

Mémoire de Master

Pour l'obtention

Du

Diplôme National de Mastère de Recherche

En Automatique, Robotique et Traitement d'Information



Intitulé :

Etude et gestion optimale d'un système hybride multi sources

Présenté par :

Mohamed Bilal JAZIRI

Soutenu le 03/11/2023 à l'ENICarthage devant le jury d'examen composé

de :

M. Khaled Nouri	Président	Professeur à l'ENICarthage
M. Mohamed Fathi KAROUI	Rapporteur	Maître-Assistant à EPT
Mme Lilia EL AMRAOUI	Examineur	Professeur à l'ENICarthage
M. Aymen Lachheb	Invité	Docteur

Laboratoire / Unité de Recherche : Laboratoire de Recherche Electricité Intelligente et TIC,
EI&TIC

Dédicaces

Je dédie avec fierté ce mémoire

A mes très chers parents

En témoignage de ma profonde gratitude pour leurs

Sacrifices, leur dévouement, leurs qualités humaines qui m'ont permis d'arriver là où je suis.

**Que ce travail n'a point la prétention de récompenser
Ma sœur**

Que dieu leur préserve santé, bonheur et longue vie

A toute la famille

Nulle dédicace ne peut exprimer mon immense reconnaissance pour leurs soutiens et encouragements

A mes meilleurs amis

**A tous ceux qui m'aiment ainsi qu'à toute personne qui m'a aidé à la
Réalisation de ce mémoire**

Qu'ils trouvent dans ce modeste travail l'expression de mon immense affection, respect et amitié

Remerciement

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de la préparation d'un Master de recherche spécialité génie électrique. Ce travail a été réalisé à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Carthage au sein du Laboratoire de Recherche Electricité Intelligente & TIC, EITIC, sous la direction de Madame **Lilia El AMRAOUI OUNI**.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à mon encadreur Mme **Lilia El AMRAOUI OUNI**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Carthage, ENICarthage, et Directrice de l'Ecole Polytechnique de Tunisie, EPT. Je lui adresse une mention très spéciale pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'elle n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.

Nous tenons à remercier également mon encadreur Monsieur **Aymen LACHHEB** Docteur pour le temps qu'il a consacré et pour les précieuses informations qu'elle nous a prodiguées avec intérêt et compréhension.

Je voudrais remercier Monsieur **M. Khaled Nouri Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Carthage**, ENICarthage, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le Jury d'examen de ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères **M. Mohamed Fathi KAROUI Maître Assistant à l'Ecole Polytechnique de Tunisie, EPT**, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant d'être rapporteur de ce travail et pour sa participation à mon jury.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer, sans remercier tous les enseignants et le personnel de l'école nationale d'ingénieurs de Carthage, pour leur aide et leurs précieux conseils et pour l'intérêt qu'ils portent à notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.

Nomenclature

γ	Rapport de vitesse périphérique
β	Représente l'angle d'attaque de la pale en degré
η_b	Rendement énergétique de la batterie
λ	Rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent
Ω	La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne [rad/s]
Aut	Le nombre de jour d'autonomie (1 jour)
Cb	Capacité nominale de la batterie (Ah)
CP	Coefficient Couple eolienne
Ceol	Le couple mécanique vu par la machine synchrone
Ctot	Détermination de la taille de batterie
Ce et Cs	Les valeurs des condensateurs de filtrage
DOD	Profondeur de décharge de la batterie (0.8)
D	Rapport cyclique
Ec	Les besoin énergétique journaliers (Wh)
Eref	Eclairement de référence (1000 W/m ²)
FS	La fréquence de commutation
Ib	Courant de batterie (I)
I0	Courant d'échange définissant à vide les échanges électrode – électrolyte
Ip	Courant circulant dans la résistance RP
Ipv	Courant générer par la cellule photovoltaïque
Ib	Le courant de décharge de la batterie
Is	Le courant de sortie hacheur
Ipv	Le courant d'entrée hacheur
<i>Kopt</i>	Rapport la nouvelle consigne de couple
LPV	Inductance de lissage de courant
Peol	Puissance extraite par eolienne
Ppv	Puissance du générateur PV (W)
ρ	La densité du vent en [Kg/m ³]
Q	La charge nominale de la batterie
R	Rayon d'une pale de la turbine [m].
Rs	Résistance sérié de la batterie (Ω).
<i>Rc;Rb;Ra</i>	Les résistances de la machine synchrone
S	La surface balayée par les pales de l'éolienne [m ²]
SOC(t)	Etat de charge de la batterie à l'instant (t).
SOC(0)	Etat de charge à l'état initial
TE	L'expression du couple électromagnétique
Vu	Tension d'utilisation (V)
Va, Vb, Vc	Les tensions de sortie de la machine synchrone
v	Vitesse du vent [m/s]

Nomenclature

Vbat	Tension de la batterie
Vdc	Tension de bus (V)
Vpv	Tension générée par la cellule photovoltaïque
Vs	La tension de sortie hacheur
Vpv	La tension d'entrée hacheur
Wr	L'expression de la pulsation rotorique

Abréviations

Ω_t	La vitesse de la rotation de la turbine
Ω_g	La vitesse de la rotation de générateur
Ω_s	La vitesse du synchronisme du générateur
Ah	Ampère par heurs
B	L'angle de calage de la pale de la turbine
Cp	Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ
CC	Courant Continu.
CA	Courant Alternatif
Cpmax	Coefficient de puissance maximale
DC/DC	Convertisseur Courant continu/ Courant continu
DC/AC	Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif
Ec	L'énergie consommée par la charge
Ed	L'énergie fournie lors de la décharge de la batterie
EAH	Les éoliennes sont divisées en celle à axe horizontal
EAV	Les éoliennes sont divisées en celle à axe vertical
EDC	Etat de Charge des batteries (State Of Charge)
EnR	Énergie renouvelable
FC	Fuel Cell
FS	La fréquence de stator
GPV	Générateur panneau photovoltaïque
GEOL	Générateur éolienne
GPV	Générateur Photovoltaïque
I.Bat	Courant de la batterie en ampères (A)
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée (Insulated-gate bipolar transistor)
INCO	Incrément de conductance (Incremental conductance)
INRE	Résistance instantanée (Instantaneous resistance)
Kopt	La vitesse spécifique optimale
Li-ion	Ions de lithium
Ls	L'inductance statorique
Lr	L'inductance rotorique
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MARS	Turbine Magnes Air Rotor systèmes
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
Nb	Le nombre des batteries nécessaire est donné par l'équation
P&Oeol	Perturbe et observe éolienne
P&O Solaire	Perturbe et observe éolienne
PSO	Optimisation par essaim de particules
PV	Panneau photovoltaïque

Abréviations

PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Piles à membrane échangeuse de protons)
PMSG	Le générateur synchrone à aimant permanent
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
Ppv	La puissance photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
Pbat	La puissance de la batterie
PRIS	La puissance réseau électrique (selon la demande)
PEOL	La puissance éolienne
Pch	La puissance de la charge (20KW)
PPAC	La puissance pile à combustible (100KW)
P&O	Perturbation et Observation
PAC	Pile A Combustible
R	Le rayon de la turbine
Rr	La résistance d'enroulement rotorique
SHSERs	Systèmes hybrides connectés au réseau
SOC	L'état de charge
SOC (0)	L'état de charge initiale
SEH	Système Energie Hybride
Tem	Couple électromagnétique
WECS	Eoliennes à vitesse variable à angle de calage des pales fixe
ZCE	Zone charge espace

Table des Matières

Table des matières	
Introduction Générale.....	16
CHAPITRE 1.....	17
GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES	17
I. Introduction :	18
II. Système hybrides :.....	18
a. Les Avantages :	19
b. Les Inconvénients :.....	19
c. Les Différentes configurations des systèmes de génération hybrides :.....	19
III. Généralités sur les sources électriques hybrides :.....	22
1. Les différents compartiments d'un système hybrides :.....	22
1.1 Piles à combustible :.....	22
1.1.1 Composants d'une pile PEMFC :	22
a. L'électrolyte :.....	22
b. Les électrodes :	22
1.2 Le générateur photovoltaïque (GPV) :.....	24
1.2.1 Principe de fonctionnement :.....	24
1.2.2 Les type des cellules photovoltaïques :	25
1.3 Batterie au lithium :	25
1.3.1 Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion :.....	27
1.3.2 Calcule d'état de charge de la batterie au lithium :	28
1.3.3 Calcule par la méthode d'intégration du courant :	28
1.4 L'énergie éolienne :	29
1.4.2 Principe de conversion :.....	29
1.4.3 Différents types d'éoliennes :.....	29
1.4.3.1 Eoliennes à vitesse fixe :.....	29
1.4.3.2 Eoliennes à vitesse variable :	30
1.4.4 Stratégies de contrôle des turbines :	30
1.4.4.1 Contrôle active par la régulation de l'angle de calage :.....	31
1.4.4.2 Contrôle des éoliennes à vitesses variables :	31
IV. Conclusion :	33
-CHAPITRE 2-	34
MODELISATION D'UN SYSTEME D'HYBRIDE	34

I. Introduction :	35
II. Architecture du système hybride :	35
III. Problématique :	36
IV. Modélisation du système hybride d'étude :	36
1. Modélisation de l'éolienne:	36
1.1 Modélisation des générateurs synchrone a aiment permanant :	41
1.1.1 Mise en équation :	41
1.1.2 La Transformation de Park-Clarke :	42
1.1.3 Caractéristiques de la génératrice à aiment permanent :	44
1.3 Modélisation du Hacheur BOOST :	45
1.2.2 Command de l'éolienne :	49
1.2.2.1 Commande en couple :	49
1.2.2.2 Commande en vitesse :	51
1.2.2.3 Technique de commande MPPT (P & O):	52
2.1 Modélisation de la pile à combustible 100kw :	53
2.1.1 Gestion de l'énergie développée par « PEMFC » (convertisseur DC/DC en MPTT) :	56
2.1 Modélisation de système de panneau photovoltaïque :	58
2.1.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques :	59
3.1.1 Influence de l'éclairement :	60
3.1.2 Influence de la température :	62
3.1.3 Résultat de simulation :	63
4. Modélisation de la Batterie de Stockage :	71
4.1 Caractéristique de la batterie :	71
4.2 Méthode de modélisation de la batterie de stockage :	71
4.3 Caractéristiques de la batterie :	72
V. Conclusion :	74
CHAPITRE 3.....	75
Stratégie de gestion du système hybride	75
I. Introduction :	76
II. Présentation d'algorithmes de gestion énergétique du système hybride :	76
1. Description des algorithmes de gestion :	78
2. Différentes commutations des interrupteurs pour la gestion d'énergie :	82
2.1 Scénario 1 l'énergie solaire alimente la charge (Ppv Pch) :	82
2.2 Scénario 2 l'énergie solaire alimente la charge avec la batterie (Ppv et Pabt Pch) :...	83
2.3 Scénario 3 la batterie alimente la charge (Pbat Pch):	83
2.4 Scénario 4 l'énergie éolienne alimente la charge (PEOL Pch) :	85
2.5 Scénario 5 : l'énergie éolienne alimente la charge avec batterie en simultanée.....	86

2.6 Scénario 6 : réseaux électriques alimente la charge (Pris Pch) :	87
2.7 Scénario 7 : cas urgence pile à combustible aliment la charge (Pac Pch) :	87
III. Interprétation :	88
IV. Conclusion :	89
Conclusion Générale	90
Conclusion générale	91
Références Bibliographiques	93
Annexe 1 - Exemples et caractéristique d'éoliennes de petite puissance :	95
Annexe 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK	96
Annexe 3: Rechargeable 48V 50Ah Lithium Ion Battery 2560Wh 16S1P Power Storage: 103	
Annexe 4: 3000 Times 3.2V 50Ah Prismatic Cells M8 LiFePO4 Lithium Iron Phosphate Battery	104
Annexe 5: Datasheet de la batterie lithium-ion pour système PV-éolien-batterie	105
Annexe 6: implémentation du contrôleur de charge et de la batterie dans Matlab/Simulink.....	106
Annexe 7: implémentation du système hybride dans le scénario PV -batterie-charge continue dans Matlab/Simulink	107

Liste des figures

Figure 1: Classification des systèmes hybrides [3]	20
Figure 2: Configuration d'un système hybride avec un bus CC [3].....	21
Figure 3 : Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride [3].....	21
Figure 4 : diagramme de pile à combustible [5].....	24
Figure 5: Principe photovoltaïque [6].....	24
Figure 6 : Cellule en silicium monocristallin [7].....	25
Figure 7 : Cellule en silicium Poly-cristallin [7]	25
Figure 8: Modèle simple d'un accumulateur [8]	26
Figure 9 : Mécanisme de la décharge [8]	27
Figure 10 : Mécanisme de la décharge [8]	27
Figure 11 : Structure général du fonctionnement à vitesse variable [12].....	31
Figure 12 : Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse [13] ..	32
Figure 13: Le Couple en fonction de λ vitesse souhaitée	32
Figure 14 : Le schéma block de la turbine [13].....	33
Figure 15 : Architecture de système global	35
Figure 16 : symbolique éolienne [15].....	37
Figure 17 : courbe couple éolienne lier à la vitesse de la rotation du turbine [16].....	37
Figure 18 : model dynamique de l'éolienne [16].....	38
Figure 19: Schémas blocs de la commande du système éolien	38
Figure 20 : Schéma synoptique de simulation du sous-système éolien.....	39
Figure 21 : vitesse du vent variable (0, 5, 7, 9, 12,14) M/S.....	40
Figure 22 : vitesse machine par rapport à la variation du vent.....	40
Figure 23 : couple développer par l'éolienne à vitesse du vent 0, 5, 7, 9, 12,14 m/s.....	40
Figure 24 : G.S.A.P aiment monter en surface [17]	41
Figure 25 : Représentation schématique d'un MSAP relativement aux repères triphasés et biphasés [17]	43
Figure 26 : Circuit électrique équivalent du modèle de G.S.A.P [17].....	44
Figure 27 : tension en triphasé MSAP vitesse vent variable	44
Figure 28 : courant développer par le MSAP à la vitesse vent variable.....	45
Figure 29: Schéma électrique d'un hacheur boost [18].....	46
Figure 30 : Structure hacheur boost (DC-DC) éolien-MPTT	47
Figure 31 : tension de la (MSAP) avant l'intervention du hacheur	47
Figure 32 : Courant de la (MSAP) après l'intervention du hacheur	48
Figure 33 : tension de la (MSAP) après l'intervention du hacheur	48
Figure 34 : schéma bloc du régulateur tension	49
Figure 35 : puissance éolienne développé après l'intervention du hacheur réguler en 500 volts	49
Figure 36 : couple de référence en fonction de la vitesse de rotation [18].....	51
Figure 37 : convergence vers le point optimal par (contrôle en couple) [19].....	51
Figure 38 : Convergence vers point max du control vitesse [19].....	52
Figure 39 : organigramme P&O [19].	52
Figure 40 : Clarification d'une pile à combustible	53
Figure 41 : Modèle de simulation d'une pile à combustible 5KW 500V DC "Simulink"	53
Figure 42 : Variation de tension d'une seule cellule à pile à combustible en fonction du temps.....	54
Figure 43 : Variation du courant Istack en fonction du temps	55
Figure 44 : Variation de la tension Vcell de stacks d'une pile à combustible en fonction du.....	55

Liste des figures

Figure 45 : Variation de la puissance d'une pile à combustible en fonction du temps	56
Figure 46 : Structure globale de l'implémentation de la pile PEMFC dans un système.....	56
Figure 47 : Variation de la tension de convertisseur DC /DC (Boost)	57
Figure 48 : Variation du courant de convertisseur (boost).....	57
Figure 49 : Variation de la puissance de la charge 5kw (une seule cellule).....	58
Figure 50 : Architecture du système de production énergie solaire (P.S.O-P.O).....	59
Figure 51 : Système PV connecté au réseau via un convertisseur à trois niveaux	59
Figure 52 : Caractéristique du module solaire aux conditions standards [20].....	60
Figure 53 : Caractéristiques (66 cellules) « I-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250] à 25°C.....	61
Figure 54 : Caractéristiques (66 cellules) « P-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250] à 25°C.....	61
Figure 55 : Caractéristiques (1 cellule) « I-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250 W/m ²] à 25°C	61
Figure 56 : Caractéristiques (1 cellules) « P-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250 W/m ²] à 25°C	62
Figure 57 : caractéristique [I-V] panneau photovoltaïque à 1 KW/M ² C° à température variable [45° 25° 10° 0°].....	63
Figure 58 : caractéristique [P-V] panneau photovoltaïque à 1 KW/M ² C° à température variable [45° 25° 10° 0°].....	63
Figure 59 : Caractéristique de puissance sans la commande (MPPT P&O et P.S.O)	64
Figure 60 : Caractéristique de tension sans la commande (MPPT P&O et P.S.O)	64
Figure 61 : Caractéristique du courant sans la commande (MPPT P&O et P.S.O).....	65
Figure 62 : Bloc régulation tension	65
Figure 63 : Caractéristique du courant avec la commande (P.O et P.S.O).....	66
Figure 64 : Caractéristique de tension avec la commande (P.O et P.S.O).....	66
Figure 65 : Caractéristique de la puissance avec la commande (P.O et P.S.O).....	67
Figure 66 : organigramme d'algorithme de PSO [21].....	68
Figure 67 : algorithme P&O [22]	70
Figure 68 :Caractéristiques de décharge de cellule de la batterie.....	71
Figure 69 : Caractéristiques de décharge de cellule de la batterie (500volts-50Ah)	71
Figure 70 : Evolution de la tension de la batterie en (charge-décharge)	73
Figure 71 : SOC du système de batterie sous variation de la charge en (charge-décharge).....	73
Figure 72 : Evolution du courant de la batterie en (charge-décharge).....	74
Figure 73 : organigramme des commandes de gestion développer.....	77
Figure 74 : Schéma du notre système multi-sources	78
Figure 75 : instruction énergies solaire qui aliment la charge.....	80
Figure 76 : instruction l'énergie éolienne aliment la charge	81
Figure 77 : fonction batterie ou le réseau électrique qui alimente notre charge.....	81
Figure 78 : fonction pile à combustible aliment la charge.....	82
Figure 79 : P.PV en vert aliment la charge (PPV> PEOL>Pch)	83
Figure 80 : panneau photovoltaïque alimente la charge et la batterie	83
Figure 81 : courbes cas batterie alimente la charge.....	84
Figure 82 : caractéristique de la tension (V) de la batterie en état de déchargement	84
Figure 83 : caractéristique de l'intensité (I) de la batterie en état de déchargement	85
Figure 84 : SOC de la batterie en état de déchargement.....	85
Figure 85 : éolienne alimente la charge.....	86
Figure 86 : Caractéristique des puissances dans le cas où alimentent la charge de 20kw et la batterie en état de recharge.....	86
Figure 87 : Caractéristique des puissances dans le cas où réseau électrique alimente la charge.	87

Liste des figures

Figure 88 : Caractéristique des puissances dans le cas où la PAC intervienne pour l'alimentation et charger la batterie	87
Figure 89 : illustration des six fréquents scénarios possibles	88

Liste des Tableaux

Tableau 1 : paramètres du modèle éolienne en Simulink.....	39
Tableau 2 : réglage thyristors commande en tension de seuil de 500 volts.....	49
Tableau 3 : caractéristique de la pile à combustible.....	54
Tableau 4 : caractéristique du module panneau photovoltaïque.....	60
Tableau 5 : Etat des Switches pour les différentes modes	80

Introduction Générale

La transition vers une production d'énergie plus durable et respectueuse de l'environnement est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, les systèmes hybrides de production d'énergie ont suscité un intérêt croissant en offrant une solution prometteuse pour exploiter efficacement les sources d'énergie renouvelable et garantir une alimentation fiable. Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous nous sommes concentrés sur l'étude approfondie d'un système hybride de production d'énergie, composé de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries de stockage, pour alimenter une charge fixe.

L'objectif principal de ce projet a été de développer une approche intégrée pour la gestion énergétique d'un système hybride, en exploitant au mieux les sources d'énergie renouvelable disponibles et en optimisant l'utilisation des ressources. Ce faisant, nous avons cherché à relever les défis liés à l'intermittence et à la variabilité des sources d'énergie renouvelable, ainsi qu'à la nécessité d'une alimentation continue et fiable de la charge fixe.

Dans le cadre de notre étude, nous avons abordé trois grands axes de recherche. Tout d'abord, dans le chapitre 1, nous avons réalisé un état de l'art exhaustif des systèmes hybrides de production d'énergie, en examinant les avancées récentes, les technologies émergentes et les meilleures pratiques dans le domaine. Cette revue de littérature nous a permis de mieux comprendre les fondements théoriques, les différentes configurations de systèmes hybrides et les principaux enjeux associés à leur mise en œuvre.

Ensuite, dans le chapitre 2, nous avons élaboré des modèles analytiques pour les différents éléments du système hybride, tels que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et les batteries de stockage. Ces modèles nous ont permis de prédire les performances énergétiques du système dans des conditions variées, en prenant en compte des paramètres tels que les caractéristiques des sources d'énergie, les pertes énergétiques et les processus de conversion d'énergie. Cette modélisation nous a offert des outils précieux pour évaluer l'impact de différentes configurations et paramètres sur le fonctionnement global du système hybride.

Enfin, dans le chapitre 3, nous avons étudié divers scénarios de gestion énergétique afin de garantir une alimentation continue de la charge fixe. Ces scénarios ont été conçus en accordant une priorité maximale à l'utilisation des sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien. Dans le cas où ces sources renouvelables ne sont pas suffisantes, nous avons évalué la possibilité de recourir au réseau électrique traditionnel en tant que source d'énergie non renouvelable. De plus, en l'absence de toutes les sources précédentes, nous avons envisagé l'utilisation de piles à combustible comme solution de secours.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES

I. Introduction :

Au cours des dernières décennies, les énergies renouvelables ont connu une croissance extraordinaire, faisant valoir leur statut de sources d'énergie inépuisables qui ne produisent pas de gaz à effet de serre. Cependant, malgré ces avantages considérables, leur part dans la production mondiale d'énergie reste négligeable par rapport aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables se répartissent en cinq catégories principales : l'éolien, le solaire, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse, chacune comportant plusieurs technologies spécifiques. Dans le domaine de l'énergie solaire, par exemple, on trouve des panneaux photovoltaïques, des chauffe-eaux solaires et des centrales thermodynamiques. Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages, notamment leur caractère inépuisable, leur faible impact sur l'environnement et leur non-pollution.

L'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit directement la lumière en électricité à l'aide de cellules solaires, représente une alternative intéressante et adaptée aux besoins limités. Cependant, lorsque la demande augmente, un système photovoltaïque perd de sa compétitivité, malgré sa facilité de déploiement, son faible impact environnemental et son entretien limité.

La performance d'un système photovoltaïque dépend largement des conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire et la température. Afin de fournir une alimentation continue tout au long de l'année, un système photovoltaïque doit donc être correctement dimensionné, nécessitant une étude rigoureuse pour choisir la solution la plus performante et la plus rentable [2].

II. Système hybrides :

Un système hybride regroupe plusieurs sources d'énergie, y compris des sources non renouvelables, afin de garantir une production d'énergie continue. Ces sources sont généralement associées à des éléments de stockage qui permettent de stocker l'énergie excédentaire et de la réinjecter ultérieurement en cas de déficit énergétique. Les systèmes hybrides sont souvent utilisés dans des régions isolées qui ne sont pas reliées aux réseaux électriques de distribution, ce qui les rend indépendants de ces réseaux.

Ces systèmes sont dimensionnés selon le besoin énergétique des différentes charges connectées, toute en favorisant l'énergie produite par les sources d'Énergie renouvelable (éolienne, panneau photovoltaïque) au détriment de celle fournie par les sources conventionnelles.

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des Sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

Outre les sources d'énergie, un système hybride peut également inclure, un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées selon différentes architectures. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système.

Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant continu.

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés [3].

a. Les Avantages :

Un avantage clé d'un système hybride est qu'il n'est pas dépendant d'une seule source d'énergie. En intégrant plusieurs sources d'énergie, telles que les énergies renouvelables et les sources conventionnelles, un système hybride offre une plus grande fiabilité et une plus grande résilience en cas de défaillance d'une source spécifique.

Cela permet d'assurer une alimentation continue et stable, même dans des conditions variables ou imprévisibles.

- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

b. Les Inconvénients :

Un inconvénient potentiel d'un système hybride est sa complexité et son coût initial plus élevé par rapport à un système utilisant une seule source d'énergie. La mise en place d'un système hybride nécessite des équipements supplémentaires tels que des convertisseurs, des systèmes de stockage et des dispositifs de gestion, ce qui peut entraîner des coûts plus élevés à l'installation. De plus, la complexité accrue du système peut nécessiter une maintenance et des réparations plus fréquentes, ce qui peut également ajouter des coûts supplémentaires à long terme.

Un autre inconvénient possible est lié à la gestion et à l'optimisation du système hybride. Il peut être plus difficile de coordonner et de contrôler efficacement différentes sources d'énergie, en particulier si elles ont des caractéristiques de fonctionnement différentes. Cela nécessite une planification et une surveillance attentives pour garantir une utilisation efficace de toutes les sources d'énergie et éviter les conflits ou les inefficacités.

Enfin, l'encombrement physique du système hybride peut être un inconvénient, en particulier dans les espaces restreints. La présence de plusieurs composants supplémentaires peut nécessiter plus d'espace pour l'installation, ce qui peut poser des défis dans certaines applications ou configurations spécifiques.

Il est important de noter que ces inconvénients peuvent varier en fonction des spécificités du système hybride et des circonstances particulières de son utilisation.

c. Les Différentes configurations des systèmes de génération hybrides :

Les systèmes hybrides peuvent être configurés de différentes manières en fonction des besoins et des contraintes spécifiques. Voici quelques configurations courantes des systèmes hybrides :

- ✓ Système hybride avec sources d'énergie parallèles : Dans cette configuration, plusieurs sources d'énergie, telles que des panneaux solaires, des éoliennes et des générateurs diesel, fonctionnent simultanément et sont connectées en parallèle pour alimenter un même réseau électrique. Cela permet d'optimiser la production d'énergie en exploitant les avantages de chaque source.
- ✓ Système hybride avec sources d'énergie redondantes : Dans cette configuration, différentes sources d'énergie sont utilisées en tant que sources de secours ou de redondance. Par exemple, un système peut utiliser principalement l'énergie solaire, mais avoir également un générateur diesel en cas de mauvaises conditions météorologiques ou de pénurie d'énergie solaire.

Chapitre1 : Généralités système hybride

- ✓ Système hybride avec stockage d'énergie : Cette configuration intègre des systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries, avec les sources d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie chargent les batteries lorsqu'elles sont disponibles, et les batteries sont ensuite utilisées pour alimenter les charges lorsque les sources d'énergie ne sont pas disponibles ou insuffisantes. Cela permet de lisser la production d'énergie et de fournir une alimentation stable en continu.
- ✓ Système hybride avec gestion intelligente de l'énergie : Cette configuration utilise des algorithmes de gestion intelligente pour optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie en fonction des conditions de demande et de disponibilité. Par exemple, le système peut prioriser l'utilisation de l'énergie solaire lorsque le soleil est fort et basculer vers d'autres sources lorsque la demande est élevée ou lorsque les conditions météorologiques sont défavorables.

Ces configurations ne sont que quelques exemples parmi de nombreuses possibilités. Chaque système hybride est conçu sur mesure en fonction des besoins spécifiques de l'application et des ressources disponibles. Le système hybride incorpore en général, un mariage d'un ensemble de sources, conventionnelles (diesel, réseau), et renouvelables (éoliennes, solaires, biomasse,), permettant d'améliorer l'autonomie du système.

En ajout, le système est doté d'un gestionnaire d'énergie permettant de gérer adéquatement le flux d'énergie.

Dans la majorité des architectures, la collecte des différents flux d'énergie sur le bus continu reste la plus utilisée, vu qu'elle offre une simplicité d'implémentation, et ne nécessite pas un procédé de synchronisation, comme sollicite la technique du bus alternatif [3].

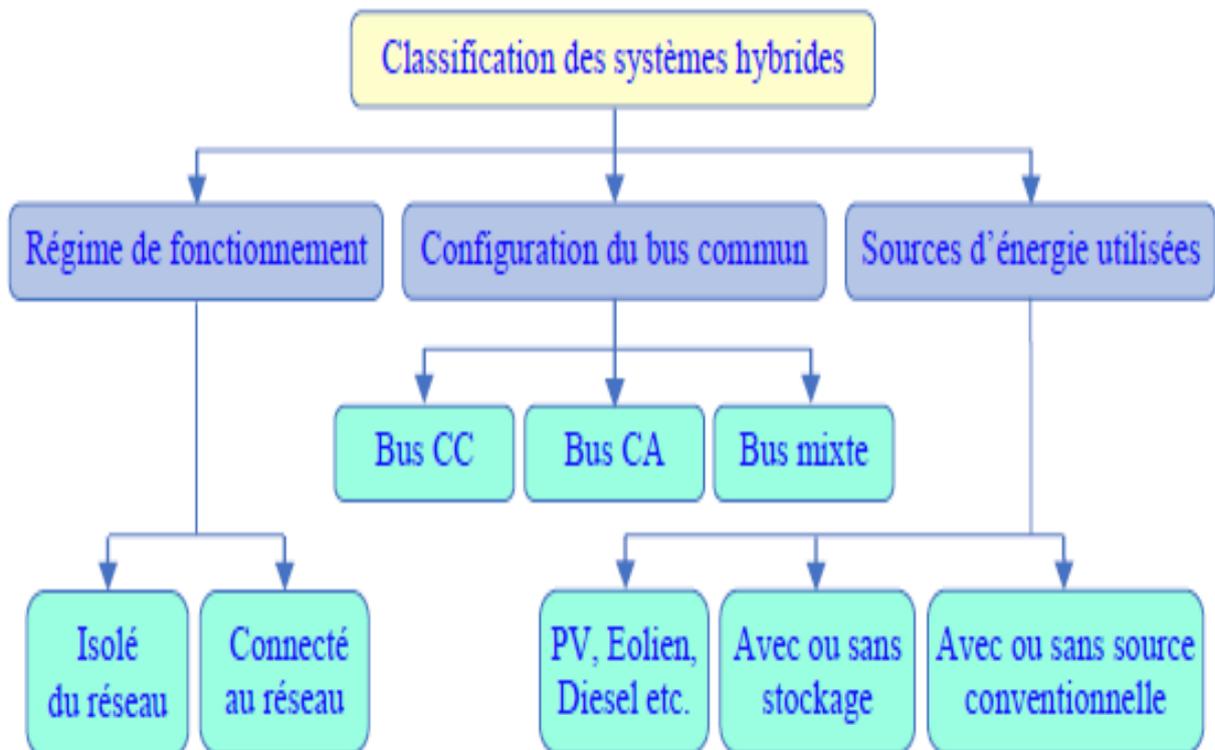


Figure 1: Classification des systèmes hybrides [3]

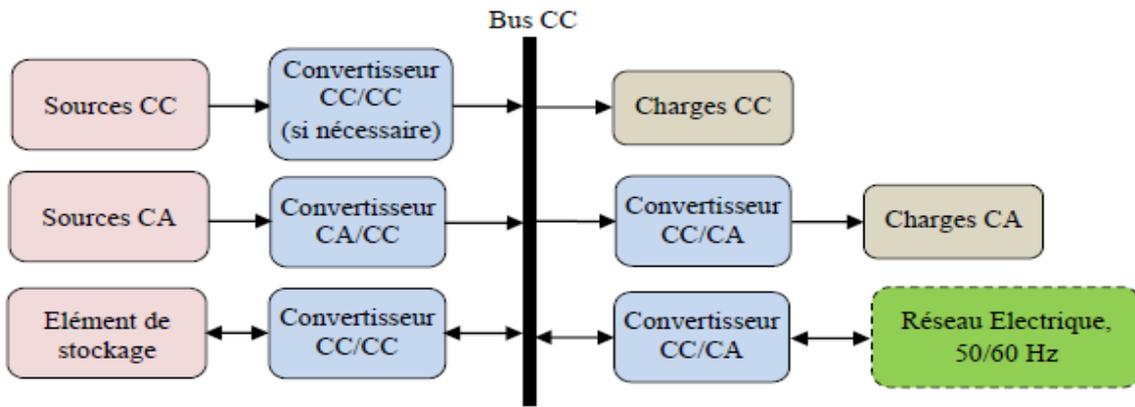


Figure 2: Configuration d'un système hybride avec un bus CC [3]

- Systèmes hybrides connectés au réseau : Il s'agit des SHSERS fonctionnant en interaction avec le réseau électrique.
Ces systèmes sont connectés avec le réseau par des convertisseurs statiques (onduleurs et/ou redresseurs) [3].
La connexion au réseau permet une injection directe du surplus de l'énergie produite par le SHSER.
Cependant, dans le cas de l'incapacité de ce dernier à répondre aux besoins énergétiques, le réseau électrique fournit de l'énergie aux différentes charges connectées [3].
- Systèmes hybrides isolés du réseau (autonomes) : Il s'agit des SHSERS fonctionnant sans interaction avec le réseau électrique de distribution.
Ils sont considérés autonomes du fait qu'ils génèrent de l'énergie sans avoir besoin de l'assistance du réseau électrique.
Les SHSERS doivent souvent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des endroits qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique tels que les villages isolés, les refuges de montagne, les îles, etc.

