

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



École Nationale Polytechnique
Département d'Automatique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Automatique

Thème :

COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT
D'UN BATIMENT À ÉNERGIE POSITIVE MULTISOURCES

Présenté par:

MOSBAH Charaf abd el karim
OURTEMACHE Hamza

Encadré par:

Pr F.BOUDJEMA
Pr D.BOUKHETALA

Promotion Juin 2013

Remerciements

Louange à Allah le tout puissant qui nous a accordé le savoir, le droit chemin ,l'opportunité de poursuivre nos études et la force pour réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciement pour nos encadreurs Monsieur **Farès Boudjema** et **Djamel Boukhetala**, Professeurs de l'**Ecole Nationale Polytechnique**, d'avoir mis leur confiance en nous, en nous confiant ce travail, et de nous avoir orienté vers ce thème d'actualité, qui présente un très grand intérêt, en nous permettant ainsi d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences.*

*Nous tenant également à remercier Monsieur **Abdelouel**, enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Bouamar**, enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

Nous tenons à présenter notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique, à leurs tête les enseignants du département d'automatique, grâce à qui nous avons acquis les connaissances, les compétences, et le savoir nécessaire durant tout notre cursus, et spécialement pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Merci infiniment à tous.

Dédicace

A la mémoire de ma grand-mère

Je dédie ce travail à mes parents, spécialement à mon Père pour son soutien inconditionnel sans lequel je ne serais nullement arrivé à ce que je suis aujourd'hui.

A ma chère famille,

A mes très chers amis qui ont toujours étaient là pour moi.

A mon chère collègue Karim, sans lequel ce travail ne serait jamais accompli.

A mes enseignants, qui m'ont beaucoup appris

A tout le staff de l'Ecole Nationale Polytechnique

Au staff du programme DEVED de la GIZ

A mes camarades d'El Maarifa, du PLC et du WBD

A tous ceux que j'aime et je chéris

Hamza

Dédicace

*Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir
donné le courage, la volonté, la patience et la bonne santé durant
toutes ces années.*

*En signe d'amour, de gratitude et de respect, je dédie ce modeste travail :
Aux êtres les plus chers au monde qui n'ont pas cessé de me fournir leurs
soutiens et leurs encouragements : Mon père qui m'a éclairé mon chemin
et qui
m'a encouragé et soutenue dans les moments difficiles de ma carrière ; Ma
chère mère, la lumière de mes yeux,
J'espère qu'ils sont fiers de leur fils,
ils sont mes plus chers êtres, que
Dieu les protège.*

Je le dédie aussi, à :

*mes frères,
mes oncles, mes tantes
mes cousines et mes cousins et
toute ma famille, de loin ou de proche.*

*Mon très cher binôme Hamza, À tous mes amis de L'ENP et tous
mes amis de la cité universitaire « Bouraoui »
À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

.... Karim

Table des matières

TABLE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

1 État de l'art

1.1	Introduction.	8
1.2	Concepts de bâtiments performants :.	9
1.3	Le bâtiment à énergie positive :.	12
1.3.1	Principes :.	12
1.4	Concepts des systèmes d'alimentations proposés :.	13
1.4.1	Production d'énergie électrique à base du photovoltaïque :.	13
1.4.2	L'effet photovoltaïque :.	14
1.4.3	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :.	15
1.4.4	Les différentes technologies des cellules :.	16
1.4.5	Générateur photovoltaïque.	17
1.4.6	Types de systèmes photovoltaïques.	19
1.4.7	Production électrique par aérogénérateur :.	21
1.5	Chaines de conversion électromagnétique :.	29
1.5.1	Génératrices asynchrones à cage :.	29
1.5.2	Génératrices synchrones :.	30
1.5.3	La Machine Asynchrone à Double Alimentation.	30
1.6	Convertisseurs électriques :.	34
1.6.1	Les redresseurs (convertisseur AC/DC).	35
1.6.2	Les onduleurs (convertisseur DC/AC).	35
1.6.3	Les hacheurs (convertisseur DC/DC).	36
1.7	Eléments de stockage d'énergie électrique :.	36
1.7.1	Par voie électrochimique.	37
1.7.2	Par voie électrostatique.	38
1.7.3	Par voie électromagnétique.	38
1.7.4	Par voie mécanique.	39
1.8	Etude des systèmes d'énergie hybride.	40
1.8.1	Classification des systèmes d'énergie hybride.	40
1.8.2	Description du système d'énergie hybride.	42
1.8.3	Configurations des systèmes d'énergie hybride.	43

1.8.4	Commande des systèmes d'énergie hybride	43
1.9	Système hybride étudié	45
1.10	Conclusion	45
2	Modélisation, commande et simulation de la chaîne photovoltaïque	47
2.1	Introduction	47
2.2	Modélisation de la chaîne photovoltaïque	48
2.2.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque :	48
2.2.2	Modèle du générateur photovoltaïque :	50
2.2.3	Constitution d'un générateur photovoltaïque :	50
2.2.4	Modélisation :	51
2.2.5	Eléments influents sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :	53
2.3	Problématique de la production de la puissance maximale.	55
2.3.1	Modes de connexion :	56
2.3.2	Principe de la recherche du point de puissance maximale	59
2.4	Commande stabilisante et commande par mode de glissement :	67
2.4.1	Résultat de simulation :	68
2.4.2	interprétation des résultats :	70
2.5	Conclusion :	71
3	Modélisation, commande et simulation de la chaîne de conversion éolienne	72
3.1	Introduction :	72
3.2	Modélisation de la partie mécanique :	73
3.2.1	La loi de Betz :	73
3.3	Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation	77
3.3.1	Modèle de la MADA dans le plan dq (Transformation de Park)	79
3.3.2	Choix du référentiel :[17]	80
3.3.3	Mise sous forme d'équation d'état	81
3.4	Synthèse de la loi de Commande pour la MADA	87
3.5	Maximisation de la puissance extraite de la turbine :	88
3.5.1	MPPT avec asservissement de la vitesse :	90
3.6	Stratégie de Commande en P et Q :	91
3.6.1	simulation :	95
3.7	Modélisation de la partie puissance :	100
3.8	Conclusion :	102
3.9	La commande par mode de glissement :	108
3.10	Conception de la commande par mode de glissement :	108
3.10.1	1-Choix de la surface de glissement :	109
3.10.2	2-Condition d'existence et de convergence	109

3.10.3 3-Calcul de la commande :.	109
3.11 La commande stabilisante suivant le théorème de Lyapunov :.	109
CONCLUSION GENERALE	

Table des figures

1.1	Carte d'ensoleillement mondiale [4]	14
1.2	ensoleillement en Algérie [13]	14
1.3	principe de la conversion photovoltaïque	15
1.4	Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV[13]	16
1.5	Cellules identiques en série [11]	17
1.6	Cellules identiques en parallèles [11]	18
1.7	(a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass [9].	19
1.8	Système photovoltaïque autonome.[6]	20
1.9	Système photovoltaïque hybride.[6]	20
1.10	Système photovoltaïque connecté au réseau.[6]	21
1.11	Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie [17]	23
1.12	Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 KW) [17]	23
1.13	Anémomètre (à gauche), Girouette (à droite) [20]	25
1.14	éolienne à axe horizontal	26
1.15	éolienne à axe vertical	26
1.16	Source : Eolienne de type Darrieus (WindWall)	27
1.17	Source : Eolienne de type Savonius (WindSide)	27
1.18	éolienne directement connectée au réseau. [16]	28
1.19	éolienne à vitesse variable basée sur la MADA [16]	28
1.20	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)[21]	29
1.21	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[21]	29
1.22	Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [21]	30
1.23	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[21]	30
1.24	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA[17]	31
1.25	Schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation [19]	32
1.26	Fonctionnement Hyposynchrone	34
1.27	fonctionnement Hypersynchrone	34
1.28	Fonctionnement Hyposynchrone	34
1.29	fonctionnement Hypersynchrone	34

1.30 Onduleur triphasé de tension	36
1.31 Principe d'un supercondensateur [10]	38
1.32 schéma de principe d'une installation de stockage d'air comprimé [27]	40
1.33 Classification des systèmes d'énergie hybride [10]	41
1.34 Synoptique d'un système d'énergie hybride avec groupe électrogène [29].	42
1.35 Configuration de SEH à bus CC[10]	43
1.36 Architecture mixte d'un système hybride [10]	44
1.37 Exemple de gestion des charges selon les priorités [34]	45
1.38 Schéma globale du système hybride étudié. [10]	46
2.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque[49]	48
2.2 Composantes d'un générateur photovoltaïque [49]	51
2.3 Modélisation du panneau PV	52
2.4 Caractéristique Courant–Tension du GPV	52
2.5 Caractéristique Puissance–Tension du GPV	53
2.6 Influence de l'irradiation sur la caractéristique Courant-Tension du GPV.	54
2.7 Influence de l'irradiation sur la caractéristique Puissance-Tension du GPV.	54
2.8 Influence de Température sur la caractéristique Courant-Tension du GPV.	55
2.9 Influence de Température sur la caractéristique Puissance-Tension du GPV.	55
2.10 Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.	56
2.11 Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en Fonction de la charge.	57
2.12 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.	58
59figure.caption.98	
2.14 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	60
2.15 Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost	61
2.16 Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST[10]	62
2.17 Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST	62
2.18 Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique	63
2.19 Principe de la première commande MPPT numérique	65
2.20 Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ d'un GPV	65
2.21 Algorithme type de la méthode PO	66
2.22 configuration de la chaîne photovoltaïque avec régulateur par mode de glissement	67
2.23 Puissance du GPV générée avec sa référence	69
2.24 Zoom sur la puissance du GPV générée avec sa référence	69
2.25 Variation du courant du GPV	69
2.26 Variation du tension du GPV	69
2.27 Puissance du GPV générée avec sa référence	70
2.28 Zoom sur la puissance du GPV générée avec sa référence	70
2.29 Variation du courant du GPV	70

2.30	Variation du tension du GPV	70
3.1	Schéma de principe d'une turbine éolienne [17]	73
3.2	Représentation de la surface balayée par la turbine[44]	73
3.3	Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	76
3.4	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [45]	77
3.5	Passage du triphasé au biphasé	79
3.6	Vitesse mécanique ω_{gen}	83
3.7	couple électromagnétique du rotor Cem	83
3.8	flux statorique Phi_{qs}	83
3.9	flux statorique Phi_{ds}	83
3.10	Courant rotorique i_{dr}	84
3.11	Courant rotorique i_{qr}	84
3.12	Courant statorique i_{qs}	84
3.13	Courant statorique i_{ds}	84
3.14	Puissance Active statorique P_s	85
3.15	Puissance Réactive statorique Q_s	85
3.16	Vitesse mécanique ω_{gen}	85
3.17	couple électromagnétique du rotor Cem	85
3.18	flux statorique Phi_{qs}	86
3.19	flux statorique Phi_{ds}	86
3.20	Courant rotorique i_{dr}	86
3.21	Courant rotorique i_{qr}	86
3.22	Courant statorique i_{qs}	87
3.23	Courant statorique i_{ds}	87
3.24	Puissance Active statorique P_s	87
3.25	Puissance Réactive statorique Q_s	87
3.26	Diagramme simplifié de la technique MPPT Avec mesure de la vitesse du vent et avec connaissance de la courbe.	89
3.27	Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.	89
3.28	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 0$	89
3.29	Schéma synoptique de la technique MPPT avec asservissement de la vitesse	91
3.30	Schéma synoptique du contrôle du convertisseur côté MADA.	91
3.31	Puissance Active $P_s P_{s.ref}$	96
3.32	Erreur de poursuite de la Puissance Active	96
3.33	Puissance Réactive $Q_s Q_{s.ref}$	96
3.34	Erreur de poursuite de la Puissance Réactive	96
3.35	Courants statoriques	97
3.36	Zoom sur les courants statoriques	97

3.37 Tensions de commande rotoriques	97
3.38 zoom sur les Tensions de commande rotorique	97
3.39 Puissance Active $P_s P_{s.ref}$	98
3.40 Erreur de poursuite de la Puissance Active	98
3.41 Puissance Réactive $Q_s Q_{s.ref}$	98
3.42 Zoom sur la puissance réactive $Q_s Q_{s.ref}$	98
3.43 Courants statoriques	99
3.44 Zoom sur les courants statoriques	99
3.45 Tensions de commande rotoriques	99
3.46 zoom sur les Tensions de commande rotorique	99
3.47 Stratégie globale de la commande de la chaine éolienne [44]	100
3.48 Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors	101
3.49 Redresseur triphasé à deux niveaux	101
3.50 Source d'alimentation	101

ملخص:

لا يمكن أن نعتبر الان الطاقات المتجددة طاقات بديلة لإنتاج الطاقة الكهربائية، ذلك انها أصبحت تشكل حتمية بسبب تزايد الطلب و محدودية الموارد.

إن تبني أنظمة إنتاج بواسطة المصادر المتجددة لتغذية المباني يمثل خيارا في منتهى الأهمية، والذي يجب تطويره و تعميمه.

في هذا العمل، اقترحنا دراسة نظام إنتاج هجين، هوائي- كهروضوئي، لمبنى ذي طاقة إيجابية، مع دمج نظام تحكم قوي، بصيغة انزلاقية، لضمان أقصى إنتاج و تكبير التواتر و التيار المنتج مع الشبكة.

الكلمات المفتاحية: التحكم الانزلاقي، مولد غير متزامن مزدوج التغذية، خلية (مولد) ضوئية، مباني ذات طاقة إيجابية، أنظمة هجينة، ، محول BUCK-BOOST...

Résumé :

Les énergies renouvelables ne représentent plus une alternative à la production d'énergie électrique, mais une fatalité imposée par la hausse de la demande ainsi que la limitation des ressources.

L'adoption des systèmes de production à base de sources renouvelables pour alimenter les bâtiments présente une option très intéressante, qui nécessite ainsi d'être développée et généralisée.

Dans ce travail nous nous sommes proposé d'étudier un système de production hybride, Eolien- photovoltaïque, pour un bâtiment à énergie positive tout en intégrant une commande robuste , par mode de glissement, pour optimiser la production et ainsi adapter à travers des convertisseurs d'électronique de puissance, la tension et l'intensité produite à celle du réseau.

Mots clés : commande par mode de glissement, machine asynchrone à double alimentation, générateur photovoltaïque, MPPT, bâtiments à énergie positive, système hybride, convertisseur BUCK-BOOST.

Abstract:

Renewable energies are no longer considered as an alternative for electrical energy production, but a fatality imposed by the growing demand and resources limitation.

The adoption of production systems based on renewable resources as a supply for buildings presents a very interesting option that needs to be developed and generalized.

In this work, we studied a hybrid production system, wind- photovoltaic connected to the electrical network, and provided with a storage system, for a positive energy building, while integrating a robust control, by sliding mode, to optimize the production and adapt the voltage and the current using electrical converters to those of the network.

Key words: sliding mode control, double-fed asynchronous machine (DASM), photo cells (generators), positive energy buildings, hybrid systems, network connection, and BUCK-BOOST converter.

Abréviations et symboles

Abréviations

SEH	Système d'Énergie Hybride
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximal (Maximum Power Point)
MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale
P&O	Perturbation et Observation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	Moteur à Courant Continu
CCR	Convertisseur Coté Réseau
CCM	Convertisseur Coté Machine
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
DC	Courant Continu (Direct Current)
f.e.m	Force électromotrice
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Pb-acide	Plomb-Acide

Symboles

		unité
C	capacité	F
C_p	coefficient de puissance	
C_{aero}	couple aérodynamique	$N.m$
$C_{aero.est}$	couple aérodynamique estimé	$N.m$
C_{arbre}	couple de l'arbre	$N.m$
C_{em}	couple électromagnétique	$N.m$
$C_{em.ref}$	couple électromagnétique de référence	$N.m$
C_{mec}	couple mécanique	$N.m$
C_{visq}	couple des frottements visqueux	$N.m$

d	rapport cyclique	
E_0	tension constante	V
E_{batt}	tension non linéaire de la batterie	V
E_g	bande énergétique du gap du semi-conducteur	V
E_r	f.e.m créée au niveau rotor	N
E_s	f.e.m créée au niveau stator	N
$Exp(s)$	zone dynamique exponentielle	V
f	coefficient du frottement visqueux	$N.m.s/rad$
f_r	fréquence des courants rotoriques	Hz
f_s	fréquence des courants statoriques	Hz
f_s	fréquence de hachage	Hz
G	l'ensoleillement	W/m^2
G	gain du multiplicateur	
G	conductance de la source	A/V
g	glissement	
I	courant	A
I_{cell}	courant de la cellule photovoltaïque	A
I_G	courant du générateur photovoltaïque	A
I_{rs}	courant de saturation inverse de la diode	A
I_{bat}	courant de la batterie	A
I_d	courant inverse de la diode	A
I_{ph}	Photo-courant de cellule	A
I_{opt}	courant de point de puissance maximale	A
I_{pv}	courant de la cellule	A
I_r	courant rotorique	A
I_s	courant statorique	A
I_{cc}	courant de court-circuit	A
J_g	inertie de la génératrice	$kg.m^2$
J_T	inertie totale	$kg.m^2$
$J_{turbine}$	inertie de la turbine	$kg.m^2$
K	constante de Boltzmann	
K_I	constante d'intégralité	
K_P	constante de proportionnalité	
L_r	inductance cyclique rotorique	H
L_s	inductance cyclique statorique	H
M	rapport de conversion	
M_{sr}	inductance mutuelle	H

A	coefficient d'idéalité	
N_p	nombre de cellules en parallèle	
N_s	nombre de cellules en série	
p	nombre de paire de pôles	
P	puissance	W
P_{aero}	puissance aérodynamique	W
P_m	puissance mécanique	W
P_{max}	puissance maximale	W
P_r	puissance active au niveau rotor	W
P_s	puissance active au niveau stator	W
P_{vent}	puissance du vent	W
q	charge de l'électron	C
Q_r	puissance réactive au niveau rotor	VAR
Q_s	puissance réactive au niveau stator	VAR
R_r	résistance rotorique	Ω
R_s	résistance statorique	Ω
R_s	résistance série	Ω
R_{sh}	résistance shunt	Ω
R_t	rayon de la turbine ou longueur d'une pale	m
$Sel(s)$	mode de la batterie	
S_{eol}	surface balayée par l'éolienne	m^2
T	température	$^{\circ}C$
T_c	température de la jonction	K
T_s	période de commutation	s
v	vitesse du vent	m/s
v_{est}	vitesse du vent estimée	m/s
V	tension	V
V_{pv}	tension du générateur photovoltaïque	V
V_{bat}	tension de la batterie	V
V_c	tension du condensateur	V
V_{opt}	tension de point de puissance maximale	V

V_{oc}	tension du circuit ouvert	V
V_{oc}^c	tension du circuit ouvert de la cellule photovoltaïque	V
V_{oc}^G	tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque	V
V_r	tension rotorique	V
V_{ref}	tension de référence	V
V_s	tension statorique	V
V_T	potentiel thermique	V
Z	l'impédance équivalente d'entrée	Ω
Symboles grecques		
β	angle d'inclinaison des pales	0
φ_r	flux rotorique	Wb
φ_s	flux statorique	Wb
λ	rapport de vitesse	
Ω_{gen}	vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
Ω_r	vitesse mécanique du rotor	rad/s
Ω_s	vitesse du champ magnétique dans l'entrefer	rad/s
Ω_t	vitesse de rotation de la turbine	rad/s
ω	pulsation de synchronisme	rad/s
ω_s	pulsation du réseau (pulsation des courants statoriques)	rad/s
ω_r	pulsation des courants rotoriques	rad/s
ρ	masse volumique de l'air	kg/m^3
θ	l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique	rad
θ_r	angle électrique rotorique	rad
θ_s	angle électrique statorique	rad
τ	constante de temps	s
$\mu_{I_{sc}}$	coefficient de température du courant de court-circuit	$A/^0K$

Introduction générale

Dans une course acharnée pour améliorer le mode de vie et le bien-être de l'humanité, l'industrialisation a envahi les quatre coins du monde dès le début du 19^{ème} siècle, en consommant ainsi les diverses ressources de notre planète, matières premières, terre et en plus important ressources d'énergie.

Certes, cette industrialisation a contribué au développement, mais ça n'as pas était sans payer cher ; dès les années 70 la communauté mondiale a déclenché les alarmes quant aux effets nuisibles sur l'environnement ; réchauffement planétaire, changement climatique, pollution etc... durant la conférence des nations unies sur l'environnement en 1972, puis mis en évidence dans le rapport de Brundtland en 1987, en appelant ainsi les pays industrialisés à adopter une démarche de production durable attirant ainsi l'attention sur un autre problème ; l'épuisement des ressources.

On devait ainsi trouver une solution aux problèmes environnementaux, et à l'épuisement des ressources d'énergie, fossiles en premier lieu. L'énergie nucléaire est apparue alors comme une solution intéressante, or avec les différents risques qu'elle présentait, mis en évidence par les différentes catastrophes, Tchernobyl et récemment Fukushima, il fallait se tourner vers d'autres modes plus propres et non épuisables ; les énergies renouvelables.

L'approche visant à utiliser les ressources « pérennes » d'énergies, entre autre le solaire, l'éolien, la géothermie etc... ne date pas d'hier , mais c'est le résultat de plusieurs années de réflexion, recherche et de développement , pour définir les différents modes d'utilisation, et répondre aux différents inconvénients, comme les problèmes de rendement , de cout et de stockage. On devait aussi définir les modes d'utilisation, doit on adopter des grandes centrales pour rependre aux besoins de l'industrie ? Ou doit-on se focaliser sur des installations privées ? Jusqu'à un certain temps, on ne parlait que de l'industrie comme premier pôle de consommation de ressources énergétiques par excellence. La croissance économique de certains pays, les pays du BRIC (Brésil, Russie, Inde, Chine) notamment appuie encore cette proposition, or d'une autre part on ne peut négliger le fait de la croissance de la population mondiale et ainsi la croissance de la demande énergétiques pour utilisation domestique qui atteint les environs de 40% de la consommation globale d'énergies dans le monde, sans oublier de mentionner qu'une partie importante de cette énergie est en fait perdue sous plusieurs formes.

Ceci étant dit, on voit bien l'intérêt d'adopter des solutions menant à intégrer l'utilisation des énergies renouvelables pour utilisation domestique, qui présente un bon marché de développement économique, et d'une autre part le besoin d'opter pour des systèmes et structure visant à optimiser la consommation d'énergies, à augmenter l'efficacité des construction et ainsi minimiser les pertes, ce qui nous introduit donc au concept des « bâtiments performants à énergies positive ».

Ce travail constitue une continuité aux différents travaux menés sur les thèmes relatifs aux bâtiments performants, introduisant les systèmes d'alimentations aux énergies renouvelables, développés aux seins de notre école ou dans d'autres universités et instituent de recherche. Nous avons essayé d'intégrer d'autres visions de commandes des systèmes ainsi que d'autres améliorations, comme ça va suivre.

Nous avons consacré un premier chapitre à l'état de l'art de l'installation hybride, où nous avons exposé dans un premier lieu les différents concepts liés aux bâtiments performants, suite à cela nous nous sommes concentrés sur l'aspect bâtiment à énergie positive en introduisant ainsi les différents systèmes de production d'énergie à sources renouvelable utilisé dans ce travail, le solaire photovoltaïque et l'éolien suivie par les éléments de conversions et de stockage. Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes étalés sur la production de l'énergie électrique par le solaire, commençant par la modélisation et la simulation, passant ensuite à l'étude du problème de production maximale à laquelle nous avons opté pour deux méthodes de commande ; stabilisation suivant le théorème de Lyapunov et par mode de glissement. À la fin de ce chapitre on exposera et on commentera les résultats de simulations. Pour le troisième chapitre, ça sera au tour de la chaîne de conversion éolienne, passant ainsi de la modélisation des différentes parties ; de la turbine à la MADA, puis la simulation, et l'amélioration des performances par les stratégies de commande robuste comme dans le chapitre précédant, arrivant à exposer et commenter les résultats de simulations.

À la fin de ce mémoire on présentera la conclusion générale, récapitulant toutes les étapes et résultats de ce travail, en proposant quelques perspectives pour assurer sa continuité.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Introduction

La diminution des ressources énergétiques fossiles et la hausse durable de leurs prix, l'augmentation considérable des besoins en énergie, les difficultés d'approvisionnement, le poids du secteur énergétique dans les émissions de CO_2 et la lutte contre le changement climatique imposent d'adapter d'autres modes de production.

On ne peut nier le fait que l'industrie représente le plus grand secteur consommant l'énergie en ses diverses formes, mais cela ne cache pas le fait que le secteur de l'habitat consomme environ 40% de l'électricité produite.

Les énergies renouvelables, se présentent comme une alternative très intéressante pour assurer l'alimentation des bâtiments, et ainsi répondre à leurs besoins énergétiques, et l'excès en énergie peut être ainsi transmise pour alimenter le réseau ce qui définit le concept des bâtiments à énergie positive.

Ce premier chapitre vise à poser le cadre précis de cette thèse, il se résume en :

- définir le concept de bâtiment à énergie positive et le situer par rapport aux différents concepts de bâtiments performants existants.
- Etat des lieux des ressources renouvelable de production d'énergie en Algérie.

- Description des technologies de production d'énergie renouvelables utilisées.
- Introduction aux systèmes de production hybrides, et éléments de stockage.

1.2 Concepts de bâtiments performants :

Le concept de bâtiments performants regroupe les différentes techniques et technologies mise au point pour atteindre certains objectifs quant à la consommation d'énergie, respect de l'environnement et économie des ressources etc. . .

Ce concept a évolué avec le temps définissant ainsi plusieurs typologies et classifications respectant des normes bien précises.

Classification des bâtiments performants :

Dans la littérature on trouve plusieurs classes des bâtiments performants, suivant des normes bien définies. Dans la classification des bâtiments on peut distinguer deux approches ; une approche énergétique et une autre globale.

Approches énergétiques :

Dans cette approche on classe les bâtiments suivant leurs performances énergétiques, où on peut distinguer plusieurs types :

- **Les bâtiments à basse consommation (Low energy house) :**

Dans ce type de bâtiments, on travaille sur la réduction et l'optimisation de la consommation d'énergie, par exemple en adoptant des techniques d'isolation thermique en réduisant les échanges avec l'extérieurs et gagner ainsi en énergie de chauffage (ou climatisation en été). Donc le point à signaler dans ce type d'édifices est qu'il ne comporte aucun moyen de production local d'énergie, mais on peut bien l'adopter.

- **Le bâtiment passif ou l'habitat passif (passive house)**

L'habitat passif désigne un bâtiment très faiblement consommateur d'énergie, voir entièrement compensée par les apports solaires ou par les calories émises par les apports internes (matériel électrique et habitants).

Pour être qualifiée de « passive » une maison doit réduire environ 80% de ses dépenses d'énergie de chauffage par rapport à une maison neuve construite selon les normes allemandes d'isolation thermique de 1995, normes déjà très exigeantes.

Le programme CEPHEUS (Cost Efficient Passive Houses as EUropean Standards) a contribué à développer le concept du bâtiment passif.[1]

Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids ; il est le plus souvent associé à la ventilation.[2]

- **Le bâtiment producteur d'énergie (near zero energy house)**

Ce type de bâtiments est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment à proprement parler. L'expression "bâtiment producteur d'énergie" est néanmoins parfois employée pour désigner un « bâtiment à énergie positive ». [2]

- **Le bâtiment zéro énergie ou zéro net (net zero energy house)**

Dans ce cas on parle d'un bâtiment combinant de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul [2].

- **Le bâtiment à énergie positive (Positive energy building)**

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau « zéro énergie » : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique [2].

- **Le bâtiment autonome**

On parle d'un bâtiment autonome quand son alimentation énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.[2]

Approches globales :

Dans les approches dites « globales » on étend l'évaluation des performances à l'appréciation de la qualité environnementale et aux aspects économiques du bâtiment.

On peut citer les types suivants :

- **Zero utility cost house (net zero annual energy bill)**

Cette approche est plutôt présente au Japon et aux Etats-Unis d'Amérique. Elle désigne les bâtiments dont la facture énergétique est nulle : la vente d'une partie de la production énergétique du bâtiment compense les frais engendrés par l'achat de l'énergie consommée (électricité, hydrocarbures etc.). Cette approche est privilégiée dans l'habitat social pour lequel la facture énergétique représente une part importante du budget des occupants. L'objectif est atteint grâce à la réduction des consommations et à l'usage de ressources énergétiques renouvelables gratuites. Mais le bilan dépend de facteurs non physiques tels que les prix des énergies ou les offres commerciales des fournisseurs. [2]

- **maison neutre en carbone ou bâtiment à émission zéro (carbon neutral house)**

Ces expressions désignent un bâtiment dont le fonctionnement n'induit aucune émission de CO₂. Cette orientation, qui s'inscrit dans la démarche du protocole de Kyoto, vise à réduire la participation du bâtiment à l'accroissement de l'effet de serre. La démarche "zéro carbone" est généralement associée à un mode de vie, dont la portée, au-delà du bâtiment, englobe les modes de déplacement, voire les modes de consommation des occupants du bâtiment. L'une des conséquences de cette démarche est l'utilisation exclusive de ressources énergétiques renouvelables. Le projet BedZed, en Angleterre, a été réalisé selon ce principe [2].

- **Le bâtiment vert , durable , soutenable ou écologique (green building)**

Ces qualificatifs font référence à des notions surtout symboliques dont les concepts associés sont mal définis. Ils dépassent très largement le cadre énergétique et soulignent plutôt le faible impact environnemental du bâtiment, par exemple par les matériaux mis en oeuvre. L'une des multiples facettes de tels bâtiments peut éventuellement correspondre à l'un des concepts présentés plus haut. Un projet européen, intitulé LenSe (Methodology development towards a Label for Environmental, Social and Economic Buildings), s'emploie actuellement à élaborer une définition européenne commune du « bâtiment durable » en vue d'aboutir à une méthode d'évaluation commune [LenSe 2008]. Voir par exemple [IISBE 2008]

- Le bâtiment intelligent (intelligent building)

Cette expression désigne un bâtiment qui présente une forme « d'intelligence », généralement apportée par des automates programmables et des systèmes informatiques de supervision. Ces équipements visent à améliorer la gestion de certaines fonctions modulables du bâtiment, telles que la protection solaire, la ventilation, le chauffage, l'éclairage ou la sécurisation des accès. Il existe une multitude de définitions de ce concept [Wong et al. 2005], cependant l'objectif essentiel du bâtiment intelligent semble être l'amélioration du confort et de la productivité des occupants à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent les préoccupations énergétiques et environnementales peuvent y être secondaires, voire absentes.[2]

1.3 Le bâtiment à énergie positive :

Le bâtiment à énergie positive (parfois abrégé en « BEPOS ») est un bâtiment qui produit plus d'énergie (électricité, chaleur) qu'il n'en consomme pour son fonctionnement. C'est généralement un bâtiment passif très performant et fortement équipé en moyens de production d'énergie par rapport à ses besoins en énergie. Les toits, murs, voire les fenêtres ou d'autres éléments (verrières de véranda ou balcons, murs d'enceinte, toiture de garage ou appentis, fondations, etc.) peuvent être mis à profit pour accumuler et restituer de la chaleur ou produire de l'électricité. Le caractère excédentaire en énergie (« positif ») est permis par des principes constructifs et bioclimatiques, mais aussi par le comportement des usagers (gestion efficace des usages, des consommations de l'électroménager et de l'informatique, de la mobilité...). La quantité d'énergie produite sur le toit, murs, ombrières... doit au moins compenser la somme des consommations énergétiques moyennes annuelles sous le toit. [3]

1.3.1 Principes :

La conception d'un bâtiment à énergie positive reprend généralement les grands principes de la maison passive, en y ajoutant des éléments de productions d'énergie :

- Isolation thermique renforcée, fenêtres de grande qualité ;
- Suppression des ponts thermiques et isolation par l'extérieur ;
- Excellente étanchéité à l'air ;

1.4. CONCEPTS DES SYSTÈMES D'ALIMENTATIONS PROPOSÉS :

- Forte limitation des déperditions thermiques par renouvellement d'air via une ventilation double flux avec récupération de chaleur sur air vicié ;
- Captation optimale de l'énergie solaire de manière passive ;
- Protections solaires et dispositifs de rafraîchissement passifs ;
- Limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers ;
- Équipement en moyens de captage ou production d'énergie (capteur photovoltaïque, capteur solaire thermique, aérogénérateur, pompe à chaleur sur nappe, freecooling par plancher rayonnant, rafraîchissement adiabatique, sondes géothermiques verticales, etc.)
- Récupération et utilisation optimales des eaux pluviales.
- Épuration naturelle par lagunage.
L'énergie excédentaire peut être fournie aux bâtiments voisins, mais est généralement injectée sur des réseaux électriques ou de chaleur, privés ou publics. [3]

1.4 Concepts des systèmes d'alimentations proposés :

Dans ce qui suit on va présenter les diverse sources et technologies renouvelable utilisées dans ce mémoire , les systèmes de stockage ainsi que les systèmes hybrides.

