

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté Sciences et Technologie
Département Electrotechnique et Automatique
Laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG)

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : ST ; Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie Renouvelable

Présentée par :
LAKHDARA Amira

Intitulée :

***Contribution à la gestion d'énergie dans un système
hybride à énergies renouvelables***

Soutenue le : 13 octobre 2022

Devant le Jury composé de :

LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Président
MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Encadreur
BAHI Tahar	Professeur	Univ. Badji Mokhtar Annaba	Co-encadreur
MENDACI Sofiane	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
RAHEM Djamel	Professeur	Univ. Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi	Examineur
RAHMANI Lazhar	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Setif 1	Examineur

Année 2022

Remerciements

C'est avec un grand soulagement et une fierté que j'achève ce modeste travail réalisé avec beaucoup d'espoir de réussite.

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu.

Je remercie chaleureusement mon encadreur Mr Moussaoui Abdelkrim Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma et mon co-encadreur Mr Bahi Tahar Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba pour avoir assuré de manière agréable le suivi de mon travail et pour m'avoir fait profiter de leurs expériences. Je tiens à leurs exprimer ma reconnaissance pour toute leur gentillesse et leurs petits soins face à ma curiosité, leurs encouragements, leur disponibilité et leurs conseils avisés qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Les honorables membres de jury : Mr Lemzadmi Ahcene Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma d'avoir accepté de présider le jury ainsi que Messieurs Mendaci Sofiane Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma, Rahem Djamel Professeur à l'université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi , Rahmani Lazhar Professeur à l'université Ferhat Abbas de Setif I les membres de jury qui trouveront en moi toute la fierté que je ressens, pour l'honneur et le temps qu'ils consacreront à me juger et le cas échéant à m'apprécier.

Le grand mérite revient aussi à mes chers parents, à ma petite famille, mes frères et à mes amis qui m'ont soutenu jusqu'au bout.

Le mot de la fin revient à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

RESUME

Le concept de développement des installations de conversion d'énergies renouvelables (solaire, éolien, etc.) est adopté par la majorité des pays comme une propriété à promouvoir de toute urgence afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et de faire face à l'épuisement incontestable des ressources énergétiques fossiles (pétrole, charbon, etc.) et un développement économique durable. Cependant, l'épuisement accéléré des ressources fossiles causé par la demande énergétique sans cesse croissante et les enjeux de la préservation de l'environnement des émissions de gaz polluants sont les principaux facteurs qui font de l'utilisation des ressources renouvelables pour la production d'électricité une alternative prometteuse pour assurer la transition énergétique.

Les énergies éoliennes et solaires sont les principales sources renouvelables. Toutefois elles sont de types intermittents car la puissance éolienne produite dépend de la vitesse du vent et celle produite par l'énergie solaire varie également avec la variation horaire, quotidienne et saisonnière de l'irradiation solaire.

Dans cette thèse, la contribution consiste à l'étude du comportement et l'analyse de fonctionnement sous différentes conditions climatiques d'un système de production d'électricité hybride (solaire et éolienne), connecté au réseau et doté d'un banc de batteries (banc de stockage d'énergie). L'objectif est d'évaluer les performances de la configuration hybride autonome proposée, qui garantit un fonctionnement optimal en termes de production de l'énergie électrique et en termes de gestion de l'énergie entre les différentes sources renouvelables (panneaux photovoltaïques, éolienne et stockage d'énergie (batterie)) afin de répondre à la demande de charge sous des conditions naturelles variables et pour les sites isolés.

ABSTRACT

The concept of development of renewable energy conversion facilities (solar, wind, etc.) is adopted by the majority of countries as a property to be promoted urgently in order to provide global and sustainable solutions to environmental challenges and to deal successfully with the indisputable exhaustion of fossil energy resources (oil, coal, etc.) and sustainable economic development.

However, the accelerated depletion of fossil resources caused by the steadily increasing energies demand and the challenges of preserving the environment from pollutant emissions are the main factors that make the use of renewable resources for electricity production a promising alternative to ensure the energy transition.

Wind and solar energy are the main renewable sources. However, they are of intermittent types because the wind power produced depends on the wind speed and the power that is produced by solar energy also varies with the hourly, daily and seasonal variation in solar irradiation.

In this thesis, the contribution consists in the study of the behavior and the analysis of operation under different climatic conditions of a hybrid electricity production system (solar and wind), connected to the network and equipped with a battery bank. (energy storage bench).

The objective is to evaluate the performance of the proposed autonomous hybrid configuration, which guarantees optimal operation in terms of the production of electrical energy and in terms of energy management between the different renewable sources. (photovoltaic panels, wind turbine and energy storage (battery)) in order to meet the load demand under varying natural conditions and for isolated sites.

ملخص

ان مفهوم تطوير مرافق تحويل الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وما إلى ذلك) متبني من طرف غالبية الدول مثل المشاريع التي يتم الترويج لها بشكل هام و عاجل من أجل إيجاد و توفير حلول شاملة ومستدامة للتحديات البيئية ومواجهة الاستنزاف الواقع على موارد الطاقة الأحفورية (النفط ، الفحم ، الخ) و الحفاظ على تنمية اقتصادية مستدامة.

اذ هذا الاستنزاف المتسارع للموارد الأحفورية و الناجم عن الطلب المتزايد على الطاقة وتحديات الحفاظ على البيئة من انبعاثات الملوثات هي العوامل الرئيسية التي تجعل استخدام الموارد المتجددة لإنتاج الكهرباء بديلاً واعدًا لضمان انتقال الطاقة.

ان طاقة الرياح والطاقة الشمسية هي مصادر الطاقة المتجددة الرئيسية. ومع ذلك، فهي ذات طبيعة متقطعة لأن طاقة الرياح المنتجة تعتمد على سرعة الرياح وتلك التي تنتجها الطاقة الشمسية تختلف أيضاً باختلاف التباين الساعي واليومي والموسمي في الإشعاع الشمسي.

تتكون المساهمة في هذه الاطروحة حول دراسة السلوك وتحليل العملية في مختلف الظروف المناخية لنظام إنتاج الكهرباء الهجين (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) ، المتصل بالشبكة ومجهز ببنك بطاريات (بنك تخزين الطاقة). و الهدف هو تقييم أداء التكوين الهجين المستقل المقترح ، والذي يضمن التشغيل الأمثل من حيث إنتاج الطاقة الكهربائية ومن حيث إدارة الطاقة بين مختلف المصادر المتجددة (الألواح الكهروضوئية ، وتخزين طاقة الرياح (البطارية)) إلى تلبية الطلب على الحمل في ظل الظروف الطبيعية المتغيرة والمواقع المعزولة

SOMMAIRE

RESUME	i
SYMBOLES ET ACRONYMES	IV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	IX
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LE DEVELOPPEMENT ET L'UTILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

1.1	Introduction	4
1.2	État de l'art sur contexte énergétique mondial	4
1.3	Systèmes hybrides à énergies renouvelables	7
1.4	Types et définitions des sources des énergies renouvelables	8
1.5	Evaluation des énergies solaire et éolienne en Algérie	10
1.6	Systèmes photovoltaïques	11
1.6.1	Avantages	12
1.6.2	Inconvénients	12
1.6.3	Systèmes autonomes	13
1.6.4	Systèmes hybrides	13
1.6.5	Système PV raccordé au réseau	13
1.6.6	Irradiation solaire	14
1.6.7	Cellule et générateur photovoltaïque	16
1.7	Système Eolien	19
1.7.1	Principe de l'énergie éolienne	20
1.7.2	Classification des éoliennes	21
1.7.3	Types d'éoliennes (selon axe)	21
1.7.3.1	Turbines éoliennes à axe vertical	22
1.7.3.2	Éoliennes à axe horizontal	22
1.7.3.3	Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal	23
1.7.4	Zones de fonctionnement de l'éolienne	24
1.7.5	Application des éoliennes	25
1.7.5.1	Systèmes isolés	25
1.7.5.2	Systèmes hybrides	26
1.7.5.3	Systèmes liés au réseau	26
1.8	Introduction aux énergies renouvelables dans les applications agricoles	26
1.9	Gestion optimale des flux d'énergies dans les systèmes hybrides	30
1.9.1	Classification des systèmes hybrides	30
1.9.1.1	Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	30
1.9.1.2	Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage	31

1.9.2	Topologies des systèmes électriques hybrides	31
1.9.2.1	Couplage de bus DC	31
1.9.2.2	Couplage de bus AC	31
1.10	Conclusion	32

CHAPITRE 2

MODELISATION DYNAMIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

2.1	Introduction	33
2.2	Structures des systèmes hybrides	34
2.2.1	Architecture autonome	34
2.2.2	Architecture connectée au réseau	35
2.3	Modélisation du système photovoltaïque	35
2.3.1	Modélisation de la cellule photovoltaïque	36
2.3.2	Modèle électrique équivalent	36
2.3.3	Modèle électrique à une diode	37
2.3.4	Facteur d'idéalité	40
2.3.5	Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)	40
2.3.6	Simulations et interprétation des caractéristiques du panneau	41
2.4	Modélisation du système éolien	42
2.4.1	Modélisation de la turbine	43
2.4.2	Modélisation de l'arbre de la machine	44
2.4.3	Simulation d'un système éolien	45
2.5	Modélisation du système de stockage	46
2.5.1	Modélisation de la batterie	47
2.5.2	Choix de la batterie	48
2.5.3	Résultats de simulations	48
2.6	Modélisation des composants	53
2.7	Modélisation des Convertisseurs statiques	55
2.7.1	Convertisseur DC-DC (Hacheur)	55
2.7.1.1	Hacheur survolteur (Boost-converter)	56
2.7.2	Convertisseur AC-DC (Redresseur)	58
2.7.3	Convertisseur DC-AC (Onduleur)	59
2.7.4	Convertisseur Bidirectionnel DC-DC (Buck-Boost)	61
2.8	Conclusion	63

CHAPITRE 3

COMMANDE D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE

3.1	Introduction	64
3.2	Méthode de poursuite du point de puissance maximale	64
3.2.1	Technique de perturbation et observation	66
3.2.2	Méthode par incrémentation de conductance	68
3.2.3	Double Intégral Sliding Mode Control (DISMC)	70
3.3	Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV	72
3.4	Techniques méta-heuristiques	74
3.4.1	Technique d'essaim d'optimisation des particules (PSO)	74

3.4.2	Technique d'optimisation des loups gris (GWO)	75
3.4.3	Technique cuckoo search (CS)	76
3.4.4	Résultats de simulations	79
3.5	Système éolien	82
3.5.1	Commande par mode glissant	82
3.5.2	Commande synergétique	87
	3.5.2.1 Synthèse du régulateur synergétique	87
	3.5.2.2 Conception du régulateur synergétique de vitesse	89
	3.5.2.3 Résultats de simulations	90
3.6	Conclusion	91

CHAPITRE 4

SIMULATION ET GESTION DU FLUX ENERGETIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

4.1	Introduction	92
4.2	Contrôle du système	92
4.3	Architecture connecté au réseau	94
	4.3.1 Système sans stockage	94
	4.3.2 Système avec stockage	96
4.4	Architecture autonome	98
4.5	Système de pompage hybride	102
	4.5.1 Modélisation du système de pompage	105
	4.5.2 Dimensionnement du système de pompage	106
	4.5.2.1 Panneau photovoltaïque	106
	4.5.2.2 Turbine éolienne	107
	4.5.2.3 Dispositif de stockage	107
	4.5.2.4 Système de pompage	108
	4.5.3 Analyse du système de pompage sous irradiation uniforme	108
	4.5.4 Analyse du système de pompage sous irradiation non uniforme	110
4.6	Conclusion	113
	CONCLUSION GENERALE	113
	REFERENCES	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Production mondiale d'énergie en 2021	6
Figure 1.2	Développement mondiale des filières renouvelables productrices d'électricité	7
Figure 1.3	Evaluation des énergies renouvelables en Algérie	10
Figure 1.4	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil	14
Figure 1.5	Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM	15
Figure 1.6	Irradiation solaire en Algérie	15
Figure 1.7	Structure d'une cellule photovoltaïque	17
Figure 1.8	Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque	18
Figure 1.9	Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark	19
Figure 1.10	Vitesse du vent en Algérie	20
Figure 1.11	Principe de conversion de l'énergie éolienne	20
Figure 1.12	Correspondance taille et puissance des éoliennes	21
Figure 1.13	Types d'éoliennes	22
Figure 1.14	Éoliennes à axe horizontal	22
Figure 1.15	Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal	23
Figure 1.16	Zones de fonctionnement d'une éolienne	25
Figure 1.17	Energies renouvelables dans les applications agricoles	27
Figure 1.19	Classification des systèmes hybrides	30
Figure 2.1	Système de Conversion Hybride autonome	34
Figure 2.2	Système de Conversion Hybride connecté au réseau	35
Figure 2.3	Modèle à deux diodes	36
Figure 2.4	Modèle à une diode	36
Figure 2.5	Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque	37
Figure 2.6	Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$	38
Figure 2.7	Caractéristique résultante d'une connexion de n_s cellules en série	40
Figure 2.8	Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle	41
Figure 2.9	Caractéristiques de la puissance photovoltaïque PV	41
Figure 2.10	Structure du système de conversion de l'énergie éolienne	42
Figure 2.11	Schéma bloc d'une turbine éolienne	43
Figure 2.12	Schéma bloc du modèle de la turbine	45
Figure 2.13	Caractéristiques de la turbine éolienne	45
Figure 2.14	Caractéristique coefficient $C_p=f(\beta)$	46
Figure 2.15	Modèle R-C de la batterie	47
Figure 2.16	Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=300V$	49
Figure 2.17	Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=600V$	50
Figure 2.18	Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1000V$	51
Figure 2.19	Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1200V$	52
Figure 2.20	Schéma de principe du filtre R_fL_f	53
Figure 2.21	Schéma de principe d'une PLL	54
Figure 2.22	Périodes de fermeture et ouverture d'un interrupteur	56

Figure 2.23	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	56
Figure 2.24	Schémas équivalents du hacheur survolteur: K	56
Figure 2.25	Schéma équivalent du convertisseur AC-DC	58
Figure 2.26	Symbole de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé	59
Figure 2.27	Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux	60
Figure 2.28	Schéma du montage du convertisseur Buck –Boost	61
Figure 2.29	Structure du régulateur PI	62
Figure 2.30	Schéma de la commande du convertisseur Buck-Boost	62
Figure 3.1	Système de conversion photovoltaïque	65
Figure 3.2	Caractéristique du panneau photovoltaïque sous irradiation variable et température constante	65
Figure 3.3	Caractéristique du panneau photovoltaïque sous irradiation constante et température variable	65
Figure 3.4	Principe de la technique P&O	66
Figure 3.5	Algorithme de la méthode P&O	67
Figure 3.6	Puissance extraite avec P&O sous E variable	67
Figure 3.7	Puissance extraite avec P&O sous T variable	68
Figure 3.8	Organigramme d'algorithme MPPT (Inc-Cond)	69
Figure 3.9	Puissance extraite avec Inc-Cond sous E variable	69
Figure 3.10	Puissance extraite avec Inc-Cond sous T variable	70
Figure 3.11	Puissance extraite avec DISMC sous E variable	71
Figure 3.12	Puissance extraite avec DISMC sous T variable	72
Figure 3.13	Générateur PV sous condition d'ombrage partiel	73
Figure 3.14	Organigramme d'algorithme PSO	74
Figure 3.15	Organigramme d'algorithme GWO	75
Figure 3.16	Mouvement d'un loup pendant le processus de recherche	76
Figure 3.17	Organigramme d'algorithme CS	78
Figure 3.18	$P_{pv}=f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	79
Figure 3.19	Puissance du PV	79
Figure 3.20	$P_{pv}=f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	80
Figure 3.21	Puissance du PV	80
Figure 3.22	$P_{pv}=f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	81
Figure 3.23	Puissance du PV	81
Figure 3.24	Système de conversion éolienne	82
Figure 3.25	Schéma bloc de la chaine avec CMG	83
Figure 3.26	Grandeurs coté turbine pour un vent variable par paliers	84
Figure 3.27	Grandeurs coté réseau pour un vent variable par paliers	85
Figure 3.28	Grandeurs côté turbine pour un vent aléatoire	85
Figure 3.29	Grandeurs côté réseau pour un vent aléatoire	86
Figure 3.30	Représentation graphique de la solution de l'équation fonctionnelle pour différentes conditions initiales	88
Figure 3.31	Schéma bloc de la commande de vitesse par mode synergétique	90
Figure 3.32	Vitesse du vent	90
Figure 3.33	La vitesse de la génératrice et la vitesse de référence	90
Figure 3.34	Puissance de la génératrice	91
Figure 3.35	Vitesse du vent	91
Figure 3.36	La vitesse de la génératrice et la vitesse de référence	91
Figure 3.37	Puissance de la génératrice	91
Figure 4.1	Organigramme du fonctionnement du système de gestion des puissances	93

Figure 4.2	Système de conversion hybride connecté au réseau	94
Figure 4.3	Comportement du SCH sans système de stockage	96
Figure 4.4	Comportement du SCH avec système de stockage	98
Figure 4.5	Système de conversion hybride autonome	99
Figure 4.6	Profil des variables d'entrée	100
Figure 4.7	Comportement des puissances	101
Figure 4.8	Mode de charge et de décharge	101
Figure 4.9	Système de pompage hybride	102
Figure 4.10	Système de pompage hybride sous ombrage partiel	103
Figure 4.11	Disposition du système de pompage hybride	104
Figure 4.12	Solution de pompage hybride	104
Figure 4.13	Schéma de la circulation de l'énergie dans un système de pompage hybride	105
Figure 4.14	Un module monocristallin	107
Figure 4.15	Profil de l'irradiation	108
Figure 4.16	Profil du vent	109
Figure 4.17	Puissance de la pompe et la puissance totale	109
Figure 4.18	EDC de la batterie	110
Figure 4.19	Débit de la pompe	110
Figure 4.20	Profil de l'ombrage partiel	111
Figure 4.21	MPPT sous ombrage partiel	111
Figure 4.22	Zoom MPPT sous ombrage partiel	112
Figure 4.23	Puissance totale sous ombrage partiel	112
Figure 4.24	Débit de la pompe sous ombrage partiel	112

LISTE DES TABLEAUX

Tab 1.1	Développement des énergies renouvelables dans le monde	6
Tab 1.2	Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie	11
Tab 1.3	Performances des différentes filières silicium	18
Tab 1.4	Les trois catégories des éoliennes	21
Tab 3.1	Comparaison des trois méthodes d'optimisation	72
Tab 3.2	Comparaison des quatre méthodes d'optimisation	81
Tab 4.1	Variables d'entrée	99
Tab 4.2	Profil de la charge	99
Tab 4.3	Caractéristiques d'un module	107
Tab 4.4	Caractéristiques de la turbine	107
Tab 4.5	Caractéristique de la batterie	108
Tab 4.6	Caractéristiques du système de pompage	108

Symbole	Désignation	Unité
I_{CC}	courant de court-circuit de la cellule	(A)
I_{01}	courant de saturation de la diode D_1	(A)
I_{02}	courant de saturation de la diode D_2	(A)
I_{Rp}	courant à travers la résistance parallèle	(A)
I	courant fourni par la cellule	(A)
$I_{cc(ref)}$	courant de court circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de $1000W/m^2$	(A)
I_{max}	courant maximal	(A)
V_{pv}	tension aux bornes de la cellule	(V)
V_{co}	tension du circuit ouvert	(V)
V_{th}	tension thermique	(V)
V_{max}	tension maximale	(V)
K	constante de Boltzmann	(J / K)
T_c	température effective de la cellule	(K)
T_{ref}	température de référence de la cellule correspondante à la température standard $25\text{ }^\circ\text{C}$	(K)
q	charge de l'électron	(C)
n	facteur d'idéalité	
n_1	facteur de non idéalité de la jonction de la diode D_1	
n_2	facteur de non idéalité de la jonction de la diode D_2	
R_p	résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction	(Ω)
R_s	résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion	(Ω)
R_{ch}	résistance de charge	(Ω)
K_i	coefficient de température du courant I	(%/°C)
E	irradiation	(W/m^2)
E_0	irradiation nominal standard	(W/m^2)
P_{max}	puissance maximale	(W)
P_{inc}	puissance d'irradiation incidente	(W)
FF	facteur de forme	
η	rendement de la conversion	(%)
n_s	nombre de cellules en série	
n_p	nombre de cellules en parallèle	
P_v	puissance du vent	(W)
$P_{éol}$	puissance éolienne	(W)
ρ	densité de l'air	(kg/m^3)
S	surface de la voile	(m^2)
V_v	vitesse du vent	(m/s)
R	rayon de la voile	(m)
H	hauteur de la turbine	(m)
λ	vitesse spécifique	
Ω_T	vitesse angulaire de rotation des pales	(rad/s)
C_P	coefficient de puissance	
β	angle de calage	
C_T	couple éolien	(N.m)
C_{em}	couple électromécanique	(N.m)
J	moment d'inertie de l'ensemble	($Kg.m^2$)

K_f	coefficient de frottement	////
V_c	source de tension idéale d'entrée	(V)
V_{bat}	tension aux bornes de la batterie	(V)
I_{bat}	courant développé par la batterie	(A)
R_v	résistance interne variable de la batterie	(Ω)
R_i	résistance interne	(Ω)
k_b	coefficient de polarisation	////
C_{bat}	capacité de la batterie	(Ah)
Q_d	quantité de charge	(Ah)

Acronymes

<i>IRENA</i>	International Renewable Energy Agency
<i>ADEME</i>	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie en France
<i>LREE</i>	Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne
<i>SER</i>	Sources d'énergie renouvelable
<i>SHSER</i>	Système hybride à source d'énergie renouvelable
<i>GPV</i>	Générateur Photovoltaïque
<i>WECS</i>	Wind Energy Conversion System
<i>SH</i>	Système Hybride
<i>SCH</i>	Système de Conversion Hybride
<i>WECS</i>	Système de conversion de l'énergie éolienne
<i>EDC</i>	Etat De Charge
<i>CC</i>	Courant Continu
<i>CA</i>	Courant Alternatif
<i>PPM</i>	Point de Puissance Maximum
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<i>P&O</i>	Perturbation et Observation
<i>Inc_Cond</i>	Incrémentation de Conductance
<i>DISMC</i>	Double Integral Sliding Mode Control
<i>OP</i>	Ombre Partiel
<i>PG</i>	Point Global
<i>PP</i>	Point Partiel
<i>PSO</i>	Partical Swarm Optimization
<i>GWO</i>	Grey Wolf Optimisation
<i>CS</i>	Cuckoo Search
<i>CMG</i>	Contrôle par Mode Glissant

INTRODUCTION GENERALE

Le besoin en énergie électrique n'a pas cessé de croître depuis plusieurs années consécutives exigeant en conséquence une consommation importante des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'uranium, etc. Cependant, la consommation accrue de ce type de sources fossiles pour la production de l'électricité accentue l'émission de gaz à effet de serre et augmente la pollution. Alors, produire de l'électricité à base d'énergies renouvelables (ER) est une solution prometteuse pour produire proprement et palier au problème du réchauffement climatique de la planète auxquels le monde est confronté [1, 2]. En effet, les énergies renouvelables notamment les panneaux photovoltaïques et les éoliennes posent plusieurs défis en raison de leur nature stochastique et intermittente que de nos jours les systèmes de stockage d'énergie par batterie peuvent être une solution prometteuse pour gérer le caractère intermittent car leurs performances sont nettement acceptables et leur coût très abordable.

Les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelables et écologiques en exploitant les énergies propres [3,4]. Ces sources d'énergies renouvelables (SER) offrent plusieurs avantages, elles sont inépuisables et leur impact sur l'environnement est beaucoup plus faible que les sources d'énergies traditionnelles. Les SER offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Les modèles énergétiques envisagés suscitent de plus en plus d'intérêt. Ils constituent une aide précieuse à la décision concernant les réglementations énergétiques. Il faut noter que ces modèles ne font pas de prédictions mais permettent notamment d'évaluer sur le long terme plusieurs scénarios possibles d'évolution du système énergétique, d'anticiper les évolutions et les impacts des prix de l'énergie à moyen et long terme et d'estimer les émissions de polluants [5,6].

Le problème de la puissance variable et non garantie de l'énergie produite par les sources d'énergies renouvelables peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride. Le système hybride à sources d'énergies renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi les quelles une au moins est renouvelable [7,8]. Les systèmes hybrides permettent incontestablement d'assurer une production économique de l'énergie électrique tout en protégeant l'environnement des émissions du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère terrestre. Le dioxyde de carbone (CO₂) est le deuxième gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère, après la vapeur d'eau, les deux contribuant respectivement à hauteur de 26 % et 60 % à l'effet de serre.

L'objectif principal est d'exploiter les SER disponibles afin d'améliorer l'efficacité globale et la rentabilité du système en termes de coût et de disponibilité, sachant que le bilan « écologique », est supposé à priori favorable. Comme un nombre important de pays en développement bénéficie de plusieurs jours ensoleillés, ainsi que du vent, un système hybride solaire/éolien est naturellement une solution digne d'analyse. Cependant, les énergies solaire et éolienne peuvent être catégorisées comme des sources intermittentes, car il ne s'agit pas d'une alimentation continue et ne répond pas à la demande de charge d'électricité depuis un certain temps. Pour ces deux types d'ER, l'énergie éolienne est la source la plus affectée par rapport à l'énergie solaire en raison de son inconstance. De même, ces deux sources d'énergies imprévisibles, autonomes, produiront une énergie électrique fluctuante et ne pourront pas assurer le niveau minimum de continuité de puissance requis par la charge.

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système hybride photovoltaïque - éolien peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement. Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas, mais au contraire, peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi, on se propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Le stockage d'énergie au moyen des batteries d'accumulateurs est considéré dans ce travail, dont le but de stocker le surplus d'énergie fournie par le système hybride, et d'assurer la continuité d'approvisionnement en électricité en cas d'une défaillance dans le réseau électrique.

Le contenu de cette thèse est structuré en quatre chapitres représentés comme suit :

- Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le développement des énergies renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne aussi l'option d'hybridation de ces dernières et leurs utilisations dans le domaine d'agriculture.
- Le deuxième chapitre traite la modélisation dynamique du système hybride : modélisation des trois (03) sources d'alimentation, le système photovoltaïque, le système éolien et le système de stockage et des convertisseurs statiques (Hacheur Boost, Hacheur Buck-Boost, Redresseur et Onduleur).
- Le troisième chapitre présente la commande d'un système d'énergie hybride, plusieurs commandes pour le système photovoltaïque classiques et méta-heuristiques dans le but d'extraire le point de puissance maximale MPPT sous différentes conditions climatiques ainsi que deux (02) commandes de réglage de vitesse pour le système éolien dans le but aussi de chercher le point de puissance maximale;
- Le quatrième chapitre présente la simulation et la gestion du flux énergétique du système hybride. Ce dernier contient deux (02) sources principales (générateur photovoltaïque et éolienne) et une source auxiliaire (batterie). Afin d'évaluer cette hybridation, un système de pompage est lié à ce système de production d'électricité.
- Nous clôturons la thèse par une conclusion générale et les éventuelles perspectives.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LE DEVELOPPEMENT ET L'UTILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

1.1 Introduction

L'énergie consommée dans le monde repose, essentiellement, sur les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon etc.). Cependant l'épuisement annoncé des ressources fossiles notamment le pétrole a nécessité une prise de conscience des décideurs à travers le monde pour trouver une alternative en urgence à cette ressource afin de satisfaire la demande sans cesse croissante en énergie électrique [9-11]. Grâce à cela, les études ont révélé que l'exploitation des ressources renouvelables comme la biomasse, géothermique, le vent et le soleil etc., est une solution prometteuse vu qu'elles soient issues de la nature, inépuisables et propres [12]. Ainsi, parmi celles-ci l'énergie du vent (Eolien) et celui du soleil (Photovoltaïque) ont connu un développement remarquable dans le domaine de la production d'électricité. Notons aussi que la disponibilité de ces dernières est gratuite et qu'en plus leurs processus de transformation s'effectuent sans pollution.

Par ailleurs, la combinaison à la fois d'énergie éolienne et d'énergie photovoltaïque (transformation hybride) conduirait à réduire au minimum l'exigence de stockage, et par conséquent le coût global du système et permet de satisfaire la demande qui requise par la charge à tout moment de l'année constitue de nos jours d'une principale contrainte économique et technologique.

Dans ce chapitre, nous souhaitons présenter et expliquer quelques données sur la production et la consommation énergétique dans le monde.

1.2 État de l'art sur contexte énergétique mondial

Le développement continu et progressif des installations industrielles et des équipements domestiques ont entraîné une augmentation conséquente en besoin de production de l'énergie électrique. Cependant, pour faire face à cette demande, les soucis majeurs et urgents de l'humanité est de faire de l'efficacité énergétique une priorité de la politique internationale en vue de satisfaire le besoin énergétique, donc protéger l'environnement, réduire les émissions

de gaz à effet de serre, économiser l'énergie pour le développement économique, réduire les inégalités et responsabiliser les acteurs. Cette problématique est la cause principale du développement remarquable des énergies renouvelables car elles sont considérées comme une alternative aux énergies fossiles que leur exploitation sera difficile et mieux rare dans un proche avenir [13]. En effet, les sources d'énergies renouvelables ont fait l'objet, au cours des dernières années, d'une attention particulière en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles, atténuer les effets des changements climatiques et répondre à la croissance globale des besoins énergétiques [14, 15].

On appelle « énergies renouvelables » les énergies dont le renouvellement s'effectue naturellement et assez rapidement pour qu'on les considère comme "inépuisables" [16,17]. A titre d'exemple, citons les principales énergies renouvelables actuellement utilisées dans le monde : biomasse traditionnelle, énergies renouvelables thermiques (solaire, biomasse, géothermie), hydroélectricité, biocarburants et les énergies renouvelables électriques (solaire, éolien, géothermie, biomasse, biogaz). Toutefois, le taux d'utilisation de ces différentes énergies renouvelables demeure très faible par rapport à la production énergétique mondiale totale bien que l'enjeu de la transition soit de parvenir à 50% [18, 19]. Ceci en raisons que depuis 1990, le taux de leur intégration dans la consommation d'énergie mondiale n'a pas atteint le niveau désiré et que la crise sanitaire du coronavirus a fortement impacté les politiques d'installations de parc renouvelables. On estime à -18% pour le solaire et -12% pour l'éolien les nouvelles implantations par rapport à l'année précédente [20].

Le rapport mis en ligne en avril 2022[21] par l'Irena (International Renewable energy Agency) rassemble de très nombreuses données sur l'évolution des capacités électriques renouvelables dans le monde entre 2011 et 2021, filière par filière (hydroélectricité avec statistiques séparées sur les STEP, éolien terrestre et offshore, solaire photovoltaïque et thermodynamique, géothermie, biomasse, etc.) et pays par pays. Il n'inclut pas de données sur la production ni sur les différents facteurs de charge moyens de chaque filière mais ces dernières sont accessibles sur le site de l'Agence pour la période allant de 2000 à 2019. En 2019, l'hydroélectricité a compté à elle seule 59,4% de la production mondiale d'électricité d'origine renouvelable (18,8% pour l'éolien terrestre, 9,6% pour le solaire photovoltaïque) selon l'Irena. D'après les dernières données d'Ember (représentées sous forme du camembert ci-après), les différentes filières renouvelables sont évaluées à 28,3% de la production totale électricité dans le monde en 2021. À la fin de l'année 2021, les capacités électriques renouvelables, toutes filières confondues dans le monde s'élevaient à près de 3 064 GW en 2020, soit 9,1% de plus qu'à fin 2020 [22].

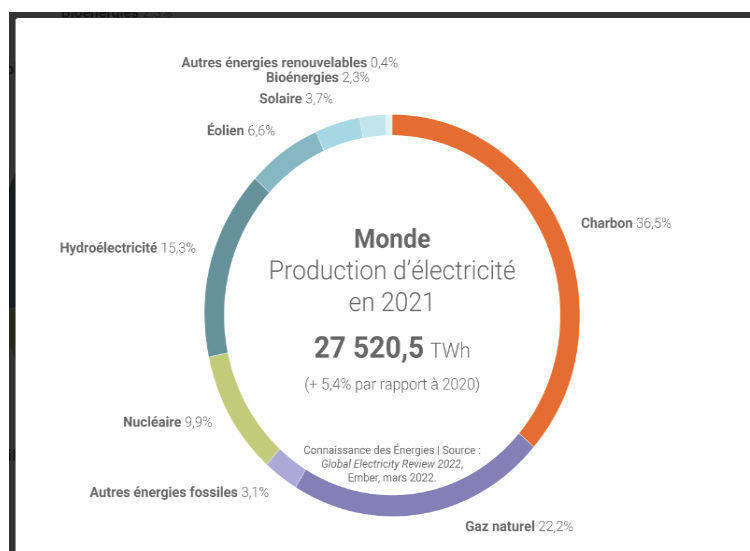


Figure 1.1 Production mondiale d'énergie en 2021 [23]

En effet, les projets suspendus et les hésitations politiques survenues en 2020 vont, nécessairement, entraîner un retard dans le développement de moyens de production renouvelables et selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), l'impact du coronavirus devrait se faire ressentir lors de l'année 2022 [24]. Par conséquent, presque tous les pays émergents qui assurent, de nos jours, l'essentiel de la croissance mondiale se sont mis d'accord pour relancer des projets en énergies renouvelables et fixer comme objectifs de développement des ER, dont 166 d'entre eux veulent favoriser les énergies renouvelables pour la production de l'électricité et 46 pour les moyens de transports.

Le développement des énergies renouvelables est suivi par les plus grandes puissances du monde. Toutefois, chaque pays mise sur certains secteurs plus que d'autres en raison de leur climat, de leur géographie, etc. Voici un tableau récapitulatif du développement des énergies renouvelables électriques [25].

Hydroélectrique	Géothermie	Eolien	Biomasse	Solaire PV	Solaire thermodynamique
<i>Algérie</i>	<i>Algérie</i>	<i>Algérie</i>	<i>Algérie</i>	<i>Algérie</i>	<i>Algérie</i>
<i>Chine</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>Chine</i>	<i>Chine</i>	<i>Chine</i>	<i>Espagne</i>
<i>Brésil</i>	<i>Indonésie</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>Etats-Unis</i>
<i>Canada</i>	<i>Philippines</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Brésil</i>	<i>Japon</i>	<i>Maroc</i>
<i>Etats-Unis</i>	<i>Turquie</i>	<i>Inde</i>	<i>Inde</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Afrique du sud</i>
<i>Russie</i>	<i>Nouvelle-Zélande</i>	<i>Espagne</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Inde</i>	<i>Chine</i>

Tab 1.1 Développement des énergies renouvelables dans le monde.

Par ailleurs, l'IRENA constate entre autres un léger ralentissement des installations de capacités renouvelables en 2021 par rapport au niveau de 2020 (année record), malgré un rythme de déploiement « *bien supérieur à la trajectoire de long terme* ». Près de 60% des nouvelles capacités renouvelables installées dans en 2021 ont été déployées en Asie.

L'objectif mondial est d'arriver à une part de 95% de renouvelable dans l'augmentation de la capacité de production énergétique globale. Pour atteindre cela, les experts misent sur une baisse des coûts de production de 36% pour le solaire et 15% pour l'éolien. Ces deux secteurs devraient doubler leur capacité (GW). Les projections du New Energy Outlook prévoient que le mix énergétique mondial atteindra 64% de renouvelable en 2050.

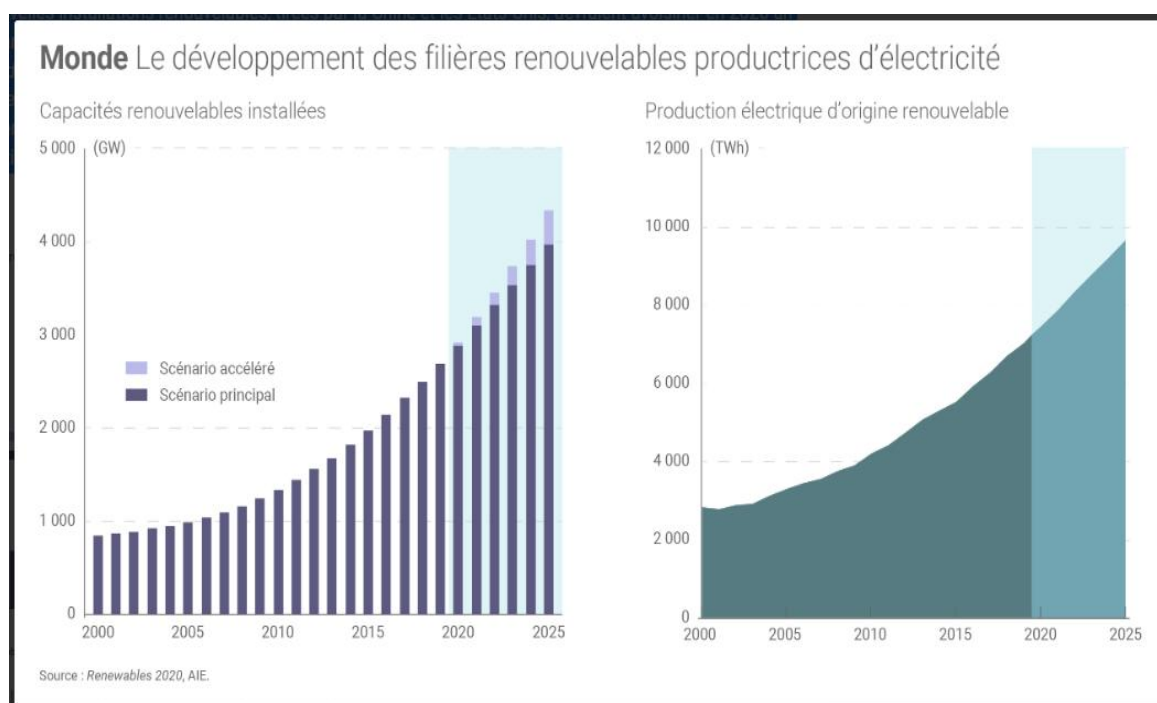


Figure 1.2 Développement mondiale des filières renouvelables productrices d'électricité [26]

I.3 Systèmes hybrides à énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources inépuisables qui se renouvellent de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité futur. Ces ressources renouvelables sont des sources d'énergies issues de phénomènes naturels provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement) et la terre (énergie géothermique). Elles représentent une alternative intéressante pour les énergies classiques (fossiles). Les six

principales Sources d'Énergies Renouvelables (SER) sont : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse. La puissance extraite des SER est tributaire des conditions climatiques, tels que l'irradiation, l'exposition au vent, la topologie et la géométrie des terrains [27-29].

Un couplage entre différentes sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie "hybride" est proposé. Ces systèmes hybrides, plus au moins complexes, nécessitent une stratégie de contrôle adaptée afin d'exploiter dans les meilleures conditions les différentes sources et d'utiliser efficacement l'énergie [30,31]. Les systèmes Hybrides à Source d'Énergie Renouvelable (SHER) transforment en électricité l'énergie provenant de sources d'énergie renouvelable primaires pour alimenter des charges électriques.

1.4 Types et définitions des sources des énergies renouvelables

Les sources des énergies fossiles sont celles qui sont issues de la fossilisation de matière organique dans le sous-sol terrestre alors que les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants, provoqués par les astres dont, principalement, le soleil [32]. Les gisements des énergies fossiles sont très localisés et souvent éloignés des lieux d'utilisation. Contrairement, les ER sont décentralisées et sont disponibles partout, sur toute la planète, bien que ce soit en quantités différentes. Cependant, la densité énergétique des énergies fossiles est très supérieure aux énergies renouvelables. En effet, sans utilisation de technologies pour concentrer les énergies renouvelables, elles ne peuvent produire de grandes puissances. Toutefois, les sources fossiles sont épuisables à l'échelle humaine, par contre les énergies renouvelables sont assez rapidement renouvelables pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine.

L'énergie solaire est captée par des cellules photovoltaïques, dont le rôle est de produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être connectées entre elles pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque.

Dans la nature, on relève plusieurs types de sources renouvelables notamment, éoliennes, hydrauliques, biomasses, géothermiques, solaires, etc.[33].

- **Energie éolienne** : pour cette énergie les phénomènes météorologiques se caractérisent par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère, que l'énergie éolienne transforme en énergie électrique.

- **Energie hydraulique** : les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) sont les origines, essentiellement, des phénomènes météorologiques.

Parmi ces énergies, on distingue celles qui proviennent des sources marines, telles que [34] :

- ✓ **Energie des vagues** : le mouvement des vagues peut être capté par des dispositifs tels le Pélamis (sorte de ver en métal articulé), le SEAREV ou encore le PH4S pour être transformée en électricité.
 - ✓ **Energie marémotrice** : cette énergie est produite grâce au mouvement de la quantité de l'eau créée par les marées (variation du niveau de la mer, courants de marée).
 - ✓ **Energie hydrolienne** : elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins.
 - ✓ **Energie thermique des mers** : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
 - ✓ **Energie osmotique** : elle a pour origine la diffusion ionique due à la rencontre (mélange) de l'eau douce avec l'eau salée de la mer (phénomène d'osmose).
- **Energie biomasse** : il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse et exploitée par combustion ou métabolisation. Elle est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.
 - **Energie géothermique** : le principe consiste à extraire l'énergie géométrique contenue dans le sol afin de l'utiliser pour chauffer ou la transformer en électricité.
 - **Energie solaire** : le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau de l'irradiation (le flux énergétique) mesuré à la surface de la terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Par ailleurs, on distingue deux (02) grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court [35]: l'*énergie solaire thermique*, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement et l'*énergie photovoltaïque*, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.

Energie solaire thermique : l'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement : directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des

aliments (fours solaires). Et, indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entrainer des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou hélio thermodynamique)).

Energie photovoltaïque : l'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule).

1.5 Evaluation des énergies solaire et éolienne en Algérie

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le gouvernement en février 2011 et révisé en mai 2015 puis placé au rang de priorité nationale en février 2016. De ce fait, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable avec un programme des énergies renouvelables qui consiste dans sa version actualisée, à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [36,37]. Cette feuille de route porte sur le photovoltaïque, l'éolien ainsi que sur les filières de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie.

L'Algérie prévoit le déploiement à grande échelle du photovoltaïque et de l'éolien et l'accompagnera, à moyen terme, de la production d'énergie à partir du solaire thermique ; l'intégration de la cogénération, de la biomasse et de la géothermie est également prévue. Déjà 23 centrales photovoltaïques de près de 500 MW ont été réalisées [38].

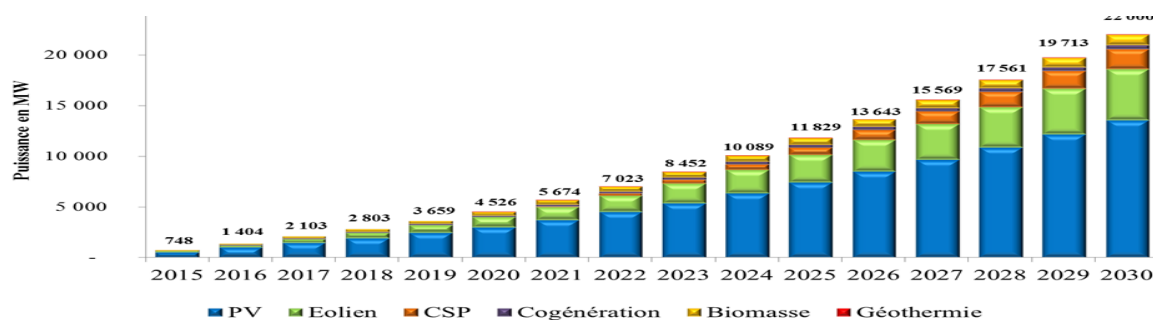


Figure 1.3 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie [39]

1.5.1 Programme de développement des énergies renouvelables

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national Algérien sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme le montre le tableau 1.2, suivant [40] :

	1 ^{ère} phase 2015-2020 [MW]	2 ^{ème} phase 2021-2030 [MW]	Total [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
Solaire thermodynamique à concentration	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

Tab 1.2 Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie

1.6 Systèmes photovoltaïques

La demande mondiale en énergie électrique nécessaire pour le développement économique, l'industrialisation et le confort des personnes n'a pas cessé de croître durant le siècle précédent et a causé, par conséquent, une pollution aggravée de l'atmosphère [41]. Cette pollution est le résultat de l'utilisation excessive des énergies fossiles pour la production de l'énergie électrique. Donc, il s'avère nécessaire que pour satisfaire le besoin énergétique de remplacer les énergies fossiles qui sont censés être, inévitablement, épuisées dans un proche avenir par l'encouragement de l'utilisation des énergies renouvelables car elles sont économiques, durables et peu polluantes. Ils ont comme principe de convertir le rayonnement solaire en courant électrique par effet photovoltaïque [42]. Dans le cas de systèmes photovoltaïques, les cellules photovoltaïques qui ont fait l'objet des travaux de recherche du physicien français Edmond Becquerel, ensuite d'Adams et Day [43], constituent les éléments de base de la technologie de fabrication des modules photovoltaïques dont la qualité s'est améliorée significativement et le prix a été réduit énormément [44]. Sachant que la quantité de l'énergie solaire qui arrive sur la surface de terre après avoir traversé l'atmosphère est d'environ 1000W/m^2 dans les zones tempérées et 1400W/m^2 quand l'atmosphère est faiblement polluée [45].

Ainsi, on s'intéresse dans ce paragraphe à la production de l'électricité à partir de l'énergie solaire en utilisant des panneaux photovoltaïques où les semi-conducteurs produisent un courant électrique sous l'effet de la lumière [46]. En général, on qualifie de photoélectrique tout phénomène électrique provoqué par l'action de la lumière sur la matière qui provoque une éjection d'électrons du matériau [47].

La production de l'électricité à partir de l'énergie solaire nécessite l'utilisation de modules photovoltaïques [48,49]. Ces derniers transmettent leur énergie aux électrons de la cellule lorsque les particules du rayonnement solaire atteignent la surface des cellules photovoltaïques provoquant ainsi leur mouvement et par conséquent la production d'un courant continu qui pourrait, éventuellement, être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur avant d'être injecté dans le réseau de distribution.

L'intérêt de l'utilisation des systèmes photovoltaïques réside, en premier lieu, comme étant une alternative pour produire, proprement de l'énergie électrique, en prévision de l'épuisement éminent des énergies fossiles. D'autres parts, l'encouragement de leurs utilisations contribuent, fortement, à la diminution du taux de rejets de déchets polluants dans l'atmosphère et à la préservation des ressources naturelles.

1.6.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages [50] :

- Haute fiabilité ;
- Appropriés aux régions isolées et aux utilisations sur les engins spatiaux car ne comporte pas de pièces mobiles ;
- Les panneaux photovoltaïques sont adaptables à des besoins énergétiques divers ;
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles ;
- Bonne qualité sur le plan écologique : utilisation sur les engins spatiaux non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions etc.