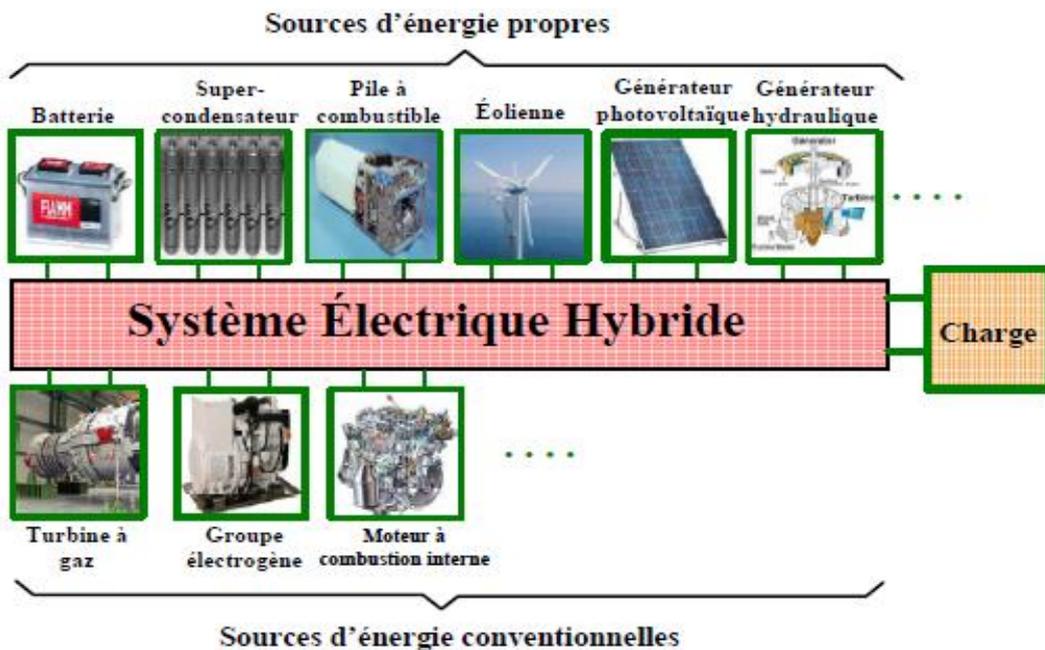


Figure 3 : Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride [3].

III. Généralités sur les sources électriques hybrides :

1. Les différents compartiments d'un système hybrides :

1.1 Piles à combustible :

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique.

Cette réaction d'oxydoréduction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [3].

1.1.1 Composants d'une pile PEMFC :

Chaque type de pile à sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes :

a. L'électrolyte :

C'est l'élément principal de la pile à combustible. Il permet aux espèces ioniques (et pas les électrons) de transiter de l'anode vers la cathode.

Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile.

Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques et leurs propriétés mécaniques.

A cela s'ajoutent d'autres contraintes selon le type de pile; le niveau de la température, les composants des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression.

Pour la PEMFC l'électrolyte se présente sous la forme solide d'une membrane ayant une épaisseur typique d'une centaine de micromètres (100µm).

Cette membrane doit posséder les propriétés suivantes :

- Une bonne conductrice ionique, plus précisément protonique (H⁺) pour une PEM.
- Un bon isolant électronique.
- Imperméable pour l'hydrogène et l'oxygène.
- Une bonne tenue mécanique face aux contraintes thermiques, de pression et d'hydratation.

Elles possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison SO₃H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode [4].

b. Les électrodes :

Les électrodes sont généralement composées de deux couches : une couche catalytique siège des réactions d'oxydoréduction et une couche de diffusion des gaz.

La couche catalytique est composée de nanoparticules de platine dispersées sur du charbon actif, dont la face en contact avec l'électrolyte polymère conducteur de protons est enduite du polymère hydrophobe polytétrafluoroéthylène (PTFE) ce qui permet d'éliminer l'eau du catalyseur.

La couche de diffusion est constituée de feutre de carbone ce qui autorise de véhiculer les gaz vers le catalyseur et d'évacuer l'eau produite ainsi que de libérer les gaz en excès vers la plaque bipolaire.

Chapitre1 : Généralités système hybride

C'est un bon conducteur électrique qui doit aussi assurer le transfert des électrons vers la plaque bipolaire et donc vers le circuit électrique externe.

Les électrodes ont une triple fonction : Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz. Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique. Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques [4].

c. Les catalyseurs :

Le catalyseur est un métal utilisé pour catalyser (accélérer) la réaction électrochimique au niveau des électrodes en résistant durablement à la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. Pour cela, le métal le plus utilisé est du platine (métal-noble) pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe).

Les catalyseurs du côté anode : Pour les piles de basse et de moyenne température, on utilise des métaux précieux : platine PT, rhodium RH, ruthénium RU ou palladium PD; ou du Nickel de Raney [4].

Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène).

Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme de particules de faible taille (2 nm).

La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe.

De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher (80F/g) ou la diminution de la quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO.

Les catalyseurs du côté cathode : Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes.

La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud.

L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre.

Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires [4].

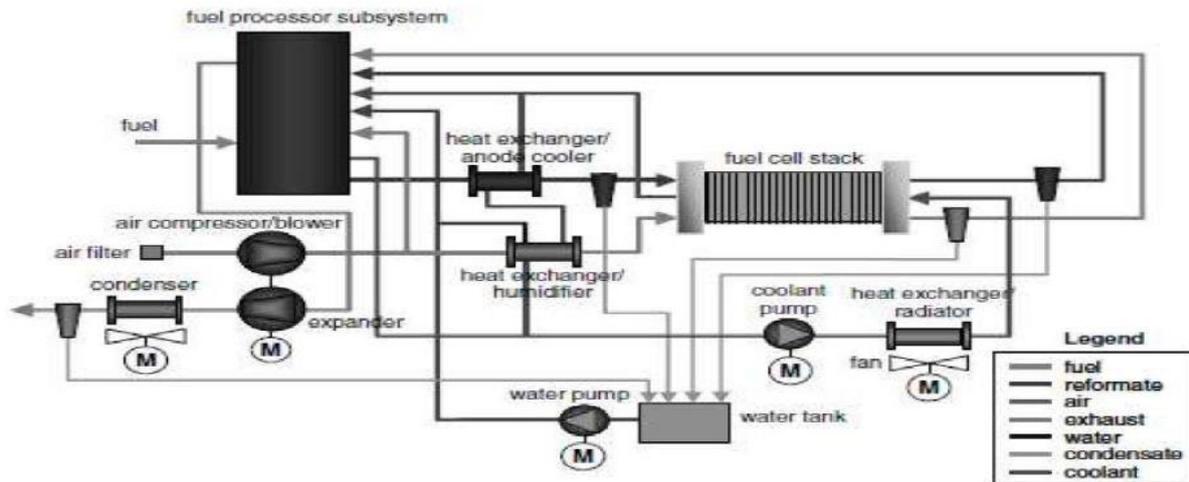


Figure 4 : diagramme de pile à combustible [5]

1.2 Le générateur photovoltaïque (GPV) :

1.2.1 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques se base évidemment sur l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque survient au niveau des cellules solaires qui sont composées de matériaux semi-conducteurs.

La jonction des cellules solaires entre elles pour donner un module photovoltaïque permet la production d'un « photo-courant » d'une puissance apte à alimenter des appareils électriques. L'effet photovoltaïque fait partie des phénomènes photoélectriques.

Un phénomène photoélectrique consiste en un déplacement d'électrons dans un matériau semi-conducteur, dû à l'action des particules lumineuses : les photons.

L'incidence de la lumière sur le semi-conducteur entraîne soit une éjection d'électrons, soit un mouvement d'électrons modifiant la conductivité du matériau (effet photovoltaïque).

Le mouvement d'électrons sera exploité à travers la superposition de 2 couches de semi-conducteurs aux propriétés électriques différentes (positive « p » et négative « n »).

La couche « n » contient donc une surcharge d'électrons.

A la jonction des 2 couches (jonction p-n) apparaît un champ électrique (Zone de Charge d'espace ou ZCE).

Bombardée de photons, les charges de la ZCE se séparent, faisant apparaître une tension électrique.

De façon imagée, si on relie les deux couches par un petit fil, les électrons emprunteront alors ce fil pour aller rejoindre les charges positives qui les attend dans la zone « p ».

Un circuit fermé de courant continu est alors formé (figure 5) [6]:

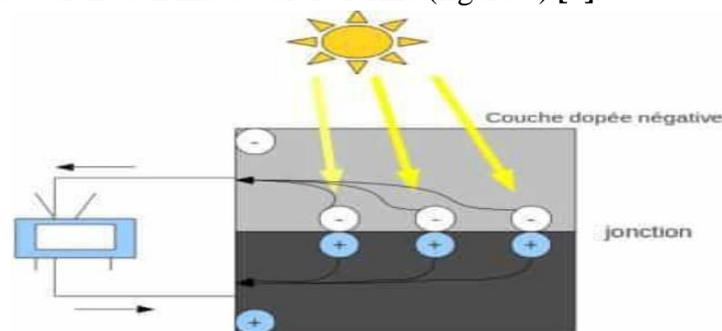


Figure 5: Principe photovoltaïque [6]

1.2.2 Les type des cellules photovoltaïques :

- **Silicium monocristallin**

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques et leur durée de vie est de 20 à 30 ans. Cette cellule photovoltaïque ayant le meilleur rendement de 12% à 18% mais aussi cette cellule qui a le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée et un rendement faible sous un faible éclairement.

Le schéma d'une celle en silicium monocristallin est présenté par la figure suivante

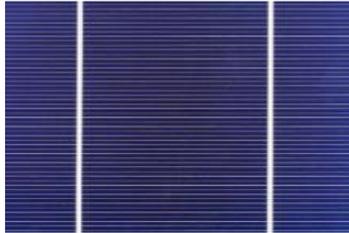


Figure 6 : Cellule en silicium monocristallin [7]

- **Silicium poly cristallin (multi cristallin)**

Les cellules silicium poly cristallin sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix), leur durée de vie de **20** à **30** ans, possède un rendement qu'une cellule monocristalline de **11%** à **15%**.

Le schéma d'une celle en silicium poly cristallin est présenté par la figure 7 :



Figure 7 : Cellule en silicium Poly-cristallin [7]

1.3 Batterie au lithium :

Une batterie lithium est composée de plusieurs cellules connectées en série et en parallèle en fonction de la tension et des exigences de l'appareil.

Trois types différents de cellules de batterie lithium sont couramment utilisés : cylindrique, prismatique et polymère ; utilisés dans les ordinateurs portables, les tablettes et téléphones.

En plus, le lithium est le plus léger des métaux.

Les accumulateurs aux ions de lithium sont largement utilisés dans l'industrie des ordinateurs portables, les téléphones cellulaires ainsi que dans les systèmes embarqués à cause de leur haute densité d'énergie.

D'ailleurs, ce type de batterie d'accumulateurs à une bonne performance à température élevée et une faible auto décharge d'autant plus qu'ils ne présentent aucun effet mémoire.

Les premières batteries d'accumulateurs de ce genre avaient des durées de vie assez faibles.

Chapitre1 : Généralités système hybride

Pour pallier les problèmes rencontrés dans les accumulateurs lithium métal, la solution radicale d'abandonner le lithium sous forme métallique au niveau de l'anode a été adoptée au profit d'un composé d'insertion.

Le graphite apparaît comme le meilleur candidat pour ce rôle. En effet, les propriétés d'insertion du carbone ont été démontrées, jusqu'à un ion lithium pour six atomes de carbone.

Au cours de la première insertion de lithium dans le graphite, une partie est totalement consommée de façon irréversible.

Ce phénomène est dû à la décomposition de l'électrolyte et à la formation d'un film passivant à la surface de l'électrode.

Contrairement à l'anode de lithium métallique, ce phénomène est indispensable pour le bon fonctionnement de la cellule.

La SEI permet d'éviter la réduction de l'électrolyte en retenant les ions Li^+ dans le carbone.

Il faut cependant que cette couche soit suffisamment poreuse pour laisser passer les ions Li^+ lors des cycles de charge/décharge cette couche de passivation peut avoir des inconvénients car elle augmente la résistance interne de l'élément ce qui provoque une chute de tension lors de l'utilisation.

La SEI ne représente pas un problème majeur, mais elle le deviendra enfin de vie des cellules, diminuant sa capacité à restituer ou accepter les ions.

Le modèle le plus simple et le plus commun, consiste en une source de tension idéale V_0 (tension à vide) en série avec une résistance interne. V_1 est la tension terminale aux bornes de l'accumulateur.

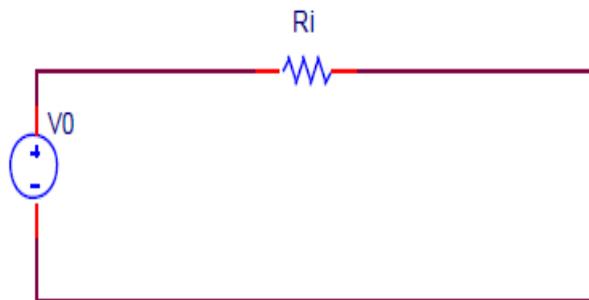


Figure 8: Modèle simple d'un accumulateur [8]

$$V(t) = V_0 - RI \times IB(t) \quad (1.1)$$

Dans ce modèle simplifié, les valeurs de R_i et V_0 sont considérées constantes. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte la variation de la résistance interne de l'accumulateur en fonction de l'état de charge et de la température. Il convient d'utiliser ce modèle lorsque les variations des paramètres liés à l'état de charge et à la température peuvent être négligées.

Veuillez noter que dans des conditions réelles, la résistance interne de l'accumulateur peut varier en fonction de l'état de charge, ce qui peut affecter les performances et la tension de l'accumulateur. De plus, la température peut également avoir une influence sur les caractéristiques de l'accumulateur. Pour une modélisation plus précise, il est recommandé d'inclure ces variations dans les calculs et les analyses, en tenant compte des conditions spécifiques d'utilisation [8].

1.3.1 Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion :

De manière générale, le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons.

Ces derniers se déplacent de la cathode (l'électrode positive) à l'anode (électrode négative) en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter ensuite un moteur, ou une lampe par exemple.

Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte, en partant de la cathode pour rejoindre l'anode, comme les électrons. Ceci a donc lieu lorsque la batterie se décharge. Lorsque l'on recharge la batterie, les électrons sont renvoyés de la cathode vers l'anode, ainsi que les ions lithium [8].

Mecanisme de la decharge d'une batterie Lithium-ion

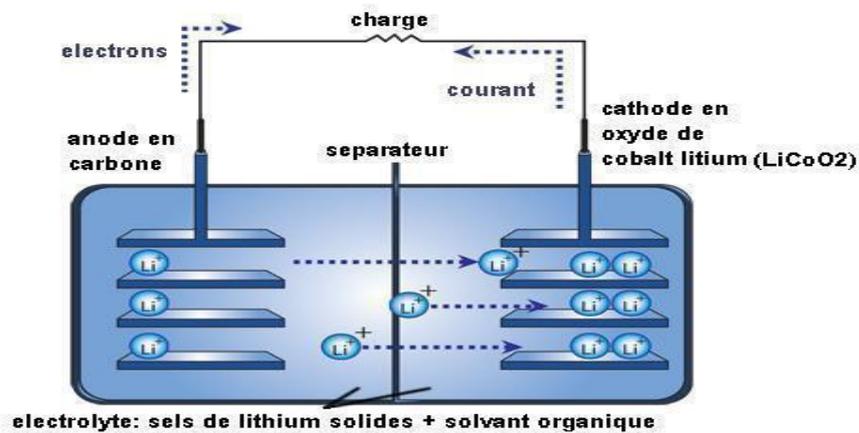


Figure 9 : Mécanisme de la décharge [8]

Mecanisme de la recharge d'une batterie Lithium-ion

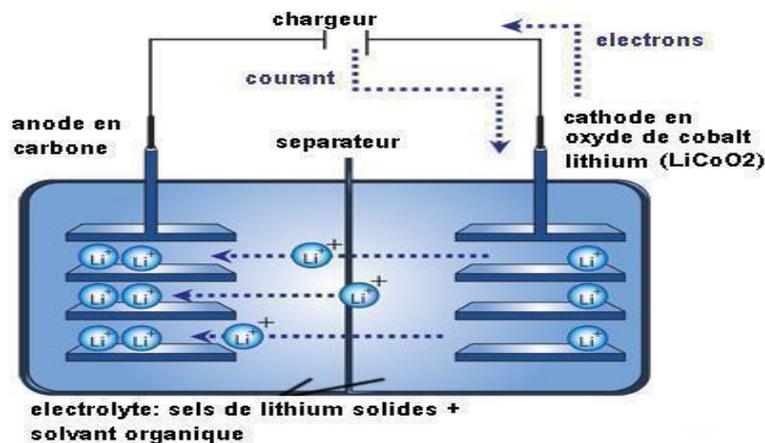


Figure 10 : Mécanisme de la recharge [8]

- Capacité : La capacité est une quantité d'électricité, exprimée en Ah, pour un régime donné.
- Résistance interne : La résistance interne de la batterie est liée aux matériaux constituant la batterie et aux réactions au sein de celle-ci. Elle dépend du régime de charge/décharge, de la température, de l'état de santé et de l'état de charge.
- Tension en circuit ouvert : La tension à vide ou en circuit ouvert OCV (Open Circuit Voltage) d'une batterie correspond à son potentiel d'équilibre i.e. la différence de potentiel entre les deux électrodes quand la batterie est au repos.

- Etat de charge : L'état de charge SOC (State Of Charge) est une expression de la capacité disponible de la batterie à un instant donné exprimée en un pourcentage de sa capacité maximale. Cette quantité est généralement calculée en intégrant le courant et ainsi en suivant l'évolution de la quantité de charge tout au long de la sollicitation électrique de la batterie [9].

1.3.2 Calcule d'état de charge de la batterie au lithium :

L'état de charge est la quantité de charge disponible dans la batterie à un instant donné en fonction de sa capacité maximale.

Dans la plupart des applications utilisant un système de stockage d'énergie, la connaissance de l'état de charge de la batterie est essentielle. C'est comparable à la jauge d'essence d'une voiture classique. Dans le cas d'un véhicule électrique, cette information est cruciale pour aider le conducteur à estimer la distance restante avant que la batterie ne se décharge.

La mesure de l'état de charge de la batterie fournit une indication précise de la quantité d'énergie stockée et disponible dans la batterie à un moment donné. Cela permet aux utilisateurs de planifier leurs activités en fonction de l'autonomie restante.

La surveillance de l'état de charge de la batterie est également importante pour prolonger la durée de vie de la batterie. Une utilisation excessive ou une décharge profonde de la batterie peut entraîner une détérioration prématurée de ses performances et de sa capacité. En surveillant régulièrement l'état de charge, les utilisateurs peuvent prendre des mesures appropriées pour préserver la batterie, comme la recharge régulière ou la limitation de la décharge excessive.

Le problème qui est souvent rapporté dans la littérature, c'est que l'état de charge ne peut pas être mesuré directement à l'aide de capteurs comme le cas d'une voiture ordinaire ou on peut mesurer le niveau d'essence dans le réservoir à l'aide d'une jauge d'essence.

Donc, pour palier à ce problème quelques méthodes ont été développées pour estimer l'état de charge.

Ces méthodes sont applicables pour la majorité des batteries.

Elles sont basées sur la mesure des paramètres électriques comme la tension, le courant et la résistance interne.

Parmi ces méthodes on va citer deux qui seront utilisées dans les deux modèles étudiés de la batterie [10].

1.3.3 Calcule par la méthode d'intégration du courant :

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie.

Si l'état de charge initiale SOC (0) est connu, la valeur de l'intégrale du courant est un indicateur de l'état de charge SOC.

L'état de charge peut être défini par l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC(0) - \left(\frac{\int_{t_0}^t I_b \times dt}{Q} \right) \quad (1.2)$$

Avec :

- SOC(t) : état de charge de la batterie à l'instant (t).
- SOC(0) : état de charge à l'état initial.
- I_b : Le courant de décharge de la batterie.

- Q : est la charge nominale de la batterie.
- $\frac{(\int_{t_0}^{t_1} I_b \cdot dt)}{Q}$: représente la charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).

1.4 L'énergie éolienne :

1.4.2 Principe de conversion :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif de conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent mécanique disponible sur un arbre qui entrainera par la suite la génératrice et celle s'occupe à la fin de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

1.4.3 Différents types d'éoliennes :

Les éoliennes sont divisées en celle à axe horizontal EAH et en celle à axe vertical EAV dans la vue en perspective de leur orientation d'axe. En outre, les nouvelles turbines éoliennes telles que les turbines de génération Kite et la turbine Magnes Air Rotor systèmes (MARS) fonctionnaient à des altitudes comprises entre 800-1000m et 183-305m.

Des développements importants ont eu lieu au cours des dernières décennies sur le front de la technologie, comme l'augmentation de la taille du rotor de la turbine, la hauteur de la tour, la fiabilité et l'efficacité des éoliennes, l'emplacement des éoliennes avec un coût efficace [10].

Les EAH typiques sont couramment utilisés dans la production d'électricité à grande échelle commerciale et à petite échelle.

Sur la base de leur diamètre de rotor ; ces éoliennes sont encore classées dans des éoliennes à grande, moyenne, domestique, mini et micro-échelle ; Les EAV est considéré principalement pour la production d'électricité à petite échelle, c'est-à-dire moins de **100 kW**.

La commission électrotechnique internationale (CEI) Std.

61400-2 définit la norme technique pour les petites éoliennes et, selon cette norme, ces turbines avec une zone de balayage de rotor de moins de **200m²** ont une puissance d'environ **50kW** avec un niveau de tension de génération inférieur à **1000VAC** ou **1,500 VDC**.

En plus de ces normes, de nombreux pays ont défini leurs propres normes nationales pour ces turbines dans la gamme de puissance de **10 à 100 kW**.

La technologie de l'énergie éolienne a connu un développement phénoménal notamment au cours des dernières décennies.

La grande variété de ces technologies a été conçue par différents fabricants connus sous le nom de groupe Vesta, Siemens, Goldwind, General Electric, Enercon et Suzon [10].

1.4.3.1 Eoliennes à vitesse fixe :

Dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe, des générateurs synchrones ou asynchrones à cage d'écureuil sont employés qui sont gérés par la dynamique de l'arbre rigide de transmission de puissance.

La vitesse de rotation du générateur éolienne dans ce cas est fixée par la fréquence de la grille. Le générateur est directement verrouillé sur la grille, à l'exception de la présence d'un démarreur doux dans le cas d'un générateur à cage d'écureuil, ce verrouillage ne permet que des faibles fluctuations dans la vitesse de l'arbre du rotor par rapport à sa valeur nominale.

La vitesse est très sensible aux fluctuations de la vitesse du vent.

Chapitre1 : Généralités système hybride

La méthode normale pour lisser les survitesses causées par le vent est de changer les caractéristiques aérodynamiques de la turbine, soit passivement par le décrochage aérodynamique ou activement par la régulation de l'angle de calage de pales.

Dans ce système, le générateur synchrone à aimant permanent (**PMSG**) a été utilisé sans aucune boîte de vitesses.

La connexion directe du générateur à l'éolienne exige que le générateur possède un grand nombre de pôles.

Les générateurs à induction et les générateurs synchrones enroulés en fil de haute puissance nécessitent un grand diamètre pour un fonctionnement efficace.

Les générateurs synchrones à aimants permanents permettent d'utiliser un petit poteau [11].

1.4.3.2 Eoliennes à vitesse variable :

Les turbines à vitesse variable qui seront intégrées à des réseaux à fréquence constante ne sont pas directement couplées à la grille.

Le dispositif de conditionnement de puissance est utilisé pour interfacer le générateur de vent à la grille.

La sortie du générateur éolien peut être une tension variable et une fréquence variable, ce qui ne convient pas à l'intégration et un interfaçage approprié est nécessaire.

Le rotor de l'éolienne dans ce cas est autorisé à tourner à toute vitesse du vent.

Un certain nombre de projets ont été proposés dans le passé pour permettre aux éoliennes de fonctionner avec une vitesse de rotor variable tout en alimentant la puissance à une grille de fréquence constante.

Certains des avantages revendiqués pour la configuration à turbine éolienne à fréquence constante à vitesse variable sont les suivants :

- ✓ Le fonctionnement à vitesse variable entraîne une augmentation de la capture d'énergie en maintenant la vitesse spécifique de la turbine dans sa valeur optimale.
- ✓ Une turbine à vitesse variable est capable d'absorber l'énergie dans les rafales de vent car elle accélère et renvoie cette énergie au système.
Cela réduit les contraintes induites par la turbulence et permet de capturer un grand pourcentage de l'énergie turbulente dans le vent.
- ✓ Un fonctionnement plus efficace sur la plus grande partie de la plage de fonctionnement, qui peut être réalisé en évitant le décrochage aérodynamique, dans les cas des hautes vitesses du vent. Alors une minimisation des stress mécanique du système.

Une meilleure qualité de la grille grâce au support de la tension du réseau [12].

1.4.4 Stratégies de contrôle des turbines :

Théorème de Betz :

Ce passage introduit les concepts de base et les relations entre la vitesse du vent et la puissance captée par les pales.

Ceci fournit la perspicacité nécessaire d'expliquer comment la puissance de sortie d'une éolienne peut être réglée en ajustant l'angle d'inclinaison de la lame ou en contrôlant le couple ou la vitesse de la génératrice.

Ces procédés de commande de puissance sont essentiels pour assurer une puissance de sortie maximale sur une large gamme de vitesses de vent.

Ils permettent également un fonctionnement fiable et en toute sécurité, la protection des pièces mécaniques La variabilité du vent à échelle de temps moyen, est appelé variation mensuelle, est généralement caractérisée en termes de distribution de probabilité sur une année [12].

1.4.4.1 Contrôle active par la régulation de l'angle de calage :

Les éoliennes sont souvent soumises à des vitesses très faibles ou à une vitesse élevée du vent (supérieure à la vitesse nominale).

La régulation de l'angle de calage ne s'applique plus dans les vitesses au-dessous de la vitesse nominale, cependant au-dessus de la vitesse nominale du vent elle est recommandée pour minimiser le stress mécanique.

Le contrôle l'angle de calage est un moyen très efficace de contrôler la vitesse de l'éolienne à des vitesses de vent élevées, limitant ainsi la puissance et la sortie de couple de la génératrice.

1.4.4.2 Contrôle des éoliennes à vitesses variables :

La (figure 11) illustre la structure générale d'un modèle d'une éolienne à vitesse variable avec les générateurs asynchrones à double alimentation.

Il montre qu'une éolienne avec un générateur asynchrone à double alimentation est beaucoup plus complexe.

Par rapport à une éolienne à vitesse constante, une éolienne à vitesse variable possède des contrôleurs supplémentaires, tels que le régulateur de vitesse du rotor et le dispositif de commande d'angle de calage des pales, comme elle dispose d'un régulateur de tension.

La vitesse de référence issu du bloc optimisation doit répondre à deux problématiques : la maximisation de la puissance et la gestion des zones de fonctionnement de l'éolienne [4, 8, 10].

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible présente un maximum défini par la limite de **Betz**.

Cette limite n'est jamais atteinte en réalité et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

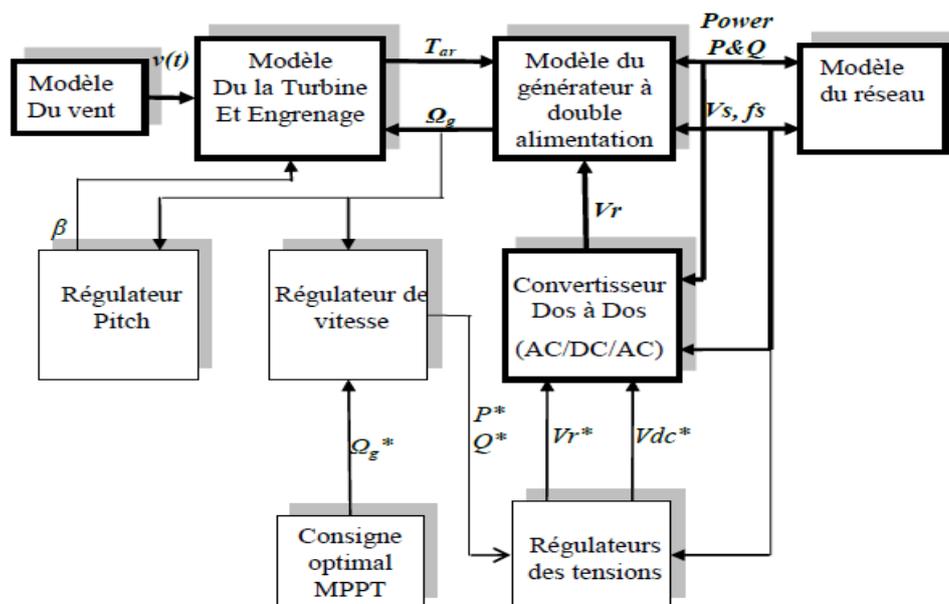


Figure 11 : Structure général du fonctionnement à vitesse variable [12].