1.4.1 Production d'énergie électrique à base du photovoltaïque :

Potentiel algérien en énergie solaire :

De la part de sa position géographique, et ses conditions climatiques, l'Algérie dispose d'un grand gisement solaire, l'un des plus grands au monde. Ce qu'on peut bien voir en parlant en chiffres, où la durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures par ans, jusqu'à 3500 heures d'ensoleillement dans le désert algériens, étant ainsi l'endroit le plus ensoleillé au monde.

On estime le total d'énergie reçus à 169 400 TWh/an, soit donc 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. Les figures (1.1) et (1.2) illustrent la répartition d'ensoleille-

ment dans le monde et l'Algérie respectivement.

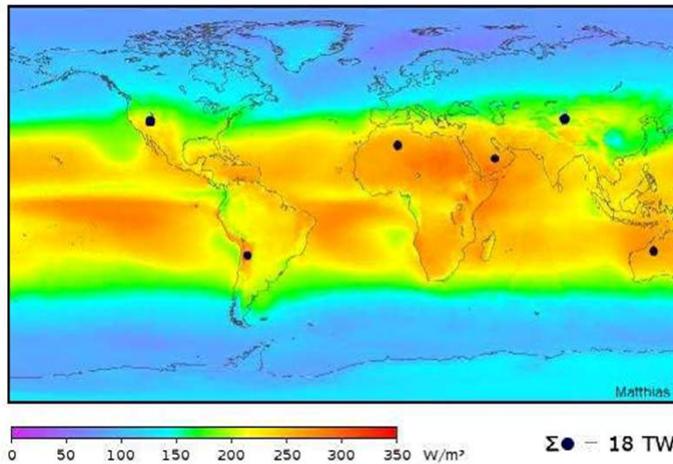


Figure 1.1 – Carte d'ensoleillement mondiale [4]

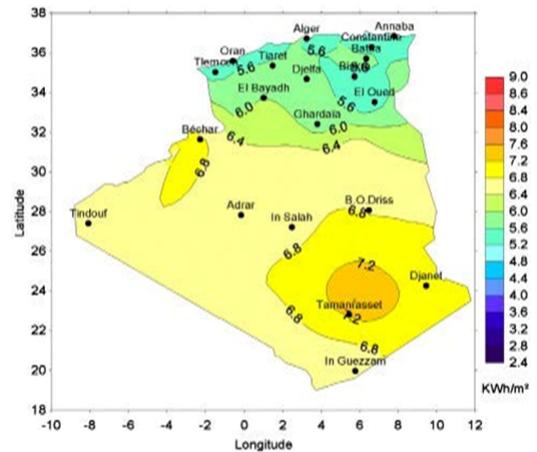


Figure 1.2 – ensoleillement en Algérie [13]

1.4.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque permet de convertir l'énergie des rayons solaires en électricité par le biais de la production d'un transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière.

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien Italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [5,6]. L'effet photovoltaïque, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel et Einstein a expliqué les mécanismes en 1912. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première Cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [6,7], et c'est en 1973 que La première maison alimentée par des cellules PV était construite à l'Université de Delaware aux États-Unis.

La jonction P-N [8,9] :

La jonction P-N est obtenue lors de la mise en contact de deux semi-conducteurs opposés (un dopé P et l'autre dopé N), on remarquera alors que les trous passent de la zone P (majoritaire en trous, minoritaire n électrons) vers la zone N (majoritaire en électrons, minoritaires en trous) laissant leur places aux ions négatifs. Pendant ce temps, les électrons passent de la zone dopé N vers la zone P laissant leur places aux ions positifs. Ces ions,

1.4. CONCEPTS DES SYSTÈMES D'ALIMENTATIONS PROPOSÉS :

centre de charge, donnent naissance à un champ électrique dirigé de N vers P, ce qui crée une barrière de potentiel. Lorsque l'équilibre est atteint le champ électrique devient suffisant pour arrêter la diffusion des majoritaires et des porteurs minoritaires. On a ainsi créé une diode PN.(voir figur 1.3)

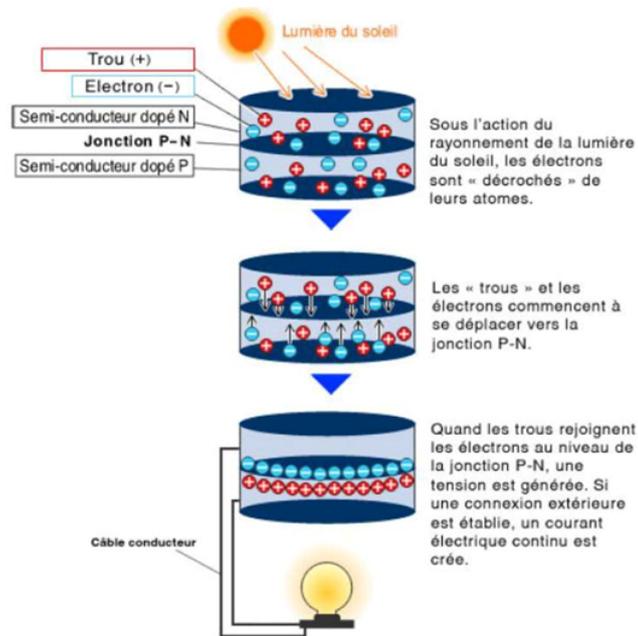


Figure 1.3 – principe de la conversion photovoltaïque

1.4.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque (Figure 1.4), est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (cc), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile [10,11].

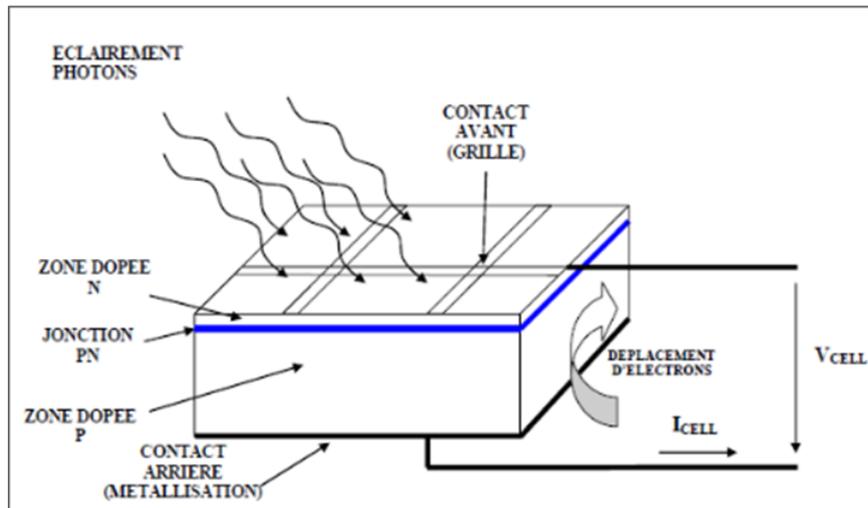


Figure 1.4 – Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV[13]

1.4.4 Les différentes technologies des cellules :

Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques dépendantes des matériaux semi-conducteurs utilisés. On peut distinguer deux grandes familles ; la famille du silicium et la famille non silicium ou composite.

La filière du silicium :

Aujourd'hui près de 99% de la production mondiale en termes de matériaux photovoltaïques font partie de cette famille.

On peut distinguer trois types :

Le silicium monocristallin :

Il représente environ 29% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 17% pour les cellules et de 14,5% pour les modules.

Le silicium poly cristallin :

Il représente environ 62% du marché photovoltaïque mondial, avec un rendement typique (pour les produits commerciaux) autour de 14,5% pour les cellules et de 12,5 pour les modules.

Le silicium amorphe :

Avec une épaisseur plus petite, et un coefficient d'absorption plus grand que les filières présentées ci-dessous, le coût du silicium amorphe est réduit mais avec un rendement (pour

les produits commerciaux) de 8% ce qui le limite aux applications de très petites puissances.

La famille composite :

Cette filière comporte deux catégories distinctes, à savoir les composites monocristallins (GaAs) et polycristallins. Mais deux technologies se sont imposées progressivement, l'une basée sur le tellurure de cadmium (noté CdTe), et l'autre sur les alliages $Cu(In, Ga)Se_2$, (cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelée filière CIS pour les rendements records qu'elles présentent de 16,5% pour CdTe et de près de 20% pour CIS (19,5%).

1.4.5 Générateur photovoltaïque

Constitution d'un générateur photovoltaïque Les cellules photovoltaïques sont généralement connectées en série et/ou en parallèle afin d'augmenter la puissance produite. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [11].

Association en série :

L'association en série des cellules identiques permet d'augmenter la tension proportionnellement au nombre de cellules tout en gardant le même courant de branche.

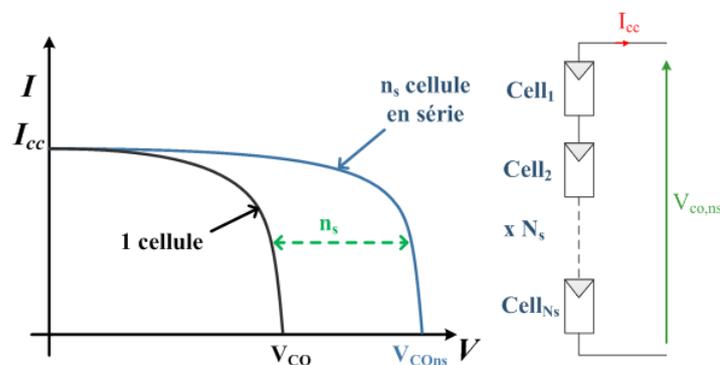


Figure 1.5 – Cellules identiques en série [11]

Association en parallèle :

L'association en parallèle des modules identiques permet d'augmenter l'intensité du courant proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche, tout en gardant la tension de la branche égale à la tension de chaque module.

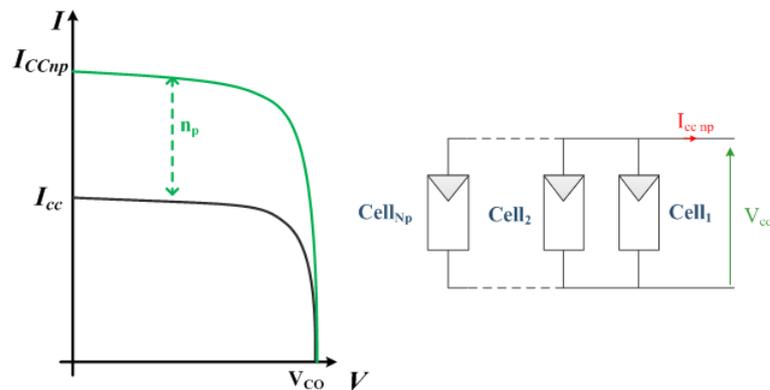


Figure 1.6 – Cellules identiques en parallèles [11]

Association série-parallèle (panneau photovoltaïque)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques uniformément exposés et protégés par les diodes by-pass (voir figure 1.7) [12].

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque[10].

La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectées en série, comme l'illustre la (figure 1.7). Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série (18 cellules pour

1.4. CONCEPTS DES SYSTÈMES D'ALIMENTATIONS PROPOSÉS :

le module PV référencé BP585). Le nombre de cellules de chaque sous-réseau correspond à un compromis économique entre protection et perte d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel d'ombrage.[13]

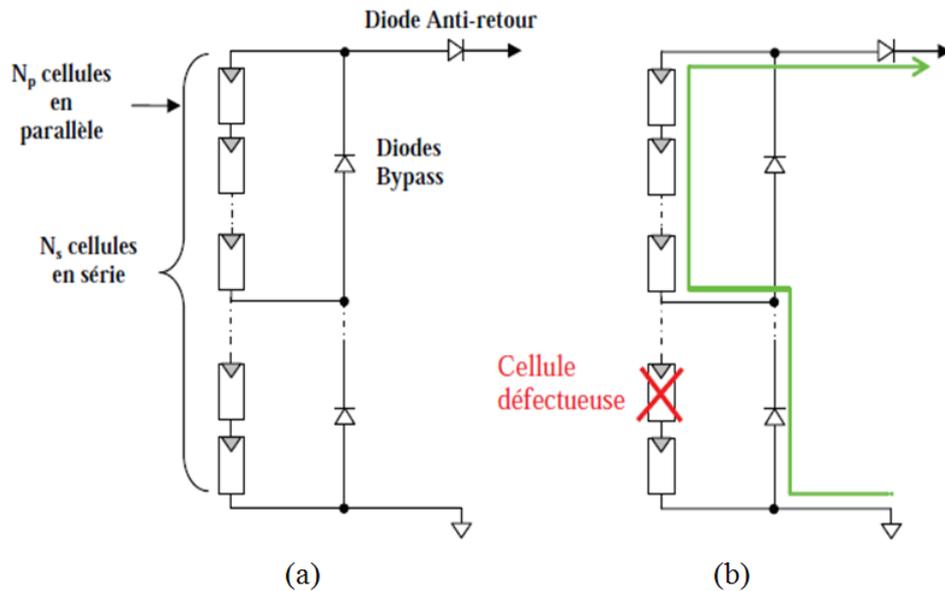


Figure 1.7 – (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection
(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass [9].

1.4.6 Types de systèmes photovoltaïques

En fonction du service et des applications recherchées les systèmes photovoltaïques peuvent être classifiés comme suit :

Autonomes :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des systèmes qui alimentent l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique et sans dépendre d'aucune autre source d'énergie (Figure 1.8) .Dans la majorité des cas, les systèmes autonomes exigent des batteries de stockage [5, 15], ils sont souvent utilisés dans les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne. . . .

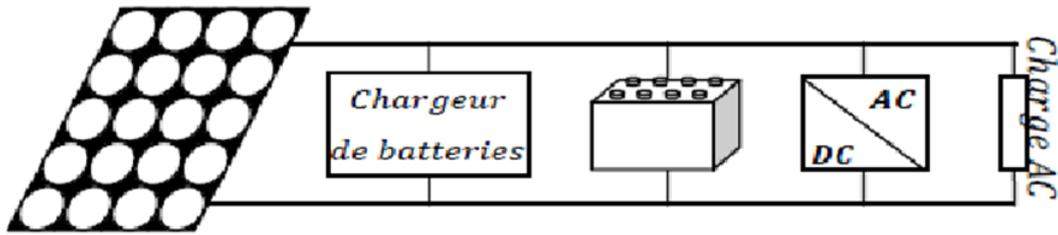


Figure 1.8 – Système photovoltaïque autonome.[6]

Hybride :

L'énergie photovoltaïque peut être ajoutée à d'autres sources d'énergies comme l'éolienne, le diesel... (Figure 1.9), et cela afin de fournir la puissance pendant 24 heures économiquement et efficacement. L'intégration de ces sources d'énergie forme un système énergétique hybride, qui est une excellente option pour assurer la continuité du service électrique et avoir plus d'énergie avec un coup réduit [14, 7].

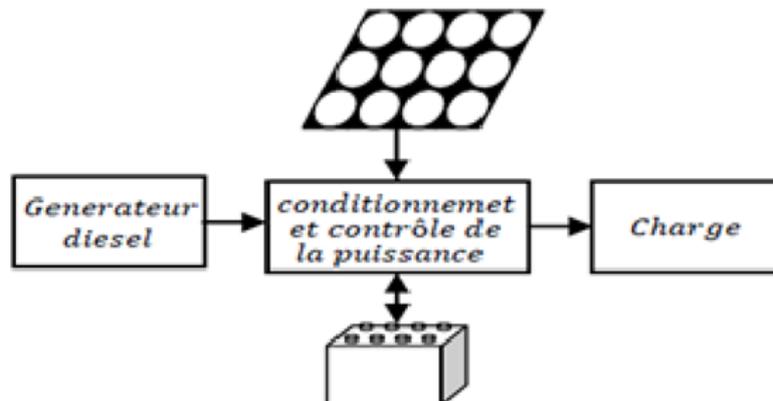


Figure 1.9 – Système photovoltaïque hybride.[6]

Connecté au réseau :

Dans ce cas, des panneaux solaires photovoltaïques sont reliés à un réseau par des convertisseurs électriques (Figure 1.10). Un système PV connecté au réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin. Ces systèmes peuvent être petits, tels que les systèmes résidentiels, ou des grands systèmes cas d'une centrale électrique photovoltaïque [15].

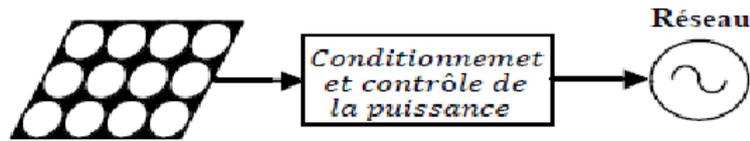


Figure 1.10 – Système photovoltaïque connecté au réseau.[6]

1.4.7 Production électrique par aérogénérateur :

Le mot "éolienne" vient du mot grec "Éole", le dieu des vents. Le terme signifie également "rapide", "vif" ou "inconstant" [16].

a) Historique de l'éolien

L'énergie du vent a été la toute première énergie renouvelable utilisée par l'homme, si on omet l'énergie du bois. Le vent a été utilisé depuis le tout début de la civilisation humaine pour la navigation maritime avec le voilier, puis avec les moulins à vent et les installations permettant le pompage de l'eau.

En creusant dans l'histoire de l'humanité on trouve les premières références à l'utilisation de l'énergie éolienne aux environs de 2 000 ans avant J-C où Hammourabi, fondateur de la puissante Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C.

En arrivant au début de Moyen Age on trouve les traces des premiers moulins à vent en Europe. Ceux-ci ont été, tout d'abord, utilisés pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulin ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher les terrains inondés. L'utilisation de ces moulins c'est ensuite étendue un peu partout en Europe dès le XIV siècle et deviennent ainsi la principale source d'énergie. Vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé à plus de 30.000, rien qu'en Hollande et au Danemark, et en Europe on comptait déjà environ 200.000. Avec l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent à régresser.

En 1888, Charles F Brush a construit une petite éolienne pour alimenter sa demeure. Deux ans après Poul La Cour a développé la première éolienne industrielle, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse, un produit qui donna naissance à l'éolienne LYKKEGARD en 1908. Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les sites isolés. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et la réalisation des éoliennes dans le monde [18].

Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'ap-

plication et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme. Il est estimé à 30.1015 kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.1012 kWh/an pour la part terrestre exploitable. [17].

b) L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient essentiellement des masses d'aires dues indirectement au réchauffement de la terre.

La cherté de certaines ressources ou installations de production d'énergie, classiques ou renouvelables, les problèmes de rendement ont rendu les éoliennes modernes de plus en plus concurrentielles. Elles ne sont plus une technologie expérimentale, mais bien des équipements disponibles dans le commerce. Il est possible d'en installer une seule ou d'en mettre plusieurs ensembles et de former ainsi un parc d'éoliennes.

La densité relativement faible de l'air complique la tâche d'extraction d'énergie, en effet, moins un fluide en mouvement est dense, plus il est difficile d'en extraire de l'énergie utile. En réalité, l'eau est presque mille fois plus dense que l'air, ce qui explique le penchant pour l'énergie hydraulique au détriment de l'énergie éolienne. Il y a eu, néanmoins, des progrès scientifiques importants dans le domaine des éoliennes. Ils ont permis de transformer efficacement le vent en électricité et de rendre «l'énergie éolienne» moderne, presque aussi concurrentielle sur le plan prix que les sources d'électricité traditionnelles.

Cependant, beaucoup de gens croient qu'une éolienne se base essentiellement sur la mécanique et l'aérodynamique. Pourtant, les éoliennes sont aussi et surtout des machines électriques. Les défis techniques et les coûts de réalisation d'une éolienne résident surtout désormais dans le domaine de l'électrotechnique. d'où le nom de "centrale éolienne". En d'autres termes, l'ensemble des composants qui permettent de produire de l'électricité. La "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble.

c) Principe de fonctionnement

Un aérogénérateur, où éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

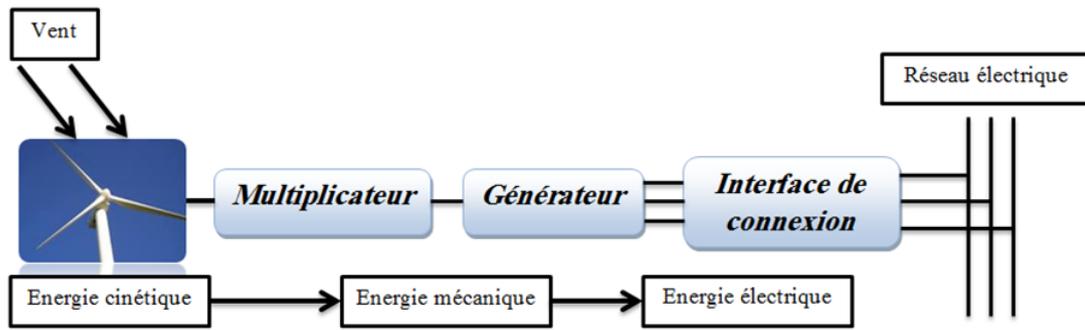


Figure 1.11 – Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie [17]

d) Éléments constitutifs d'une éolienne :

Les éoliennes modernes sont généralement constituées par les éléments suivants :

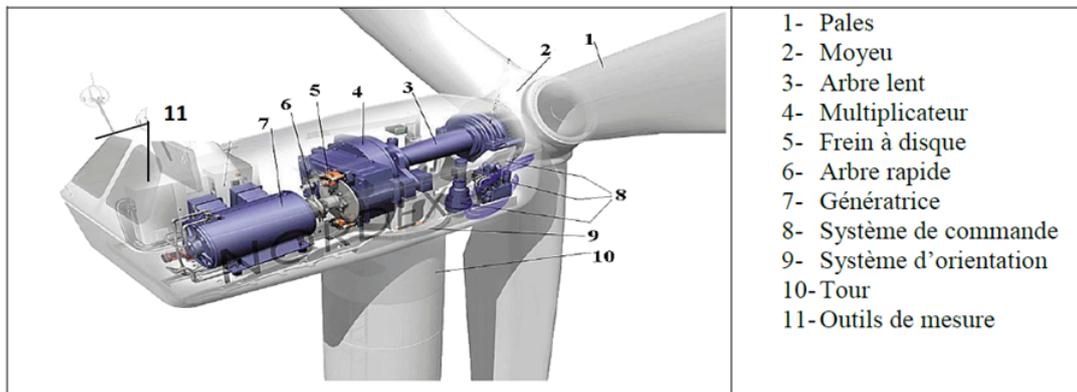


Figure 1.12 – Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 KW) [17]

1) Les pales :

composantes cruciales de l'éolienne, il existe très peu de fabricants dans le monde capables d'en construire. Elles sont tellement longues qu'il faut des convois exceptionnels pour les transporter. De la nature des pales dépendent le bon fonctionnement, la durée de vie et le rendement de l'éolienne. Elles sont faites en fibre de verre et en fibre de carbone, leur profil est étudié en soufflerie, leurs longueur est fonction de la puissance désirée, quant à leurs largeur est également calculée avec grand soin [20].

2) Le moyeu de commande du rotor :

le moyeu permet de faire pivoter les pales pour un meilleur rendement en fonction de la force du vent [20].

Ces deux éléments constituent le rotor.

3) Le mât (le pylône ou la tour) :

nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal [16], il supporte la nacelle, et permet également le passage des câbles et des diverses liaisons de l'éolienne. La plupart des mâts des éoliennes modernes sont des tours tubulaires de forme conique fabriquées en acier. Typiquement, sa longueur est de 50 à 60 m pour des éoliennes de 600 kW à 2 MW, avec un diamètre du rotor de 44 à 72 m, et pèse environ de 40 à 80 de tonnes. Il existe également des tours plus légères, faites de treillis métalliques, elles ont été pratiquement abandonnées par les constructeurs pour des raisons d'esthétique [20].

4) La nacelle :

il s'agit d'une cabine dans laquelle se trouvent : l'arbre lent, le multiplicateur, l'arbre rapide, la génératrice, le frein, un régulateur de vitesse et un capteur de chaleur. Elle se trouve au sommet du mât et soutient le rotor. La nacelle est protégée par un capot en composite renforcé par des fibres de verre. Elle est équipée d'une isolation acoustique épaisse sur les parois intérieures. [20].

5) Le système d'orientation de la nacelle :

la nacelle est montée sur le mât en général par le biais d'un système d'orientation. La rotation de la nacelle a lieu par l'intermédiaire de trois ou quatre motoréducteurs électriques, équipés de freins à disques sur l'arbre rapide. Un couple de frottement permanent permet de maintenir la nacelle à un angle d'orientation constant pour des moments de rotation standards, sans forte turbulence. Dans le cas de rafales de vent ou de turbulences, les moto-freins permettent de stabiliser l'orientation [20].

6) Le multiplicateur de vitesse :

bien des constructeurs aimeraient l'éliminer car il s'agit d'un composant lourd et coûteux se résumant en une grosse boîte d'engrenages, il permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de le coupler à un générateur de série (donc peu cher) qui, lui tourne de 40 à 50 fois plus vite. Dans le cas des éoliennes dites à attaque directe, le multiplicateur

est éliminé [20].

7) Le générateur :

les plus simples et robustes sont des générateurs à induction, mais il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile. On doit essayer de stabiliser la vitesse de ces machines près de leur valeur nominale pour avoir en bout de ligne une fréquence et une tension régulières. Voilà pourquoi certains fabricants installent deux génératrices, l'une exploitant les basses vitesses de vent et l'autre exploite les hautes vitesses [20].

On peut aussi trouver d'autres éléments comme : l'anémomètre et la girouette (Figure 1.13) pour la mesure de la vitesse du vent et pour indiquer sa direction, le paratonnerre pour protéger l'éolienne contre le tonnerre, et autre...

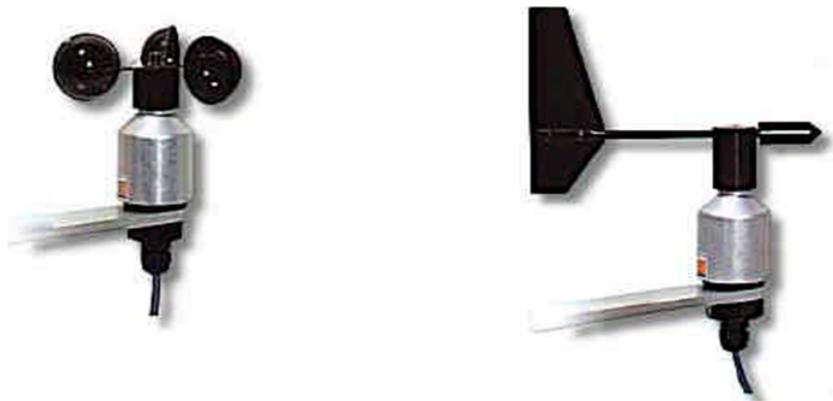


Figure 1.13 – Anémomètre (à gauche), Girouette (à droite) [20]

e) Avantages, limites et inconvénients de l'énergie éolienne :

i-Avantages

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages qui lui sont propres :

- L'énergie éolienne est modulaire, ce qui permet de maintenir en fonctionnement la plus grande partie de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse.
- Les frais de fonctionnement sont limités en comparant avec le haut niveau de fiabilité

1.4. CONCEPTS DES SYSTÈMES D'ALIMENTATIONS PROPOSÉS :

et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.

- Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

ii.Limites

La production d'énergie a lieu en fonction du vent et non de la demande. Dans le cas d'installations autonomes, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou un groupe électrogène, ce qui augmente le coût. Dans le cas d'un couplage au réseau, les éoliennes ne pourront représenter qu'un pourcentage réduit des centrales classiques [20].

iii.Inconvénients :

Quand la puissance fournie par les éoliennes est inférieure à la capacité de la charge du réseau, il faut une source de puissance complémentaire. Dans le cas contraire, il faut l'intervention d'un système de régulation de façon à maintenir constantes la fréquence et la tension. La complexité de résoudre ces contraintes techniques a amené la plupart des entreprises à négliger l'énergie éolienne pour les petits réseaux.

f) Typologie des éoliennes

On peut distinguer plusieurs types d'éolienne classés soit selon la vitesse ou selon l'axe de rotation.

i. Selon l'axe de rotation

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (Walker et al, 1997).



Figure 1.14 – éolienne à axe horizontal

Figure 1.15 – éolienne à axe vertical

1. éolienne à axe horizontal :

Ces éoliennes sont similaires à celles qu'on rencontre actuellement sur les fermes éoliennes. Elles sont caractérisées par des hélices perpendiculaires au vent, montrées sur un mât. La hauteur varie de 5 à 20 m pour les petites éoliennes avec un diamètre de 2 à 10 m, et supérieure au double de la longueur d'une pale pour les éoliennes à grande puissance [16][21]. Elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevée, et démarrent d'une façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [16][21].

2. Eolienne à axe vertical :

Ce type d'éolienne a été conçu pour mieux s'adapter avec les contraintes engendrées par les turbulences au milieu urbain. Avec un design qui leur permet de fonctionner quelle que soit la direction du vent, elles sont moins soumises aux perturbations que celles à axe horizontal.

Elles présentent plusieurs avantages dont on peut citer le fait de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, elles sont relativement silencieuses, et peuvent être intégrées avec le design des bâtiment.

Or, tout ça n'empêche de signaler quelques inconvénients, où certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques, ajoutant à cela le cout d'investissement, poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [16][21].

En général on préfère les éoliennes à axe vertical à l'horizontal dans les milieux urbains, où les turbulences ne peuvent être évitées.

Les figures ci-dessous, représentent deux modèles d'éolienne à axe vertical.



Figure 1.16 – Source : Eolienne de type Darrieus (WindWall)



Figure 1.17 – Source : Eolienne de type Savonius (WindSide)

ii. Selon la vitesse

1. Éolienne à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe (Figure 1.18) sont les premières à être développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est directement couplée au réseau. Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau (50 Hz) et le nombre de paires de pôles de la génératrice. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation des pales. Ce système est simple et moins coûteux [16].

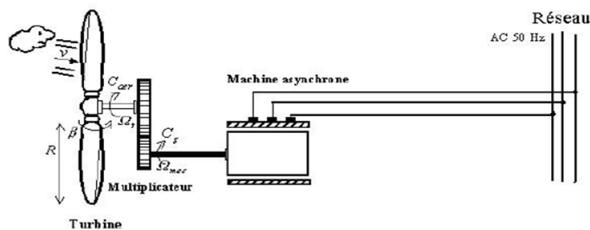


Figure 1.18 – éolienne directement connectée au réseau. [16]

2. éolienne à vitesse variable :

Dans ce type d'éolienne, il existe deux structures possibles :

Structure basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à faire fonctionner la machine à vitesse variable par des convertisseurs statiques.

Structure basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (Figure 1.19). La variation de la vitesse est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situés au niveau du circuit rotorique.