1.6.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients, dont on note principalement :

- Produit des déchets dû au démantèlement des installations de production en fin de vie ;

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement de conversion d'un module est faible de 28% pour les cellules au silicium cristallin ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;
- Le coût du générateur photovoltaïque serait élevé si le stockage de l'énergie électrique dans des batteries est nécessaire ;
- La fiabilité et les performances dépendent du choix de la batterie et des composants des régulations qui lui sont associés.

Le mode d'utilisation d'un système solaire est basé sur les exigences techniques, économiques et géométriques. Alors, il y a, principalement, trois modes : autonome, hybride et raccordée au réseau [51].

1.6.3 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont installés pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Un tel mode d'utilisation nécessite, généralement, l'insertion d'un système de stockage associé aux générateurs photovoltaïques (PV) afin d'assurer l'alimentation, à chaque instant de la journée et la nuit et pendant plusieurs jours quelques soient les conditions météorologiques.

1.6.4 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires. Ils sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique, le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie.

1.6.5 Système PV raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des chaînes (strings en anglais) eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings. Si la consommation locale

est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

1.6.6 Irradiation solaire

L'irradiation solaire est constituée de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge [52,53]. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour « Air Mass ». Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 (Figure 1.4). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000W/m^2 au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1).

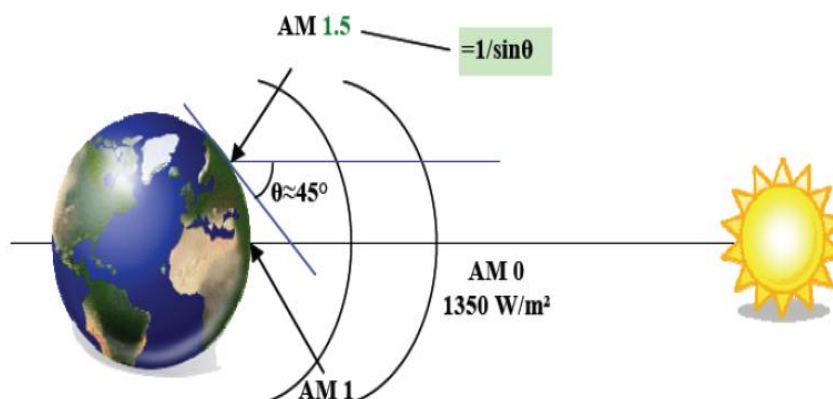


Figure 1.4 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [54]

Le niveau d'irradiation global reçu au sol est déterminé en ajoutant à ce dernier l'irradiation diffus qui concerne l'irradiation dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 . La Figure1.5 correspondant à latitudes indiquées [55].

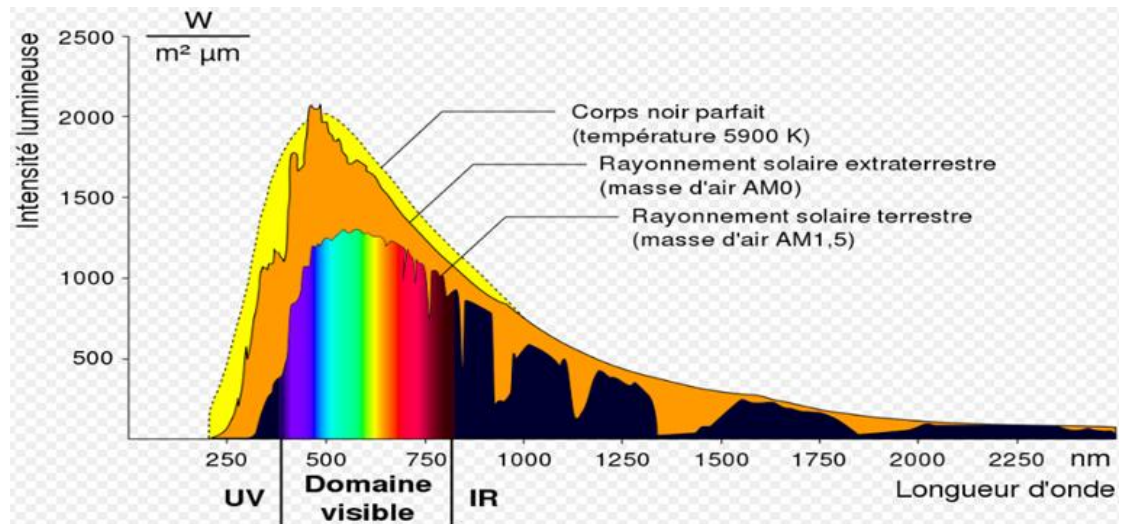


Figure 1.5 Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM [56].

La figure 1.6 présente des informations sur l'irradiation solaire en Algérie.

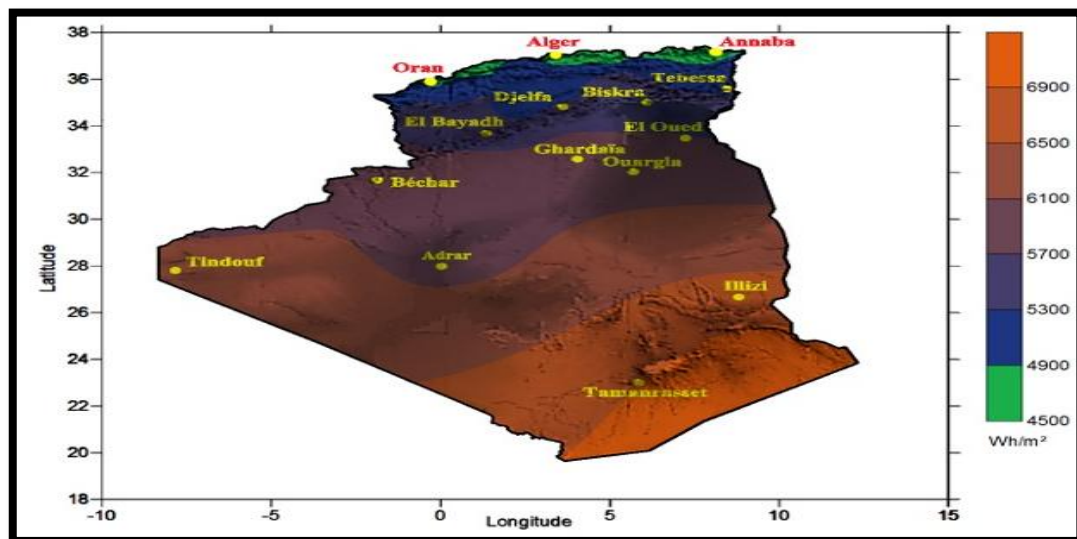


Figure 1.6 Irradiation solaire en Algérie [57]

Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

- E : énergie en Joule (J) ;
- h : constante de Planck ($J \cdot s$) ($h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$) ;
- c : vitesse de la lumière ($m \cdot s^{-1}$) ($c = 299\,792\,458 \text{ m} / \text{s}$) ;
- λ : longueur d'onde (m) (souvent exprimée en micromètre) ;
- ν : fréquence (Hz).

On obtient donc la relation suivante qui lie l'énergie du photon exprimée en électron-volt (eV) et sa longueur d'onde exprimée en μm par :

$$E = 1.2419 / \text{Lamda} \quad (1.2)$$

La conversion photovoltaïque est définie comme la transformation de l'énergie des photons en électricité grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière [58].

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé : l'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur défini par l'équation (1.3), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction [59].

$$E_g = E_c + E_v \quad (1.3)$$

Donc, toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm.

L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation (1.4). Donc, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

$$E = h \cdot \frac{c}{\text{Lamda}} \quad (1.4)$$

1.6.7 Cellule et générateur photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque (PV) est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique [60]. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être

libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure 1.7 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée *P* (dopée au bore) et l'autre dopée *N* (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est dite tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [61].

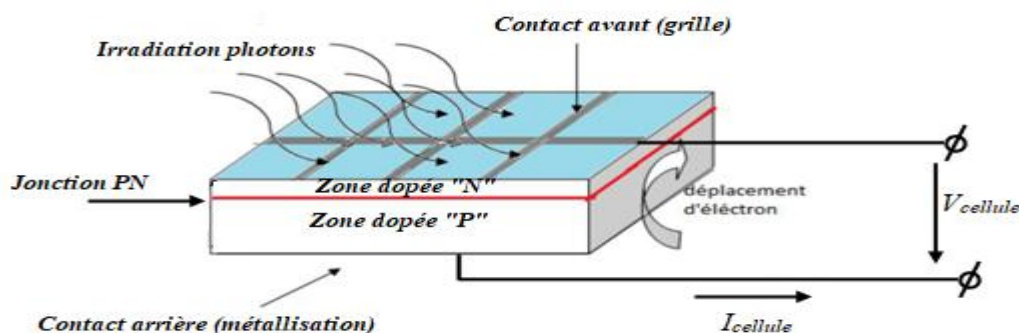


Figure 1.7 Structure d'une cellule photovoltaïque

Différents types de technologies de fabrication des cellules photovoltaïques existent sur le marché, en effet les cellules photovoltaïques basés sur le silicium cristallin dominant le marché avec plus de 90%. On distingue deux catégories des cellules fabriquées à partir du silicium cristallisé, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium poly-cristallin. Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium poly-cristallin mais de rendement plus élevé. Le silicium est aussi utilisé dans la technologie dite amorphe, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui sera projeté sur une feuille de verre. Ce type de cellules présente l'avantage d'être intégré sur des supports souples ou rigides, il est

utilisé généralement pour les calculatrices et les montres. Le tableau 1.3 montre les performances des différentes filières silicium présentement sur le marché [62].

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
<i>Monocristallin</i>	12 à 16 %	-0.442% par °C	-0.38% par an
<i>Poly-cristallin</i>	11 à 14 %	-0.416% par °C	-0.35% par an
<i>Amorphe</i>	6 à 7 %	-0.175% par °C	-1.15% par an

Tab 1.3 Performances des différentes filières silicium

Dans ce qui suit, on cite quelques types de cellules photovoltaïques [63, 64]:

- ❖ *La cellule photovoltaïque multi-jonction* : ces cellules sont constituées de plusieurs couches minces associant de matériaux semi-conducteurs.
- ❖ *La cellule photovoltaïque CIGS* : elles sont construites en déposant un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Puisque ces métaux rares alors leur coût de fabrication est élevé.
- ❖ *La cellule photovoltaïque organique* : pour ces cellules, au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Le rendement de ces cellules est encore inférieur à 3% mais leur coût est faible à cause du faible prix de la matière première.

Lorsque les photons sont absorbés par la cellule, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des paires électrons-trous. Ceci crée alors une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8) entre les deux couches que l'on peut mesurer entre les bornes positives et négatives de la cellule, nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, ce courant est nommé courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'irradiation (E). A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La figure I.8 illustre la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{OPT} et I_{OPT}) [65].

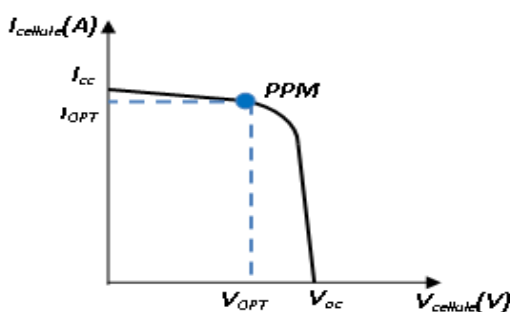


Figure 1.8 Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

1.7 Système Eolien

L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 avant J.-C. environ [66,67]. L'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. et vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé à 200000 dans toute l'Europe. Et, ce n'est qu'à l'arrivée de la machine à vapeur que les moulins à vent ont commencé à disparaître progressivement [68].

Dans les années 1887-1888, l'Américain Charles F. Brush construit à Cleveland la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Malgré sa grande taille de 17m de hauteur, elle ne produisait que 12 KWh. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice.

Après la seconde guerre mondiale, avec la baisse des prix des combustibles fossiles, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour le pompage (le coût du kWh thermique était bien meilleur marché que celui de l'éolien). Mais la crise du pétrole dans les années 1970 a stimulé l'intérêt pour la production d'énergie à grande échelle par les éoliennes. Depuis les années 1990, les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance, ainsi que l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes et surtout les subventions accordées par de nombreux gouvernements ont rendu la solution éolienne plus compétitive [69,70].



Figure 1.9 Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark [71]

L'énergie électrique est produite à partir des vents atmosphériques, soit sur terre (onshore), soit sur mer (off-shore). L'énergie éolienne est une source d'énergie propre qui consiste à convertir l'énergie éolienne en électricité en utilisant des éoliennes. Une éolienne crée une énergie économique et non polluante.

Les éoliennes créent de l'électricité sans utiliser de combustibles fossiles, sans produire de gaz à effet de serre ou déchets radioactifs ou toxiques. Cependant, le niveau de production d'électricité dépend énormément de la vitesse du vent dont voici la cartographie de la vitesse du vent en Algérie illustrée par la figure 1.10.

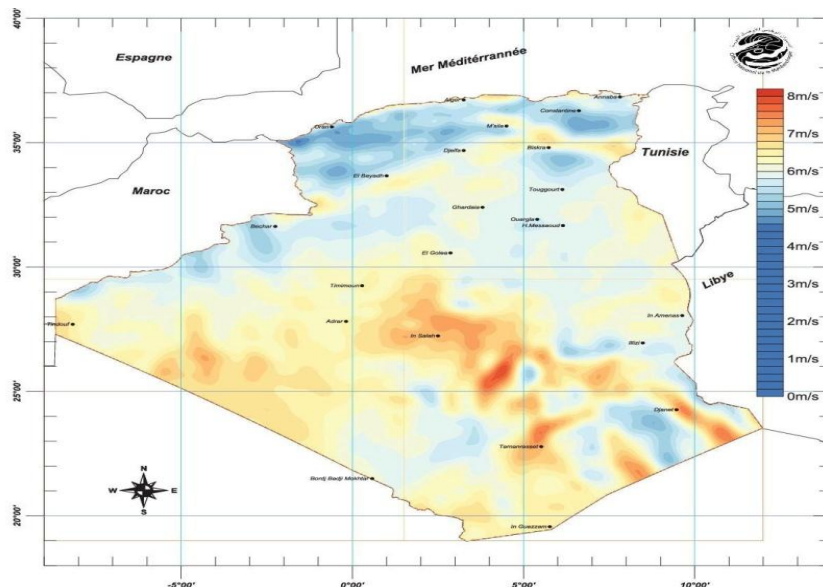


Figure 1.10 Vitesse du vent en Algérie [72]

1.7.1 Principe de l'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres zones, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (masses d'air en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. Ce système connu sous l'appellation anglaise : Wind Energy Conversion System (WECS) [73-75].

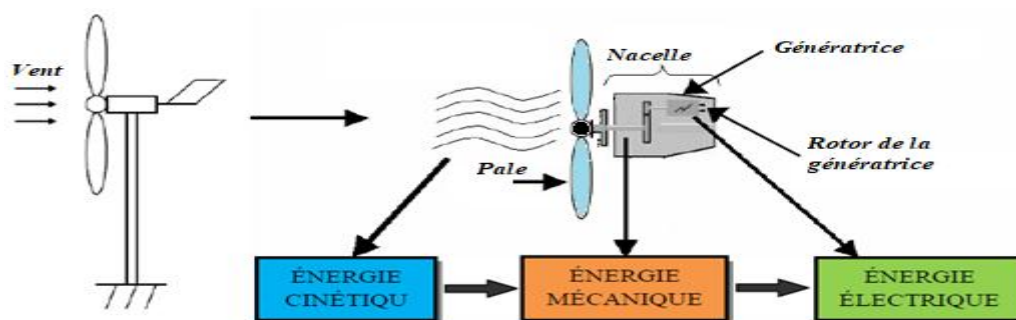


Figure 1.11 Principe de conversion de l'énergie éolienne

1.7.2 Classification des éoliennes

Les générateurs éoliens sont classés selon plusieurs critères (gamme de puissances, axe horizontal ou vertical, mode de fonctionnement à vitesse fixe ou variable), et aussi l'emplacement : 'On shore' (placé sur la terre), 'Offshore' (placés dans la mer) [76,77]. Selon la gamme de puissance nominale produite par l'aérogénérateur, les éoliennes sont divisées en trois catégories, petite, moyenne et grande puissance.

Le tableau 1.4 contient les trois catégories des éoliennes et la figure 1.12, montre la correspondance entre la taille et la puissance des éoliennes.

Echelle	Diamètre des pales	Valeur de puissance
Petite puissance	<12m	<40KW
Moyenne puissance	12 à 45m	40 KW à 1 MW
Grande puissance	>46 m	>1 MW

Tab 1.4 Catégories des éoliennes [78]

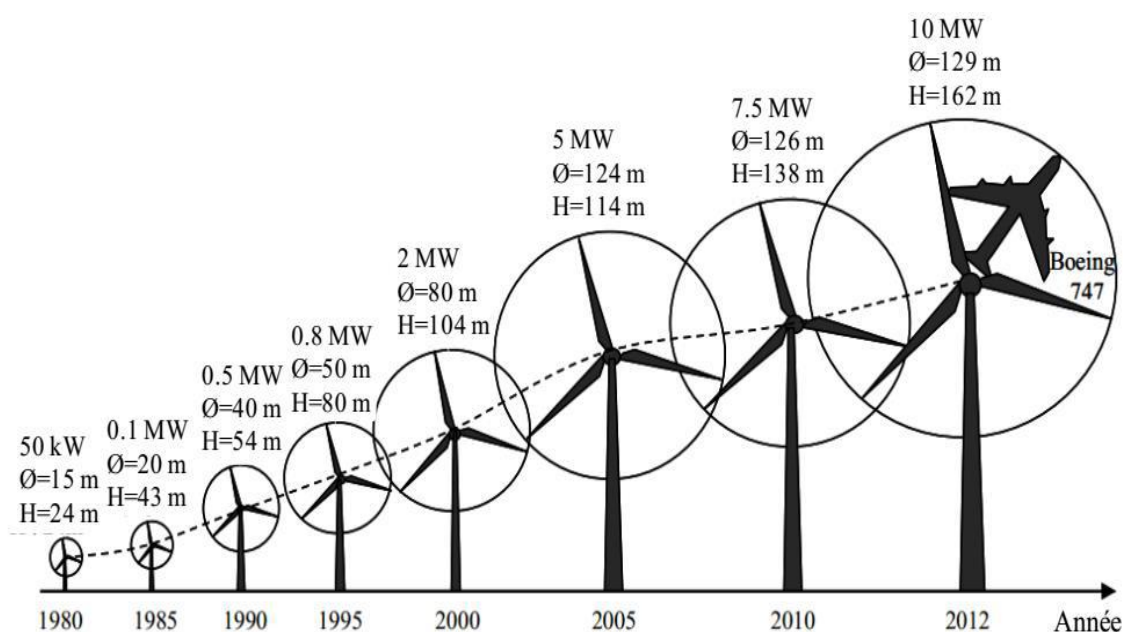


Figure 1.12 Correspondance taille et puissance des éoliennes [79]

1.7.3 Types d'éoliennes (selon axe)

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes : à axe vertical et à axe horizontal [80,81].

1.7.3.1 Turbines éoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes [82]: turbines Darrieus classiques, turbines Darrieus à pales droites (type-H) et turbines Savonius (voir la figure 1.13).

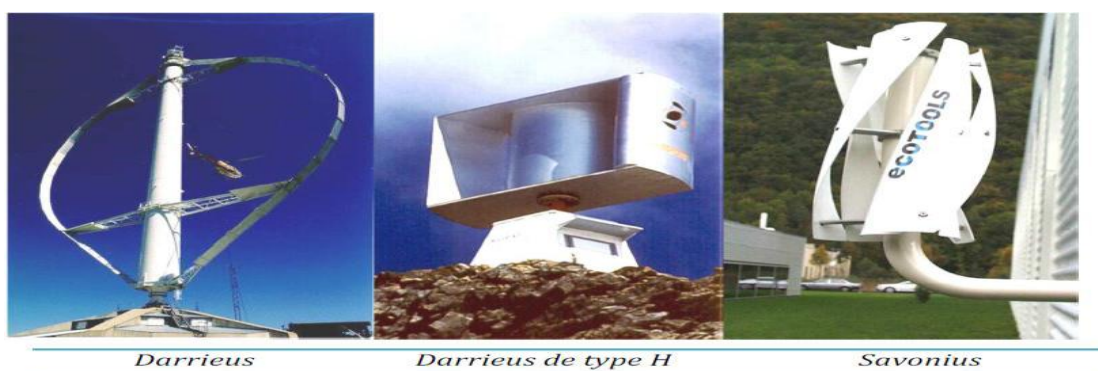


Figure 1.13 Types d'éoliennes

1.7.3.2 Éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (voir la figure 1.14) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [83]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

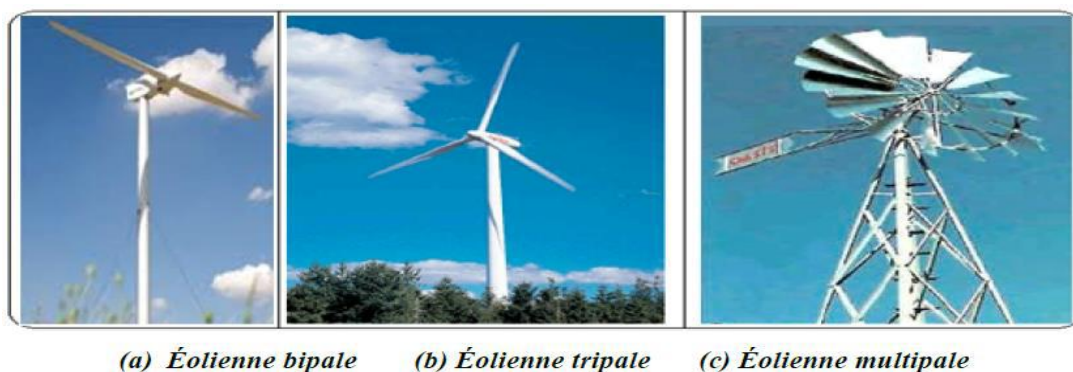


Figure 1.14 Éoliennes à axe horizontal [84]

1.7.3.3 Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal

Les principaux composants d'une éolienne sont illustrés par la figure 1.15 qui correspond à une turbine à axe horizontal à trois pales.

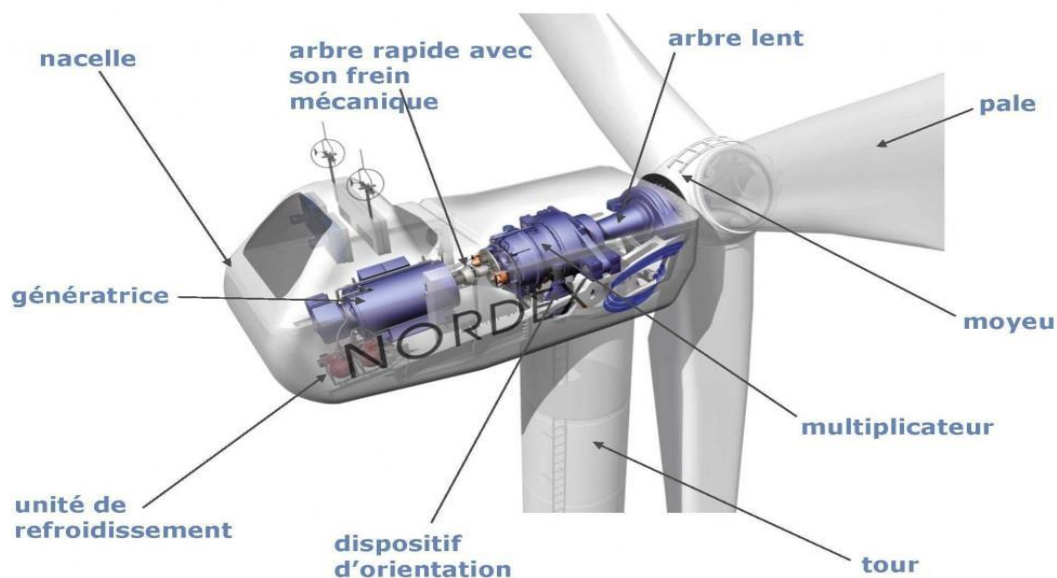


Figure 1.15 Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal [85]

- ❖ *La tour ou le mat* : c'est un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.
- ❖ *La nacelle* : montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.
- ❖ *Le rotor* : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
- ❖ *Le moyeu* : c'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.
- ❖ *Les pales* : des éléments permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor, leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs. L'ensemble moyeu-pales forme le rotor de la turbine.

- ❖ *Le multiplicateur de vitesse* : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- ❖ *L'arbre* : relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- ❖ *L'arbre secondaire* : relie le multiplicateur au générateur. Généralement, il comporte un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ❖ *La génératrice électrique* : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique (convertit l'énergie mécanique en énergie électrique) qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelques kW à 10MW [86].
- ❖ *Le système de commande* : il contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- ❖ *Le système d'orientation* : il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.
- ❖ *Le système de refroidissement* : il se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile ou radiateurs d'eau pour le multiplicateur.

1.7.4 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Le rôle de la régulation de vitesse de l'éolienne est d'assurer la sécurité de l'éolienne contre les vents violents (rafales) et d'optimiser l'extraction de la puissance du vent. La turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre mécanique une puissance nominale (P_n) obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent (V_n). Lorsque la vitesse du vent (v) est supérieure à (V_n), la turbine éolienne doit modifier son mode de fonctionnement afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante [87,88]. A côté de la vitesse nominale (V_n), on spécifie aussi :

- La vitesse de démarrage (V_d) à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie ;
- La vitesse maximale du vent (V_m), avec laquelle, il n'y aura plus de conversion de l'énergie du vent pour des raisons de sûreté de fonctionnement ;
- Les vitesses (V_n, V_d, V_m) définissent quatre zones comme le montre la figure 1.16.

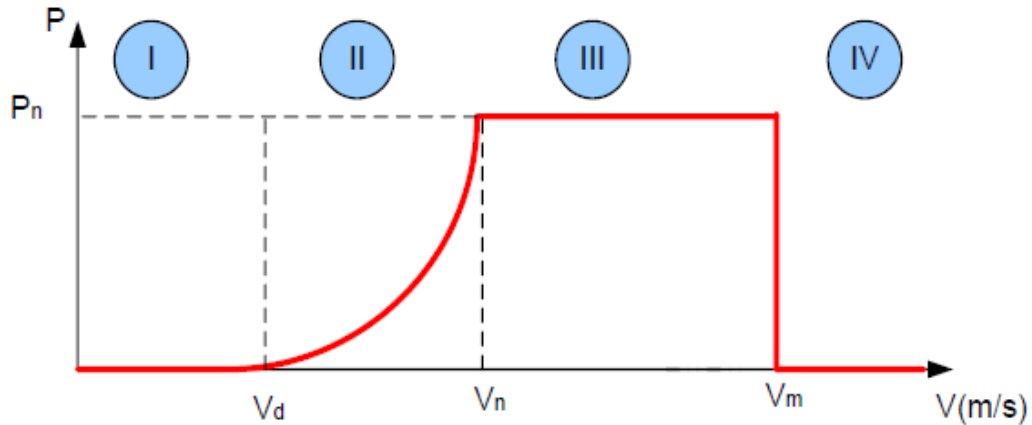


Figure 1.16 Zones de fonctionnement d'une éolienne

- **Zone I** : correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisant pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance où $P=0$ (la turbine à l'arrêt).
- **Zone II** : dans laquelle la puissance fournie dépend de la vitesse du vent V ; Un algorithme est utilisé pour l'extraction du maximum de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- **Zone III** : la vitesse du vent est au-dessus de la vitesse nominale, la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance P fournie reste égale à P_n . Par un système d'orientation des pales (Pitch control) qui est utilisée pour réguler la vitesse de la turbine.
- **Zone IV** : la vitesse de vent est trop importante, elle dépasse la valeur maximale admissible par l'éolienne V_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($=90^\circ$) ; au risque d'endommagement du système turbine-générateur, la turbine s'arrête et la puissance générée sera nulle.

1.7.5 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ✚ *Systèmes isolés ;*
- ✚ *Systèmes hybrides ;*
- ✚ *Systèmes reliés au réseau.*

1.7.5.1 Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des

champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Les systèmes isolés en général utilisent quelques formes de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie [89].

1.7.5.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur [90].

1.7.5.3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie, par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Ces systèmes nécessitent un convertisseur statique [91].

1.8 Introduction aux énergies renouvelables dans les applications agricoles

Les systèmes de pompage d'eau sont très utilisés dans les zones rurales, pour extraire l'eau afin de couvrir leurs besoins quotidiens. Toutefois, comme dans ces zones les sources d'eau sont souvent réparties sur plusieurs kilomètres de terrain et où les réseaux électriques sont inexistantes, l'utilisation des systèmes de pompage d'eau sont alors utilisés. En effet, l'utilisation des énergies renouvelables est une solution prometteuse à ces problèmes et présente le plus grand potentiel de développement à de nombreux cas (voir les figures 1.17).

Les énergies renouvelables représentent une opportunité économique pour les exploitations agricoles car elles permettent aux agriculteurs de diversifier et de renforcer leur revenu tout en contribuant à la production d'électricité. De plus, la production d'énergie permet une autonomie de l'exploitation. L'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie en France) a publié un rapport "Agriculture et Energies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles" (février 2018) a mis en évidence le potentiel fort des différentes énergies renouvelables dont les panneaux

photovoltaïques [92]. Que ce soit sur les toitures, les centrales au sol ou encore sur les serres, le photovoltaïque représente un gisement important pour les agriculteurs [93].



Figure 1.17 Energies renouvelables dans les applications agricoles

La combinaison entre production d'énergie renouvelable et agriculture a un avantage important qui est de ne plus artificier des centaines d'hectares de terres cultivables pour installer uniquement des centrales solaires. Il est nécessaire de préserver nos terres agricoles pour nourrir la planète tout en amorçant notre transition énergétique. L'agrivoltaïsme qui associe une production d'électricité photovoltaïque et une production agricole sur une même surface semble être un bon compromis. Les agriculteurs font partie prenante du développement des énergies renouvelables [94].

Dans les applications agricoles, le pompage photovoltaïque est constitué généralement de panneaux solaires, d'une unité de commande et d'un groupe motopompe. En fonction du dimensionnement du système, il est parfois nécessaire d'utiliser des batteries de stockage et

un régulateur de charge. À cause de la nature intermittente du rayonnement solaire, il est plus intéressant de faire du pompage avec batteries. Cela permet d'éviter des problèmes d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et le groupe motopompe. Il permet aussi un pompage régulier durant toute la journée. Cependant, pour des raisons de simplicité du système et de coût, il est préférable de stocker l'eau dans un réservoir plutôt que de stocker l'énergie dans les batteries. Le pompage photovoltaïque sans batterie, communément appelé « pompage au fil du soleil », permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batteries [95]. L'eau pompée est stockée dans un réservoir situé à une certaine hauteur au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Il est important de dimensionner le réservoir pour au moins 3 jours d'autonomie.

Compte tenu du coût additionnel du système avec batterie et des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage, la solution « au fil du soleil » est présentement préférée. Cependant, celle-ci présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger [96] :

- Il est impossible de pomper au-dessous d'un certain niveau d'éclairement, la pompe ne pouvant pas être amorcée sous une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée ;
- Le rendement des pompes diminue en dehors de leur puissance nominale de fonctionnement, le système nécessitera l'utilisation d'un adaptateur de charge ;
- Le débit de la pompe ne sera pas constant

À la lumière de ce qui précède, les sources d'énergies renouvelables les plus courantes pour les applications agricoles sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Les éoliennes modernes utilisent des générateurs pour produire du courant alternatif(CA) ou du courant continu (CC). Ces générateurs sont connectés à des pompes fonctionnant avec des moteurs CA ou CC. Les recherches récentes et pertinentes sur des applications de pompage éolien montrent que :

- Les systèmes de pompage d'eau à base d'énergie éolienne sont mieux adaptés pour les applications d'irrigation [97] ;
- C'est une technologie alternative économiquement viable pour les systèmes d'irrigation [98];
- Le système éolien peut être utilisé avec succès pour le pompage d'eau souterraine dans les régions éloignées, où les ressources éoliennes sont disponibles.

D'ailleurs, une étude comparative entre les systèmes photovoltaïque et éolien pour les systèmes de pompage d'eau dans les régions du Sahara a été menée en Algérie [99]. Il ressort de cette étude que le coût par mètre cube d'eau produite par le système de pompage éolien est moins cher que celle produite par le système photovoltaïque. Les auteurs ont proposé l'énergie éolienne comme une solution alternative pour le pompage d'eau en raison de sa faisabilité technique et économique par rapport au système de pompage photovoltaïque.

Cependant, les principales limitations de cette technologie d'après sont :

- La vitesse du vent n'étant pas constante dans le temps, cela affecte grandement la performance d'une telle technologie ;
- Comparativement au système photovoltaïque, le système éolien présente des contraintes supplémentaires. Ainsi, l'entretien est nécessaire pour les composants mécaniques.

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation de sources d'énergies renouvelables pour le pompage d'eau mais très peu d'études ont été effectuées sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour pomper l'eau. Il est évident que les énergies éolienne et solaire sont une solution alternative pour l'irrigation des terres agricoles. Toutefois, le principal inconvénient de ces systèmes est lié à leurs caractéristiques stochastiques, ce qui limite leur mise en œuvre en tant que source d'énergie primaire dans les zones rurales.

Les performances d'un SHER, le rendement et la durée de vie sont influencées, d'une part, par le dimensionnement des composants, et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. La stratégie de fonctionnement est primordiale dans un système hybride d'énergie car c'est elle qui prend les décisions liées aux flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système. Cette stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SHER de décider quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible. Bref, le défi fondamental dans le fonctionnement de ces systèmes hybrides est la gestion de la puissance délivrée à la charge. Le problème principal dans la gestion des systèmes hybrides d'énergie est de pouvoir fournir la puissance demandée par la charge malgré les fortes variations de l'énergie produite. Par ce paragraphe, nous voulons apporter notre contribution à la compréhension et à l'étude de la gestion d'énergie d'un système autonome hybride photovoltaïque-éolien pour des applications agricoles notamment pour l'irrigation.

La production de l'énergie électrique à base des ressources naturelles constitue une alternative à la protection de l'environnement, la sécurité d'approvisionnement et à l'indépendance énergétique.

1.9 Gestion optimale des flux d'énergie dans les systèmes hybrides

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les SER, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un SHSER est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable[100]. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride.

1.9.1 Classification des systèmes hybrides (SERH)

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi.

La figure 1.18 montre leur classification.

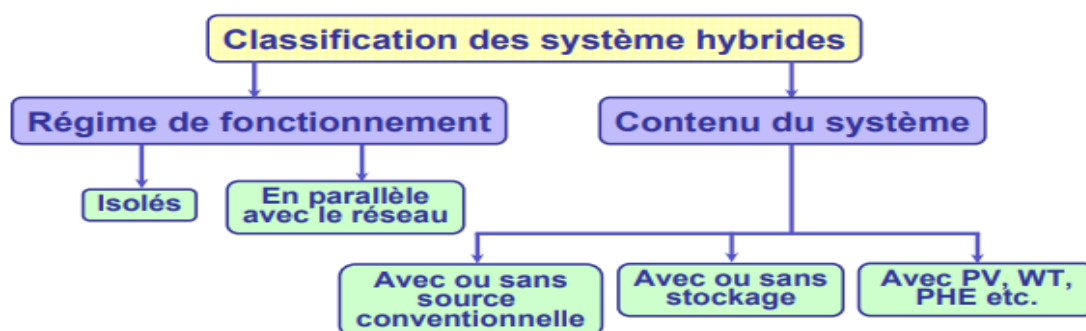


Figure 1.18 Classification des systèmes hybrides (SERH)

1.9.1.1 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

L'inconvénient majeur des systèmes non hybrides est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs désavantages comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie [101].

1.9.1.2 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares.

1.9.2 Topologies des systèmes électriques hybrides

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable, qui peut être continu ou alternatif.

1.9.2.1 Couplage de bus DC

Un système hybride couplé au bus continu, est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités.

Avantages

1. Synchronisation n'est pas nécessaire ;
2. Moins de pertes de transmission ;
3. Connexion à un seul câble.

Inconvénients

1. Des problèmes de compatibilité de tension ;
2. Problèmes de corrosion avec les électrodes DC ;
3. Connexion non standard nécessite des coûts élevés dans l'installation et la maintenance.

1.9.2.2 Couplage de bus AC

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif.

Avantages

1. Il peut être facilement isolé à partir du système en cas où des sources seront en panne ;
2. Connexion au réseau facile ;

3. Interface standard et la structure modulaire ;
4. Multi-tension facile ;
5. Bien d'établir dans le coté économique.

Inconvénients

1. Synchronisation nécessaire ;
2. Le facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion sont nécessaires ;
3. Les pertes de transmission sont plus élevées. (Spécialement pour les longues distances).

1.10 Conclusion

A l'issue des notions portées dans le contenu de ce chapitre on note que le problème fondamentale consiste dans l'épuisement futur des énergies fossiles et par conséquent de penser à une alternative de leur remplacement en extrême urgence, afin d'assurer une transition énergétique adéquate. Ces notions, notamment celles concernant les systèmes solaires et éoliennes, sont tirées d'une bibliographie du domaine de l'exploitation de systèmes de conversions à énergies renouvelables. Ainsi, grâce à cette étude on remarque que malgré le caractère intermittent des énergies solaire et éolienne, l'option de l'hybridation de ces deux derniers, avec stockage s'avère une configuration d'une grande importance.

CHAPITRE 2

MODELISATION DYNAMIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

2.1 Introduction

Les énergies renouvelables regroupent plusieurs filières technologiques dont le principe de fonctionnement dépend de la source d'énergie primaire (récupérée) et de l'énergie utile à obtenir (électrique). Parmi les primaires, les sources d'énergies solaire et éolienne représentent une opportunité de développement efficace et durable pour la production de l'énergie électrique. A cette effet, les laboratoires de recherches s'intéressent alors à la conception des systèmes hybrides à énergies renouvelables (SHER) afin de généraliser, d'améliorer et d'optimiser leur l'exploitation.

Par définition, les systèmes hybrides de production d'électricité sont des systèmes combinant au moins deux sources d'énergies de natures différentes incluant souvent un système de stockage d'énergie. Ils peuvent être divisés en deux (02) groupes : dans le premier groupe, le SHER est branché en parallèle avec le réseau électrique dit "*SHER connectés au réseau*", afin de contribuer à satisfaire le besoin énergétique de la charge. Contrairement le deuxième groupe dit "*SHER isolé*" fonctionne en régime isolé ou en mode autonome par rapport au réseau pour garantir le besoin des consommateurs situés dans des sites éloignés non connectés au réseau électrique tels que les refuges de montagnes, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

Les systèmes photovoltaïques (PV) ont attiré une attention particulière grâce à leurs avantages remarquables comparativement aux combustibles fossiles. Les cellules solaires sont à base de semi-conducteurs qui lorsque l'énergie solaire (l'irradiation) atteint la surface des cellules solaires, un courant continu traverse les panneaux PV. Or, l'énergie éolienne est l'une des ressources énergétiques les plus prometteuses et les plus dynamiques au monde bien que par nature la vitesse du vent soit en constante évolution.

Le système de stockage est nécessaire pour compenser le manque de puissance quelques soient les conditions météorologiques et aussi assurer une alimentation performante et continue à l'entrée du hacheur bidirectionnel. Ce dernier doit être contrôlé adéquatement pour satisfaire l'énergie requise par la charge.

2.2 Structures des systèmes hybrides

2.2.1 Architecture autonome

La figure 2.1 représente la structure d'un système hybride (GPV, Eolienne et Système de Stockage) connecté au bus à courant continu(CC) à travers des convertisseurs d'électronique de puissance (Hacheur, Redresseur, Hacheur bidirectionnel).

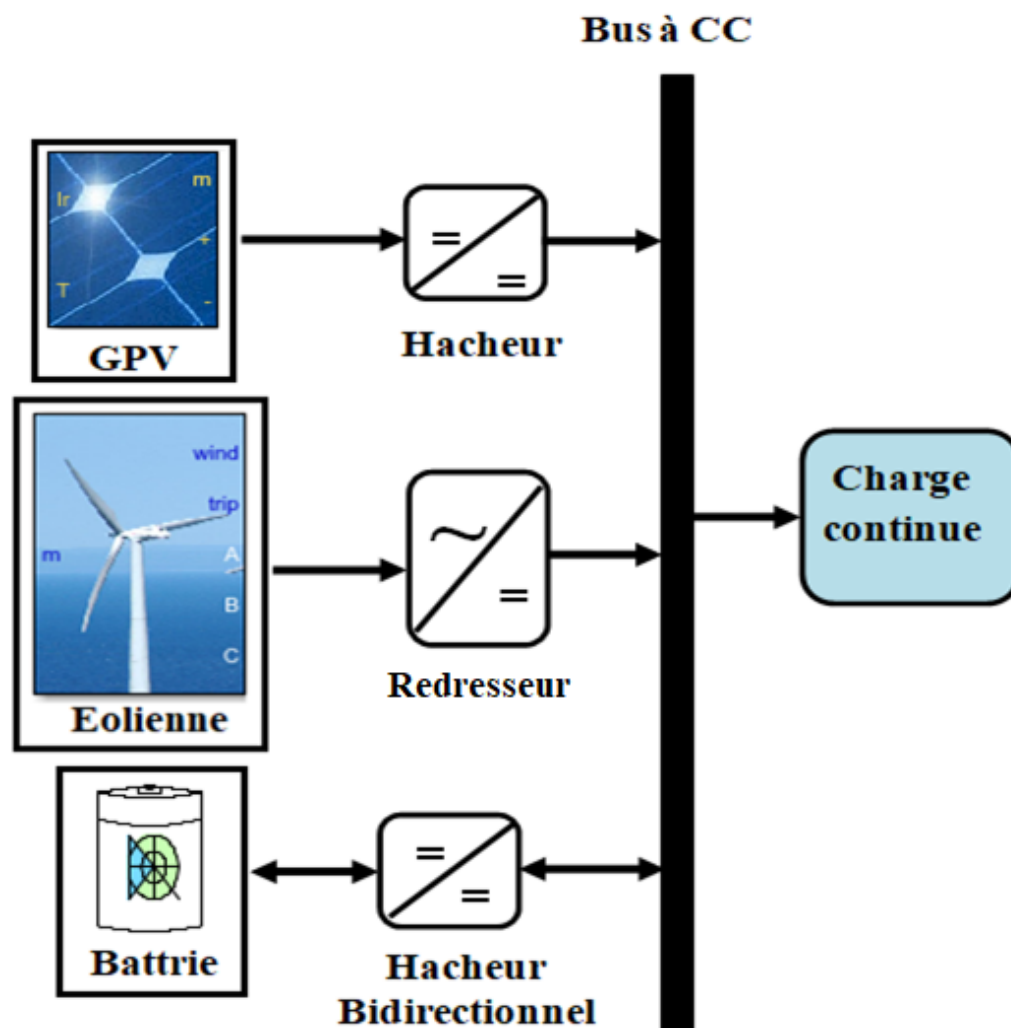


Figure 2.1 Système de conversion hybride autonome

Pour une telle structure, le problème de réglage de la fréquence n'est pas nécessaire et donc l'ajout d'une source n'exige pas l'étage de synchronisation. Toutefois, pour les systèmes de moyenne et forte puissance, la régulation de la tension du bus CC demeure, particulièrement, requise et difficile.

2.2.2 Architecture connectée au réseau

Dans cette structure, l'ensemble des composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, via un onduleur comme le montre la figure 2.2. Donc chaque convertisseur doit être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Dès lors, il est aisé de remarquer que la réalisation d'une telle structure est relativement compliquée car en plus du fonctionnement parallèle des sources renouvelables, il est impératif de synchroniser les tensions de sortie avec les tensions aux bornes de la charge.

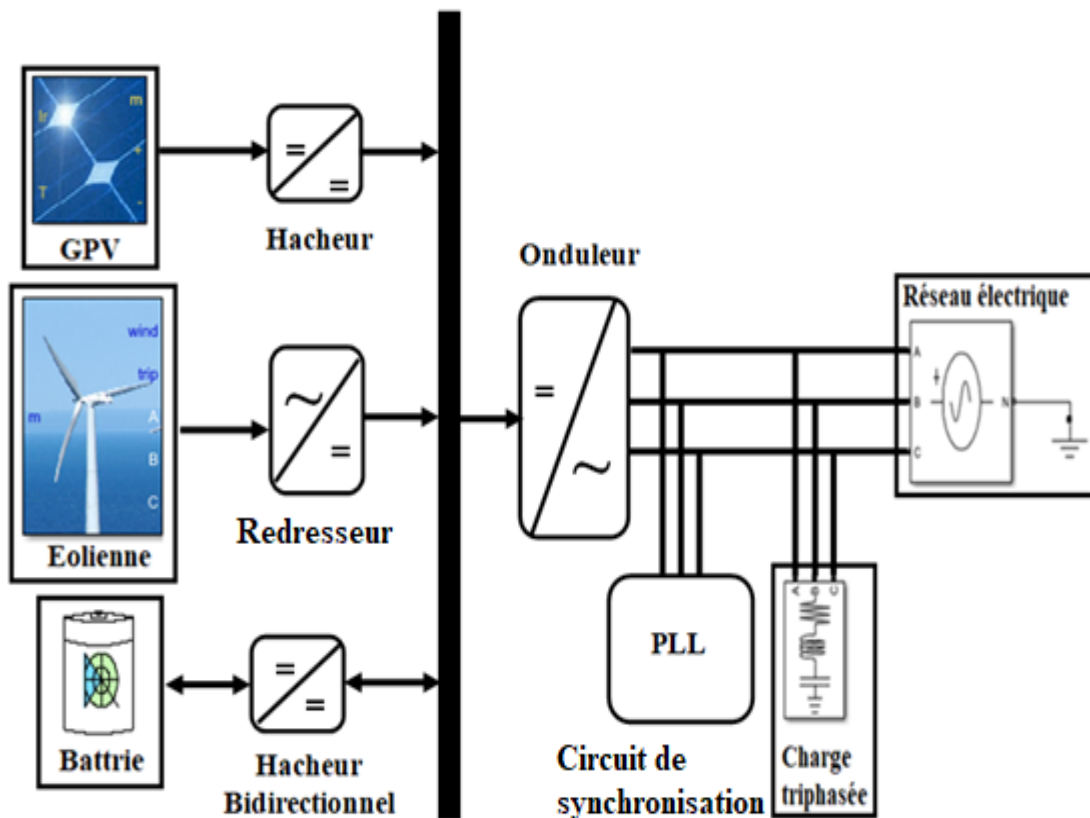


Figure 2.2 Système de conversion hybride connecté au réseau

2.3 Modélisation du système photovoltaïque

Cette section présente le développement mathématique de la cellule photovoltaïque notamment celui déduit du circuit électrique équivalent à une seule diode. Ceci afin d'étudier par simulation numérique le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs constituant la cellule et déduire le modèle du générateur photovoltaïque (GPV).