Le contrôle optimal pour les éoliennes à vitesse variable WECS à angle de calage des pales fixe, dans le régime de charge partielle vise généralement à réguler la puissance extraite du vent par l'ajustement de la vitesse du générateur électrique.

Pour chaque vitesse du vent, il y a une certaine vitesse de rotation pour laquelle la courbe de puissance d'une éolienne donnée atteint son maximum (**Cp atteint sa valeur maximale**).

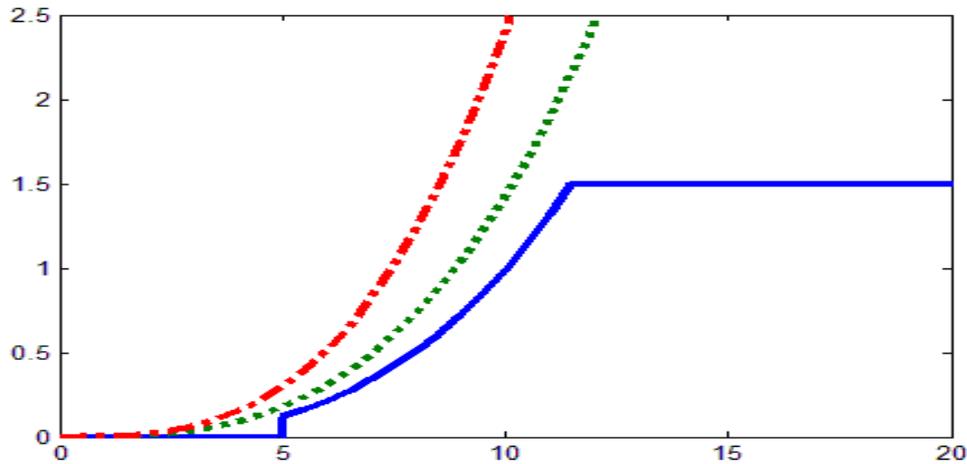


Figure 12 : Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse [13]

Pour assurer un régime optimal, il faut manipuler le coefficient d'efficacité aérodynamique en régulant la vitesse du générateur afin de maintenir $C_p(Y, B) = C_{p, Max} = C_p(Y, opt)$, et c'est effectuée par l'injection d'un consigne de vitesse dans un régulateur qui assure une vitesse spécifique optimal λ_{opt} , puis un point de consigne de couple est généré par le régulateur de vitesse.

Le couple est l'image de la puissance active, une consigne de la puissance active est dérivée à partir de la consigne du couple [13].

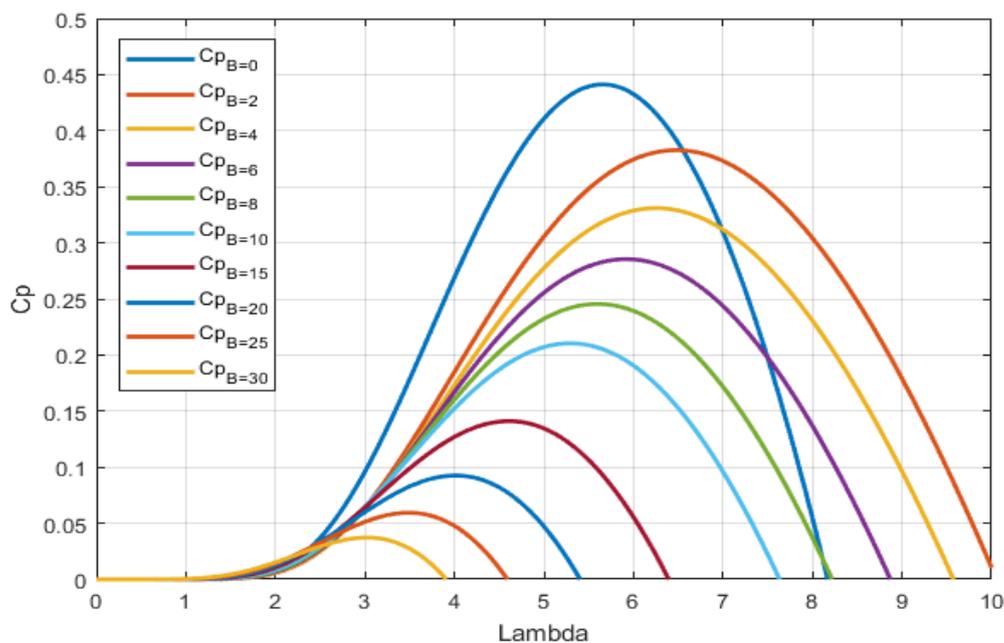


Figure 13: Le Couple en fonction de λ vitesse souhaitée

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle β de calage sont illustrées sur la figure (13).

La valeur maximale de C_p ($C_{p \max}=0.44$) est atteinte pour $\beta=0$ et $\lambda_{opt}=5.67$.

Partant de la caractéristique de la puissance il est clair que pour chaque vitesse du vent elle existe une vitesse de rotation optimale qui performe une puissance maximale, la poursuite de ces valeurs optimales de vitesse dite MPPT (Maximum Power Point Tracking).

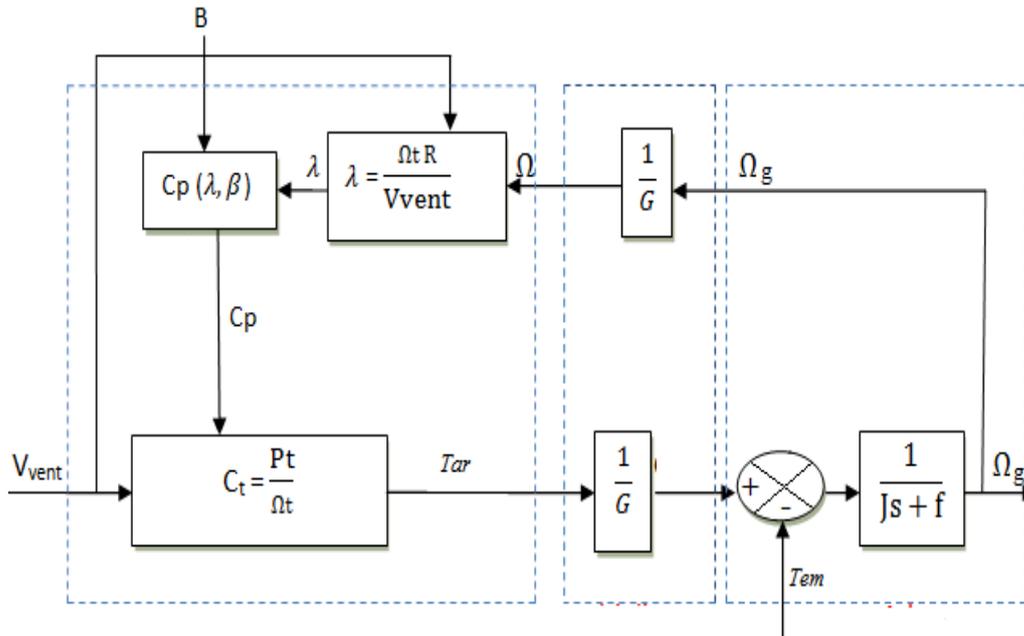


Figure 14 : Le schéma block de la turbine [13]

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude bibliographique a été effectuée pour examiner les diverses sources d'énergie renouvelable disponibles pour la production d'électricité, ainsi que les différentes topologies des installations photovoltaïques, des systèmes de stockage, des éoliennes, des piles à combustible (PEMFC) et des convertisseurs élévateurs (survolteurs).

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation de notre système hybride, composé d'une éolienne, d'une pile à combustible et d'un stockage assuré par des batteries au lithium. Dans cette perspective, nous procéderons d'abord à l'identification des différents composants d'un système photovoltaïque, d'une éolienne et d'une pile à combustible, puis à leur dimensionnement en respectant les spécifications du cahier des charges.

-CHAPITRE 2-

MODELISATION D'UN SYSTEME
D'HYBRIDE

I. Introduction :

Ce deuxième chapitre vise à présenter un modèle analytique du système hybride composé d'un panneau solaire, d'une pile à combustible, d'une batterie et d'une éolienne.

Le modèle analytique sera développé pour représenter le fonctionnement et les interactions de ces différentes composantes du système hybride. Il permettra de décrire mathématiquement les performances et les caractéristiques de chaque élément, ainsi que les flux d'énergie entre eux. L'objectif de ce modèle analytique est de fournir une représentation mathématique précise et détaillée du fonctionnement du système hybride, ce qui permettra de prédire les performances, d'optimiser les configurations et les stratégies de contrôle, ainsi que de réaliser des simulations et des analyses approfondies.

II. Architecture du système hybride :

L'architecture du système d'étude est montrée sur la Figure 15

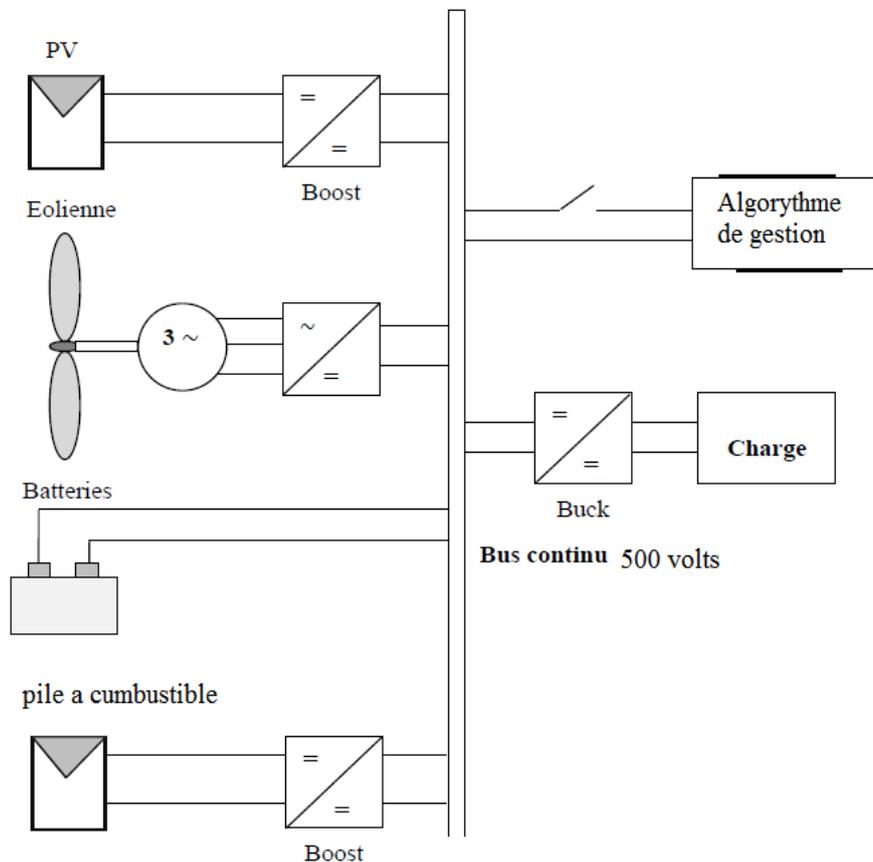


Figure 15 : Architecture de système global

- ✓ système de panneau photovoltaïque (50kwh).
- ✓ pile à combustible (100kwh).
- ✓ éolienne (40kwh).
- ✓ batterie de stockage (500volt-50ah).
- ✓ Réseau de distribution électrique (200kwh).
- ✓ Des switchers de commandes concernant les algorithmes de gestion entre ces sources d'énergies qui en distribution vers la charge (bus contenus de 500 volts).

III. Problématique :

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, et l'océan.

Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles.

Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année.

La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables.

L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

La combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie.

Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie. Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle.

Alors, un modèle de gestion pour tous ces source énergétique et bien implantée pour faire manipuler tous les scénarios possibles qui peuvent être attaquée à notre système de (cas manque éclaircissement solier ou manque de vent ou absences totale des énergies).

IV. Modélisation du système hybride d'étude :**1. Modélisation de l'éolienne:**

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique.

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [15].



Figure 16 : symbolique éolienne [15]

Comme vu précédemment la puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V^3 \quad (2.1)$$

Avec :

- **C_p** : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ .
- λ : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent $\lambda = R\Omega/V_w$.
- **p** : La densité du vent en [Kg/m³].
- **S** : La surface balayé par les pales de l'éolienne [m²].
- **Ω** : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne [rad/s].
- **V** : Vitesse du vent [m/s].
- **R** : Rayon d'une pale de la turbine [m].

Plusieurs approximations numériques ont été développées dans la littérature pour déterminer une expression du coefficient C_p.

On site parmi ces approximations celles parus respectivement dans les références suivantes :

$$C_p = \frac{1}{2} \times (\gamma - 0,022 \times \beta^2 - 5,6) \times -e^{0,17} * \gamma \quad (2.2)$$

$$-\gamma = \frac{9 \times v_w}{4 \times \Omega} 4 * \Omega \quad (2.3)$$

γ est le rapport de vitesse périphérique, et β représente l'angle d'attaque de la pale en degré :

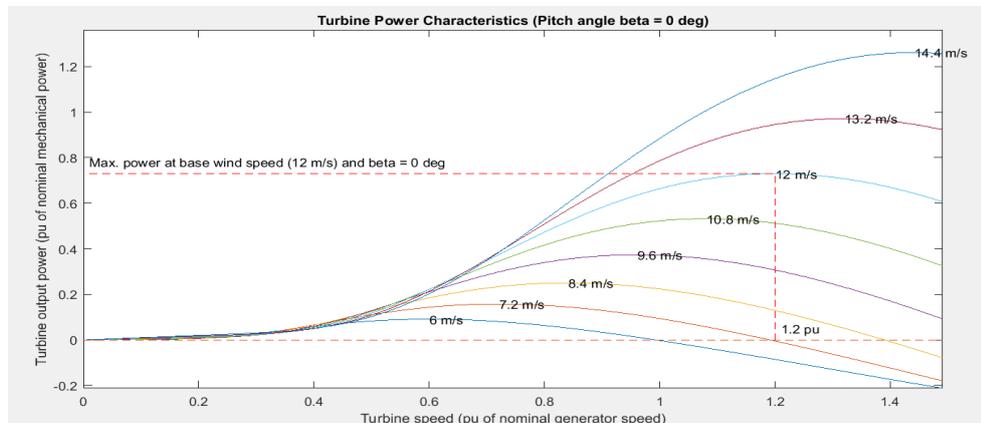


Figure 17 : courbe couple éolienne lier à la vitesse de la rotation du turbine [16]

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

L'expression du couple correspondant à la puissance précédemment mentionnée est donnée par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda) \rho S V_w^3}{\Omega} \quad (2.4)$$

Le couple mécanique vu par la machine synchrone est différent du couple éolien car il faut tenir compte de l'inertie de l'éolienne et des frottements visqueux propre à la structure de l'éolienne. Ceci peut être traduit en terme mathématiques par l'équation suivante :

$$C_{eol} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_r \quad (2.5)$$

Avec **J** et **f** respectivement l'inertie de l'éolienne et le frottement de l'éolienne. Et **P** étant l'opérateur Laplace. A partir de ces deux équations, nous pouvons représenter le modèle dynamique de l'éolienne avec le schéma suivant :

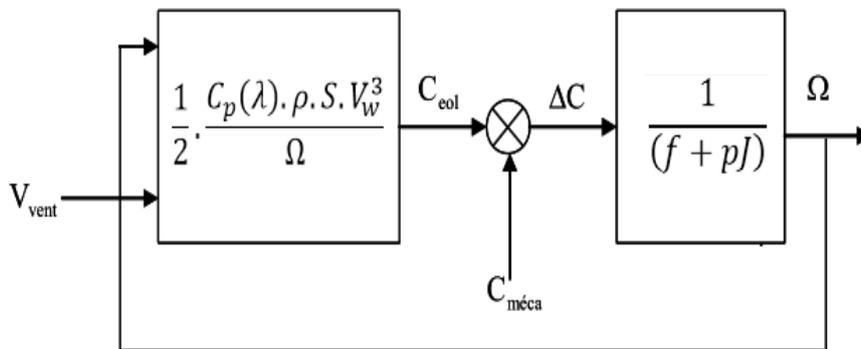


Figure 18 : model dynamique de l'éolienne [16]

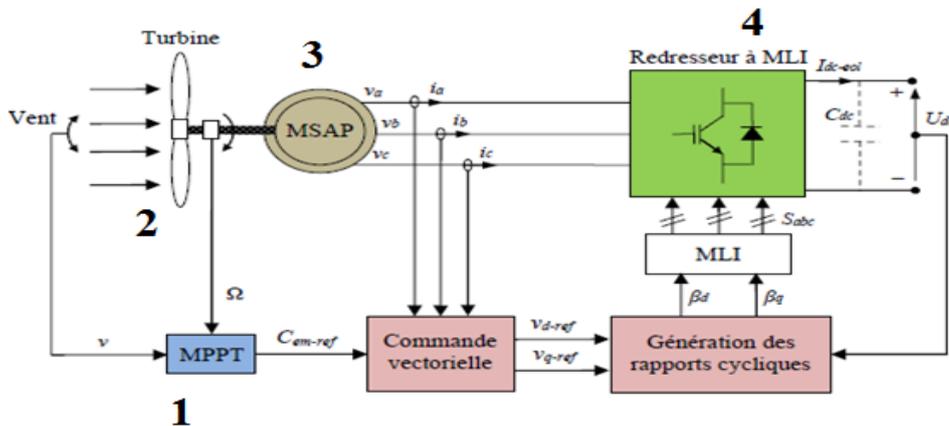


Figure 19: Schémas blocs de la commande du système éolien

- ✓ 1 : Régulateur des angles des pales.
- ✓ 2 : model Turbine de l'éolienne.
- ✓ 3 : Modèle de la génératrice MSAP (Machine Synchrone Aiment Permanent).
- ✓ 4 : redresseur à MLI.

Le tableau 1 présente les paramètres du modèle éolienne en Simulink ;

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Tableau 1 : paramètres du modèle éolienne en Simulink

Paramètres	Valeur
Puissance mécanique nominal (W)	80 (KW)
Puissance électrique nominale générateur (VA)	80/0.9 (VA)
Vitesse éolienne nominale (m/s)	12 (M/S)
Rendement utile dans sa nominale énergie mécanique	0.73
Rendement utiles vitesse rotationnelle nominal machine	1.2
Angle de beta affichage puissance éolienne	0

Le coefficient de performance C_p de la turbine est défini comme le rapport entre la puissance mécanique de sortie de la turbine et la puissance développée par l'éolienne. Il est également fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation et de l'angle de tangage calage (β). C_p atteint sa valeur maximale lorsque l'angle de tangage (β) est nul. Cela signifie que la turbine atteint une efficacité maximale lorsque ses pales sont alignées avec la direction du vent, minimisant ainsi les pertes d'énergie dues à un angle de tangage non optimal.

Des caractéristiques de puissance de l'éolienne pour voir les caractéristiques de l'éolienne à l'angle d'inclinaison spécifié (**beta=0**).

La figure 20 représente un schéma d'une turbine éolien dont :

- ✓ La première entrée est l'angle d'inclinaison de la pale (β) en degrés.
- ✓ La deuxième entrée est la vitesse du vent.
- ✓ La troisième entrée et vitesse l'arbre du générateur.
- ✓ La sortie est le couple appliqué à l'arbre du générateur par unité des valeurs nominales du générateur.

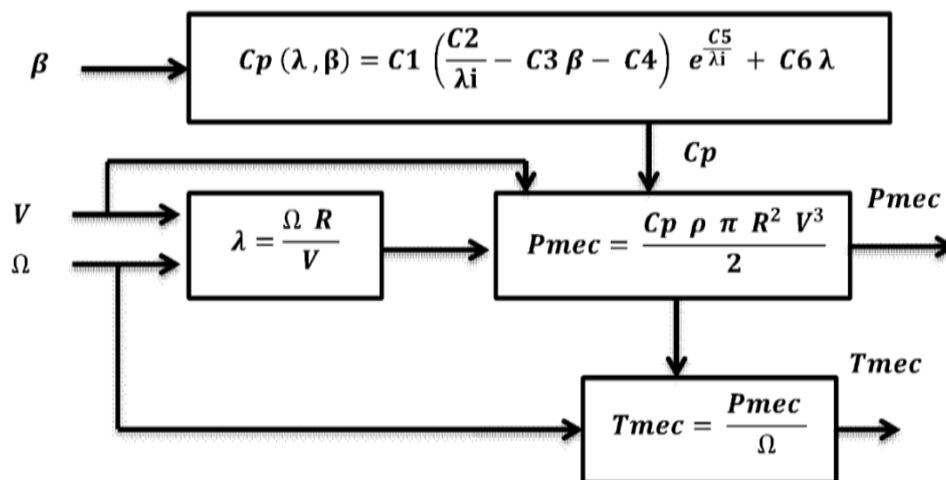


Figure 20 : Schéma synoptique de simulation du sous-système éolien

La figure 21 représente de la vitesse du vent applique à notre éolien par rapport à la vitesse $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ due à l'arbre machine asynchrone dans (0, 5, 7, 9, 12, 14 mètre/seconde) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$:

Dans cette figure, nous voulons expliquer le changement graduel de la vitesse de l'air, ici nous regardant le changement de la vitesse d'ordre croissant jusqu'à ce qu'il atteigne 14 mètres par heure.

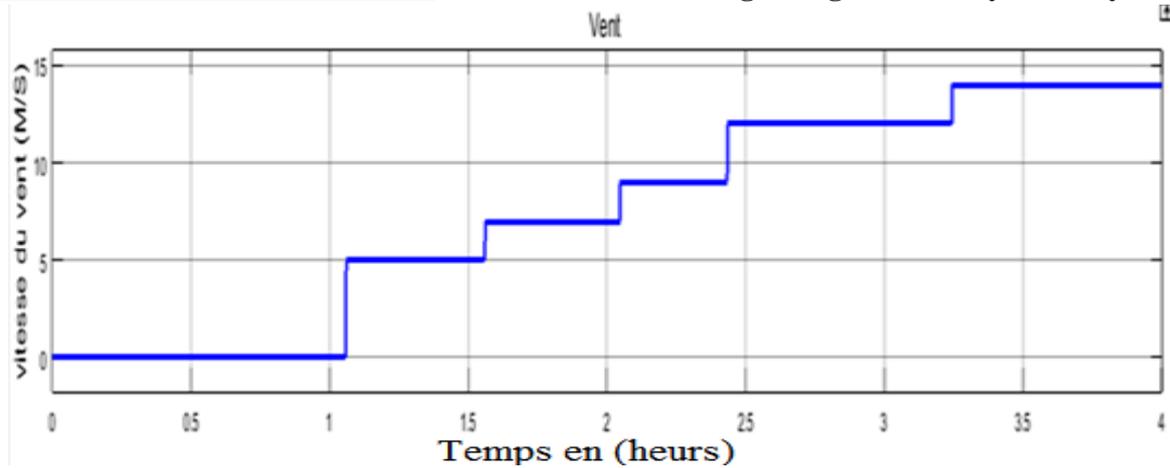


Figure 21 : vitesse du vent variable (0, 5, 7, 9, 12,14) M/S

Dans la figure suivante, on remarque la synchronisation de la vitesse de rotation du générateur électrique, de manière séquentielle, avec la vitesse des vents existant selon la figure précédente.

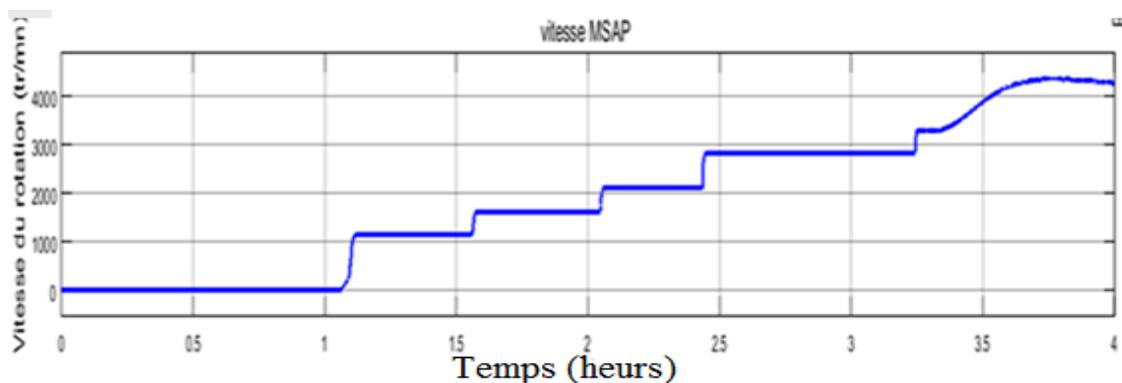


Figure 22 : vitesse machine par rapport à la variation du vent

Ici en présente le couple développé par la machine par rapport aux vitesses du vent développée.

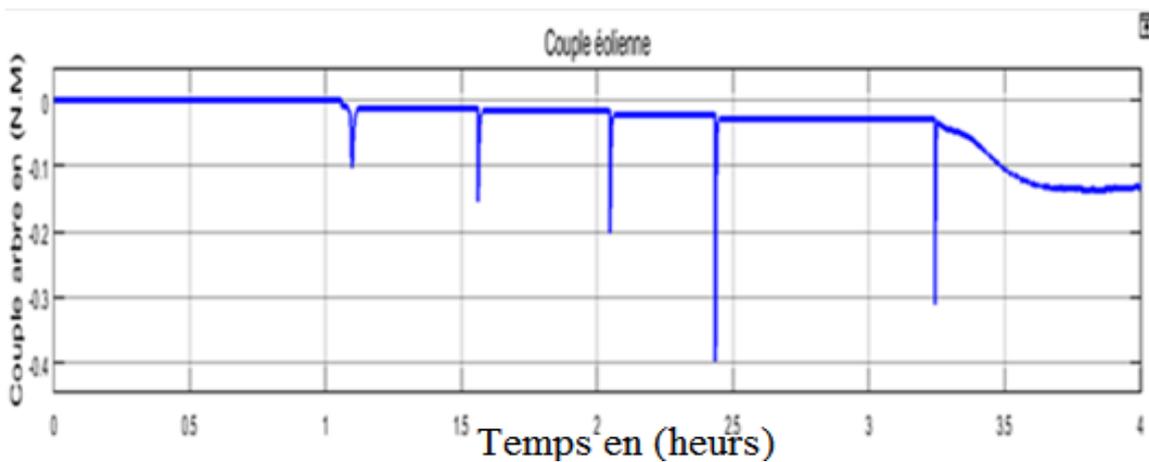


Figure 23 : couple développer par l'éolienne à vitesse du vent 0, 5, 7, 9, 12,14 m/s

On peut constater que la vitesse du vent a un effet considérable sur les caractéristiques de puissance d'une éolienne. Ces caractéristiques dépendent de plusieurs facteurs, notamment la vitesse du vent et l'angle d'inclinaison des pales.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Aux vitesses de vent faibles, l'éolienne génère un couple minimal, ce qui se traduit par une puissance de démarrage. À mesure que la vitesse du vent augmente, la puissance de sortie de l'éolienne augmente également jusqu'à atteindre sa valeur maximale, connue sous le nom de puissance nominale.

Au-delà de cette puissance nominale, l'éolienne est conçue pour fonctionner à une puissance constante.

1.1 Modélisation des générateurs synchrones à aimant permanent :

La modélisation de la G.S.A.P consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce qui permet d'étudier avec pertinence le comportement des différentes variables en mode dynamique et statique et exploiter ce modèle dans les simulations.

Dans une GSAP, le champ magnétique est produit par des aimants permanents. Selon la manière avec laquelle les aimants sont montés sur le rotor on peut considérer deux types de GSAP.

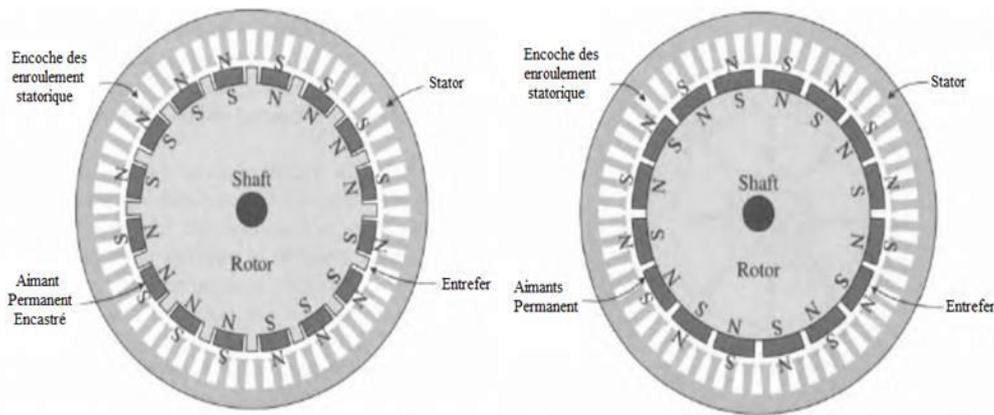


Figure 24 : G.S.A.P aimant monter en surface [17]

1.1.1 Mise en équation :

En négligeant la saturation du circuit magnétique, les pertes hystérisées et en supposant que les tensions sont sinusoïdales. Le système d'équations de tensions de la machine synchrone est donné par les équations suivantes :

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (2.7)$$

$$v_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (2.8)$$

Avec $R_c=R_b=R_a=R_s$ les résistances statiques et $\psi_a-\psi_b-\psi_c$ respectivement les flux totaux circulant dans les enroulements statiques de la phase a, b, etc.

Pour simplifier, nous écrivons ce système sous forme matricielle avec l'équation suivante :

$$v_{abc} = R_s [i_{abc}] + \left[\frac{d\psi_{abc}}{dt} \right] \quad (2.9)$$

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Les flux statiques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux de l'aimant permanent.

1.1.2 La Transformation de Park-Clarke :

L'utilisation d'un repère biphasé peut simplifier les calculs en permettant de travailler avec un système à deux équations au lieu d'un système à trois équations, chaque équation correspondant à une phase.