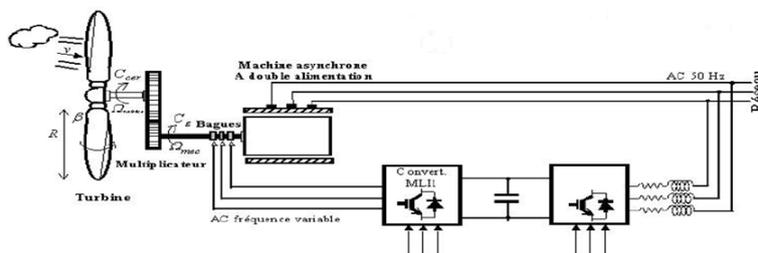


Figure 1.19 – éolienne à vitesse variable basée sur la MADA [16]

1.5 Chaines de conversion électromagnétique :

Quand on parle de production d'électricité par aérogénérateur, on parle en général de chaînes de production. Celles-ci peuvent être différentes selon la puissance fournie, selon la vitesse ou encore par leur fonctionnement couplé ou non au réseau.

Dans ce qui suit nous allons nous baser plutôt sur les systèmes couplés au réseau, ce qui concorde avec notre cas d'étude.

1.5.1 Génératrices asynchrones à cage :

Ces génératrices sont utilisées dans les systèmes de production à grandes puissances reliés au réseau électrique vue leur faible cout, et ne nécessitant qu'une simple installation.

Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive ainsi qu'un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistance pour limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion réseau.

Pour les grandes puissances d'où une grande dimension, la vitesse de rotation est relativement faible ce qui nécessite d'insérer un multiplicateur de vitesse (voir figure (1.20)) On peut aussi

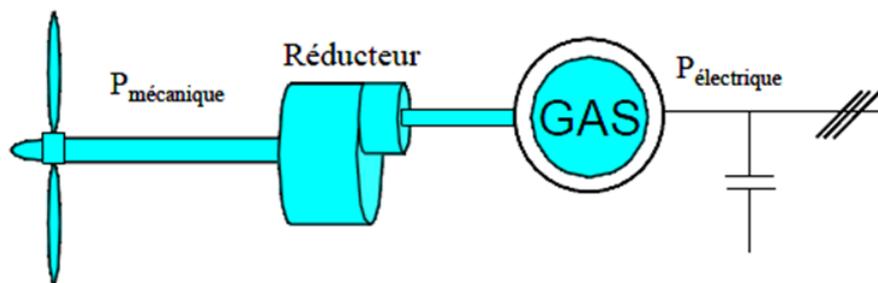


Figure 1.20 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)[21]

trouver d'autres structures utilisant un variateur de fréquence, mais ça reste relativement couteux. (Voir figure 1.21)[21]

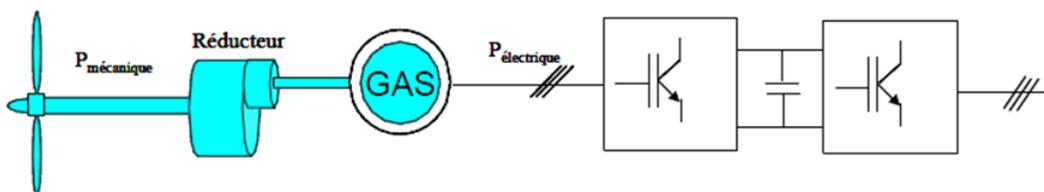


Figure 1.21 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[21]

1.5.2 Génératrices synchrones :

Ce type de génératrices est utilisé surtout dans le cas des entrainements directs (sans multiplicateur mécanique). Leur fréquence étant incompatible avec le réseau, elles nécessitent un convertisseur de fréquence. C'est pourquoi les machines à entrainement direct sont à vitesse variable.

L'inducteur (rotor) est bobiné nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

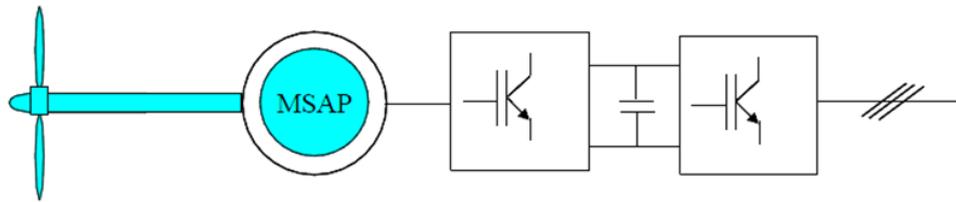


Figure 1.22 – Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [21]

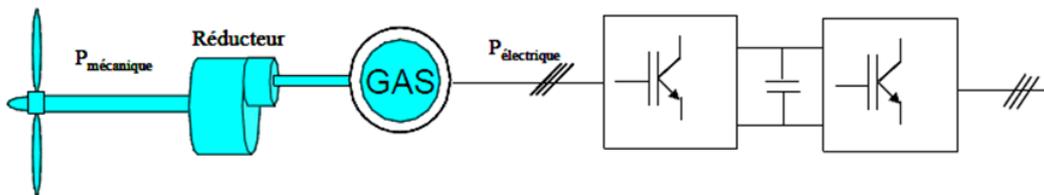


Figure 1.23 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[21]

1.5.3 La Machine Asynchrone à Double Alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge.

Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : Elle se compose comme la machine asynchrone d'un stator fixe comportant trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimentés par un système triphasé de tension et fréquence fixes, et d'un rotor de forme cylindrique qui est mobile contenant un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasée, et p est le nombre de paire de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator [20][21].

Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même

nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse $\Omega_r = \frac{d\Theta_r}{dt}$ par rapport au stator, avec Θ_r l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

a) Structure des machines asynchrones à double alimentation

Comme dans les machines asynchrones classiques la machine asynchrone à double alimentation présente un stator triphasé identique constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements, son rotor est constitué de bobinages triphasés connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure 1.24).

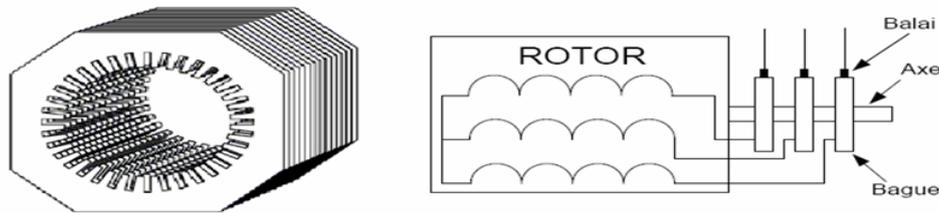


Figure 1.24 – Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA[17]

b) Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation

Avant d'entamer l'explication du principe de fonctionnement on pose que toute perte est négligeable.

De là, la puissance P_s est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie $(1 - g)P_s$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP_s sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf_r . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elles sont renvoyées, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur.

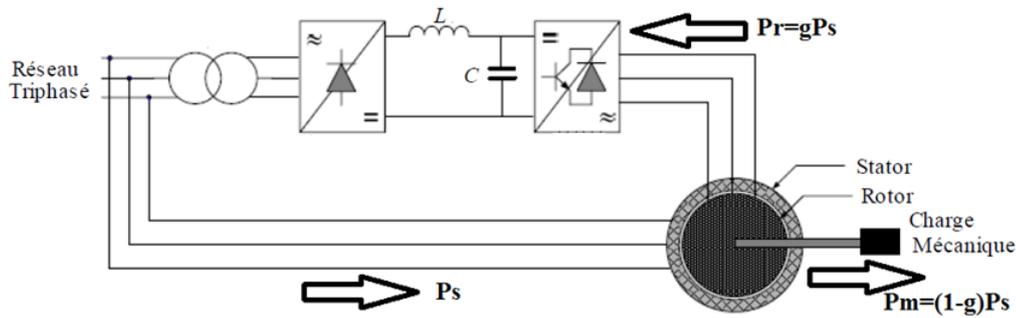


Figure 1.25 – Schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation [19]

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor.

On trouve ainsi la relation suivante entre les F.E.M créées au rotor et au stator :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \left(\frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \right) \quad (1.1)$$

ou :

N_r et N_s : représentent respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.

ω_s et ω : Sont respectivement les pulsations statorique et mécanique de la machine.

En définissant le glissement comme suit :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (1.2)$$

Alors l'équation (1.1) devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} g \quad (1.3)$$

On définit les courants au stator I_s et au rotor comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (1.4)$$

Donc, le rapport entre la puissance P_r au rotor et la puissance P_s au stator devient :

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{I_r E_r}{I_s E_s} = g \quad (1.5)$$

c) Avantages et inconvénients de la MADA

i-Avantages

- Possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Possibilité de fonctionner en régime dégradé, à cause de la double alimentation.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [19].

ii- Inconvénients

- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Machine plus volumineuse que celle à cage, à cause des balais.

d) Fonctionnement de la MADA à vitesse variable

Les figures (1.26) et (1.27) ci-dessous montrent les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor, quant à lui, est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, où : P_s représente la puissance statorique, P_r la puissance rotorique et P_m la puissance mécanique

i-Cas moteur : Fonctionnement Hyposynchrone ($g > 0$) et Hypersynchrone ($g < 0$)
Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone (Figure 1.26). En mode moteur hypersynchrone (Figure 1.27), une partie de la puissance absorbée par le réseau va au

rotor et est convertie en puissance mécanique.

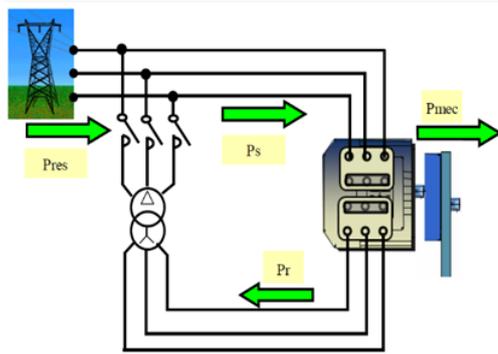


Figure 1.26 – Fonctionnement Hyposynchrone

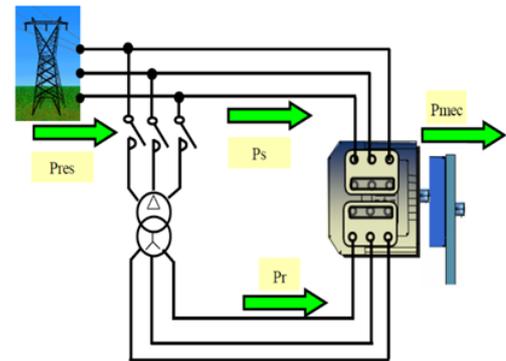


Figure 1.27 – fonctionnement Hypersynchrone

ii-Cas Génératrice : Fonctionnement Hyposynchrone ($g > 0$) et Hypersynchrone ($g < 0$) En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hyposynchrone, (Figure 1.28) une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hypersynchrone (Figure 1.29), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à gP_m est transmise par l'intermédiaire du rotor [19].

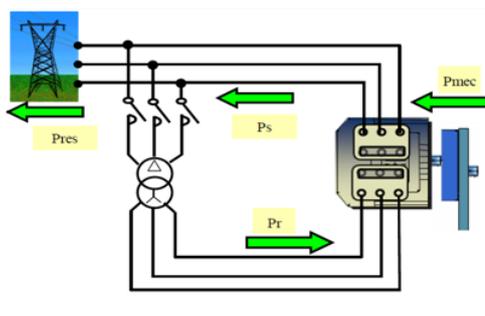


Figure 1.28 – Fonctionnement Hyposynchrone

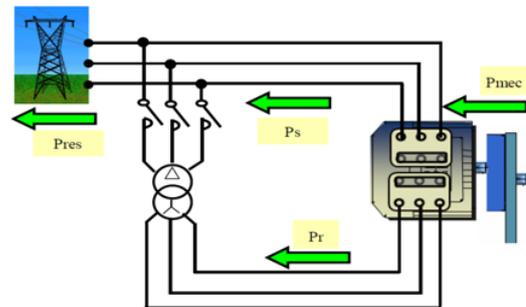


Figure 1.29 – fonctionnement Hypersynchrone

1.6 Convertisseurs électriques :

Dans un système hybride, des convertisseurs sont utilisés pour optimiser et stabiliser l'énergie, charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans un tel système : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs [22].

1.6.1 Les redresseurs (convertisseur AC/DC)

Les redresseurs réalisent la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [14].

Suivant la possibilité d'ajuster la tension de sortie, deux grandes familles de redresseurs peuvent être distinguées :

- Les redresseurs non commandés, ou redresseurs à diodes, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie.

De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

- Les redresseurs commandés, ou redresseurs à thyristors, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes [14]. Dans le SEH, les redresseurs sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source alternative. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement [23,22].

1.6.2 Les onduleurs (convertisseur DC/AC)

Les onduleurs réalisent la conversion continu-alternatif ; ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à AC ou en parallèle avec des sources à AC. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à AC pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers [22].

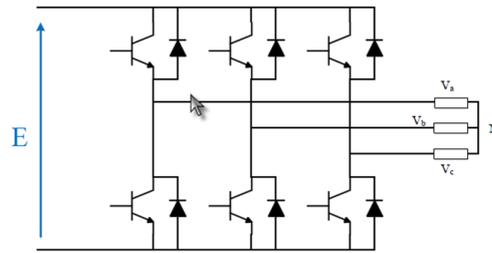


Figure 1.30 – Onduleur triphasé de tension

1.6.3 Les hacheurs (convertisseur DC/DC)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe [14], par exemple, pour adapter la tension entre deux sources [22]. Dans ce type de convertisseurs, on peut faire une distinction entre les hacheurs réversibles et les hacheurs non réversibles :

1. Les hacheurs non réversibles : sont ceux qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge. On distingue :

- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.
- Les éleveurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), qui assure les deux fonctions.

2. Les hacheurs réversibles : dans ce cas une source peut devenir une charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Selon le type de conversion, tension ou courant, on distingue :

- Les hacheurs réversibles en courant
- Les hacheurs réversibles en tension
- Et les hacheurs réversibles en tension et en courant.

1.7 Éléments de stockage d'énergie électrique :

On peut toujours penser à intégrer des systèmes de stockage afin d'assurer une alimentation permanente et ainsi répondre à la demande dynamique en matière d'électricité, car on ne peut en aucun cas écarter la possibilité de rencontrer des problèmes dans le réseau de distribution ou dans le système de production, ou encore les deux, une situation qui en un sens peu probable mais tout à fait possible.

On peut distinguer plusieurs méthodes de stockage d'énergie, en plus courants, les systèmes électrochimiques, là on parle bien de batteries, ou encore des super condensateurs, ou on peut bien choisir une solution plus intéressante, mais qui reste encore à étudier et à développer les piles à combustible.

1.7.1 Par voie électrochimique

a. Les batteries :

Le mode de stockage d'énergie électrique privilégié actuellement dans notre vie courante reste l'accumulateur. Qu'il s'agisse de téléphones portables ou de voitures, les batteries sont très largement répandues. La technologie est basée sur le concept chimique de pile : on accumule de l'énergie chimique. Fondamentalement, l'élément de base d'une batterie est composé de deux électrodes, jouant les rôles d'anode et cathode, ainsi que d'un électrolyte, en contact avec les électrodes, permettant la circulation des ions, et donc la création d'un courant [24][25].

Parmi les nombreuses filières actuellement développées [24][10] :

- Les batteries au plomb, utilisées couramment pour alimenter des installations ne pouvant supporter des coupures d'alimentation électrique (installation photovoltaïques ou hybrides des sites isolées) ;
- Les batteries au nickel-cadmium, largement utilisées sur tous les véhicules électriques. Cependant, le principal défaut de cette filière réside dans l'utilisation de Cadmium, qui est un métal lourd.
- Toutes les filières dérivées des batteries au lithium : lithium-ion, lithium polymères, lithium-métal-polymères. . . etc.

b. Les accumulateurs à circulation :

Ceux-ci fonctionnent sur le même principe que les piles précédemment présentées, à ceci près que l'électrolyte est circulant, et donc, qu'il n'y a pas création de composés solides. Les composés chimiques responsables du stockage sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. De plus, cette technologie ne nécessite pas de substances très toxiques ou très réactives [26][10].

c. La pile à combustible :

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le même que celui d'une pile traditionnelle, En effet, quand l'intérêt pour la pile à combustible s'est réveillé vers la fin des années 1980, les développements ont porté bien davantage sur la pile que sur le combustible. Aujourd'hui, du fait des progrès technologiques obtenus sur la pile, force est de constater qu'un déséquilibre inverse est apparu et que l'on est moins avancé sur le combustible que sur la pile [27][10].

1.7.2 Par voie électrostatique

Le principe de base d'un supercondensateur est le suivant : un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) est placé entre deux électrodes conductrices à très grande surface spécifique, c'est-à-dire à très grande surface de contact entre l'électrode et l'électrolyte. En général, les matériaux utilisés pour les électrodes sont des grains de carbone (charbon activé, fibres de carbone, aérogels de carbone...) ou des polymères conducteurs qui ont des surfaces spécifiques pouvant atteindre plusieurs milliers de m² par gramme de matière.

Lorsqu'on applique un champ électrique entre les électrodes, des ions positifs et négatifs se déplacent dans l'électrolyte et forment à la surface de chaque électrode une couche de charges électriques, appelée double couche (voir figure 1.31). Comme cette surface est très grande, la quantité de charges accumulées est bien plus importante que dans le cas de condensateurs classiques. L'énergie volumique stockée est d'ailleurs comprise entre 1 et 10 $\frac{kWh}{m^3}$, entre 0,1 à 1 $\frac{kWh}{m^3}$ pour les condensateurs ou hypercondensateurs [26]. Comme il n'y a pas de réaction chimique à la surface des électrodes, la longévité (ou cyclabilité) est beaucoup plus élevée ici (100 000 à 500 000 cycles de charge/décharge) que pour la voie électrochimique étudiée précédemment (300 à 1500 cycles). Cependant, pour obtenir des systèmes exploitables, il faut mettre en série un grand nombre de cellules pour aboutir à une tension de stockage élevée [13][23].

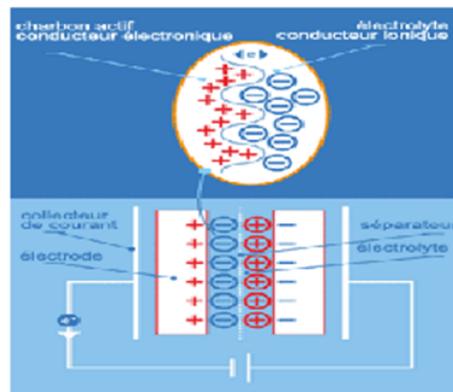


Figure 1.31 – Principe d'un supercondensateur [10]

1.7.3 Par voie électromagnétique

Un des supports de la filière de stockage électromagnétique est la bobine supraconductrice. Le principe de fonctionnement est assez simple : un courant parcourant un bobinage engendre un champ magnétique, auquel est associée une énergie magnétique, fonction de l'inductance de la bobine et du volume magnétisé [27]. La particularité de cette bobine est qu'elle a une résistance nulle au-dessous d'une certaine température critique, caractéristique du matériau. En conséquence, si le bobinage est fermé, le courant se maintient et il n'y a

pas de dissipation d'énergie par effet Joule : celle-ci reste stockée sous forme magnétique.

Il existe deux catégories de supraconducteurs [28][27] :

- Basse température : cette technique met en jeu des conducteurs fonctionnant à 4K, en présence d'un champ magnétique de 5T .
- Haute température : celle-ci a connu un développement très récent. Les matériaux mis en jeu sont utilisables sous 10T, à des températures variant de 20 à 30K[28].

1.7.4 Par voie mécanique

a. Le stockage sous forme d'énergie gravitaire :

Ce type de stockage existe principalement à l'heure actuelle sous la forme de Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ces stations permettent de pomper et de turbiner de façon cyclique la même eau entre un bassin supérieur et un bassin inférieur [27]. En général, on pompe en utilisant l'électricité bon marché des heures creuses (comme par exemple la nuit en été), et on turbine pour produire de l'électricité d'une valeur plus élevée aux heures de pointe[10].

b. Le stockage sous forme de pression :

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des nappes aquifères, des cavernes ou des cavités salines souterraines, le poids des terrains au dessus permettant de résister à la pression de l'air. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel ou de fioul, puis détendu dans une turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée (voir figure 1.32)[12][27].

c. Le volant d'inertie :

Les volants d'inertie ont été employés historiquement dans les transports en commun. Leur principe de fonctionnement est le suivant : un disque ou un cylindre tournant est accéléré par un *moteur/générateur* électrique, lorsque l'on désire stocker de l'énergie électrique et freiné par ce même *moteur/générateur* (fonctionnant dans ce cas en générateur), lorsque l'on désire récupérer l'énergie stockée. Les frottements devant être limités le plus possible, le volant est placé dans une enceinte sous vide et sur des paliers à suspension magnétique. La durée de vie du système est quasi illimitée ($> 10000cycles$). L'absence de lubrifiant permet aussi de travailler dans des gammes de températures et de pression assez larges [28].

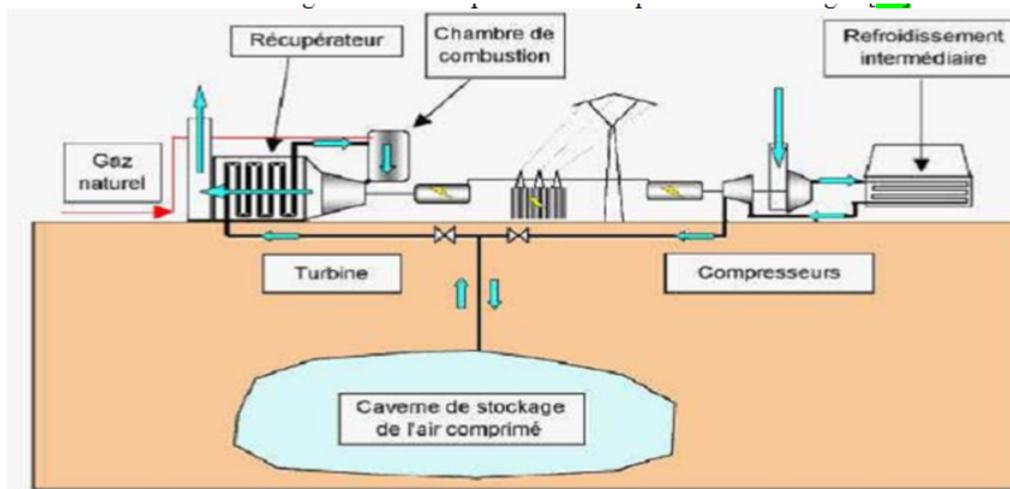


Figure 1.32 – schéma de principe d'une installation de stockage d'air comprimé [27]

1.8 Etude des systèmes d'énergie hybride

Nul ne peut nier le fait que les technologies renouvelables de production d'énergie gagnent de plus en plus de terrain et s'imposent ainsi comme une alternative prometteuse de production d'énergie, économique et propre et ce avec la croissance économique importante que connaît notre monde aujourd'hui. Et encore, les systèmes de génération éolien et photovoltaïque sont les plus prometteurs parmi les technologies de production d'énergie renouvelables, par leurs nombreux avantages, or ça n'empêche de souligner quelques inconvénients, surtout quant à la disponibilité des ressources. Ce qui nous introduit donc aux systèmes hybrides qui sont utilisés pour surmonter l'intermittence, l'incertitude, et la faible disponibilité de chaque source d'énergie renouvelable, ce qui rend le système plus fiable.

Les systèmes d'énergie hybride (éolien – photovoltaïque) bien adaptés à une production connectée au réseau ou bien décentralisée peuvent contribuer à résoudre plusieurs problèmes d'approvisionnement énergétique. Ainsi, ils peuvent aussi trouver leurs applications dans les installations de télécommunications et de surveillance militaire [29][30].

Ces dernières années, le système d'énergie hybride a connu des nouveaux développements pour ce qui concerne les méthodes de gestion de la production, ainsi que l'optimisation du dimensionnement par des logiciels spécialisés (HOMER, SOMES, RAPSIM...).

1.8.1 Classification des systèmes d'énergie hybride

Les systèmes d'énergie hybride sont classifiés suivant plusieurs critères. Cependant, nous avons choisi les classifications les plus courantes [30][31].

a-Le régime du fonctionnement

On peut trouver deux principaux groupes des systèmes d'énergie hybride

- Les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau électrique. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.
- Les systèmes hybrides groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique.

b) Le contenu du système d'énergie hybride

Dans ce classement en fonction du contenu du système, trois critères peuvent être pris en compte.

- la présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle. Cette dernière peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz. . . etc.
- La présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité.
- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un générateur hydraulique, ou bien une combinaison de plusieurs sources renouvelables. Le choix des sources se base sur une analyse technique et économique. Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la figure 1.33.

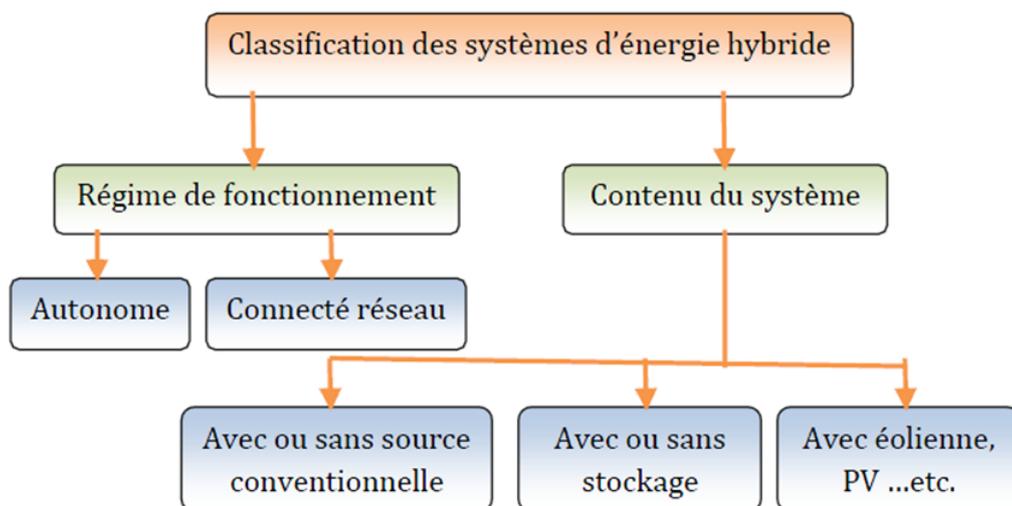


Figure 1.33 – Classification des systèmes d'énergie hybride [10]

1.8.2 Description du système d'énergie hybride

Le système d'énergie hybride contient principalement deux bus : 1) Bus à DC pour les sources et les charges à DC et les batteries. 2) Bus à AC pour les générateurs à AC et les systèmes de distributions. L'interconnexion entre les deux bus est réalisée à l'aide des convertisseurs de l'électronique de puissance [25][30][32].

Les systèmes d'énergie hybride autonome associent en général deux technologies complémentaires, une ou plusieurs sources d'énergies classiques (générateur diesel) avec au moins une source d'énergie renouvelable (figure 1.33). Cette dernière comme l'éolienne ou le photovoltaïque ne délivre pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet une production électrique non interrompue [29].

Dans la plupart des systèmes hybrides on trouve un système de stockage, en général des batteries d'accumulateurs (figure 1.34). L'utilisation de l'hydrogène permet d'avoir une autonomie beaucoup plus importante. Mais reste toujours l'inconvénient de la capacité de stockage limitée, ainsi que leur coût élevé. Pour cela, on cherche à minimiser le recours au stockage, et c'est l'un des objectifs d'utilisation des systèmes d'énergie hybride [33][32].

En général Il y a trois aspects principaux à étudier pour un système d'énergie hybride :

- La configuration du système d'énergie hybride qui résulte d'un dimensionnement en fonction des ressources disponibles, ainsi que les contraintes d'utilisations.
- La maximisation de l'utilisation des ressources renouvelables.
- La qualité de l'énergie électrique fournie à l'utilisateur.

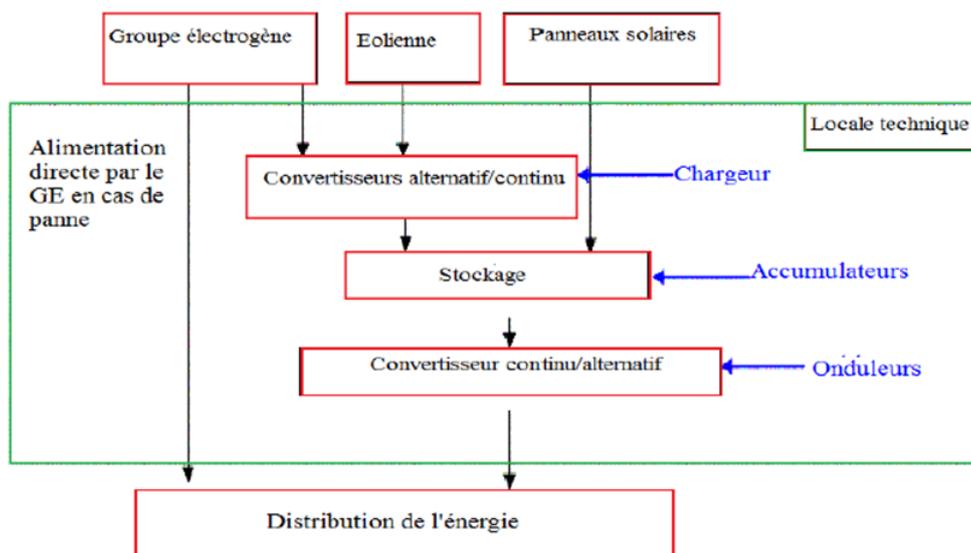


Figure 1.34 – Synoptique d'un système d'énergie hybride avec groupe électrogène [29].

1.8.3 Configurations des systèmes d'énergie hybride

Pour le système d'énergie hybride, il y a deux principales configurations : architecteur à bus CC et architecture mixte à bus CC-CA [32][30].

a) Architecture à bus CC

Dans ce cas la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus CC (figure 1.35). Ainsi les systèmes de production à CA utilisent des redresseurs. Le système de commande est relativement simple, ce qui constitue le grand avantage pour d'une telle architecture [32]. Les désavantages sont principalement le rendement faible à cause de la batterie, et des pertes dans les convertisseurs de puissance.

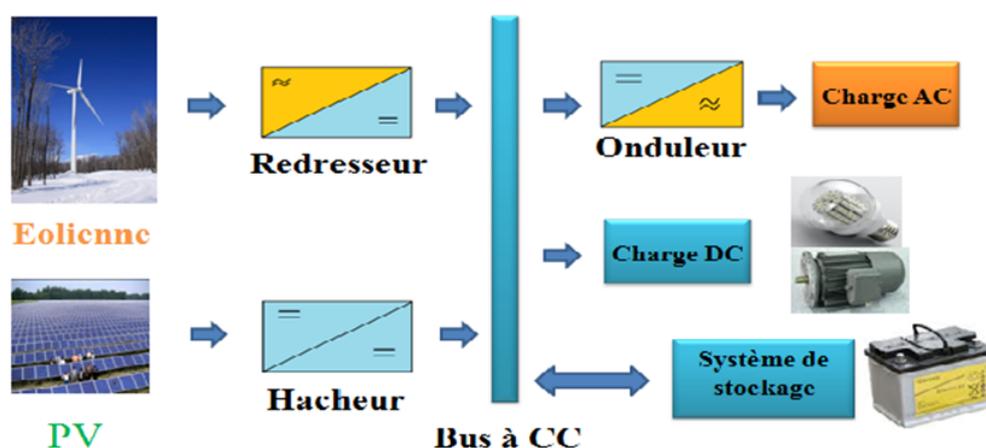


Figure 1.35 – Configuration de SEH à bus CC[10]

b) Architecture mixte à bus CC/CA :

Cette architecture a des performances plus supérieures par rapport à la configuration à bus CC [32]. En effet, dans ce cas l'éolienne peut alimenter directement la charge CA ce qui permet d'augmenter le rendement du système. Quand il y a un surplus d'énergie les batteries se chargent (voir figure 1.36) [30]. Pour les convertisseurs, on peut avoir un seul bidirectionnel entre les deux bus CC/CA qui remplace les deux précédents convertisseurs CC/CA unidirectionnels.