2.3.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

De la littérature, on retient, essentiellement, deux (2) modèles de la cellule photovoltaïque [102-104] : celui à deux diodes et à une diode dit "standard". Les circuits électriques équivalents de ces modèles sont illustrés, respectivement, par les figures 2.3 et 2.4.

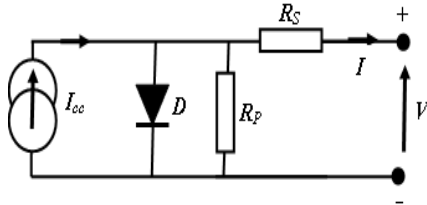


Figure 2.3 Modèle à deux diodes

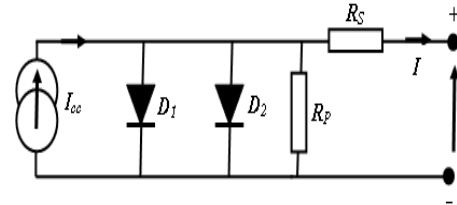


Figure 2.4 Modèle à une diode

En plus du nombre de diodes, ils comprennent une source de courant produisant le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule, une résistance série (R_s) et une résistance montée en parallèle (R_p).

2.3.2 Modèles électriques équivalents

Pour les modèles précédents, l'expression du courant I de sortie est donnée par l'équation suivante [105,106].

$$I = I_{cc} - I_{01} \left[e^{\frac{q(V_{pv} + I.R_s)}{n_1.k.T}} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\frac{q(V_{pv} + I.R_s)}{n_2.k.T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Avec,

I_{CC} : courant de court-circuit de la cellule (A);

I_{01} : courant de saturation de la diode D_1 (A);

I_{02} : courant de saturation de la diode D_2 (A);

K : constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} J / K$);

T_c : température effective de la cellule ; $T(K)=273+T$ ($^{\circ}C$)

q : charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$);

n_1 : facteur de non idéalité de la jonction de la diode D_1 ;

n_2 : facteur de non idéalité de la jonction de la diode D_2 ;

I : courant fourni par la cellule (A);

V_{pv} : tension aux bornes de la cellule(V).

2.3.3 Modèle électrique à une diode

Dans la suite, de cette thèse, on considère le modèle à une seule diode car c'est le plus souvent utilisé. On présente ci-après plus de détails sur le développement mathématique du modèle du circuit équivalent à une seule diode.

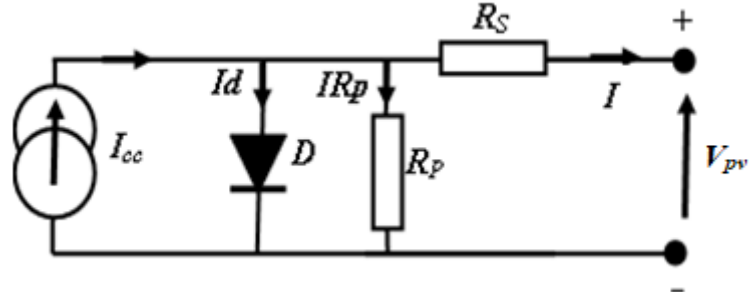


Figure 2.5 Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque

Où,

R_p (Ω): résistance parallèle qui caractérise les courants de fuite ;

R_s (Ω): résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion.

De la figure 2.5, on peut déduire :

$$I = I_{cc} - I_d - I_{R_p} \quad (2.2)$$

Avec,

I_d (A): courant à travers la diode ;

I_{R_p} (A): courant à travers la résistance parallèle.

Le courant de court-circuit à une température (T) quelconque est exprimé par la relation suivante :

$$I_{cc(T)} = I_{cc(T_{ref})} [1 + k_i (T_c - T_{ref})] \quad (2.3)$$

où,

$I_{cc(T_{ref})}$: courant de court-circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de 1000W/m^2 et qui est donné par la fiche technique du constructeur ;

T_{ref} : température de référence de la cellule exprimée en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) correspondante à la température standard 25°C , soit $T_{ref}(^{\circ}\text{K}) = 25 + 273.15^{\circ}\text{K}$;

k_i : coefficient de température du courant I exprimé en ($\%/^{\circ}\text{C}$) (selon la fiche du constructeur);

Le courant I_{cc} est proportionnel à l'irradiation (E). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc}(E) = I_{cc}(E_0) \cdot \frac{E}{E_0} \quad (2.4)$$

Où, E_0 est l'irradiation nominal standard égal à $1000W/m^2$.

L'expression (2.2) peut s'écrire :

$$I = I_{cc} - I_d - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.5)$$

avec,

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv} + I.R_s)} - 1 \right) \quad (2.6)$$

En supposant que la cellule photovoltaïque soit de bonne qualité, la R_p aura une valeur très élevée et donc le troisième terme de la partie droite de l'équation (2.5) peut être négligé

$$\left(\frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \approx 0 \right).$$

Donc, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit :

$$I = I_{cc} - I_0 e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv} + I.R_s)} \quad (2.7)$$

Ainsi, on retient de (2.7) que :

$$e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv} + I.R_s)} \gg 1 \quad (2.8)$$

Par ailleurs, les grandeurs caractéristiques en l'occurrence le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension du circuit ouvert (V_{co}) peuvent être déterminés de la caractéristique $I=f(V)$.

La tension V_{co} est donnée par le fabricant ou mesurée grâce à des relevés sous un éclairage $1000W/m^2$.

Cependant, l'allure de la caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) d'une cellule PV pour une température et une irradiation fixes est illustrée par la figure 2.6.

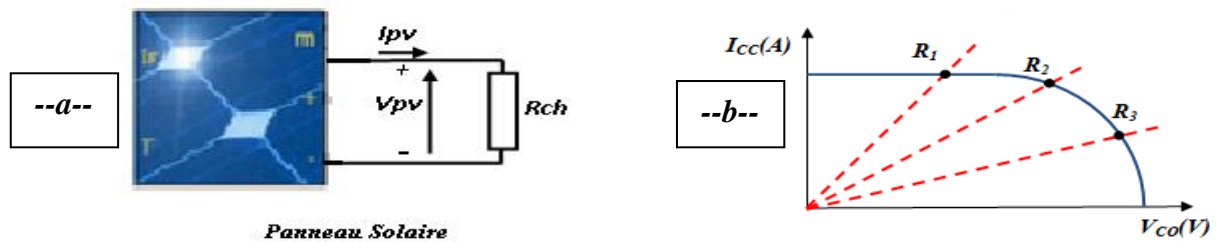


Figure 2.6 Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$

Pour une résistance de charge (R_{ch}) connectée aux bornes du panneau solaire, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des caractéristiques du panneau et de la charge. Où, si la charge est purement résistive ($R_{ch} = R_1, R_2, \dots$) sa caractéristique est une

droite $\frac{I}{V_{pv}} = \frac{1}{R_{ch}}$ (cas de la figure 2.6.b).

Avec :

- **Courant de court-circuit (I_{cc})**: c'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit soit $V=0$ (pratiquement $I_{cc} = I$);
- **Tension de circuit-ouvert (V_{co})**: c'est la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant de la cellule PV est nul. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT_c}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (2.9)$$

Où,

$$V_{th} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \text{ c'est la tension thermique.} \quad (2.10)$$

- **Puissance maximale (P_{max})**: elle est associée à une tension maximale (V_{max}) à une intensité maximale (I_{max}) et que sous les conditions normalisées d'irradiation standard (Température=25° et une Irradiation = 1000 W/m²), elle est dite puissance crête.
- **Facteur de forme (FF)**: c'est le rapport de la puissance maximale délivrée à la charge sur le produit (I_{cc}, V_{co}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (2.11)$$

Pour les cellules ayant un rendement moyen, le FF = 0.7 à 0.85.

- **Rendement de la conversion (η)**: c'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraire, il reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à la puissance d'irradiation incident (P_{inc}) sur une surface de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot E_0} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (2.12)$$

Avec (P_{inc}) est égale au produit de l'éclairement par la surface totale des photopiles.

Il est généralement compris dans l'intervalle [107] : $14\% \leq \eta \leq 16\%$

2.3.4 Facteur d'idéalité

Le facteur d'idéalité (n) est donné par l'expression suivante [108]:

$$n = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (2.13)$$

Sa valeur est comprise dans l'intervalle :

$$n = [1 \ 2] \quad (2.14)$$

Il est égal à « 1 » pour une diode idéale et égal à 2, quand on tient compte du courant de génération – recombinaison.

On relèvera des écarts de tension et de courant dans la partie proche de V_{co} qui est une droite, après avoir converti l'échelle de courant en logarithme.

2.3.5 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

La puissance maximale que peut délivrer par exemple une cellule en silicium de 150 mm² sous une tension de 0.5V sous des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C) est de 2.3W environ. Puisque, cette faible puissance est, en pratique, insuffisante pour la plupart des applications, les cellules sont regroupées entre elles pour former un module et le regroupement de modules identiques constitue un panneau photovoltaïque. Enfin, le générateur photovoltaïque est constitué de nombreux panneaux photovoltaïques connectés en série et parallèle. Lorsque des cellules identiques sont assemblées en série, leurs tensions s'additionnent (la tension résultante augmente), or si elles sont montées en parallèle, c'est leurs courants qui s'additionnent (le courant résultant augmente).

Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. La figure 2.7 montre la caractéristique résultante (I_{ccns} , V_{cons}), avec $I_{ccns} = I_{cc}$ et $V_{cons} = n_s \cdot V_{co}$.

•

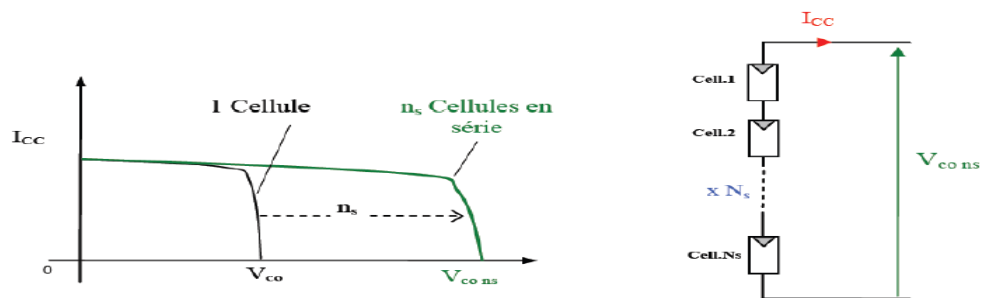


Figure 2.7 Caractéristique résultante d'une connexion de n_s cellules en série

Dans un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La Figure 2.8 illustre la caractéristique résultante avec $I_{ccnp} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{conp} = V_{co}$ [109].

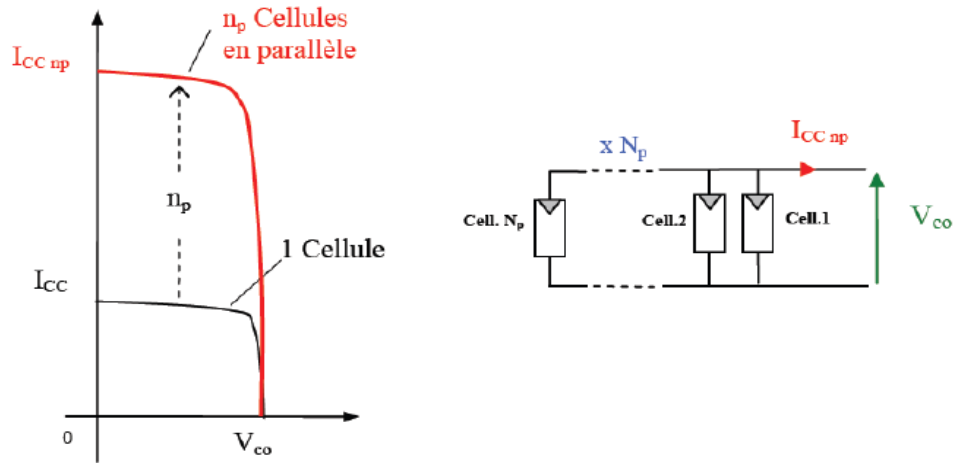


Figure 2.8 Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

2.3.6 Simulations et interprétation des caractéristiques du panneau

Les caractéristiques courant et puissance en fonction de tension, obtenues par simulations sous différentes conditions météorologiques (irradiation et température) sont présentées par la figure 2.9. On remarque que les points caractéristiques (I_{cc} , V_{co} , P_{max}) de $I=f(V)$ varient en fonction de l'irradiation et de la température.

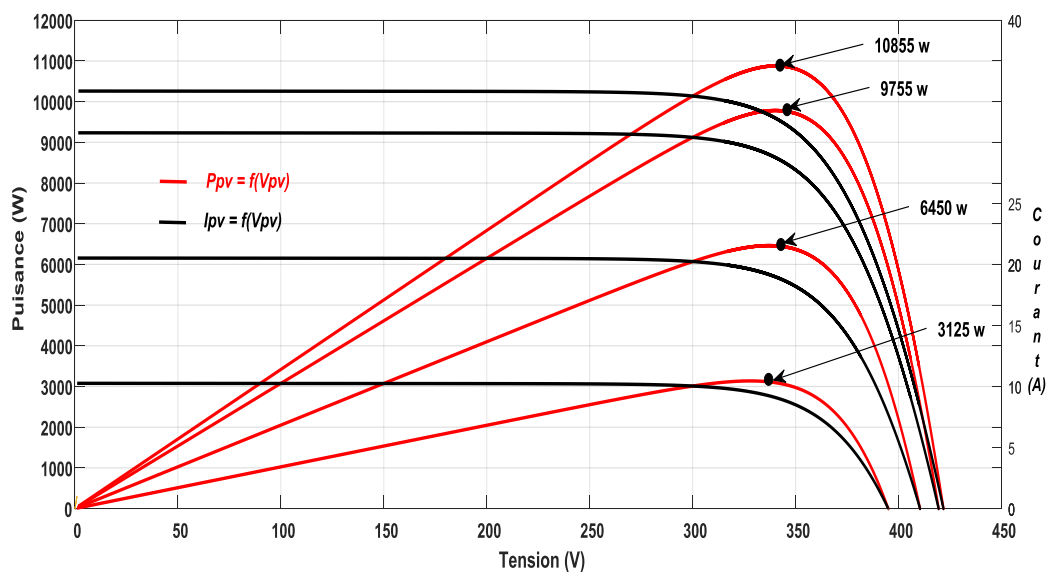


Figure 2.9 Caractéristiques de la puissance photovoltaïque PV

Le système photovoltaïque a été testé sous l'effet de quatre (4) niveaux d'irradiation tout en maintenant la température constante ($T = 25^{\circ}\text{C}$). La figure 2.9 montre les caractéristiques de la puissance photovoltaïque $P_{pv}=f(V_{pv})$ et du courant $I_{pv}=f(V_{pv})$ en fonction de la tension photovoltaïque. Il convient déjà de noter que chaque courbe de combinaison irradiation-température correspond à une puissance maximale. Effet pour les irradiances $E=1000\text{W}/\text{m}^2$, $E=900\text{W}/\text{m}^2$, $E=600\text{W}/\text{m}^2$ et $E=300\text{W}/\text{m}^2$ avec une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$. Les puissances maximales obtenues sont respectivement de 10855W, 9755W, 6450W et 3125W, respectivement.

2.4 Modélisation du système éolien

L'énergie électrique est particulièrement une énergie largement utilisée car elle peut être produite grâce à plusieurs processus technologiques, tels que : l'hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie géothermique, et bien plus encore. Ces dernières énergies sont dites renouvelables et propres. L'énergie éolienne est devenue l'une des sources d'énergies renouvelables les plus importantes et les plus prometteuses. Toutefois, du fait de sa disponibilité imprévisible et aléatoire, les concepts de gestion de l'énergie éolienne sont essentiels pour extraire le maximum d'énergie du vent lorsqu'il est disponible. C'est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus efficaces pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent [110].

La structure du système de conversion de l'énergie éolienne (WECS) est composée, principalement, de trois (03) parties : la partie mécanique (rotor aérodynamique et boîte de vitesses), la partie électrique (générateur électrique, convertisseurs électroniques de puissance et charges électriques) et le système de contrôle.

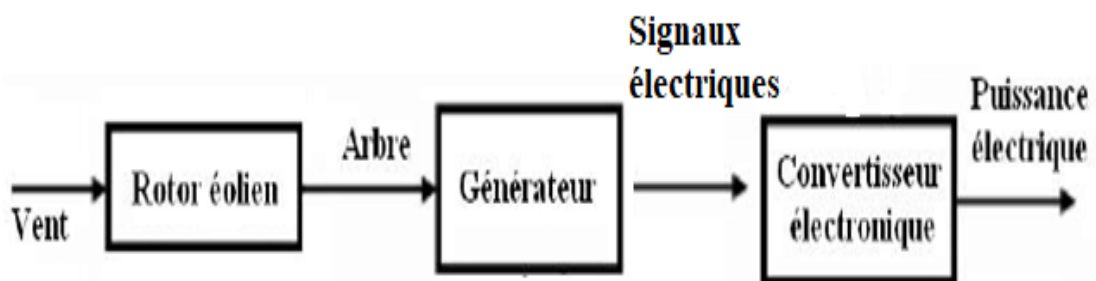


Figure 2.10 Structure du système de conversion de l'énergie éolienne

2.4.1 Modélisation de la turbine

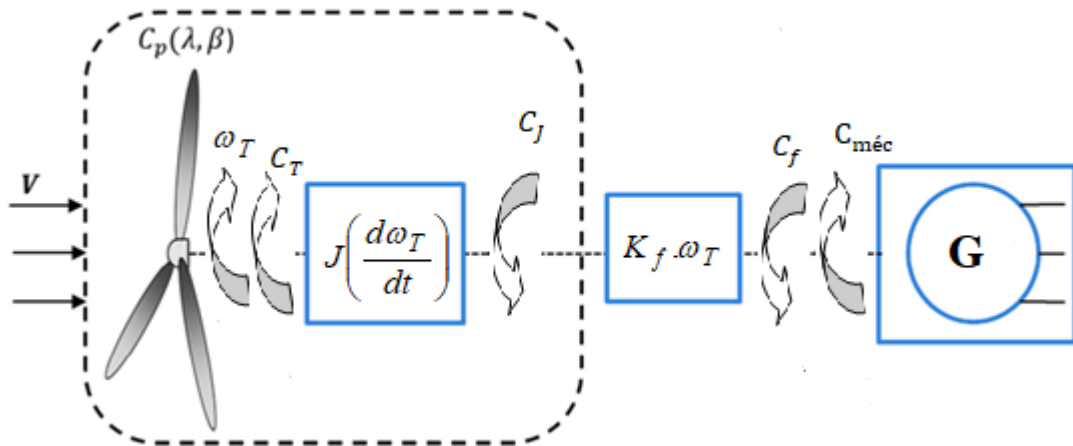


Figure 2.11 Schéma bloc d'une turbine éolienne

L'éolienne convertit l'énergie éolienne en puissance mécanique à partir de l'énergie cinétique du vent passant par la surface S de la voilure.

La puissance éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2.15)$$

P_v : puissance du vent (W), ρ : densité de l'air (kg/m^3), S : surface de la voilure (m^2), V_v : vitesse du vent (m/s).

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (2.16)$$

R : rayon de la voilure (m).

La vitesse spécifique (λ) est le rapport de la vitesse linéaire de la turbine ramenée à la vitesse de vent.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_T}{V_v} \quad (2.17)$$

ω_T : vitesse angulaire de rotation des pales (rad/s).

L'équation (2.18) définit la « limite de Betz » correspondant à la puissance maximale pouvant être extraite d'un vent donné [111] et que C_p est le coefficient de puissance :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \right) \quad (2.18)$$

et,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.19)$$

La puissance éolienne s'écrira :

$$P_{\acute{e}ol} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (2.20)$$

$P_{\acute{e}ol}$: puissance éolienne (W), $C_p(\lambda, \beta)$: coefficient de puissance, β : angle de calage ;
 λ : vitesse spécifique.

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_T = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\omega_T} \quad (2.21)$$

La puissance maximale théorique ($P_{\acute{e}olmax}$) qui peut être exploitée est approximativement comprise entre 60% et 70% et le (C_p^{opt}) est la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance (C_p).

Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale (λ_{opt}) pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant la vitesse du vent nominale (V_{vn}) et la vitesse de rotation nominale (ω_T).

2.4.1 Modélisation de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par :

$$J \left(\frac{d\omega_T}{dt} \right) = C_T - C_{em} - K_f \cdot \omega_T \quad (2.22)$$

Où,

J : moment d'inertie de l'ensemble ;

K_f : coefficient de frottement ;

C_{em} : couple électromécanique.

La modélisation de la turbine éolienne génère ses entrées : la vitesse du vent V_v , l'angle d'orientation des pales β , et la vitesse de rotation de la turbine $\omega_T(t)$. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse de la turbine $\omega_T(t)$, il a donc deux entrées : le couple C_T , le couple électromagnétique C_{em} fourni par la génératrice.

Le schéma montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale β et le couple électromagnétique de la génératrice C_{em} . La vitesse du vent V_v est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système [112].

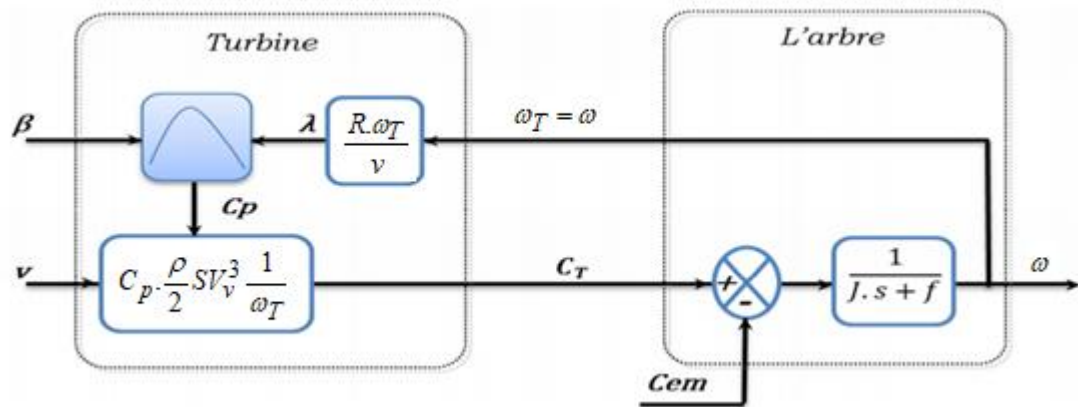


Figure 2.12 Schéma bloc du modèle de la turbine

2.4.4 Simulation d'un système éolien

La caractéristique de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est une forme de cloche comme le montre la figure 2.13. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, représente les points optimaux recherchés, qui définissent une courbe de puissance optimale.

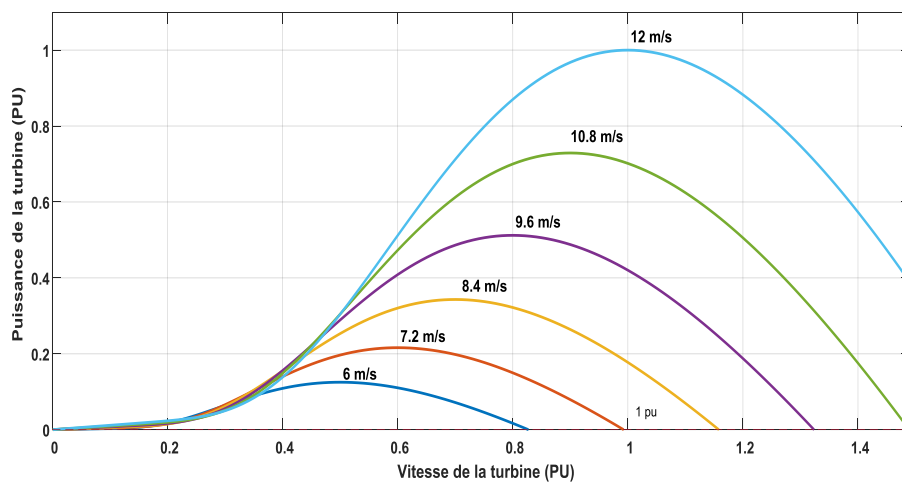


Figure 2.13 Caractéristiques de la turbine éolienne

La figure 2.14 représente les caractéristiques de C_P en fonction de l'angle de calage ou d'orientation des pales (β) on note que $\beta=0$ est l'angle fonctionnel où le coefficient de puissance est maximum.

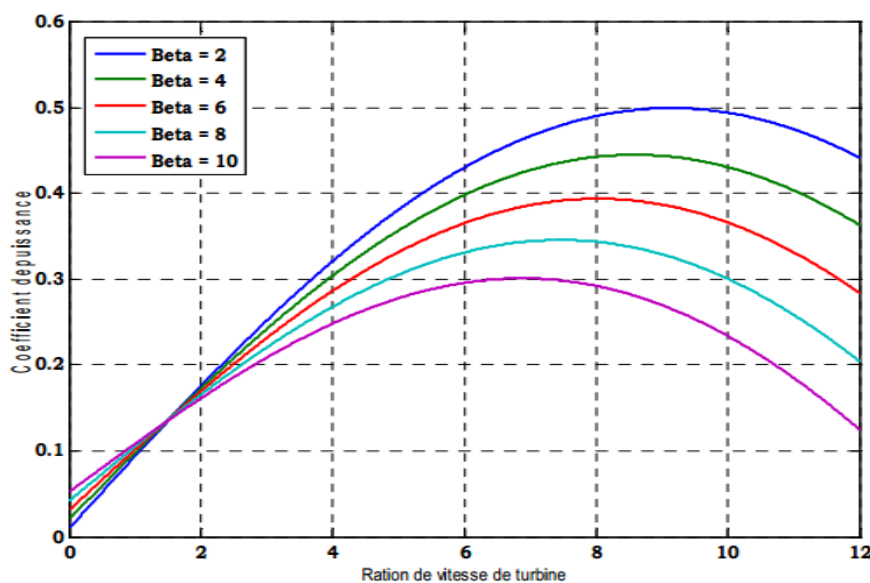


Figure 2.14 Caractéristique coefficient $C_P=f(\beta)$

2.5 Modélisation du système de stockage

Les systèmes de conversion d'énergie renouvelable génèrent de la puissance en fonction, principalement, des conditions météorologiques (irradiation, température et vitesse du vent). Comme il y a des périodes où la charge demande moins d'énergie que le système hybride fournisse, il est donc nécessaire et avantageux de prévoir un système de stockage d'énergie. Ainsi, l'excès d'énergie produite par rapport à celle dont a besoin la charge serait stockée (chargement des batteries) et quand l'énergie demandée par la charge est supérieure que celle que peut fournir le système, l'énergie stockée serait utilisée comme complément (déchargement des batteries) afin que la charge reçoive de l'énergie demandée quelque soient les conditions. Au final, l'énergie stockée pourra être consommée par la charge aux moments adéquats.

Les batteries sont des périphériques de stockage qui exigent, continuellement, de nombreux efforts pour améliorer leur fonctionnement. Parmi les caractéristiques importantes des batteries, on distingue [113] : la résistance interne (R_i), la tension à vide (E_0), la tension nominale, la tension de fin décharge, la capacité, le taux de décharge et recharge, la profondeur de décharge, l'influence des paramètres extérieurs, la durée de vie et nombre de jour d'autonomie. Par ailleurs, exprimée en pourcentage l'état de charge (EDC) (acronyme

est SOC de l'anglais State-Of-Charge) renseigne sur le niveau de charge de la batterie afin d'éviter les décharges profondes ou les charges excessives qui abîmeront les batteries. Cette observation a pour objectif de ralentir la dégradation de la batterie afin d'allonger au maximum sa durée de vie.

L'EDC est défini comme le rapport de la capacité disponible par la capacité nominale en pourcent [114], comme l'exprime l'équation suivante :

$$EDC = \frac{\text{Capacit édisponible [AH]}}{\text{Capacit énominale [AH]}} \cdot 100\% \quad (2.23)$$

2.5.1 Modélisation de la batterie

La batterie peut être représentée par son circuit équivalent [115] montré par la figure 2.15.

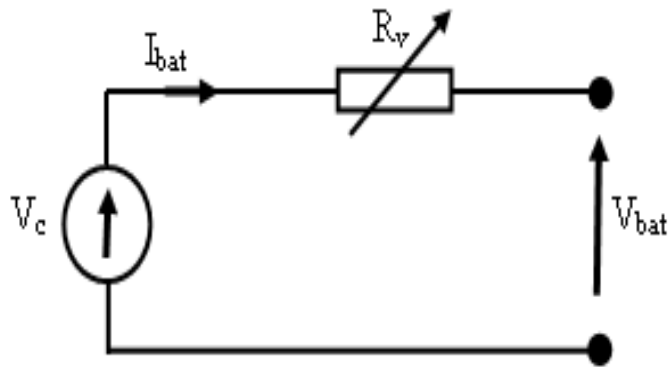


Figure 2.15 Modèle R-C de la batterie

Où,

V_c : source de tension idéale d'entrée (V);

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie (V);

I_{bat} : courant développé par la batterie (A);

R_v : résistance interne variable de la batterie (Ω).

Avec,

$$R_v = R_i + k_b \frac{C_{bat}}{C_{bat} - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (2.24)$$

R_i : résistance interne (Ω);

k_b : coefficient de polarisation ;

C_{bat} : capacité de la batterie (Ah) ;

De la figure 2.15, on déduit l'équation (2.25) de la tension aux bornes de la batterie:

$$V_{bat}(t) = V_c - R_v I_{bat}(t) \quad (2.25)$$

Et, l'état de charge (EDC) de la batterie est :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (2.26)$$

Avec, Q_d : quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

En littérature, on distingue deux (2) types d'accumulateurs [116], notamment : ceux contenant une réaction chimique irréversible (non rechargeables) et ceux dont la réaction est réversible (rechargeables). On y trouve, le modèle le plus populaire notamment les piles rechargeables.

Dans le cadre de la réalisation de ce travail, nous nous sommes intéressés au stockage réversible (chargement, déchargement), en vue de le considérer dans la configuration du système étudié. A cet effet, le système de stockage doit se charger et se décharger adéquatement.

2.5.2 Choix de la batterie

On considère une tension d'entrée contrôlée $V_{in}=800V$ et on impose des courants de références de $-15A$, $+25A$, $+10A$ et $-30A$, respectivement (si $i_{ref} < 0$, on décharge la batterie et si $i_{ref} > 0$, on la recharge) afin d'étudier la capacité de contrôler la charge et de décharge de la batterie. En modifiant pour chaque simulation la tension nominale de la batterie (Lithium Ion) de la bibliothèque logiciel MatLab, avec comme valeur : $V_{bat}=300V$, $V_{bat}=600V$, $V_{bat}=1000V$, $V_{bat}=1200V$ et un état initiale de charge $EDC=70\%$.

2.5.3 Résultats de simulations

Les résultats de simulations obtenus sont représentés par les figures (2.16, 2.17, 2.18 et 2.19). Elles présentent l'EDC, les courants et les tensions de la batterie sous l'effet de la variation de la tension nominale de la batterie par rapport à celle de l'entrée du convertisseur.

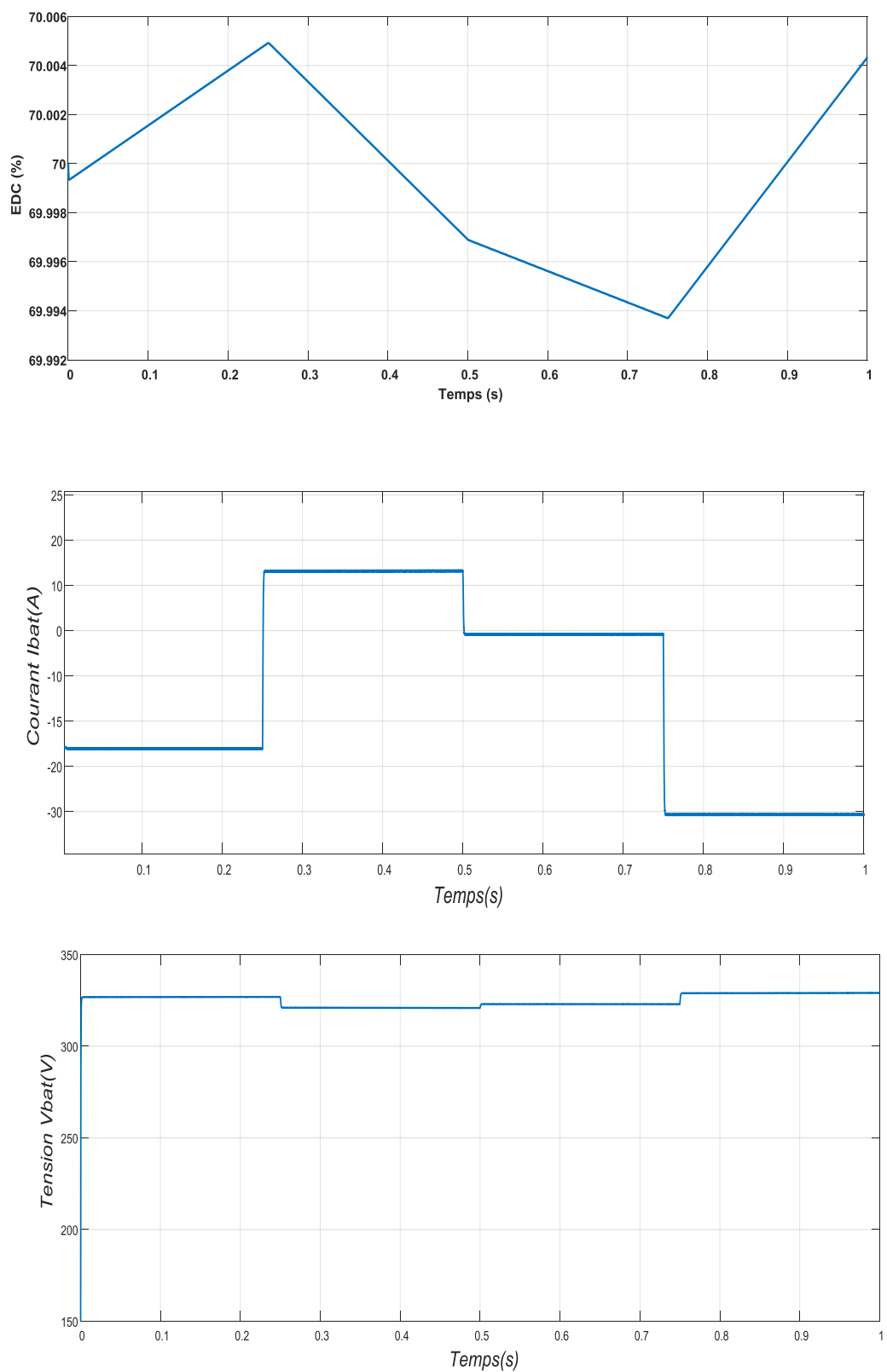


Figure 2.16 Etat des grandeurs de la batterie sous $V_{bat}=300V$

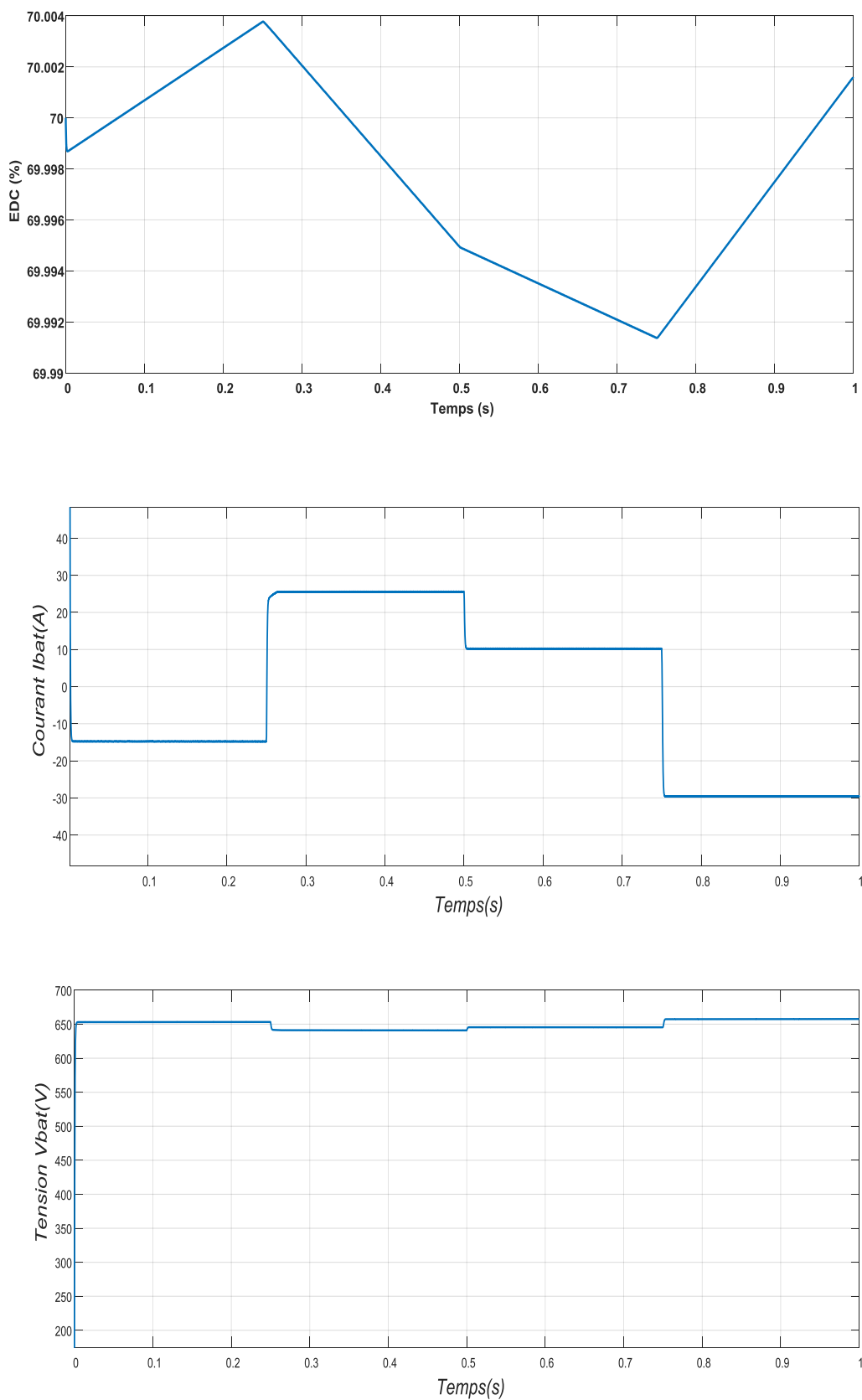


Figure 2.17 Etat des grandeurs de la batterie sous $V_{bat}=600V$

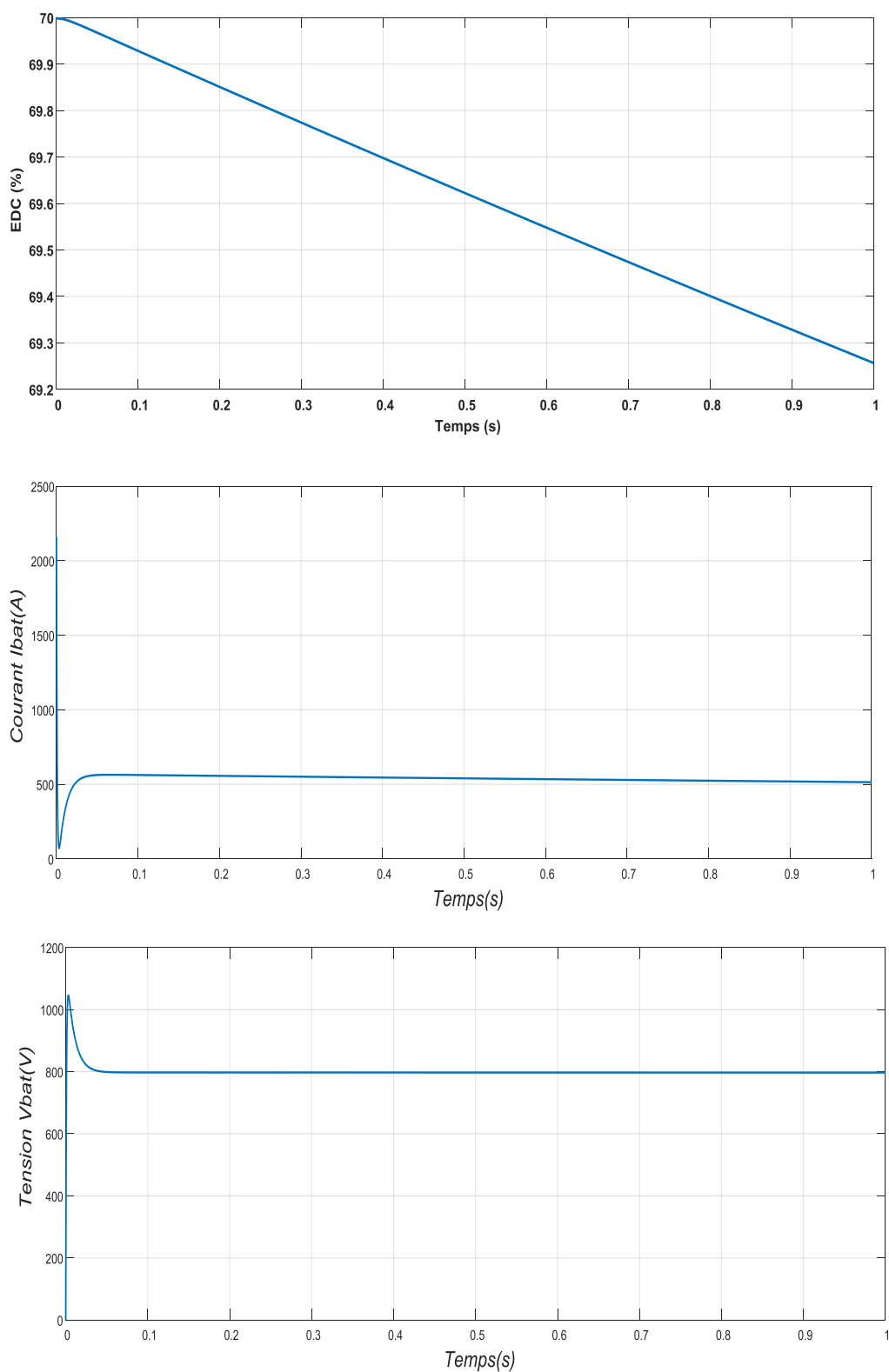


Figure 2.18 Etat des grandeurs de la batterie sous $V_{bat}=1000V$

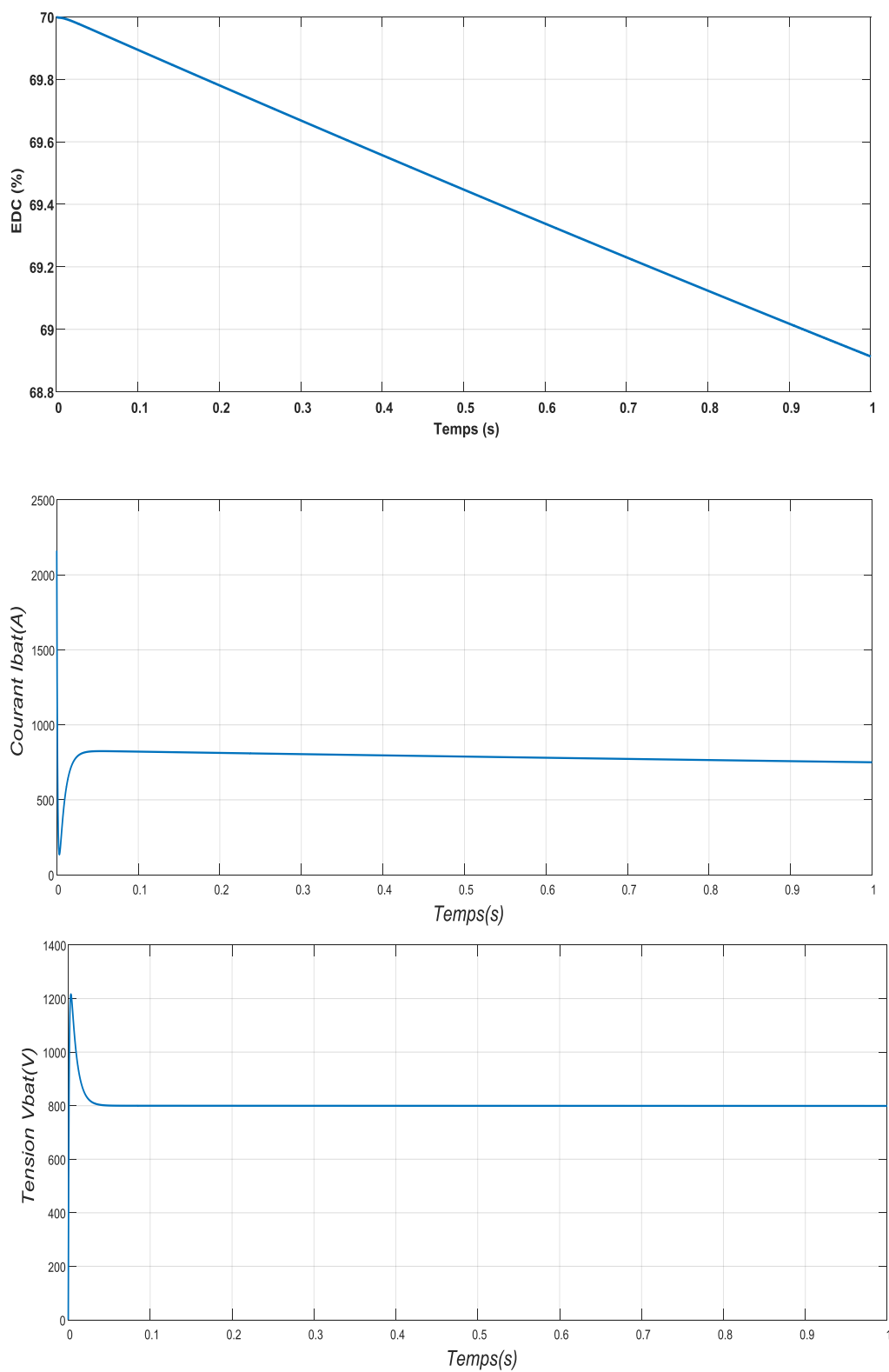


Figure 2.19 Etat des grandeurs de la batterie sous $V_{bat}=1200V$

L'analyse de ces figures permet de conclure que si la tension nominale de la batterie est inférieure à celle de l'entrée du convertisseur, le système est capable de fonctionner en charge et décharge la batterie. Contrairement, le système est incapable.