Dans les systèmes électriques, notamment dans le contexte des systèmes triphasés, le repère biphasé est une méthode de représentation et d'analyse qui regroupe les grandeurs électriques en deux phases distinctes, généralement appelées phase directe et phase inverse.

En utilisant ce repère, les équations et les calculs peuvent être simplifiés car il y a moins de variables à prendre en compte. Au lieu de travailler avec trois équations correspondant à chaque phase individuelle, on peut travailler avec seulement deux équations qui représentent les grandeurs combinées des deux phases.

Cela peut faciliter la modélisation, l'analyse et la résolution des problèmes liés aux systèmes triphasés, en réduisant la complexité mathématique et en simplifiant les calculs nécessaires.

Il convient de noter que l'utilisation d'un repère biphasé peut être appropriée dans certaines situations, mais elle peut ne pas être applicable ou adaptée à tous les scénarios. La décision d'utiliser un repère biphasé ou un autre système de référence dépend des caractéristiques spécifiques du système électrique étudié et des objectifs de l'analyse.

Afin de simplifier les calculs, il est préférable d'utiliser un repère biphasé qui permet de travailler avec un système à deux équations au lieu d'un système à trois équations correspondant à une équation par phase.

En effet, dans certains cas, il est possible et préférable de se projeter sur un repère biphasé tournant à la vitesse de rotation du rotor pour éliminer les variables de nature sinusoïdale et travailler avec des grandeurs continues.

Lorsque l'on travaille avec des systèmes électriques tels que les machines tournantes ou les convertisseurs d'électronique de puissance, il peut être avantageux de passer d'un repère triphasé sinusoïdal à un repère biphasé tournant. Dans ce repère, les grandeurs électriques sont représentées par des grandeurs continues qui tournent à la même vitesse que le rotor de la machine.

Cette transformation permet de simplifier les équations et les calculs en éliminant les composantes sinusoïdales variables dans le temps.

Cela facilite l'analyse et la modélisation des systèmes électriques, en particulier lorsqu'on souhaite étudier des phénomènes transitoires, des régulations de vitesse ou des interactions avec d'autres systèmes de puissance.

En travaillant avec des grandeurs continues dans un repère biphasé tournant, on peut appliquer des techniques de contrôle et de modélisation plus simples et efficaces, ce qui peut simplifier la conception et la mise en œuvre des systèmes électriques.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation d'un repère biphasé tournant ne convient pas à tous les scénarios et dépend des caractéristiques spécifiques du système étudié. Il est essentiel d'évaluer attentivement les avantages et les limitations de cette approche avant de l'appliquer à un problème donné.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Effectivement, pour réaliser la projection sur un repère biphasé tournant, on utilise généralement la transformée de Park-Clarke ou la transformée de Park-Concordia.

La transformée de Park-Clarke permet de transformer les grandeurs triphasées sinusoïdales en grandeurs biphasées continues en conservant les amplitudes des grandeurs. Cette transformation utilise le coefficient $2/3$ pour maintenir la cohérence des amplitudes entre les deux repères.

Cependant, il est important de noter que la transformée de Park-Clarke ne conserve pas les puissances électriques. Cela signifie que les puissances calculées dans le repère triphasé ne seront pas équivalentes à celles calculées dans le repère biphasé après transformation.

Pour remédier à cela, la transformée de Park-Concordia est utilisée. Elle permet également de passer d'un repère triphasé sinusoïdal à un repère biphasé tournant, mais conserve non seulement les amplitudes, mais aussi les puissances électriques. La transformée de Park-Concordia utilise le coefficient $\sqrt{2/3}$ pour assurer cette conservation.

Ainsi, en choisissant entre la transformée de Park-Clarke et la transformée de Park-Concordia, on doit prendre en compte les objectifs de l'analyse ou de la modélisation, en tenant compte de la conservation des amplitudes des grandeurs (Park-Clarke) ou de la conservation des puissances électriques (Park-Concordia).

Afin de simplifier les calculs, il est préférable d'utiliser un repère biphasé.

Qui permet de travailler avec un système à deux équations au lieu d'un système à trois équations correspondant à une équation par phase.

Il est aussi possible et préférable pour certain cas de de ce projeter sur un repère biphasé tournant à la vitesse de rotation du rotor pour éliminer les variables de nature sinusoïdales et travailler avec des grandeurs continues.

Pour ce faire on utilise la transformé de Park-Clarke ou Park-Concordia.

La transformée de Park-Clarke assure la conservation des amplitudes des grandeurs en introduisant le coefficient $2/3$.

Mais pas des puissances électriques, à la différence de la transformée de Park-Concordia qui conserve la puissance et utilise le coefficient $\sqrt{2/3}$.

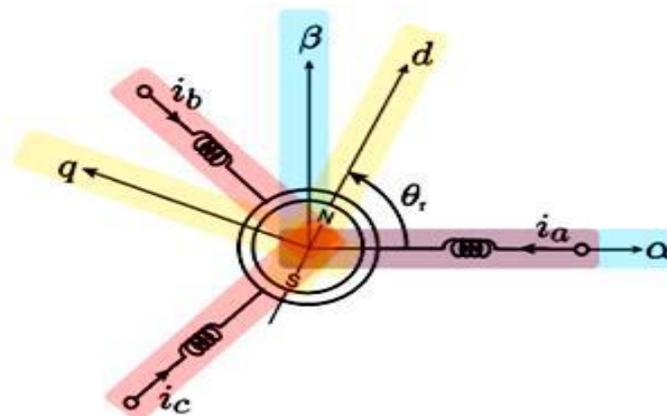


Figure 25 : Représentation schématique d'un MSAP relativement aux repères triphasés et biphasés [17]

Nous retrouvons ainsi les équations suivantes :

On obtient ainsi les équations suivantes :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_r \psi_{qs} \quad (2.10)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_r L_q i_{qs} - L_{ds} p i_{ds} \quad (2.11)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{qs} + \omega_r \psi_{ds} \quad (2.12)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} - L_{qs} p i_{qs} \quad (2.13)$$

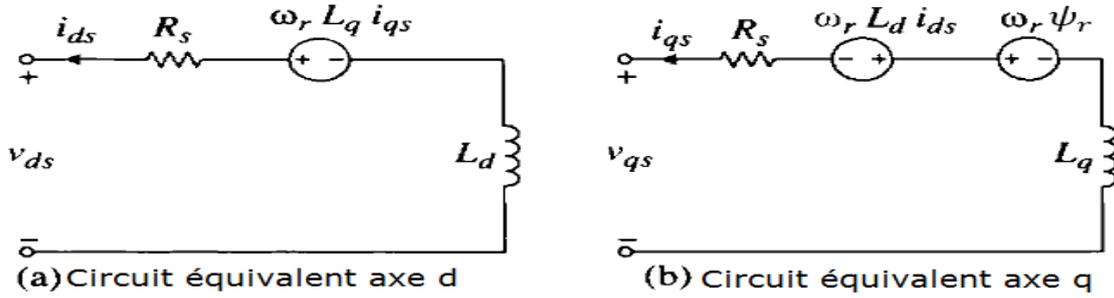


Figure 26 : Circuit électrique équivalent du modèle de G.S.A.P [17]

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_e = 3 \frac{Np}{2} (i_{qs} \psi_{ds} - i_{ds} \psi_{qs}) \quad (2.14)$$

Avec Np le nombre de pair de pôles :

L'expression de la pulsation rotorique est :

$$\omega_r = \left(\frac{Np}{J_s} (T_e - T_m) \right) \quad (2.15)$$

1.1.3 Caractéristiques de la génératrice à aimant permanent :

Les figures (27-28) présentent l'allure de la tension et du courant développer par la génératrice, on peut remarquer que cette machine peut délivrer une tension variable en fonction de la variation de la vitesse de vent arrive jusque que 600 volts en graduation par ordre croissante et une intensité de 100 ampères.

Ces grandeurs les caractéristiques sont les caractéristiques naturelles de la génératrice obtenue avant la phase d'intervention du hacheur élévateur et l'algorithme P&O pour attirer le maximum de puissance pour cette éolienne.

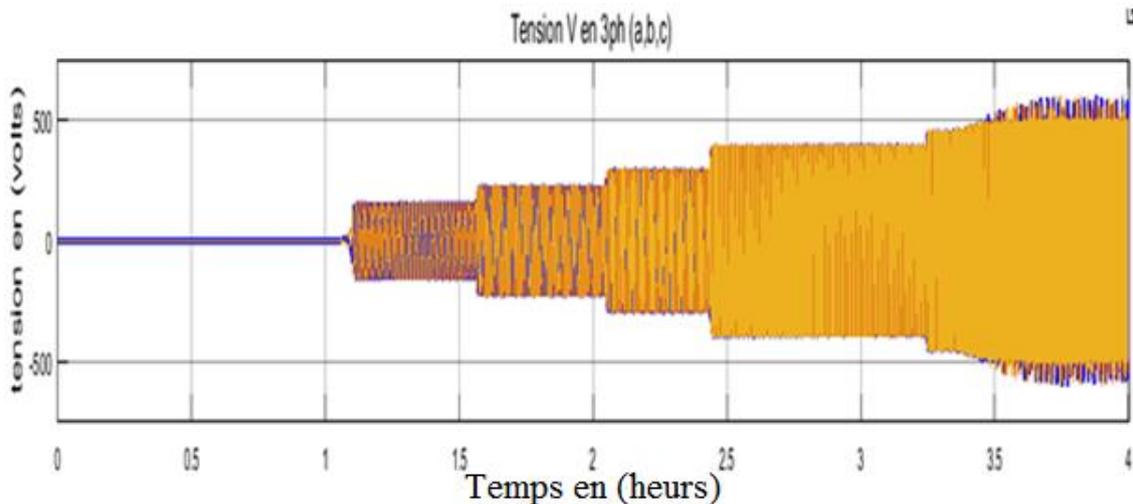


Figure 27 : tension en triphasé MSAP vitesse vent variable

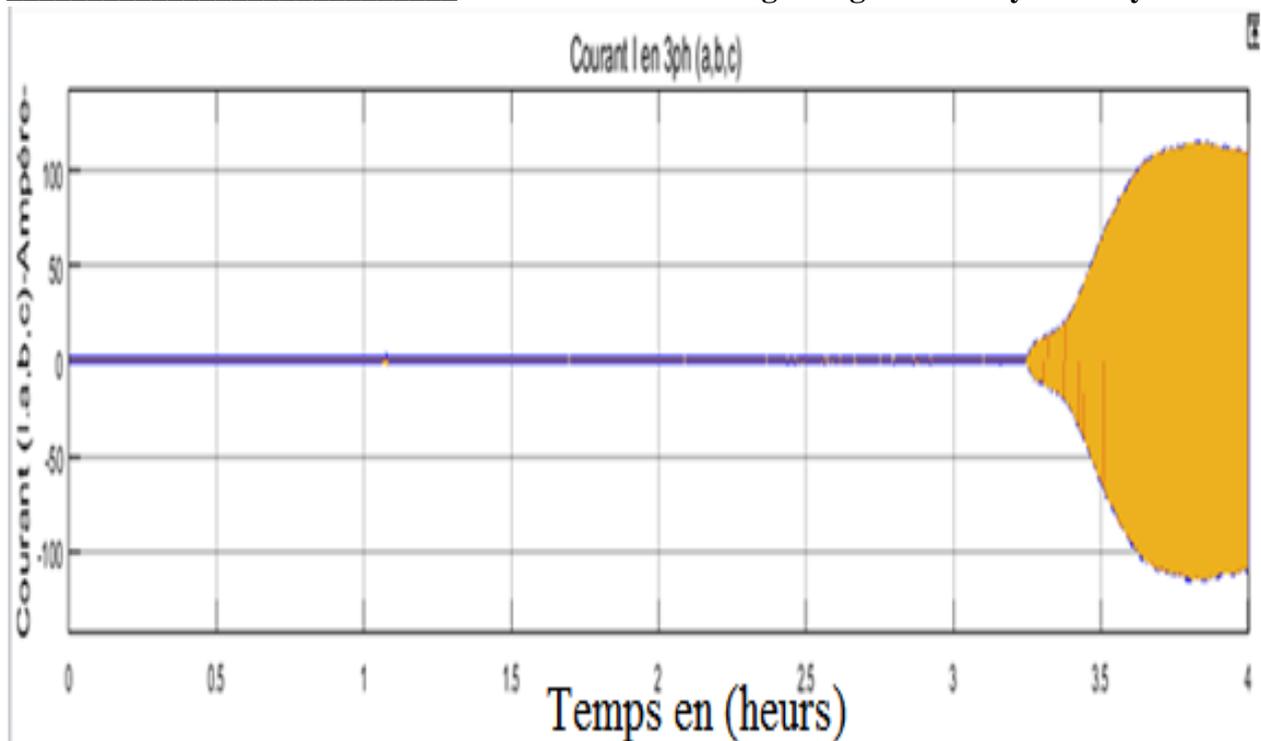


Figure 28 : courant développer par le MSAP à la vitesse vent variable

1.3 Modélisation du Hacheur BOOST :

Le hacheur élévateur est un dispositif électronique très efficace qui permet d'augmenter la tension d'entrée sans recourir à l'utilisation d'un transformateur. Le processus de transfert d'énergie est réalisé grâce à différents composants tels que, l'interrupteur de puissance, la diode et les condensateurs de filtrage. Ce processus est contrôlé à une fréquence fixe, et les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie varient en fonction du rapport cyclique (D).

Le rapport cyclique (D) représente la proportion de temps pendant lequel le commutateur MOSFET est fermé par rapport à la période complète du cycle de commutation. Les relations entre le rapport cyclique, la tension d'entrée et la tension de sortie sont données par les formules suivantes :

$$D = 1 - \left(\frac{V_{pv}}{V_s} \right) \quad (2.16)$$

$$D = 1 - \left(\frac{I_s}{I_{pv}} \right) \quad (2.17)$$

Avec

- ✓ V_s : La tension de sortie hacheur.
- ✓ V_{pv} : La tension d'entrée hacheur.
- ✓ I_s : Le courant de sortie hacheur.
- ✓ I_{pv} : Le courant d'entrée hacheur.
- ✓ D : Rapport cyclique est compris entre 0 et 1.

Les valeurs des condensateurs de filtrage C_e , C_s et d'inductance de lissage de courant LPV sont déterminées par les équations ci-dessous avec facteur d'ondulation de la tension de 5% conformément à la norme CEI et facteur d'ondulation du courant doit demeurer à 30%.

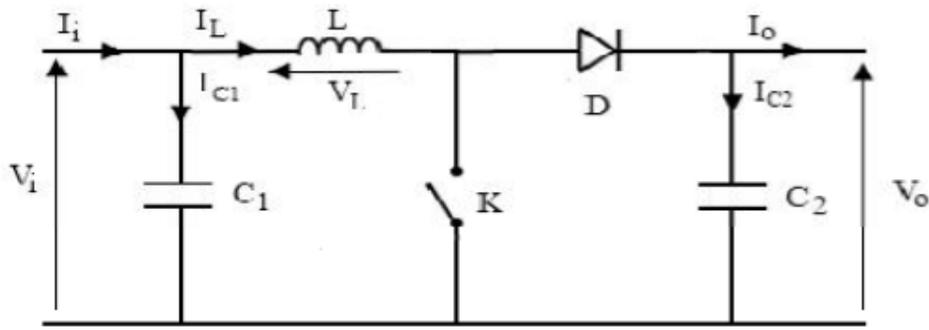


Figure 29: Schéma électrique d'un hacheur boost [18]

Les condensateurs d'entrée et de la sortie de filtrage sont déterminés par les expressions (2.14) et (2.15)

$$C_e = \Delta i \frac{L_{pv}}{8} f_s \Delta V_{pv} \quad (2.18)$$

$$C_s = \frac{i_s D}{f_s \Delta V_s} \quad (2.19)$$

L'inductance de lissage est obtenue par l'équation (2.20)

$$L_{pv} = \frac{V_{pv} D}{f_s \Delta i} \quad (2.20)$$

Avec:

- ✓ LPV : Inductance de lissage de courant.
- ✓ Ce et Cs : Les condensateurs d'entrée et de la sortie de filtrage.
- ✓ \$f_s\$: La fréquence de commutation.

La variation des conditions météorologiques peut être dégradée le point de puissance maximale et par suite dégrade la tension de sortie du champ photovoltaïque qui fournir une tension continue n'est pas constant à la charge.

L'adaptation de la source avec la charge s'effectue en faisant varier le rapport cyclique D en utilisant la technique de commande MPPT.

Les variations des conditions météorologiques peuvent affecter le point de puissance maximale d'un champ photovoltaïque, ce qui peut à son tour entraîner une dégradation de la tension de sortie. Concrètement, la tension continue fournie par le champ photovoltaïque n'est pas constante lorsqu'il est soumis à différentes charges.

Lorsque les conditions météorologiques varient, telles que l'ensoleillement, la température et les ombrages, le point de puissance maximale du champ photovoltaïque peut se déplacer. Le point de puissance maximale correspond à la combinaison optimale de tension et de courant qui permet d'obtenir la puissance maximale du système.

Si le point de puissance maximale se dégrade en raison des variations météorologiques, la tension de sortie du champ photovoltaïque peut également se dégrader. Cela signifie que la tension continue fournie par le champ photovoltaïque n'est pas stable et peut fluctuer en fonction des conditions environnementales changeantes.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Il est important de prendre en compte ces variations lors de la conception et de l'exploitation des systèmes photovoltaïques afin de garantir une régulation appropriée de la tension de sortie et d'optimiser les performances globales du système.

L'adaptation de la tension de la source avec la tension de la charge s'effectue en faisant varier le rapport cyclique D en utilisant la technique de commande MPPT.

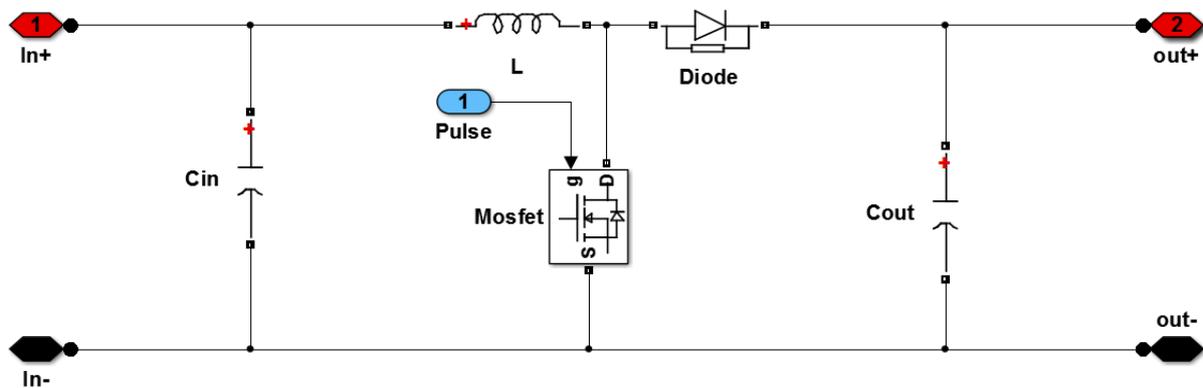


Figure 30 : Structure hacheur boost (DC-DC) éolien-MPTT

1.2.1 Hacheur élévateur de tension :

Dans la figure on va présenter la variation de la tension générée par l'éolienne avant qu'elle ne passe par le hacheur. Ce dernier comprend une boucle de régulation visant à rendre la tension plus stable.

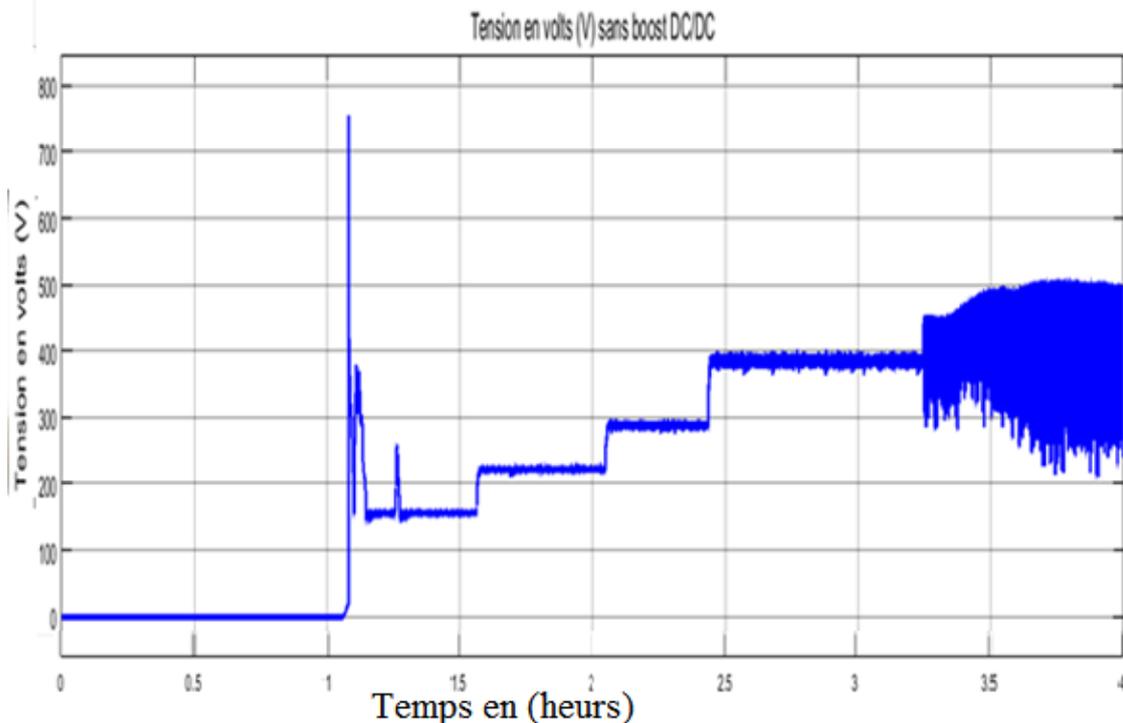


Figure 31 : tension de la (MSAP) avant l'intervention du hacheur

Le courant développé par la génératrice d'étude après son passage au hacheur est présenté dans la figure 32, on peut voir que le courant se stabilise rapidement en termes de sa réponse de 100 ampères.

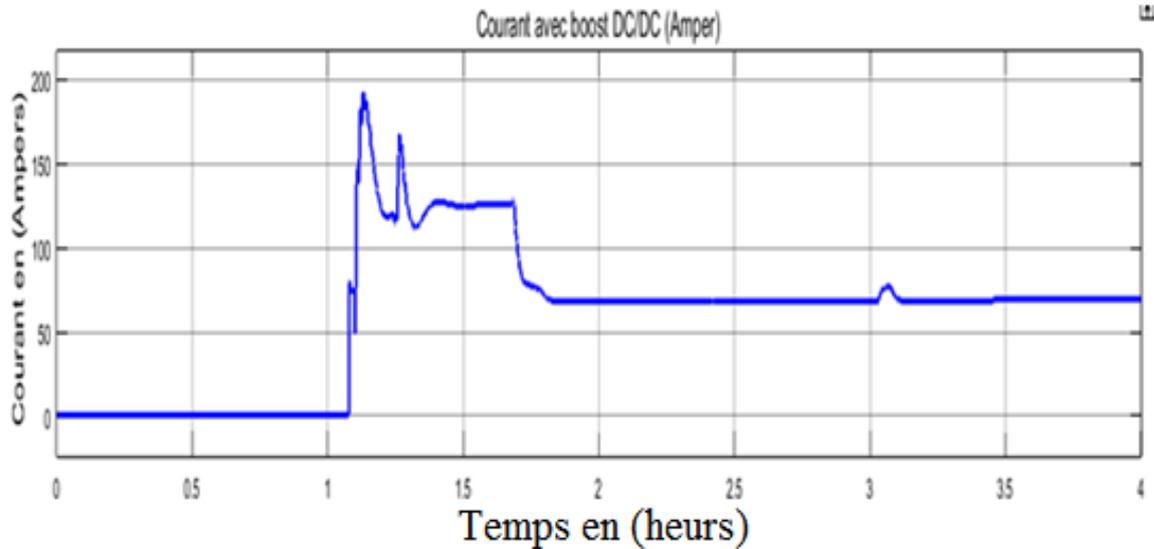


Figure 32 : Courant de la (MSAP) après l'intervention du hacheur

Dans cette courbe figure (31-33) on peut voir la différence majeure entre une tension non stable développer par la machine et après sans passage par hacheur survolteur qui régule aussi la tension.

On voit ici une tension de 500 volts stable et rapide en terme régulation à sa limite quel que soit la vitesse du vent appliqué à notre éolienne.

Dans cette courbe on peut voir la différence majeure entre une tension non stable développer par la machine et après sans passage par hacheur survolteur qui régule aussi la tension a 500 volts.

On voit ici une tension de 500 volts stable et rapide en terme régulation à sa limite quel que soit la vitesse du vent appliqué à notre éolienne.

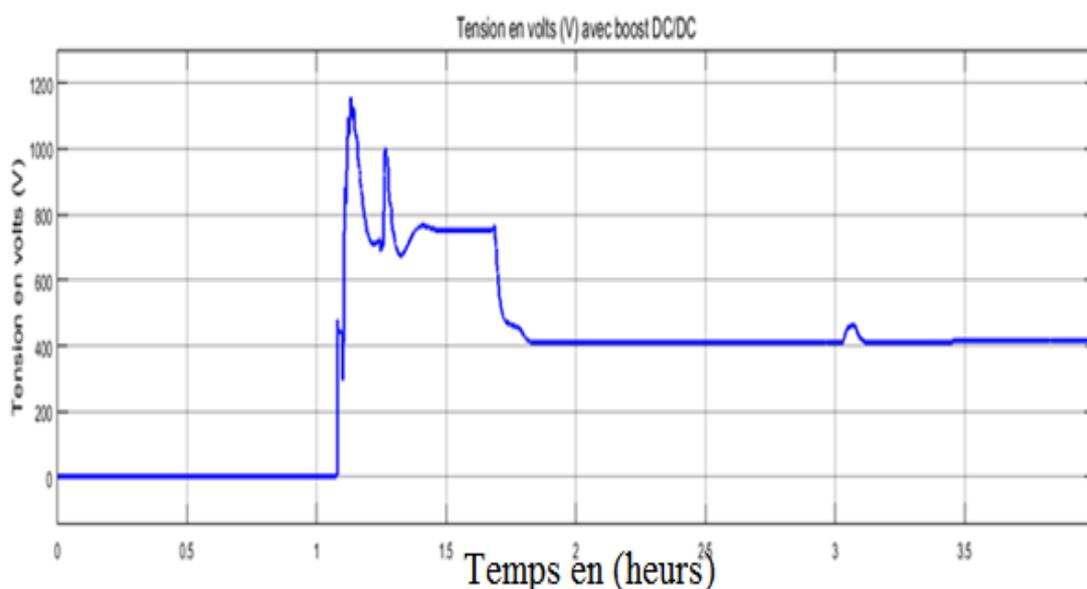


Figure 33 : tension de la (MSAP) après l'intervention du hacheur

La figure 33 illustre la variation de la tension développer par la génératrice, on constate que la tension est toujours stable dans sa valeur de 500 volts quelques soit la variation de la vitesse de

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

vent grâce à un boucle de régulation appliquer le thyristor de commande à gâchette, voici la (figure 34) suivant donne une image générale sur la boucle de régulations de tension.

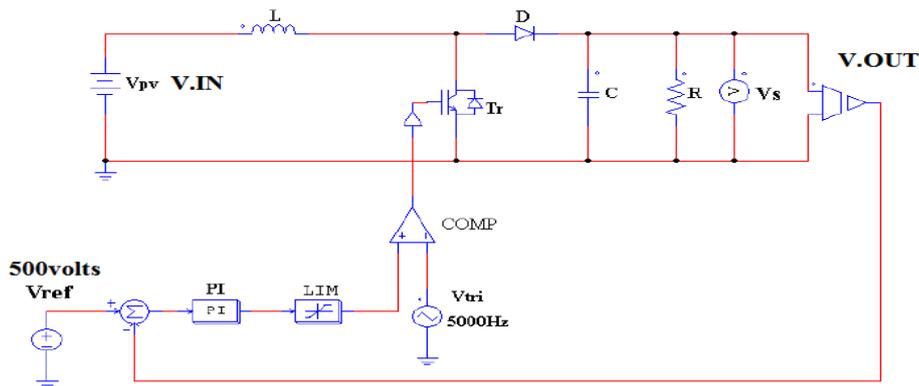


Figure 34 : schéma bloc du régulateur tension

Le tableau suivant illustre le paramètre de ce bloc de régulation :

Tableau 2 : réglage thyristors commande en tension de seuil de 500 volts

Paramètre thyristor « régulation en tension »	Valeurs
Résistance (ohms)	0.001
Inductance (h)	0
Tension de suivit (v)	500
Capacité d'amortissement (f)	670
Résistance d'amortissement (ohms)	500

La figure 35 illustre Puissance développée par la machine après l'intervention du hacheur (50kw stable) :

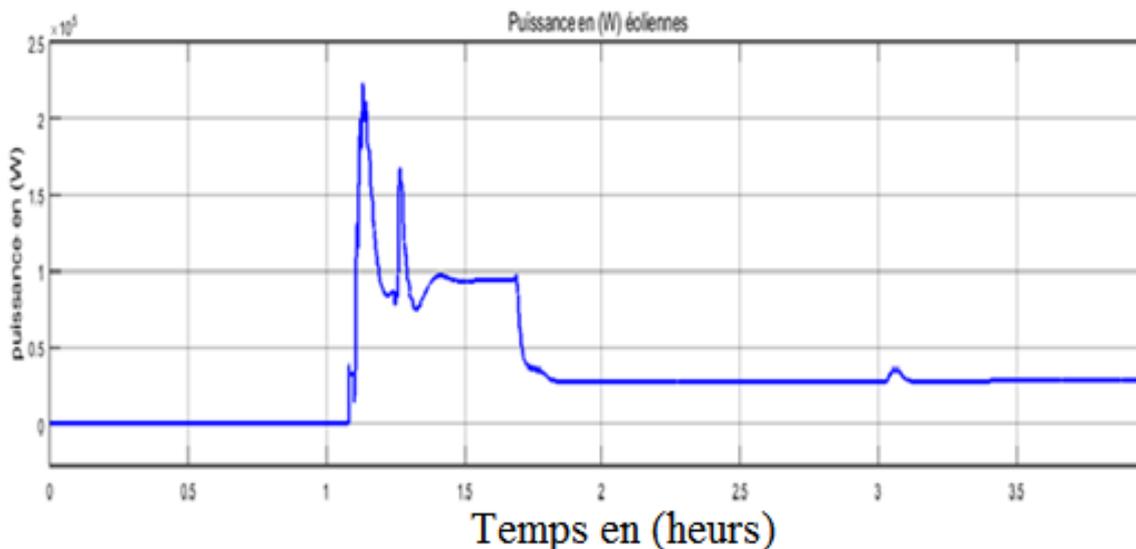


Figure 35 : puissance éolienne développée après l'intervention du hacheur réguler en 500 volts

1.2.2 Commande de l'éolienne :

1.2.2.1 Commande en couple :

Compte tenu de la relative difficulté à régler la vitesse d'une turbine fortement inertielle, une commande en couple de la génératrice peut être envisagée.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Cette façon de procéder donne une association plus « saine » de point de vue physique : une source de vitesse (ensemble éolienne) est connectée à une source de couple (génératrice pilotée en couple).