1.8.4 Commande des systèmes d'énergie hybride

Le but de cette commande est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge malgré les grandes fluctuations des sources.

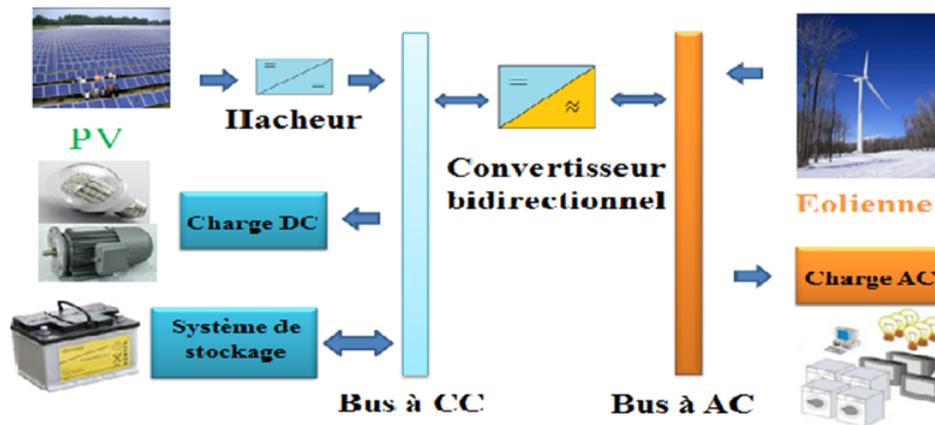


Figure 1.36 – Architecture mixte d'un système hybride [10]

Stratégie de fonctionnement :

C'est un algorithme qui permet de gérer le flux d'énergie dans les différents composants du système pendant une période importante. Selon le profil de charge et les caractéristiques propres du système, ainsi que les exigences sur la qualité de l'énergie voulue [34]. Le fonctionnement d'un système d'énergie hybride dépend des paramètres suivants :

- Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics les creux. . .

Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, l'écart type, les fréquences des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes, les variations saisonnières. . . etc.

- La configuration du système : le nombre et les types de composants.
- Les normes de la qualité d'énergie. Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces pour des applications particulières.

Gestion du stockage

Les deux principales stratégies de gestion de stockage sont [31][35] :

- La stratégie de stockage à court-terme "Peack Shaving Strategy" (par exemple par des supercondensateurs), elle permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou la charge.
- La stratégie à long terme "Cycle Charge Strategy" (par exemple par des batteries) est utilisée pour alimenter la charge sur une longue durée, elle permet aussi d'améliorer l'équilibre énergétique.

Gestion des charges :

Elle peut être aussi à court terme ou à long terme, les charges sont connectées ou déconnectées par ordre de priorité (figure 1.37).

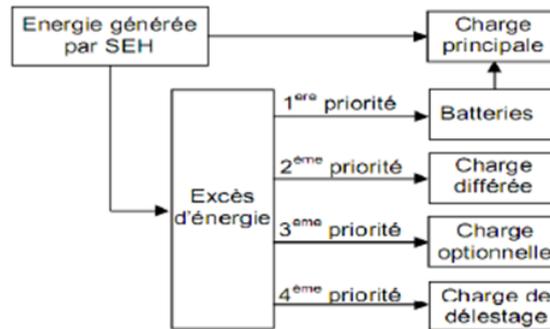


Figure 1.37 – Exemple de gestion des charges selon les priorités [34]

1.9 Système hybride étudié

La figure (1.38) montre l'architecture du système hybride adopté dans ce mémoire. Les sources principales sont les générateurs éoliens (à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA) et photovoltaïque, tandis que le système de stockage par batteries joue un rôle essentiel dans la qualité et la disponibilité d'énergie.

Le réseau électrique travaille comme une source secondaire de soutien. Le système est projeté vers des applications résidentielles.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les ressources d'énergies renouvelables ; l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, , aussi le concept de l'électricité à partir du photovoltaïque et du vent. A la fin, nous avons présenté quelques systèmes hybrides et plus particulièrement le système hybride éolien photovoltaïque à étudier.

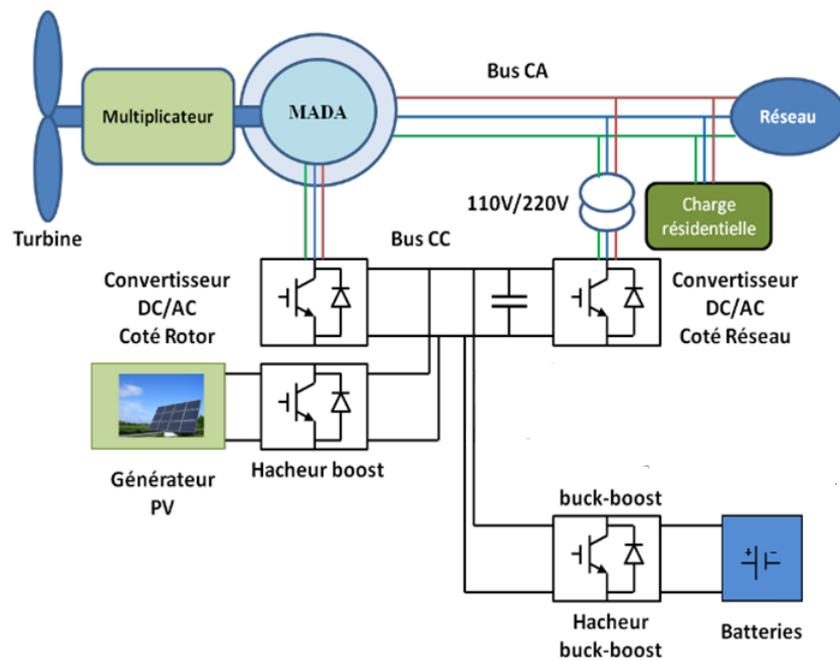


Figure 1.38 – Schéma globale du système hybride étudié. [10]

Chapitre 2

Modélisation, commande et simulation de la chaîne photovoltaïque

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la modélisation, la simulation et la commande de la partie photovoltaïque de notre système d'alimentation.

On peut trouver plusieurs modèles décrivant le fonctionnement et le comportement d'une cellule photovoltaïque dans la littérature, et ce sous différentes conditions de fonctionnement. Ces modèles diffèrent entre eux dans la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la caractéristique tension-courant.

Une fois que le système est modélisé, on passera donc à l'application de la commande en mode glissant et Lyapunov pour l'optimiser.

2.2 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

2.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque :

Pour notre étude, on utilisera le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à jonction PN, illustré par la figure (2.1). Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, associé à une diode en parallèle pour les phénomènes de polarisation de la cellule, on trouve aussi deux résistances, une en série et une en parallèle pour modéliser les défauts de la cellule (les pertes) [36].

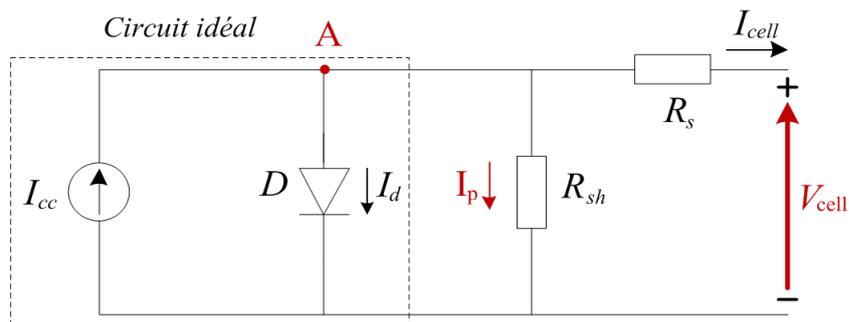


Figure 2.1 – Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque[49]

Où :

I_{cc} : courant modélisant le flux incident, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_d : Courant inverse de la diode

I_p : Courant fourni par la cellule

R_s : Résistance série (pertes ohmiques du matériau et des contacts)

R_{sh} : Résistance shunt (admittance du générateur courant)

V_{cell} : Tension aux bornes de la cellule.

Maintenant nous allons nous intéresser à chaque élément à part.

a-La résistance série

Une des limitations principales du modèle vient des pertes résistives séries qui sont présentes dans une cellule solaire en pratique. En effet, le courant produit au niveau de la cellule solaire se déplace aux contacts par le matériel semi-conducteur résistif. C'est pratique à supposer que les pertes séries peuvent être représentées par une résistance R_s appelée la résistance série de la cellule solaire [37].

b-La résistance shunt

Le passage du courant entre les cellules se fait le long des frontières des cellules, en présence des résistances de contacts. Ceci est représenté généralement par une résistance R_{sh} appelée la résistance shunt, en parallèle avec le dispositif [37].

c-La non-idéalité de diode :

Dans la pratique, peu de dispositifs montrent une caractéristique $I(V)$ totalement idéale (avec un coefficient d'idéalité égale à l'unité). Pour cette raison il est courant d'ajouter également un paramètre n compris entre 1 et 2 (coefficient d'idéalité) pour expliquer la non idéalité de la diode [37].

Pour pouvoir élaborer le modèle du panneau PV, on utilise des équations de base tirées de la théorie des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [38] :

a-Le photo-courant I_{ph} :

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et dépend également de la température ainsi que les paramètres du panneau solaire, selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.1)$$

Avec :

I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur)

K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau

T [K] : Température ambiante

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K)

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²)

b-Le courant de saturation I_0 :

Ce courant varie avec la température et est donné par l'équation :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.2)$$

Avec :

E_g : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25C)[eV]

I_{rs} : Courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)[A]

A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$)

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K-1)

Q : Charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

c-Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs} :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s AKT}\right) - 1} \quad (2.3)$$

Où :

V_{oc} [V] Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)

N_s Nombre de cellules connectées en série

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

2.2.2 Modèle du générateur photovoltaïque :

2.2.3 Constitution d'un générateur photovoltaïque :

Etant donné que la plupart des applications domestiques et industrielles demandent plus de puissance que celle délivrée par une cellule élémentaire, considérée de très faible puissance

(délivrant à peine quelques watts pour une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés sous une tension inférieure au volt), plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque, pour ainsi produire plus de puissance.

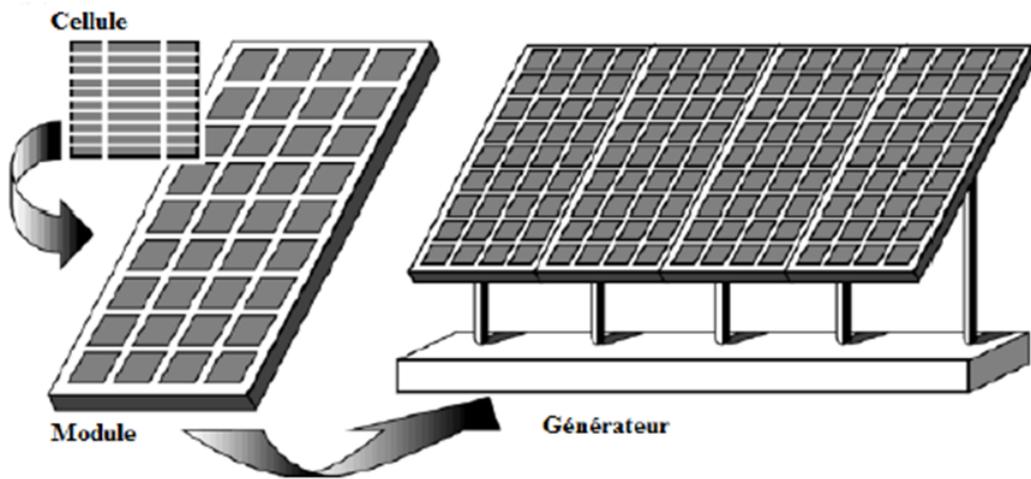


Figure 2.2 – Composantes d'un générateur photovoltaïque [49]

La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

2.2.4 Modélisation :

Pour modéliser un générateur photovoltaïque on se base essentiellement sur le modèle d'une seule cellule photovoltaïque. Etant donné les équations décrites précédemment propres à une seule cellule PV, qui représente l'élément de base du générateur, on peut passer à une équation globale, on introduit donc l'équation spécifique à un générateur :

$$I_{cell} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T}\right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Où :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

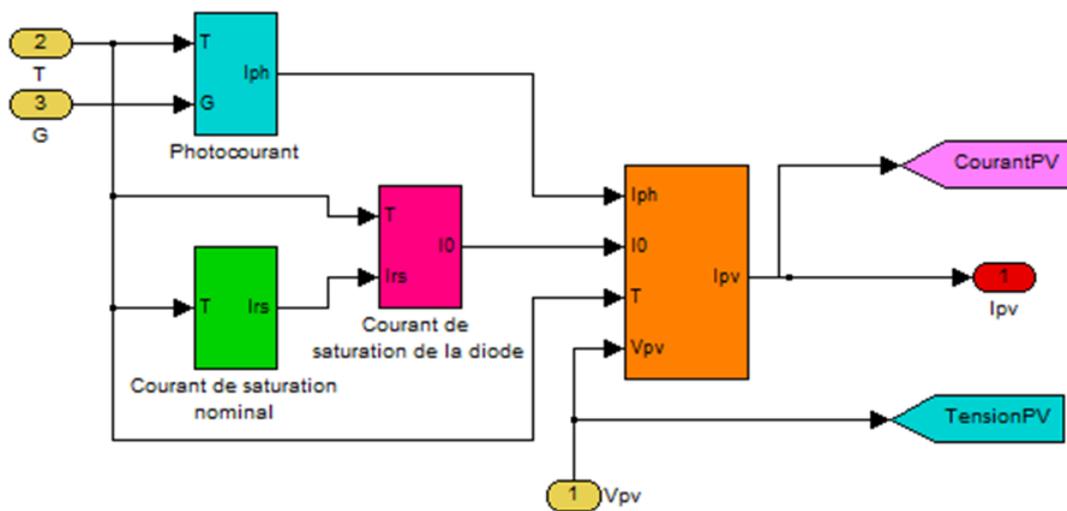


Figure 2.3 – Modélisation du panneau PV

Arrivant à ce point, on peut simuler un panneau PV en utilisant l'équation 2.5 (voir figure 2.3), sous des conditions standards d'éclairement et de température ($1000\text{W}/\text{m}^2, 25\text{C}$).

Les figures suivantes illustrent les caractéristiques fondamentales du générateur photovoltaïque sous Les conditions standards d'éclairement et de température.

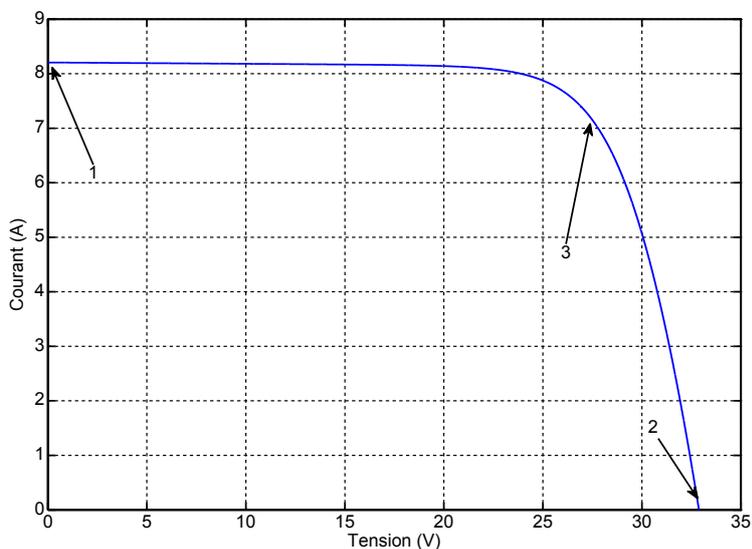


Figure 2.4 – Caractéristique Courant–Tension du GPV

Dans un premier lieu on examine la caractéristique $I=f(V)$, on distingue trois points importants :

Point (1) : ce point correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire en court-circuit.

Point (2) : correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge ; à circuit ouvert.

Point (3) correspond au point de fonctionnement où la puissance maximale que peut fournir le PV est délivrée.

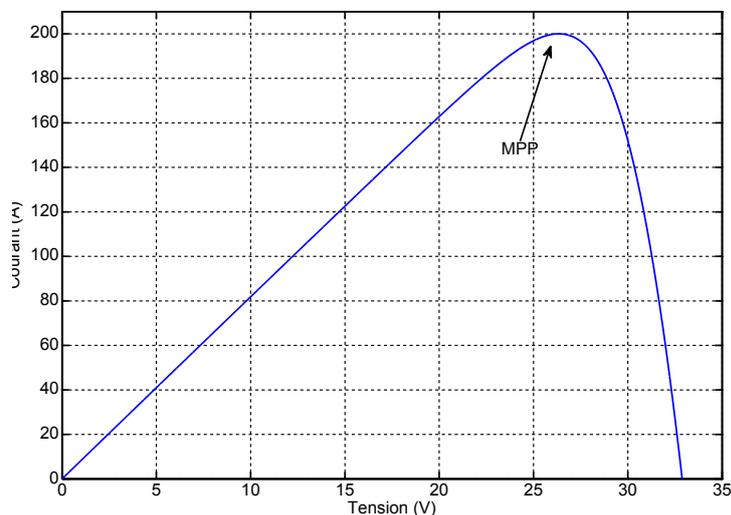


Figure 2.5 – Caractéristique Puissance–Tension du GPV

La figure ci-dessus représente la caractéristique Puissance-Tension du GPV sous les conditions standards de l'ensoleillement et de la température.

Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximale (MPP) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement I_{opt} et V_{opt} .

2.2.5 Éléments influents sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Dans ce qui suit on va étudier l'influence de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

a-Influence de l'irradiation :

Les figures ci-dessous représentent les résultats d'une simulation sur l'influence de l'irradiation sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

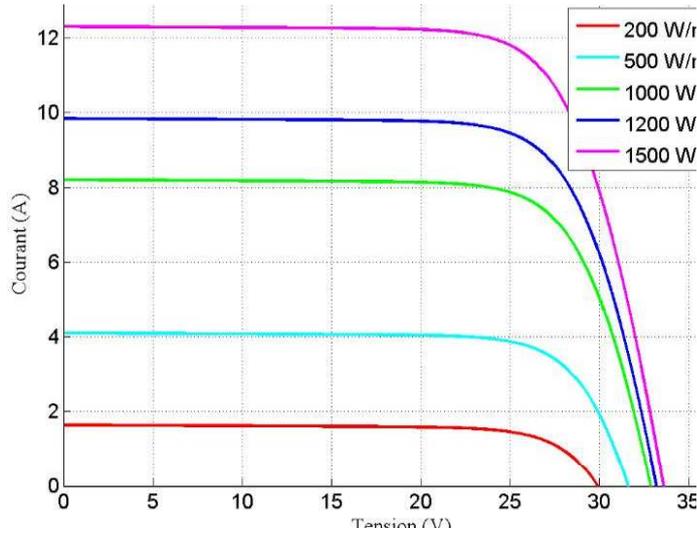


Figure 2.6 – Influence de l'irradiation sur la caractéristique Courant-Tension du GPV.

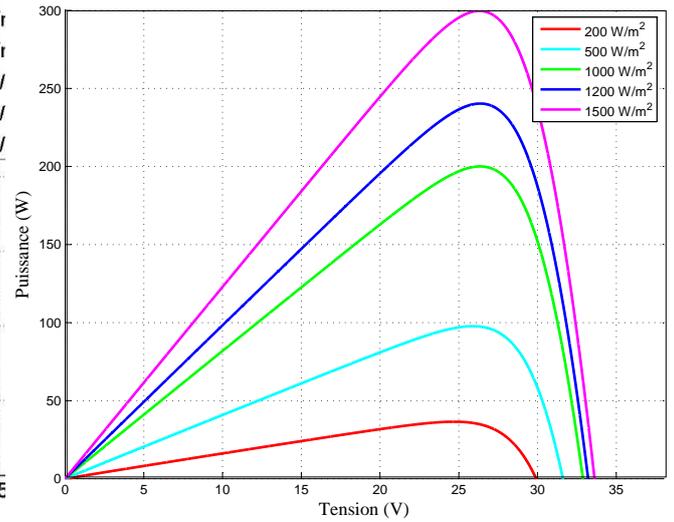


Figure 2.7 – Influence de l'irradiation sur la caractéristique Puissance-Tension du GPV.

On remarque bien, depuis les courbes ci-dessus que plus l'irradiation augmente pour une température donnée on a une augmentation de l'intensité du courant en court-circuit , ainsi qu'une légère variation de la tension à circuit ouvert.

On souligne aussi le fait que le point de puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'irradiation.

b-Influence de la température

Des figures suivantes on remarque que la tension à vide diminue lorsque la température augmente alors que le courant de court-circuit augmente légèrement, ceci engendre une diminution de la puissance maximale.

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

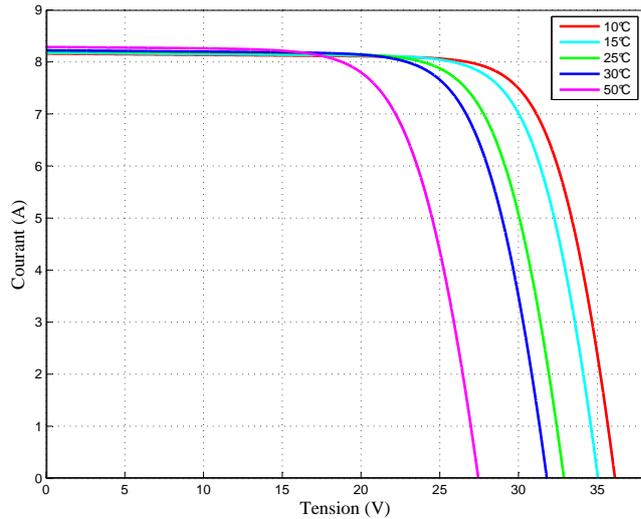


Figure 2.8 – Influence de Température sur la caractéristique Courant-Tension du GPV.

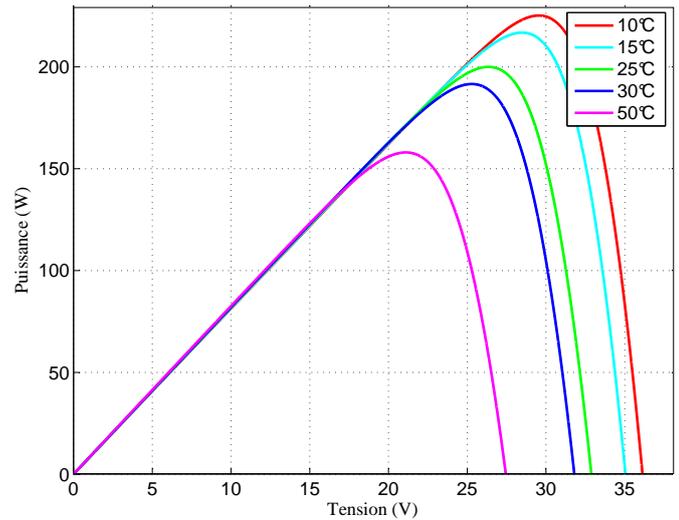


Figure 2.9 – Influence de Température sur la caractéristique Puissance-Tension du GPV.

D'après ces figures, nous remarquons l'influence de la température sur la tension du circuit ouvert V_{oc} .

On remarque à partir des courbes que le modèle adopté concorde parfaitement avec les données expérimentales du constructeur dans les conditions standards ($1000 W/m^2, 25C$). Ainsi, la puissance maximale théorique correspond à la puissance maximale expérimentale. Pour résumer ; le point de fonctionnement d'un module PV se déplace en faisant varier la température, l'ensoleillement ou la charge.

L'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant du générateur que la tension, alors que la température affecte beaucoup plus la tension que le courant.

Donc, on peut dire que pour obtenir une grande puissance, il serait plus intéressant d'avoir une irradiation importante sous une basse température.

2.3 Problématique de la production de la puissance maximale.

Pour assurer le fonctionnement des dispositifs à des points optimaux de leur fonctionnement on applique de spécifiques lois de commandes sans pour autant connaître ces points à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement.

Dans notre cas, pour des ressources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. On appelle ce type de commande « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking (MPPT).

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.[13]

2.3.1 Modes de connexion :

Connexion directe entre la source et la charge :

Ce premier cas, connexion directe, est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

On peut présenter ce type d'application comme un champ photovoltaïque ayant une tension V_{OPT} fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération (figure 2.10). La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

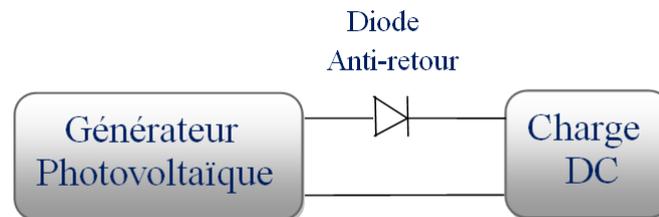


Figure 2.10 – Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

Or, la configuration ainsi décrite n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Par exemple, le cas de batteries de stockage dans les systèmes isolés.

D'autre part, si on effectue un examen plus approfondi de ces applications on peut montrer que même dans ce cas, le transfert d'énergie électrique disponible aux bornes du GPV vers la charge dépend fortement de l'état de la batterie ayant une tension à ses bornes variant d'un pourcentage non négligeable. Plus généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre (la figure 2.11)

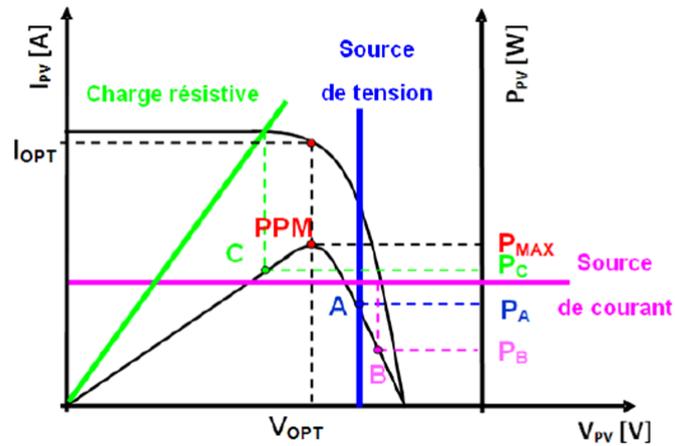


Figure 2.11 – Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en Fonction de la charge.

Comme on le voit dans la figure précédente, un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- *Une charge de type source de tension continue,
- *Une charge de type source de courant continu,
- *Une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur. D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu. A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle.

Introduction d'un étage d'adaptation :

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque V_{OC} . Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure (2.12), est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

la charge. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge.

L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques (CS).



Figure 2.12 – Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaitée, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- 1) Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost, ...).
- 2) Introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward, ...).
- 3) Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur).

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT [17, 18]. Cependant, en pratique, pour que l'étage d'adaptation joue le rôle d'interface idéale (sans pertes) entre les deux éléments, plusieurs conditions sont à respecter :

*Le type d'action de contrôle sur le port d'entrée ne doit pas générer des pertes en régime statique ou transitoire.

*Le transfert de la puissance du GPV ne doit pas être minimisé par les diverses pertes liées au fonctionnement de l'étage d'adaptation.

2.3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale

La commande MPPT d'un système solaire photovoltaïque peut être définie comme étant une commande qui fait varier le rapport cyclique d'un convertisseur statique, de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit maximale à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher la puissance maximale, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le point de puissance maximale, en fonction de variations des paramètres d'entrée (I et V) et de sortie (charge variable) du convertisseur statique [39]..

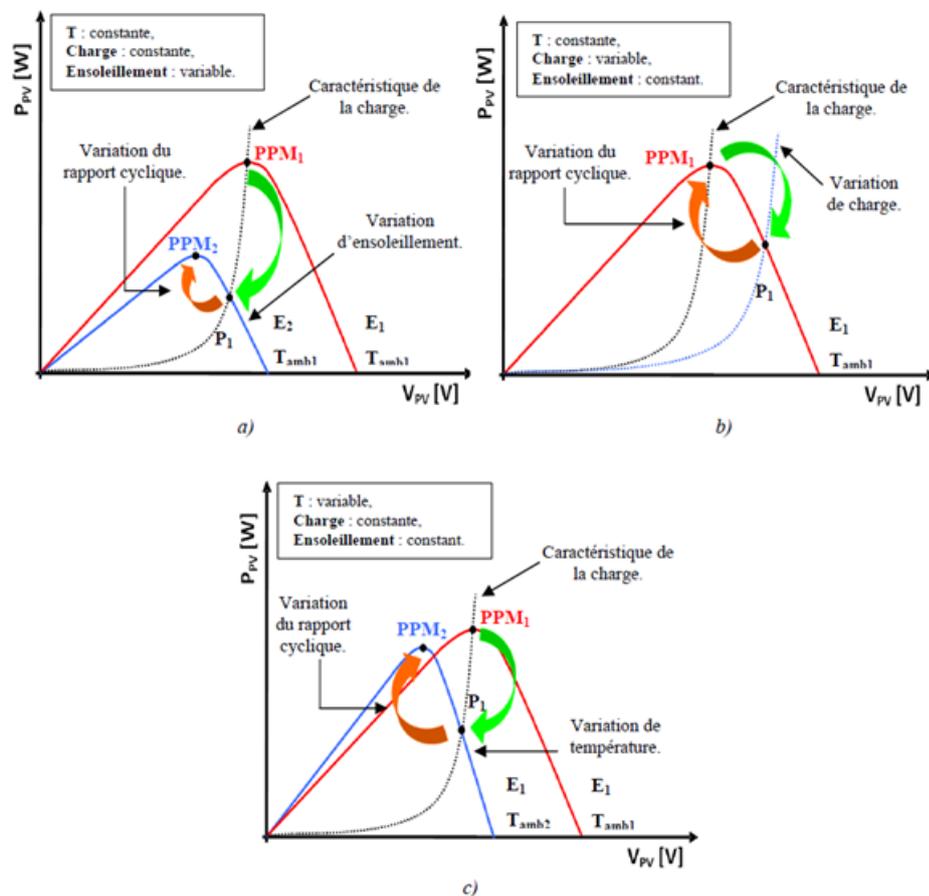


Figure 2.13 –

Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal
a-suite à une variation d'ensoleillement.
b-suite à une variation de Charge.
c-suite à une variation de température.

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

Présentation de l'étage d'adaptation :

Pour pouvoir extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV puis ainsi le transférer à la charge, on utilise un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme montré dans la figure (2.13). L'étage d'adaptation joue le rôle d'interface entre les

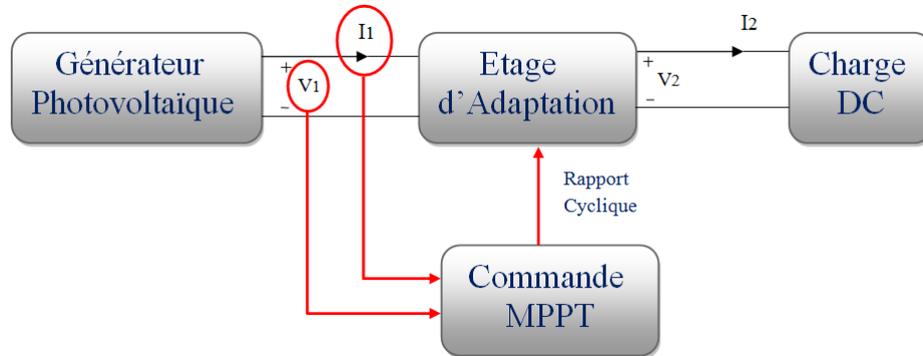


Figure 2.14 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

deux éléments en assurant le transfert du maximum de puissances fournies par le générateur.