2.6 Modélisation des composants

Les charges sont des consommateurs d'énergie électrique en fonction de leurs caractéristiques. Le système d'équation de la source triphasée est défini par le système d'équation (2.27) où, E : valeur efficace de la tension de la source.

$$\begin{cases} E_a(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \\ E_b(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ E_c(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.27)$$

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution, un onduleur est nécessairement utilisé. Où, la connexion de cet onduleur au réseau s'effectue à travers un filtre ($R_f L_f$) dont le schéma de principe est montré par la figure 2.20.

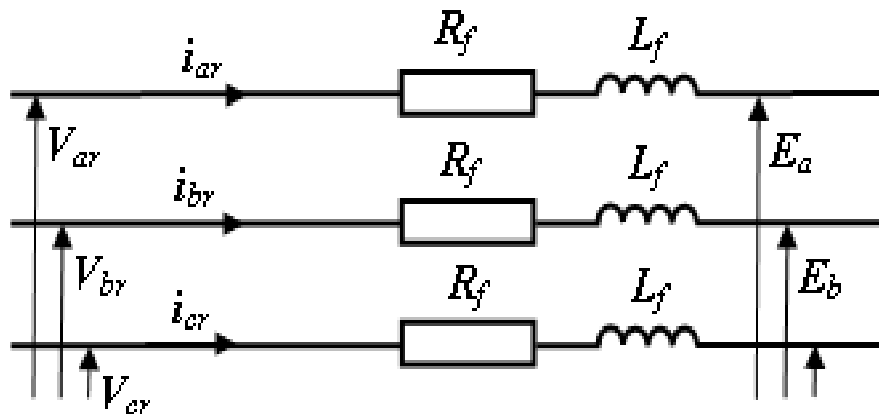


Figure 2.20 Schéma de principe du filtre($R_f L_f$)

L'application de la loi des mailles pour chaque phase au point de raccordement du filtre donne les équations qui lient les tensions modulées par le convertisseur et les courants transitant à travers le filtre :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_f i_{ar} + L_f \frac{di_{ar}}{dt} + E_a \\ V_{br} = R_f i_{br} + L_f \frac{di_{br}}{dt} + E_b \\ V_{cr} = R_f i_{cr} + L_f \frac{di_{cr}}{dt} + E_c \end{cases} \quad (2.28)$$

D'où, sous forme de Laplace

$$\begin{cases} I_{ar} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{ar} - E_a) \\ I_{br} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{br} - E_b) \\ I_{cr} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{cr} - E_c) \end{cases} \quad (2.29)$$

Avec, S : opérateur de Laplace

Dans le but d'assurer la synchronisation du convertisseur (onduleur) avec le réseau électrique, une structure boucle à verrouillage de phase PLL (Phase Locked Loop) a été utilisée. Son principe de calcul est montré par la figure 2.21.

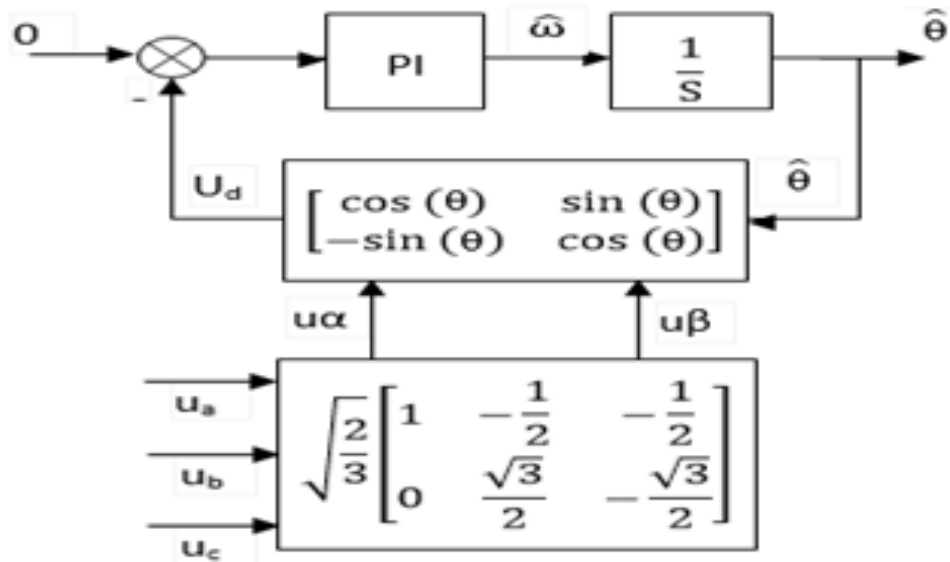


Figure 2.21 Schéma de principe d'une PLL

2.7 Modélisation des convertisseurs statiques

2.7.1 Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Le générateur photovoltaïque (PV) génère une puissance qui varie fortement en fonction de l'éclairement, la température et du vieillissement global du système. Donc, il faut adapter son comportement lorsqu'il est connecté à une charge et ce quel que soit sa nature (continue (DC)) comme les batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique. En effet, pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est de prévoir un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur entre la source et la charge tout en assurant grâce à une stratégie de control, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

Un hacheur est un convertisseur statique qui convertie une source continue à son entrée à une source continue à sa sortie. Il est appelé convertisseur DC/DC et caractérisé, en pratique, par deux (2) topologies principales : notamment, la topologie dite isolée et le Fly Back. Concernant la topologie isolée, elle nécessite un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence et elle est principalement utilisée pour les alimentations à découpage [117]. Par contre, la topologie Fly Back qui est non isolée et n'utilise pas de transformateur d'isolement, est principalement utilisée dans les entraînements des machines à courant continu et les chaînes des systèmes d'alimentation photovoltaïque [118]. Les convertisseurs de topologie non isolée sont classés en trois (3) catégories : abaisseur, élévateur et mixte (élévateur-abaisseur) et sont respectivement, appelés en anglais Buck, Boost.

La topologie Buck est utilisée pour avoir une tension de sortie faible par rapport à celle de l'entrée. Dans les applications PV, elle est habituellement utilisée pour les chargeurs des batteries et les systèmes de pompage de l'eau. La topologie Boost est utilisée pour augmenter la tension d'entrée. Les systèmes de production de l'énergie l'utilisent pour augmenter la tension de sortie au niveau de l'entrée de l'onduleur. Aussi, il y a des topologies qui sont capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost [119].

Selon les circuits correspondants aux topologies des types de convertisseurs, on remarque que les semi-conducteurs nécessitent une commande de la base. Cependant, les périodes de fermeture (T_f) (bloqué : non passant) et d'ouverture (T_o) (passant) pour une période du cycle de commande (T_c) définit le rapport cyclique (D).

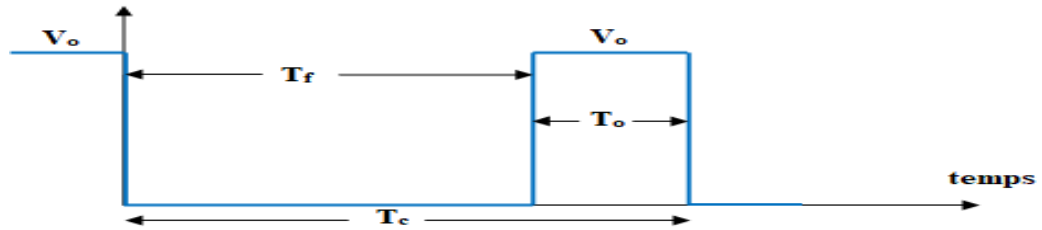


Figure 2.22 Périodes de fermeture et ouverture d'un interrupteur

Le rapport cyclique est alors exprimé par la relation suivante :

$$D = \frac{T_o}{T_c} \in [0 \ 1] \tag{2.30}$$

2.7.1.1 Hacheur survolteur (Boost-converter)

Connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base de son circuit électrique où K désigne le semi-conducteur est donné par la figure 2.23. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [120].

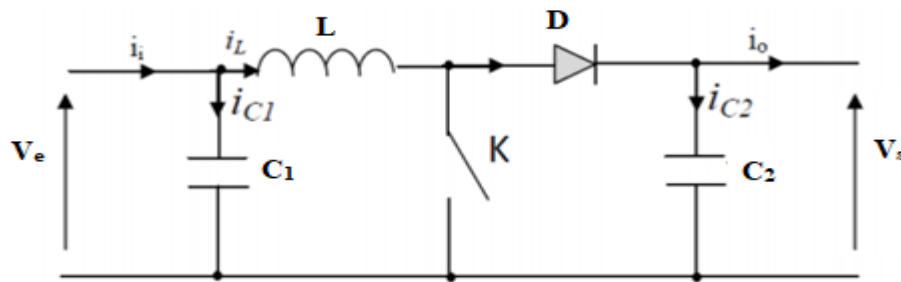


Figure 2.23 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (Boost). La figure 2.24 montre les configurations relatives aux deux phases de fonctionnement.

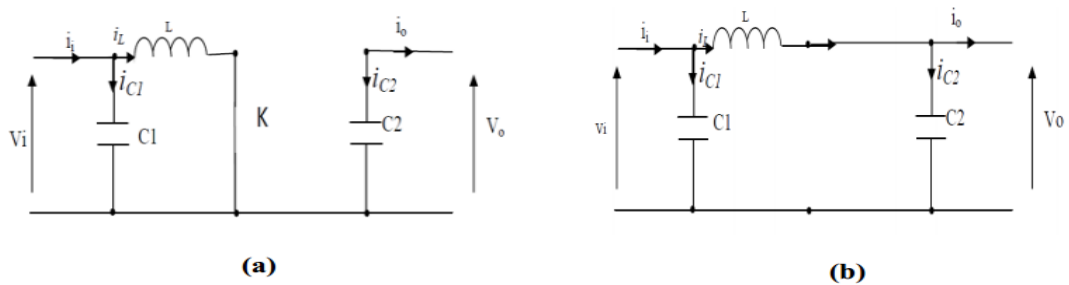


Figure 2.24 Schémas équivalents du hacheur survolteur: K (a) : fermé, (b) : ouvert

1^{ère} phase :

Elle correspond à la séquence de fonctionnement ($0 \leq t \leq DT_s$)

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (2.31)$$

2^{ème} phase :

Elle correspond à la seconde séquence de fonctionnement ($(1-D)T_s$) soit ($DT \leq t \leq T$)

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (2.32)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1-D) \quad (2.33)$$

En appliquant la relation (2.33) sur les systèmes d'équations (2.31) et (2.32), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière. Ainsi, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [121].

$$\begin{cases} i_l = i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-D)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (1-D)v_0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Le convertisseur DC-DC joue le rôle d'adaptateur entre le GPV et la charge continue DC pour avoir un transfert maximal de puissance. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du point de puissance maximale (*PPM*) quelque soient les conditions de fonctionnement (irradiation, température, variation de charge, etc.).

2.7.2 Convertisseur AC-DC (Redresseur)

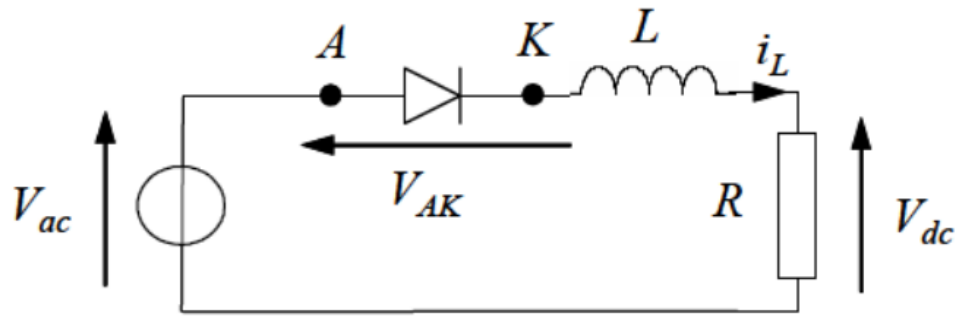


Figure 2.25 Schéma équivalent du convertisseur AC-DC

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \quad (2.35)$$

Où, la tension V_L aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction (c) de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ($c = 1$), on a :

$$V_L = V_{ac} - V_{dc} \quad (2.36)$$

Et lorsque celle-ci est bloquée ($c = 0$) :

$$V_L = 0 \quad (2.37)$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction c de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c (V_{ac} - V_{dc}) \quad (2.38)$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance :

$$V_{dc} = R i_L \quad (2.39)$$

Donc, l'équation du courant dans l'inductance devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c (V_{ac} - R i_L) dt \quad (2.40)$$

Ainsi, à partir des règles élémentaires évoquées précédemment, nous pouvons dire que la diode est conductrice ($c = 1$), si et seulement si, l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \text{ ou } i_L > 0 \quad (2.41)$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons :

$$V_{AK} = V_{ac} + V_{dc} \quad (2.42)$$

Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédentes n'est pas remplie, la diode est bloquée ($c=0$).

2.7.3 Convertisseur DC-AC (Onduleur)

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de puissance qui transforment l'énergie continue en énergie alternative ayant une forme plus proche d'une sinusoïde pour que le taux des harmoniques (THD) soit très faible [122]. La figure 2.26 présente le symbole d'un tel convertisseur.

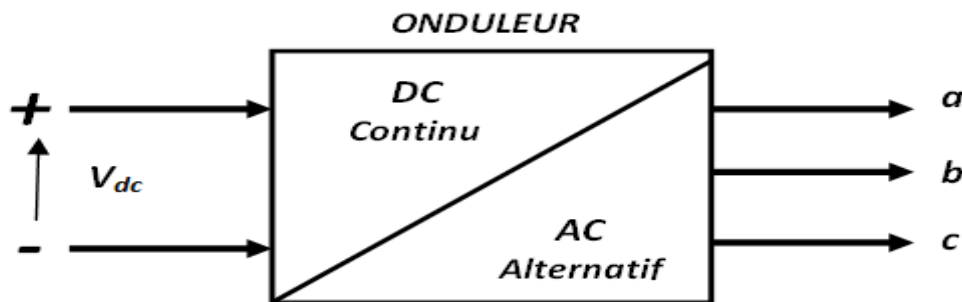


Figure 2.26 Symbole de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé

Pour les systèmes hybrides couplés aux réseaux de distribution, l'onduleur permet de transformer le courant continu produit par la chaîne de conversion en courant alternatif. Ce courant sera adapté, grâce à un circuit à verrouillage de phase (PLL: Phase Locked Loop) à la fréquence de la tension du réseau [123,124].

Le schéma de la figure 2.27 présente un onduleur triphasé à structure de tension [125]. Il est composé de trois (03) bras dont chacun est constitué de deux (2) semi-conducteurs (interrupteurs) réversibles en courant (onduleur à 2 niveaux) commandable à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (IGBT) et d'une diode montée en antiparallèle, commandé de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode où les semi conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés n'existe que durant les commutations.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension U_{dc} ou à deux condensateurs avec un point milieu C_{dc1} , C_{dc2} [126,127]. Le filtre passif habituellement du premier ordre (L_f , R_f) est inséré pour raccorder l'onduleur de tension au réseau de distribution.

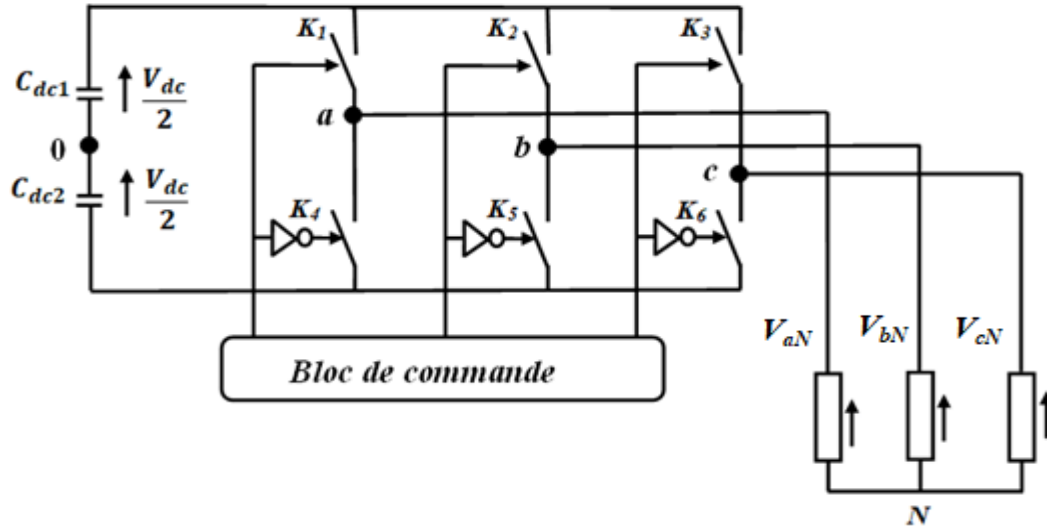


Figure 2.27 Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

On aura alors,

$$[V_{abc}] = V_{dc} \cdot [T] \quad (2.43)$$

Avec,

$[V_{abc}]$ est le système de tensions alternatives équilibré :

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T \quad (2.44)$$

$[T]$ est la matrice de transfert de l'onduleur ;

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions de formes les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées [128, 129]. Il s'agit de générer les ordres d'ouvertures et de fermetures des semi-conducteurs (K) de manière que la tension à la sortie de l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

2.7.4 Convertisseur Bidirectionnel DC-DC (Buck-Boost)

Les hacheurs réversibles permettent l'inversion du courant ou de la tension. Dans cette catégorie, on distingue [130, 131] :

- **Hacheur réversible en tension** (deux quadrants): c'est uniquement la tension appliquée à la charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.
- **Hacheur réversible en courant** (deux quadrants): C'est uniquement le courant de charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.

Le circuit de montage du convertisseur Buck- Boost pour la charge et décharge de la batterie est représenté par la figure 2.28.

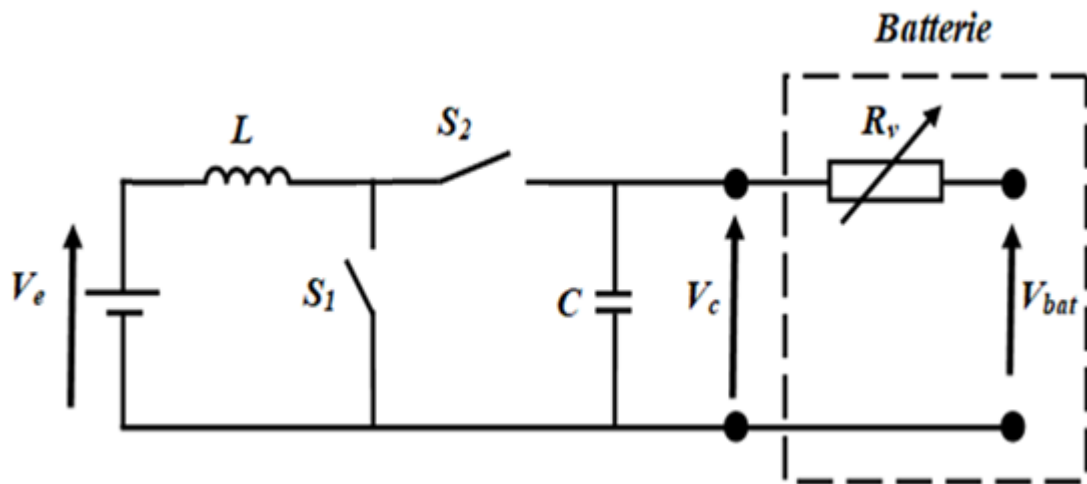


Figure 2.28 Schéma du montage du convertisseur Buck –Boost

On utilise un régulateur proportionnel intégral (*PI*) pour réguler le courant i_L . La nouvelle entrée (u) qui représente la sortie du régulateur est définie comme :

$$u = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.46)$$

En utilisant la transformée de Laplace, on obtient :

$$u = L \cdot S i_L \quad (2.47)$$

Soit G la fonction de transfert du courant en boucle ouverte :

$$G = \frac{i_L}{u} = \frac{1}{S \cdot L} \quad (2.48)$$

Le régulateur élabore la commande du convertisseur à partir du signal de l'écart entre la référence I_{Lref} et le courant dans l'inductance I_L .

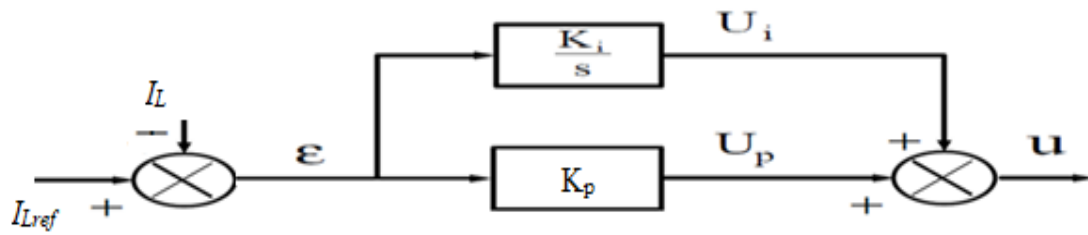


Figure 2.29 Structure du régulateur PI

La fonction de transfert du régulateur est :

$$C(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \tag{2.49}$$

La loi de commande est donnée par :

$$V_e = V_c + L \frac{di_L}{dt} \tag{2.50}$$

D'après le modèle d'état, on obtient :

$$u = L \frac{di_L}{dt} = V_e - (1 - D)V_c \tag{2.51}$$

$$D = 1 + \frac{u - V_e}{V_c} \tag{2.52}$$

On utilise, la technique MLI pour générer les impulsions de commande correspondante à D déterminé. Le circuit fonctionne en mode Boost quand la batterie se décharge et en mode Buck quand elle se charge.

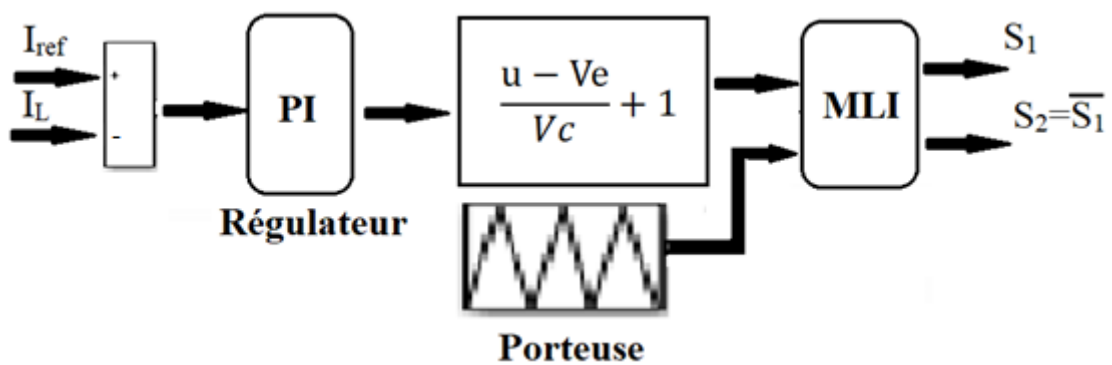


Figure 2.30 Schéma de la commande du convertisseur Buck-Boost

A partir d'une source de tension contrôlée V_e , on commande le convertisseur Buck-Boost en comparant le courant mesuré avec le courant de référence. Cependant, lorsque le courant de référence est négatif, on décharge la batterie et lorsqu'il est positif, on la recharge.

2.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré principalement aux définitions, rôle et modélisation des différents constituants d'un système de conversion hybride. Aussi, les principes de fonctionnement du système hybride de production d'énergie sont amplement développés notamment en termes de l'influence des conditions météorologique, (irradiation, température et vent).

Le système hybride à énergie renouvelables est complexe car il comprend plusieurs sources de production d'énergie. Cependant, la conception d'un système hybride nécessite la modélisation des différents composants qui constituent ce système afin de produire le comportement de l'ensemble sous différents scénarios de changement des conditions météorologiques notamment le niveau de l'irradiation, température et la vitesse du vent pour le cas d'un système hybride Solaire-Eolien-Batteries.

CHAPITRE 3

COMMANDE D'UN SYSTEME D'ENERGIE HYBRIDE

3.1 Introduction

Les systèmes hybrides sont constitués de ressources à énergies renouvelables qui de nature leur disponibilité dépend, essentiellement, des conditions météorologiques notamment l'irradiation et la température pour les systèmes solaires et la vitesse du vent pour les systèmes éoliens. Cependant, les architectures des systèmes de conversion solaire et éolienne exigent l'utilisation de convertisseurs statiques de puissance tels que des hacheurs, redresseurs, onduleurs et nécessitent pour l'utilisation des algorithmes d'optimisation de l'extraction de la puissance maximale disponible.

A cet effet, dans le cadre de ce travail ce chapitre est subdivisé en deux (02) parties essentielles. La première partie est consacrée à analyser l'influence d'un changement uniforme de l'irradiation et de la température aussi bien que l'influence du phénomène d'ombrage (variation non uniforme de l'irradiation) sur le comportement des panneaux photovoltaïques. Puisque, l'extraction de la puissance maximale développée par le système photovoltaïque est une exigence certaine, nous considérons l'analyse des performances de six (06) méthodes d'extraction de la puissance maximale dont trois (03) dites classiques (P&O, Inc_Cond et DISMC) et les autres dites méta-heuristiques. La seconde partie consiste à la présentation de la structure du système éolien adopté aussi bien qu'au développement et qu'application de deux (02) types de commandes, notamment, la commande en mode glissant et la commande synergétique.

3.2 Méthodes classiques de poursuite du point de puissance maximale

La stratégie de contrôle de la puissance de sortie maximale du panneau où autrement la puissance maximale que peut délivrer un panneau photovoltaïque sous une irradiation et une température données, exige généralement les mesures des tensions (V_{pv}) et courant (I_{pv}) du panneau afin de déduire la valeur du rapport correspondant pour la commande du semi-

conducteur du hacheur. La configuration du système étudié est présentée par la figure 3.1. Elle comprend, principalement, un panneau solaire, un hacheur, le bloc MPPT et la charge.

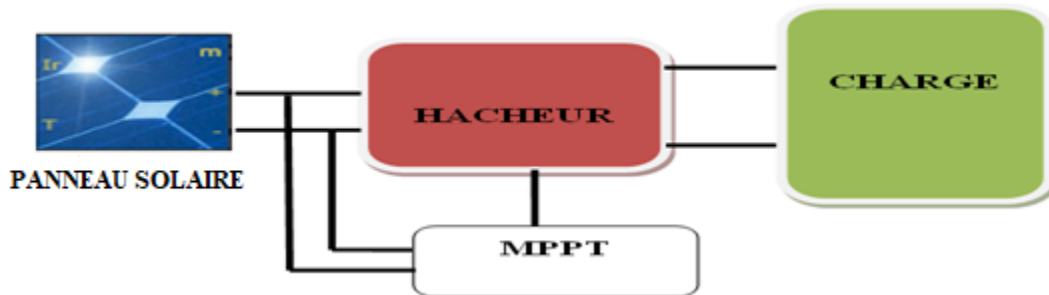


Figure 3.1 Système de conversion photovoltaïque

La production de la puissance depuis les systèmes dépend essentiellement de l'irradiation et de la température [132]. Les figures 3.2 et 3.3 présentent, respectivement, les allures des courants et de la puissance des panneaux photovoltaïques sous l'effet de la variation de l'irradiation et de la température.

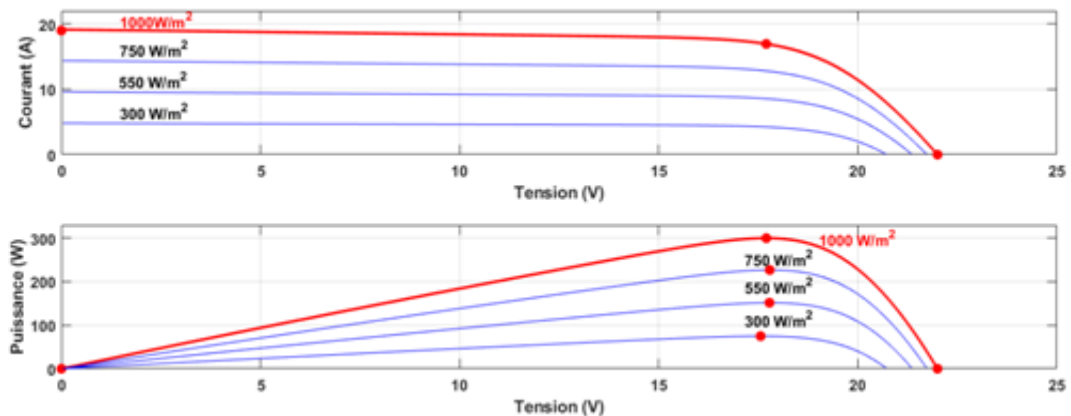


Figure 3.2 Caractéristique sous l'irradiation variable et température constante

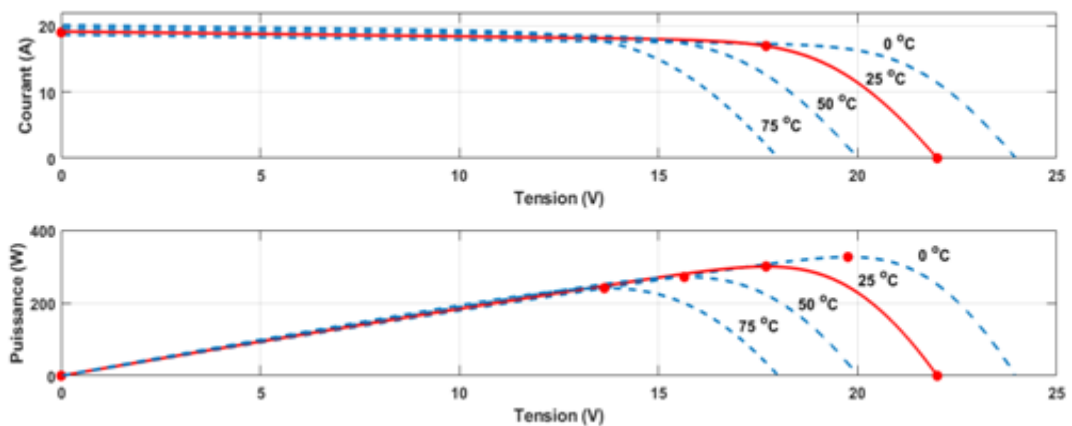


Figure 3.3 Caractéristique sous l'irradiation constante et température variable

On remarque clairement que le point de puissance maximale dépend du niveau de l'irradiation et de température, donc il est nécessaire de prévoir l'utilisation du bloc d'extraction de puissance maximale (MPPT) afin d'extraire la puissance maximale développée par panneau quelques soient les conditions météorologiques. Ces méthodes différentes par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur robustesse. Les sections suivantes présentent quelques méthodes.

3.2.1 Technique de perturbation et observation

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir le point de puissance maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque. Les premières utilisations du MPPT datent de 1968. Il s'agit d'un genre de contrôleur qui va forcer le générateur à travailler à sa puissance maximale. Parmi les méthodes, on considère celle dite perturbation et observation (P&O). Cette dernière est très souvent exploitée et citée grâce à sa simplicité. Elle repose sur un procédé algorithmique dans le but de rechercher le point de puissance maximale (MPPT) [133-135]. Son principe se base sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur, ou on agit directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie. Donc, suite à une perturbation de tension, la puissance augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPPT.

Les figures 3.4 et 3.5 présentent, respectivement, le principe de fonctionnement et l'organigramme de la technique de la commande MPPT de type P&O. La puissance à chaque instant est calculée grâce aux valeurs de la tension et du courant du panneau photovoltaïque ce qui nécessite l'utilisation de deux capteurs.

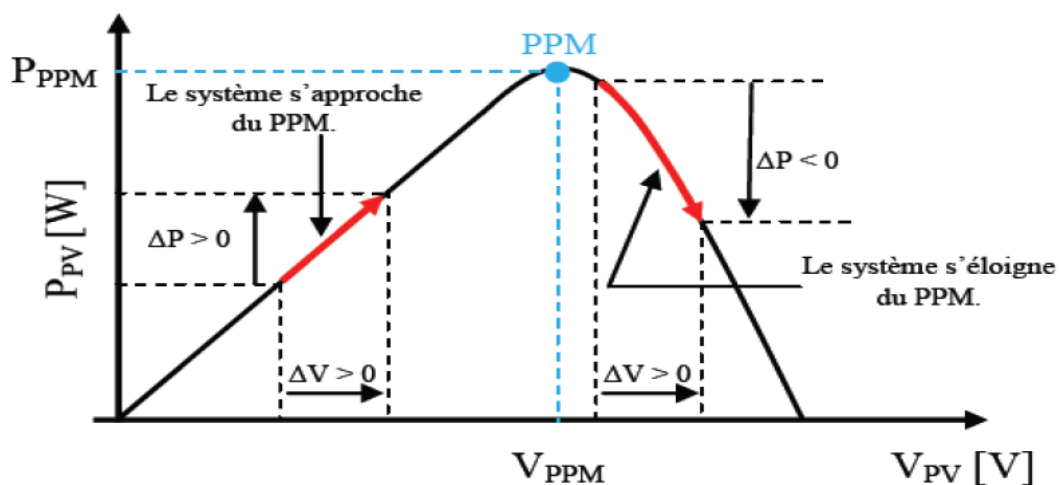


Figure 3.4 Principe de la technique P&O

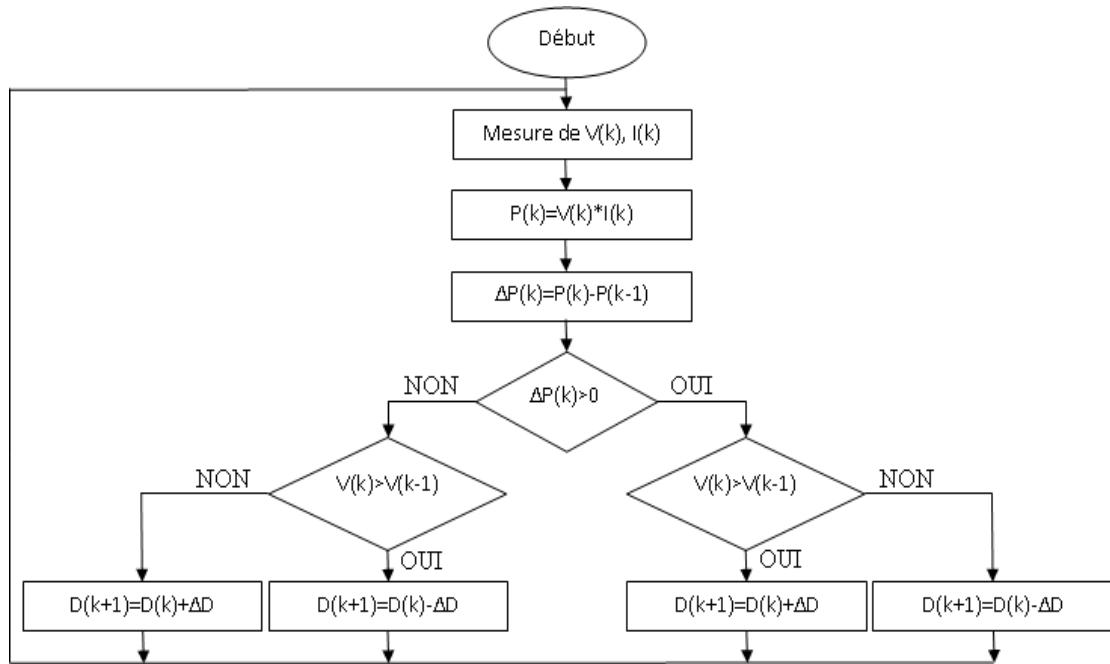


Figure 3.5 Algorithme de la méthode P&O

Cette section est réservée à l'analyse par simulation du système photovoltaïque sous différentes conditions climatiques. Pour des valeurs de $E=1000\text{W/m}^2$, 750W/m^2 , 500W/m^2 , 250W/m^2 (irradiation variable) et une température constante (25°C) comme le montre la figure 3.6(a) le panneau délivre le maximum de puissance comme l'indiquent la figure 3.6(b).

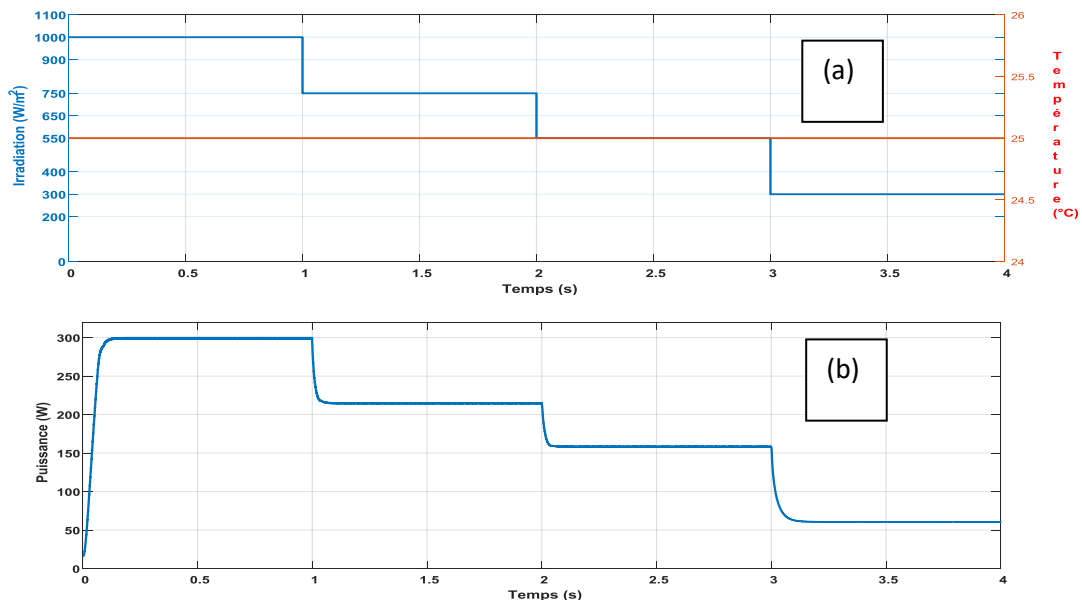


Figure 3.6 Puissance extraire avec P&O sous E variable

Dans le cas où la température est variable $T= 0^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}, 75^{\circ}\text{C}$ et l'irradiation est constante ($E=1000\text{W/m}^2$) les figures 3.7(a) et 3.7(b) présentent l'évolution de la température, l'irradiation et de la puissance extraite par le panneau.

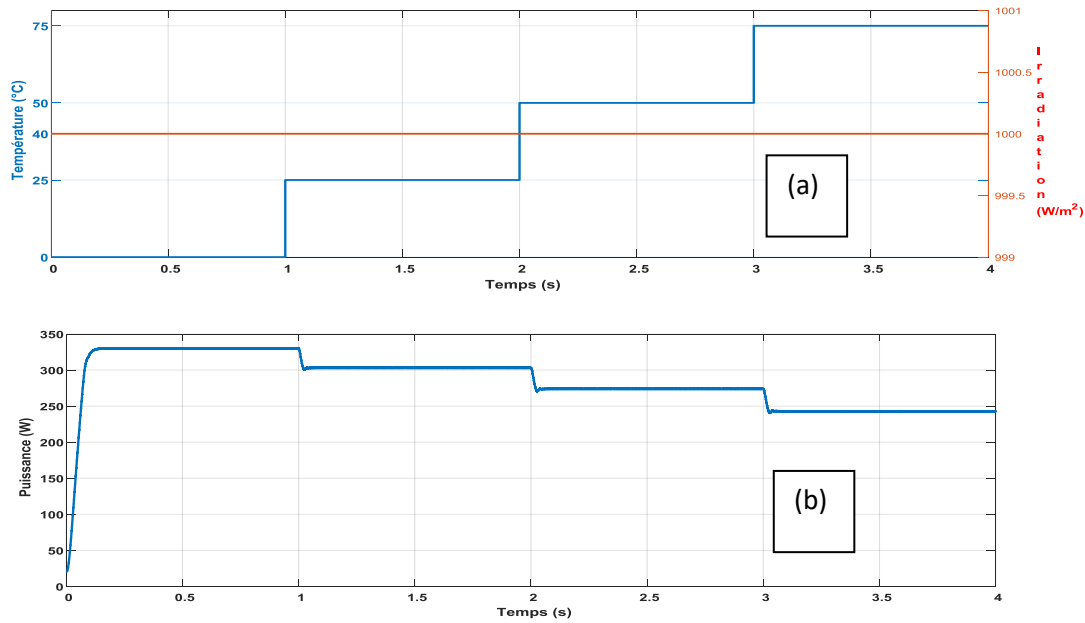


Figure 3.7 Puissance extraite avec P&O sous T variable

3.2.2 Méthode par incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \tag{3.1}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \tag{3.2}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} \tag{3.3}$$

Le terme I_{pv}/V_{pv} représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et dI_{pv}/dV_{pv} représente le terme d'incrément de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point PPM [136-138].

$$\begin{cases} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} & \left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0\right) \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} & \left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0\right) \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} & \left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0\right) \end{cases} \quad (3.4)$$

L'organigramme de cette méthode est présenté par la figure 3.8.

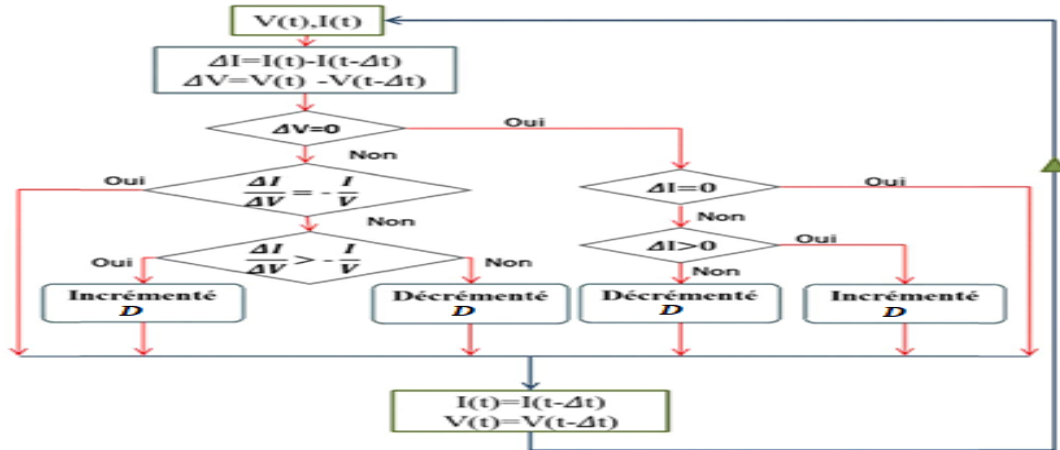


Figure 3.8 Organigramme de la technique MPPT (Inc-Cond)

Cette méthode a été aussi testée par simulation sous le changement uniforme de l'irradiation et de la température. Sous ces dernières conditions, les résultats obtenus sont illustrés, respectivement, par les figures 3.9 et 3.10. Ainsi, on remarque que cette technique assure l'extraction de la puissance maximale correspondante aux valeurs instantanées de l'irradiation et de la température.