Cette nouvelle façon de contrôler le système demande une adaptation du dispositif de recherche du point de puissance maximal MPPT.

Alors le couple éolien est proportionnel au carré de la vitesse angulaire du rotor :

$$C_{eol} = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda) \rho S R^3}{\lambda^3} \Omega^2 \quad (2.21)$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire lorsque le coefficient de puissance (C_p) est maximisé à un certain point de fonctionnement, le rapport entre la vitesse angulaire et le couple pour obtenir la puissance maximale peut être donnée par la relation : $\lambda = \lambda_{opt}$ (2.22)

Dans cette relation, λ représente le rapport entre la vitesse angulaire de la génératrice (ω) et la vitesse du vent (V), et λ_{opt} est le rapport de vitesse angulaire optimal pour maximiser la puissance.

L'objectif est de régler la vitesse angulaire de la génératrice en fonction de la vitesse du vent de manière à atteindre ce rapport optimal. En maintenant ce rapport constant, l'éolienne peut fonctionner dans sa plage de fonctionnement optimale et maximiser la puissance extraite du vent.

Il est important de noter que la valeur de λ_{opt} dépend des caractéristiques spécifiques de l'éolienne, telles que sa conception, son modèle et ses performances. Elle peut être déterminée expérimentalement ou à l'aide de simulations et peut varier d'une éolienne à une autre.

En réglant la vitesse angulaire de la génératrice en fonction du rapport optimal, il est possible d'optimiser les performances de l'éolienne et d'obtenir une production d'énergie maximale à partir du vent disponible.

Le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{eol}(opt) = K_{opt} \Omega^2(opt) \quad (2.23)$$

Avec K_{opt} le même rapport défini dans le cas de la régulation en vitesse :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \left[\frac{C_p(\lambda) \rho S R^3}{\lambda_{opt}^3} \right] \quad (2.24)$$

L'algorithme de commande en couple nécessite comme entrée une mesure de la vitesse angulaire du rotor pour déduire via le rapport K_{opt} la nouvelle consigne de couple.

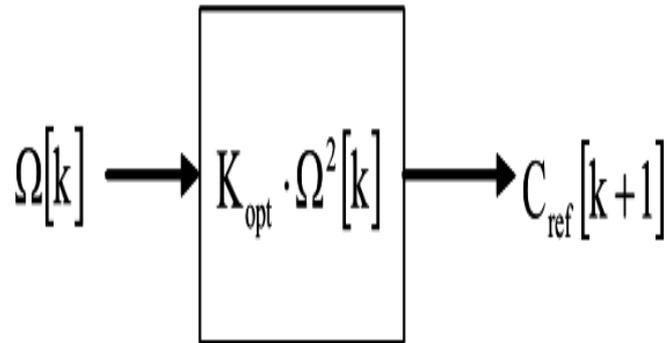


Figure 36 : couple de référence en fonction de la vitesse de rotation [18]

La mesure de la vitesse de rotation Ω_1 engendre le calcul du couple $C_{ref,1}$; Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromécanique de la génératrice. Par l'action de ce couple la vitesse de rotation change. Pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse Ω_2 où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée ; Après quelques itérations, la paire de coordonnées optimum à $(\Omega_{opt}; C_{opt})$ est atteinte et l'extraction de la puissance maximale P_{max} est réalisée à ce point.

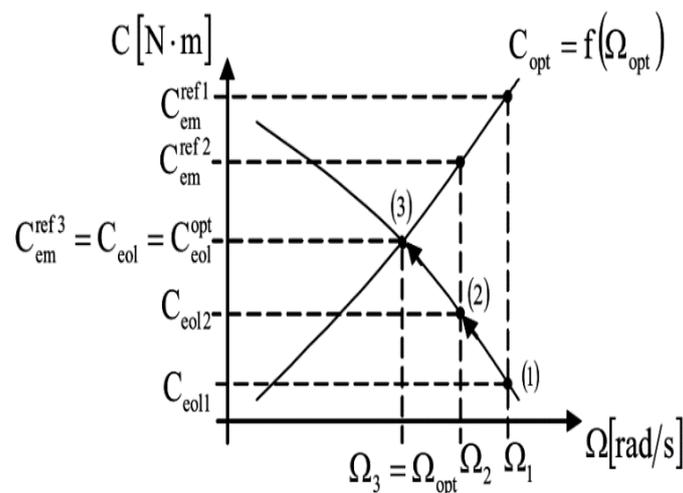


Figure 37 : convergence vers le point optimal par (contrôle en couple) [19]

1.2.2.2 Commande en vitesse :

La convergence de la recherche de point maximal de puissance est illustrée selon la Figure 38:

- ✓ En mesurant la puissance P_1 à la vitesse de rotation Ω_1 , la vitesse de référence est calculée selon l'équation trouvée précédemment ce qui équivaut à trouver une vitesse $Réf = \Omega_2$ correspondante au point $(\Omega_2; P_1)$ de la courbe optimale $P_{opt} = (\Omega_{opt})$.
- ✓ Après une période de calcul, l'état du système équivalent à $(\Omega_2; P_2)$ est atteint et la vitesse de référence Ω_3 est calculée.
- ✓ Après plusieurs itérations, selon la valeur de l'inertie et de la bande passante du régulateur de vitesse, le point optimal $(\Omega_{opt}; P_{opt})$ est atteint.

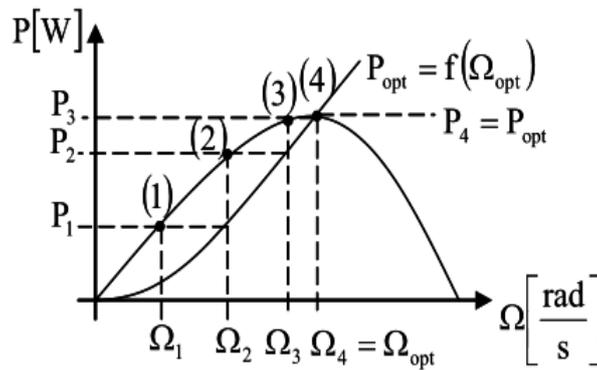


Figure 38 : Convergence vers point max du control vitesse [19]

1.2.2.3 Technique de commande MPPT (P & O):

L'algorithme MPPT de commande de vitesse utilise la mesure du courant et de la tension pour déterminer la puissance actuelle du système. Cette puissance est ensuite utilisée pour calculer la nouvelle consigne de vitesse.

Les stratégies de commande MPPT, qui ne nécessitent pas de connaissance préalable de la courbe caractéristique, utilisent des algorithmes heuristiques pour suivre en permanence la puissance maximale. Ces stratégies permettent de maximiser la production d'énergie sans avoir à connaître les caractéristiques spécifiques de chaque composante de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, telles que la courbe $C_p=f(\lambda)$ de l'éolienne ou les caractéristiques de la machine synchrone à aimants permanents.

Son effet est ensuite observé au niveau de la puissance de sortie de la G.S.A.P. Si une augmentation de la puissance électrique est détectée à la suite d'une augmentation du rapport cyclique, alors le rapport cyclique sera à nouveau augmenté avec le même pas que précédemment. En revanche, si une diminution de la puissance est constatée après une augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique sera inversée. Cela permet d'ajuster de manière dynamique le rapport cyclique afin de maximiser la puissance de sortie de la génératrice.

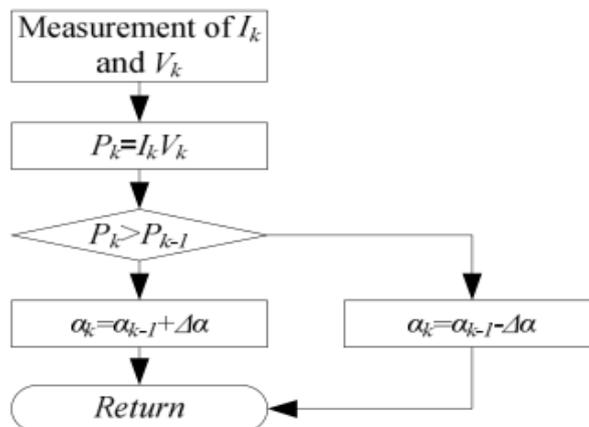


Figure 39 : organigramme P&O [19].

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

2.1 Modélisation de la pile à combustible 100kw :

20 cellules de 5 kW montée en parallèle pour extraire une puissance de secours de 100Kw qui peut faire l'alimentation de la charge de 20 kW avec le rechargement de batterie de 25kwh (50ah-500volts) en 15min (100/25) pour passer de l'état vide à la pleine charge.

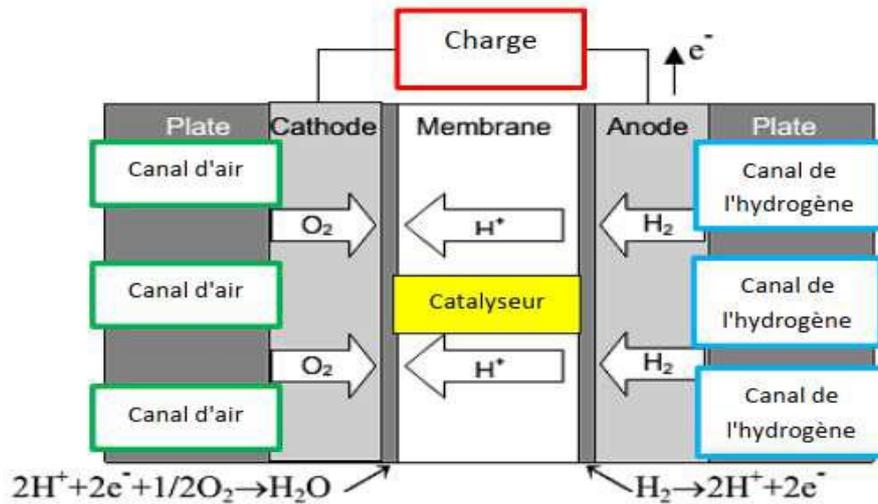


Figure 40 : Clarification d'une pile à combustible

Nous avons établi un modèle dynamique d'une pile à combustible de type PEM sous « Simulink matlab » (Fig.41).

Le modèle en galope le calculateur des pressions PH2 et PO2 plus la pile à combustible élémentaire.

Dans notre cas nous avons choisi un stack de nombre 582 cellules.

Les gases réactifs sont humidifier avec un taux de RH=100% et une température=343K.

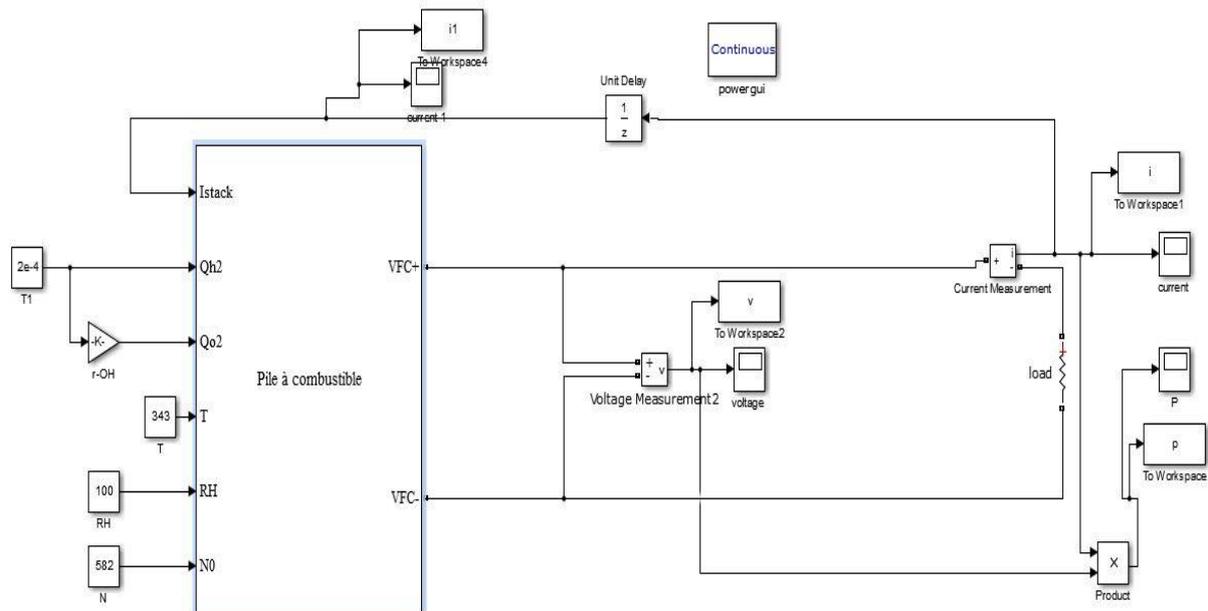


Figure 41 : Modèle de simulation d'une pile à combustible 5KW 500V DC "Simulink"

Le tableau 3 présente les paramètres de la pile à combustible :

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Tableau 3 : caractéristique de la pile à combustible

Paramètre nominale pile à combustible	Disparité du signal Paramètres de la pile à combustible
Puissance nominal=4000W Puissance maximale=5000W	Consommation de carburant [x_H2]=99,95 %
Résistance = 0,07833 Ohms	Composition de l'oxygène [y_O2]=21 %
Potentiel de Nerst de 1 cellule [En]=0.85V	Débit de carburant [Fuel FR] lors de l'utilisation formelle de
Utilisation formelle de : Hydrogène (H2)=99.56% Oxydant (O2)=59.3%	l'hydrogène : Nominal=50,06 l/min Maximale = 84,5 l/min
Utilisation formelle : Carburant = 60,38 l/min	Débit d'air [Air FR] en fonctionnement formel Oxydant :
Courant d'échange [i0]=0.29197 A	Nominal=300 l/min Maximum = 506,4 l/min
Coefficient d'échange [alpha]=0.60645	Température du système [T]=338 Kelvin
Pression d'alimentation en air [Paire]=1 bar	La pression d'alimentation en carburant [Pfuel]=1,5 bar

Le résultat relatif à cette caractéristique est présenté dans la figure (42, 43, 44, 45).

La figure 43 représente la variation de tension d'une seule cellule PEMFC en fonction du temps.

On constat que la pile PEMFC attendre un régime permanant après un temps de 10 sec.

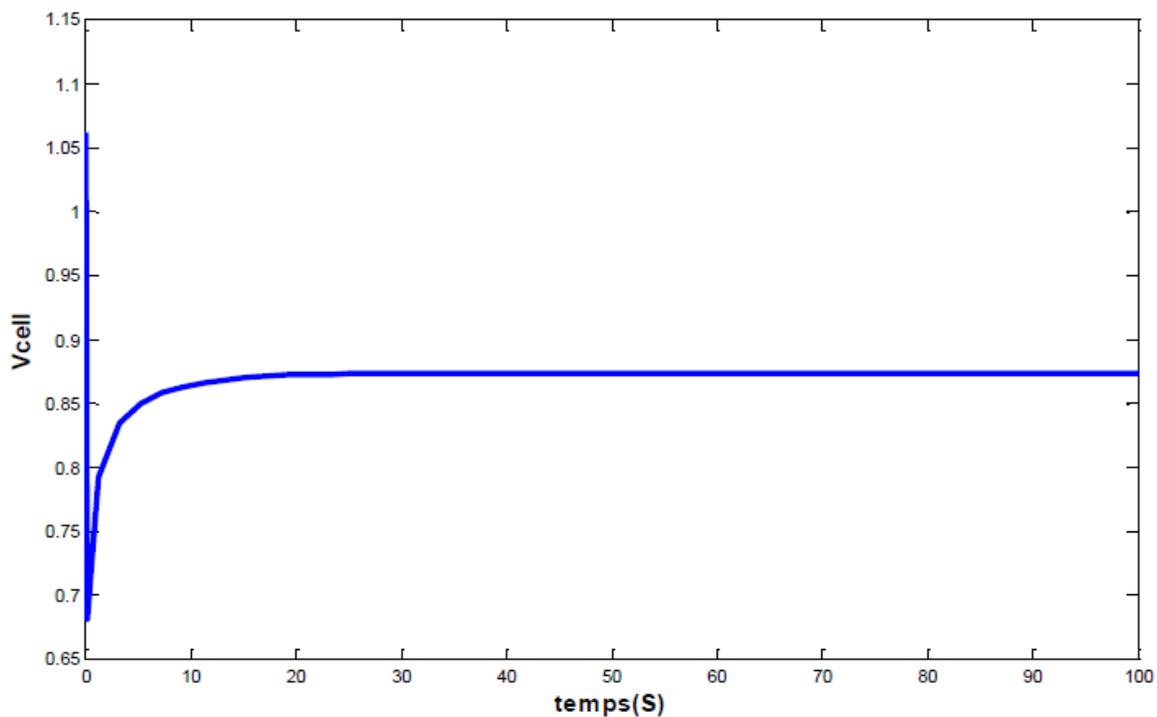


Figure 42 : Variation de tension d'une seule cellule à pile à combustible en fonction du temps

La figure 43 représente la variation de courant d'une seule cellule PEMFC en fonction du temps.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

On constat que la pile PEMFC attendre un régime permanant après un temps de 10sec de 240 ampères.

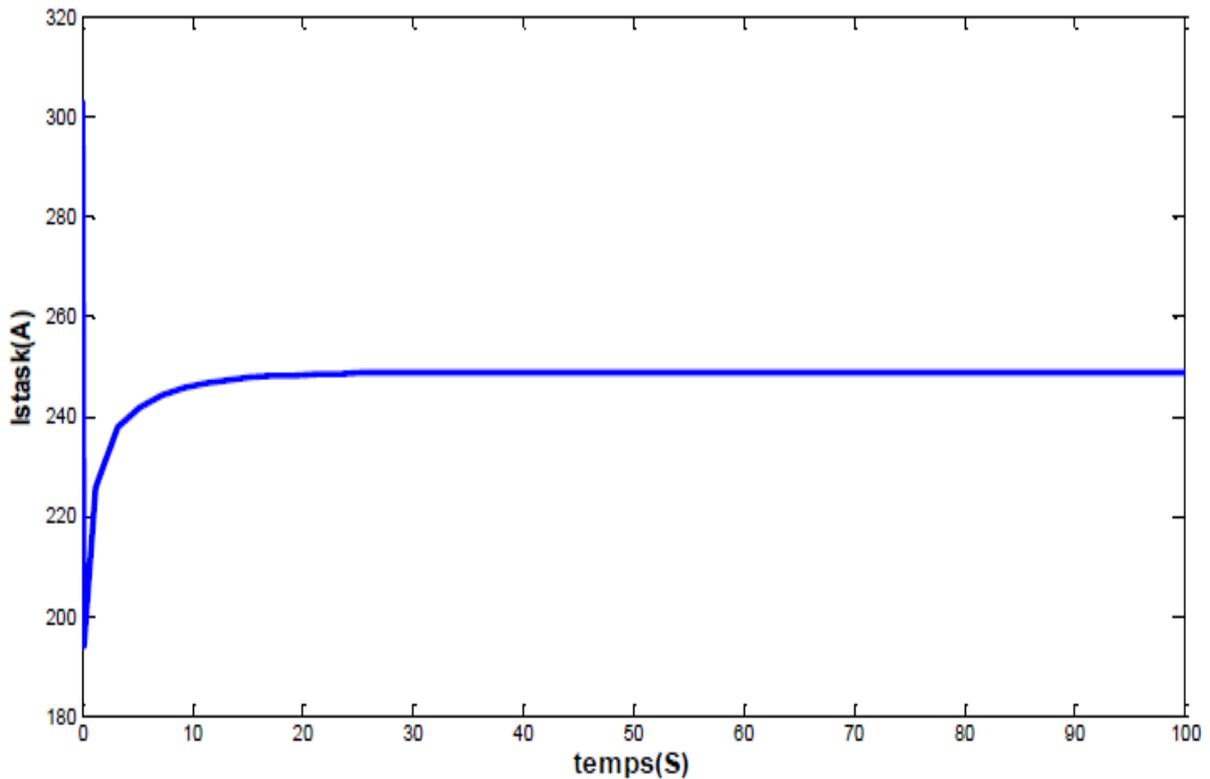


Figure 43 : Variation du courant Istack en fonction du temps

La figure 44 représente la variation de la tension des tous les cellules PEMFC en fonction du temps.

On constat que la pile PEMFC attendre un régime permanant après un temps de 10 sec de 500 volts bus contenue.

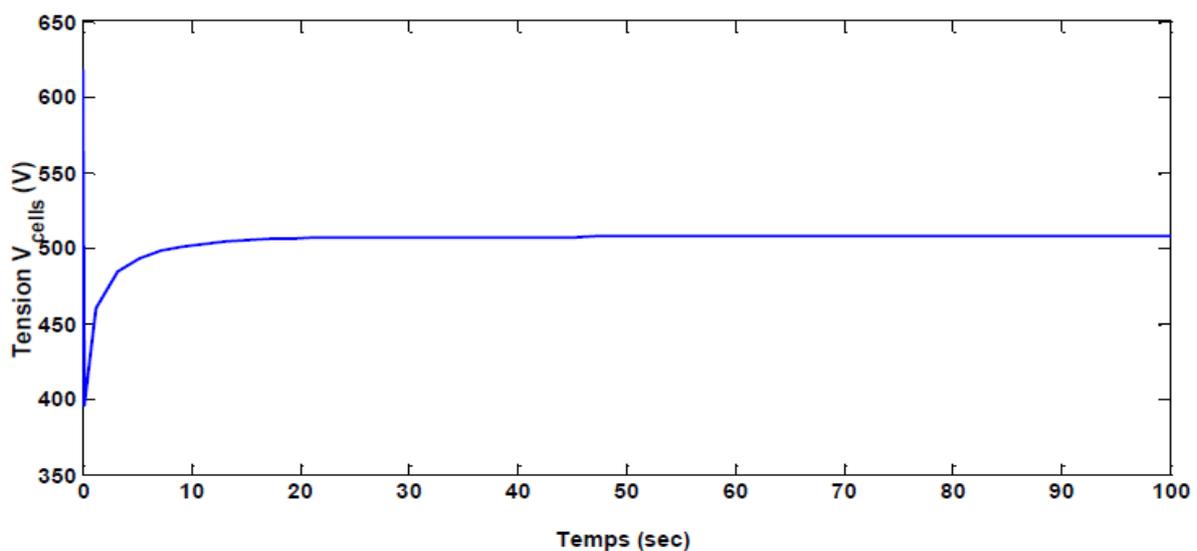


Figure 44 : Variation de la tension Vcell de stacks d'une pile à combustible en fonction du Temps

En fin la puissance au boude de 10 secondes arrive à 100 kw ;

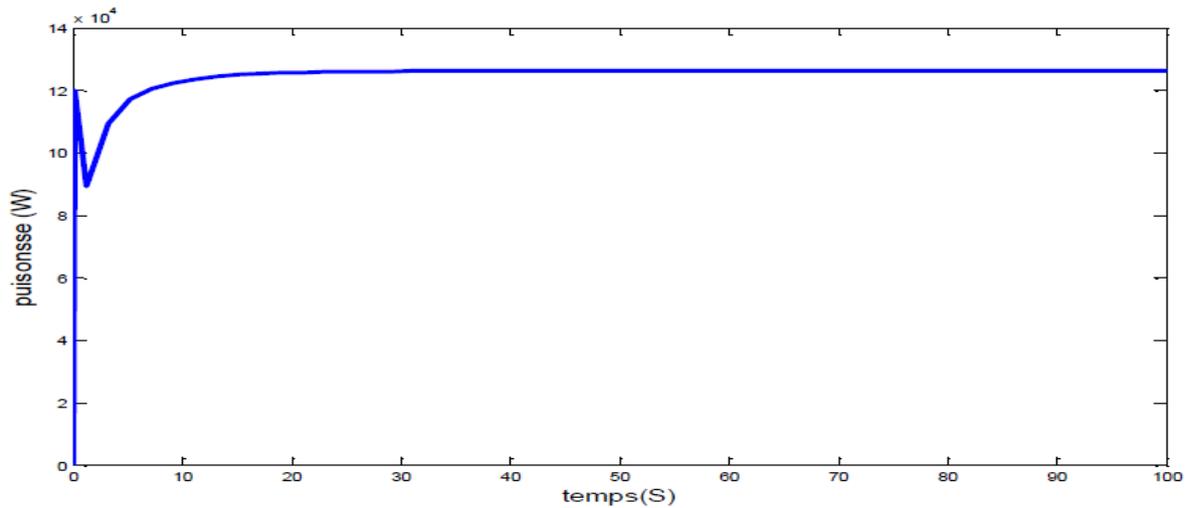


Figure 45 : Variation de la puissance d’une pile à combustible en fonction du temps

Les figures 43, 44 et 45 illustrent la variation du courant, tension et puissance d’une stack de PEMFC en fonction du temps.

On voit que la pile à combustible PEMFC attendre ça régime permanent =240 A, après un temps de 10sec.

2.1.1 Gestion de l’énergie développée par « PEMFC » (convertisseur DC/DC en MPPT) :

La figure 46 représente un contrôle et une gestion optimale d’un système énergétique qui est constitué d’une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) connecté avec une charge à la moyenne d’un hacheur (DC-DC).

Le convertisseur DC/DC alimente la charge avec une puissance contrôlée et suit le point maximum par la technique MPPT(PO).

Les paramètres de convertisseur DC/DC utilisées dans cette simulation est les suivants :

$R_L=100 \Omega$, $R_1=1 \Omega$, $C=2.$, $L=0.01H$.

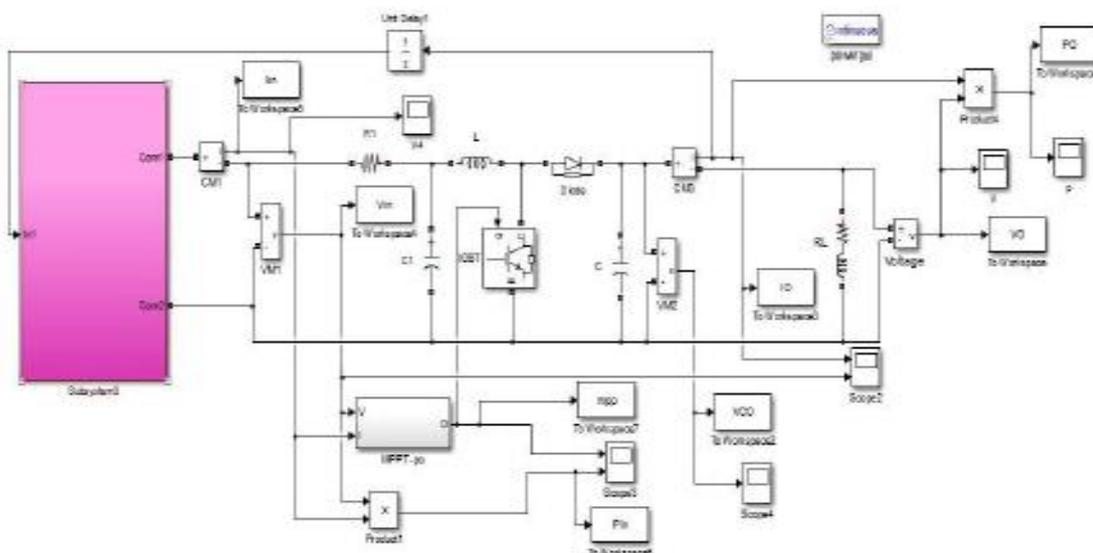


Figure 46 : Structure globale de l’implémentation de la pile PEMFC dans un système

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Dans la figure 47 on représente l'impact du régulateur de tension qui est implanté à l'intérieur du (DC-DC), pour qu'on obtienne une tension stable à 500 volts.