Le convertisseur le plus utilisé est le hacheur dévolteur/survolteur, souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck-Boost, qui est un convertisseur continu-continu ayant pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

Le hacheur Buck-Boost, est un convertisseur qui a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types de hacheur le survolteur « Boost » et le dévolteur « Buck ». Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée continue. Son schéma de base est illustré par la Figure (2.15).

L'entrée et la sortie du hacheur représentent des sources de tension. Un convertisseur direct ne peut mettre en relation deux sources de même nature, une telle représentation est justifiée dans le sens où le convertisseur comporte une source de courant qui relie les deux sources de tension, et c'est les capacités à l'entrée et à la sortie du convertisseur qui confèrent le caractère source de tension alors que l'inductance confère le caractère source de courant [42]. L'élément de commande (transistor, thyristor, MOS, IGBT... etc) est représenté par l'interrupteur K.

On distingue deux modes de fonctionnement, le premier est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge. Durant le second mode de fonctionnement, lorsque l'élément

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

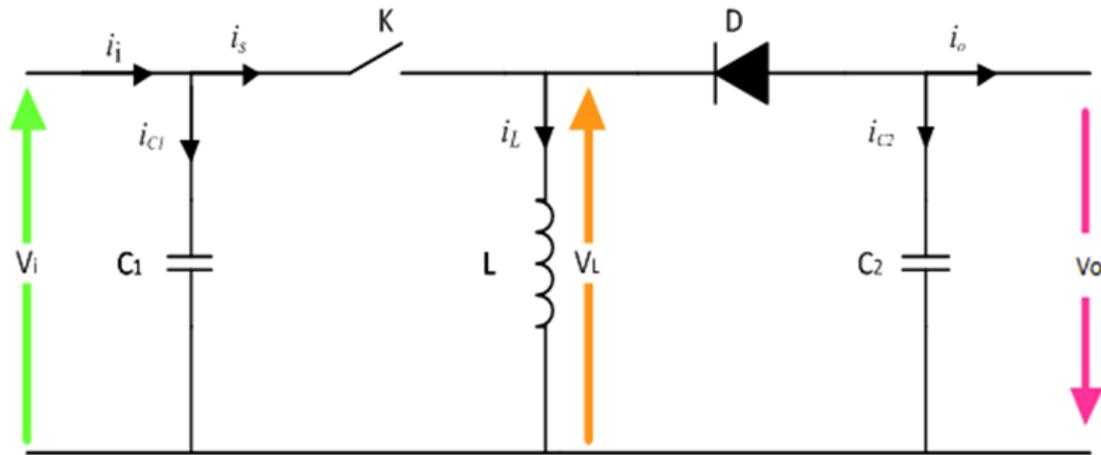


Figure 2.15 – Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost

de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, l'énergie stockée par la bobine va alimenter la charge et recharger la capacité [40]. Durant le fonctionnement du hacheur, l'interrupteur K est fermé pendant un temps t_{on} égal à dT_s et est ouvert pendant un temps t_{of} , f égal à $(1 - d)T_s$.

Avec :

T_s : période de commutation égale $\frac{1}{f_s}$.

f_s : fréquence de hachage.

d : rapport cyclique de commande ($d \in [0, 1]$).

Le principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost est basé essentiellement sur la position du commutateur K :

L'intervalle $[0, dT_s]$: Cet intervalle est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement avec une pente égale à $\frac{V_i}{L}$ ce qui lui permet de stocker de l'énergie durant toute la durée de la fermeture, et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge [10][29].

Le circuit est le suivant :

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

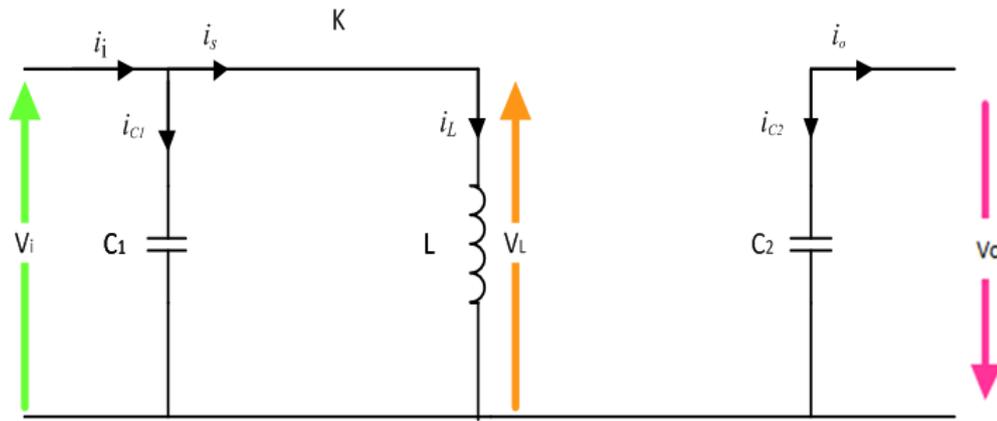


Figure 2.16 – Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST[10]

Sur l'intervalle $[dT_s, Ts]$: l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, le courant de la bobine décroît linéairement avec une pente de $-\frac{V_o}{L}$ ce qui permet d'alimenter la charge et de recharger la capacité. Le circuit est représenté par la figure ci-dessous.

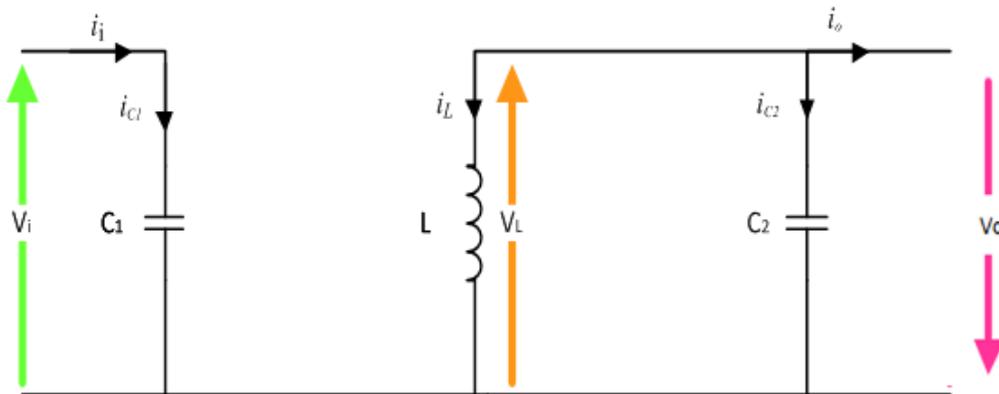


Figure 2.17 – Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST

*Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

En combinant les deux systèmes d'équations (2.6) et (2.7) on a un seul système, on trouve le modèle approximé du convertisseur Buck-Boost [4] :

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

$$\begin{cases} c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = (i_i - i_L) dT_s + i_i(1-d)T_s \\ c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = -i_o dT_s + (i_L - i_o)(1-d)T_s \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = v_i dT_s + v_o(1-d)T_s \end{cases} \quad (2.8)$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations (2.8) donne :

$$\begin{cases} I_i - dI_L = 0 \\ I_o - I_L = 0 \\ dV_i + (1-d)V_o = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

En utilisant les relations ,on peut calculer le rapport de conversion $M(d)$, défini par :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{d}{(1-d)}$$

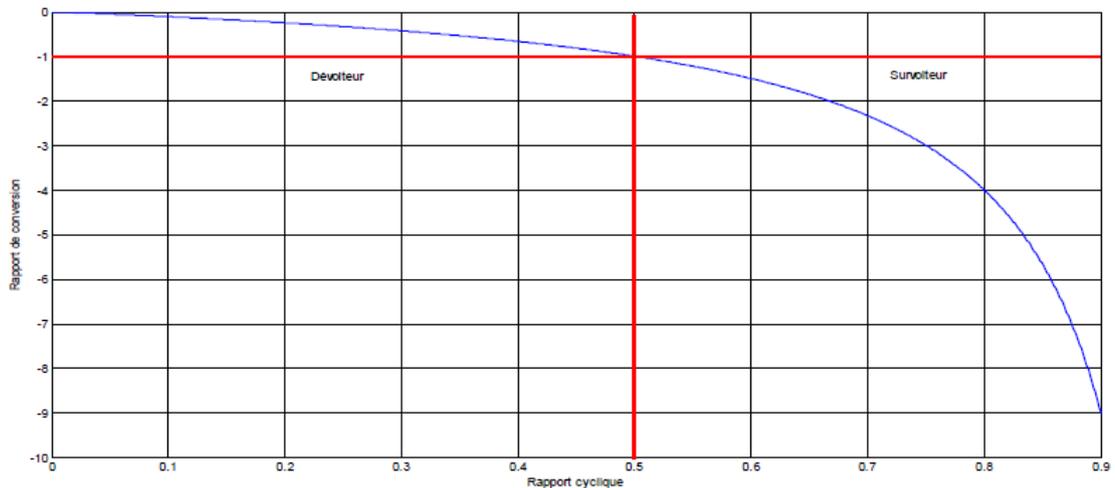


Figure 4.8 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

Figure 2.18 – Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

Après avoir présenté la modélisation de l'étage d'adaptation en revient de nouveau pour répondre à la problématique posée précédemment qui concerne le point de puissance maximale.

Synthèse des différents MPPT rencontrés dans la littérature :

On peut distinguer plusieurs méthodes pour maximiser la puissance, on trouve par exemple en addition aux premières méthodes apparues ; la méthode Perturbe and Observe, les méthodes robustes, par mode de glissement par exemple.

Dans cette partie nous allons présenter quelques méthodes et algorithmes de type MPPT, puis on va s'étaler sur la commande par mode de glissement.

a-Les premiers types de commande MPPT

Pour les premières commandes MPPT, les algorithmes utilisés étaient relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial, avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer [13]. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure (3.1) et peut être implanté entièrement en numérique.

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

b-b. La commande "Perturb and Observe" (PO) :

L'algorithme « Perturb and observe » est le plus répandu. Il se base sur une méthode itérative qui permet d'obtenir le Maximum Power Point.

En effet, le principe de ce type de commandes consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale afin d'analyser la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [42-43]. Suite à cela, comme l'illustre la figure (2.20), si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

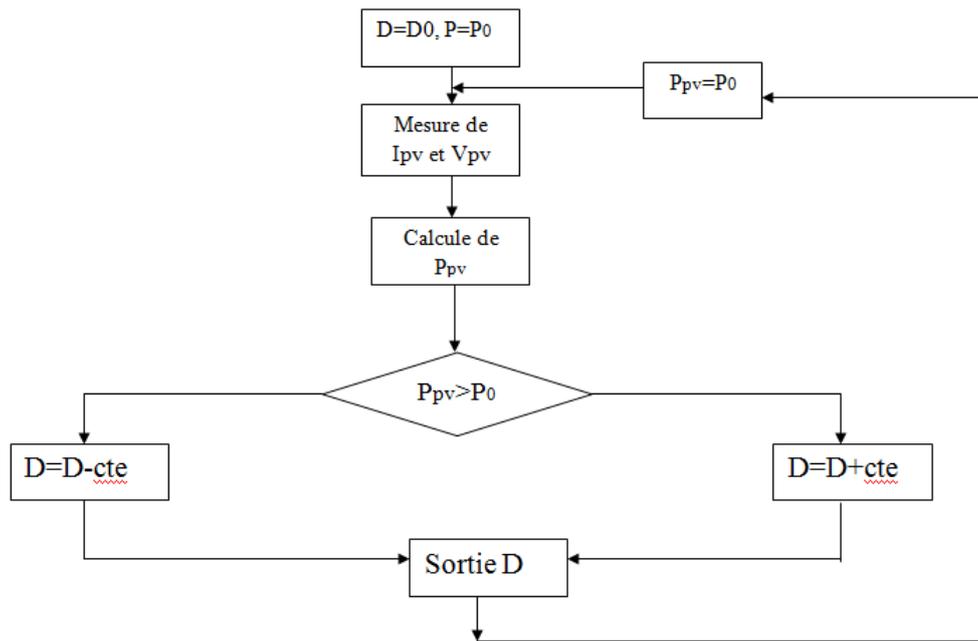


Figure 2.19 – Principe de la première commande MPPT numérique

puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

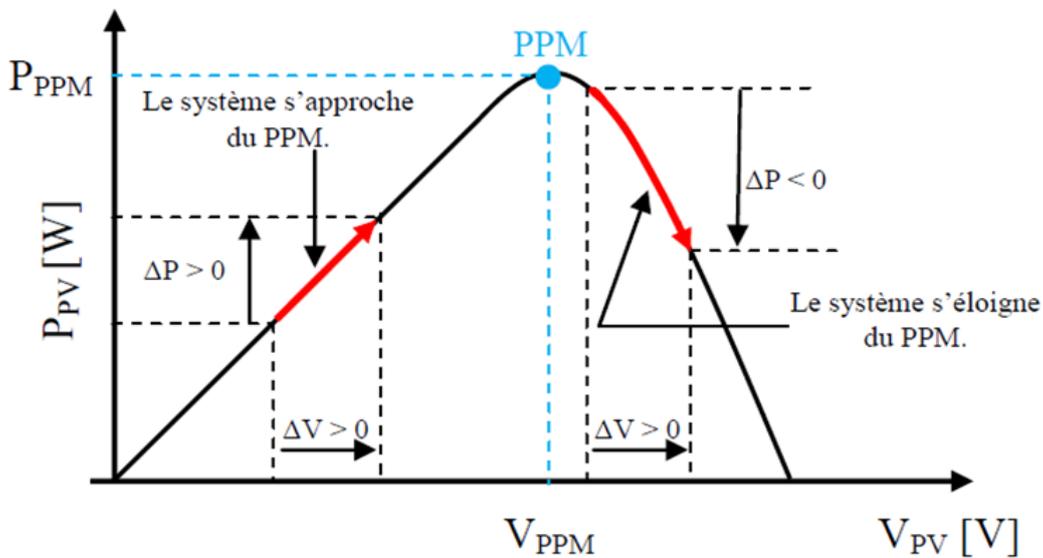


Figure 2.20 – Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ d'une GPV

La figure (2.21) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type *PO*, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour

2.3. PROBLÉMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE.

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

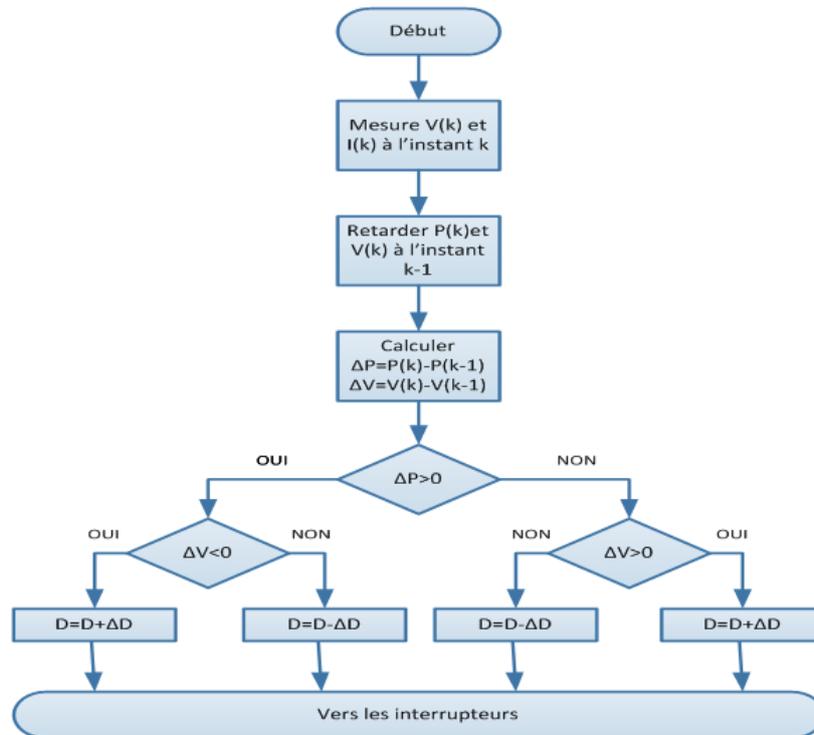


Figure 2.21 – Algorithme type de la méthode PO

Le problème avec cette la méthode PO est qu'elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi vu que la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

D'où la nécessité donc d'opter pour d'autres approches, ce qui nous mène ainsi à introduire la commande par mode de glissement et la commande stabilisante suivant le théorème de Lyapunov.

la figure (2.22) illustre le principe de la méthode.

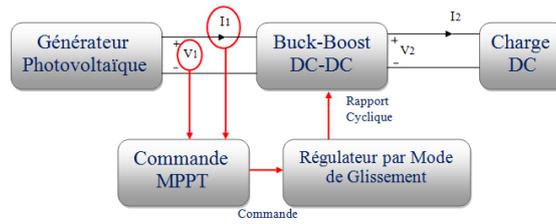


Figure 2.22 – configuration de la chaîne photovoltaïque avec régulateur par mode de glissement

2.4 Commande stabilisante et commande par mode de glissement :

Application de la commande par la méthode de *Lyapunov* au convertisseur Buck-Boost :(voire annexe B)

Des équations (2.8) on peut extraire le modèle d'état du convertisseur Buck-Boost comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_1} I_i - \frac{1}{C_1} x_3 U \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{RC_2} x_2 - \frac{1}{C_2} x_3 - \frac{1}{C_2} x_3 U \\ \dot{x}_3 = X_2 + \left(\frac{x_1}{L} - x_2\right) U \end{cases} \quad (2.10)$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 = V_{pv} \\ x_2 = V_o \\ x_3 = I_l \end{pmatrix}$$

Pour extraire le maximum de puissance, on agit sur le rapport cyclique du Back Boost, qui représente notre commande, pour faire suivre la tension de sortie du GPV à une tension de référence $V_{pv,ref}$ qui est donc notre objectif de commande.

Pour ce faire, on définit l'erreur $e = V_{pv} - V_{pv,ref}$, ce qui réduit le problème de suivie de référence à un problème de stabilisation de l'erreur à 0.

Pour cela on définit la fonction de lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} e^2 \text{ FDP sur } R$$

Ce qui nous donne la dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e \dot{e} \\ \dot{V} &= e(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1,ref}) \\ \dot{V} &= e\left(\frac{1}{C_1} I_i - \frac{1}{C_1} x_3 U - \dot{x}_{1,ref}\right) \end{aligned}$$

On cherche la commande U de telle sorte que la fonction \dot{V} soit une fonction définie négative d'où :

$$U = c_1 \frac{1}{x_3} \left(\frac{1}{C_1} i_i - \dot{x}_{1.ref} \right) - k \left(-\frac{C_1}{x_3} \right) e$$

Application de la commande par Mode de glissement au convertisseur Buck-Boost :(voire annexe B)

D'après le modèle d'état du convertisseur Buck-Boost définie dans les équations (2.11) Il suffit de dériver la première sortie $y = x_1$ une fois pour faire apparaitre la commande, ce qui fait que $r= 1$.

En utilisant l'équation (2.12), on tire :

$$S(x) = e(x)$$

Ou encore

$$S(x) = y - y_{ref} = x_1 - x_{1ref}$$

La condition de convergence est :

$$\begin{aligned} S\dot{S} &< 0 \\ S(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) &= S\left(\frac{1}{C_1} I_i - \frac{1}{C_1} x_3 U - \dot{x}_{1ref}\right) \end{aligned}$$

Donc la commande sera :

$$U = c_1 \frac{1}{x_3} \left(\frac{1}{C_1} i_i - \dot{x}_{1.ref} \right) - k \left(-\frac{C_1}{x_3} \right) \text{Sign}(S(x))$$

2.4.1 Résultat de simulation :

Dans cette partie, le but est de vérifier le comportement des algorithmes PO, et mode de glissement avec des variations de l'ensoleillement, et donc la capacité de ceux-ci à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale.

Nous avons testé ses algorithmes sous des variations brusques de l'irradiation solaire, ce qui nous a donné les résultats des figures (2.23) à (2.26) pour l'algorithme PO et de (2.27) à (2.30) pour la commande par mode de glissement.

Résultats de simulation de la méthode Perturbe and Observe :

2.4. COMMANDE STABILISANTE ET COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT :

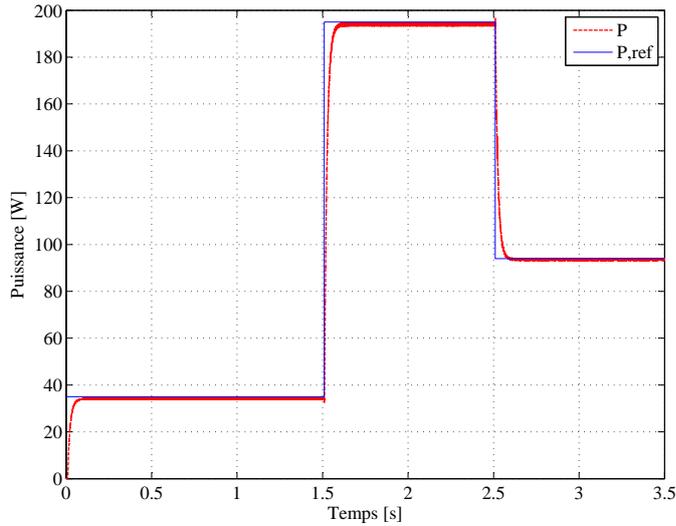


Figure 2.23 – Puissance du GPV générée avec sa référence

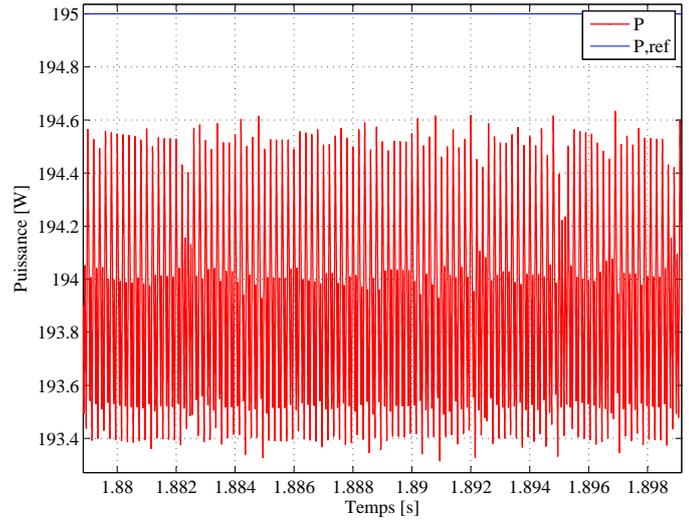


Figure 2.24 – Zoom sur la puissance du GPV générée avec sa référence

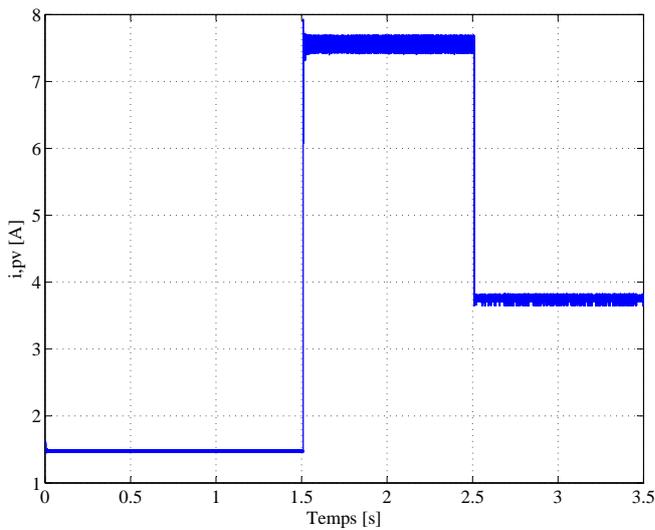


Figure 2.25 – Variation du courant du GPV

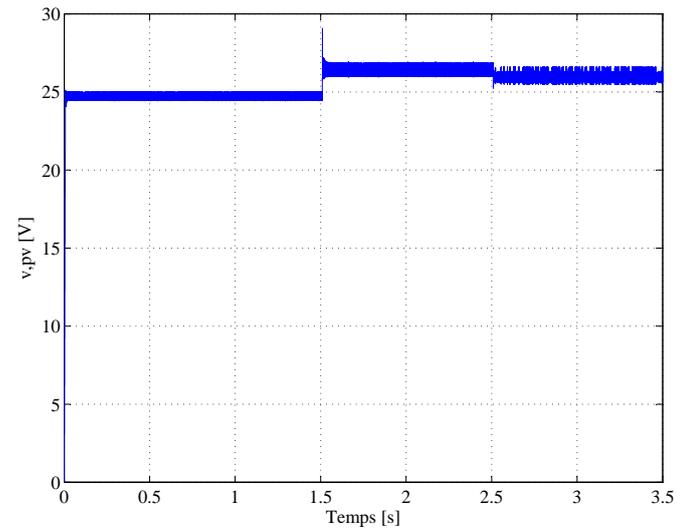


Figure 2.26 – Variation de la tension du GPV

Résultats de simulation de la méthode Mode de Glissement :

2.4. COMMANDE STABILISANTE ET COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT :

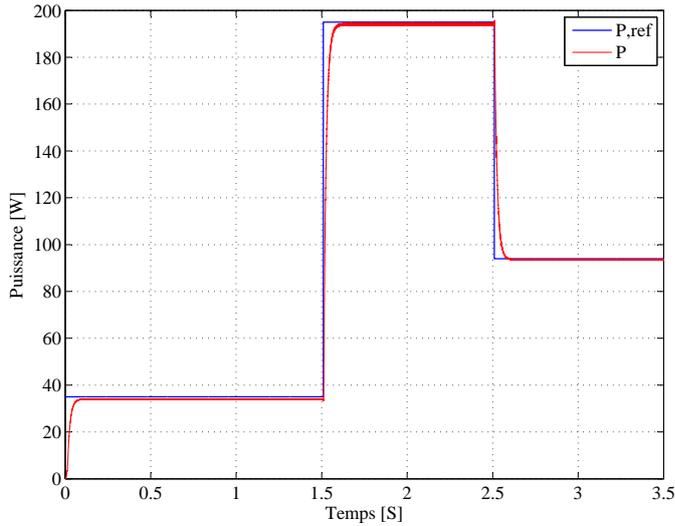


Figure 2.27 – Puissance du GPV générée avec sa référence

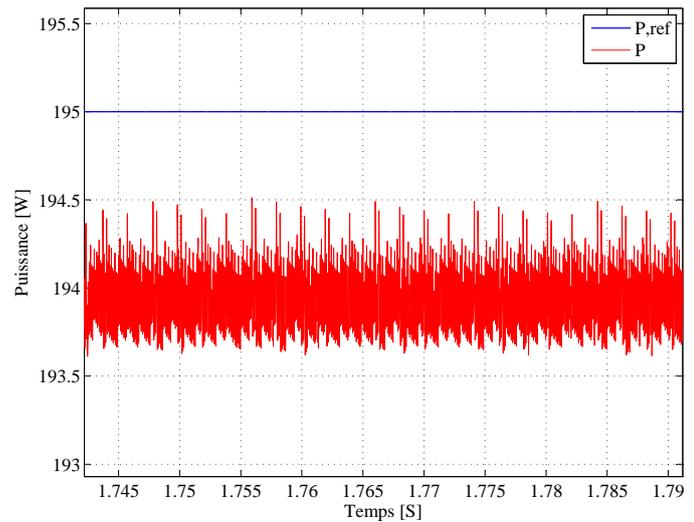


Figure 2.28 – Zoom sur la puissance du GPV générée avec sa référence

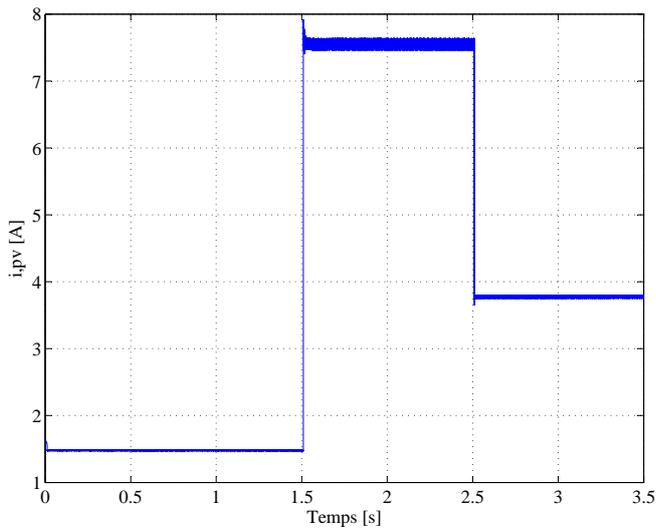


Figure 2.29 – Variation du courant du GPV

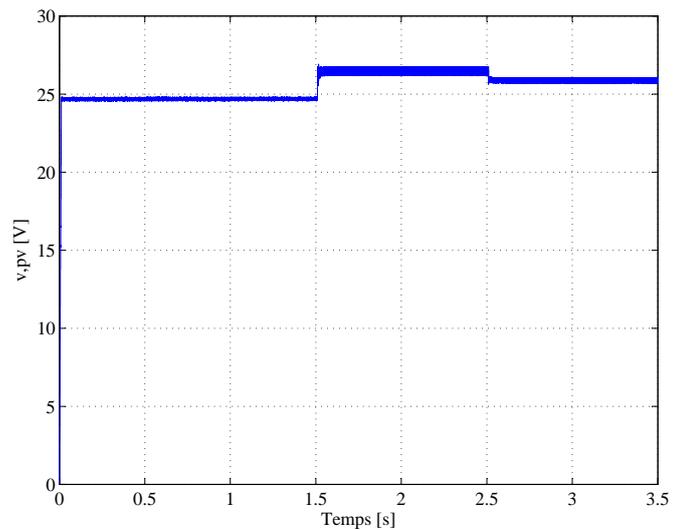


Figure 2.30 – Variation du tension du GPV

2.4.2 interprétation des résultats :

En observant les résultats des deux algorithmes, on remarque bien que les deux donnent de bons résultats quant à la poursuite du point de puissance maximal (PPM), avec d'infimes différences.

Les résultats pour la commande par mode de glissement restent meilleurs quant au temps de réponse par rapport à l'algorithme *P&O* même si la différence est minime, et n'apparaît pas sur la figure, mais elle présente une grande influence sous de grandes et brusques variations

des conditions climatiques. De même pour les ondulations autour du PPM en régime permanent, qui sont plus importantes pour l'algorithme *P&O* que pour le mode de glissement. On tient à signaler, que pour l'algorithme *P&O*, la réponse dépend fortement du choix du pas d'incrémentation du rapport cyclique, qui représente la commande de l'étage d'adaptation, où pour des faibles valeurs du pas on obtient de très bons résultats, parlant de l'amplitude des ondulations mais avec une importante marge de temps de réponse, et ainsi en augmentant le pas on diminue le temps de réponse mais cela influence sur l'amplitude de l'ondulation autour du PPM.

Pour la commande par mode de glissement, on peut obtenir de meilleurs résultats, en choisissant adéquatement le gain k ...

2.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est penché sur l'étude du problème de la recherche du point maximal pour la production énergétique par générateur photovoltaïque. Dans un premier lieu nous avons commencé par l'élaboration du modèle du générateur à partir du modèle de la cellule PV. Un modèle que nous avons testé en comparant les résultats de simulation à des résultats expérimentaux (présentés dans l'annexe).

Après ce, nous avons élaboré et testé deux différentes approches, une première classique, par l'algorithme *P&O*, et une seconde robuste, par mode de glissement et Lyapunov.

Les résultats de simulation ont bien montré que la deuxième approche est bien meilleure que l'approche classique vue sous l'angle de temps de réponse et ondulation autour du PPM, et qu'on peut bien améliorer en choisissant les paramètres adéquatement (essentiellement le gain K) .