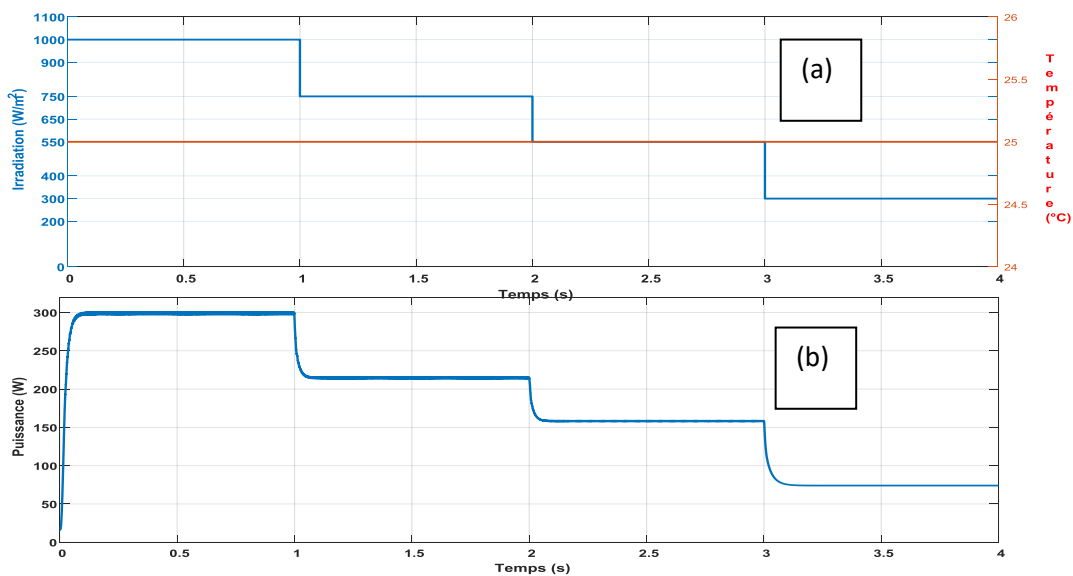


Figure 3.9 Puissance extraite avec Inc-Cond sous E variable

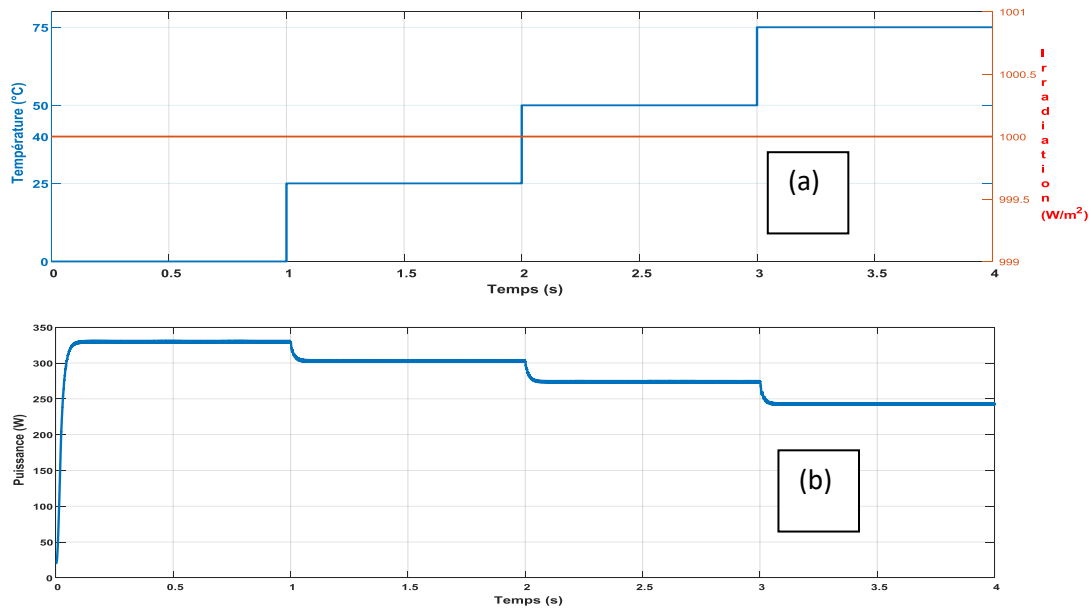


Figure 3.10 Puissance extraite avec Inc-Cond sous T variable

3.2.3 Mode Glissant à Double Intégral

Il s'agit de la commande par mode glissant à double intégral dont l'abréviation en anglais est DISMC (Double Integral Sliding Mode Control) appliquée pour le suivi de la puissance maximale produite par un panneau solaire. Elle a pour rôle d'imposer au hacheur le rapport cyclique exact (D) adéquat pour maintenir le générateur photovoltaïque (GPV) à sa puissance maximale.

$$\dot{x}_1 = f(x_1) + g(x_1)u_1 \quad (3.5)$$

$$u_1 = \begin{cases} 0 & \text{Si } S_1 > 0 \\ 1 & \text{Si } S_1 < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Où,

S_1 est la surface de commutation, qui est exprimée par,

$$S_1 = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3 + a_4 e_4 \quad (3.7)$$

Les termes a_1 - a_4 désignent les paramètres de surface de glissement, et e_1 - e_4 sont les signaux d'erreur.

$$\begin{cases} e_1 = i_L^* - i_L / i_L^* = A(V_{pv}^* - \beta_{V_{pv}}) \\ e_2 = V_{pv}^* - \beta_{V_{pv}} \\ e_3 = \int (V_{pv}^* - \beta_{V_{pv}}) dt \\ e_4 = \int [\int (V_{pv}^* - \beta_{V_{pv}}) dt] dt \end{cases} \quad (3.8)$$

Où, A est le gain amplifié de l'erreur de tension. L'application du DISMC est réalisée par le calcul de la commande équivalente u_{leq} . Cela peut être dérivé de la condition d'invariance, $\dot{S}_1=0$,

$$\dot{S}_1 = a_1 \dot{e}_1 + a_2 \dot{e}_2 + a_3 \dot{e}_3 + a_4 \dot{e}_4 = 0 \quad (3.9)$$

$$u_{leq} = 1 - A_1 \frac{i_{c_e}}{V_{dc}} - \frac{V_{pv}}{V_{dc}} + A_2 \frac{e_2}{V_{dc}} + A_3 \frac{e_3}{V_{dc}} \quad (3.10)$$

$$A_1 = \left(\frac{A\beta L}{C_e} + \frac{a_2\beta L}{a_1 C_e} \right), A_2 = \frac{a_3 L}{a_1} \text{ and } A_3 = \frac{a_4 L}{a_1} \quad (3.11)$$

A_1, A_2 , et A_3 paramètres déterminés selon les critères d'existence et de stabilité [139-142]. La loi de commande en mode glissant à double intégral est dérivée à l'aide de la technique en Modulation de Largeur d'Impulsion(MLI), en comparant le signal de commande dit de référence $v_{référence}$ avec un signal dit porteuse $v_{porteuse}$.

$$\begin{cases} v_{référence} = (V_{dc} - V_{pv}) - A_1 i_{C_e} + A_2 e_2 + A_3 e_3 \\ v_{porteuse} = \beta V_{pv} \end{cases} \quad (3.12)$$

A l'issue de ce développement mathématique, un programme de simulation a été développé sous l'environnement MatLab/Simulink et l'ensemble du système a été testé sous les conditions de l'irradiation et de la température définies précédemment. Alors, les résultats de simulation sont représentés par les figures 3.11 et 3.12.

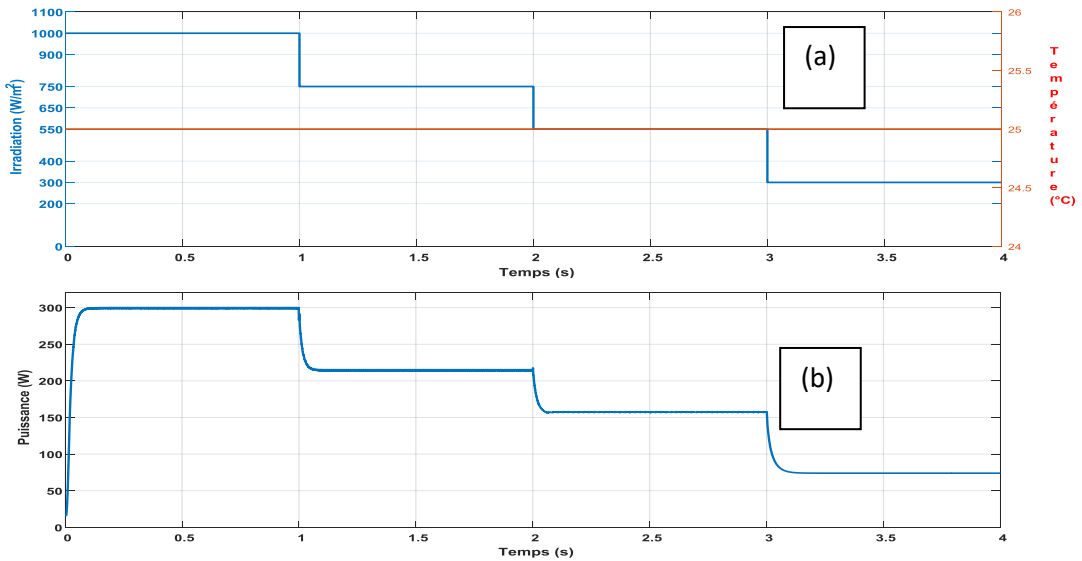


Figure 3.11 Puissance extraite avec DISMC sous E variable

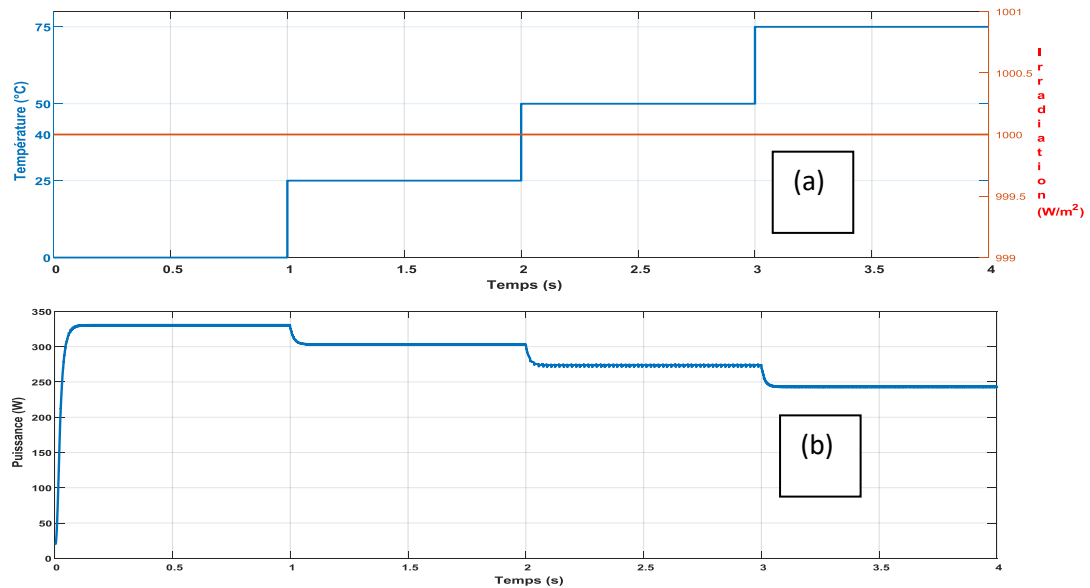


Figure 3.12 Puissance extraite avec DISMC sous T variable

- Comparaison des performances des algorithmes

Technique MPPT	Erreur statique (W)	Temps de réponse (s)	MPPT rendement (%)
P&O	1	0,12	99,66
Inc_Cond	1	0,1	99,66
DISMC	0,5	0,075	99,83

Tab 3.1 Comparaison des trois méthodes d'optimisation

Le tableau montre que la technique DISMC a offert le temps de réponse le plus court. Par ailleurs, cette méthode proposée suit correctement le point maximum avec une convergence plus rapide par rapport aux techniques P&O et Inc_Cond. La perte de puissance basée sur le DISMC est réduite, ce qui se traduit par une efficacité accrue du système.

En analysant les résultats de la simulation du point de la puissance maximale de la commande en mode glissant à double intégral, on constate que le point de la puissance maximale suit le point de puissance maximale avec de meilleures performances par rapport aux deux (02) autres techniques P&O et Inc_Cond. Cependant, le DISMC a montré une grande robustesse et a bien fonctionné dans différentes irradiances.

3.3 Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV

Le phénomène d'ombrage partiel est un problème affectant le bon fonctionnement du PV. Il s'agit d'une distribution non uniforme de l'éclairage. Ce phénomène gêne l'extraction du point de puissance maximum du fait de l'apparition de plusieurs points de puissance maximum locaux.

Sous ce phénomène, la totalité ou la plupart des parties du PV pourraient être ombragées, ce qui entraîne une réduction de la consommation d'énergie et de la puissance maximale des modules PV partiellement ombragés [143-145].

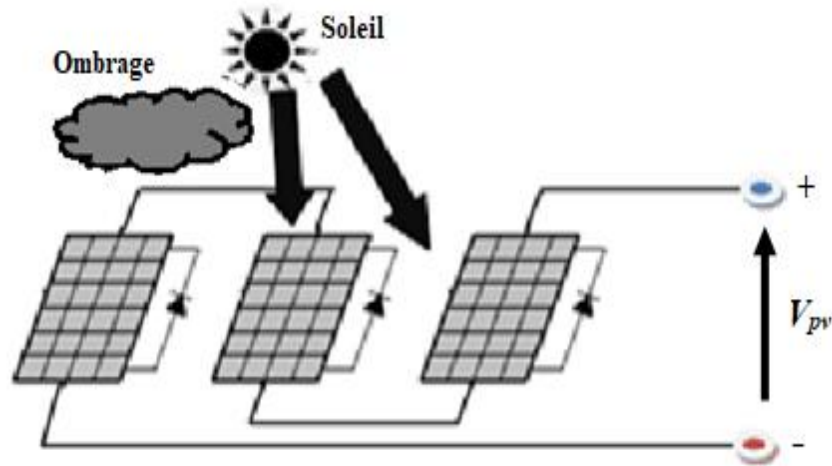


Figure 3.13 Générateur PV sous condition d'ombrage partiel

Le contrôleur de poursuite de point de puissance (MPPT) est conçu pour pallier aux contraintes engendrées par différents changements climatiques [146]. Les performances de ce contrôleur dépendent de la rapidité d'atteindre le point de puissance maximale, de la façon d'osciller autour de ce point et de la robustesse de ce contrôleur face aux changements atmosphériques brutaux tels que l'ombrage partiel (OP). Parmi les solutions trouvées dans la littérature, il y a la reconfiguration de la structure qui est proposée qui réduit l'effet de l'ombrage en offrant une configuration optimale du système PV en vue d'atteindre le point de puissance maximale global (PPMG).

Les techniques conventionnelles donnent de bons résultats dans des conditions d'éclairement uniformes [147]. Toutefois, cette performance n'est pas assurée durant l'OP parce que la courbe $P=f(V)$ comprend des pics multiples. Par conséquent, P&O pourrait être emprisonné par le maximum local.

L'objectif de ce travail est d'extraire la puissance de sortie maximale du module PV sous différents irradiances solaires. La DISMC, Essaim d'Optimisation des Particules (PSO), la Cuckoo Search (CS) et la technique d'Optimisation des Loups Gris (GWO) sont présentés et comparés dans différentes conditions atmosphériques et à l'ombre partiel [148-150].

3.4 Techniques méta-heuristiques

3.4.1 Technique d'essaim d'optimisation des particules

L'algorithme PSO (Partical Swarm Optimization en anglais) s'inspire du comportement d'animaux tels que les oiseaux. Cette technique est basée sur les règles de déplacement progressif des positions aléatoires de ces particules pour atteindre une position locale optimale [151, 152].

Dans cette technique, des règles simples sont conçues pour gérer le déplacement des particules afin qu'elles convergent progressivement vers un maximum global. L'optimisation de l'essaim de particules (PSO) est basée sur l'essaim intelligent. Son organigramme est représenté par la figure 3.14.

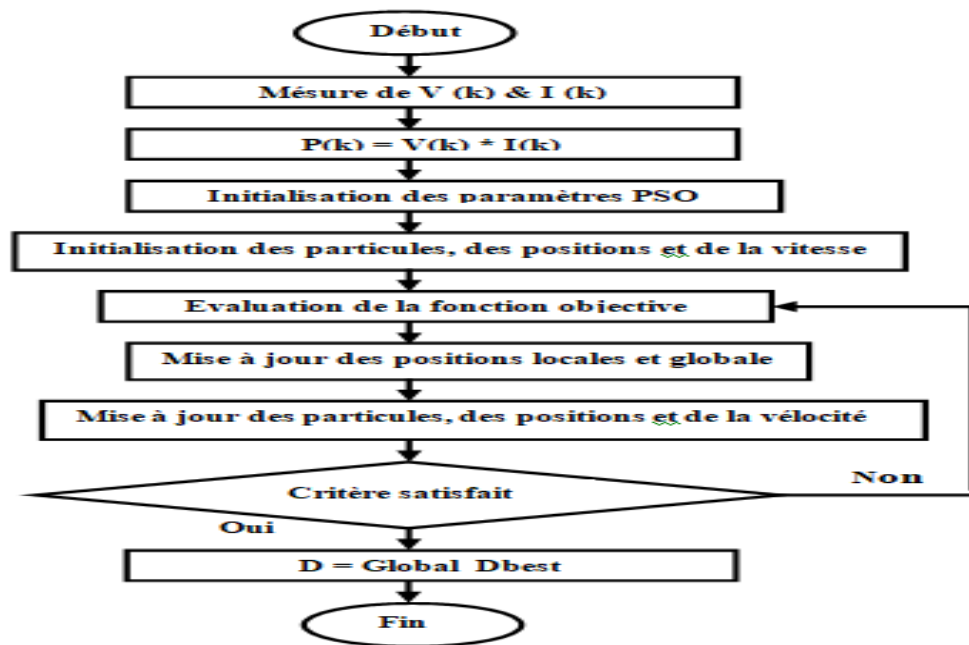


Figure 3.14 Organigramme d'algorithme PSO

Cet algorithme est exécuté par les équations suivantes :

$$V_i(t+1) = w * (V_i(t) + c_1 * rand_1 * (P_{Best}_i(t) - D_fitness_i(t)) + c_2 * rand_2 * (G_{Best}_i(t) - P_i(t))) \quad (3.13)$$

Avec,

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.14)$$

et,

$$D = PSO(V, I) \quad (3.15)$$

Avec, P : position d'une particule; V : vitesse; P_{Best} : meilleure position de la particule qui correspond à Local_DBest; G_{Best} : meilleure position du groupe de particules qui correspond à Global_DBest; $rand$: random variable; D : duty cycle; c_1 : poids de l'information locale; c_2 : poids de l'information global; w : poids d'inertie.

3.4.2 Technique d'optimisation des loups gris

La technique d'optimisation des loups gris (en anglais Grey Wolf Optimisation (GWO)) est un algorithme méta-heuristique inspiré des loups gris, qui préfèrent vivre en meute et peuvent être utilisés pour optimiser une fonction difficile à exprimer analytiquement [153]. L'algorithme GWO a été développé afin d'imiter la hiérarchie sociale des loups gris et en particulier leurs comportements durant la chasse. Le GWO utilise quatre types de populations de loups : Les loups α qui mènent la chasse sont considérés les meilleures solutions. Les loups β et δ qui représentent les meilleures seconds et troisièmes respectivement, peuvent assister les loups α dans la prise de décision. Les loups ω sont des loups suiveurs. La Figure 3.15 représente l'organigramme de l'algorithme GWO.

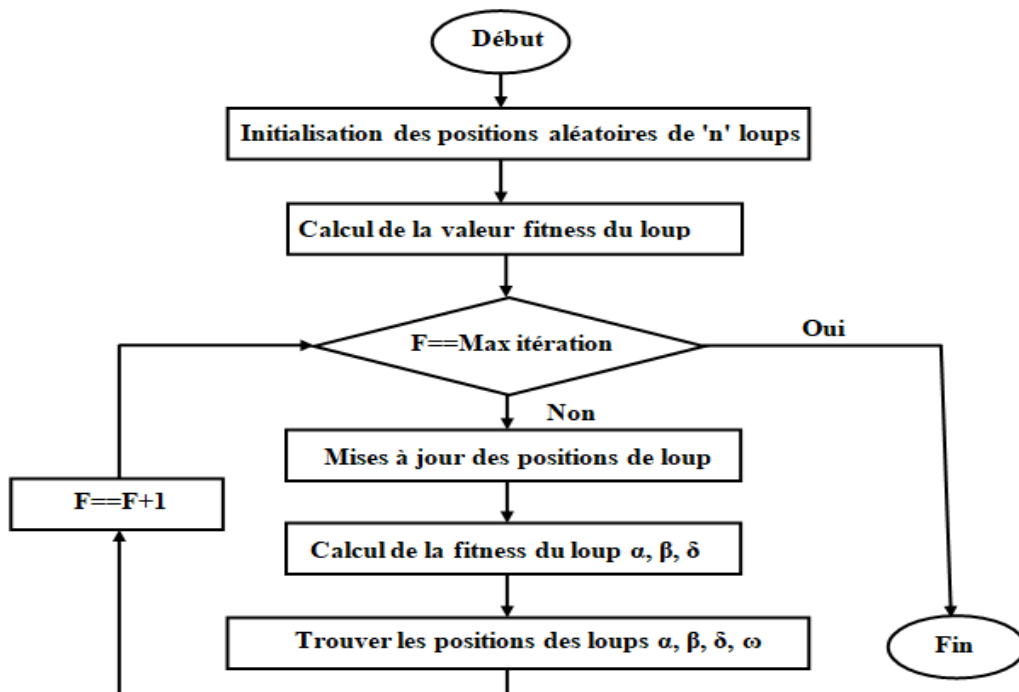


Figure 3.15 Organigramme de l'algorithme GWO [154]

Les principales phases sur lesquelles est basé le GWO sont:

- Reconnaissance de la position de la proie et encerclement de cette dernière ;
- Harceler la cible jusqu'à ce qu'il cesse de bouger. Par conséquent, les positions de loups sont mises à jour pour converger vers les meilleures positions obtenues ;
- Attaque du gibier.

Le comportement d'attaque peut être présenté par les relations suivantes [155]:

$$\vec{e} = \left| \vec{c} \cdot \vec{x}_p(t) - \vec{x}(t) \right| \quad (3.16)$$

$$\vec{x}(t+1) = \vec{x}_p(t) - a \cdot \vec{e} \quad (3.17)$$

Où t est l'itération courante ; a , c et e représentent le coefficient vecteurs ; x_p est le vecteur de position de la proie et x spécifie le vecteur de position du loup gris.

Les vecteurs a et c sont estimés comme suit :

$$\vec{a} = 2b \cdot r_1 - b \quad (3.18)$$

$$\vec{c} = 2 \cdot r_2 \quad (3.19)$$

Où, les composantes de b décroissent linéairement de 2 à 0 et r_1 , r_2 sont des vecteurs aléatoires appartenant au domaine $[0, 1]$.

La Figure 3.16 illustre une idée simple de l'action du loup dans la recherche espace, où i représente le nombre de loup, P_i et G_i désignent les meilleures valeurs personnelles et globales qui doivent être mises à jour à chaque itération au cours du processus d'optimisation.

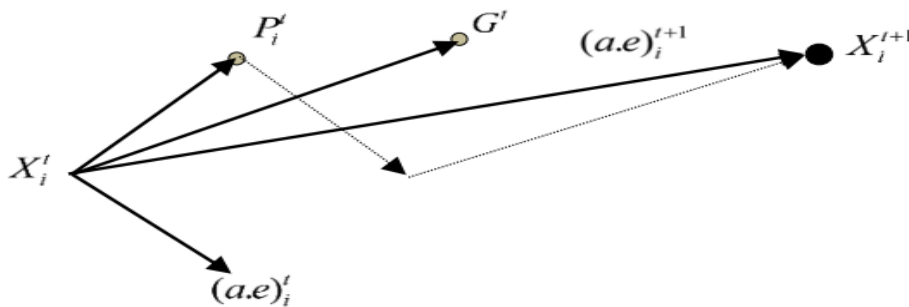


Figure 3.16 Mouvement d'un loup pendant le processus de recherche

3.4.3 Technique Cuckoo Search

L'algorithme de recherche Cuckoo Search (CS) a été publié en 2009 par Xin-She Yang et Suash Deb comme un outil méta-heuristique efficace pour l'optimisation [156,157]. Il est basé sur le comportement des oiseaux appelés "Cuckoo". Cette algorithme de recherche de coucou était influencé par les actions inhabituelles de certaines espèces de coucou appelées

parasitisme obligatoire du couvain, c'est-à-dire en pondant leurs œufs dans les nids d'autres oiseaux (nommés oiseaux hôtes), précédemment observés. Par la croissance des œufs dans un certain nombre de nids différents, ce dernier est accompli. Certaines simplifications du comportement réel sont nécessaires pour rendre l'algorithme adapté aux problèmes d'optimisation. Lors de la recherche de nids des oiseaux hôtes, les "cuckoo" choisissent des directions ou des trajectoires qui peuvent être modélisées par certaines fonctions mathématiques. L'un des modèles les plus courants est le vol de Lévy qui modélise les pas de la recherche du nid de coucou. Afin de générer de nouveaux "cuckoo" à partir des "cuckoo" existants, Yang et Deb ont intégré le vol de Lévy de la manière suivante:

- Dans un nid choisi au hasard, chaque coucou pond un œuf à la fois ;
- Les nids avec les meilleurs œufs (c'est-à-dire des solutions de qualité) sont transmis aux générations futures, assurant le maintien de bonnes solutions dans le temps ;
- Le nombre de nids est toujours fixe et le nombre d'œufs que l'oiseau hôte découvre auront une probabilité P_a ($0 < P_a < 1$), lorsque l'oiseau hôte trouve les œufs pondus dans leur nid, alors l'oiseau hôte quittera le nid ou le détruira œufs de coucou ;
- Les nouveaux nids sont obtenus en utilisant la loi de vol de Lévy qui est donnée comme suit [158,159]:

$$X_j^{i+1} = X_j^i + \alpha \oplus Lévy \quad (3.20)$$

L'opérateur \oplus représente la multiplication par entrée pour le problème multidimensionnel. Pour MPPT, cela peut être simplifié à

$$V_j^{i+1} = V_j^i + \alpha \cdot Lévy = V_j^i + s \quad (3.21)$$

Où,

$$s \approx K \cdot \left(\frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \right) (V_{best} - V_j) \quad (3.22)$$

V_j^i : représente la tension de la $j^{\text{ème}}$ particule à la $i^{\text{ème}}$ itération cycle ; β : indice de la loi de puissance ; K : coefficient de pas.

u et v suivent la distribution :

$$u \approx N(0, \sigma_u^2) \quad (3.23)$$

$$v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (3.24)$$

$$\sigma_u = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \cdot \sin(\pi + \beta/2)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \cdot \beta \cdot \left(2 \frac{(\beta-1)}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.25)$$

$$\sigma_v = 1 \quad (3.26)$$

Γ : la fonction gamma intégrale.

Les vols de Lévy sont déployés par toutes les particules à chaque itération cycle jusqu'à ce qu'ils trouvent le GMPP. Le processus de suivi sera arrêté si toutes les particules convergent vers une solution. La Figure 3.17 montre l'organigramme de l'algorithme CS.

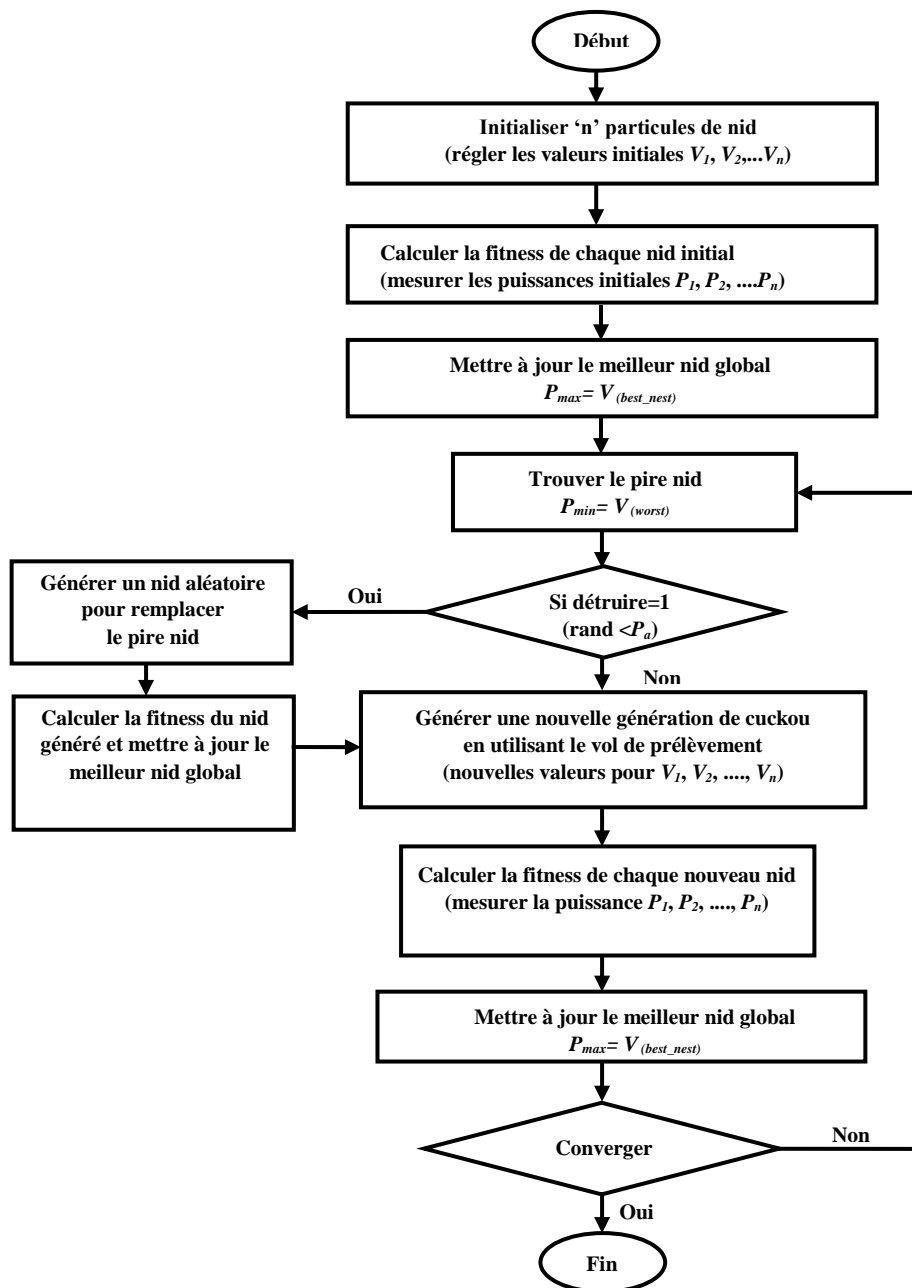


Figure 3.17 Organigramme de l'algorithme CS [160]

3.44 Résultat de simulation

L'analyse du fonctionnement de l'ensemble est envisagée sous le fil du soleil ; tout en tenant compte du phénomène d'ombrage. Sachant que dans ces conditions, la caractéristique statistique $P=f(V_{pv})$ conserve, pour l'essentiel, plusieurs MPP dont un seul est dit MPP global et par contre les autres sont dits partiels.

- *1^{er} profil d'ombrage*

Les résultats de la simulation sont illustrés à la figure 3.18. Sous le premier profil d'ombrage, il existe un pic global (PG) et deux (02) pics partiels (PP1 et PP2) de puissances maximales. De plus, la figure 3.19 montre que sous cette condition, seuls les algorithmes avancés PSO, CS et GWO détectent la puissance maximale globale (PG=114W). Mais il est également intéressant de noter que le rythme P_{pv} pour CS et surtout PSO présentent trop d'oscillations avant d'extraire le point maximum.

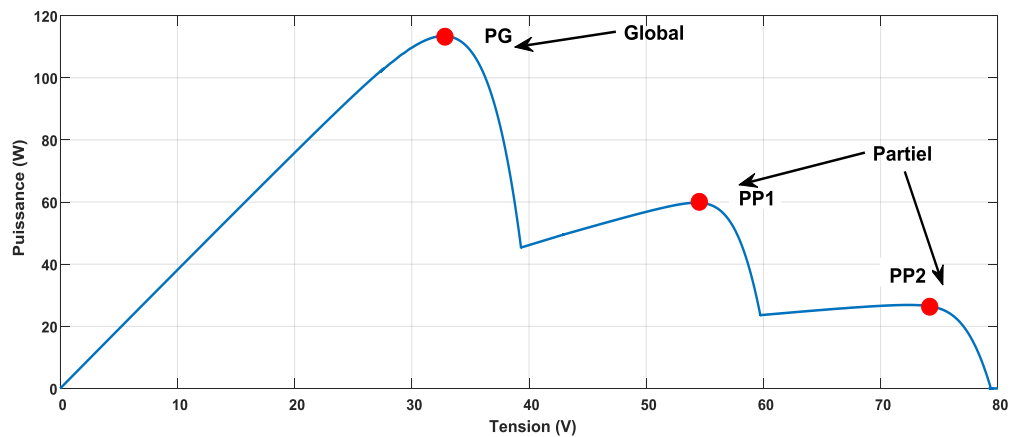


Figure 3.18 $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel

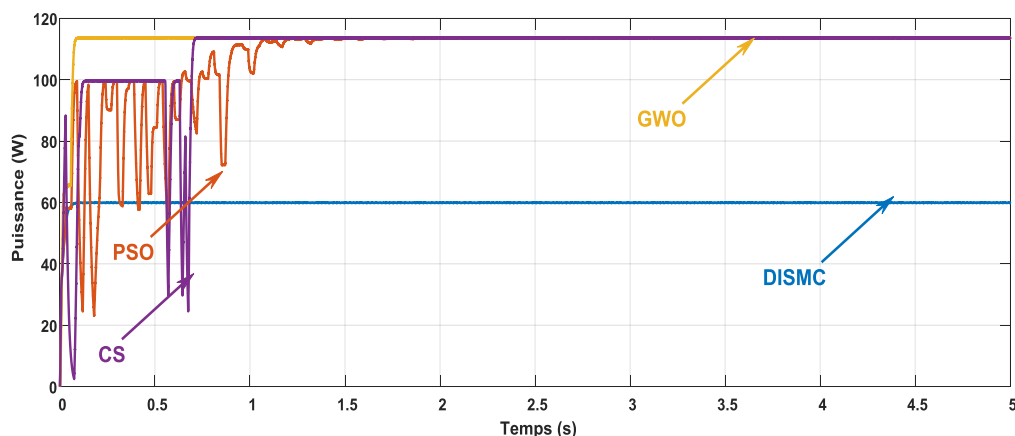


Figure 3.19 Puissance du PV

- **2^{ème} profil d'ombrage**

Sous l'effet de ce deuxième profil d'ombrage, la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ est représentée sur la figure 3.20. Elle est caractérisée par un pic global (PG) et trois (03) pics partiels de puissance maximale. Et, pour l'analyse comparative, la superposition des formes d'ondes des puissances, obtenues par les algorithmes des quatre (04), le tableau 1 donne le point de puissance maximale, le temps de réponse (T_r) et le rendement MPPT pour les quatre (04) algorithmes étudiés.

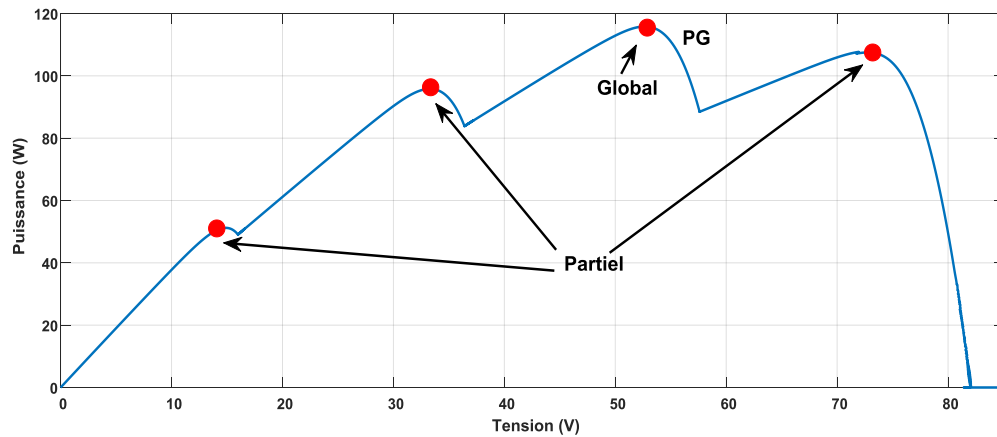


Figure 3.20 $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel

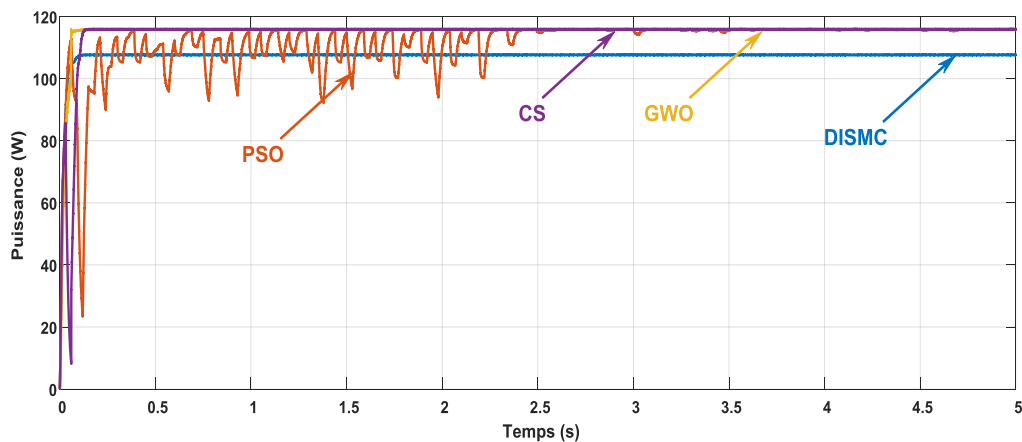


Figure 3.21 Puissance du PV

- **3^{ème} profil d'ombrage**

Sous l'effet de ce troisième profil d'ombrage, la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ est représentée sur la figure 3.22. Elle est caractérisée par un pic global (PG) et un (01) pic partiel de puissance maximale. Et, pour l'analyse comparative, la superposition des formes d'ondes des puissances, obtenues par les quatre (04) algorithmes, le tableau 1 donne le point de puissance maximale, le temps de réponse (T_r) et le rendement MPPT pour les quatre (04) algorithmes étudiés.

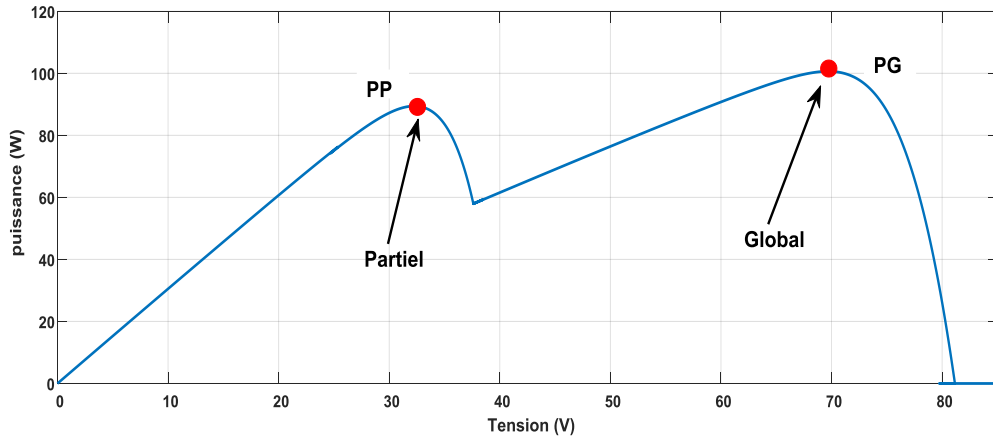


Figure 3.22 $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel

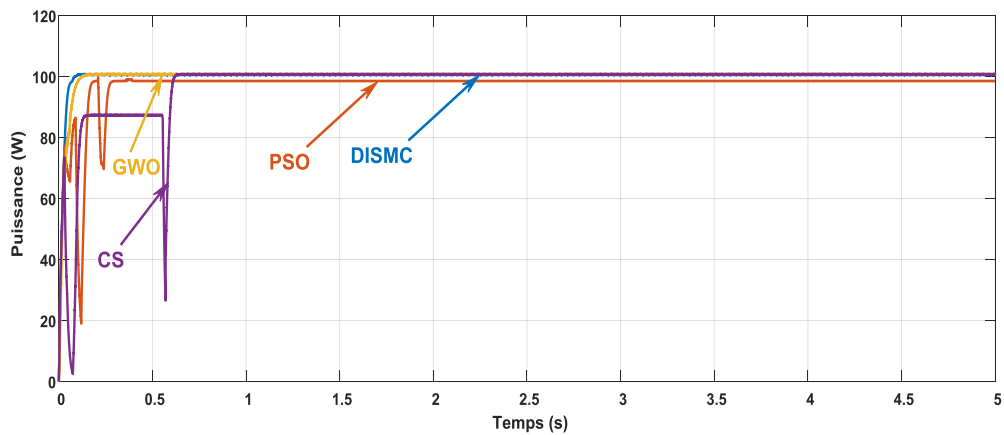


Figure 3.23 Puissance du PV

Les trois (03) profils sont sélectionnés par rapport à la position du point global de la puissance. On remarque que celui pour le premier profil il est situé à l'extrême gauche, pour le second en position intermédiaire et finalement le 3^{ème} à l'extrême droite.

- Comparaison des algorithmes

Ombrage		1 ^{er} profil d'ombrage	2 ^{ème} profil d'ombrage	3 ^{ème} profil d'ombrage
P_{Max} (W)	DISMC	60	107,8	100,8
	PSO	113,5	115,75	99
	CS	113,6	115,85	100,74
	GWO	113,6	115,75	100,75
Tr (s)	DISMC	0,07	0,1	0,075
	PSO	1,028	0,94	0,27
	CS	0,68	0,09	0,62
	GWO	0,06	0,06	0,12
MPPT rendement(%)	DISMC	52,63	92,93	99,80
	PSO	99,56	99,78	98,01
	CS	99,64	99,87	99,74
	GWO	99,64	99,78	99,75

Tab 3.2 Comparaison des quatre methodes d'optimisation

Le tableau montre que la technique DISMC est piégée dans le point partiel, donc les pertes de puissance sont importantes. Le résultat de la simulation basée sur GWO a offert le temps de réponse le plus court. Le GWO montre que le MPPT proposé suit clairement le point global avec une convergence plus rapide par rapport au PSO et CS techniques. La perte de puissance basée sur le GWO due à l'oscillation est réduite, ce qui se traduit par une efficacité accrue du système.

On constate qu'avec l'algorithme GWO le système fonctionne sur le point de puissance maximum global, ce qui prouve l'avantage économique et technique de cette installation. De ce qui précède résultats, il est conclu que le MPPT proposé basé sur GWO donne une vitesse de suivi plus élevée et les oscillations disparaissent rapidement par rapport aux trois autres méthodes, à savoir PSO, CS et DISMC.

3.5 Système éolien

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe au réseau [161]. La figure 3.24 représente la configuration la plus simple utilisant une machine synchrone.

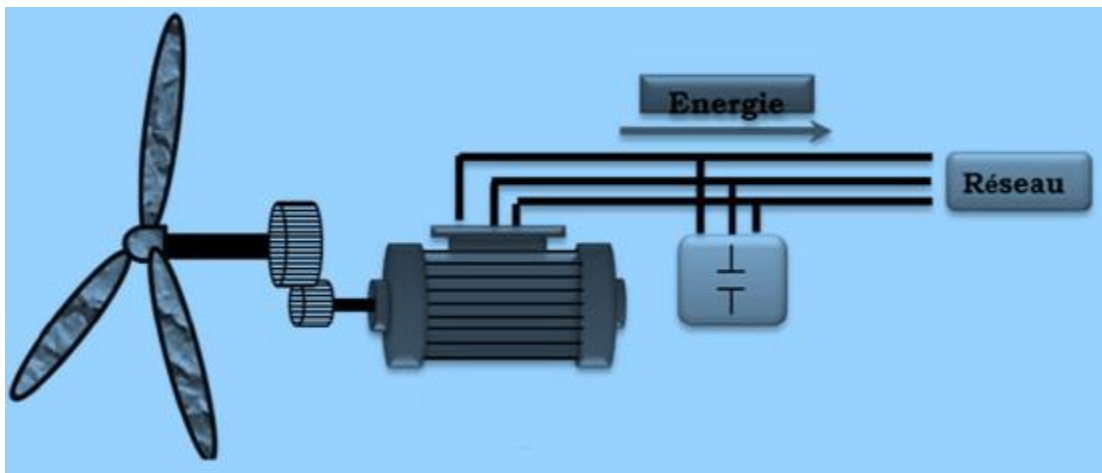


Figure 3.24 Système de conversion éolienne

3.5.1 Contrôle par mode glissant

La perturbation de la chaîne éolienne due au vent aléatoire disponible nous oblige à appliquer un contrôle MPPT pour extraire la puissance maximale générée [162, 163].

Le premier type de contrôle est appliqué pour contrôler la vitesse, il est basé sur le CMG.

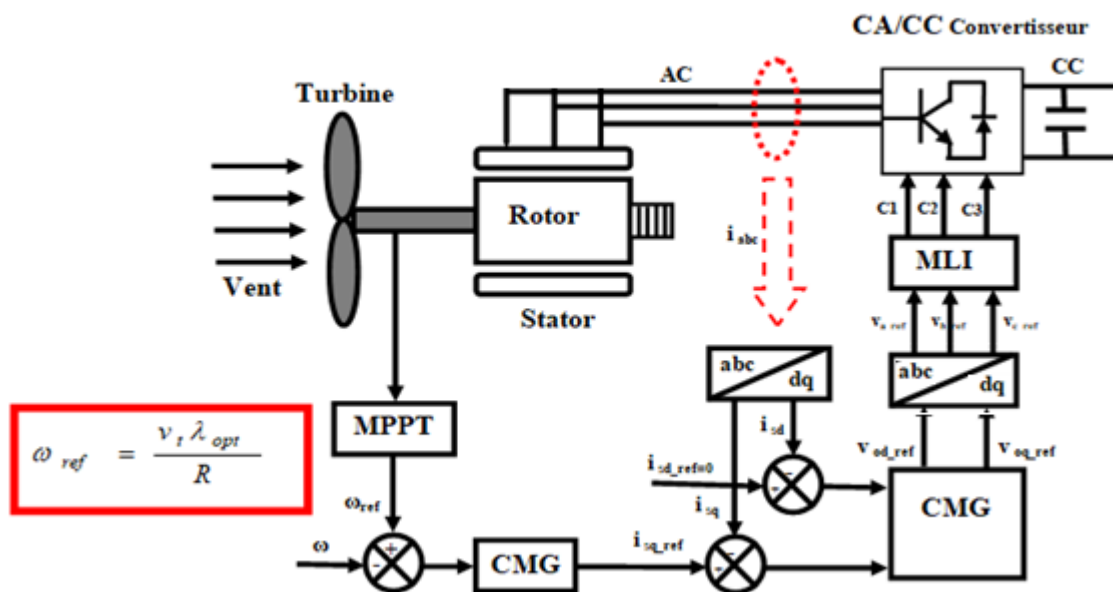


Figure 3.25 Schéma bloc de la chaîne avec CMG

Pour concevoir une commande de vitesse en mode glissant, on considère le système suivant :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_{em} - K_f \cdot \omega) \tag{3.27}$$

La règle d'existence du CMG est $S = 0$ pour s'assurer que le système atteint la surface du glissement

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{S} > 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{S} < 0 \end{cases} \tag{3.28}$$

La fonction de Lyapunov est très utilisée pour étudier l'existence de CMG.

$$V(S(\omega)) = \frac{1}{2} S^2(\omega) \tag{3.29}$$

$$\dot{V}(S(\omega)) = S(\omega) \cdot \dot{S}(\omega) \tag{3.30}$$

Avec:

$$\dot{S}(\omega) = \dot{\omega} - \dot{\omega}^* \tag{3.31}$$

En remplaçant (3.27) dans le (3.31)

$$\dot{S}(\omega) = \dot{\omega} - \dot{\omega}^* + \frac{1}{J} (C_{em} + K_f \cdot \omega - C_m) \tag{3.32}$$

On a,

$$C_{em} = C_{emeq} + C_{emn} \tag{3.33}$$

Avec, C_{emeq} : élément équivalent; C_{emn} : élément discret.