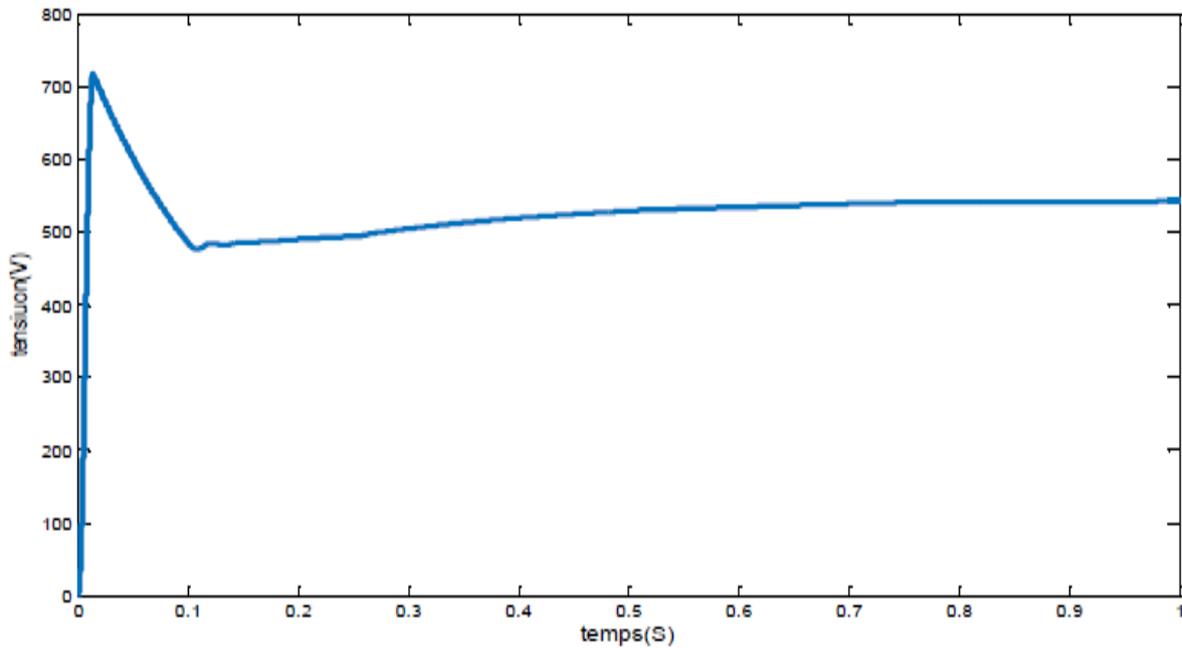


Figure 47 : Variation de la tension de convertisseur DC /DC (Boost)

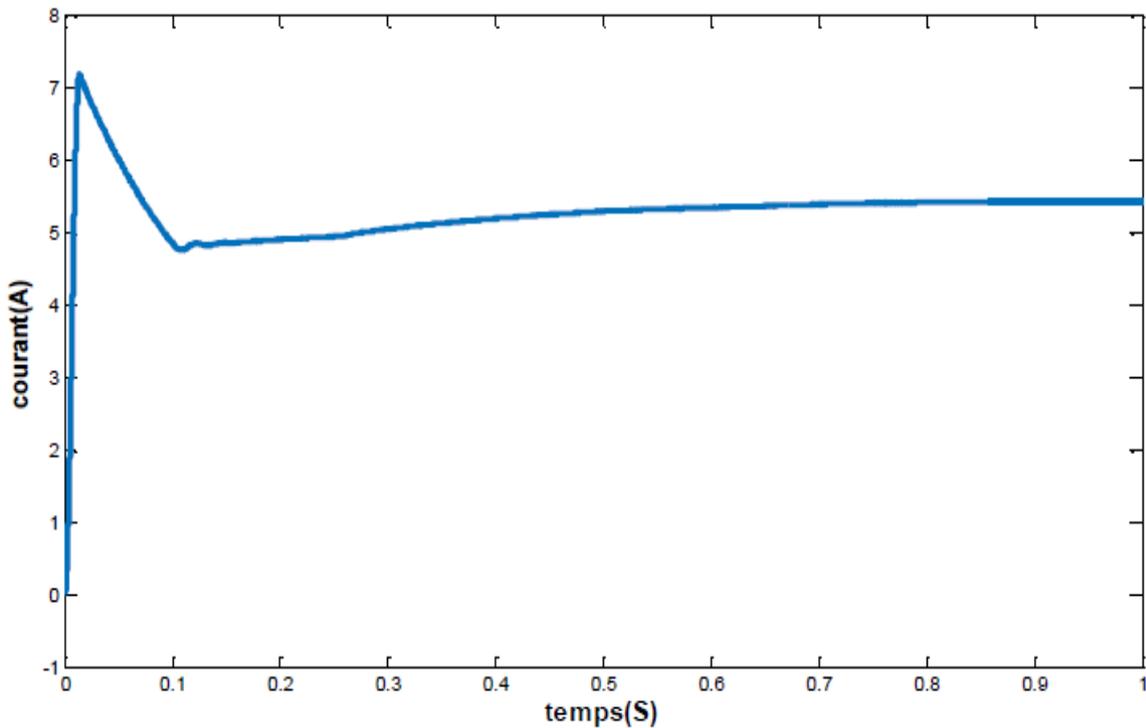


Figure 48 : Variation du courant de convertisseur (boost)

Grâce à la commande MPPT le convertisseur fournit à la charge une tension ou bien puissance stable comme illustré sur la figure 43.

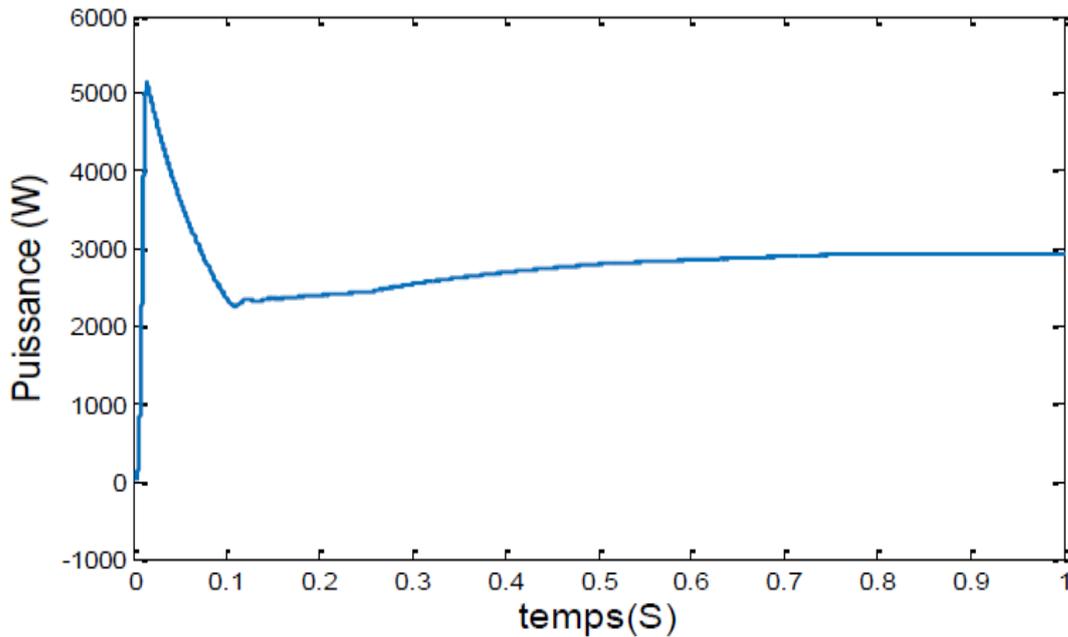


Figure 49 : Variation de la puissance de la charge 5kw (une seule cellule)

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet des performances électrique de pile à combustible. Nous avons conclu que la commande MPPT applique au convertisseur DC/DC permis de maintenir les performances électriques (tension, puissance) de la pile à combustible PEM Stable.

En manipulant ces piles, nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation parce que plusieurs phénomènes contribuent au bon fonctionnement de cette dernière.

La pression et la concentration des gaz réactifs appropriés sont les conditions qui adhèrent au bon fonctionnement de la pile et que tous ces paramètres doivent être optimaux pour obtenir des bonnes performances.

Alors que si nous augmentons la pression , nous obtenons de meilleur transfert de matière qui se traduit par une réduction des polarisations d'activation et de concentration , cela surtout à des fortes densités de courant, mais si elle dépasse un certain seuil elle peut perforer la membrane, c'est pour cela qu'il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses facteurs pour augmenter la conductivité de la membrane et avoir un bon aménagement des fluides et de la chaleur à l'intérieur de la pile.

En fin nous allons voir l'efficacité de l'algorithme MPPT pour maximise la puissance fournir par la pile PEMFC quel que soit la variation des conditions d'opérateur.

2.1 Modélisation de système de panneau photovoltaïque :

Le model est constitué par un panneau PV, une charge résistive et un convertisseur DC/DC commandé par un signal à modulation de largeur impulsion (MLI ou PWM) avec une stratégie de recherche du point de puissance maximal MPPT.

La figure ci-dessous présente le schéma sous Matlab/Simulink d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT ainsi que la commande P.S.O.

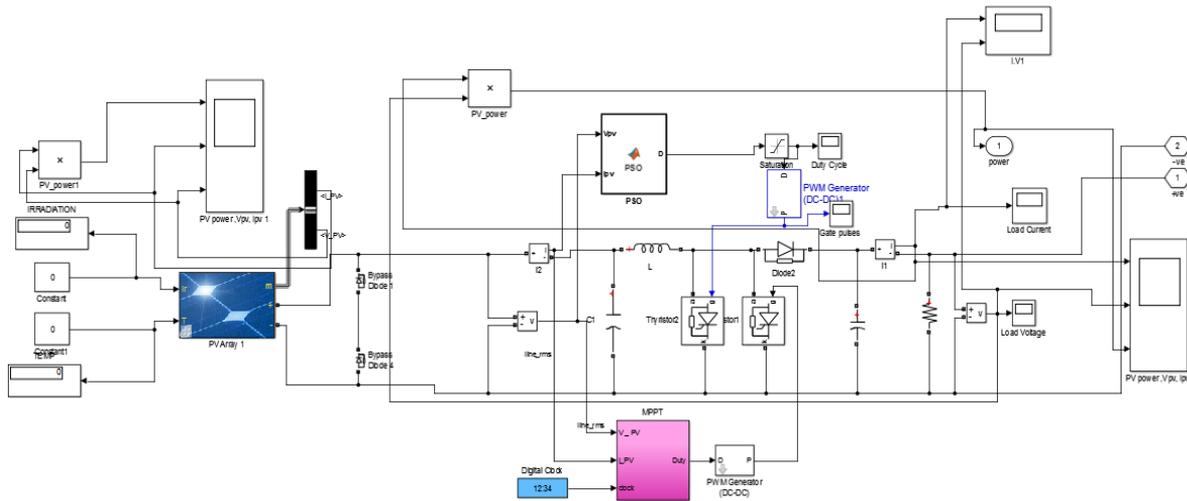


Figure 50 : Architecture du système de production énergie solaire (P.S.O-P.O)

2.1.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques :

Dans ce cas d'étude, nous avons mis en place un module de panneau photovoltaïque composé de 66 cellules solaires qui sont connectées en parallèle de puissance totale égale 100KW. Ce module est couplé à un hacheur parallèle élévateur de type DC-DC. Ce hacheur est contrôlé par des algorithmes de gestion afin d'extraire la puissance électrique maximale du système. Deux algorithmes utilisés sont le **PSO** (optimisation par essaim de particules) et le **PO** (perturbe et observe) avec la technique de suivi du point de puissance maximale (**MPTT**). De plus, une boucle de régulation est présente au niveau du hacheur de commande pour maintenir une tension de 500 volts. Le système de production de l'énergie électrique est composé de :

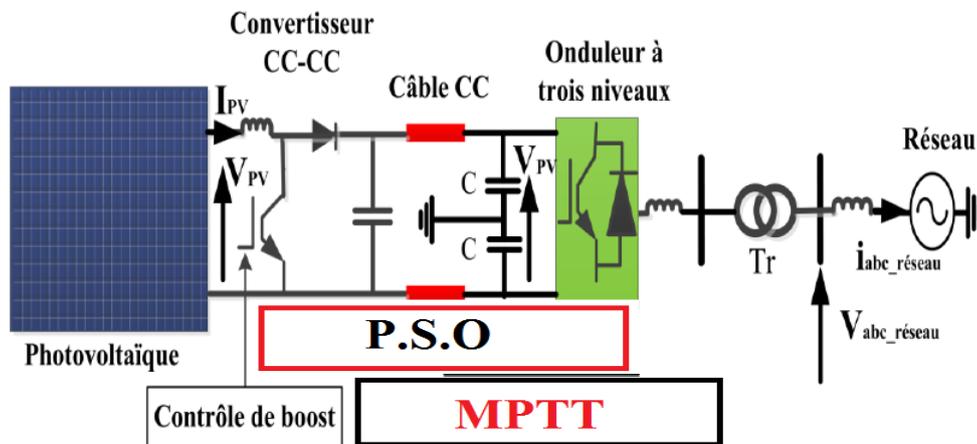


Figure 51 : Système PV connecté au réseau via un convertisseur à trois niveaux

Un modèle de système de production d'énergie électrique basé sur des panneaux photovoltaïques a été développé dans l'environnement logiciel Matlab Simulink.

Nous allons maintenant étudier le comportement de ces cellules solaires en examinant leur sensibilité à l'éclairement, à la température, ainsi que les variations de la "tension-courant" qu'elles délivrent et leur puissance dans différentes conditions climatiques (figure 52).

Tableau 4 : caractéristique du module panneau photovoltaïque

Paramètre	Valeurs
Cellules	66
Série connectée par cellules	5
Max puissance en (W)	339.78
Open circuit voltage voc (V)	51.1
Voltage dans sa max point de puissance (V.M.P)	42
Coefficient de température	-0.36
Courant de court-circuit (A)	9.12
courant dans son maximum puissance (A)	8.09
Diode saturation current (I.0)	3.1647e-10
Facteur de diode ideal	1.0358
resistance Shunt Rsh (ohms)	66.7455
resistance Series Rs (ohms)	0.32744

On représente dans la figure 53 les caractéristiques courant-tension pour un module solaire :

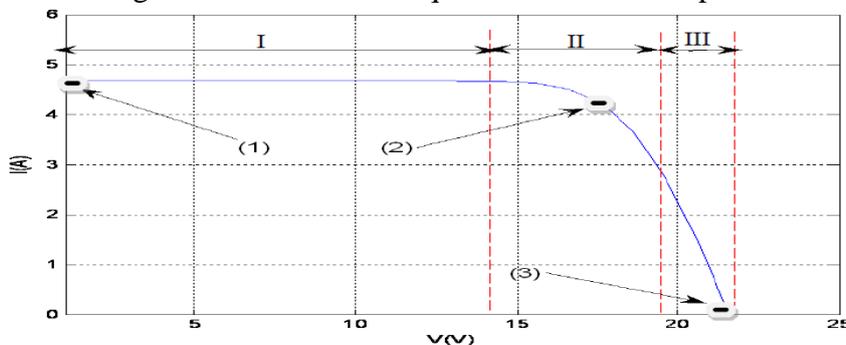


Figure 52 : Caractéristique du module solaire aux conditions standards [20]

Les caractéristiques du module solaire peuvent être divisées en trois intervalles distincts :

- ✓ Intervalle I : le module solaire est considéré comme source de courant, où le courant est constant alors que la tension est variable.
- ✓ Intervalle II : le module solaire n'est considéré ni comme source de courant ni source de tension. Cette partie constitue en fait la zone préférée.
- ✓ Intervalle III : le module solaire est considéré comme une source de tension, où la tension est constante alors que le courant est variable.

3.1.1 Influence de l'éclairement :

La caractéristique (I-V) du module solaire est influencée principalement par la variation de deux paramètres : l'éclairement solaire et la température de la cellule.

Les figures 53 et 54 présentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) pour un module solaire de (5 séries et de 66 panneaux montés en parallèle) ; respectivement pour différents niveaux d'éclairement. On peut observer que le courant de court-circuit varie proportionnellement au niveau d'éclairement, tandis que la tension en circuit ouvert est moins affectée.

Par conséquent, la puissance extraite augmente de manière monotone, comme on peut le constater sur la figure 54.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Array type: 1Soltech 1STH-340-WH;
5 series modules; 66 parallel strings

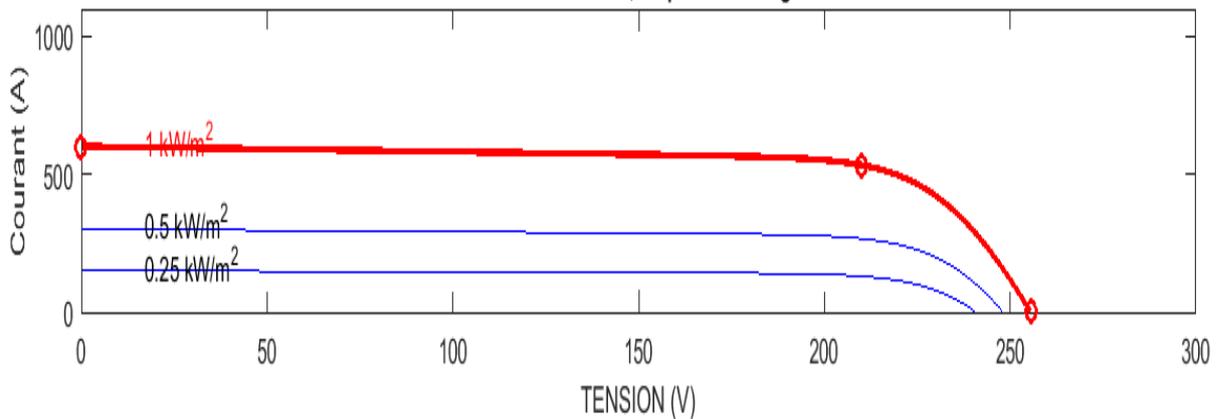


Figure 53 : Caractéristiques (66 cellules) « I-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250] à 25°C

Array type: 1Soltech 1STH-340-WH;
5 series modules; 66 parallel strings

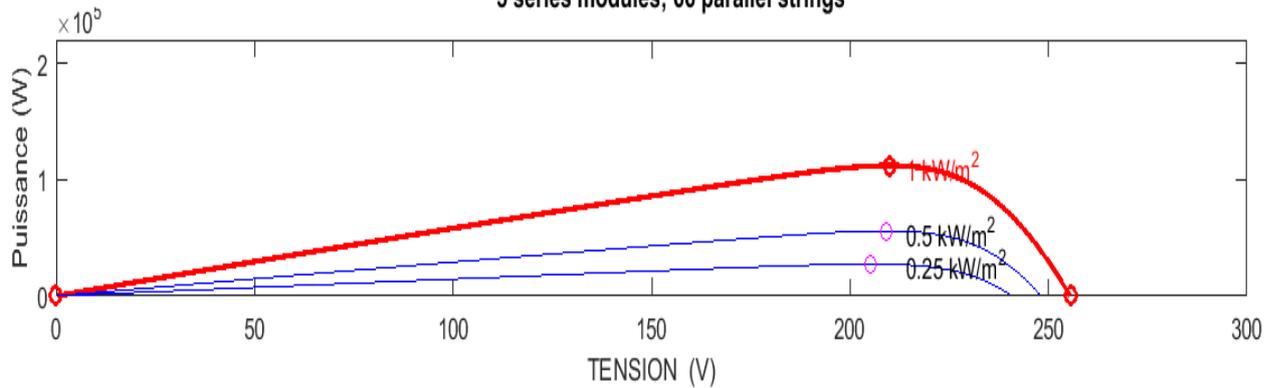


Figure 54 : Caractéristiques (66 cellules) « P-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250] à 25°C

La caractéristiques P-V présentées sur les figures suivantes, met en évidence un point où la puissance produite par les modules PV (1 seul module) est maximale, ce point est appelé point de puissance maximale, PPM. Cette puissance se dégrade en fonction de l'ensoleillement et la température.

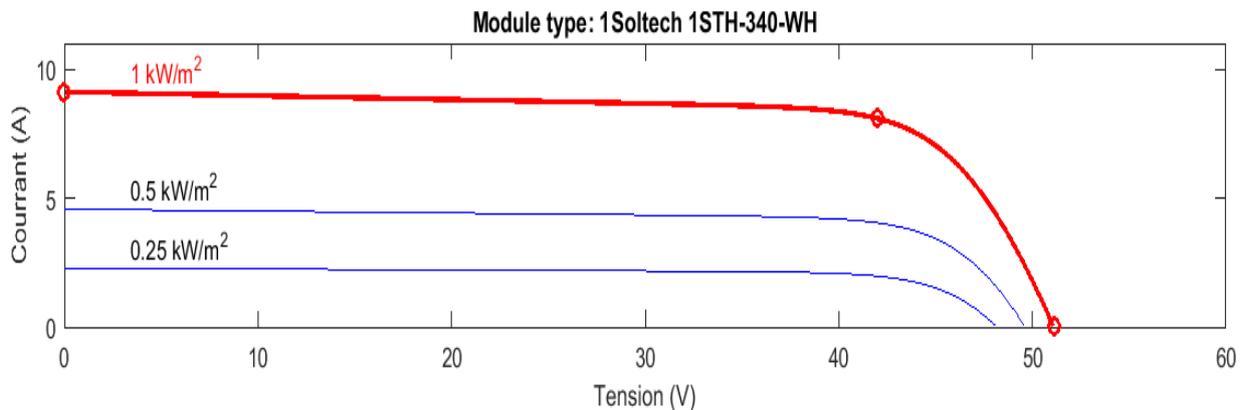


Figure 55 : Caractéristiques (1 cellule) « I-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250 W/m²] à 25°C

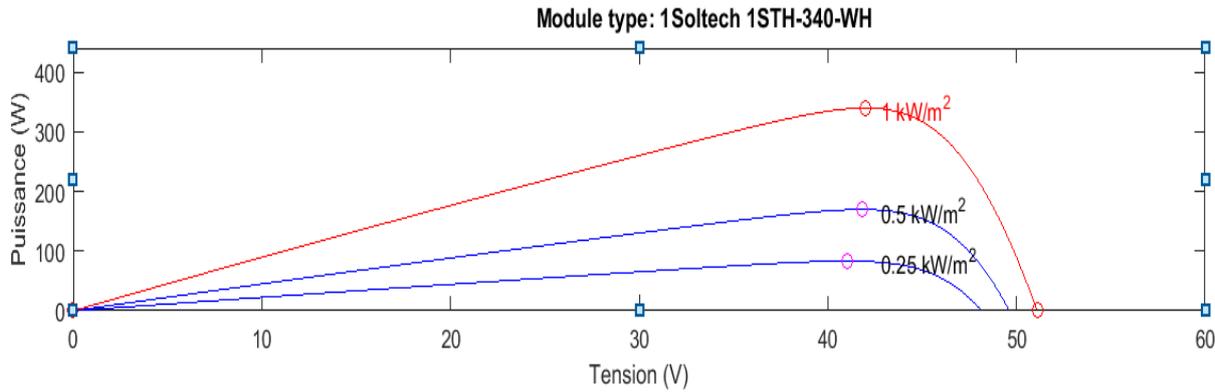


Figure 56 : Caractéristiques (1 cellules) « P-V » avec variation de l'irradiation IRR [1000 500 250 W/m²] à 25°C

Lorsque l'ensoleillement est de 1000W/m², la puissance maximale du champ PV est de 340W. Lorsque l'ensoleillement est de 500W/m², la puissance maximale du champ PV est de 200W. Enfin, lorsque l'ensoleillement est de 250W/m², la puissance maximale du champ PV est de 50W. On observe donc que la puissance maximale du champ PV augmente proportionnellement à l'ensoleillement.

De manière similaire, le courant du champ PV suit la même tendance. Plus l'ensoleillement n'est élevé, plus le courant du champ PV sera élevé. Ainsi, le courant croît avec l'éclairement, ce qui est cohérent avec la puissance maximale croissante du champ PV.

3.1.2 Influence de la température :

De manière analogue, les figures 57 et 58 illustrent les comportements similaires du module PV pour une augmentation graduelle de la température de la cellule, tandis que le niveau d'éclairement est maintenu constant à sa valeur standard de 1000 W/m². On observe une légère augmentation du courant avec l'augmentation de la température, due à une absorption accrue de la lumière. Cependant, la tension en circuit ouvert a tendance à diminuer à mesure que la température augmente, ce qui entraîne une diminution de la puissance extraite.

Afin d'observer l'influence de la température, les courbes caractéristiques I-V et P-V du champ PV ont été tracées pour une irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et différentes températures. Ces courbes sont présentées sur la figure suivante :

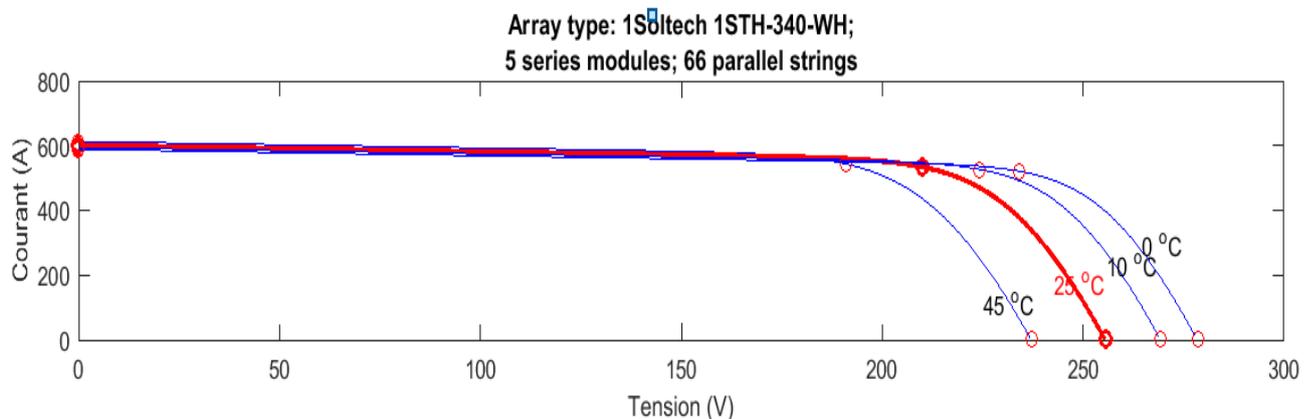


Figure 57 : caractéristique [I-V] panneau photovoltaïque à 1 KW/M² C° à température variable [45° 25° 10° 0°]

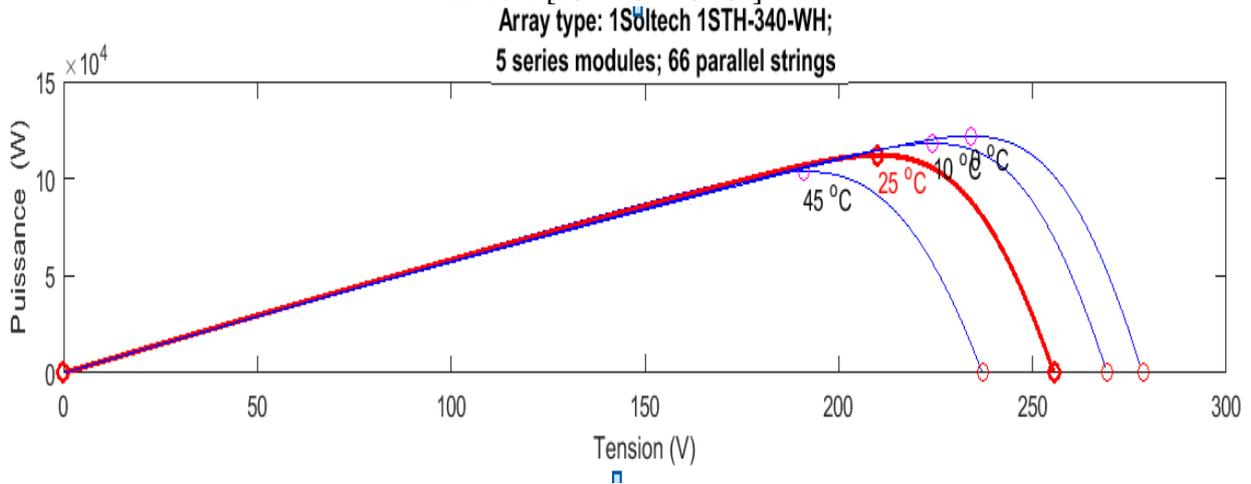


Figure 58 : caractéristique [P-V] panneau photovoltaïque à 1 KW/M² C° à température variable [45° 25° 10° 0°]

Lorsque la température est de 45°C, la tension maximale du champ PV est de 220V. Lorsque la température est de 25°C, la tension maximale du champ PV est de 270V. Lorsque la température est de 10°C, la tension maximale du champ PV est de 300V. Enfin, lorsque la température est de 0°C, la tension maximale du champ PV est de 280V. Ainsi, on observe que la tension décroît lorsque la température augmente.

De même, la puissance maximale du champ PV suit la même tendance. Elle décroît avec la température. Il est important de noter que lorsque la température est de 25°C, la puissance maximale du champ PV atteint 100 kW, correspondant à la puissance maximale au point de puissance maximale (PMPP). Cette valeur de puissance maximale est obtenue à une température optimale.

Ces observations mettent en évidence l'influence significative de la température sur les performances du champ PV, notamment sur la tension et la puissance maximales. Il est donc essentiel de prendre en compte les variations de température lors de la conception et de l'exploitation des systèmes photovoltaïques.

Pour démontrer la pertinence de l'utilisation du convertisseur boost, nous avons étudié l'évolution de la puissance du champ PV en fonction du temps dans deux configurations différentes : lorsque la charge est directement connectée au champ PV et lorsque l'on intercale le convertisseur boost entre le champ PV et la charge.

3.1.3 Résultat de simulation :

a. sans intervention du hacheur :

Les résultats des simulations sont illustrés respectivement dans les Figures 59, 60 et 61. Dans cette configuration, la charge est directement connectée aux panneaux photovoltaïques sans l'intervention d'un hacheur ni l'utilisation des algorithmes PSO ou P&O.

En examinant les Figures 59, 60 et 61, on peut observer les consommations de puissance pour les intervalles de temps suivants : $t = [0s, 0.6s]$, $t = [0.6s, 1.2s]$ et $t = [1.2s, 2s]$. Les valeurs correspondantes sont de 60 kW, 80 kW et 110 kW respectivement pour des niveaux d'irradiation $G = 600 \text{ W/m}^2$, 800 W/m^2 et 1000 W/m^2 , à une température fixée à 25°C.

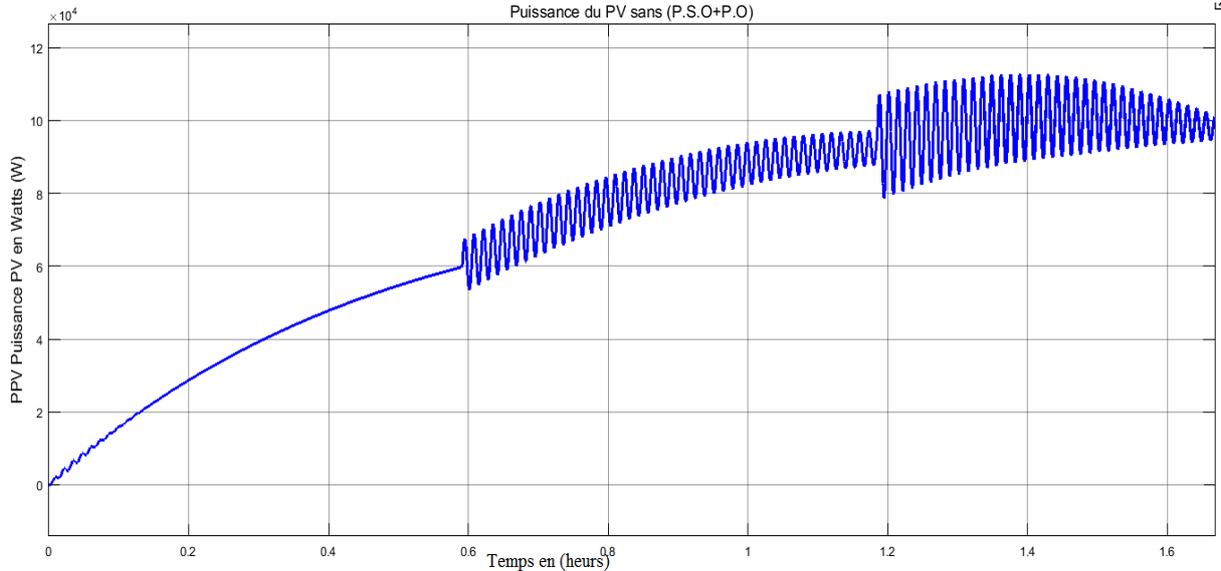


Figure 59 : Caractéristique de puissance sans la commande (MPPT P&O et P.S.O)

En analysant les Figures 60, 61,62, nous pouvons constater que les puissances consommées pendant les intervalles de temps suivants : $t = [0s, 0.6s]$, $t = [0.6s, 1.2s]$ et $t = [1.2s, 2s]$. Les valeurs correspondantes sont respectivement de 500volts, 550volts et 580volts, pour des niveaux d'irradiation $G = 600 \text{ W/m}^2$, 800 W/m^2 et 1000 W/m^2 , à une température fixée à 25°C . Et que la tension ne pas stable ni en termes de repense même en termes de valeurs souhaitée.