Chapitre 3

Modélisation, commande et simulation de la chaîne de conversion éolienne

3.1 Introduction :

Pour une exploitation optimale de l'énergie éolienne, plusieurs types de machines électriques peuvent jouer le rôle d'une génératrice, dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques bien spécifiques. Parmi ces machines, nous étudions la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Cette dernière permet d'avoir une large plage de variation de vitesse. En plus, le dimensionnement des convertisseurs de puissance, qui sont reliés au côté rotor de la machine est réduit jusqu'à environ 30% de la puissance nominale pour la plupart des installations. Ainsi, ce choix constitue un avantage très important en terme de diminution des pertes dans les convertisseurs de puissance, et aussi en terme de réduction du coût globale [10].

Nous allons commencer, dans un premier lieu, par la modélisation de la partie mécanique, après nous allons passer à la modélisation de la génératrice qui assure le transfert mécanique électrique, en fin nous allons voir la modélisation de la partie puissance qui assure l'alimentation du rotor.

3.2 Modélisation de la partie mécanique :

La turbine que nous allons étudier est constituée de trois pales de longueur R_t , fixées sur un arbre tournant à une vitesse Ω_t qui est relié à un multiplicateur de gain G entraînant un générateur, comme montré dans le schéma ci dessous.

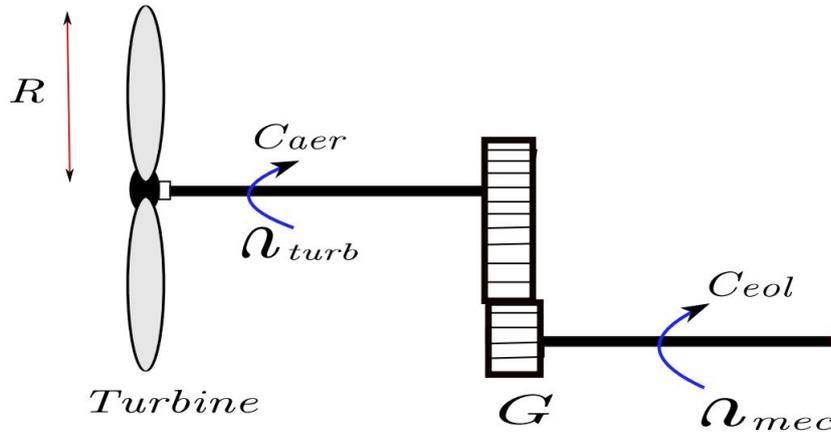


Figure 3.1 – Schéma de principe d'une turbine éolienne [17]

3.2.1 La loi de Betz :

En 1911 Albert Betz formula une loi qui détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir plus de 16/27 d'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie mécanique, en d'autres termes ; étant donné que les pales ne peuvent pas capter la totalité de la puissance du vent, la puissance aérodynamique est inférieure à la puissance du vent. Selon la seconde

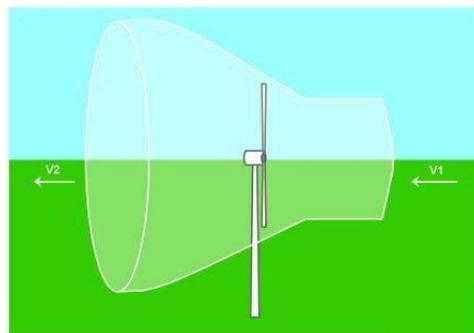


Figure 3.2 – Représentation de la surface balayée par la turbine[44]

loi de Newton la puissance extraite du vent par le rotor est exprimée comme suit :

$$P_m = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.1)$$

Où :

m : est la masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde, donnée

par la formule :

$$m = \rho S \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (3.2)$$

ρ : la densité de l'air $1.225 \frac{kg}{m^3}$.

S : La surface balayé par le rotor.

v_1 et v_2 représentent la vitesse avant et après le passage à travers le plan du rotor, respectivement. (comme dans la figure 3.2)

En substituant m dans l'équation d'avant, on obtient :

$$P_m = \left(\frac{\rho}{4}\right)(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)S \quad (3.3)$$

La théorie de Betz nous donne la puissance du vent comme suit :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{\acute{e}ol} \rho v^3 \quad (3.4)$$

On obtient donc le ratio entre la puissance extraite du vent est celle du vent comme suit :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{m_t}} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right) \quad (3.5)$$

Ce qui nous mène ainsi à la relation entre la puissance aérodynamique et celle du vent exprimée comme :

$$\begin{aligned} P_{aero} &= C_p(\lambda, \beta) P_{vent} \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Où :

R_t : est le rayon de la turbine ou la longueur d'une pale [m] ;

C_p : le coefficient de puissance. Ce coefficient correspond au rendement aérodynamique de la turbine, il diffère pour chaque éolienne et dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ .

Pour cette étude, on a choisi une modélisation de C_p sous forme polynomiale donnée par l'équation (3.7) qui apparaît dans plusieurs références. Cette modélisation est valable quel que soit l'angle de calage β , et quel que soit le rapport de vitesse λ .

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_1}} + \lambda c_6 \quad (3.7)$$

Tel que le paramètre λ_1 dépend de λ et β par la relation suivante :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3.8)$$

Les coefficients C_i dans l'équation (3.7) dépendent de la turbine considérée. Dans notre cas on prend

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

On définit le rapport de vitesse λ comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \quad (3.9)$$

Avec :

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine [rad/s].

Pour donner un ordre de grandeur, si $\lambda < 3$: l'éolienne est dite lente, et si $\lambda > 3$: l'éolienne est dite rapide.

La figure ci-dessous représente la relation entre les variations du rapport de vitesse λ pour différentes valeurs de l'angle β et la variation du coefficient de puissance C_p

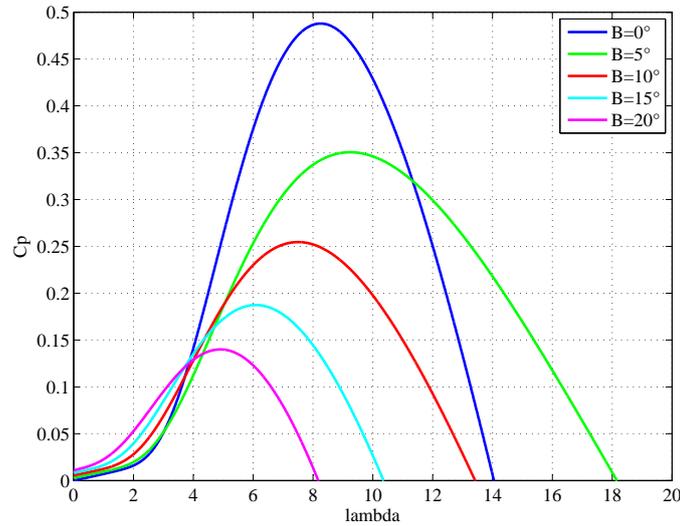


Figure 3.3 – Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

On peut ainsi déterminer le couple aérodynamique à partir de la relation entre la puissance aérodynamique et la vitesse de rotation de la turbine :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (3.10)$$

La vitesse de la génératrice est liée à la vitesse de la turbine par le gain du multiplicateur comme suite :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{gen}}{G} \quad (3.11)$$

Production optimale d'énergie :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (3.4) [45] :

Pour la vitesse du vent V_1 avec une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance maximale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (Vitesse fixe), une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse Ω_2 , Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

Conclusion, il est nécessaire d'introduire la variation de vitesse d'une éolienne. En effet, la vitesse de la turbine doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent en suivant une

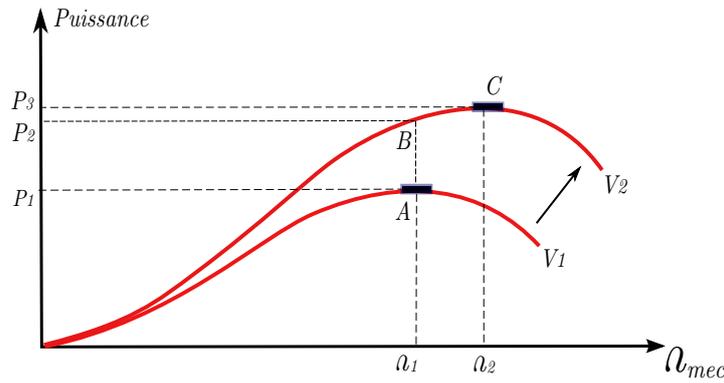


Figure 3.4 – Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [45]

consigne, c'est pour cela que les éoliennes à forte et moyenne puissance raccordées au réseau fonctionnent à vitesse variable [45].

L'une des configurations les plus attirante est celle basée sur la machine asynchrone à rotor bobiné et doublement alimentée (MADA), d'où notre choix de se baser uniquement sur cette machine.

3.3 Modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation

Equations électriques :

D'après la loi de Faraday et la loi d'Ohm ,les équations électriques en notation matricielle sont :

Pour le stator :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][I_s]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi_s]_{abc} \quad (3.12)$$

Pour le rotor :

$$[V_r]_{abc} = [R_r][I_r]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi_r]_{abc} \quad (3.13)$$

Avec :

$[V_s]_{abc}, [V_r]_{abc}$: Vecteurs de tensions statorique et rotorique.

$[I_s]_{abc}, [I_r]_{abc}$: Vecteurs de courants statorique et rotorique.

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique d'une phase.

$[\varphi_s]_{abc}, [\varphi_r]_{abc}$:Vecteurs de flux statorique et rotorique.

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Equations des flux :

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants. Les équations sous forme matricielle sont représentées comme suit :

Pour le stator :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_s][I_s]_{abc} + [M_{sr}][I_r]_{abc} \quad (3.14)$$

Pour le rotor :

$$[\varphi_r]_{abc} = [L_r][I_r]_{abc} + [M_{rs}][I_s]_{abc} \quad (3.15)$$

Avec :

$[L_s]$: La matrice d'inductance statorique.

$[L_r]$: La matrice d'inductance rotorique.

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$[M_{rs}]$: La matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor.

Équation mécanique :

L'expression générale du couple est donnée par la relation(3.17)

$$C_{mec} = J_T \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (3.16)$$

3.3. MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

avec :

$-J_T$: représente l'inertie totale de l'éolienne constituée de l'inertie de la turbine $J_{turbine}$ ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , elle est donnée par l'expression suivante :

$$J_T = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (3.17)$$

C_{mec} : représente le couple mécanique, qui est fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple issu du multiplicateur

C_{arbre} :

$$C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \quad (3.18)$$

En remplaçant l'expression du couple mécanique (3.16) dans l'équation (3.18) on aboutira à l'équation décrivant l'évolution de la vitesse mécanique à partir des différents couples.

$$J_T \frac{d\Omega_{gen}}{dt} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \quad (3.19)$$

3.3.1 Modèle de la MADA dans le plan dq (Transformation de Park)

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps. Pour remédier à ce problème on doit faire un changement de repère, son but est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système. [10]

En appliquant cette transformation au niveau du stator et du rotor nous obtenons les

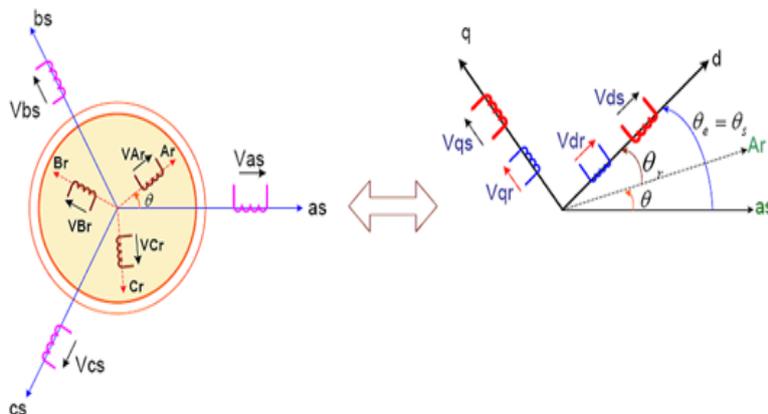


Figure 3.5 – Passage du triphasé au biphasé

équations électriques et magnétiques suivantes :

Au stator :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (3.20)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (3.21)$$

- **Puissances statoriques**

Dans un repère biphasé, les puissances actives et réactives d'une machine asynchrone s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (3.22)$$

- **Équation du couple électromagnétique**

Après avoir passé au repère biphasé, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes. ce qui nous mène à la formule [17] :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (3.23)$$

3.3.2 Choix du référentiel : [17]

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié [32][33] :

Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation. $\omega_e = \omega_s$ et

$$\omega_e = -\omega$$

Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante les variations importantes de la vitesse de rotation. $\omega_e = \omega_s = \omega$ et $\omega_r = 0$.

Référentiel lié au champ tournant :

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent, d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. $\omega_r = \omega_s$; $\omega_r = \omega_s - \omega$

3.3.3 Mise sous forme d'équation d'état

Il est nécessaire de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état,

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u + dC_g \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.24)$$

Où x, u et y représentent respectivement le vecteur d'état, de commande et de sortie.

Et $f(x), g(x)$ et $h(x)$ sont des fonctions non-linéaires.

Après le calcul, nous aboutissons au système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r i_{dr} + \omega_r i_{qr} + \alpha_s \beta \varphi_{ds} - \beta \Omega \varphi_{qs} - \beta v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r i_{qr} - \omega_r i_{dr} + \alpha_s \beta \varphi_{qs} + \beta \Omega \varphi_{ds} - \beta v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} v_{qr} \\ \frac{d\Omega_{gen}}{dt} = \frac{p\mu}{J_T} (\varphi_{qs} i_{dr} - \varphi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J_T} C_r - \frac{f}{J_T} \Omega_{gen} \end{cases} \quad (3.25)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_r = g\omega_s = \omega_s - p\Omega_{gen} \\ \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \beta = \frac{M}{L_s\sigma_r} \\ \sigma_r = L_r(1 - \frac{M^2}{L_sL_r}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{M}{L_s} \\ \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_sM^2}{L_s^2\sigma_r} \end{array} \right.$$

nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega_{gen}]^T$ comme vecteur d'état et les grandeurs v_{dr}, v_{qr} comme variable de commande .

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + v_{ds} \\ \dot{x}_2 = a_4x_2 - a_5x_1 + a_6x_4 + v_{qs} \\ \dot{x}_3 = a_7x_3 + a_8x_4 + a_9x_1 + x_2 + a_{10}v_{ds} + a_{11}u_{a12} \\ \dot{x}_4 = a_{13}x_4 + a_{14}x_3 + a_{15}x_2 + a_{16}x_1 + a_{17}v_{qs} + a_{18}u \\ \dot{x}_5 = a_{19}(x_2x_3 - x_1x_4) + a_{20} + a_{21}x_5 \end{array} \right. \quad (3.26)$$

les coefficients a_i sont définis par :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = -\alpha_s a_2 = \omega_s \\ a_3 = \alpha_s M \\ a_4 = -\alpha_s \\ a_5 = \omega_s \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a_6 = \alpha_s M \\ a_7 = -\gamma_r \\ a_8 = \omega_r \\ a_9 = \alpha_s \beta \\ a_{10} = -\beta \Omega \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a_{11} = -\beta \\ a_{12} = \frac{1}{\sigma_r} \\ a_{13} = -\gamma \\ a_{14} = \omega_r \\ a_{15} = \alpha_s \beta \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a_{16} = \beta \Omega \\ a_{17} = -\beta \\ a_{18} = \frac{1}{\sigma_r} \\ a_{19} = \frac{\sigma_r \mu}{J_T} \\ a_{20} = -\frac{1}{J_T} C_r \end{array} \right.$$

$$a_{21} = -\frac{f}{J_T}$$

Simulation et interprétation :

Dans cette partie on arrive donc à la simulation du modèle de la MADA . Ayant eu le modèle dans la partie précédente par la transformation de Park (Plan(d,q)) liée au champs tournant, et ainsi implémenté pour nous donner les résultats illustrés par les figures qui vont suivre.

Les résultats ont été obtenues pour un modèle d'une MADA à une puissance nominale de $4.5kW$, alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite de fréquence 50 Hz et d'amplitude 220 V au niveau du stator, avec rotor en court-circuit.

Dans ce qui suit nous allons étudier les deux cas d'essai ; à vide, puis avec l'application un couple

Démarrage à vide, $C_r = 0 \text{ N.m}$:

3.3. MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

Ayant pris le couple résistant nul, nous remarquons des figures obtenues que les différentes grandeurs de la machine présentent un régime transitoire oscillatoire. Des différentes figures, on voit bien que les différents paramètres représentés se stabilisent à une valeur finale en régime permanent atteint au bout de 1 s ; la vitesse mécanique du rotor Ω_{gen} atteint une valeur proche de 160 rad/s à vide, Les courants rotoriques se stabilisent à des valeurs quasi nulles de même que pour les puissances, les flux (φ_{ds} , φ_{qs}) se stabilisent aussi à (-1.2 Wb, -0.05 Wb) respectivement.

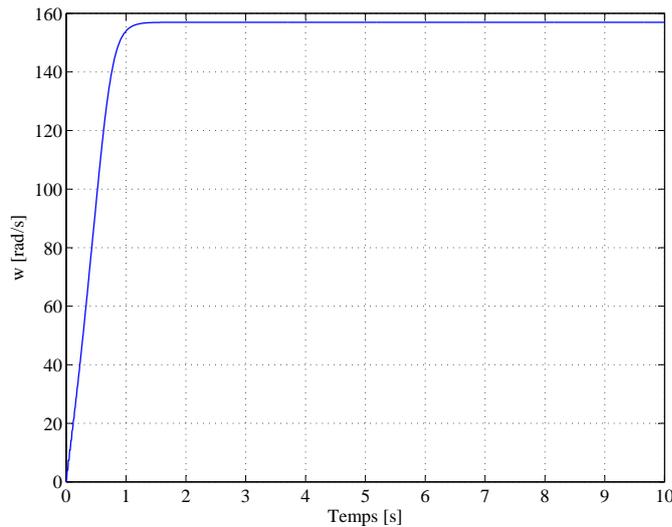


Figure 3.6 – Vitesse mécanique ω_{gen}

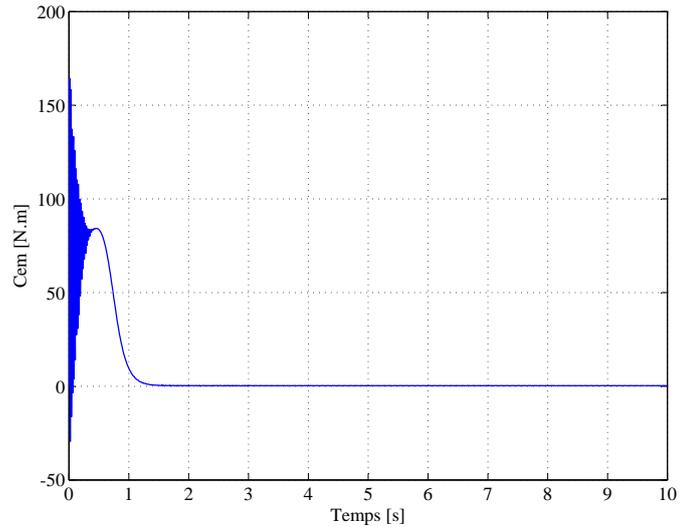


Figure 3.7 – couple électromagnétique du rotor C_{em}

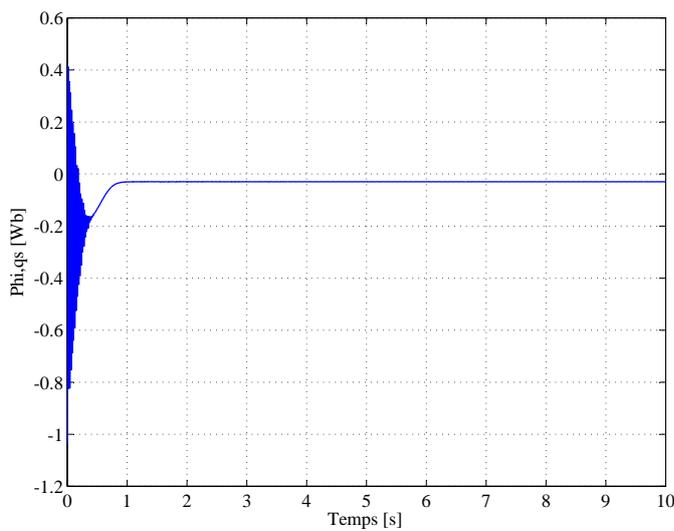


Figure 3.8 – flux statorique $\Phi_{i,qs}$

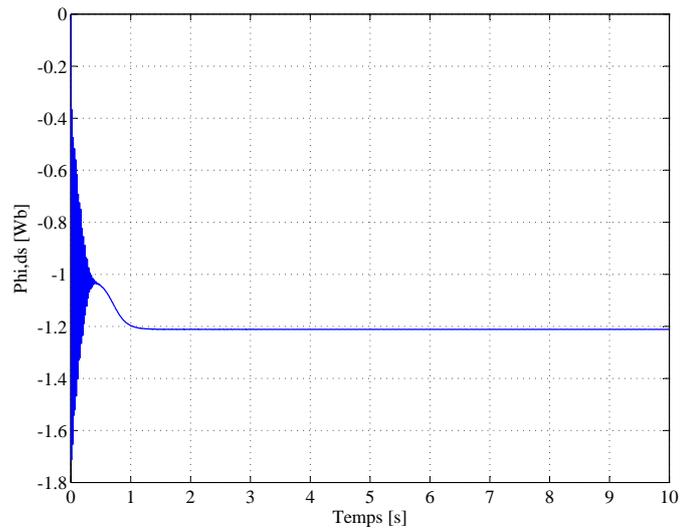


Figure 3.9 – flux statorique $\Phi_{i,ds}$

3.3. MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

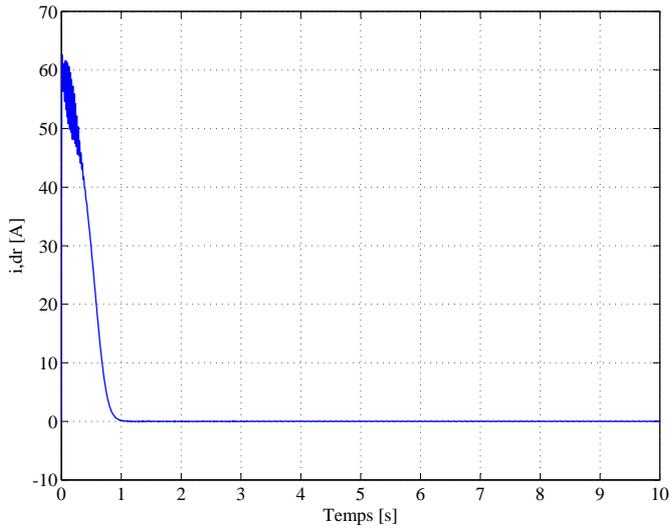


Figure 3.10 – Courant rotorique

i_{dr}

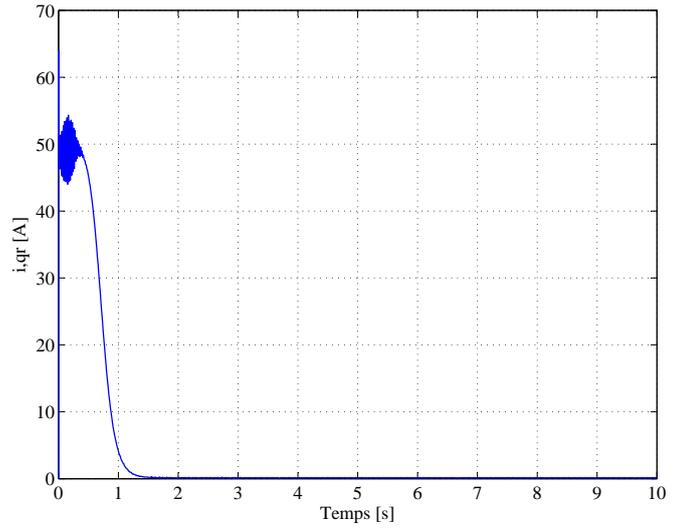


Figure 3.11 – Courant rotorique

i_{qr}

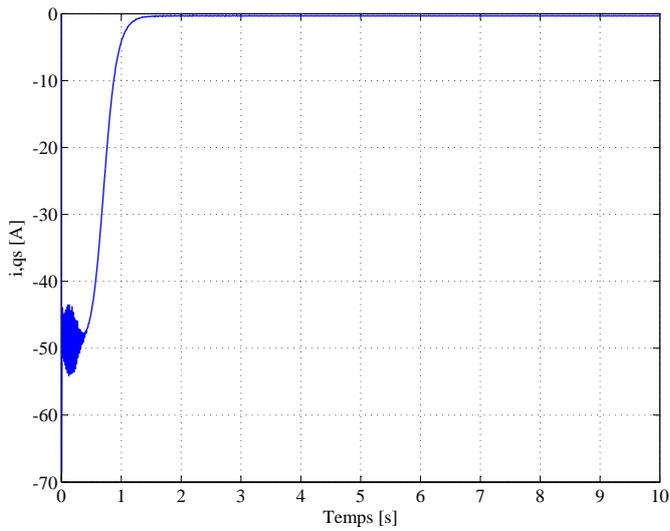


Figure 3.12 – Courant statorique

i_{qs}

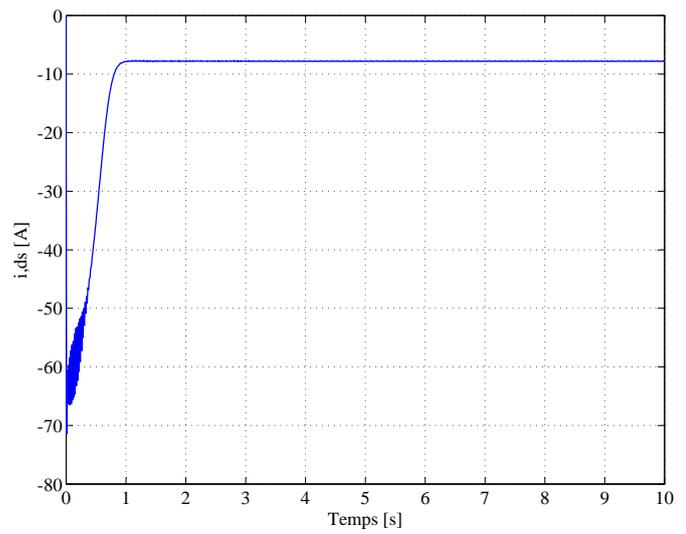


Figure 3.13 – Courant statorique

i_{ds}

3.3. MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

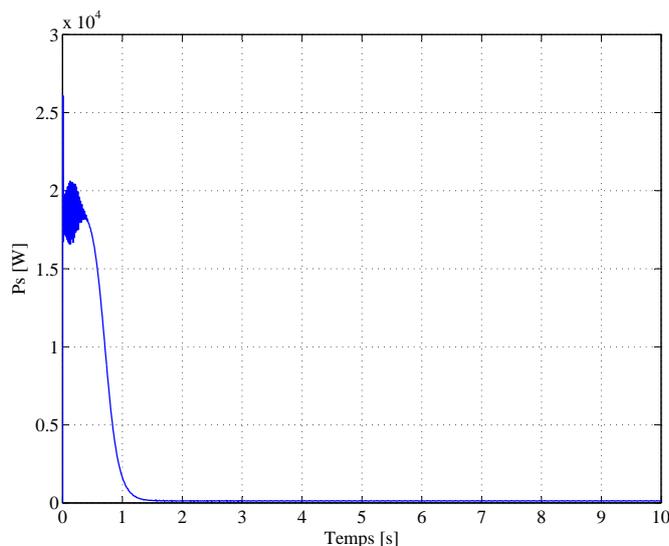


Figure 3.14 – Puissance Active statorique P_s

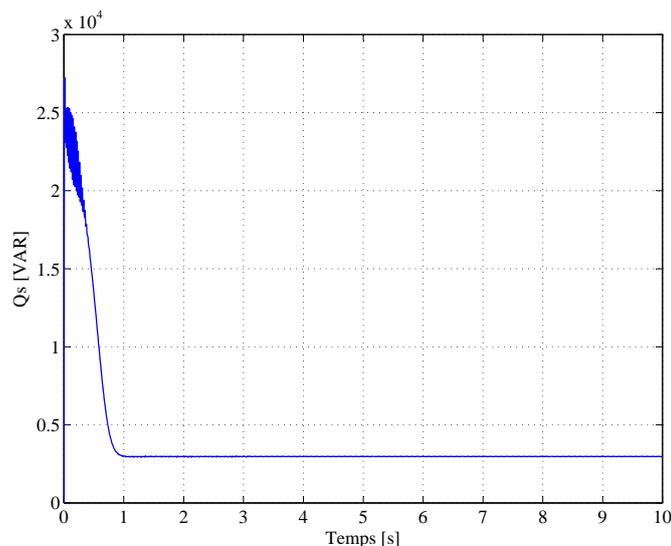


Figure 3.15 – Puissance Réactive statorique Q_s

Démarrage à vide avec application d'un couple résistant, $C_r = 50$ N.m :

Des figures obtenue on remarque que dès l'application du couple résistant le couple électromagnétique C_{em} augmente pour ainsi compenser le couple résistant, ceci induit une diminution de la vitesse de rotation se traduisant par un glissement correspondant au glissement nominale de la machine, ainsi qu'une augmentation du courant rotorique i_{qr} . Idem pour les flux statorique.