Alors (3.33) devient :

$$\dot{S}(\omega) = \omega + \frac{1}{J} ((C_{emeq} + C_{emn}) + K_f \cdot \omega - C_m) \quad (3.34)$$

Lorsque le système atteint la surface S en conséquence, il satisfait l'équation différentielle linéaire [156]

$$S(\omega) = 0, \dot{S}(\omega) = 0 \text{ and } C_{emn} = 0 \quad (3.35)$$

On obtient:

$$C_{emeq} = -J \omega - K_f \cdot \omega + C_m \quad (3.36)$$

En remplaçant l'équation (3.36) dans la (3.34) on obtient :

$$\dot{S}(\omega) = \frac{1}{J} (C_{emn}) \quad (3.37)$$

Pour assurer la convergence de Lyapunov :

$$C_{emn} = -K \cdot \text{sign}(S(\omega)) \quad (3.38)$$

Avec $K > 0$

• Résultats de simulations

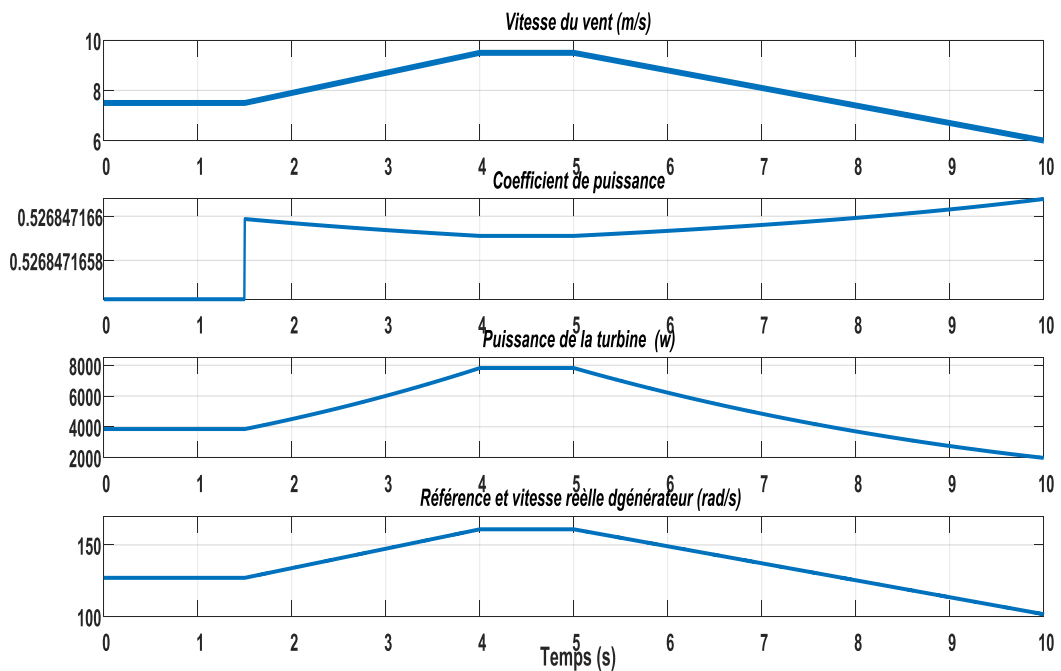


Figure 3.26 Grandeurs côté turbine pour un vent variable par paliers

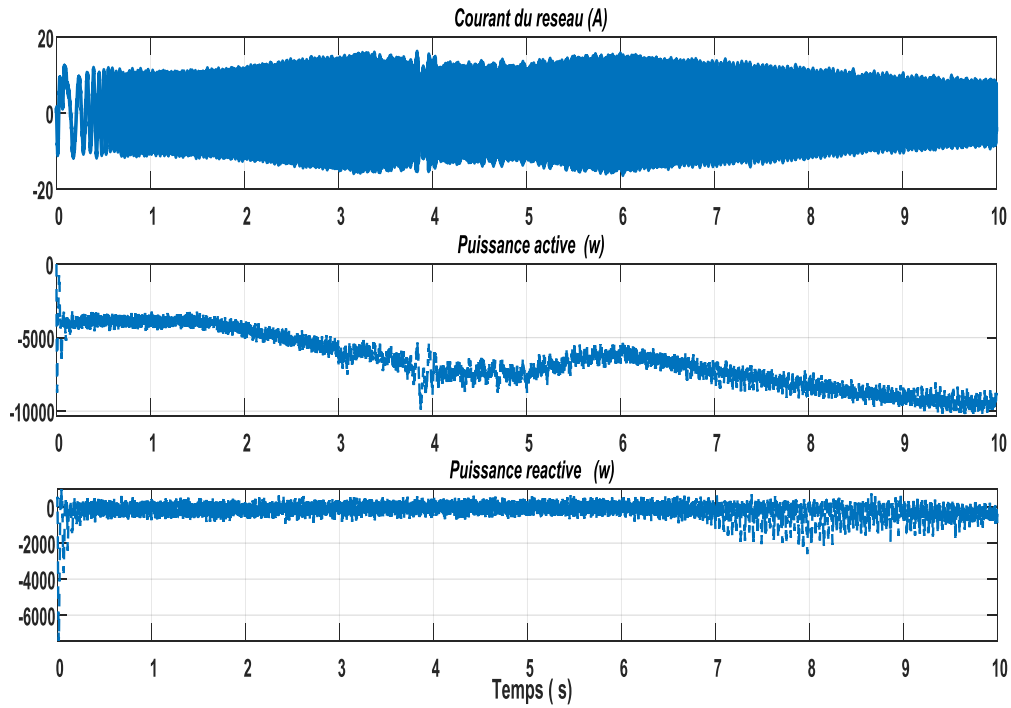


Figure 3.27 Grandeurs côté réseau pour un vent variable par paliers

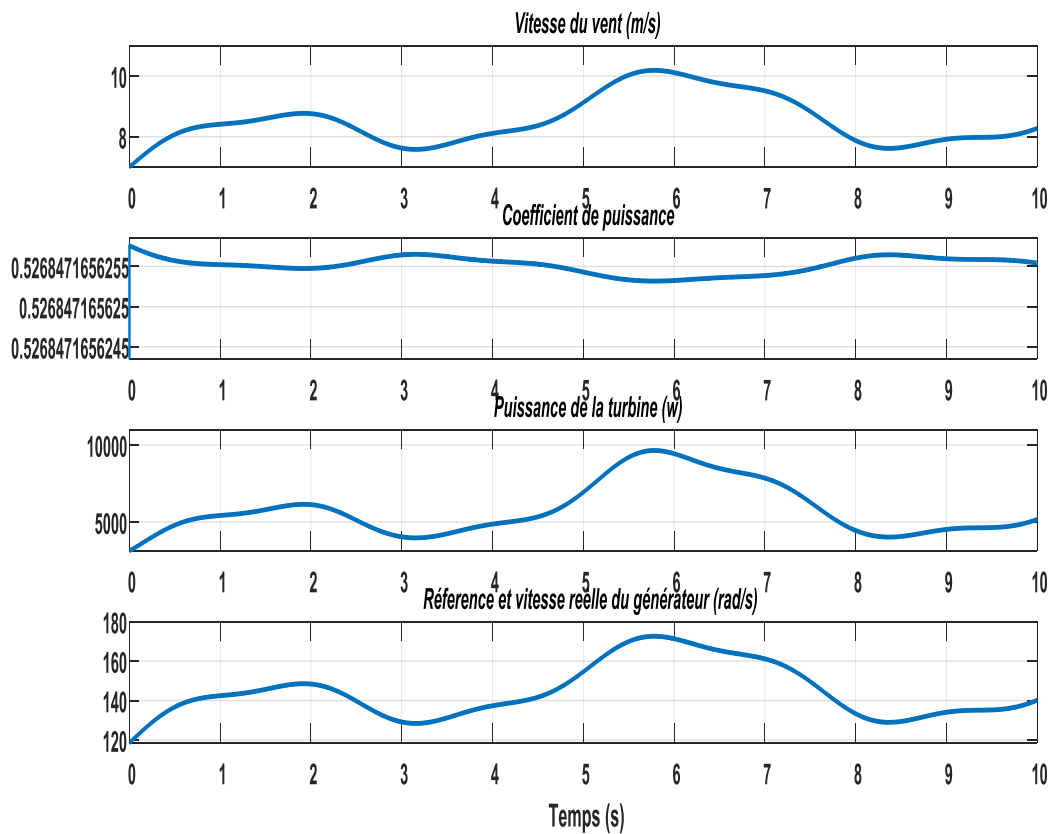


Figure 3.28 Grandeurs côté turbine pour un vent aléatoire

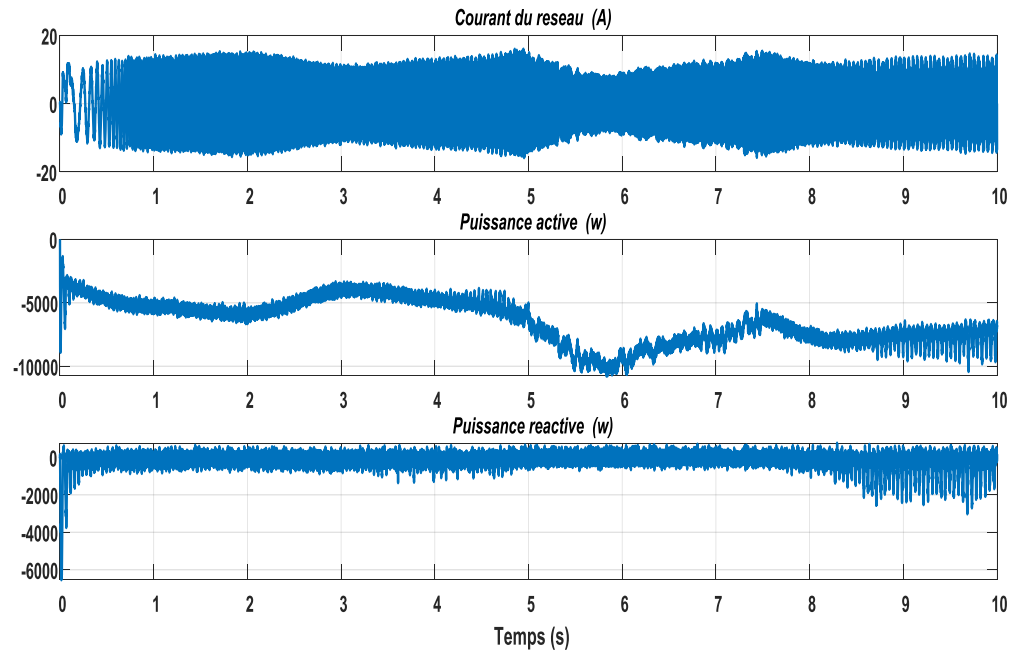


Figure 3.29 Grandeurs côté réseau pour un vent aléatoire

L'analyse opérationnelle de la turbine éolienne est examinée sous deux (02) profils de vent différents : le premier profil est formé, principalement, par deux (02) niveaux de vent constants de valeurs respectives 7m/s et 9.5m/s ; et deux intervalles où la vitesse augmente progressivement entre les instants 1,5s et 2,5s par contre dans la dernière partie des profils, la vitesse décroît de 9,5m/s à 6m/s. Concernant le second profil, la vitesse du vent change aléatoirement. Les grandeurs enregistrées pour chacun de ces profils, en particulier, le coefficient de puissance, la puissance de la turbine, la vitesse de la génératrice, le courant stator, enfin la vitesse sont représentées respectivement sur les figures 3.26 et 3.28. On remarque que le coefficient de puissance change en fonction de l'évolution du profil du vent pour que le maximum de puissance soit extrait. De plus, la vitesse de la génératrice suit parfaitement l'évolution des niveaux de référence de vitesse au cours de chaque intervalle prouvant que le réglage du mode glissant assure sans aucun doute de bonnes performances.

Concernant les grandeurs côté réseau, en particulier les courants statoriques et les puissances active et réactive enregistrées sous les deux profils de vitesse du vent, elles sont représentées respectivement sur les figure 3.27 et figure 3.29. On voit que les courants statoriques ont la même fréquence que le réseau auquel ils sont connectés ; les puissances active et réactive suivent leurs valeurs de référence. En effet, la référence de puissance passive est imposée par le système de contrôle et la puissance réactive est imposée à zéro ($Q_{ref} = 0$) pour assurer un facteur de puissance unitaire de l'installation.

3.5.2 Commande synergétique

La théorie de la commande synergétique (*SC*) est développée par Anatoly Kolesnikov [164-166]. C'est une stratégie de commande non linéaire qui a le même objectif que la commande par mode glissant. Cette commande partage avec la commande par mode glissant les avantages de stabilité globale, la réduction d'ordre et l'insensibilité vis-à-vis des paramètres et elle diffère dans le fait que cette commande est toujours continue ce qui permet d'éviter le problème de broutement ("Chattering" en anglais) de la commande par mode glissant.

Récemment cette théorie a été appliquée avec succès dans le domaine des commandes de l'électronique de puissance [167,168].

La commande synergétique ne requiert pas la linéarisation du modèle. Elle utilise une macro-variable qui peut être fonction de deux ou plusieurs variables d'état du système.

L'objectif de cette commande est de forcer le système à fonctionner dans une région bien déterminée définie par une macro-variable. Le concept fondamental de cette approche est de gouverner les trajectoires du système contrôlé vers une variété désirée dans l'espace d'état du système [169].

3.5.2.1 Synthèse du régulateur synergétique

Considérons le système dynamique non-linéaire *SISO* de dimension n qui peut être décrit par l'équation non linéaire suivante [170] :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (3.39)$$

Où : x , u et t représentent respectivement le vecteur d'état du système, le vecteur de commande et le temps.

La synthèse du contrôleur synergétique commence par le choix d'une macro-variable Ψ par le concepteur. Cette macro-variable peut être définie sous forme d'une combinaison linéaire des variables d'état du système afin de satisfaire le cahier des charges et prendre en considération d'éventuelles contraintes de contrôle. Le nombre de macro-variables n'excédant pas le nombre de variables à contrôler [171, 172] soit :

$$\Psi = \psi(x, t) \quad (3.40)$$

Où, Ψ est la macro-variable et $\psi(x, t)$ une fonction des variables d'état et du temps définie par l'utilisateur.

L'objectif de la commande synergétique est de forcer le système à évoluer sur le domaine choisit au préalable par le concepteur $\Psi = 0$, d'où:

$$\psi(x, t) = 0 \quad (3.41)$$

Les caractéristiques de la macro-variable peuvent être choisies par le concepteur, selon les paramètres tels que l'objectif de commande, le temps de réponse, limitations de la commande, etc.

La macro-variable peut être une combinaison linéaire simple des variables d'état, et elle est forcée d'évoluer d'une façon désirée exprimée par une contrainte appelée dans la littérature de la théorie de la commande synergétique, l'équation fonctionnelle [173, 174], qui a la forme générale suivante :

$$T\dot{\psi} + \psi = 0 \quad T > 0 \quad (3.42)$$

Où, T est un paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence du système en boucle fermée vers le domaine indiqué [175, 176].

La solution de l'équation (3.42) donne la fonction suivante :

$$\psi(t) = \psi_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.43)$$

Comme le montre la figure 3.30, la macro-variable $\psi(\tau)$ converge vers l'attracteur ou le collecteur (le manifold) $\Psi=0$ pour des conditions initiales différentes de ψ_0 .

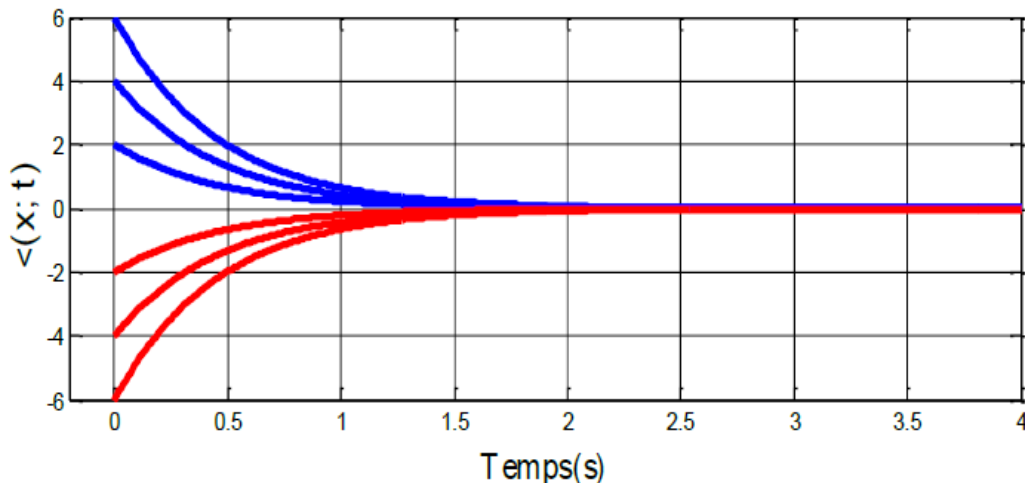


Figure 3.30 Solution de l'équation fonctionnelle pour différentes conditions initiales

La substitution de (3.39) et de (3.40) dans (3.42) permet d'écrire :

$$T \frac{d\psi}{dx} f(x, u, t) + \psi(x, t) = 0 \quad (3.44)$$

En résolvant (3.43) pour u , la loi de commande peut être trouvée comme suit [177] :

$$u = g(x, T, \psi(x, t), t) \quad (3.45)$$

À partir de l'équation (3.45), on peut voir que la commande dépend non seulement des variables d'état du système, mais également de la macro-variable et de la constante de temps choisies T . En d'autres termes, le concepteur peut choisir les caractéristiques du contrôleur en choisissant une macro-variable appropriée et une constante de temps spécifique T .

Dans la synthèse du contrôleur synergétique montré ci-dessus, il est clair que le contrôleur synergétique agit sur le système non-linéaire et une linéarisation ou une simplification du modèle n'est pas nécessaire comme lors de l'application de la théorie de commande traditionnelle.

3.5.2.2 Conception du régulateur synergétique de vitesse

Afin de concevoir le régulateur synergétique [178] de la vitesse de rotation du générateur éolien, nous considérons l'équation d'état qui définit la dynamique de l'arbre :

Pour concevoir un régulateur par la commande synergétique de la vitesse, nous considérons le système d'équations (3.46).

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - K_f \cdot \omega) \quad (3.46)$$

Nous choisissons l'erreur de vitesse comme étant la macro-variable:

$$\psi(\omega) = e(\omega) = \omega_{ref} - \omega \quad (3.47)$$

La dérivée de la fonction macro-variable

$$\dot{\psi} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_{ref} \quad (3.48)$$

La loi de commande (C_{em-ref}) s'écrit alors :

$$C_{em-ref} = C_{em} = \frac{J}{T} \left[\frac{C_f}{J} \omega - \frac{TC_g}{J} + (\omega_{ref} - \omega) \right] \quad (3.49)$$

Où : T est choisi de sorte à avoir des performances statiques et dynamiques satisfaisantes.

L'équation (3.49) permet de tracer le schéma bloc de la commande par mode synergétique de la vitesse de rotation de la génératrice pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT, représenté à la figure 3.31.

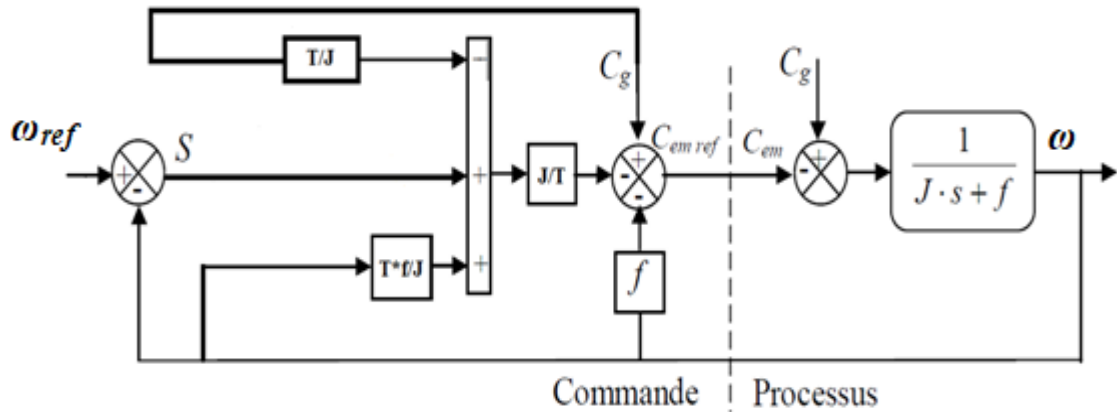


Figure 3.31 Schéma bloc de la commande de vitesse par mode synergétique

3.5.2.3 Résultats de simulations

L'analyse opérationnelle de la turbine éolienne est examinée sous deux (2) profils du vent, où la vitesse de la génératrice suit parfaitement l'évolution des niveaux de référence de vitesse au cours de chaque intervalle prouvant que le réglage de la commande synergétique assure sans aucun doute de bonnes performances (figure 3.33, figure 3.36). On remarque aussi que la puissance change en fonction de l'évolution du profil du vent pour que le maximum de puissance soit extrait (figure 3.34, figure 3.37).

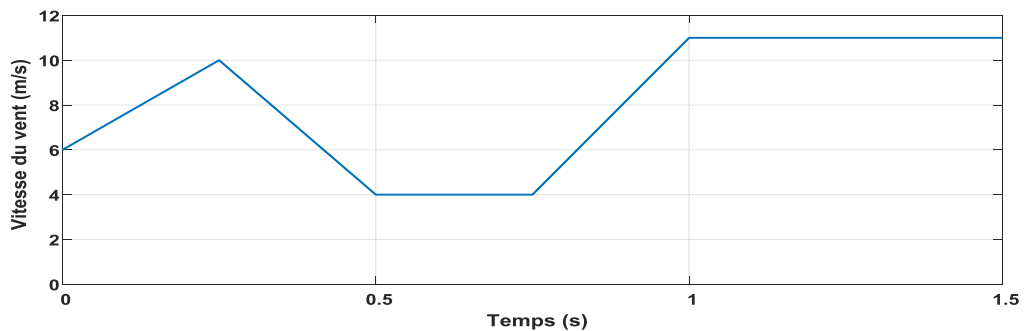


Figure 3.32 Vitesse du vent

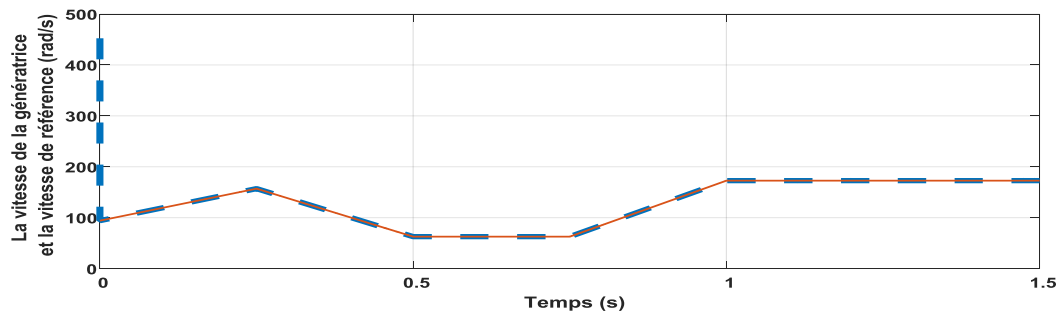


Figure 3.33 La vitesse de la génératrice et la vitesse de référence

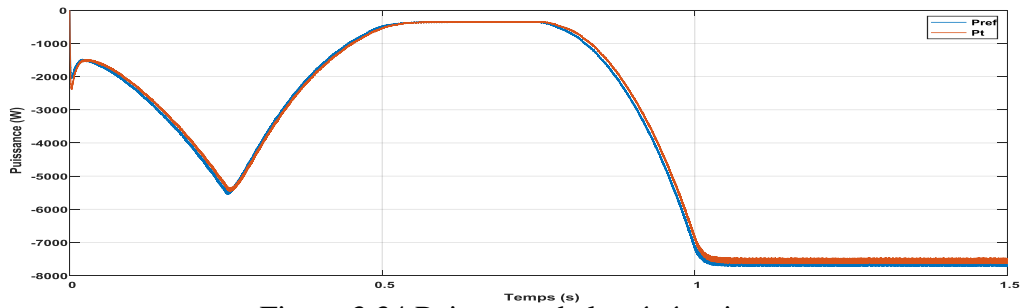


Figure 3.34 Puissance de la génératrice

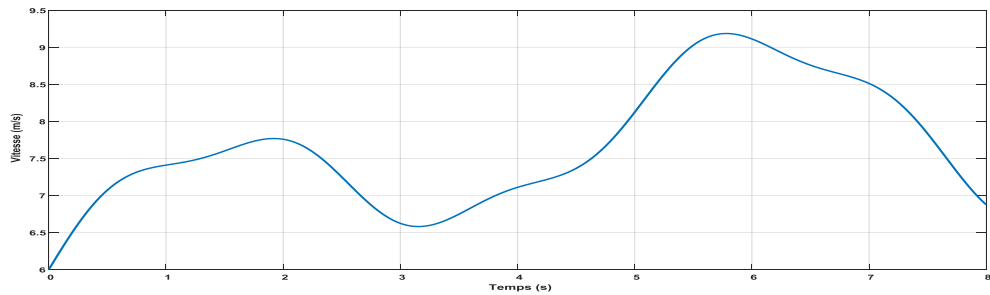


Figure 3.35 Vitesse du vent

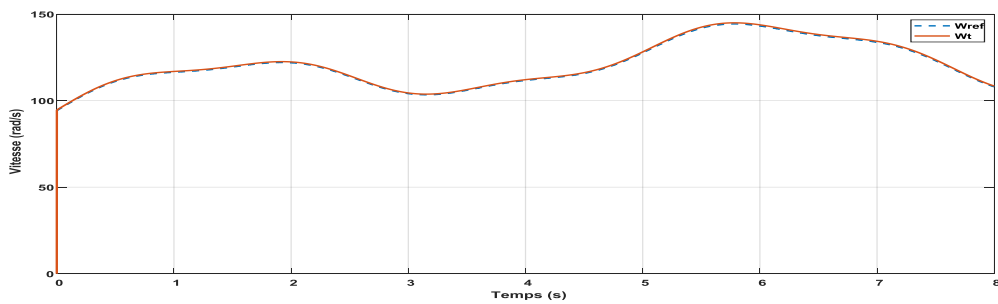


Figure 3.36 La vitesse de la génératrice et la vitesse de référence

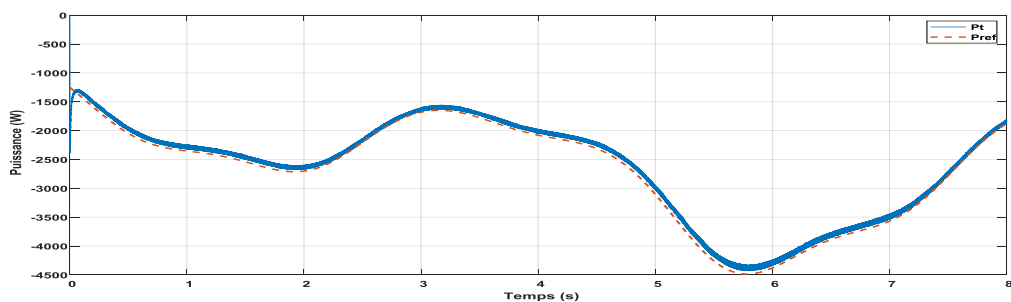


Figure 3.37 Puissance de la génératrice

3.6 Conclusion

L'aspect commande et control d'un système hybride de la puissance maximale du panneau photovoltaïque et de la vitesse de la génératrice de la turbine éolienne avec connexion au réseau caractérisent les travaux menés dans cette thèse. Le contrôle de la puissance maximale par un régulateur à structure variable s'est avéré très efficace sous l'effet de différentes conditions météorologiques (irradiation, température et vent) considérés. L'analyse des résultats obtenus par simulation est très concluante et donc la structure proposée est très prometteuse.

CHAPITRE 4

SIMULATION ET GESTION DU FLUX ENERGETIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

4.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont très attractives pour la production d'énergie électrique afin de satisfaire le besoin en énergie des pays émergents. Alors, ces pays investissent trop de moyens pour valoriser leurs ressources naturelles, hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, etc., dans le but de réduire leur dépendance des énergies fossiles [179]. Toutefois, à cause de la disponibilité intermittente des ER, un système de stockage s'avère nécessaire pour assurer la continuité du service sous l'effet des conditions météorologiques variables [180-183], En compensant le manque de puissance.

Ce chapitre est consacré à la gestion de la puissance délivrée par le panneau solaire, l'éolienne, celle du réseau de distribution, de la puissance absorbée par la charge et la puissance du système de stockage (Batterie). On traite la conception d'un système, primo lorsqu'il soit connecté à un réseau de distribution et secundo lorsqu'il s'agit d'une installation pour un système de pompage d'eau destiné pour un site isolé.

Ce système de production d'électricité hybride à base d'ER, notamment, constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV), une éolienne (WT) et un système de stockage batterie (SB). Dans ce cas, l'énergie produite en excès par rapport à celle demandée par la charge serait stockée (charge de la batterie) et lorsque l'énergie demandée par la charge dépasse celle fournie par le système hybride, l'énergie stockée serait utilisée en complément (décharge de la batterie) à compenser l'utilisation de l'énergie produite par le réseau électrique pour répondre aux besoins de la charge.

4.2 Contrôle du système

Du fait qu'il y a des périodes où la charge demande moins d'énergie que le SER fournisse, il est alors nécessaire et avantageux de prévoir un système de contrôle de la gestion d'énergie. Ainsi, l'excès d'énergie produite par rapport à celle dont a besoin la charge serait stockée (chargement des batteries) et quand l'énergie demandée par la charge est supérieure que celle

que peut fournir le système considéré, l'énergie stockée serait utilisée comme complément (déchargement des batteries) afin que la charge reçoive de l'énergie demandée quelque soient les conditions. Au final, l'énergie stockée pourra être consommée par la charge aux moments adéquats.

Il est rappelé que les commandes du système photovoltaïque et l'éolienne ont été bien exposées dans le chapitre précédent et que le dimensionnement du système de stockage (Batterie) a fait l'objet du deuxième chapitre. Cependant, pour assurer un fonctionnement en mode charge et décharge des batteries, un convertisseur bidirectionnel est prévu et dont l'algorithme de sa commande est :

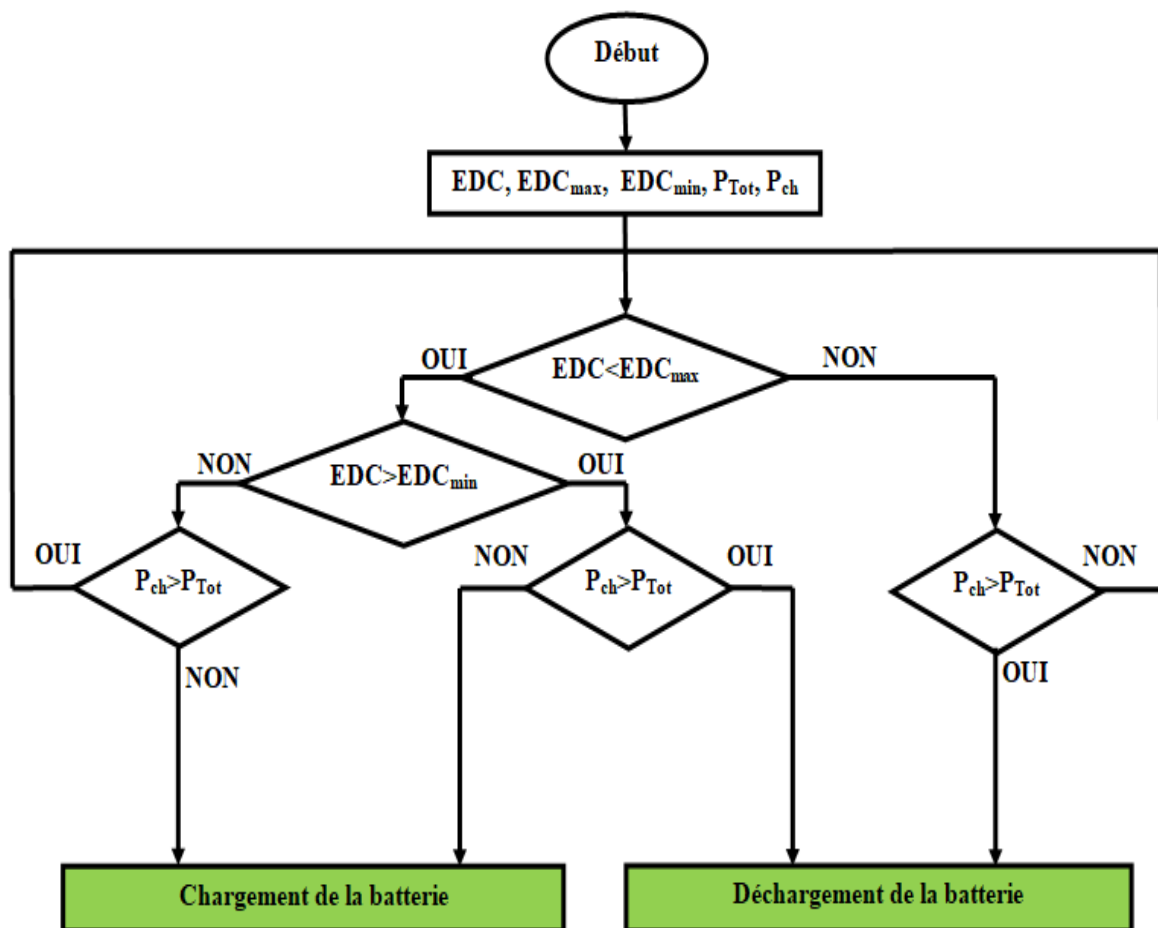


Figure 4.1 Organigramme du fonctionnement du système de gestion des puissances

4.3 Architecture connectée au réseau

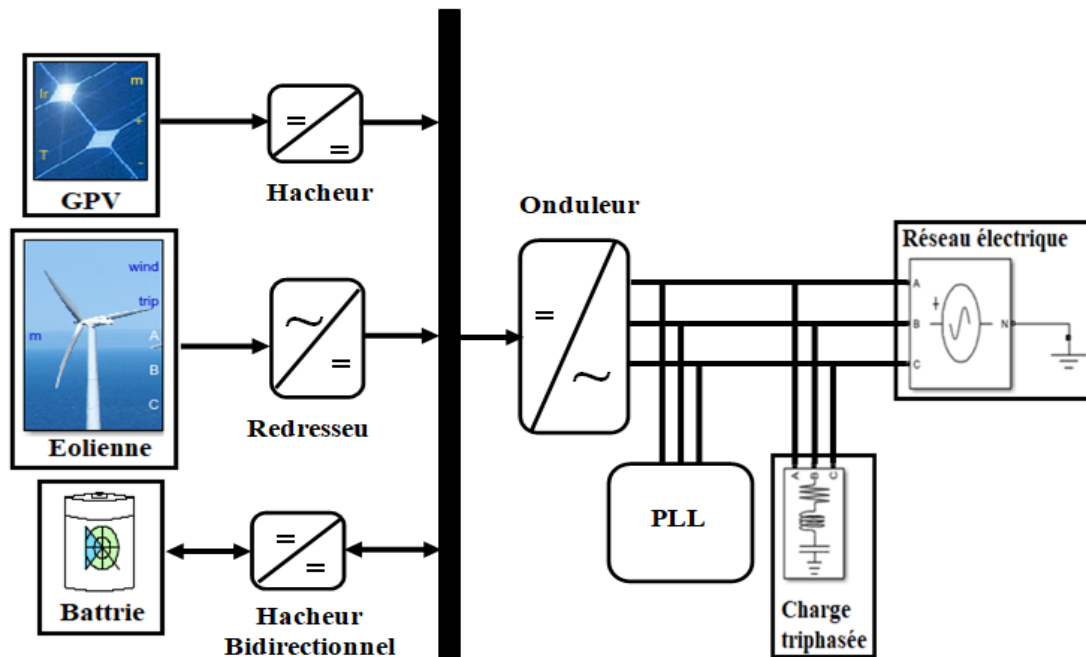


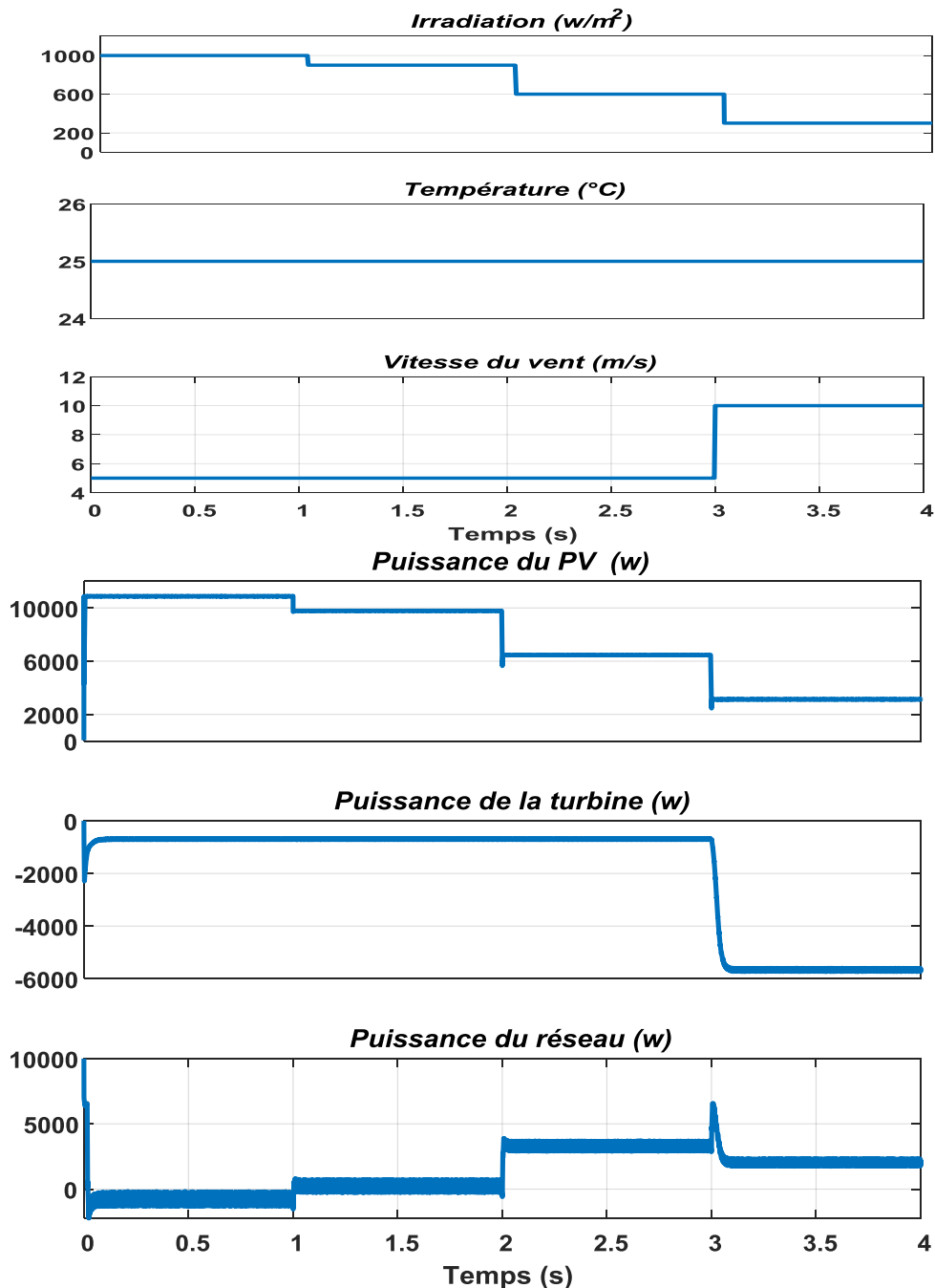
Figure 4.2 Système de conversion hybride connecté au réseau

L'objectif de cette partie est de développer un mécanisme de gestion de l'énergie des différentes sources du système hybride. Les résultats de la simulation et les discussions sont présentés pour initier l'analyse du fonctionnement d'un système hybride : PV-Eolienne-Batterie-Réseau et valider son fonctionnement sous irradiation, température et vitesse du vent. Chaque partie du système proposé est simulée à l'aide du logiciel MatLab / Simulink, grâce auquel le comportement de l'installation sous différentes conditions environnementales est analysé afin de valider l'étude [184].

4.3.1 Système sans stockage

La figure 4.3 montre le comportement du système hybride proposé sous une irradiation et d'une vitesse du vent variables mais une température constante sans l'utilisation du système de stockage. On remarque que lorsque l'irradiation est de 1000W/m^2 et la vitesse du vent est de 5m/s (entre 0s et 1s), les puissances totales du GPV et du WT satisfont la demande de la charge avec un surplus injecté dans le réseau électrique qui est bien représenté avec la puissance négative du réseau et l'appel de courants alternatifs. De $t=1\text{s}$ à 2s , l'irradiation est de 900W/m^2 les puissances absorbées du GPV et de l'éolienne sont toujours suffisantes, on constate donc que le réseau est au repos, ce qui explique que les courants du réseau valent 0(zéro). En revanche, lorsque l'irradiation passe de 900W/m^2 à 600W/m^2 mais que la vitesse

du vent reste invariable et égale à 5m/s, les puissances fournies sont trop insuffisantes, donc le réseau aide d'une part. Ce qui explique l'augmentation des courants du réseau de $t=2s$ à $3s$. Enfin, de $t=3s$ à $4s$ l'irradiation diminue encore mais il y a une augmentation de la vitesse du vent, ce qui explique l'augmentation de la puissance éolienne et par conséquent l'augmentation de la puissance totale demandée par la charge, ce qui va influencer le réseau qui constate une diminution dans ses courants.



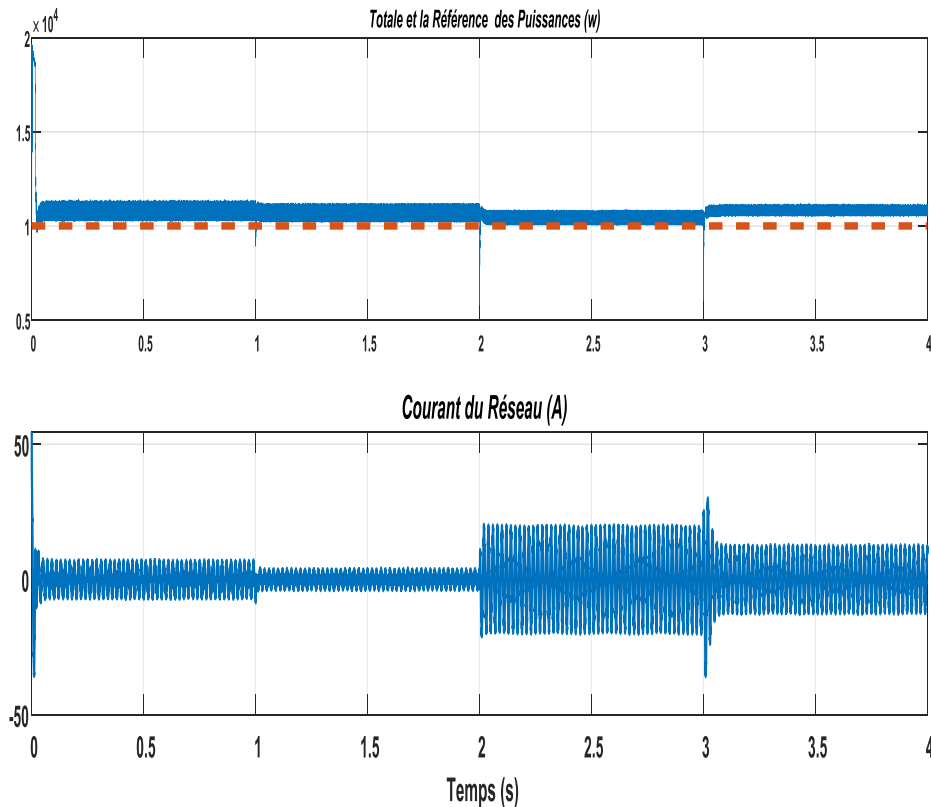
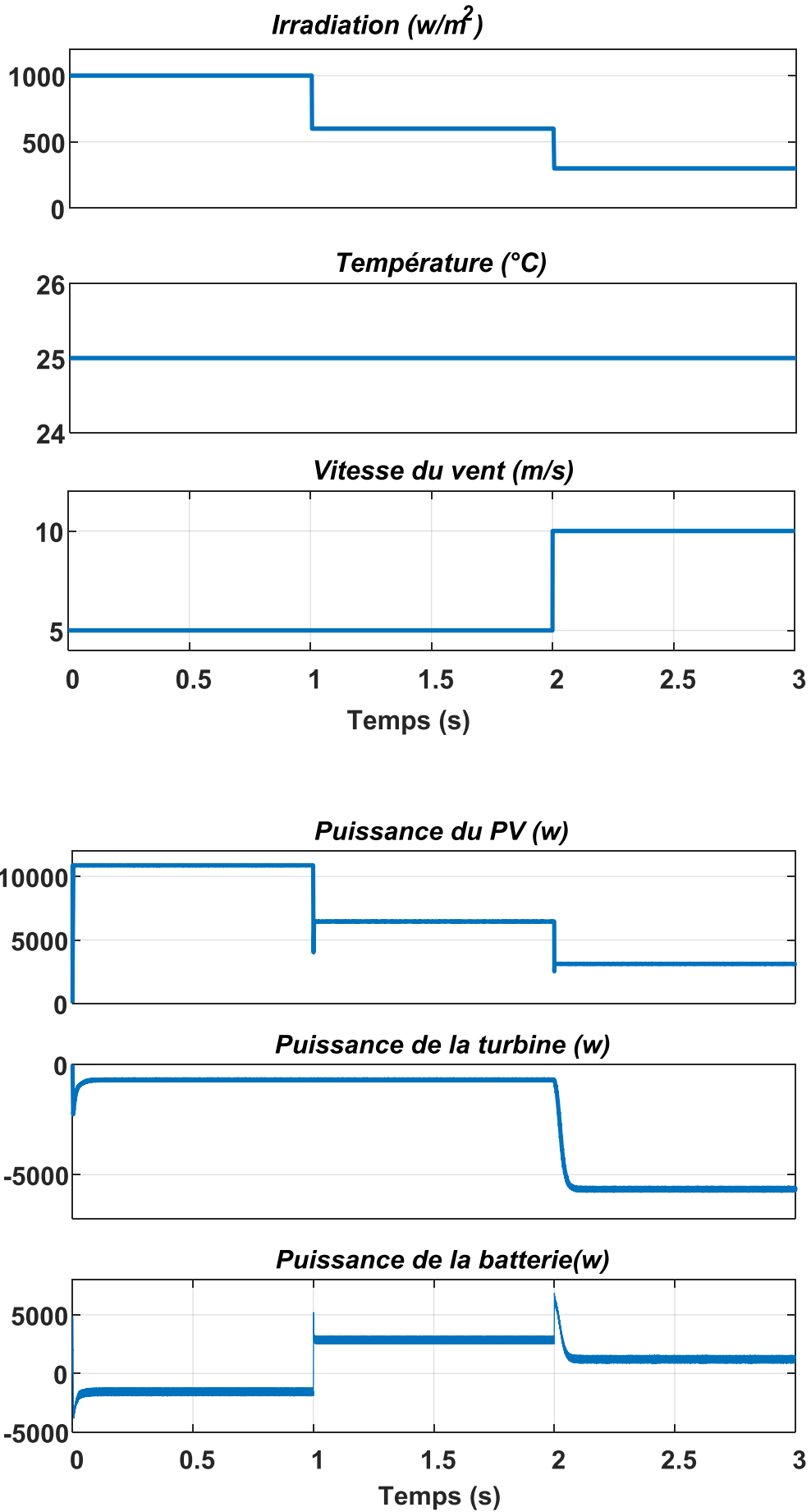


Figure4.3 Comportement du SCH sans système de stockage

4.3.2 Système avec stockage

Cependant, pour la suite de ce travail la figure 4.4 présente les résultats de simulation où une batterie de stockage est prévue. Pour cela, en prenant en compte l'intervalle de $t=0$ s à 1s où l'irradiation est de 1000W/m^2 et une vitesse est de 5m/s. La puissance totale fournie dépasse celle requise par la charge, il est donc possible de stocker l'énergie excédentaire produit dans des batteries de stockage. Cela explique l'augmentation de l'EDC de l'état de charge de la batterie. Mais, entre 1s et 2s où l'irradiation passe de 1000W/m^2 à 600W/m^2 ce qui provoque une diminution de la puissance photovoltaïque et par conséquent une diminution de la puissance totale fournie, dans ce cas la batterie prend le relais de l'état de décharge pour suppléer au manque de puissance demandé. On constate également que les courants du réseau électrique sont nuls. Enfin, de $t=2$ s à $t=3$ s avec une diminution de l'irradiation de 600W/m^2 à 300W/m^2 et une augmentation de la vitesse du vent de 5 m/s à 10m/s, on constate une augmentation de la puissance fournie, ce qui provoque la diminution de la puissance de la batterie qui sert à combler le vide. Nous remarquons également que le réseau est toujours au repos.