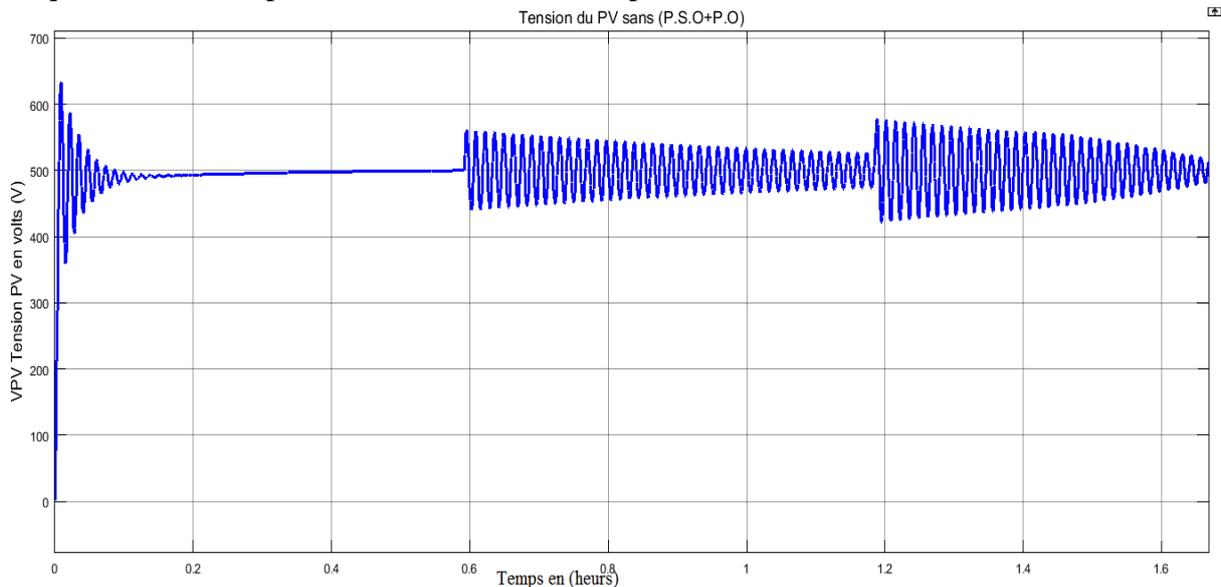


Figure 60 : Caractéristique de tension sans la commande (MPPT P&O et P.S.O)

D'après la Figure 61 on remarque pendant les intervalles de temps $t = [0s, 0.8s]$, $t = [0.8s, 1.2s]$ et $t = [1.2s, 2s]$, nous observons que les valeurs du courant (I) sont respectivement de (120A), (180A) et (200A) pour des niveaux d'irradiation $G = 600\text{W/m}^2$, 800W/m^2 et 1000W/m^2 , et une température fixée à 25°C .

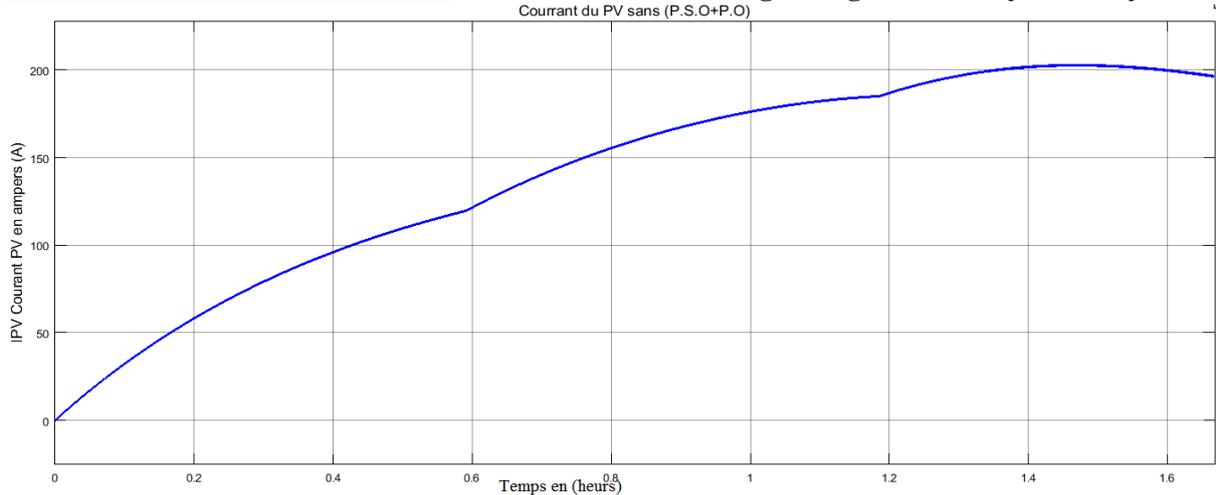


Figure 61 : Caractéristique du courant sans la commande (MPPT P&O et P.S.O)

On peut noter que sans l'utilisation du convertisseur boost et des algorithmes de gestion de puissance tels que PSO ou P&O, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est directement utilisée par la charge sans aucune régulation ou optimisation supplémentaire.

En outre, lorsque la charge est directement connectée au champ PV, la puissance du champ PV dépend directement des conditions d'ensoleillement et de la charge elle-même. Cependant, cette configuration peut présenter certaines limitations en termes d'adaptation de la tension et de la puissance.

b. Les résultats avec l'intervention du hacheur :

La tension reste stable à 500 volts, indépendamment des variations d'éclairement (irradiation), grâce à une boucle de régulation. Cette boucle de régulation assure le maintien de la tension à une valeur constante en ajustant la conversion de l'énergie solaire ou éolienne pour répondre aux besoins du système. Ainsi, même lorsque l'irradiation varie, la boucle de régulation réagit en ajustant les paramètres du convertisseur DC-DC pour maintenir la tension de sortie constante à 500 volts. Cela garantit une alimentation stable et fiable pour les composants du système hybride et permet leur bon fonctionnement.

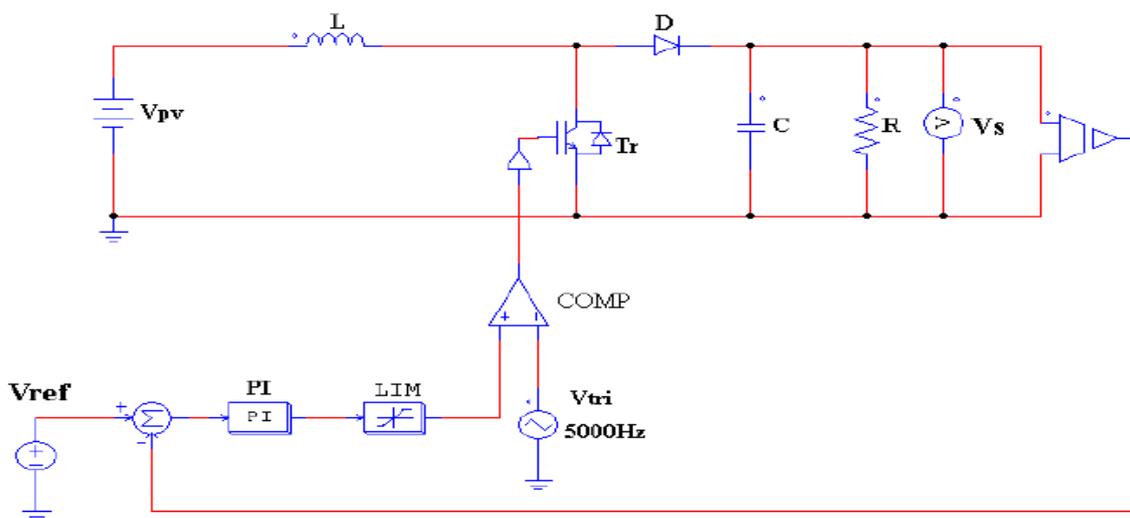


Figure 62 : Bloc régulation tension

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Après avoir modélisé le champ PV et connecté celui-ci au convertisseur boost, nous avons procédé à la simulation de son fonctionnement en utilisant le logiciel Simulink. Nous avons intégré une commande MPPT en utilisant des blocs programmés spécifiquement dans Simulink. Cette commande MPPT permet d'optimiser la puissance de sortie du champ PV en ajustant en temps réel les paramètres du convertisseur boost. Ainsi, nous avons pu évaluer et analyser les performances du système en termes d'efficacité énergétique et de suivi de point de puissance maximale.

Les Figures 63 et 64 illustrent les variations du courant, de la tension et de la puissance du système photovoltaïque pour différentes valeurs d'irradiation solaire, avec une température fixée à 25°C. Ces résultats sont obtenus grâce à l'intégration d'une boucle de régulation de bus DC et à l'exploitation des algorithmes MPPT.

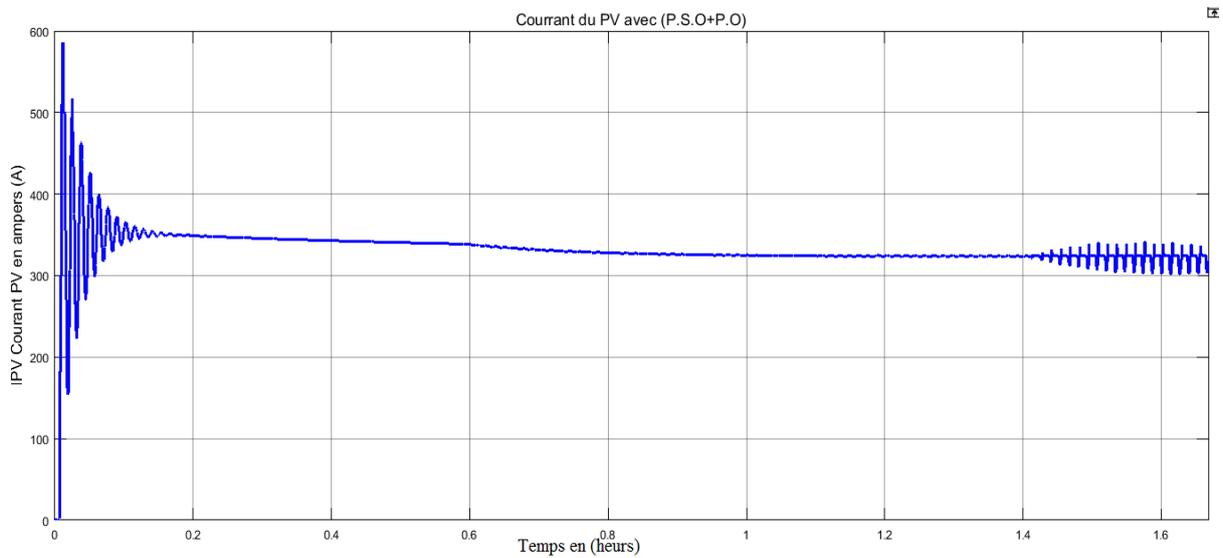


Figure 63 : Caractéristique du courant avec la commande (P.O et P.S.O)

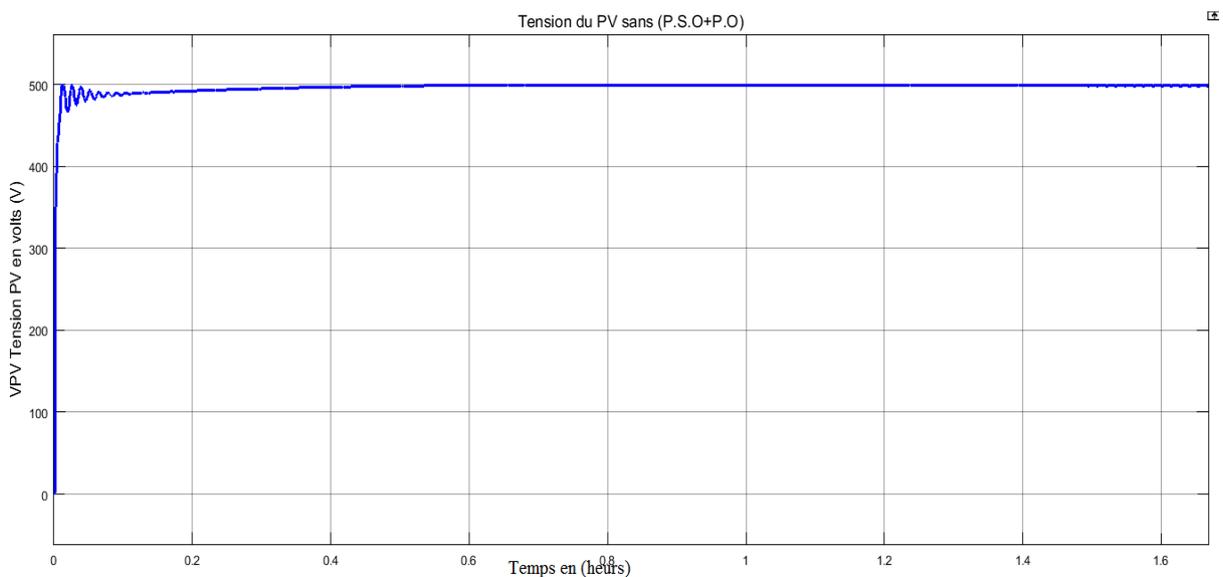


Figure 64 : Caractéristique de tension avec la commande (P.O et P.S.O)

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

L'algorithme MPPT permet de suivre le point de puissance maximale du système photovoltaïque en ajustant en temps réel les paramètres de fonctionnement du convertisseur boost. Cela permet d'optimiser la production d'énergie solaire en extrayant le maximum de puissance disponible à partir des panneaux photovoltaïques.

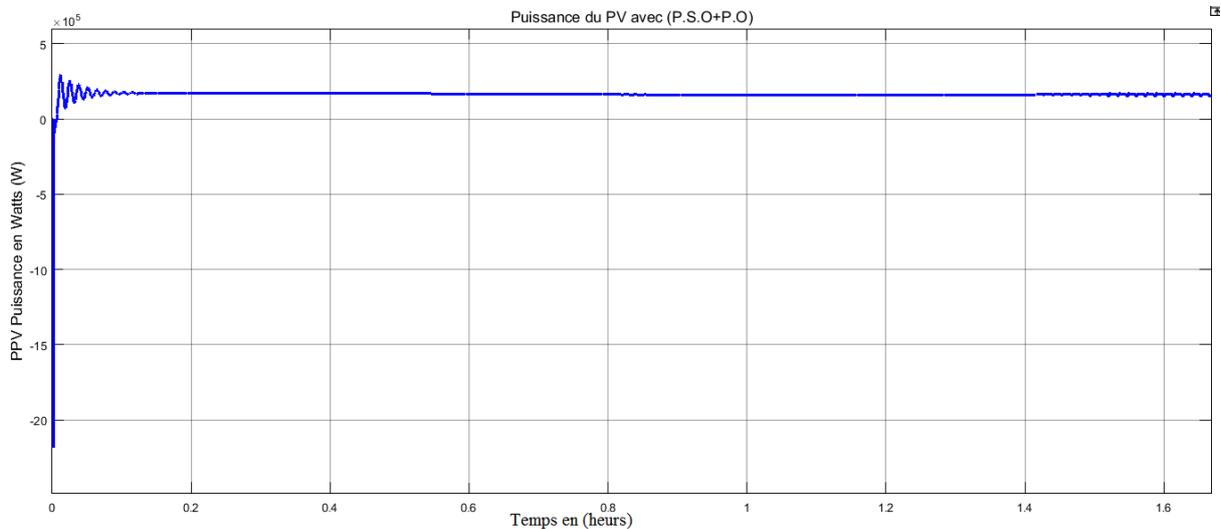


Figure 65 : Caractéristique de la puissance avec la commande (P.O et P.S.O)

Les Figures montre que, grâce à l'intégration de la boucle de régulation de bus DC et à l'utilisation de l'algorithme MPPT, le courant, la tension et la puissance du système photovoltaïque sont ajustés en fonction de l'irradiation solaire. On peut observer que lorsque l'irradiation solaire augmente, le système réagit en augmentant le courant, la tension et la puissance pour exploiter au maximum l'énergie solaire disponible.

Cela démontre l'efficacité de la boucle de régulation de bus DC et de l'algorithme MPPT dans l'optimisation des performances du système photovoltaïque, en garantissant une production d'énergie maximale même dans des conditions variables d'irradiation solaire.

Les Figures 63, 64, 65 offrent une représentation visuelle des résultats, permettant de mieux comprendre l'impact de l'intégration de la régulation de bus DC et des algorithmes MPPT sur les performances du système photovoltaïque.

En intercalant le convertisseur boost entre le champ PV et la charge, on peut observer une amélioration significative de la gestion de la puissance.

Le convertisseur boost permet d'ajuster et de réguler la tension de sortie du champ PV, ce qui permet une meilleure adaptation aux exigences de la charge.

Il permet également d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en fournissant une tension et une puissance plus stables et contrôlées.

En étudiant l'évolution de la puissance du champ PV en fonction du temps dans les deux configurations, nous pouvons observer une meilleure stabilité et régulation de la puissance lorsque le convertisseur boost est utilisé.

Cela démontre la pertinence de l'utilisation du convertisseur boost pour améliorer les performances du système photovoltaïque et optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.

3.1.4 Les algorithmes élaborés pour la commande du système solaire :

a. Algorithme de gestion (PSO) :

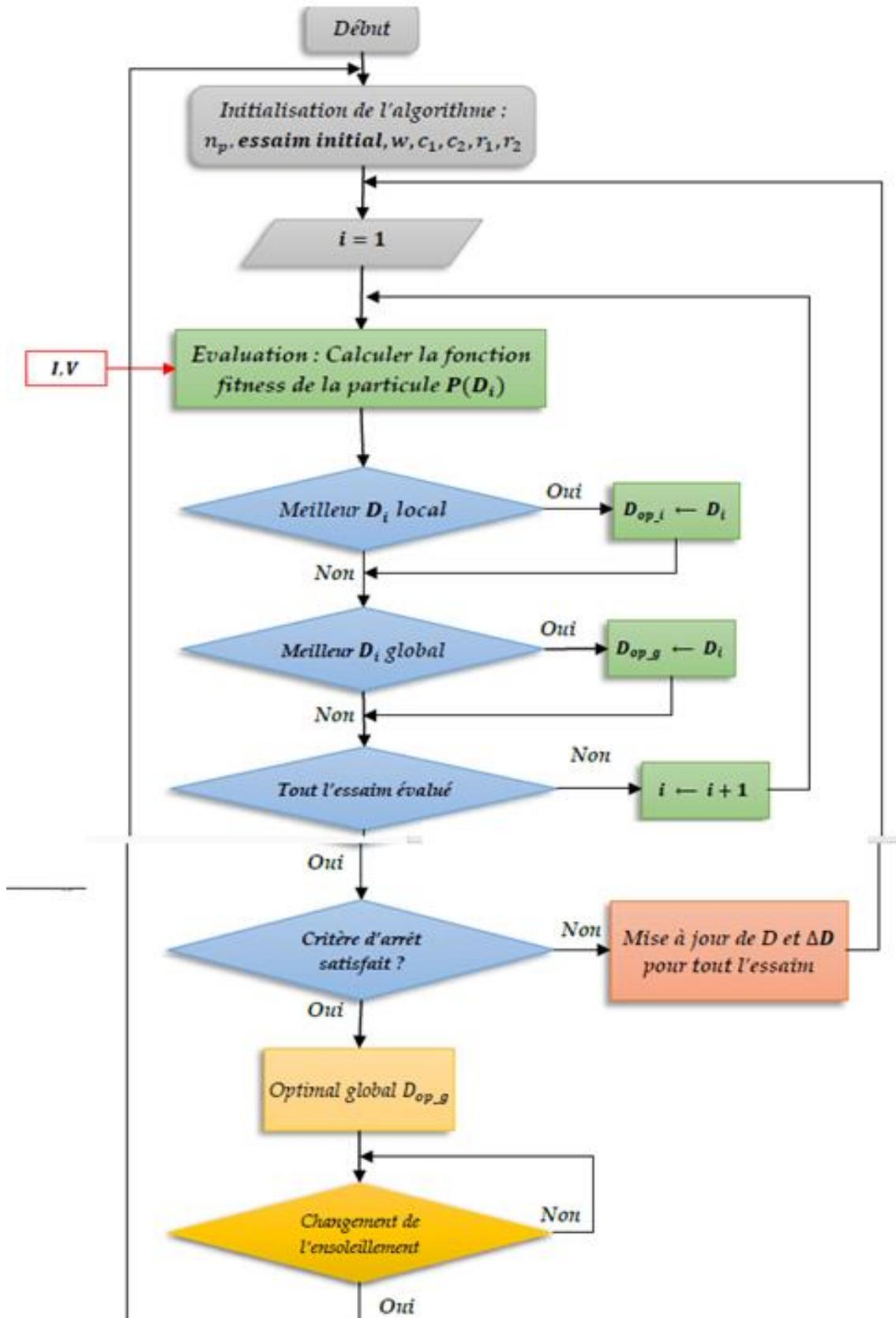


Figure 66 : organigramme d'algorithme de PSO [21]

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Les étapes de l'algorithme se résument en ce qui suit :

- **Etape 1** : Initialisation de l'algorithme ; les particules (les valeurs initiales de D et ΔD) sont générées d'une façon aléatoire sur l'espace de travail (nombre de particules n_p de l'essaim). Les constantes d'optimisation (w , c_1 , c_2 , r_1 , r_2) sont aussi définies dans cette étape, ces constantes définissent le comportement de l'évolution de l'algorithme et nécessitent une bonne connaissance du système [22].

- **Etape 2** : Evaluation des particules :

Chaque rapport cyclique est appliqué au convertisseur, la tension et le courant correspondants seront récupérés et la puissance de chaque particule est calculée.

Cette puissance est plus grande pour un rapport cyclique optimal [22].

- **Etape 3** : Mettre à jour la position optimale locale et globale :

Si le rapport cyclique d'une particule donne la meilleure puissance de son parcours alors ce rapport sera enregistré tant que l'optimum local D_{op_i} , et s'il donne la plus grande puissance que celles obtenues par les autres particules alors il devient l'optimum global D_{op_g} [22].

- **Etape 4** : Mettre à jour D et ΔD

Si le critère d'arrêt est satisfait alors le meilleur rapport cyclique D_{op_g} est utilisé sinon une optimisation de D et ΔD [26].

S'il n'y a pas de changement dans l'éclairement le PPM ne change pas, il est donc inutile de perturber le système d'une manière continue à la recherche d'un nouveau PPM, pour cela un étage est inséré dans le logigramme pour tester le changement dans l'ensoleillement [22].

b. Algorithme de gestion (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du champ photovoltaïque V et I respectivement.

Cette méthode opère en perturbant périodiquement la tension du champ PV, et en comparant la puissance précédemment fournie avec la nouvelle après perturbation.

Cette méthode permet de retrouver le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température.

La Figure suivantes représente l'algorithme de la méthode P&O.

Après avoir modélisé le champ PV et connecté celui-ci au convertisseur boost, nous avons effectué la simulation de son fonctionnement. Pour cela nous avons implémenté les modèles obtenus dans Simulink. Une commande MPPT a été insérée à l'aide des blocs programmés sous Simulink.

La commande MPPT permet de se situer à tout moment de l'ensoleillement à la puissance maximale de notre système PV. Pour simuler la puissance maximale, nous avons d'abord connecté notre système PV directement à la charge, puis nous avons par la suite connecté entre la charge et le système PV le convertisseur boost commandé par le MPPT [22].

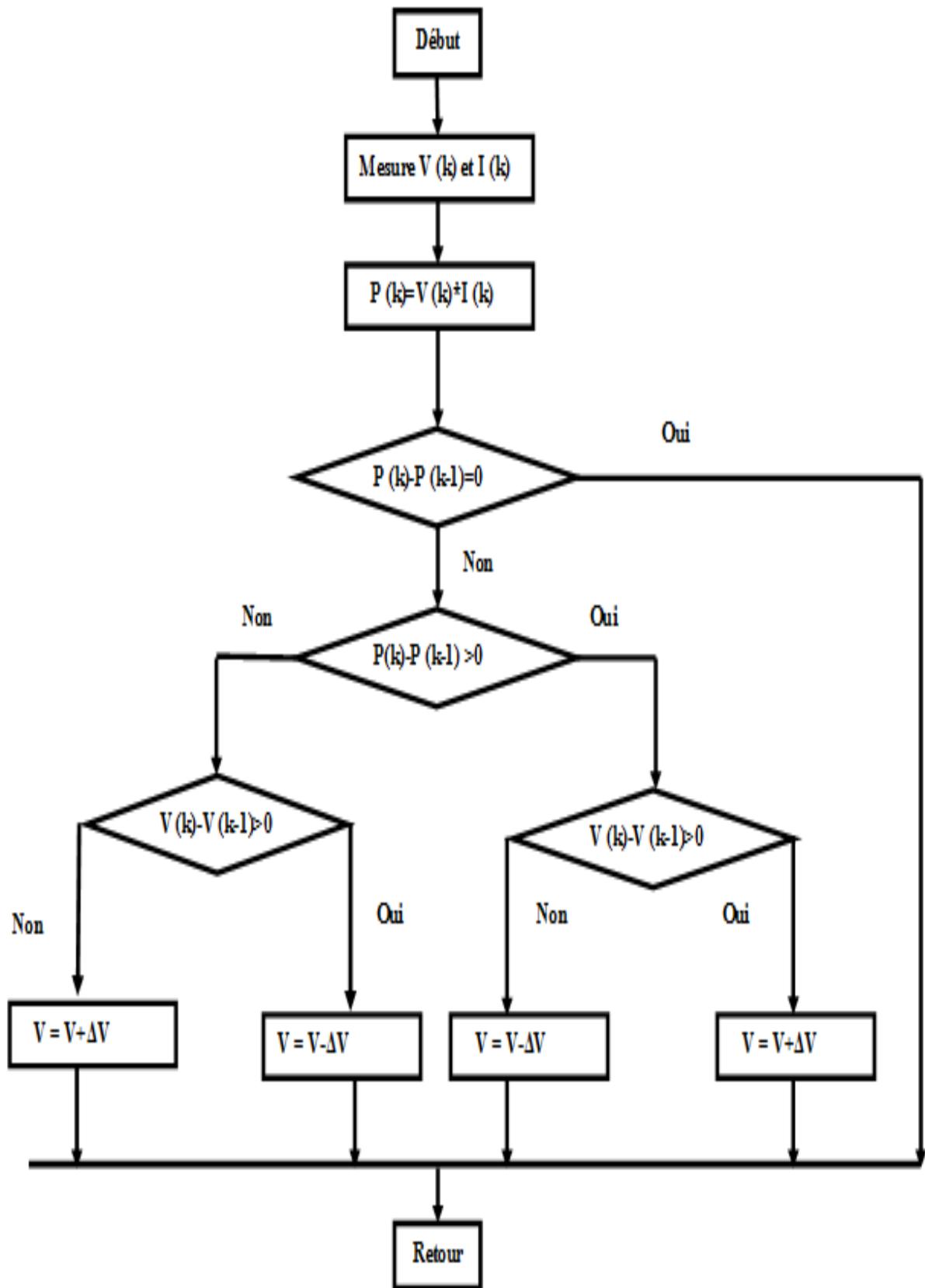


Figure 67 : algorithme P&O [22]

4. Modélisation de la Batterie de Stockage :

4.1 Caractéristique de la batterie :

La cellule phosphate de fer de 50 Ah est testée avec des différents courants de décharge de (10, 20, 30,40 et 50 A).

Une tension début a diminué de 3.65 V à une tension de fin de décharge à 2.5 avec une tension d'erreur plus au moins de 50 mV.

La figure (68-69) présente la simulation de cellule pour différente courant de la batterie :

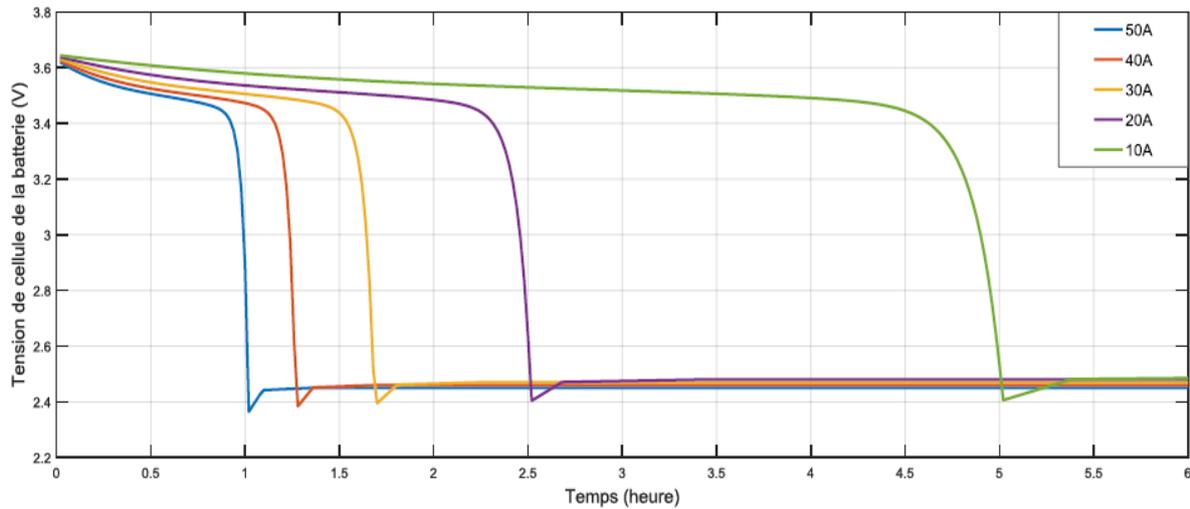


Figure 68:Caractéristiques de décharge de cellule de la batterie

L'assemblage 16S1Ps des cellules phosphate de fer donne les caractéristiques de décharge de La batterie (500V, 50 Ah) pour différente courante de la batterie (10, 20, 30, 40 et 50 Ampères).