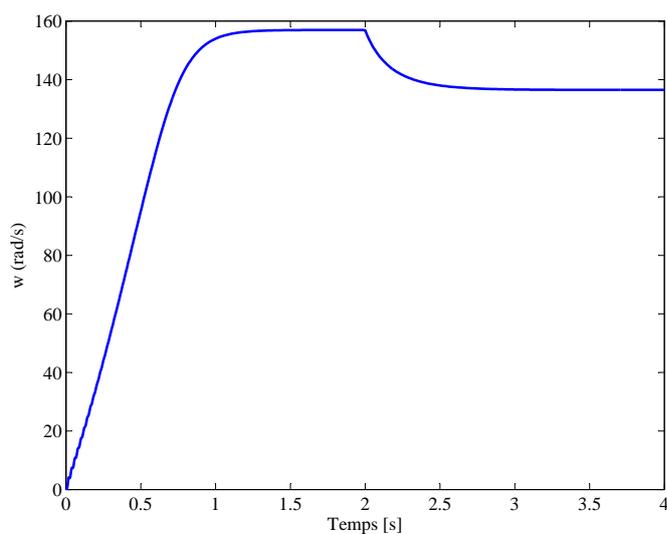


Figure 3.16 – Vitesse mécanique ω_{gen}

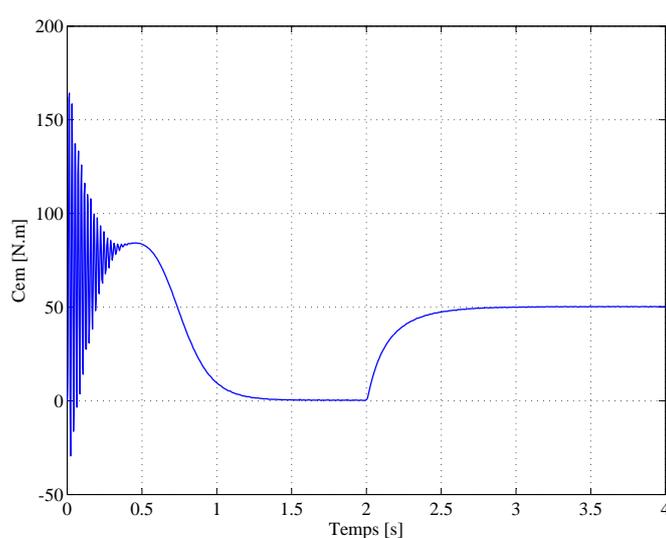


Figure 3.17 – couple électromagnétique du rotor C_{em}

3.3. MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

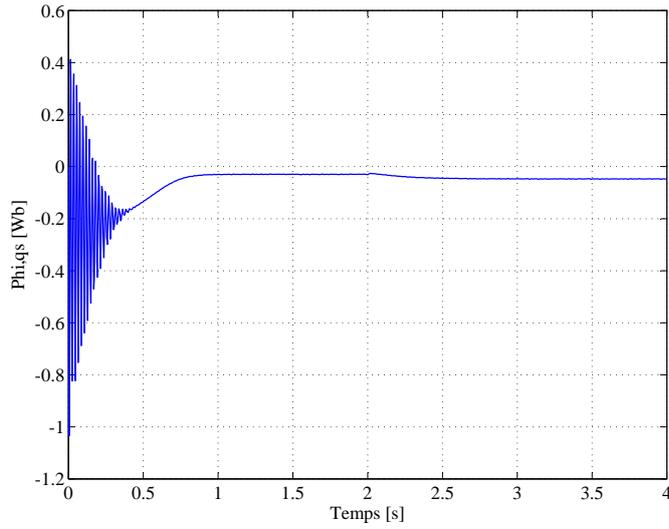


Figure 3.18 – flux statorique
 Φ_{qs}

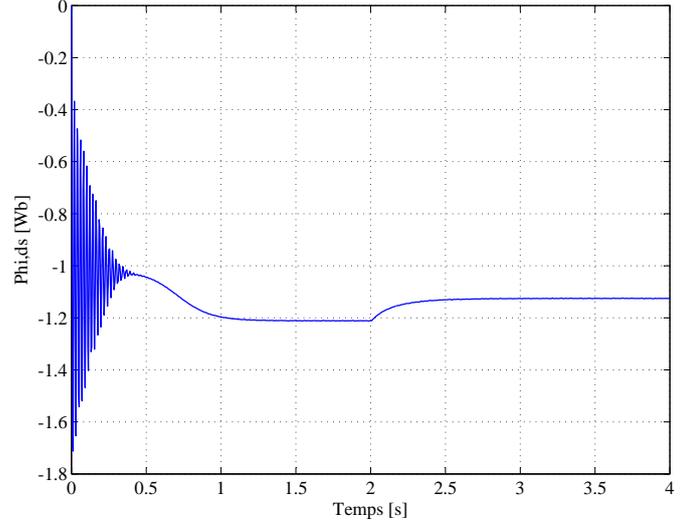


Figure 3.19 – flux statorique
 Φ_{ds}

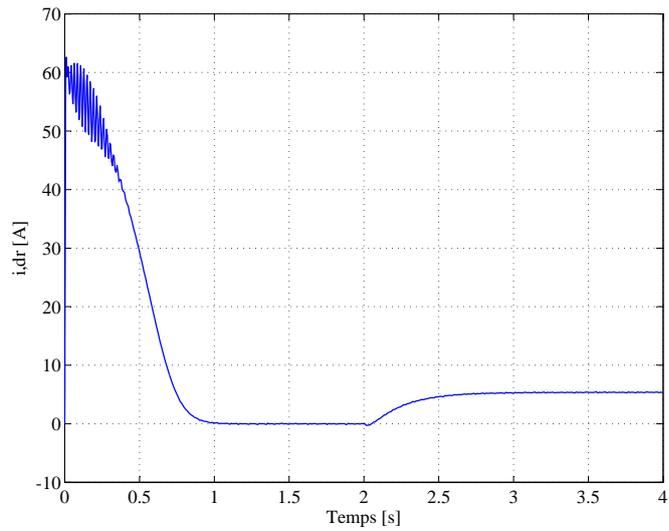


Figure 3.20 – Courant rotorique
 i_{dr}

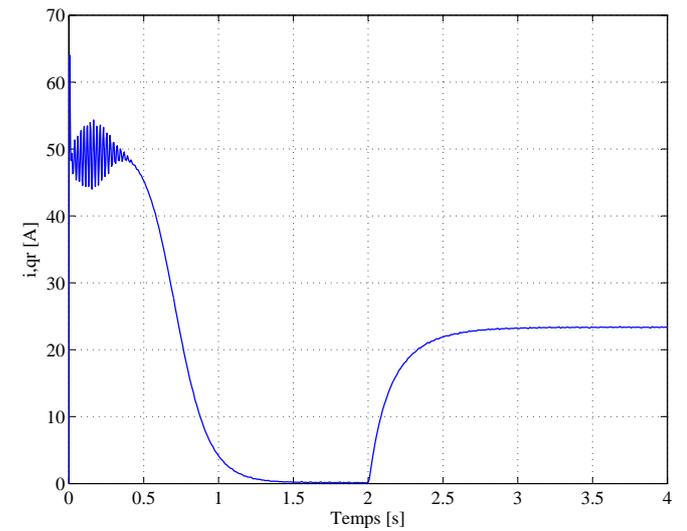


Figure 3.21 – Courant rotorique
 i_{qr}

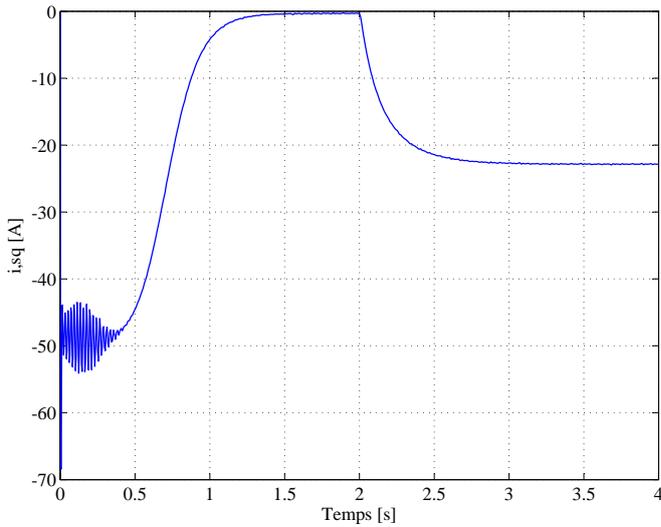


Figure 3.22 – Courant statorique i_{qs}

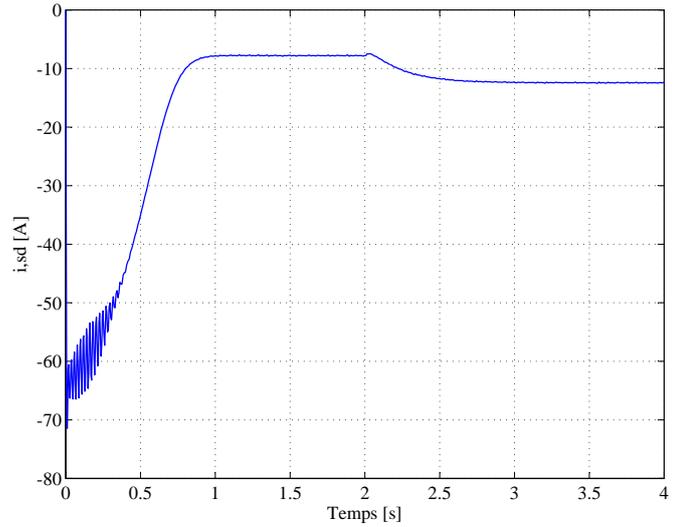


Figure 3.23 – Courant statorique i_{ds}

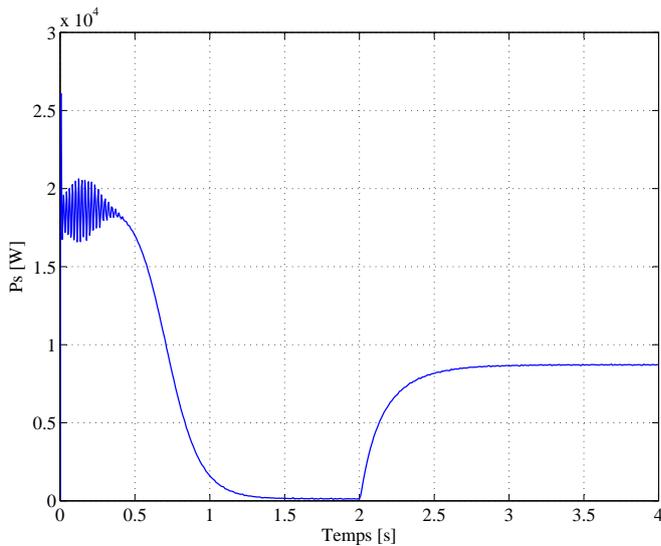


Figure 3.24 – Puissance Active statorique P_s

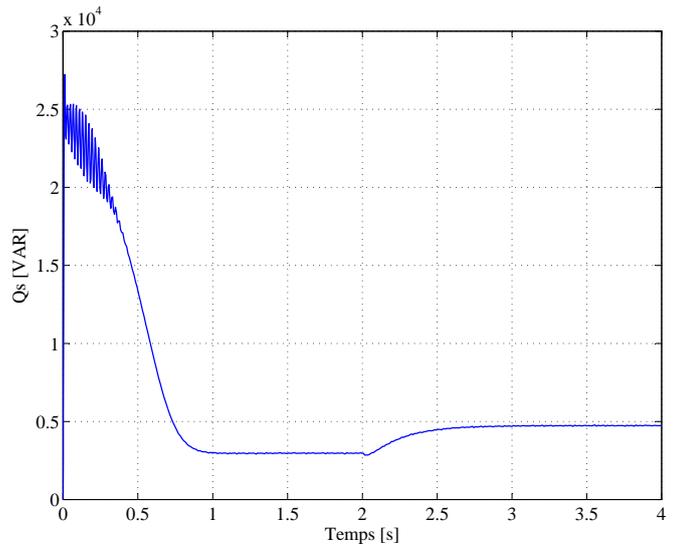


Figure 3.25 – Puissance Réactive statorique Q_s

3.4 Synthèse de la loi de Commande pour la MADA

Pour des raisons évidentes de simplifications, un référentiel d-q lié au champ tournant statorique et un flux statorique aligné sur l'axe d ont été adoptés .

ie :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

De plus,

la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices utilisées dans l'éolien.

ie :

$$R_s = 0$$

La commande de la MADA doit permettre un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par les tensions rotoriques. L'adaptation des équations de puissances satoriques aux hypothèses simplificatrices donne :

Dans le repère biphasé, les tensions et les puissances (actives et réactives) statoriques d'une génératrice asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad \begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (3.28)$$

L'adaptation de ces équations aux hypothèses simplificatrices donne :

$$\begin{cases} v_{ds} = V_s \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (3.29)$$

3.5 Maximisation de la puissance extraite de la turbine :

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes , est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) . Nous présenterons dans cette section la technique de MPPT avec mesure de vitesse du vent et avec connaissance de la caractéristique.

Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

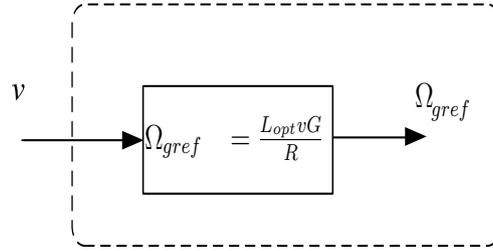


Figure 3.26 – Diagramme simplifié de la technique MPPT Avec mesure de la vitesse du vent et avec connaissance de la courbe.

Calcul de $\Omega_{réf}$ Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne λ doit être maintenu à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$) (Figure 3.7) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ($C_p = C_{pmax}$). Le vitesse de rotation de la génératrice aura dans ce cas comme expression :

$$\Omega_{réf} = \frac{Gv\lambda_{opt}}{R} \quad (3.30)$$

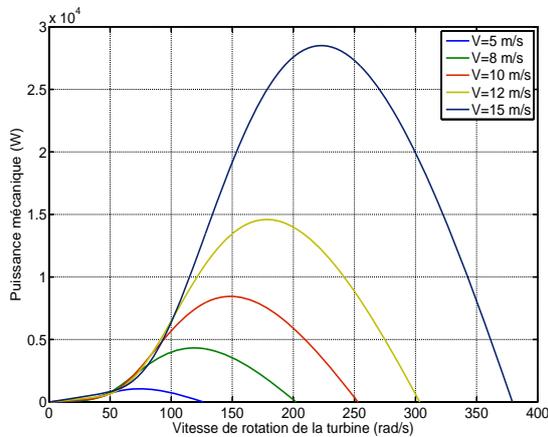


Figure 3.27 – Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

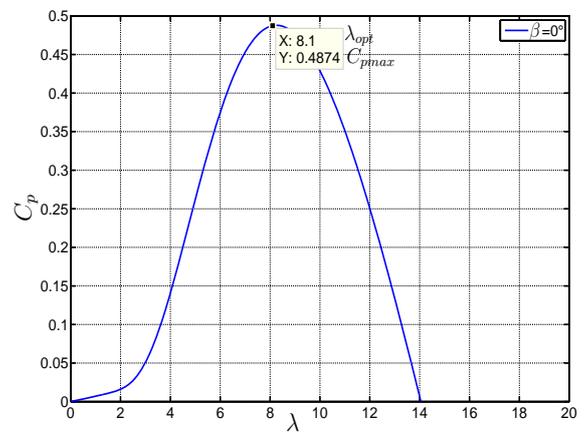


Figure 3.28 – Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 0$

à partir de la courbe caractéristique $C_p = f(\lambda, \beta)$ on peut déterminer graphiquement le couple ($\lambda_{opt} = 0,81, C_{pmax} = 0,49$)

Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur.

Cependant, l'équation (3.12) exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre situé sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du

vent en un seul point de l'espace d'une part, et très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation d'une autre part. L'utilisation d'un filtre spatial peut corriger le problème des turbulences en faisant un filtrage passe-bas de la mesure de l'anémomètre, mais le phénomène du cisaillement (variation de la vitesse du vent avec la hauteur des pales) reste non pris en charge.

3.5.1 MPPT avec asservissement de la vitesse :

1. Synthèse d'une loi de commande par la méthode Lyapunov :

principe : En démarrant d'une fonction $V(x)$ (appelée de Lyapunov) définie positive (FDP) sur \mathfrak{R}^n , la commande sera celle qui impose à $\dot{V}(x)$ d'être une fonction définie négative (FDN). Cependant, le problème majeur réside dans la détermination de cette fonction qu'elle soit FDP. En effet, la détermination de telle fonction n'est pas généralement une tâche aisée. L'objectif de la commande étant de ramener la vitesse de rotation de la génératrice à suivre sa référence, la fonction de Lyapunov que nous devrions choisir doit être dépendante de l'erreur de poursuite de la référence.

$$V(x) = f(e) \tag{3.31}$$

L'erreur de réglage est définie par :

$$e = \Omega - \Omega_{réf} \tag{3.32}$$

On choisit comme fonction de Lyapunov, la fonction suivante et elle est FDP sur \mathfrak{R} :

$$V(x) = \frac{1}{2}e^2 \tag{3.33}$$

Sa dérivée donne :

$$\dot{V}(x) = e \left(-\frac{1}{J}C_{em} - \frac{f}{J}\Omega_g + C_g - \dot{\Omega}_{réf} \right) \tag{3.34}$$

$\dot{V}(x)$ est FDN ssi :

$$\left(-\frac{1}{J}C_{em} - \frac{f}{J}\Omega_g + C_g - \dot{\Omega}_{réf}\right) = -Ke \quad (3.35)$$

on obtient alors :

$$C_{em} = Ke - f\Omega_g + C_g - J\dot{\Omega}_{réf} \quad (3.36)$$

on choisi : $K = 100$

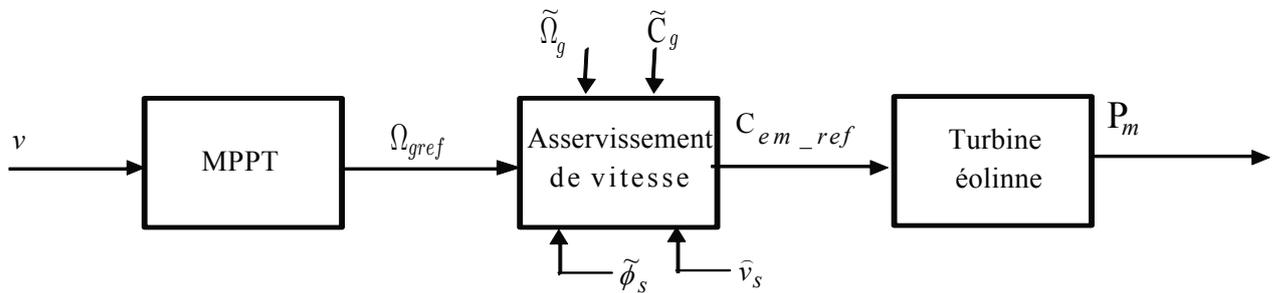


Figure 3.29 – Schéma synoptique de la technique MPPT avec asservissement de la vitesse

3.6 Stratégie de Commande en P et Q :

Le rôle principal du dispositif de contrôle du convertisseur coté MADA dans cette stratégie est de régler le transfert des puissances active et réactive à travers le stator de la MADA . Il reçoit la puissances active référence ($P_{sref} = -P_m$) du block MPPT avec asservissement de la vitesse et envoie les ordres de commande au convertisseur, celle de la réactive de référence on la prend toujours nulle $Q_{sref} = 0$.

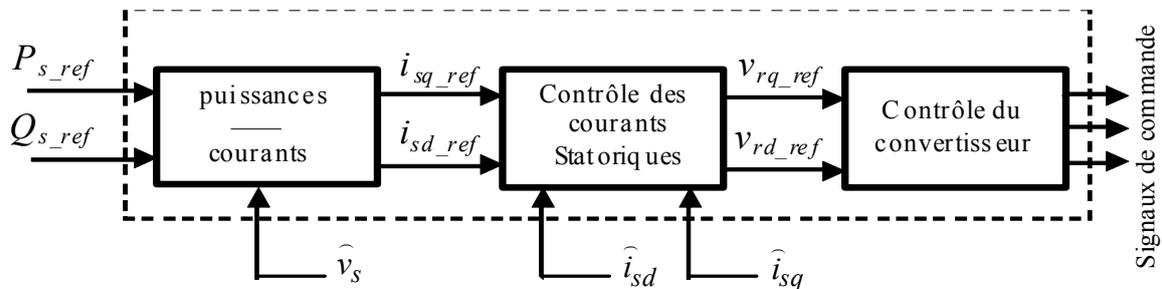


Figure 3.30 – Schéma synoptique du contrôle du convertisseur côté MADA.

Application de la commande par la méthode de Lyapunov à la MADA :

Notre système est dit affine en la commande, il est de la forme :

$$\begin{cases} x = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.37)$$

Où :

$$\begin{cases} f^T(x) = (f_1 f_2 f_3 f_4 f_5) \\ g^T(x) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{18} & 0 \end{pmatrix} \\ u^T = (v_{dr} v_{qr}) \\ h(x) = \begin{pmatrix} P_s \\ Q_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s W_s} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3.38)$$

L'objectif de la commande étant de ramener les puissances active et réactive au stator à suivre leurs références, les fonctions de Lyapunov que nous devrions choisir doivent étre dépendantes des erreurs de poursuite des deux références.

$$V(x) = f(e_1, e_2, \dots, e_i) \quad (3.39)$$

Les erreurs de réglage sont définies comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = y_1 - y_{1ref} \\ e_2 = y_2 - y_{2ref} \end{cases} \quad (3.40)$$

Où :

$$\begin{cases} y_{1ref} = P_s^{opt}, y_1 = P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ y_{2ref} = Q_s^{opt}, y_2 = Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s W_s} \end{cases} \quad (3.41)$$

On choisi comme fonction de Lyapunov, la fonction FDP suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (3.42)$$

Sa dérivée est donnée comme suite :

$$\dot{V}(x) = +e_1(-V_s \frac{M}{L_s} \dot{x}_4 - \dot{P}_{sref}) + e_2(-V_s \frac{M}{L_s} \dot{x}_3 - \dot{Q}_{sref}) \quad (3.43)$$

$\dot{V}(x)$ est FDN ssi :

$$\begin{cases} -V_s \frac{M}{L_s} f_4(x) + -V_s \frac{M}{L_s} a_{18} v_{qr} - \dot{P}_{sref} = -K_1 e_1 \\ -V_s \frac{M}{L_s} f_3(x) + -V_s \frac{M}{L_s} a_{11} v_{dr} - \dot{Q}_{sref} = -K_2 e_2 \end{cases} \quad (3.44)$$

on obtient alors :

$$\begin{cases} U_1 = v_{dr} = -\frac{f_3(x)}{a_{11}} - \frac{1}{V_s \frac{M}{L_s} a_{11}} (\dot{Q}_{sref} - K_2 e_2) \\ U_2 = v_{qr} = -\frac{f_4(x)}{a_{18}} - \frac{1}{V_s \frac{M}{L_s} a_{11}} (\dot{P}_{sref} - K_1 e_1) \end{cases} \quad (3.45)$$

Application de la commande par Mode de glissement à la MADA :

L'objectif de la commande étant de ramener les puissances active et réactive au stator à suivre leurs références, ce problème de poursuite devient un problème de stabilité des erreurs à 0 , définies comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = y_1 - y_{1ref} \\ e_2 = y_2 - y_{2ref} \end{cases} \quad (3.46)$$

En dérivant (3.48) on trouve :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -V_s \frac{M}{L_s} (f_4(x) + a_{18}u_2) - \dot{y}_{1ref} \\ \dot{e}_2 = -V_s \frac{M}{L_s} (f_1(x) + a_{11}u_1) - \dot{y}_{2ref} \end{cases} \quad (3.47)$$

1-Choix de la surface de glissement.

Dans notre cas :

$$\begin{aligned} r_1 &= 1 \\ r_2 &= 1 \end{aligned}$$

donc les surfaces de glissement sont :

$$\begin{cases} S_1 = e_1 = P_s - P_{sref} = y_1 - y_{1ref} \\ S_2 = e_2 = Q_s - Q_{sref} = y_2 - y_{2ref} \end{cases} \quad (3.48)$$

2-L'établissement des conditions d'existence et de convergence.

afin de ramener le système vers la surface de glissement puis le maintenir sur, on doit satisfaire la condition :

$$S_i \dot{S}_i < 0$$

Par le calcul de \dot{S}_i on trouve :

$$\left\{ \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x^T} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x^T} (f + gu) \right. \quad (3.49)$$

$$\left\{ \frac{dS}{dt} = \frac{\partial (y - y_{ref})}{\partial x^T} (f + gu) \right. \quad (3.50)$$

On impose à \dot{S} la forme suivante :

$$\left\{ \dot{S} = -K \text{sign}(S) \right. \quad (3.51)$$

Où :

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \text{diag} \left[k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_m \right] \\ \text{sign}(S) = \left[\text{sign}(S_1) \quad \text{sign}(S_2) \quad \dots \quad \text{sign}(S_p) \right]^T \end{array} \right. \quad (3.52)$$

Finalement, les tensions qui doivent être appliquées comme entrées de commande ont l'expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = v_{dr} = -\frac{f_3(x)}{a_{11}} - \frac{1}{V_s \frac{M}{L_s} a_{11}} (\dot{Q}_{sref} - K_1 \text{sign}(S_1)) \\ U_2 = v_{qr} = -\frac{f_4(x)}{a_{18}} - \frac{1}{V_s \frac{M}{L_s} a_{11}} (\dot{P}_{sref} - K_2 \text{sign}(S_2)) \end{array} \right. \quad (3.53)$$

La commande n'existe que si le terme $V_s \frac{M}{L_s} a_{11} \neq 0$, la condition est assurée dans notre cas (V_s est la tension du réseau donc $V_s \neq 0$ et $a_{11} > 0$).

3.6.1 simulation :

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de la chaîne de production éolienne avec deux approches de commande, Lyapunov et par mode de glissement. Notre but étant d'extraire la puissance maximale pour un profil de vent bien déterminé, on étudie donc l'asservissement de la puissance active, qui doit suivre une référence donnée, et réactive qui doit être nulle.

Résultats de simulations par la méthode de Lyapunov :

3.6. STRATÉGIE DE COMMANDE EN P ET Q :

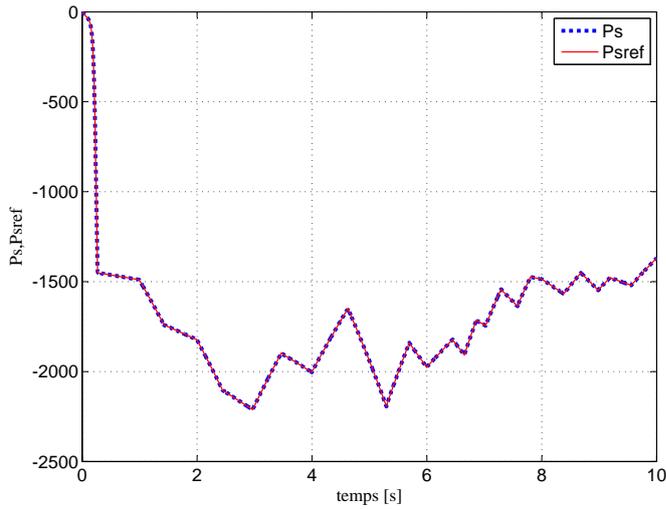


Figure 3.31 – Puissance Active
 $P_s P_{s.ref}$

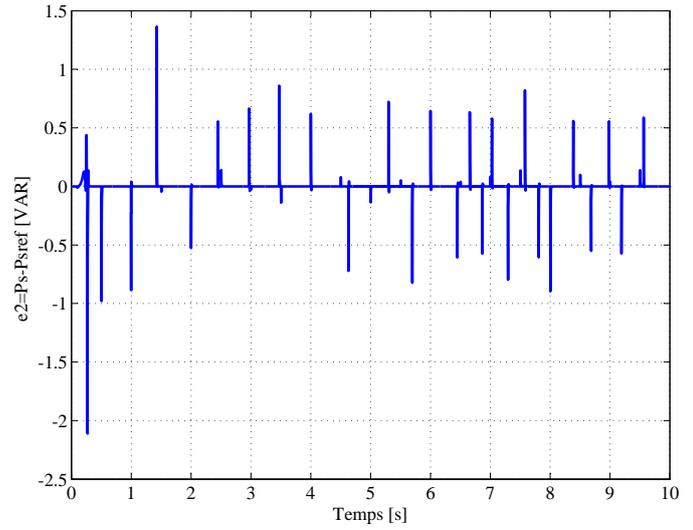


Figure 3.32 – Erreur de poursuite
de la Puissance Active

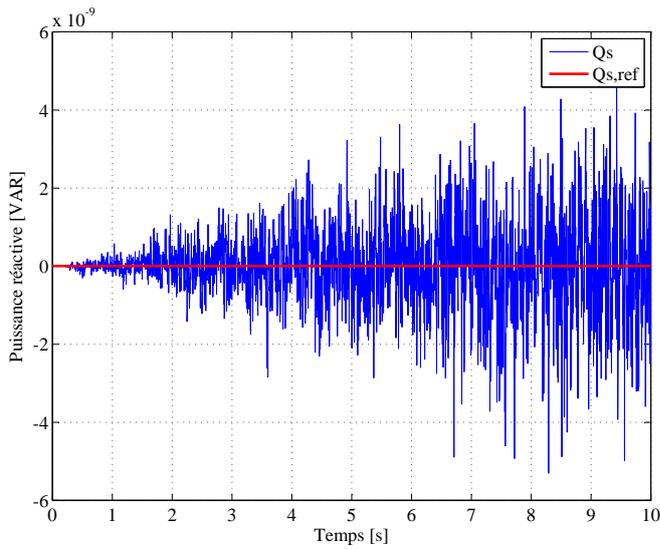


Figure 3.33 – Puissance Réactive
 $Q_s Q_{s.ref}$

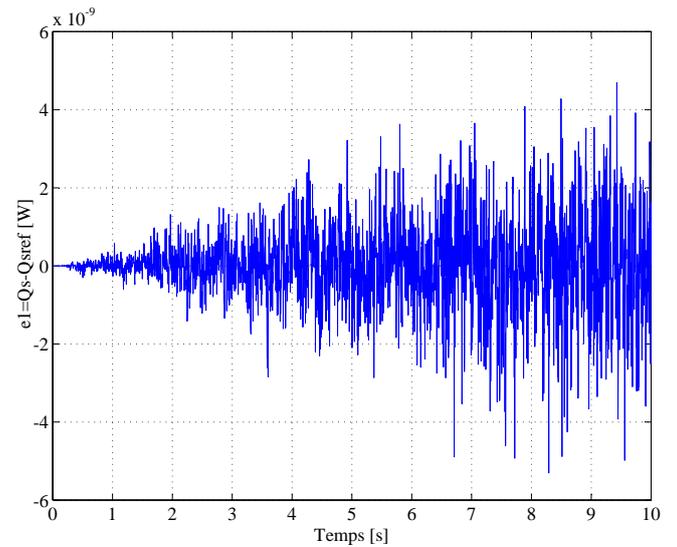


Figure 3.34 – Erreur de poursuite
de la Puissance Réactive

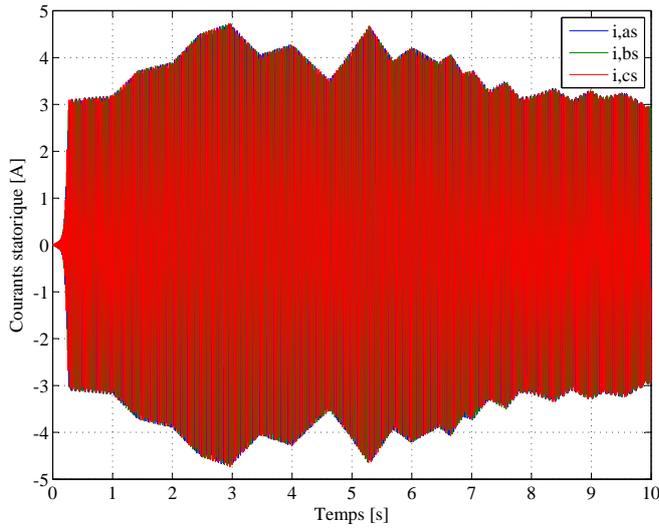


Figure 3.35 – Courants statos-
riques

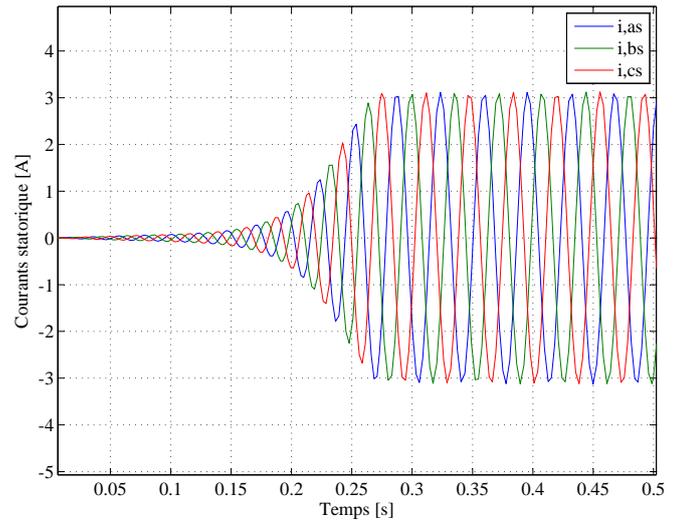


Figure 3.36 – Zoom sur les cou-
rants statoriques

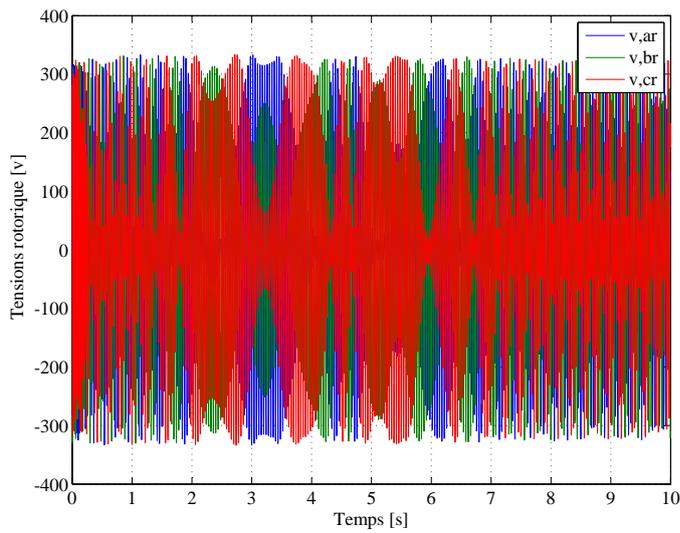


Figure 3.37 – Tensions de com-
mande rotoriques

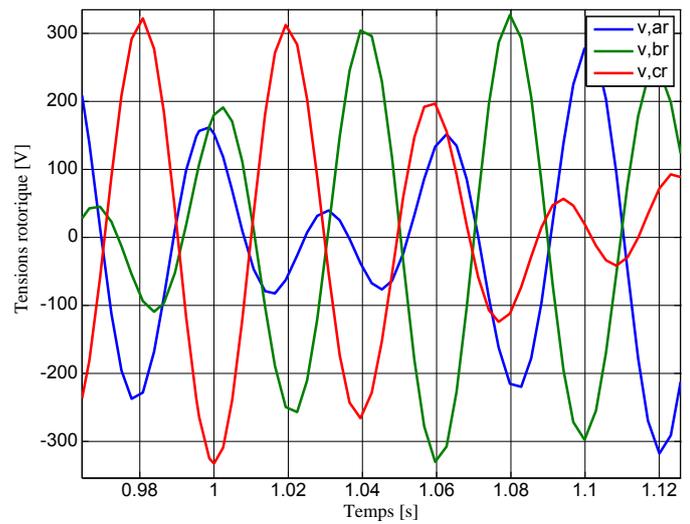


Figure 3.38 – zoom sur les Ten-
sions de commande rotorique

Résultats de simulations par la méthode de Mode de glissement :