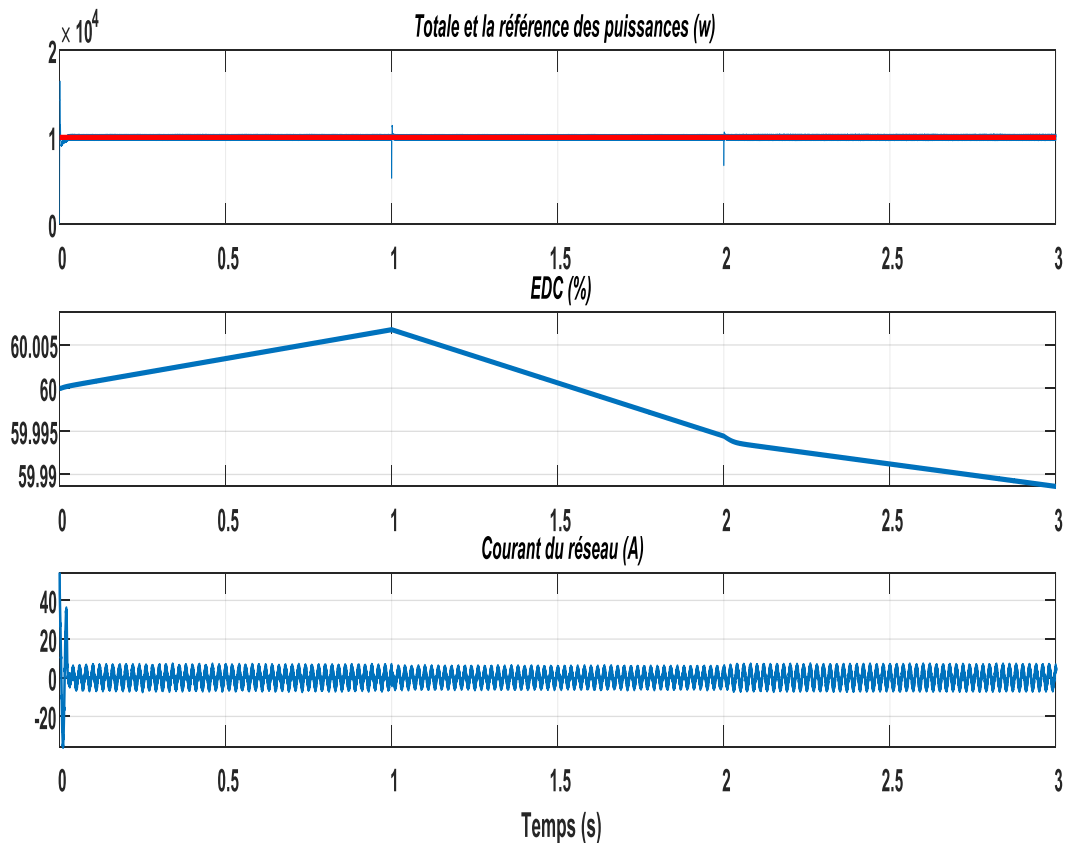


Figure 4.4 Comportement du SCH avec système de stockage

4.4 Architecture autonome

Cette section consiste à développer un mécanisme de gestion de puissance des différents composants d'un système hybride. A cet effet, les données météorologiques du site ainsi que celles relatives aux équipements doivent être connues. Le système hybride considéré se compose essentiellement d'un système photovoltaïque, d'une éolienne, d'une batterie de stockage et d'une charge DC. Le cahier de charge exige que l'excédent d'énergie produit par rapport à celle dont a besoin la charge serait stocké (charge des batteries) et lorsque l'énergie demandée par la charge et supérieure à celle que peut fournir le système hybride, l'énergie stockée serait utilisée comme complément (décharge des batteries) pour que la charge reçoive l'énergie demandée quelles que soient les conditions.

Chaque maillon de la chaîne proposée ainsi que la chaîne globale sont simulés sous le logiciel MatLab / Simulink grâce auquel le comportement de l'installation sous différentes conditions environnementales est analysé afin de valider l'étude.

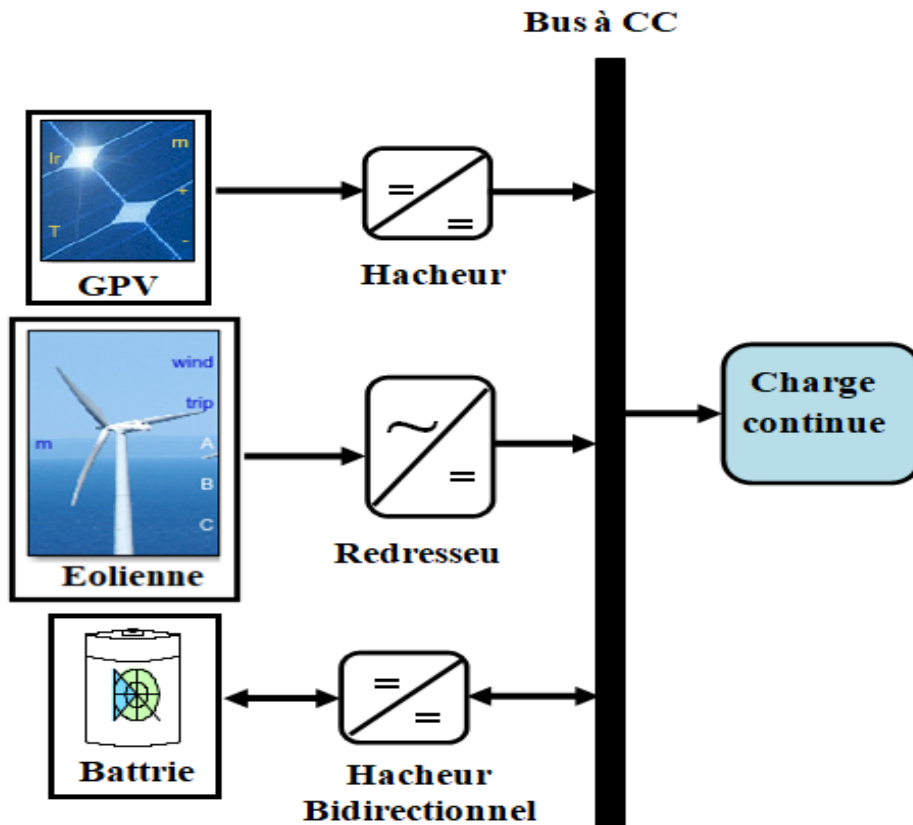


Figure 4.5 Système de conversion hybride autonome

Cette section est réservée à l'analyse de la gestion de puissance du système hybride considéré. A cet effet, un ensemble de variables d'entrée (Irradiation, Température et Vitesse du vent) a été imposé en prenant compte du fonctionnement de chaque élément de la chaîne de production. Les structures de leurs profils et celui de la charge sont considérés selon cinq (5) intervalles de temps remarquables qui sont, respectivement, enregistrés dans le tableau 4.1 et 4.2 et illustrés par la figure 4.6 [185].

<i>Intervalles(s)</i>	<i>E(W/m²)</i>	<i>T(°C)</i>	<i>v_v(m/s)</i>
$0 \leq t < 0.25$	1000	25	Augmenter de 5 à 10
$0.25 \leq t < 0.5$	1000	25	Diminuer de 10 à 4
$0.5 \leq t < 0.75$	Diminuer de 1000 to 400	25	Augmenter de 4 à 11
$0.75 \leq t < 1.5$	400	Augmenter de 25 to 30	11

Tab 4.1 Variables d'entrée

De plus, en considérant un profil de la charge, comme le montre le tableau.

<i>Intervalles(s)</i>	<i>P_{ch} (KW)</i>
$0 \leq t < 0.5$	10
$0.5 \leq t < 1$	12
$1 \leq t < 1.5$	6

Tab 4.2 Profil de la charge

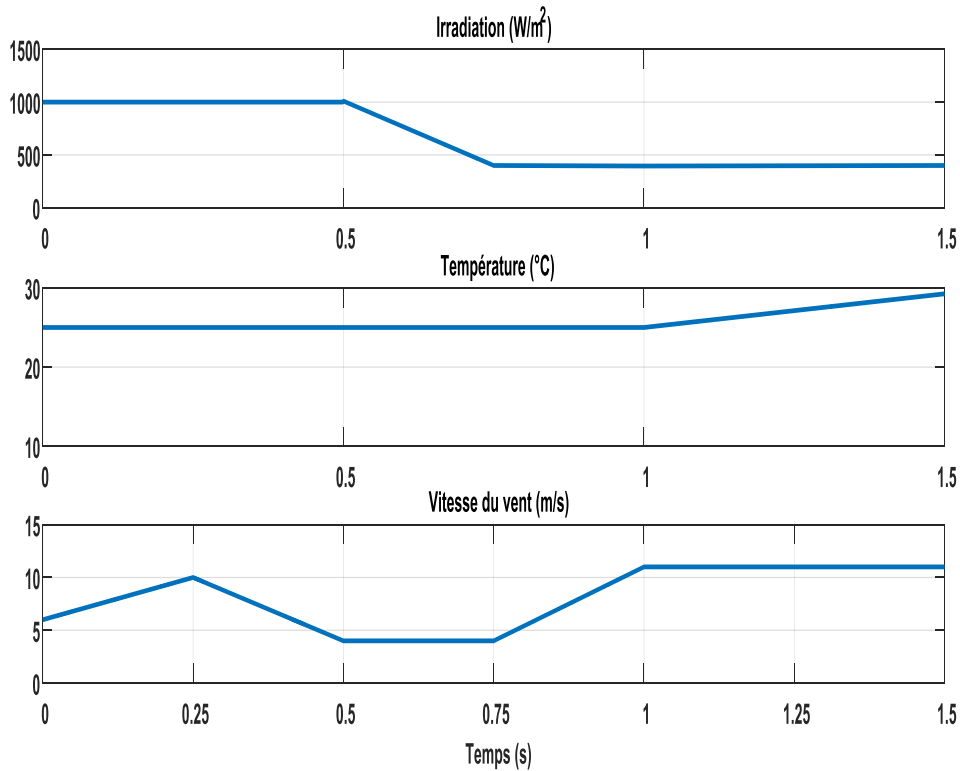


Figure 4.6 Profils des variables d'entrée

Sous ces conditions, la Figure 4.7 montre l'allure de la puissance produite par le panneau solaire (P_{PV}). Elle dépend principalement de l'évolution de l'irradiation disponible. La même figure, montre également la forme de la puissance produite par l'éolienne ($P_{turbine}$). Cela permet de visualiser le profil de la puissance totale (P_{Totale}) produite simultanément par la chaîne photovoltaïque et éolienne. Ainsi, selon ces profils, on constate que grâce au convertisseur bidirectionnel, le fonctionnement de la batterie en mode charge et décharge s'effectue en fonction, d'une part, de la différence entre la puissance totale et la puissance de charge, et d'autre part, les signaux de commande des deux semi-conducteurs du hacheur Buck-Boost comme le montrent les signaux au milieu de la Figure 4.8 qui correspond parfaitement à la forme de l'état de charge (EDC) de la batterie. Pour la même figure, soit le mode charge pour les intervalles ($0s \leq t < 0.5s$) et ($1s \leq t < 1.5s$) ainsi que le mode décharge pour ($0.5s \leq t < 1s$). Il ressort de cette analyse une bonne gestion de l'énergie entre les deux sources principales (Énergies photovoltaïque et éolienne) et une source auxiliaire (Batterie de stockage) du système hybride considéré.

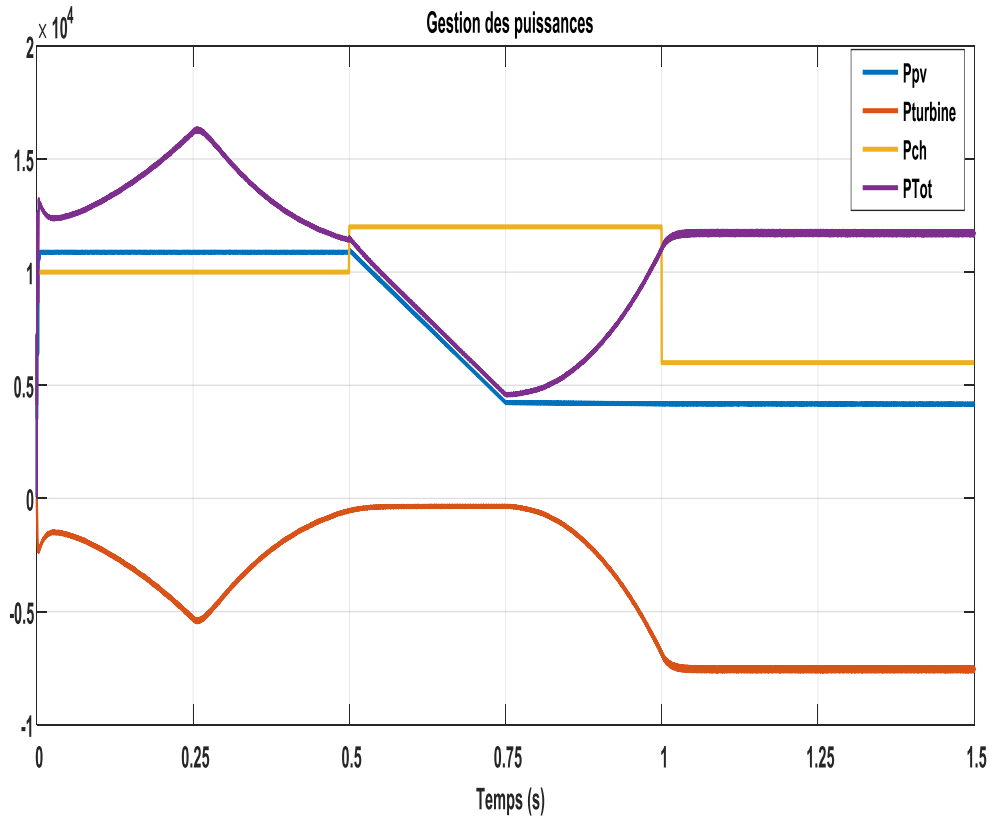


Figure 4.7 Comportement des puissances

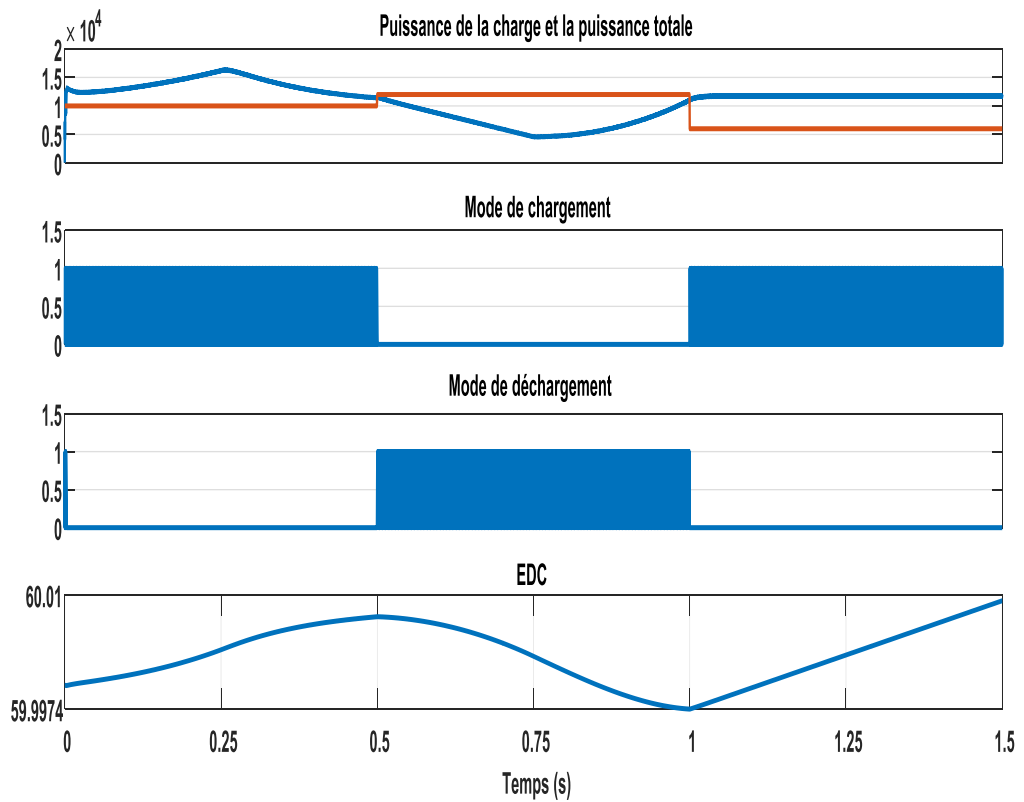


Figure 4.8 Modes de charge et de décharge

4.5 Système de pompage Hybride

L'eau d'un système de pompage hybride peut être distribuée directement à l'application (par exemple, goutte à goutte irrigation) ou distribuée à une forme de stockage de l'eau, comme un barrage ou un réservoir d'eau. La puissance de pompage nécessaire au système est grande pour déplacer l'eau de la source à son point de livraison.

Pour un système qui aura un stockage d'eau, il est important de considérer la capacité de ce stockage hydraulique. C'est surtout le cas, si le système de pompage sera conçu pour pomper plus d'eau les jours ensoleillés afin de compenser la réduction du pompage d'eau sous les nuages.

Une configuration courante pour un système de pompage hybride consiste à installer trois (03) sources d'énergies, deux principales (photovoltaïque et éolienne) et une auxiliaire (Batterie de stockage), ce qui signifie qu'il y aura de l'eau disponible même lorsque le générateur photovoltaïque produit moins d'énergie que nécessaire, par exemple par temps nuageux ou pendant la nuit (voir les figures 4.9 et 4.10).

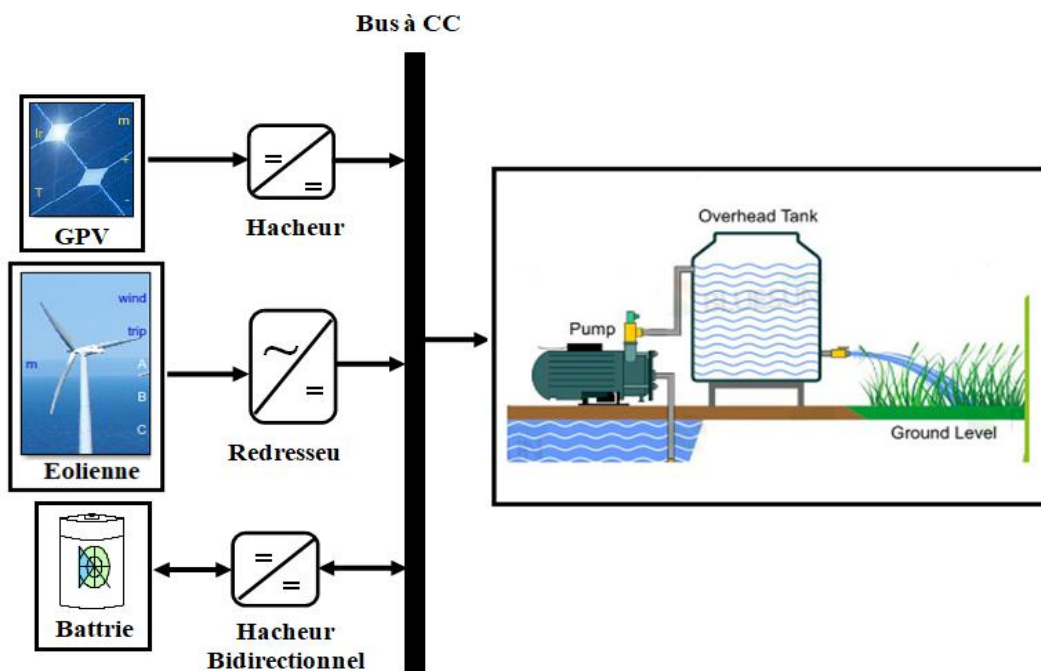


Figure 4.9 Système de pompage hybride

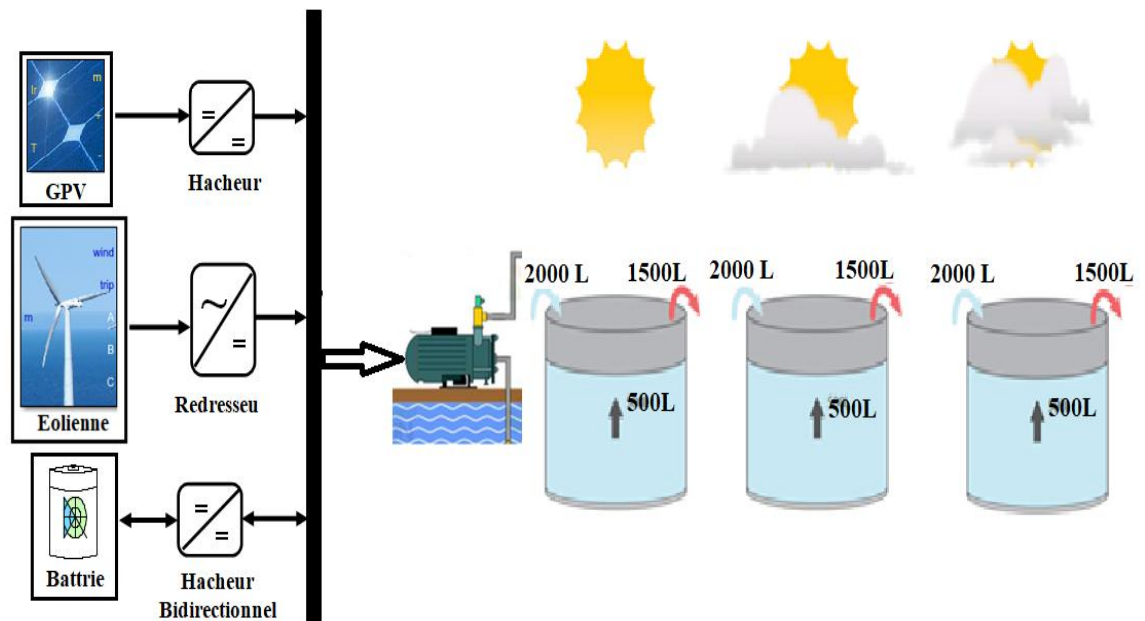


Figure 4.10 Système de pompage hybride sous ombrage partiel

Le système hybride a le potentiel de réduire la facture d'énergie de pompage et les coûts de maintenance si l'une des conditions suivantes s'applique :

- Besoin d'utilisation des pompes électriques pour l'irrigation et êtes loin et non connecté au réseau ;
- Pomper de l'eau vers des réservoirs pour le stocker ou un usage domestique ;
- Un potentiel de transfert de charge (par exemple, utiliser l'énergie renouvelable pour réduire la demande totale d'électricité et permettre une structure tarifaire plus favorable).

Le système choisi est un système autonome plus adapté à l'application de pompage dans les zones éloignées du réseau électrique. L'autonomie du système est assurée par le système de batterie de stockage. Ce dernier assure aussi la stabilité et la régulation de l'énergie fournie à la charge (Figure 4.11). Le système en question présente l'avantage de pouvoir pomper de l'eau à n'importe quel moment jour et nuits, cette flexibilité est due à la présence des multiples sources telles que le photovoltaïque l'éolien et la batterie.

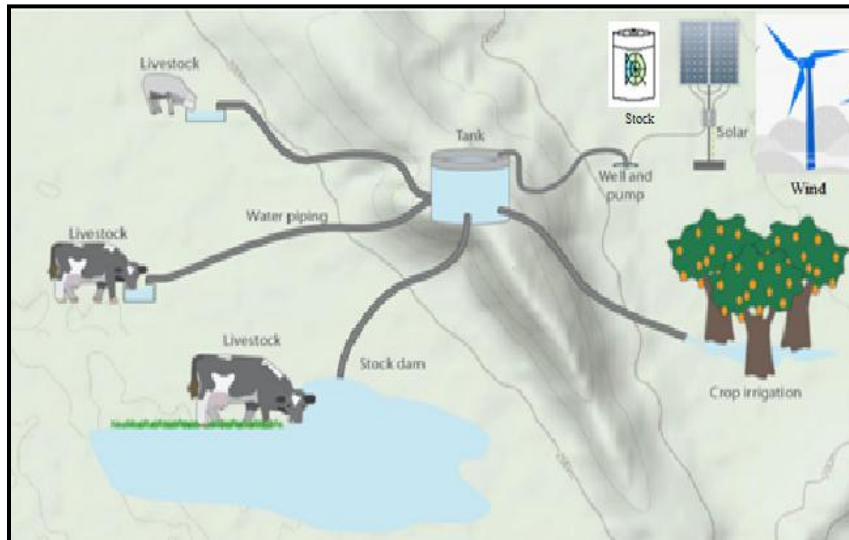


Figure 4.11 Disposition du système de pompage hybride

Habituellement, un système de pompage à énergie hybride (figure 4.12) contient l'équipement suivant : un panneau solaire qui convertit la lumière du soleil en électricité, une turbine éolienne qui transforme le vent en énergie électrique, la batterie qui joue le rôle du stockage électrique, les contrôleurs du système qui contrôlent les sources d'énergie et la pompe, un moteur électrique qui entraîne la pompe, et une pompe à eau qui déplace l'eau d'une source à son point de livraison.

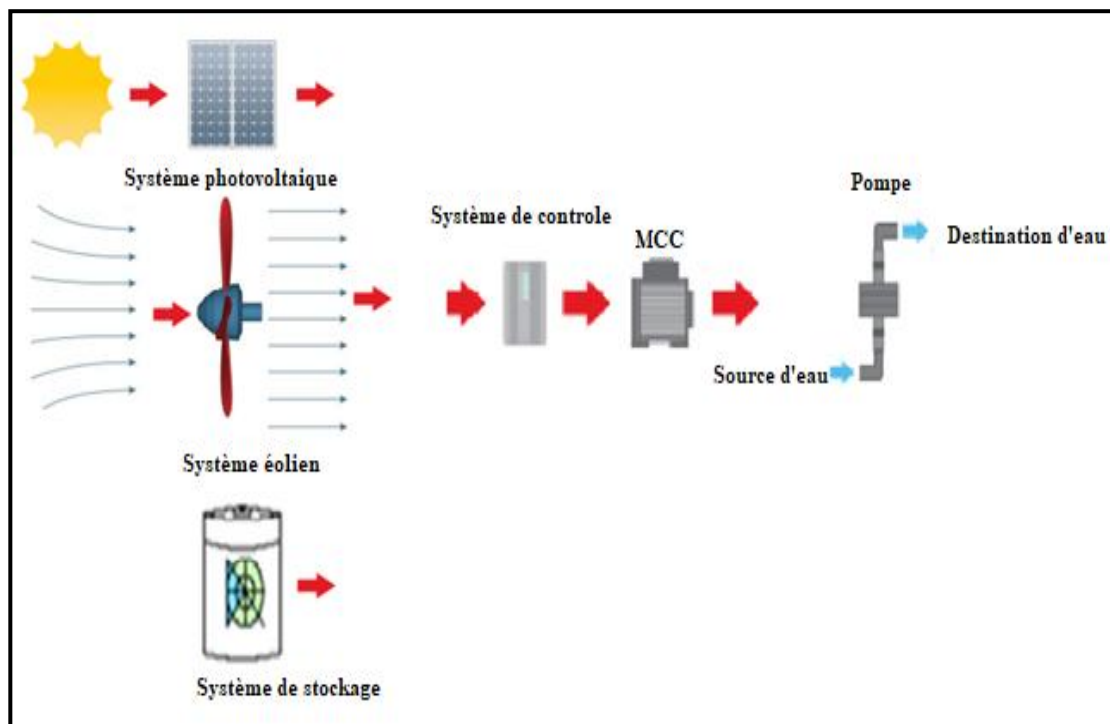


Figure 4.12 Solution de pompage hybride

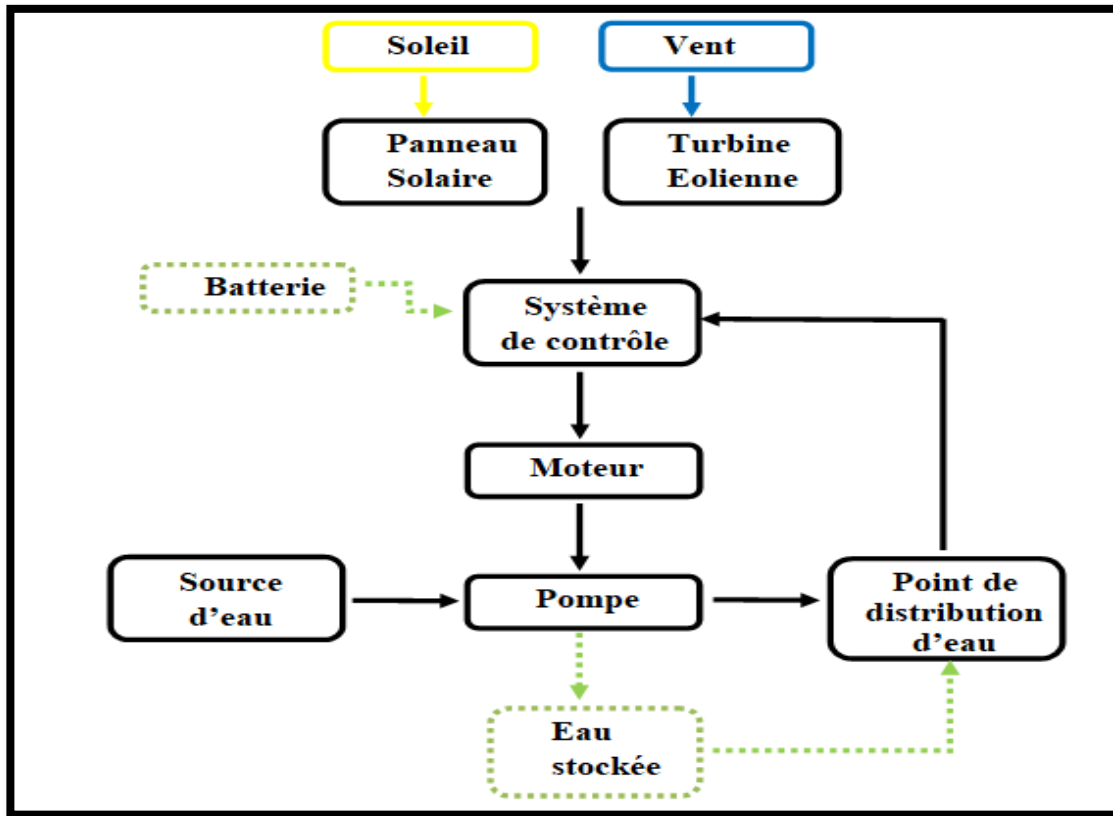


Figure 4.13 Schéma de la circulation de l'énergie dans un système de pompage hybride

4.5.1 Modélisation du système de pompage

Dans un système de pompage hybride, la pompe à eau doit être entraînée par un moteur électrique, car elle est alimentée par la sortie du générateur d'énergie. La pompe à eau utilisée doit être compatible avec la source d'alimentation fournie. Le système de conversion choisi produit de l'électricité en courant continu ; par conséquent, si le moteur de la pompe doit être alimenté directement par le générateur hybride, ce moteur doit être un moteur à courant continu de puissance nominale appropriée et correctement dimensionné. Le moteur à courant continu d'une pompe à énergie renouvelable convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Le moteur à aimant permanent n'a pas besoin d'excitation externe car son enroulement de champ est magnétique permanent. Ce type de moteur est défini par les relations suivantes [186] :

$$U = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + K_m \cdot \omega_m \quad (4.1)$$

Où, U : tension source continue (V), I_a : courant d'induit (A), R_a : résistance d'induit (Ω),
 L_a : inductance d'induit (H), K_m : constante de couple (V.s/rad) et ω_m : vitesse moteur (tr/min).

Le couple électrique C_{em} (N.m):

$$C_{em} = K_m \cdot I_a \quad (4.2)$$

L'équation dynamique est :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - B \cdot \omega_m \quad (4.3)$$

Où, J : constante d'inertie ($kg.m^2$) et B : coefficient de frottement visqueux ($N.m.s/rad$).

Il existe deux types de méthodes de pompage, les pompes dynamiques et les pompes volumétriques. Pompes dynamiques offrent généralement une meilleure efficacité et flexibilité et conviennent aux grandes tâches de pompage, telles que les vastes acres irrigation.

La pompe est une machine qui convertit la puissance mécanique en puissance liquide, elle est directement couplée au moteur et caractérisée par le couple, la vitesse et le débit [187].

$$T = 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 + 0,00019 \cdot \omega + 0,092 \quad (4.4)$$

$$Q = \frac{\eta \cdot P}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (4.5)$$

$$H = 4,923 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 - 1,5826 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \cdot Q + 18144 \cdot Q^2 \quad (4.6)$$

Où, P : puissance d'entrée nécessaire (W), ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3),
 H : hauteur manométrique (m), g : accélération standard de la pesanteur ($9,81 m/s^2$), Q :
débit (m^3/s) et η : rendement de l'installation de pompage.

4.5.2 Dimensionnement du système de pompage

4.5.2.1 Panneau photovoltaïque

Les modules monocristallins sont généralement plus efficaces que les autres types de modules solaires (Figure 4.14), avec une efficacité commerciale niveau d'environ 18 à 21 pour cent. Ils ont également tendance à avoir des rapports coût/puissance plus élevés que les autres modules solaires.



Figure 4.14 Module PV monocristallin

Puissance nominale $P(W)$	270
Nombre des modules	10
Courant de court circuit $I_{cc}(A)$	9.04
Tension à vide $V_{oc}(V)$	37.72
Courant à P_{mpp} $I_{pm}(A)$	8.50
Tension à P_{mpp} $V_{pm}(V)$	31.92

Tab4.3 Caractéristiques électriques d'un module

4.5.2.2 Turbine éolienne

L'éolienne utilisée est un modèle d'éolienne à pas variable. Le coefficient de performance C_p de la turbine est la puissance de sortie mécanique de la turbine divisée par la puissance éolienne et une fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation et de l'angle de tangage (Bêta) ; C_p atteint sa valeur maximale à bêta nul.

La première entrée est la vitesse du générateur. Pour un générateur synchrone, la vitesse de base est la vitesse synchrone. La deuxième entrée est l'angle d'inclinaison de la pale (bêta) en degrés. La troisième entrée est la vitesse du vent en m/s. La sortie est le couple appliqué à l'arbre du générateur. L'inertie de la turbine doit être ajoutée à l'inertie du générateur.

Puissance nominale	2850W
Hauteur	15-35m
Diamètre	3-13m

Tab4.4 Caractéristiques de la turbine

4.5.2.3 Dispositif de stockage

En fonction des exigences de fiabilité de l'eau, et en acceptant que la disponibilité d'énergie puisse varier de ce qui est prévu, un système de pompage hybride peut être conçu pour

inclure un stockage d'énergie supplémentaire bien que l'ajout de la batterie augmente la complexité technique et le coût du système.

Tension nominale	200V
Capacité nominale	30Ah
Etat de charge initial	20%

Tab4.5 Caractéristiques de la batterie

4.5.2.4 Système de pompage

Les caractéristiques du système de pompage sont données par le tableau 4.6.

Résistance d'induit (R_a)	1.5Ω
Constante de couple (K_m)	$0.52V.s/rad$
Moment d'inertie (J)	$1.06e^{-6}Kg/m^2$
Coefficient de frottement visqueux (B)	$3.79e^{-3}N.m.s/rad$
Puissance électrique	2400W

Tab4.6 Caractéristiques du système de pompage

4.5.3 Analyse du système de pompage sous irradiation uniforme

Dans cette phase du travail, on analyse les résultats obtenus de la simulation d'un système hybride qui alimente un système de pompage. A cet effet, un ensemble de variables d'entrée (Irradiation et Vitesse du vent) a été développé, prenant en compte le fonctionnement de chaque élément de la chaîne de production, comme le montre la figure 4.15 et 4.16.

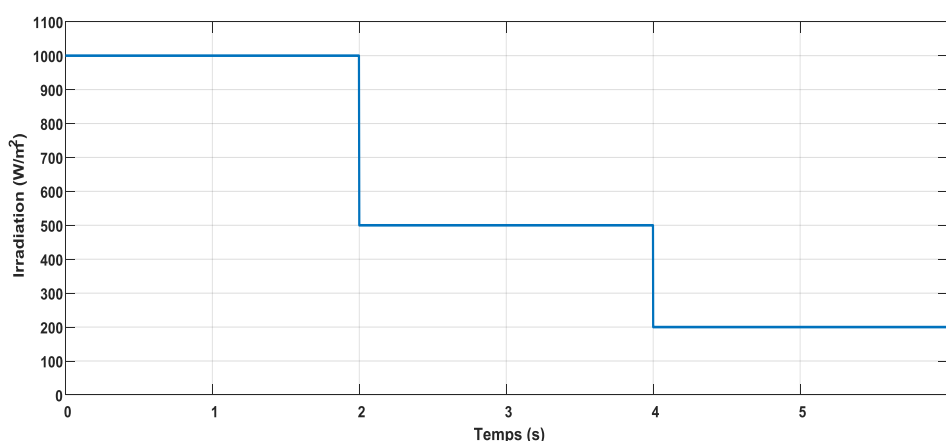


Figure 4.15 Profil de l'irradiation

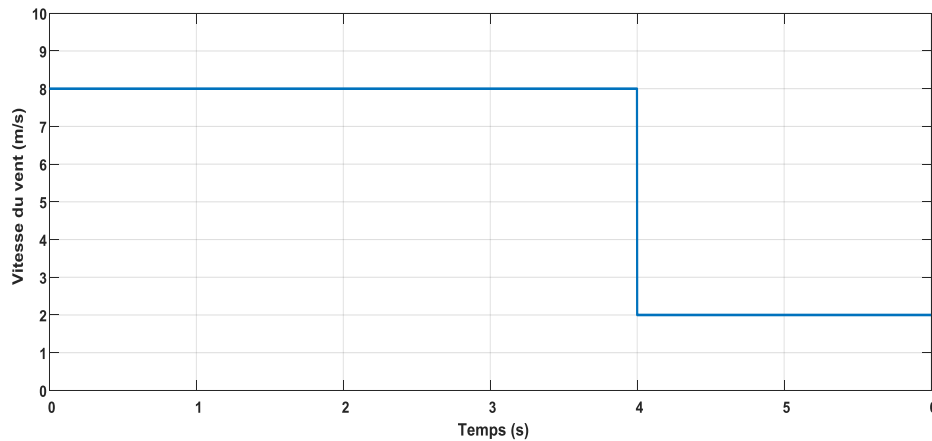


Figure 4.16 Profil du vent

Pour ces conditions, la Figure 4.17 montre l'allure de la puissance totale produite par le système photovoltaïque et le système éolien. Elle dépend principalement de l'évolution des conditions climatiques (irradiation et vitesse du vent) disponibles. La même figure, montre également la forme de la puissance absorbée par la pompe. Ainsi, selon ces profils, on constate que grâce au convertisseur bidirectionnel, le fonctionnement de la batterie en mode charge et décharge s'effectue en fonction, de la différence entre la puissance totale et la puissance de charge comme le montre la figure 4.18 qui correspond parfaitement à la forme de l'état de charge (*EDC*) de la batterie. La figure 4.19 montre le débit de la pompe au cours du changement climatique imposés, on remarque que le débit ne change pas et il n'est pas affecté par ces changements.

Cette analyse justifie la bonne gestion de l'énergie pour le système de pompage alimenté par un système hybride autonome, comprenant deux sources principales (Énergies photovoltaïque et éolienne) et une source auxiliaire (Batterie de stockage).

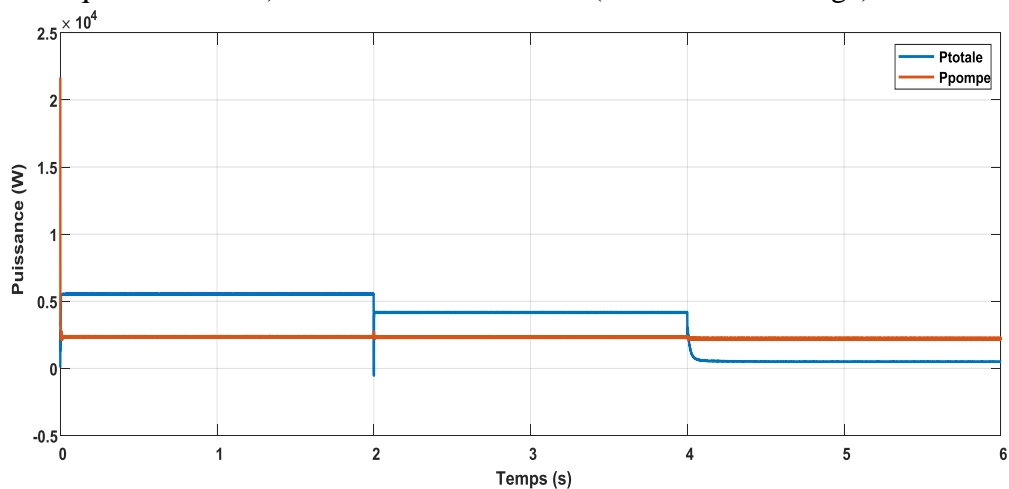


Figure 4.17 Puissance de la pompe et la puissance totale

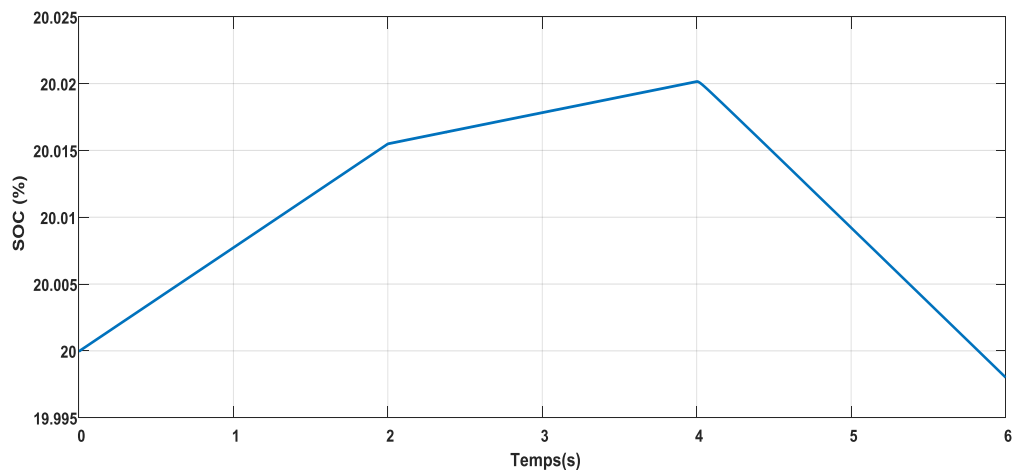


Figure 4.18 EDC de la batterie

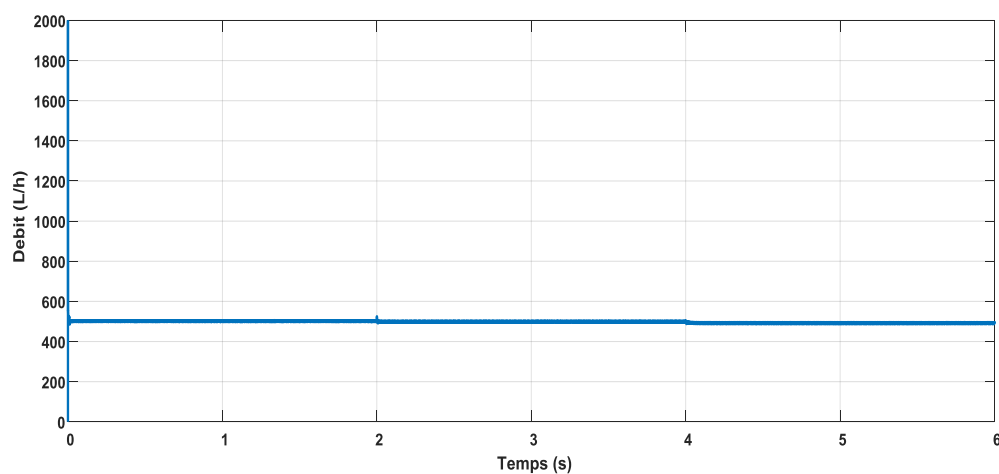


Figure 4.19 Débit de la pompe

4.5.4 Analyse du système de pompage sous irradiation non uniforme (ombrage partiel)

Cette section concerne l'analyse du comportement du système de pompage hybride sous le phénomène d'ombrage partiel. A cet effet, l'influence de ce phénomène naturel est étudiée pour la structure hybride avec un MPPT classique : le mode glissant à double intégral (DISMC) puis une MPPT méta-heuristique soit l'optimisation des loups gris (GWO).

Ainsi, le profil des entrées sélectionnées sont représentées par la figure 4.20 les résultats de simulation obtenus pour le DISMC et le GWO sont présentés par la figure 4.21. On remarque que la méthode d'optimisation GWO suit correctement le point maximum global pour un système hybride au moment où le DISMC, malgré ses meilleures performances (figure 4.22), ne suit que un point maximum partiel (figure 4.21), ce qui conséquent la perte d'énergie qui influe sur le comportement du système.

Mais malgré l'influence de ce phénomène, qui est l'ombrage partiel, sur le système photovoltaïque l'hybridation est une solution pour combler le manque de puissance demandée par la pompe dans ce travail (figure 4.3 et 4.24).

