>ème</sup> Cycle LMD

M. Rabah ROUAS

Titre:

**Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque**

**Résumé :** Dans cette thèse, nous avons développé un dispositif capable d'alimenter continuellement en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. Ceci est réalisable par la mise au point d'un système hybride combinant une éolienne et des panneaux photovoltaïques comme sources principales, des batteries pour le stockage ainsi qu'un générateur diesel comme sources de secours. La combinaison de ces sources d'énergies sert à pallier à la discontinuité de l'alimentation, si ces dites source venaient à opérer chacune individuellement. Cette discontinuité est due aux caractères aléatoires ainsi qu'à la dépendance des conditions météorologiques et climatiques de ces sources. Pour ce faire, nous avons dimensionné chaque source du système hybride de façon à ce qu'elle puisse satisfaire seule dans les conditions les plus favorables la charge maximale demandée. Par la suite, nous avons modélisé chacune des chaînes de conversion d'énergie et nous avons développé les lois de commande en puissance assurant de bonnes performances de suivi de consignes. Finalement, nous avons mis en œuvre un algorithme de gestion d'énergie pour déterminer les modes de fonctionnement des sources du système hybride dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant autant que possible le système de stockage et le générateur diesel.

**Mots-clés:** Système hybride autonome, panneaux photovoltaïques, éolienne, batteries de stockage, chaîne de conversion d'énergie, générateur asynchrone auto-excitée, commande directe de puissance DPC, redresseur à MLI, algorithme de gestion d'énergie

Title:

**Study of a wind-photovoltaic hybrid system**

**Abstract :** In this thesis, we developed an energy conversion system able to continuously feed isolated zones whose connection to the electrical network is very expensive and non profitable. This is realizable by the development of an hybrid system combining two renewable energy sources; a wind energy generator and photovoltaic panels. Storage batteries and a diesel generator are used as substituting sources. This combination is used to mitigate the problem of the discontinuity when the renewable energy sources operate each one individually. This discontinuity is due to random nature of these sources and their dependence of the climatic conditions. We dimensioned each source of the hybrid system so that it can satisfy, under favorable conditions, the maximum requested load. Thereafter, we modeled each energy conversion chain and we developed power control laws ensuring good performances in terms of precision. Finally, we implemented an energy management algorithm to determine operating modes of the hybrid system with the aim of producing power as much than that requested by the load. And this by requesting firstly the renewable energy sources while saving as possible the storage batteries and the diesel generator.

**Keywords:** Autonomous Hybrid System, Photovoltaic Panel, Wind Energy Generator, Storage Batteries, Self Excited Induction Generator, Direct Power Control, PWM Rectifier, Energy Management Algorithm.