3.6. STRATÉGIE DE COMMANDE EN P ET Q :

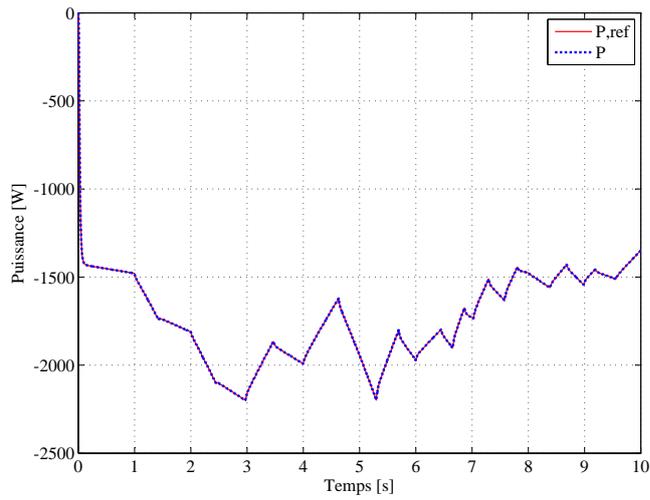


Figure 3.39 – Puissance Active
 $P_s P_{s.ref}$

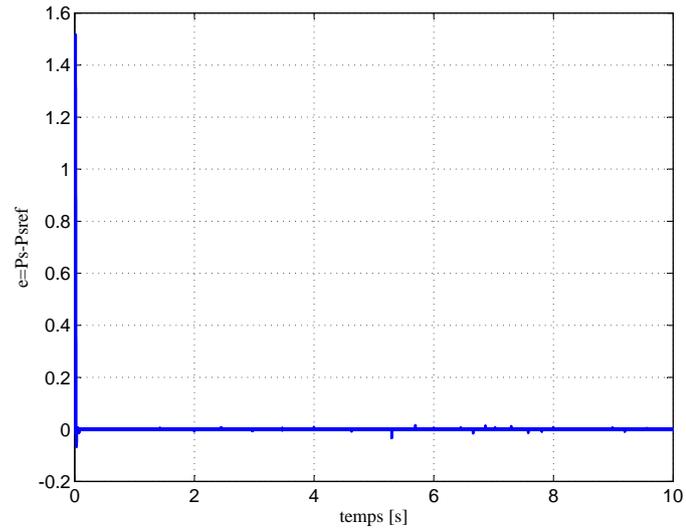


Figure 3.40 – Erreur de poursuite de la Puissance Active

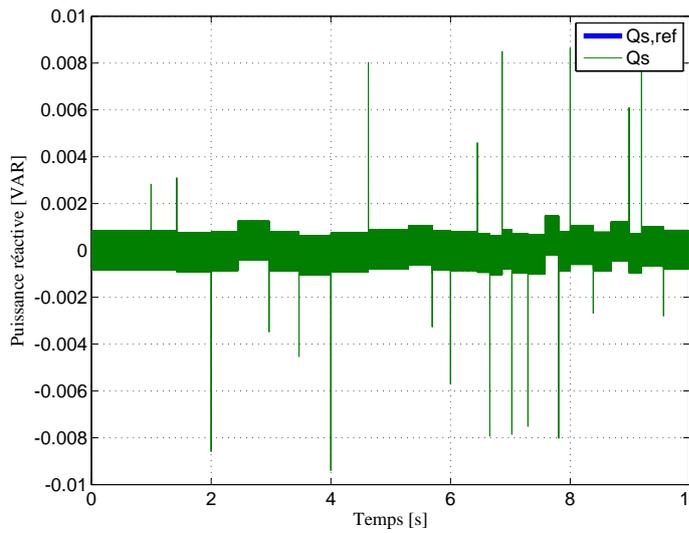


Figure 3.41 – Puissance Réactive
 $Q_s Q_{s.ref}$

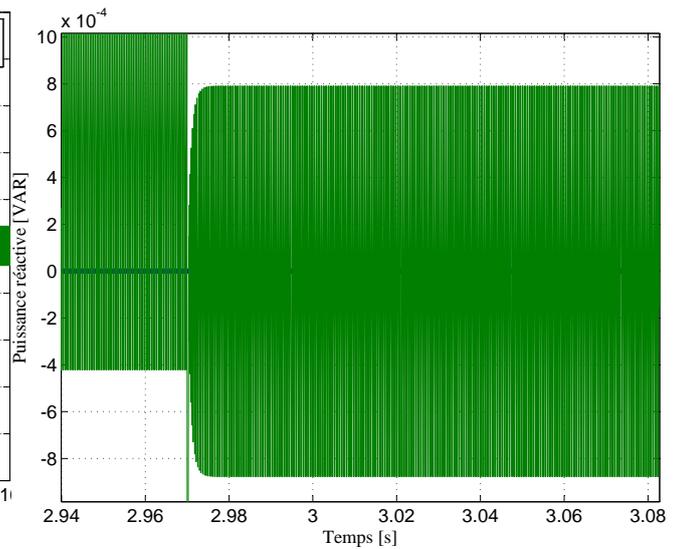


Figure 3.42 – Zoom sur la puissance réactive $Q_s Q_{s.ref}$

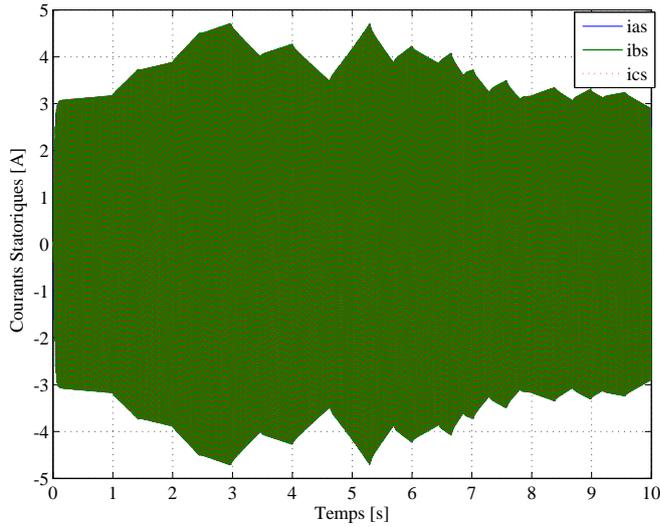


Figure 3.43 – Courants statoriques

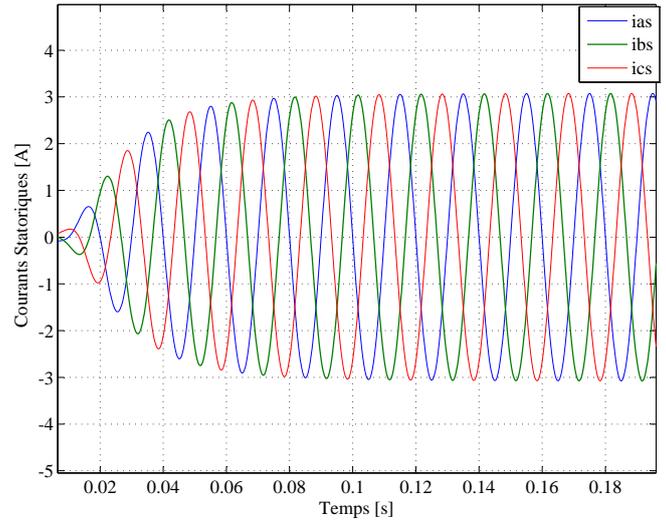


Figure 3.44 – Zoom sur les courants statoriques

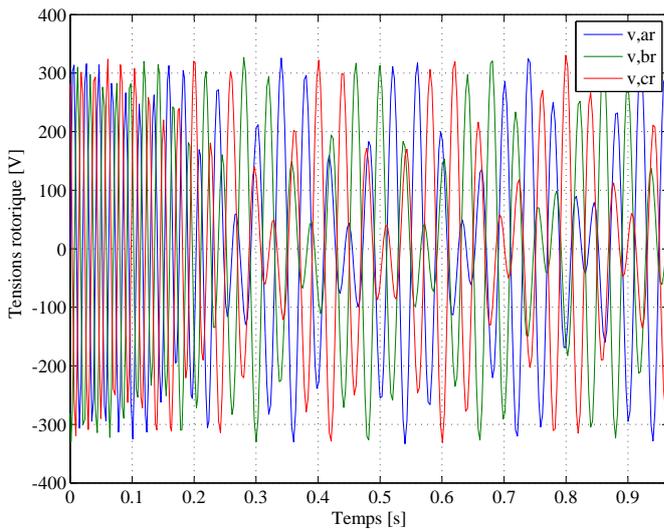


Figure 3.45 – Tensions de commande rotoriques

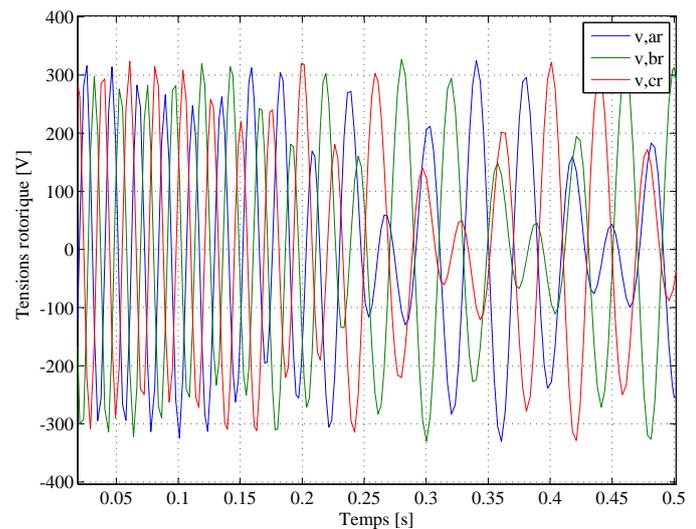


Figure 3.46 – zoom sur les Tensions de commande rotorique

En comparant les figures issues des simulations des commandes par Lyapunov et mode de glissement, on remarque bien que d'une première vue ; les deux approches nous ont bien permis d'atteindre notre objectif de commande étant la poursuite de la puissance. Mais si on se concentre sur les erreurs de poursuite de la puissance active, c'est bien clair que l'approche de commande par mode de glissement est meilleure que Lyapunov en présentant une erreur quasi nulle après un temps court du début de la simulation et reste insensible aux variations de la puissance de référence. Quant à la puissance réactive elle reste quasi nulle pour les deux cas même si l'erreur est de l'ordre de 10^{-9} pour Lyapunov et 10^{-4} pour la commande

par mode de glissement.

3.7 Modélisation de la partie puissance :

Les tensions rotoriques de commande développées précédemment , sont assurées à l'aide d'un cascade onduleur-redresseur entre le réseau et le rotor comme illustre la figure(3.42)

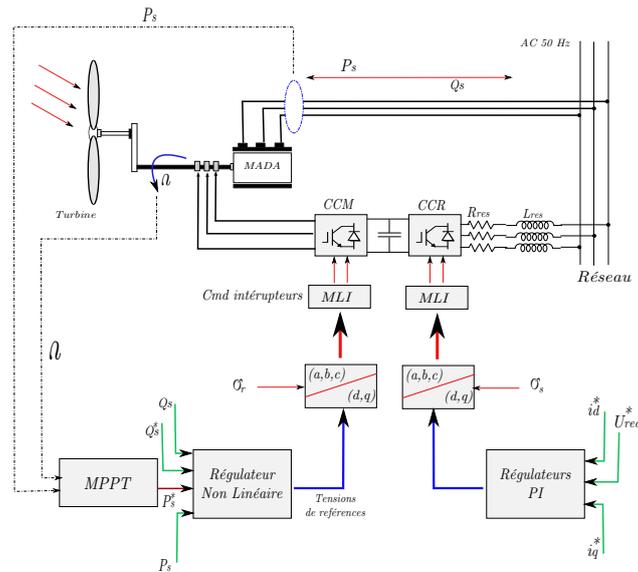


Figure 3.47 – Stratégie globale de la commande de la chaîne éolienne [44]

Convertisseur côté machine (CCM)

L'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue [44]. Ceci est assuré par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. Le cascade ainsi formée comporte deux convertisseurs à MLI.

Ces convertisseurs sont bidirectionnels en puissance, donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur (3.43). Néanmoins les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Convertisseur côté réseau (CCR) :

Le redresseur a le rôle de fournir de la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La tension continue est considérée constante, La figure (3.44) représente la structure

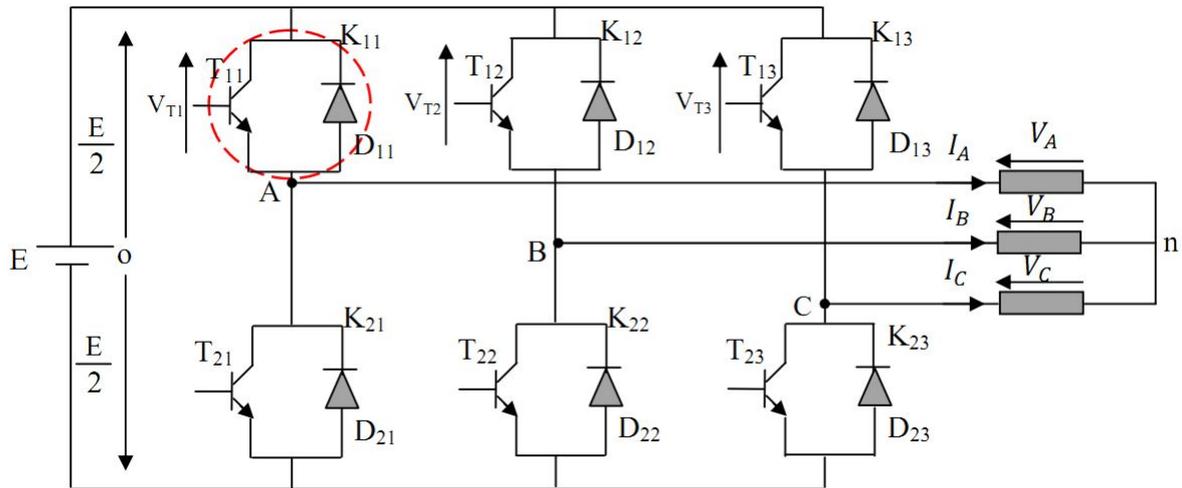


Figure 3.48 – Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors

générale d'un redresseur de courant triphasé à deux niveaux.

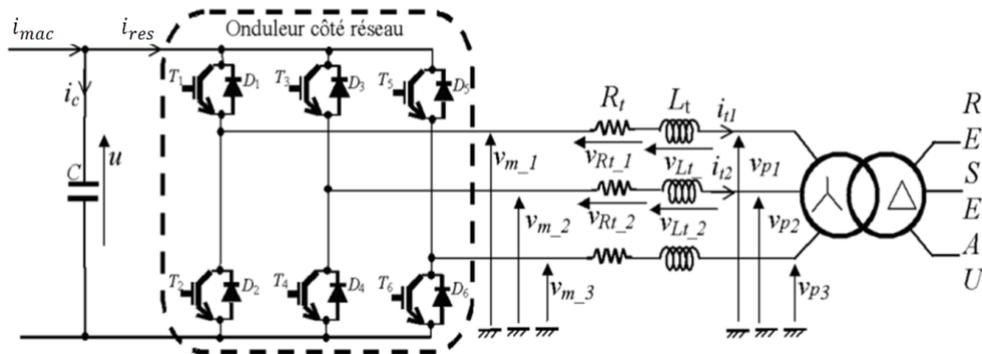


Figure 3.49 – Redresseur triphasé à deux niveaux

:

Modélisation de la source d'alimentation : La source d'alimentation du redresseur est modélisée par une f.e.m triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

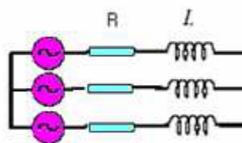


Figure 3.50 – Source d'alimentation

A l'équilibre, avec des impédances des trois phases identiques, les tensions de ligne et les courants fondamentaux sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} v_{res.a} = Ri_{res.a} + L\frac{di_{res.a}}{dt} + v_{an} \\ v_{res.b} = Ri_{res.b} + L\frac{di_{res.b}}{dt} + v_{bn} \\ v_{res.c} = Ri_{res.c} + L\frac{di_{res.c}}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad (3.54)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Avec : S_a, S_b et S_c l'état des commutateurs des trois bras du convertisseur.

$$\begin{cases} i_{res.a} = I_m \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{res.b} = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ i_{res.c} = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{cases} \quad (3.56)$$

Tel que :

- V_m : L'amplitude de la tension ;
- I_m : L'amplitude du courant ;
- ω : La fréquence angulaire ;
- φ : Déphasage entre le courant et la tension.

De l'autre coté, le courant de sortie du redresseur est obtenu par :

$$i_{red} = i_{ch} + i_c = S_a i_{res.a} + S_b i_{res.b} + S_c i_{res.c} \quad (3.57)$$

La tension redressée est extraite à partir de l'équation suivante :

$$U_{red} = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (3.58)$$

Pour une charge caractérisée par une impédance Z , le courant qui la traverse est :

$$i_{ch} = \frac{U_{red}}{Z} \quad (3.59)$$

3.8 Conclusion :

Ce chapitre englobe trois grands axes, où nous avons commencé par la modélisation des diverses parties de la chaîne de production éolienne, de la partie mécanique représentée par la turbine qui assure le transfert de la puissance aérodynamique du vent en puissance mécanique

au niveau de l'arbre, à la partie électrique représentée par la génératrice qui transfère ainsi la puissance mécanique en puissance électrique.

Pour la partie électrique nous avons adopté le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, que nous avons étudié dans le cas moteur puis dans le cas génératrice, pour lequel nous avons développé et étudié deux approches de commande non linéaires, par Lyapunov puis par mode de glissement.

Les résultats de simulation ont bien montré que l'approche par mode de glissement est bien intéressante quant aux erreurs de poursuite de la puissance maximale par rapport à celle de Lyapunov.

Conclusion générale et perspectives :

Ce travail représente une contribution et une continuité aux divers travaux entrepris pour l'amélioration et le développement de l'utilisation des énergies renouvelables dans les systèmes domestiques pour l'alimentation des bâtiments dits à énergie positives, répondant ainsi aux besoins énergétiques tout en préservant les ressources et assurant une rentabilité économique. Nous nous sommes penchés dans ce mémoire sur le problème d'optimisation de la production d'énergie électrique par un système hybride éolien-photovoltaïque tout en répondant aux diverses problématiques d'optimisation de la production.

Dans l'introduction de ce travail nous avons exposé les défis énergétiques auxquelles notre monde est confronté aujourd'hui, chose qui met en évidence l'importance de développer, d'adopter et de généraliser de tels systèmes de production basé sur l'exploitation des diverses sources renouvelables. Cette introduction a été suivie d'un état de l'art, où nous avons présenté les différents concepts des bâtiments performants pour arriver à une définition des bâtiments à énergie positive, puis nous avons parlé des diverses sources d'énergies renouvelables et technologies utilisées dans ce travail tout en soulignant le potentiel dont jouie notre pays, ensuite nous sommes passés aux convertisseurs et systèmes de stockage pour terminer avec une représentation du système globale.

Dans un deuxième chapitre, nous nous sommes concentré sur la chaîne photovoltaïque, commençant par la modélisation du générateur photovoltaïque obtenu à partir du modèle d'une seule cellule. Puis, à travers de ce modèle, nous avons étudié l'influence des divers paramètres naturels, d'ensoleillement et de température, sur la production de l'électricité solaire, des résultats qui ont été identiques aux résultats expérimentaux de la bibliographie présentés dans l'annexe. Après ce, vient l'étude de la problématique de la production maximale à laquelle nous avons répondu en étudiant deux diverses approches, une première classique étant l'approche Perturb & Observe, et une deuxième par la commande stabilisante par Lyapunov et commande par mode de glissement, où des résultats de simulation sont donnés.

Nous avons constaté que la dernière présente de meilleurs résultats quant aux temps de réponse, et oscillations autour du PPM.

Dans le troisième chapitre, c'était au tour de la chaîne de production éolienne, où nous avons commencé par modéliser les différentes parties de la chaîne éolienne, commençant par la turbine à la génératrice, à l'étage d'adaptation. Dans la partie électrique, nous avons adopté le

modèle de la MADA, que nous avons étudié dans les deux cas moteur et générateur, puis comme dans le cas de la chaîne photovoltaïque, nous avons testé deux approches de commande, par Lyapunov puis par mode de glissement, arrivant ainsi à présenter les résultats de simulation, qui ont démontré qu'à un certain point l'approche par la deuxième approche est bien meilleur que la première.

En perspective on propose de :

- Travailler sur les problèmes de connexion au réseau électrique.
- Intégrer un système de gestion intelligente pour la gestion non seulement de la production, mais aussi pour optimiser la consommation.
- Développer d'autre approche de commande.
- Intégrer d'autres types de convertisseur d'électronique de puissance.
- Aller vers le développement des réseaux intelligents pour gérer la production et la consommation de toute une région.

Annexe A

- Paramètres de la cellule photovoltaïque utilisée :

- Courant de court-circuit : $I_{sc} = 8.21A$;
- Courant de saturation : $I_0 = 126.6 * 10^{-11}A$;
- La résistance série : $R_s = 0.01\Omega$;
- Coefficient d'idéalité $A = 1$;
- Nombre de cellules connectées en série dans un module $N_s = 54$
- Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module $N_p = 1$
- Tension de circuit ouvert du module $v_{oc} = 32.9V$

Dans les conditions normales de température et d'ensoleillement :

$T = 25^{\circ}C$ et $G = 1000W/m^2$.

- Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales : $= 3$;
- Longueur d'une pale : $R = 3m$;
- Inertie de la turbine : $J_{turbine} = 0.042kg.m^2$;
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$;
- Coefficient de viscosité : $f = 0.017$;
- Puissance nominale : $P_{elec} = 10kW$;
- Vitesse nominale : $\Omega_{mec} = 1500tr/min$?.

- Paramètres de la MADA :

Valeurs nominales : 4,5 kW ; 220/380V-50Hz ; 15/8,6A ; 1440 tours/min ; p = 2

- Résistance statorique : $R_s = 1.2\Omega$;
- Résistance rotorique : $R_r = 1.8\Omega$;
- Inductance mutuelle : $M = 0.15H$;
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.1554H$;
- Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.1568H$;

- Inertie de la MADA : $J_g = 0.2kg.m^2$;
- Coefficient de frottement : $f = 0.001N.m.s/rad$?.

Annexe B

La commande par mode de glissement :

Parfois le choix de la fonction de Lyapunov $V(x)$ adéquate pour le système est une tâche délicate, donc une autre alternative à la synthèse d'une loi de commande est la loi de commande par mode de glissement « sliding control », elle a prouvé sa robustesse dans son application sur les convertisseurs électriques, dans cette stratégie, on choisit tout d'abord une trajectoire d'état sur laquelle les objectifs de la commande sont atteints. Cette trajectoire d'état est appelée « surface de glissement ». En suite, on détermine le signal de commande à fin de ramener le vecteur d'état à cette surface de glissement et de l'y maintenir pour les temps futurs

Conception de la commande par mode de glissement :

La commande par mode de glissement comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant, et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence ; cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et des perturbations sur le modèle.

La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

- 1-Choix de la surface de glissement.
- 2-L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- 3-Détermination de la loi de commande.

1-Choix de la surface de glissement :

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante : $\dot{X} = AX + BU$
Pour un vecteur de commande U de dimension m , il faut choisir m surfaces de glissement.

Pour ce qui est de la forme de la surface, J.J. Slotine nous proposons une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_{ref} .

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (3.60)$$

Avec :

X : Variable à réguler.

e : L'écart entre la variable à réguler et la référence $x - x_{ref}$.

λ : Une constante positive.

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

2-Condition d'existence et de convergence

La condition de convergence a été proposée par Utkin . Elle consiste à donner une dynamique à la surface convergente vers zéro. Elle est exprimée par :

$$S\dot{S} < 0$$

3-Calcul de la commande :

Une fois la surface de glissement choisie ainsi que la vitesse de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre.

La commande stabilisante suivant le théorème de Lyapunov :

Introduction à la synthèse de loi de commande stabilisante par Lyapunov :

On considère un système non linéaire $\dot{x} = f(x, u)$ On veut déterminer un retour d'état non linéaire $U = g(x)$ à fin de stabiliser le système.

On choisit tout d'abord une Fonction Définie Positive (*FDP*) de *Lyapunov* sur R^n , et on calcule $\dot{V}(x)$

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x, u) \quad (3.61)$$

Ensuite, on essaye de déterminer un retour d'état non linéaire $U = g(x)$ de telle sorte que $\dot{V}(x)$ soit Fonction Définie Négative (*FDN*) sur R^n (ie ; on va forcer la fonction \dot{V} à devenir définie négative à travers le retour d'état).

Bibliographie

- [1]<http://www.new-energy-solution.org/pages/technologie/photovoltaïque/effet-photovoltaïque.html>.
- [2]S.THIERS, « Bilans Énergétiques en Environnementaux de Bâtiments à Énergie Positive », Thèse de Doctorat, Mines ParisTech, 21 Novembre 2008.
- [3]<http://www.cipcsp.com/tutorial/panneau-solaire.html>.
- [4]Matthias Loster. «Total Primary Energy Supply-From Sunlight». [http://www.ez2c.de/ml/solar land area/index.html](http://www.ez2c.de/ml/solar%20land%20area/index.html). 2010.
- [5]K.TOUAFEK, « Etude dun capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [6]M.L.AMMOUR, R.RIANE, « Commande Hybride par Logique Floue d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque-Diesel pour une maison en site isolé », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2011.
- [7]Ameziane Sadek, « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », Mémoire de Magister Université de Batna 2009.
- [8]N.M.BENANI, M.L.BENDIB, « Commande d'une maison à énergie Positive », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [9]Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Anne Labouret, « Cellules solaires, Les bases de l'énergie photovoltaïque », 5ème édition, ETSF, 2010.
- [10]A. BOUHARCHOUCHE, « Etude et commande d'un système de production hybride Eolien-Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique,18 Fevrier 2013.
- [11]S. Astie, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ", Techniques de l'Ingénieur, D 3 936.
- [12]W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [13]R.RIAH, S.TALBI, « Comparaison et Synthèse d'un Nouvel Algorithme MPPT Robuste pour une Chaîne de Production d'Énergie Photovoltaïque », », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2011.

- [14] Z.ZIADI, « Commande Hybride d'une Maison à Energie Positive », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2010.
- [15] S.BELLARBI, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie pour un système éolien de petite puissance, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 57 – 67.
- [16] W. CHABANE, B. OSMANE, "Analyse et Modélisation des Centrales Dispersées, Application sur les Piles à Combustible et les Chaines de Conversion éolienne Basées sur la MADA ». Projet de Fin d'Etude, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2008.
- [17] A.BAHLOUL, O.BELAOUDMOU, « Etude et Commande d'un Système Hybride éolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [18] A. MIRECKI, « Étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [19] R. KEZERLI. « Alimentation et Commande d'une MADA Connectée au Réseau Local, en Utilisant les Convertisseurs Multiniveaux ». Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2009.
- [20] A. HAMID et H. DJELFAOUI. « Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée par une Source Hybride (Eolien - Photovoltaïque) ». Projet de Fin d'Etude, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2009.
- [21] A.ABDELLI, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [22] VECHIU Lonel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université du HAVRE, 2005.
- [23] Ould Mahmoud Abdel Kadet, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, 2008.
- [24] T. Scimone, «Energy Storage in Electric Power Generation Plant from Renewable Sources », Université Degli Studi di Catania, Italie, 2010.
- [25] H. G. Arantazamendi,« Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro-réseaux », Doctorat, INP de Grenoble, 2006.

- [26] J. De Dinechin , « Le stockage énergétique », Cours A5-2 Energies Renouvelables. ENSTA, 2007.
- [27] J. Lachaize, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », Doctorat automatique, INP de Toulouse , 2004.
- [28] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, et M. L. Crow, « Energy Storage Systems for Advanced Power Application », Proceedings Of The IEEE, VOL. 89, NO. 12, December 2001.
- [29] D. Koussa, et M. Belhamel, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel)», Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen, 2007.
- [30] L. Stoyanov, G. Notton et V. Lazarov, « Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N1, 2007, PP.1-18.
- [31] V. Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique ». Doctorat, CNAM, Paris, 2008.
- [32] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous, « Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte », Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N1, pp. 145 – 162, 2011.
- [33] M. Amin, « Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converter », Doctorat, Université Internationale de Florida, 2012.
- [34] I. Vichiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelable dans un réseau autonome », Mémoire de Doctorat, Université du Havre, Décembre, 2005.
- [35] D. Lu, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain », Doctorat, ECL Lille, 2010.
- [36] Dariga MEEKHUN, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [37] Stéphane PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [38] N. Pandiarajan, R. Ramaprabha, Ranganath Muthu, « Application of circuit model for photovoltaic energy conversion system», research article, India, 2011. Sylvain BRI-

- GAND, « Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque », éditions du moniteur, 2008.
- [39]SAURABH KASAT, « Analysis, Design and Modeling of DC-DC Converter Using SIMULINK», Bachelor of Engineering, Institute of Engineering and Technology, India, 2004.
- [40]A . Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Etude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [41]A.Rufer, P.Barrade, « Cours d'électronique de puissance, Conversion DC/DC», EPFL, Lausanne, 2008.
- [42]Snehasish Pal, Suvarun Dalapati, Digital simulation of two level inverter based on space vector pulse width modulation», Indian Journal Of Science and Technology, Vol. 5 No.4, India, April 2012.
- [43]M.M.BATOUCHE, K.BESSADI, « Commande de la vitesse optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une MADA », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2005.
- [44]B.BENAMIRA, A.BEHLOULI, « Commande non linéaire de la puissance optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA couplée au réseau électrique », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [45]F.BOUCHAFAA, « Etude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC. Application à la conduite d'une MSAP », Mémoire de Magister, USTHAB, 22 février 2006.
- [46]Tarjei Midtsund, « Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems. Evaluation of Current Control Structures for Voltage Source Converters operating under Weak Grid Conditions », Master of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, July 2010.
- [49]BISKER Asma, «Commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau »,Projet de fin d'étude (ENP),juin 2012.