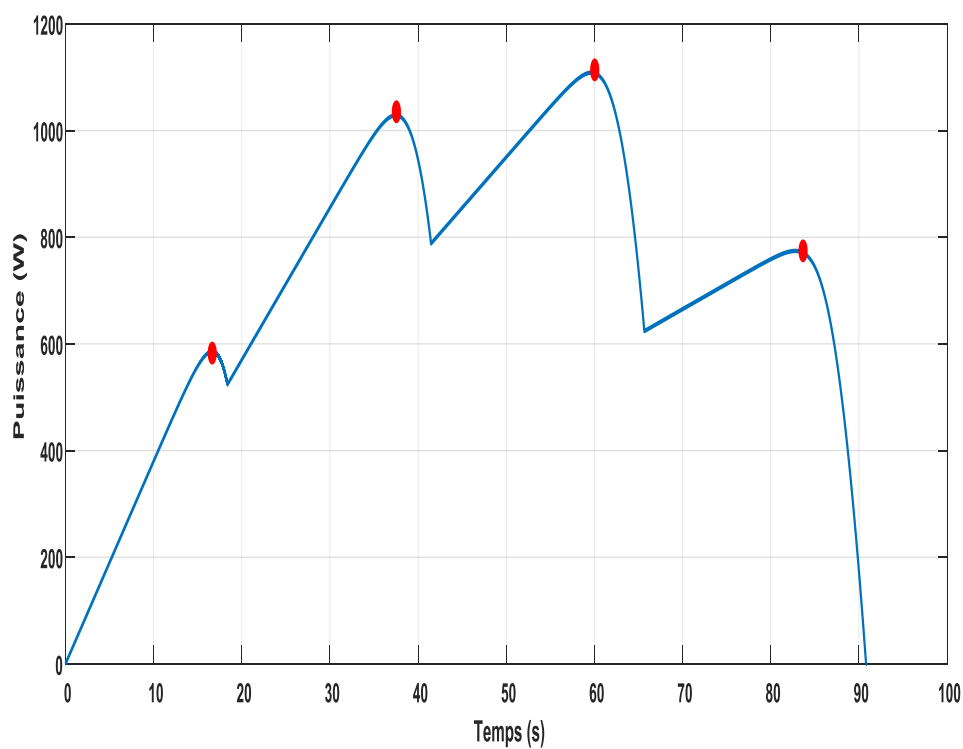


Figure 4.20 Profil de l'ombrage partiel

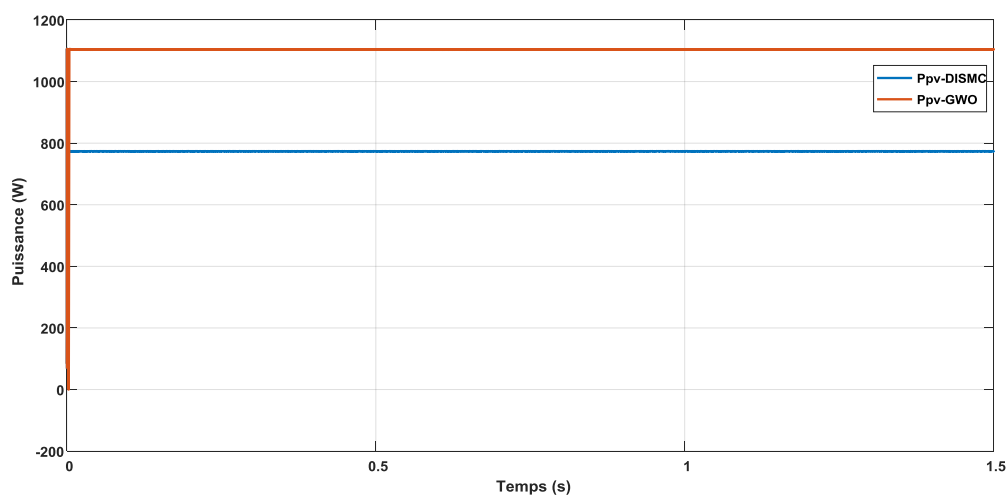


Figure 4.21 MPPT sous ombrage partiel

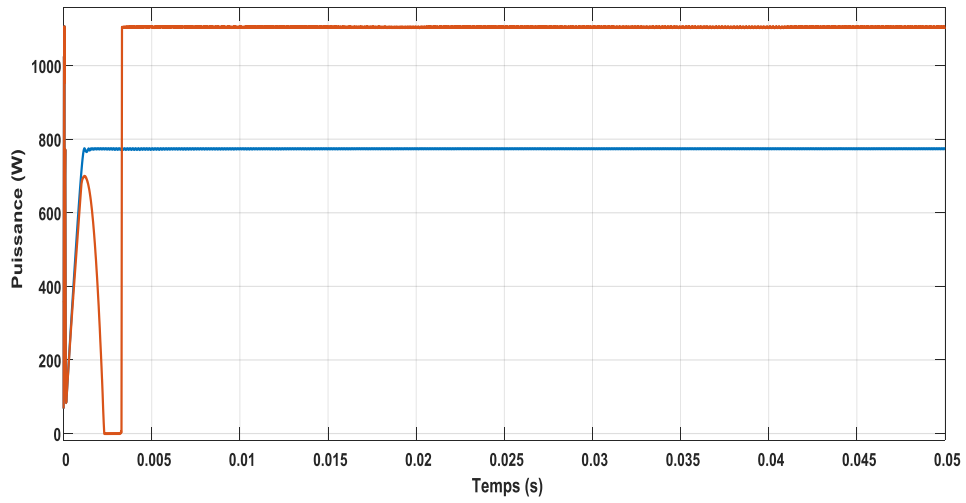


Figure 4.22 Zoom MPPT sous ombrage partiel

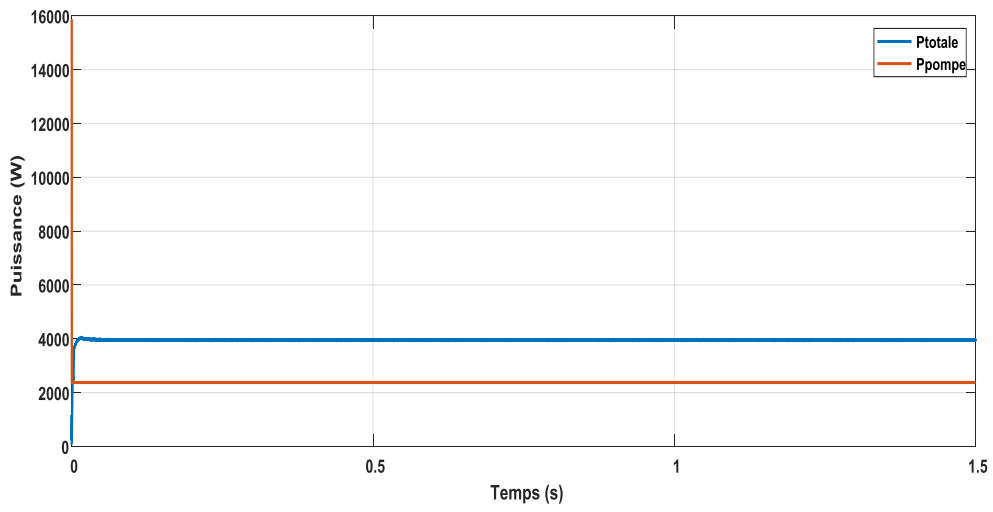


Figure 4.23 Puissance totale sous ombrage partiel

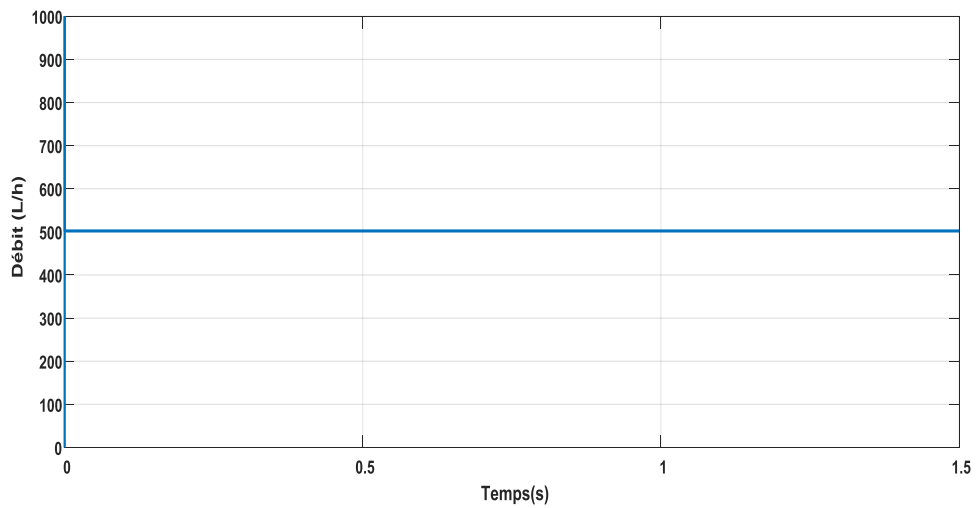


Figure 4.24 Débit de la pompe sous ombrage partiel

4.6 Conclusion

L'utilisation des systèmes de conversion des énergies renouvelables est une alternative prometteuse et indiscutable à l'utilisation des énergies fossiles, grâce aux avantages qu'elles présentent, principalement, par leur disponibilité (durable et inépuisable) et par leur propreté (pas de rejet de déchets dans l'atmosphère). Cependant, face au caractère intermittent de l'énergie solaire et éolienne, l'option de l'hybridation avec le stockage s'avère être une configuration d'une grande importance. A cet effet, un système hybride présente un intérêt capital pour les sites isolés. Outre l'intérêt de telles installations, le système de stockage joue un rôle clé pour la continuité de service dans les conditions météorologiques disponibles.

L'installation hybride considérée dans ce travail contribue à l'enrichissement du domaine de la gestion de l'énergie produite par les multi sources. Elle montre principalement l'importance du dispositif de stockage pour la continuité de service même si les conditions climatiques, notamment d'irradiation et de température sont défavorables. D'autant plus que la disponibilité de sources d'énergies durables, inépuisables et propres, c'est-à-dire sans rejet de déchets dans l'atmosphère, est un atout majeur pour encourager et promouvoir l'utilisation de systèmes de conversion d'énergie renouvelable comme alternative prometteuse et indiscutable à la l'utilisation des énergies fossiles, grâce aux avantages qu'elles présentent, principalement, par leur disponibilité (durable et inépuisable) et par leur propreté. Cependant, face au caractère intermittent de l'énergie solaire et éolienne, l'option de l'hybridation avec le stockage s'avère être une configuration d'une grande importance.

CONCLUSION GENERALE

La production de l'énergie électrique constitue le palier du développement économique, de la sécurité, de la stabilité et l'avancée technologique. Ainsi, au vue de la situation énergétique et environnementale à travers le monde, la réussite de la transition énergétique en exploitation des ressources renouvelables est le défi de tout le monde. Par conséquent, les systèmes de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables font de nos jours le centre d'intérêt de plusieurs travaux scientifiques en termes de conception, dimensionnement, modélisation, optimisation, commande, etc. L'exploitation de systèmes de conversions à énergie renouvelables est une alternative prometteuse et incontestable par rapport à l'exploitation des énergies fossiles et ce grâce aux avantages qu'ils présentent, principalement, par leur disponibilité (durables et inépuisables) et par leur propreté (pas de rejet de déchets dans l'atmosphère). Toutefois, le caractère intermittent des énergies solaire et éolienne, l'option de l'hybridation de ces deux derniers, avec stockage s'avère une configuration d'une grande importance. A cet effet, un système hybride est d'un intérêt capital pour les sites isolés. En plus, de l'intérêt de telles installations le système de stockage joue un rôle primordial pour la continuité de service sous les conditions météorologiques disponibles.

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse est une contribution à la compréhension de la gestion des puissances d'un système hybride autonome PV/Eolienne/Batterie. L'effet de la variation de l'irradiation, température et vitesse du vent sur le comportement du système considéré ont été validés par simulations sous l'environnement MatLab /Simulink. Les tests réalisés par simulations numériques sous les différents scénarios de changements climatiques (irradiation, température et vent) et essentiellement le changement uniforme et non uniforme (ombrage partiel) de l'irradiation ont prouvé, vu l'étude comparative des performante que nous avons réalisé, que algorithmes d'optimisation classiques n'assurent pas un fonctionnement au point de puissance maximale en présence d'un ombrage partiel

contrairement aux techniques méta-heuristiques. En effet, bien que Les techniques conventionnelles considérées donnent de bons résultats dans des conditions d'éclairement uniformes, il a été montré que la commande DISMC assure les meilleures performances dans le cas de changement uniforme de l'irradiation. En outre, le MPPT proposé basé sur GWO donne une vitesse de suivi plus rapide et un amortissement conséquent des oscillations par rapport aux trois autres méthodes, à savoir PSO, CS et DISMC et quel que soit le profil de l'ombrage partiel il permet d'atteindre le point de puissance maximale global (PPMG). Par ailleurs, le système hybride proposé garantit un fonctionnement optimal en termes de production de l'énergie électrique. La gestion des puissances entre les différentes sources renouvelables est assurée grâce aux techniques de commandes appliquées.

A l'issue de ce travail, on persiste avec l'envie et le désir de continuer de travailler dans le même axe et de valider expérimentalement les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse.

REFERENCES

- [1] Abdulkader Tabanjat, «Modelling, control and supervision of multi-source system connected to thenetwork with a buffer storage of electrical energy via hydrogen vector », *Electric power Université deTechnologie de Belfort-Montbeliard*, 2015. English. NN2015BELF0266.
- [2] Nabil Derbel, Quanmin Zhu, «Modeling Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems », *Springer*, ISSN 1865-3529 ISSN 1865-3537 (electronic), *Green Energy and Technology*, ISBN 978-981-13-1944-0,ISBN978-981-13-1945-7(eBook), <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1945-7>,Library of Congress Control Number: 2018964938.
- [3] Saib Samia, «Contribution à l’optimisation d’un système hybride (PV/éolien) avec stockage d’énergie connecté au réseau électrique », *Universite ferhat abbas — setif1, Faculte de technologie*, 2018.
- [4] Bati Ernest Boya Bi, Prosper Gbaha, Kamenan Blaise Koua, Magloire Paul Ekoun Koffi, « Dimensionnement et Gestion de l’Energie au Sein d’un Système Hybride de Production d’Energie », *European Scientific Journal December 2018 edition Vol.14, No.36 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431*, Doi: 10.19044/esj.2018.v14n36p260
- [5] Maroua Haddad, «Sizing and management of hybrid renewable energy system for data center supply », *Operations Research [cs.RO]. Université Bourgogne Franche-Comté*, 2019. English.NNT:2019UBFCD036.
- [6] M. Bunthem Kim, « Contribution to the design and control of a hybrid renewable energygeneration system based on reuse of electrical and electronicscomponents for rural electrification in developing countries », *Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)*, mai 2019.
- [7] BI, Bati Ernest BOYA, et al, « Étude d’un système hybride de production d’énergie. », *Afrique SCIENCE* 16.5 (2020): 203-217.
- [8] Toual Belgacem, « Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d’Energie Electrique », *Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd*, Décembre 2018.
- [9] John A. R., Felix Thomas, Sibir Sunny A, Jishnu Balakrishnan K, Adharsh Ashok, Gopakumar Pathirikkat, 2017, « Multiple Renewable Energy Extraction using MISOC Topology for Residential Applications », *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI-2017), Jan. 05 07, Coimbatore, INDIA*.
- [10] A. Qazi et al., « Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions », in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63837-63851, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.
- [11] Ahmed MM, Shimada K. ,« The Effect of Renewable Energy Consumption on Sustainable Economic Development: Evidence from Emerging and Developing Economies. *Energies*. 2019; 12(15):2954. <https://doi.org/10.3390/en12152954>
- [12] Dahmane, Menad. , « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome », *Diss. Université de Picardie Jules Verne*, 2015.

- [13] Diffalah, Khaouni. , « Qu'est ce qu'agir avec justice à l'égard des générations futures en matière d'énergies renouvelables: comparaison entre la France et l'Algérie », Diss. Université de Paris, 2021.
- [14] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, P. Surekha, « Solar PV and Wind Energy Conversion Systems », ISSN 1865-3529 ISSN 1865-3537 (*electronic*) *Green Energy and Technology* ISBN 978-3-319-14940-0 ISBN 978-3-319-14941-7 (*eBook*) DOI 10.1007/978-3-319-14941-7, Springer International Publishing Switzerland , 2015.
- [15] Ludmil Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Energie électrique. *Université Pascal Paoli*, 2011.
- [16] Munsif, Rabia, et al. , « Industrial air emission pollution: potential sources and sustainable mitigation », *Environmental Emissions. IntechOpen*,2021.
- [17] Yu, Yi, Wanwan Zhu, and Yuan Tian. , « Green supply chain management, environmental degradation, and energy: evidence from Asian countries », *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2021 (2021).
- [18] Bersalli, Germán., « Évaluation et évolution des politiques de promotion des énergies renouvelables: la transition des secteurs électriques en Amérique Latine », Diss. Université Grenoble Alpes, 2017.
- [19] Collard, Fabienne. , « La politique énergétique en Europe », *Courrierhebdomadaire du CRISP* 38 , 5-66, 2018.
- [20] Laura Cozzi, « Les perspectives énergétiques mondiales, horizon 2040, *Les scénarios de l'Agence internationale de l'énergie* », Mis en ligne sur Cairn.info le 31/08/2020, <https://doi.org/10.3917/futur.438.0049>
- [21] <https://www.irena.org/Statistics/Statistical-Profiles>
- [22] Mida, Dris. , « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien–Photovoltaïque », Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [23] <https://www.connaissancedesenergies.org/lelectricite-dans-le-monde-en-2021-annee-de-records-220330>, 2021.
- [24] Furfari, Samuel, and Ernest Mund. , « The irenic world of IRENA." *Revue de l'Energie* 646 , 2019.
- [25] Guérineau, Julie. , « Le monde en transition." *DARD/DARD* 5.1 (2021): 12-18.
- [26] <https://www.connaissancedesenergies.org/les-energies-renouvelables-produiront-plus-delectricite-que-le-charbon-en-2025-selon-laie-220218>.
- [27] Mauricio Higuaita Cano, « Systeme de gestion de l'énergie basé sur l'incertitude pour un système hybride à sources d'énergie renouvelable autonome avec production d'hydrogène », *Thèse présentée à L'université du Québec à trois-rivières*, septembre, 2017.
- [28] Gassab Samir, « Gestion d'énergie d'une centrale à énergie renouvelable hybride dédiée à l'alimentation d'un site isolé », *Université Ferhat Abbas - Setif 1*, 07, 2019.
- [29] Lawan Gaptia Maï Moussa. , « Gestion optimale d'énergie électrique à partir des sources d'énergies renouvelables dédiées aux sites isolés », Autre.

- Normandie Université, Français. NNT : 2019Normlh28.2019.
- [30] Chaima Ghanjati. , « Contrôle de puissance et optimisation des flux d'énergie au sein des systèmes multi-sources à énergies renouvelables », *Energie électrique. Université de Poitiers; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie)*, 2021. Français. NNT : 2021Poit2293, 2021.
- [31] Fateh Slama, « Amélioration de l'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique (smart grid) », *Universite Ferhat Abbas — Setif -1-, juillet 2021*
- [32] Allaoua, Ouichène. , « Les énergies renouvelables: Définitions Renewable Energies », *The algerian journal of political sciences and international relations* 13 th issue december 2019
- [33] Michaille, Patrick VE, Grenêche, « Dominique and Mazière, Maurice. "1 Les différentes sources d'énergie », *Transition énergétique : la France en échec : Analyse et perspectives*, Les Ulis: EDP Sciences, 2021, pp. 15-26. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2295-9.c002>
- [34] « Les différentes catégories d'énergies marines », <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-categories-d-energies-marines>, publié le 27 août 2014 | mis à jour le 08 oct. 2020.
- [35] « Les deux formes du solaire, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique », <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaïque-et-le-solaire-thermique>, publié le 27 août. 2014 | mis à jour le 14 fev. 2022.
- [36] Fadila, Fenni. , « Potentiels et perspectives des énergies renouvelables en Algérie) Expériences de certains pays », 2022.
- [37] Lakhal, Nabila, and Naziha Boulkedra. , « Les Photovoltaïques: une Idée, une Réalisation et un Impact Economique en Algérie Photovoltaic: An idea, an Achievement and an Economic Impact in Algeria. », 2021.
- [38] « Energies renouvelables : l'Algérie entre dans une nouvelle ère énergétique durable", <https://afrique.latribune.fr/entreprises/la-tribune-afrique-de-l-energie-by-enedis/2018-06-08/energies-renouvelables-l-algerie-entre-dans-une-nouvelle-ere-energetique-durable-780786.html>
- [39] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie#519>
- [40] Boughali, Slimane & Bechki, Djamel & Bouguettaia, Hamza & Moukhtar, Lati & Mennouche, Djamel. , « Nouveau paradigme de la transition énergétique à l'ère du développement durable : cas de l'algérie. », 2017.
- [41] Benabdelkrim.B, Benattilah.A, Ghaitaoui.T. , « Study of Degradation of Amorphous PV Module Performance under Different Climatic Conditions », *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 1(2),125-135. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.2.>, 2019.
- [42] Lakhdara Amira, « Etude de la commande de la puissance et stockage d'un système photovoltaïque », *universite badji mokhtar annaba*, 2019.

- [43] Guillemoles, Jean-François. , « Chapitre 11: Chimie et photovoltaïque: d'Edmond Becquerel à nos jours, un parcours radieux », Chimie et lumière. EDP Sciences, 2021. 197-214.
- [44] Gazbour, Nouha. , « Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques. Diss. Université Grenoble Alpes, 2019.
- [45] Cherifi, Mohand, and Houa Ounouh. , « Étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque », Diss. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [46] Amelot, Dylan. , « Etudes des propriétés d'interfaces pour les cellules solaires de nouvelle génération », Diss. Sorbonne Université, 2021.
- [47] Gouriou, Tristan. , « Étude de l'impulsion électromagnétique et du plasma issus de la décharge de matériaux diélectriques soumis à une irradiation d'électrons », Diss. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2019.
- [48] Colange, Benoît. , « Diagnostic de systèmes énergétiques par l'analyse intelligente de structures de données de grande dimension. », 2021.
- [49] Zerhouni Fatima Zohra, M'hamed Houari Zerhouni, and Mansour Zegrar. "Systèmes Energétiques Autonomes », *University of Sciences and Technology of Oran*, 2021.
- [50] Benabderrahmane, Ihssane, and Saadia Benattalah. , « Développement d'un nouveau design de codeur rotatif pour la commande d'un système de poursuite solaire. Diss. Université Ghardaia, 2019.
- [51] Hadjab, Moufidi ,« État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques », *Éditions universitaires européennes*, 2019.
- [52] Mida, Dris. « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Électrique Hybride Eolien-Photovoltaïque ». Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [53] Gomez, Lionel Davy, et al. , « Dimensionnement par optimisation d'un système photovoltaïque pour une alimentation isolée avec profil de charge constant », 2016.
- [54] Bouchama Idris, Dilmi Melouki. , « Performance study of ingap/gaas/ge tandem solar cells by simulation », 10.13140/RG.2.2.16262.73289, 2016.
- [55] Abouda, Salim. « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes ». Diss. Reims, 2015.
- [56] https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire
- [57] Mohamed, tagrerout., and Atmania. Hanane. , « Le mix énergétique: un outil de la sécurité énergétique en Algérie », 2021.
- [58] BOUANANI, Boualem. , « Etude technologique et électrique des cellules solaires en couches minces à hétérojonctions ZnO/CdS/CIGS utilisant les logiciels Athena et Atlas de Silvaco », Diss. 2015.

- [59] Radja, Nour El Houda, and Souhyla Ben Salem. , « Caractérisation structurale, électronique et optique des semi-conducteurs CdTe et CdS pour des applications dans les cellules photovoltaïques », *Diss. Univ M'sila*, 2020.
- [60] Sofia, Belaid Lalouni. "Cours Energie Solaire Photovoltaïque." *Université A. Mira de Bejaia*, 2015.
- [61] Souilah, Omar, « Contribution à la modélisation d'une cellule photovoltaïque multijonction à la base de InGaN », *Diss.* 2021.
- [62] Couderc, Romain, « Etude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration », *Diss. Lyon, INSA*, 2015.
- [63] Ghabrouri, Amina, Mouna Haddag, and Nacer Hebbir. , « Simulation du rendement des différents types de cellules photovoltaïques en fonction de la température et l'éclairement », 2020.
- [64] Carrere, Tristan, « Procédés d'implantation ionique et structures innovantes pour les cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium », *Diss. Université Paris-Saclay (ComUE)*, 2016.
- [65] Mahdia, Tansaout, and Khemmar Silia, « *Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab Simulink* », *Diss. Université Mouloud Mammeri*, 2016.
- [66] Mahgoun Mohamed Seddik, « Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne », *Université Ferhat Abbas de Setif 1*, 01 ,2022.
- [67] Rouabhi, Riyadh, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée », *Diss. Université de Batna 2*, 2016.
- [68] Ziane, Khaled, « Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien », *Diss. Univesité d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed*, 2017.
- [69] Wokuri, Pierre, « Participation citoyenne et régimes de politiques publiques: nouvelle donne ou donne inchangéele cas des projets coopératifs d'énergie renouvelable au Danemark et en France », *Lien social et Politiques* 82 : 158-180 ; 2019.
- [70] Belmokhtar, Karim, « Contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène », *Diss. Université du Québec à Trois-Rivières*, 2015.
- [71] <https://www.timetoast.com/timelines/des-procedes-transformant-l-energie-eolienne-en-energie-electrique>.
- [72] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [73] Largey, Thierry, « CDAP (VD) AC. 2016.0243 du 30.9.-Énergie éolienne, Qualité pour agir/Pesée des intérêts/Protection contre le bruit.», 2019.

- [74] Kermagoret, Charlène, Harold Levrel, and Antoine Carlier, « La compensation au service de l'acceptabilité sociale: un état de l'art des apports empiriques et du débat scientifique: réflexions au service du développement de l'énergie éolienne en mer." *VertigO: la revue électronique en sciences de l'environnement* 15.3 , 2015.
- [75] Altmooos, Michael, « L'énergie éolienne en Allemagne du sud-ouest—origines, problèmes et solutions à la transformation des paysages de la transition énergétique », *Revue Géographique de l'Est* 55.1-2 , 2015.
- [76] Huraux, Charles-Adrien, and Markus Herrmann, « L'énergie éolienne et son exploitation au Québec: un aperçu des enjeux socio-économiques ». No. 2015-5. *Create*, 2015.
- [77] Grenier, David, « Modernisation des données de réanalyse pour WEST et impact sur le potentiel éolien analysé: implantation des réanalyses ERA5 », *Diss. École de technologie supérieure*, 2021.
- [78] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-axe-horizontal.html>
- [79] MaxenceFontana, « L'avenir de l'éolien », Arts et métiers - Licence Arts et métiers, mémoire en ligne, 2020.
- [80] Leroy, Vincent, et al. , « Développement d'un couplage hydrodynamique et aérodynamique instationnaire pour l'étude des éoliennes flottantes à axe vertical », *Actes des 15èmes Journées de l'Hydrodynamique*. 2016.
- [81] Patrick, Berthelot, et al. , « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes », *Revue française de géotechnique* nos 138-139 1^{er} et 2^e trimestres 2012.
- [82] Adib, Zahraa, and Ilham Ainana. , « Modélisation simulation analyse d'un projet d'éolienne offshore dans un site maritime favorable en Algérie », *Diss. Directeur: Mme. FARADJI Djamilia Née Kherbouche/Co-directeur: Mr. Hadjidj Mohamed Salim*, 2020.
- [83] El Khchine, Younes. , « Simulation des performances aérodynamiques d'une éolienne à axe horizontal », *CFM 2015-22ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2015.
- [84] https://www.researchgate.net/figure/11-technologie-eolienne-a-axe-horizontale-BEL-07-Les-eoliennes-a-axe-horizontal_fig8_265087995.
- [85] Bourzami Arif, Bouktir Tarek. , « Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue », 10.13140/RG.2.2.16449.92001. 2019.
- [86] Azzouz, Tamaarat. , « *Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA.* », *Diss. Université Mohamed Khider-Biskra*, 2015.
- [87] Lambert, Adrien, and Vincent Kelner. , « Conception d'un banc d'essai pour génératrice d'éolienne de petite puissance », *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels* , 2016.

- [88] Gallas, Hayder, et al. , « Un aérogénérateur de 1, 5 MW connecté au réseau électrique basé sur une machine synchrone à double excitation." *Jeunes Chercheurs en Génie Électrique*, 2019.
- [89] Kerner, Laura. , « Interaction sol-structure sous sollicitations cycliques dynamiques: Application aux éoliennes offshore fondées sur monopieu », *Diss. Paris Est*, 2017.
- [90] Ghalem, A. F. F. A. N. E. , « Contrôle avancé d'un système VSC-HVDC pour améliorer le transport d'énergie électrique: Application à la conversion éolienne », *Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-*, 2020.
- [91] Feddaoui, Omar, Riad Toufouti, and Djamel Labed. , « Modélisation et commande d'un système d'énergie hybride photovoltaïque Éolien Diesel avec batteries de stockages », *Diss. Université de Constantine*, 2021.
- [92] Geremy Brouttier, ,« Modéré par ENDA énergie, Thématique(s) : Energie, Agriculture espace rural, Rubrique : Contributions, <https://www.mediatorre.org/actu,20200429093241,2.html>
- [93] Traoré, Abdoul Karim. , « Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles », *Diss. Université du Québec à Trois-Rivières*, 2016.
- [94] Murphy, Sophia, and Mali Eber Rose. , « La transition vers une agriculture durable », *International*, 2021.
- [95] Madani, Lynda, and Sadia Moumou. , « L'importance des énergies renouvelables dans l'agriculture saharienne en Algérie », *Diss. Université Mouloud Mammeri*, 2020.
- [96] Slimani, Aicha, Salima Azzouzi, and Abdelkader Encadreur Harrouz. , « Application des Energies Renouvelables (solaire) pour renforcer le débit d'eau de foggara dans la région d'Adrar », *Diss. Université Ahmed Draia-Adrar*, 2018.
- [97] Benbatouche, A., B. Kadri, and A. Badraoui., « Conception et Réalisation d'une électrovanne, Application dans les systèmes d'irrigation intelligent. », *International journal of scientific research and engineering technology (IJSET)*.
- [98] Marzougui, Taher. , « Réduction du coût énergétique d'un réseau d'irrigation agricole: optimisation de la facture, diagnostic de fuites et production énergétique locale à base des énergies renouvelables. *Diss. Aix-Marseille*, 2018.
- [99] Louazene, Mohamed Lakhdar. , « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes– Application zone de Ouargla ». *Diss. Université de Batna 2*, 2015.
- [100] Niass, Makhary. , « Etude et modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE: impacts de la température et de la pression », 2022.

- [101] Triki, Yacine. Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables », Diss. Université de Haute Alsace-Mulhouse; Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou, Algérie), 2020.
- [102] A. Lakhdara, T. Bahi, A.K. Moussaoui, « Energy Management and Control of a Photovoltaic System Connected to the Electrical Network », *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, IEEE, 2020*.
- [103] Yu, Yi, Wanwan Zhu, and Yuan Tian. , « Green supply chain management, environmental degradation, and energy: evidence from Asian countries », *Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021*.
- [104] Benabdelkrim B, Benattilah A, Ghaitaoui T. , « Study of Degradation of Amorphous PV Module Performance under Different Climatic Conditions », *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2), 125-135. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.2>*
- [105] Humada, Ali M., et al. "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016): 494-509*.
- [106] Shongwe, Samkeliso, and Moin Hanif. , « Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods », *IEEE Journal of photovoltaics 5.3, 2015*.
- [107] Sahu, Tekeshwar Prasad et DIXIT, T. V. "Modelling and analysis of Perturb & Observe and Incremental Conductance MPPT algorithm for PV array using Ćuk converter », In : *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. IEEE, p. 1-6, 2014*.
- [108] Muamer M. Shebani, Tariq Iqbal, « Dynamic Modeling, Control, and Analysis of a Solar Water Pumping System for Libya », *Hindawi Journal of Renewable Energy,, Article ID 8504283, 13 pages. 2017*.
- [109] Lodhi, Ehtisham, et al. , « Performance Evaluation of Faults in a Photovoltaic Array Based on VI and VP Characteristic Curve. », *2020 12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). IEEE, 2020*.
- [110] D. Jha, T. Amarmath, P. Swetapadma, R.R. Behera, « A Review on Wind Energy Conversion System and Enabling Technology, (CEPES) », *Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India. Dec. 14-16, 2016*.
- [111] I. Mohamed, A. Yousef, K. Hasaneen, M. Nashed, H. GalaL Hamed, « International Standalone Wind Energy Conversion System Control Using New Maximum Power Point Tracking Technique », *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 9, Issue 2, February , 2019*.
- [112] Sefsaf, Amira, and Ilhem Beldjerba, « Modélisation et contrôle d'un aérogénérateur connecté au réseau », Diss. Directeur: Dr. Mama Bouchaour/Co-directeur: Dr. Merad Laaredj, 2020.
- [113] Mehrjerdi, Hasan, and Reza Hemmati, « Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks », *Journal of Cleaner Production 234 (2019): 810-821*.

- [114] Tran, Manh-Kien, et al, « Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA », *Batteries* 7.3 : 51, 2021.
- [115] Padmanabhan, Nitin, Mohamed Ahmed, and Kankar Bhattacharya, « Battery energy storage systems in energy and reserve markets », *IEEE Transactions on Power Systems* 35.1 : 215-226, 2019.
- [116] Dehghani-Sani, A. R., et al, « Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104: 192-208 ; 2019.
- [117] Benzidane, Mohammed Ridha, et al, « Miniaturization and Optimization of a DC–DC Boost Converter for Photovoltaic Application by Designing an Integrated Dual-Layer Inductor Model », *Transactions on Electrical and Electronic Materials*: 1-14, 2021.
- [118] Ngo, Minh Nhut, et al, « Silicon-carbide-based isolated DC/DC converter for medium-voltage photovoltaic power plants », *Energies* 15.3: 1038, 2022.
- [119] Sayed, Khairy, Mohammed G. Gronfula, and Hamdy A. Ziedan, « Novel soft-switching integrated boost DC-DC converter for PV power system », *Energies* 13.3 : 749, 2020.
- [120] Benzidane, Mohammed Ridha, et al. , « Miniaturization and Optimization of a DC–DC Boost Converter for Photovoltaic Application by Designing an Integrated Dual-Layer Inductor Model », *Transactions on Electrical and Electronic Materials* : 1-14, 2021.
- [121] Nayak, P. Srinivasa Rao, et al, « Design and Simulation Of BUCK-BOOST Type Dual Input DC-DC Converter for Battery Charging Application in Electric Vehicle », *2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. IEEE, 2021.
- [122] Li, Linwei, et al, « A three-phase to single-phase AC-DC-AC topology based on multi-converter in AC electric railway application." *IEEE Access* 7 : 111539-111558, 2019.
- [123] Du, Heng, et al, « An adaptive frequency phase-locked loop based on a third order generalized integrator." *Energies* 12.2 : 309, 2019.
- [124] Xu, Jinming, et al, « Overview of SOGI-based single-phase phase-locked loops for grid synchronization under complex grid conditions », *IEEE Access* 9: 39275-39291, 2021.
- [125] Li, Cheng, Prasad Enjeti, and José A. Cobos, « Analysis and Comparison of Indirect Power in DC-AC or AC-DC Topologies by Quasi-static DC-DC Modeling », *2019 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*. IEEE, 2019.
- [126] Idkhajine, Lahoucine, and Eric Monmasson. , « Embedded Fully FPGA-based Real-Time Simulators for Static Power Converters with Power Switch Characteristics Approximated by Identification. », *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69.9 (2021): 9624-9633.

- [127] Li, Linwei, et al, « A three-phase to single-phase AC-DC-AC topology based on multi-converter in AC electric railway application." *IEEE Access* 7 : 111539-111558, 2019.
- [128] Thurlbeck, Alastair P., and Yue Cao, « Analysis and modeling of UAV power system architectures », *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2019.
- [129] Yadav, Apoorva, and Arunima Verma, « Modeling and Analysis of Modified SEPIC Converter Fed by Solar PV System », *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*. IEEE, 2020.
- [130] Broday, Gabriel R., et al, « Modeling and dynamic feedback linearization of a 5-switch tri-state buck-boost bidirectional DC-DC converter », *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Vol. 1. IEEE, 2021.
- [131] Assunção, Gabriel de O., and Ivo Barbi, « Method for Deriving Transformerless Common-Ground Voltage Source Inverter Topologies », *IEEE Transactions on Power Electronics* 37.9 : 10821-10832, 2022.
- [132] Muratori, Francesco, « Étude de faisabilité et préconception d'une expérience de mesure de la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire irradié aux temps très courts sur le réacteur RJH », Diss. Aix-Marseille, 2020.
- [133] Abdel-Salam, Mazen, Mohamed Th El-Mohandes, and Mahmoud El-Ghazaly. "An efficient tracking of MPP in PV systems using a newly-formulated P&O-MPPT method under varying irradiation levels », *Journal of Electrical Engineering & Technology* 15.1: 501-513, 2020.
- [134] Azad, Murari Lal, Pradip Kumar Sadhu, and Soumya Das. "Comparative Study Between P&O and Incremental Conduction MPPT Techniques-A Review." *2020 International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*. IEEE, 2020.
- [135] Kim, Bongsuck, et al, « A study on high-efficiency MPPT algorithm based on P&O method with variable step size », *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics* 24.1: 1-8, 2019.
- [136] Yilmaz, Unal, Omer Turksoy, and Ahmet Teke, « Improved MPPT method to increase accuracy and speed in photovoltaic systems under variable atmospheric conditions », *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 113 : 634-651, 2019.
- [137] Narendra, A., et al, « Modelling and analysis of grid-tied solar PV system." *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*. IEEE, 2019.
- [138] Cui, Yao, et al. "A Rprop-neural-network-based PV maximum power point tracking algorithm with short-circuit current limitation », *2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*., 2019.
- [139] Rafika, E. L., et al. , « Real-Time implementation of a PV system maximum power point tracking based on the ANN-Backstepping sliding mode control », *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 11.4 : 1959-1967, 2021.
- [140] Ahmad, Fahad Faraz, et al. , « Application of sliding mode control for maximum

- power point tracking of solar photovoltaic systems: A comprehensive review », *Annual Reviews in Control* 49 : 173-196, 2020.
- [141] Nasiri, Mojtaba, Saleh Mobayen, and Quan Min Zhu. "Super-twisting sliding mode control for gearless PMSG-based wind turbine », *Complexity* , 2019.
- [142] Armghan, Hammad, et al. , « Double integral action based sliding mode controller design for the back-to-back converters in grid-connected hybrid wind-PV system », *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 127 : 106655, 2021.
- [143] Badoud A. , « MPPT Controller for PV Array under Partially Shaded Condition. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2019, 1(1),99-111. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.10>, 2019.
- [144] Murtaza A, Chiaberge M, Spertino F, Boero D, De Giuseppe M. , « A maximum power point tracking technique based on bypass diode mechanism for PV arrays under partial shading », *Energy Build* 2014;73:13–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.018>, 2014.
- [145] Bouilouta A, Mellit A, Kalogirou SA. , « New MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions », *Energy* 2013;55:1172–85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.038>, 2013.
- [146] Aouchiche. N, « Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque », Université Bourgogne Franche-Comté, Français. NNT : 2020UBFCA001, 2020.
- [147] Amira Lakhdara, Tahar Bahi, and Abdelkrim Moussaoui. , « MPPT techniques of the solar PV under partial shading », *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. IEEE, 2021.
- [148] Arfaoui, Jouda, et al, « Numerical performance evaluation of solar photovoltaic water pumping system under partial shading condition using modern optimization », *Mathematics* 7.11 (2019): 1123.
- [149] Figueiredo, Samuel N., Ranoyca NALS Aquino, and Marcos EPV Zurita. , « Comparison between P&O-based and PSO-based MPPT algorithms for photovoltaic system under partially shaded conditions », *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. IEEE, 2019.
- [150] Hayder, Wafa, et al. , « Improved PSO: a comparative study in MPPT algorithm for PV system control under partial shading conditions », *Energies* 13.8: 2035, 2020.
- [151] Javed, Saba, and Kashif Ishaque. , « A comprehensive analyses with new findings of different PSO variants for MPPT problem under partial shading », *Ain Shams Engineering Journal* 13.5: 101680, 2022.
- [152] Lakhdara A, Bahi T, Moussaoui A. , « PSO Control under Partial Shading Conditions. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2020, 2(2),126-136. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.2.5>
- [153] Mohanty, Satyajit, Bidyadhar Subudhi, and Pravat Kumar Ray. , « A grey wolf-assisted perturb & observe MPPT algorithm for a PV system », *IEEE Transactions*

on Energy Conversion 32.1: 340-347, 2016.

- [154] Mohanty, Satyajit, Bidyadhar Subudhi, and Pravat Kumar Ray. "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions », *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 7.1 : 181-188, 2015.
- [155] Chtita, Smail, et al. , « A novel hybrid GWO–PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems operating under partial shading conditions." *Scientific Reports* 12.1 : 1-15, 2022.
- [156] Nugraha, Dimas Aji, and Kuo-Lung Lian. , « A novel MPPT method based on cuckoo search algorithm and golden section search algorithm for partially shaded PV system. », *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 42.3 : 173-182, 2019.
- [157] Pant, Shraiya, and R. P. Saini. Comparative study of MPPT techniques for solar photovoltaic system », 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). IEEE, 2019.
- [158] Basha, CH Hussaian, and C. Rani. "Different conventional and soft computing MPPT techniques for solar PV systems with high step-up boost converters: A comprehensive analysis." *Energies* 13.2 : 371, 2020.
- [159] Eltamaly, Ali M. , « An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions », *Energies* 14.4 : 953, 2021.
- [160] abed El-Raouf, M. Osama, et al. , « MPPT of pv-wind-fuel cell of off-grid hybrid system for a new community », 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018.
- [161] Amira, Lakhdara, Bahi Tahar, and Moussaoui Abdelkrim. , « Sliding mode control of doubly-fed induction generator in wind energy conversion system », *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*. IEEE, 2020.
- [162] Kelkoul, Bahia, and Abdelmadjid Boumediene. , « Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine », *Energy* 214 (2021): 118871.
- [163] Golnary, Farshad, and Hamed Moradi. , « Dynamic modelling and design of various robust sliding mode controls for the wind turbine with estimation of wind speed », *Applied Mathematical Modelling* 65 (2019): 566-585.
- [164] Slimane, Wissem, et al. , « Second order sliding mode maximum power point tracking of wind turbine systems based on double fed induction generator », *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 11.3 : 716-727, 2020.
- [165] Rai, Rashmi, Saurabh Shukla, and Bhim Singh. , « Sensorless field oriented SMCC based integral sliding mode for solar PV based induction motor drive for water pumping », *IEEE Transactions on Industry Applications* 56.5.:, 2020.

- [166] Mida, Dris. , « *Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien–Photovoltaïque»* », Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [167] Khan, Umar Habib, et al. , « MPPT control paradigms for pmsg-wecs: a synergistic control strategy with gain-scheduled sliding mode observer », *IEEE Access* 9 : 139876-139887, 2021.
- [168] Ardjal, Aghiles, Maamar Bettayeb, and Rachid Mansouri. , « Fractional nonlinear synergetic control of wind turbine for maximum power point tracking », *2019 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*. IEEE, 2019.
- [169] Benbouhenni, Habib, and Nicu Bizon. , « A synergetic sliding mode controller applied to direct field-oriented control of induction generator-based variable speed dual-rotor wind turbines." *Energies* 14.15: 4437, 2021.
- [170] Mayilsamy, Ganesh, et al. , « Fast Terminal Synergetic Control of PMVG-Based Wind Energy Conversion System for Enhancing the Power Extraction Efficiency », *Energies* 15.8: 2774 ; 2022.
- [171] Obaid, Waleed, Abdul-Kadir Hamid, and Chaouki Ghenai. , « Hybrid MPPT Controlled Solar/Wind Power System for Pumping System », *2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*. IEEE, 2019.
- [172] Raveendhra, Dogga, J. Praveen, and Poojitha Rajana. , « Mitigation of Electrical Inertia of PE Converters in Solar Powered HESS system for Remote Area Power System Applications using Synergetic Controller », *2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. IEEE, 2021.
- [173] Ardjal, Aghiles, et al. , « Design and implementation of a fractional nonlinear synergetic controller for generator and grid converters of wind energy conversion syste », *Energy* 186 (2019): 115861.
- [174] Mars, Nadia, et al. , « Effect of synergetic control in hybrid PV-Wind system response." *IET Renewable Power Generation* 15.10 (2021): 2195-2204.
- [175] Ardjal, Aghiles, et al. , « Nonlinear synergetic control approach for dc-link voltage regulator of wind turbine DFIG connected to the grid », *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA)*. IEEE, 2018.
- [176] Mayilsamy, Ganesh, et al. , « Fast Terminal Synergetic Control of PMVG-Based Wind Energy Conversion System for Enhancing the Power Extraction Efficiency », *Energies* 15.8: 2774, 2022.
- [177] Zhang, Yujia, Lei Zhang, and Yongwen Liu. , « Implementation of maximum power point tracking based on variable speed forecasting for wind energy systems », *Processes* 7.3: 158, 2019.

- [178] Benbouhenni, Habib, and Nicu Bizon. , « A synergetic sliding mode controller applied to direct field-oriented control of induction generator-based variable speed dual-rotor wind turbines », *Energies* 14.15: 4437, 2021.
- [179] Basma, Aoukach, and Oukarfi Benyounes. , « A simulation energy management system of a multi-source renewable energy based on multi agent system." *IAES International Journal of Artificial Intelligence* 10.1: 191, 2021.
- [180] Mahjoub, Sameh EL, et al. , « Control of a Dual Input Converter for PV-Wind Hybrid Sources Using a Storage System », *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. IEEE, 2020.

- [181] Merahi, Farid, Abd Essalam Badoud, and Saad Mekhilef. , « A novel power management strategies in PV-wind-based grid connected hybrid renewable energy system using proportional distribution algorithm », *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31.7 (2021): e12931.
- [182] Santhoshi, B. Kavya, K. Mohanasundaram, and L. Ashok Kumar. , « ANN-based dynamic control and energy management of inverter and battery in a grid-tied hybrid renewable power system fed through switched Z-source converter », *Electrical Engineering* 103.5: 2285-2301.2021.
- [183] Molla, Emiyamrew Minaye, and Cheng-Chien Kuo. , « Voltage sag enhancement of grid connected hybrid PV-wind power system using battery and SMES based dynamic voltage restorer », *IEEE Access* 8 : 130003-130013, 2020.
- [184] Lakhdara, A., T. Bahi, and A. Moussaoui. , « Study and Management of an Hybrid System Connected to The Network », *J. Electrical Systems* 18.2: 163-172, 2022.
- [185] Lakhdara, A., T. Bahi, and A. K. Moussaoui. , « Control and Management Solar-Wind-Storage Hybrid System », *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*. Springer, Cham, 2020.