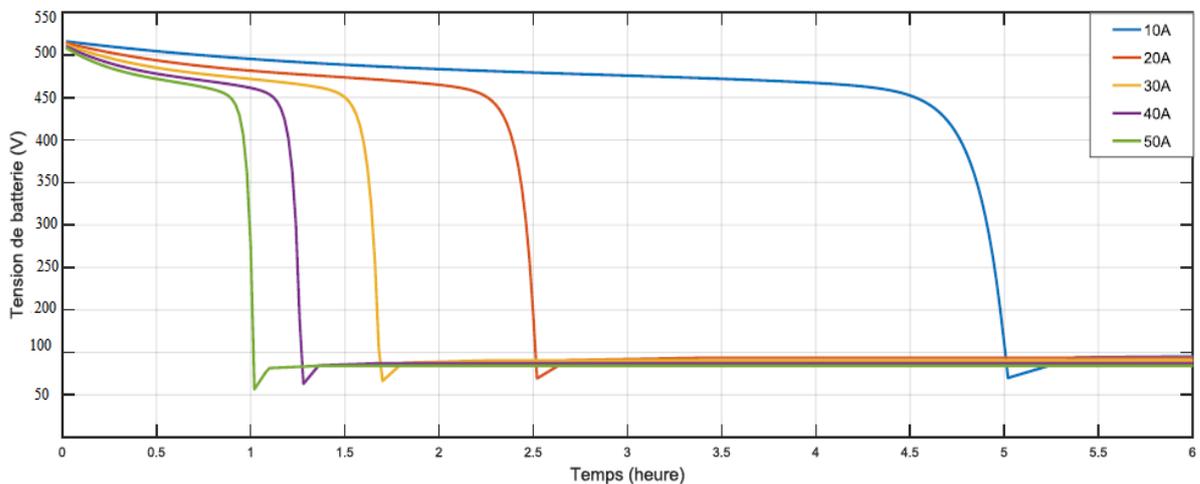


Figure 69 : Caractéristiques de décharge de cellule de la batterie (500volts-50Ah)

4.2 Méthode de modélisation de la batterie de stockage :

Ce système hybride qui est composée de quatre sources énergétiques (deux renouvelable un « panneau photovoltaïque de 50kw, un éoliennes de 40kw » et deux non renouvelable « réseau triphasée 200KW, pile à combustible 100KW) est une source d'énergie intermittente, donc pour assurer la continuité de production d'énergie au consommateur, un système de stockage est nécessaire.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Ce dernier permet d'améliorer le rendement énergétique et d'injecter l'énergie pendant les périodes nécessaires (sans soleil-sans éoliennes) est une implantation de batterie de stockage Lithium-ions de (500volts-50ah).

La détermination de la taille de batterie se fait selon l'équation suivante :

$$C_{tot} = \frac{Ec \times Aut}{Vu \times \eta b \times DOD} \quad (2.25)$$

Avec :

- ✓ Ec : Les besoin énergétique journaliers (Wh)
- ✓ Aut : Le nombre de jour d'autonomie (1 jour)
- ✓ Vu : Tension d'utilisation (V)
- ✓ DOD : Profondeur de décharge de la batterie (0.8)
- ✓ ηb : Rendement énergétique de la batterie est le rapport entre l'énergie fournie lors de la décharge (E_d) et l'énergie fournie pendant la charge (E_c) comme le montre l'équation ci-dessous : $C_{TOT} = E_d/E_c = 95.68 \%$.

Après la détermination de la capacité totale de la batterie, Le nombre des batteries nécessaire est donné par l'équation :

$$N_b = N_{bs} N_{bp} \quad (2.26)$$

Avec :

- ✓ N_{bs} : Le nombre des batteries en série.
- ✓ N_{bp} : Le nombre des batteries en parallèles.
- ✓ Le nombre des batteries en séries est donné par l'équation : $NBS = V_U/V_B$ avec V_B : La tension d'une seule batterie (V).
- ✓ Le nombre des batteries en parallèle est donné par l'équation : $Nb = C_{tot}/C_b$ avec : C_b = Capacité d'une seul batterie (Ah);

4.3 Caractéristiques de la batterie :

Dans la figure 70 les caractéristiques de la batterie de 500 volts-50Ah sont établies dans les différentes phases de chargement et de déchargement selon les étapes suivantes :

- ✓ On a fixé la décharge de la batterie à 20% et la charge à 80%.
- ✓ On constate au début de la décharge la tension chute à cause de la résistance interne de l'accumulateur qui est faible au début, suivie d'une zone nominale qui dure plus longtemps. Cette zone s'appelle aussi zone de polarisation ohmique dans laquelle l'influence de la résistance interne reste constante, Finalement, une chute de tension.
- ✓ Au début de la charge on constate que la tension augmente à nouveau.

Le modèle développé de la batterie est simulé avec des différents courants et on remarque que la batterie se décharge rapidement quand le courant est élevé.

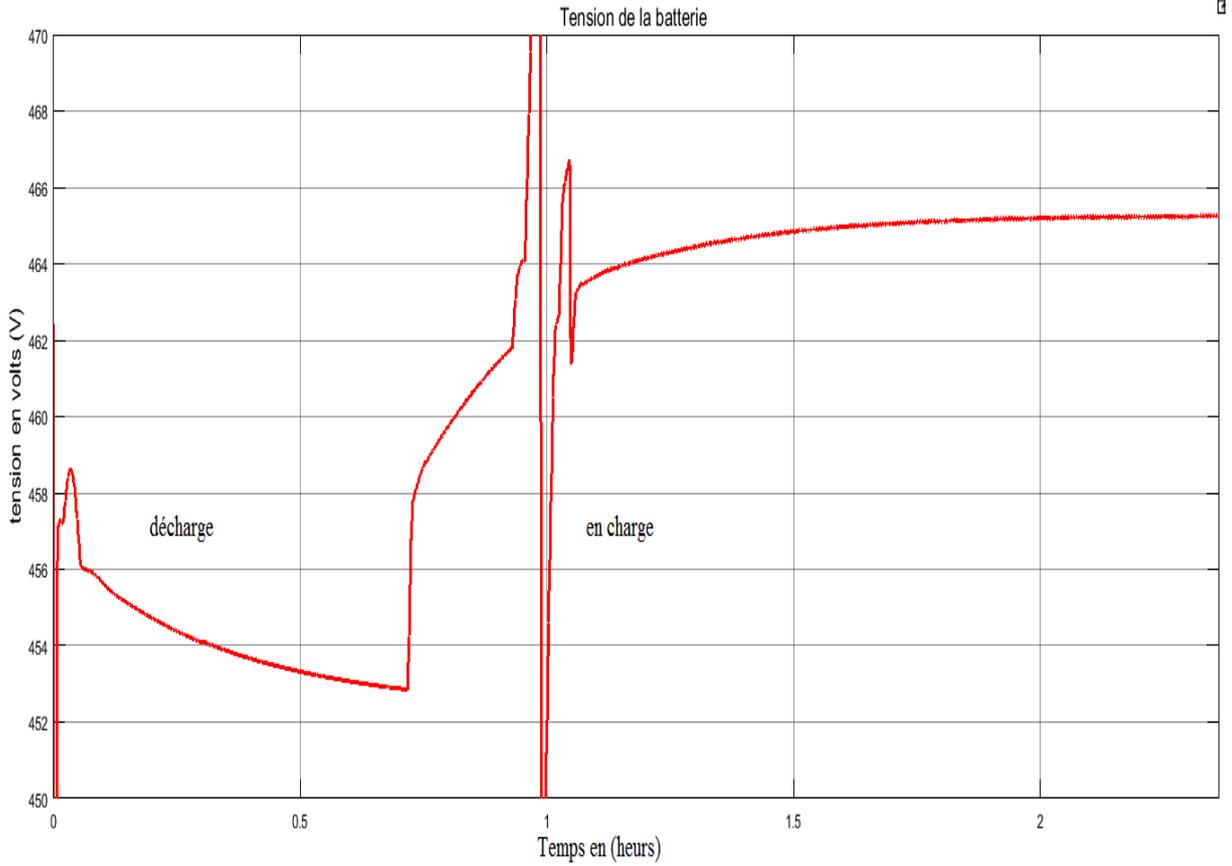


Figure 70 : Evolution de la tension de la batterie en (charge-décharge)

La figure suivante représente l'état de la batterie :

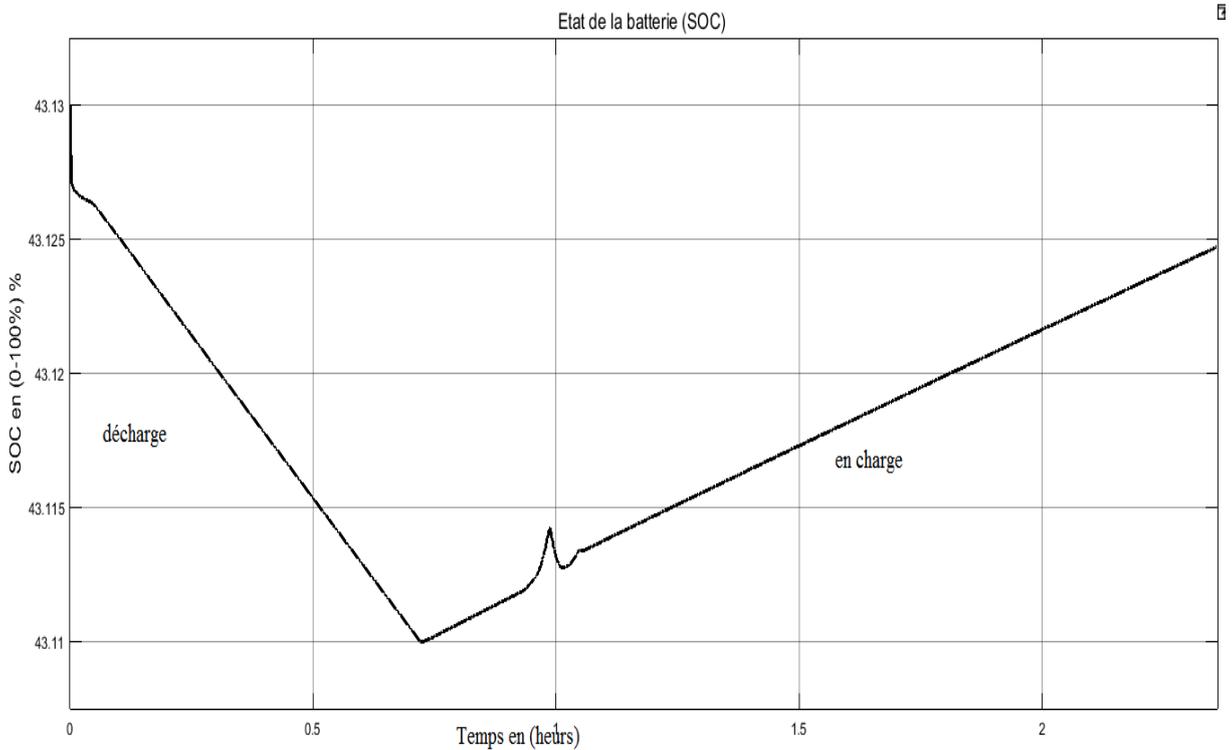


Figure 71 : SOC du système de batterie sous variation de la charge en (charge-décharge)

Figure 72 représente l'allure du courant de la batterie en mode charge ainsi qu'en mode décharge :

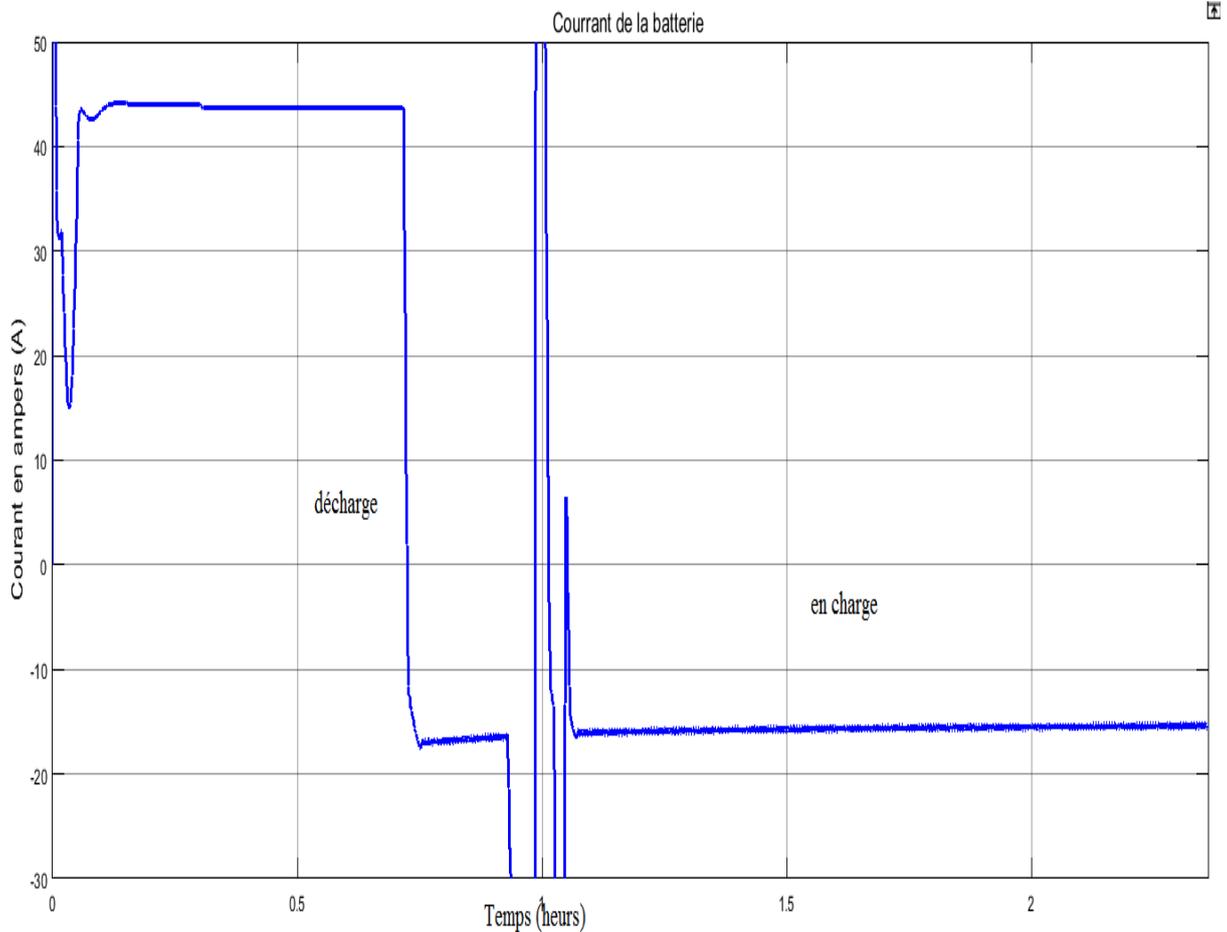


Figure 72 : Evolution du courant de la batterie en (charge-décharge)

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la configuration du système hybride d'étude, ainsi que les modèles analytiques associés à chaque composant, à savoir les panneaux solaires de 100 kWh, la batterie de stockage de 25 kWh, la pile à combustible de secours de 24 kWh et l'éolienne de 40 kWh. Nous avons également présenté les modèles de conversion utilisant des hacheurs BOOST bus (DC-DC) de 500 volts.

De plus, nous avons introduit les algorithmes de gestion de ces sources d'énergie électrique, tels que l'algorithme "P&O" et l'algorithme "PSO" spécifiquement conçus pour les panneaux photovoltaïques, ainsi qu'un autre algorithme de gestion "P&O" dédié aux éoliennes. Nous avons également abordé la commande en couple et en vitesse pour ces systèmes.

Ces différents éléments nous permettront d'analyser et d'optimiser le fonctionnement de notre système hybride, en exploitant au mieux les ressources disponibles et en assurant une gestion efficace de l'énergie électrique produite.

CHAPITRE 3

Stratégie de gestion du système hybride

I. Introduction :

Ce chapitre vise à explorer différentes stratégies de gestion de production d'énergie électrique pour notre système hybride, compte tenu des conditions climatiques variées. Dans cette optique, nous avons étudié divers scénarios de gestion qui sont adaptés aux sources d'énergie que nous avons utilisées.

L'objectif est de déterminer les stratégies de gestion les plus appropriées pour optimiser la production d'énergie électrique en tirant parti des caractéristiques spécifiques des différentes sources d'énergie. Les sources incluent les panneaux solaires, les batteries de stockage, la pile à combustible de secours et les éoliennes.

En considérant les conditions climatiques, nous avons identifié les scénarios de gestion les plus prometteurs.

Ces scénarios intègrent des stratégies de gestion avancées, telles que le contrôle de la charge, le contrôle de la demande, l'utilisation d'algorithmes d'optimisation de puissance (Comme MPPT et P&O) et la mise en œuvre de régulateurs pour maintenir une tension stable.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents scénarios de gestion envisagés, en mettant l'accent sur les avantages, les contraintes et les performances attendues pour chaque stratégie.

II. Présentation d'algorithmes de gestion énergétique du système hybride :

Des algorithmes globaux de gestion des sources énergétiques ont été développés, implémentés en utilisant des fonctions mathématiques dans MATLAB. Ces algorithmes permettent de gérer toutes les sources énergétiques disponibles. Pour la gestion des panneaux photovoltaïques, les algorithmes PO et PSO sont utilisés pour l'extraction du maximum de puissance. Pour les éoliennes, l'algorithme perturbe and observe P.O et une commande en couple en vitesse avec un régulateur d'angle des pales sont également utilisés.

J'ai également mis en place un algorithme global de gestion pour toutes ces sources d'énergie, comprenant la pile à combustible, la batterie d'alimentation, les éoliennes et les deux systèmes de panneaux photovoltaïques.

Voici comment il fonctionne : si la somme des puissances électrique disponible entre le photovoltaïque plus l'énergie éolienne est supérieure à la demande énergétique ($PPV+PEOL > Pch$), et si la source énergétique solaire est supérieure à l'éolienne ; dans ce cas le panneau photovoltaïque est activé et satisfait le besoin énergétique.

Si non je compare les taux de puissance électrique délivrés par les autres sources (éolienne et panneaux photovoltaïques) et j'utilise la source ayant la puissance la plus élevée pour alimenter la charge.

Si les ressources énergétiques renouvelable ne satisfait pas notre demande énergétique ($PEOL+PPV < PCH$) alors nous avons implantée une batterie de 25 kw qui alimente notre charge (PBATT).

Si non si il ya pas d'une énergie éolienne et ni d'énergies solaire et aussi que la batterie est finie ; dans ce cas le réseau de distribution d'énergie électrique est disponible qui fournit une puissance électrique suffisante de 20 kW, il alimente la charge jusqu'à ce qu'une source d'énergie renouvelable soit disponible.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Dans le scénario où aucune source d'énergie renouvelable telle que l'éolienne ou le panneau solaire n'est disponible, et où la batterie est complètement déchargée tandis que le réseau électrique de distribution est indisponible, nous avons recours à une pile à combustible de 100 kW pour alimenter l'intégralité de la charge.

Cette pile à combustible assure également la recharge de la batterie en attendant que l'une des sources d'énergie mentionnées précédemment (éolienne, panneaux photovoltaïques, réseau électrique, batterie de stockage) devienne disponible.

En optant des sources des énergies renouvelables et nos renouvelables, nous pouvons toujours alimenter une charge de 20 kW sans recourir au réseau électrique.

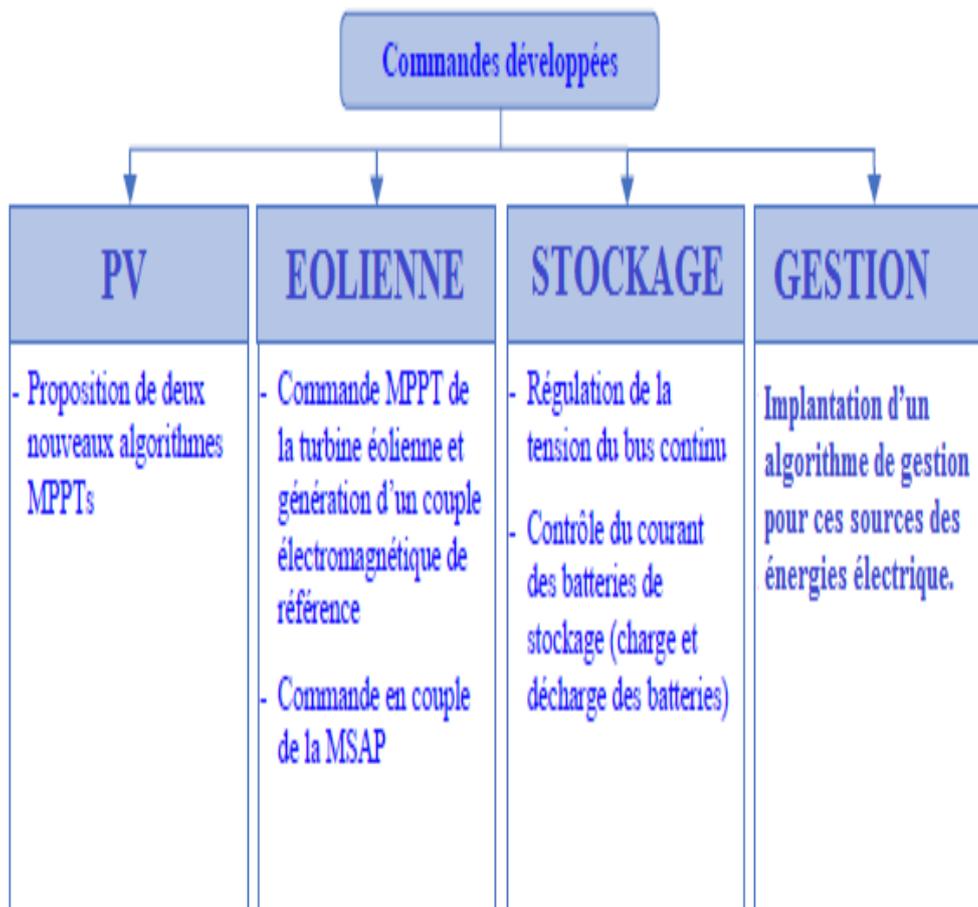


Figure 73 : organigramme des commandes de gestion développer

Les caractéristiques du système hybride :

- Puissance de la charge : 20KW.
- Puissance de Pile à combustible : $5KW \times 20 = 100KW$.
- Puissance de l'Eolienne = max 40KW.
- Batteries = de 25KW.
- Autonomés des batteries 50Ah.
- Puissance crête des panneaux PV = de 100KW.

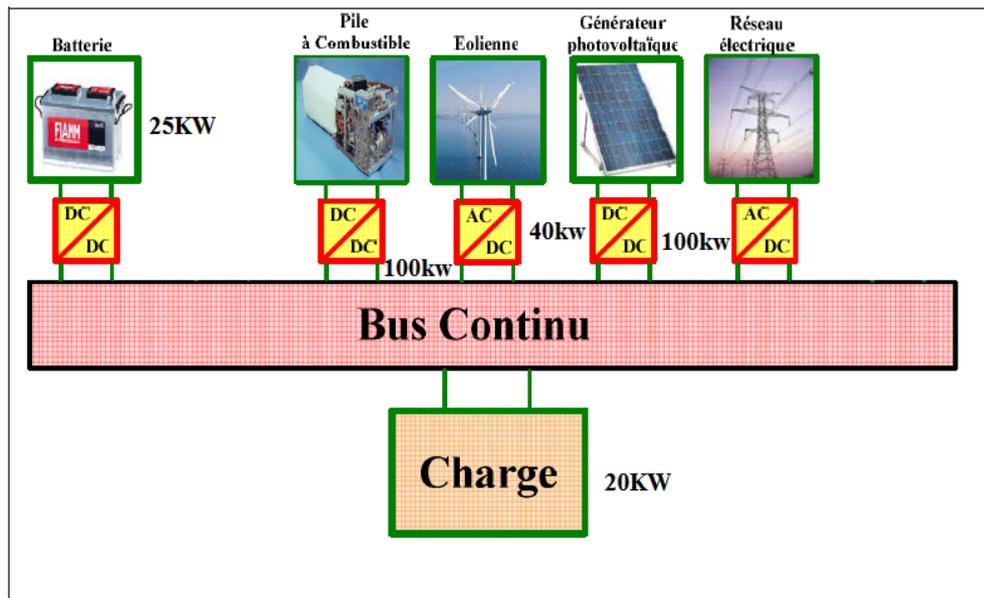


Figure 74 : Schéma du notre système multi-sources

Le système hybride étudié comprend une chaîne de conversion comprenant un générateur photovoltaïque de 100 kW, une pile à combustible de 100 kW, une éolienne de 40 kW, une batterie de 25 kW, et un réseau de distribution électrique de 100 kW. Ce système hybride propose d'alimenter une charge fixe de 20 kW, et tout excédent d'énergie produit par le générateur photovoltaïque et l'éolienne est utilisée pour charger la batterie qui constitue notre système de stockage. (Puissance en kW)

L'énergie stockée dans la batterie est utilisée pour compenser les éventuelles insuffisances au niveau de la charge, dans les cas où le générateur photovoltaïque, l'éolienne ou le réseau électrique ne peuvent pas satisfaire pleinement les besoins de la charge. Ainsi, lorsque la production d'énergie des sources renouvelables est inférieure à la demande de la charge, l'énergie stockée dans la batterie est utilisée pour combler cette lacune et assurer un approvisionnement continu à la charge.

Une pile à combustible est adoptée pour satisfaire les manques énergétiques et aussi de charger la batterie en cas de manque total des énergies renouvelable et non renouvelable.

1. Description des algorithmes de gestion :

Nous présentons les différents modes de fonctionnement du système hybride en fonction de la production d'énergie et de l'état de charge de la batterie ; Ces modes sont les suivants :

✚ Scénario-1 (Solaire alimente la charge) :

L'énergie générée par les panneaux photovoltaïques GPV est supérieure à la demande de la charge ($P_{pv} > P_{ch}$), et la batterie est complètement chargée ($Soc > Soc_{max}$) ; "M1".

Alors : le générateur GPV alimente la charge et le reste des énergies électrique sera injecter au réseau électrique.

✚ Scénario-2 (Solaire alimente la charge + batterie en charge de puis l'énergie solaire) :

L'énergie générée par le GPV est supérieure à la demande de charge ($PPV > Pch$), et la batterie n'est pas chargée ($Soc < soc_{min}$) ; "M2".

Alors : GPV alimente la charge et simultanément faire injecter l'énergie au système de stockage pour recharger la batterie.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

✚ Scénario-3 (Batterie aliment la charge) :

L'énergie générée par le GPV ou GEOL ou la somme de $(PEOL+PPV) > Pch$ est inférieur à la demande de charge, et la batterie est complètement chargé ($Soc > soc\ max$) ; **"M3"**.

Alors : la batterie alimente la charge de 20kw.

✚ Scénario-4 (Eolienne aliment la charge) :

L'énergie générée par le GEOL est supérieure à la demande de charge et supérieur aussi à la puissance délivrer GPV par $(PEOL > PPV > Pch)$, et la batterie est complètement chargée ($Soc > soc\ max$) ; **"M4"**.

Alors : énergies éolienne disponible qui fait aliment notre charge de 20 kw.

✚ Scénario-5 (Eolienne alimente la charge plus (+) batterie en charge de puis l'énergie éolienne):

L'énergie générée par le GEOL est supérieure à la demande de charge et supérieur aussi à la puissance délivrer GPV par $(PEOL > PPV > Pch)$, et la batterie n'est pas chargée ($Soc < soc\ min$) ; **"M5"**.

Alors : énergies éolienne disponible qui fait aliment notre charge de 20 kw simultanément qui faire recharger notre batterie.

✚ Scénario-6 (Réseau électrique aliment la charge) :

L'énergie générée par la somme $(GPV+GEOL)$ est inférieur à la demande de charge $(PEOL + PPV < Pch)$, avec la batterie n'est pas chargée ($Soc < soc\ min$) « batterie vide », et réseau électrique ordinaire disponible **"M6"**.

Alors : réseau de distribution électrique disponible qui fait aliment notre charge de 20 kw.

✚ Scénario-7 (cas de secours pile à combustible aliment la charge) :

La somme de puissance des énergies générée par le $[GPV\ et\ GEOL\ et\ PBAT\ et\ Pris] < Pch$ est inférieur à la demande de charge $(PPV+PBAT+PEOL+Pris < Pch)$, et la batterie est complètement déchargée ($Soc < soc\ min$) et la pile à combustible est disponible (PPAC) **"M7"**.

Alors : la pile à combustible de 100kw (PPAC) qui va occuper tout la charge de 20 kw.

Note : à chaque phase du déchargement complète de la batterie on 'a fait un délestage de la pile à combustible. Par un interrupteur à gâchette pour que la batterie faire occupe l'alimentation du tout la charge.

GPV: générateur panneau photovoltaïque.

GEOL : générateur éolienne.

- PEOL : La puissance éolienne (MAX 40KW).
- Ppv : La puissance photovoltaïque (MAX 100KW).
- Pbat : La puissance de la batterie (25KW).
- PRIS : La puissance réseau électrique (selon la demande).
- Pch: La puissance de la charge (20KW).
- PPAC: la puissance pile à combustible (100KW).

Tableau 5: Etat des Switches pour les différentes modes

MODE	K2	K3	K4	K5	K6
M1	0	0	1	0	0
M2	0	0	1	0	0
M3	1	0	0	0	0
M4	0	0	0	0	1
M5	1	0	0	0	0
M6	0	1	0	0	0
M7	0	0	0	1	0

- K2 : interrupteur d'une batterie.
- K3 : interrupteur d'un la charge-réseau de distribution.
- K4 : interrupteur d'un panneau solaire.
- K5 : interrupteur d'une pile à combustible.
- K6 : interrupteur d'une éolienne.

Si y a une source d'énergie renouvelable « PPV + PEOL » (panneau photovoltaïque + l'éolienne) supérieur à la demande énergétique « Pch » donc l'alimentation par (PV +PEOL) ; si non l'alimentation ce fait par mesure d'ordre de croissance entre les sources des énergies renouvelable si le « PPV » est supérieur à la puissance éolienne « P.EOL » est aussi que supérieur à la demande énergétique [PPV>PEOL>Pch], donc l'alimentation ce fait par les panneaux solaires.

```
function [S4,S5,S6] = fcn(Ppv, Pload, SYSPV, FCpower, Wpower, ptotal)
    S4=0; S5=0; S6=0;
    if SYSPV>Pload
        S4=1;
        S5=0;
        S6=0;
    else
        S4=0;
        S5=0;
        S6=0;
    end
```

Figure 75 : instruction énergies solaire qui aliment la charge

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Si non si la puissance générer par l'éolienne que est supérieur à notre puissance solaire [PEOL > PPV > Pch] qui va alimente notre charge de 20 kw.

```
function [S4,S5,S6] = fcn(Ppv,Pload,SYSPV,FCpower,Wpower,ptotal)
    S4=0;S5=0;S6=0;
    if Wpower > Pload
        S4=0;
        S5=0;
        S6=1;
    else
        S4=0;
        S5=0;
        S6=0;
    end
end
```

Figure 76 : instruction l'énergie éolienne aliment la charge

Sinon si il n'ya pas ni d'énergie éolienne et ni solaire ; cas que (« PPV + PEOL » < Pload) inferieur à la demande énergétique donc nous sommes dans un cas de manque des énergies renouvelable.

Dans ce cas en aliment notre charge par batterie d'alimentation (PBAT) et pour cette petite quantité de puissance délivrer par ces ressources renouvelables donc l'alimentation ce fait par batterie de 25kwh ;

Dans le cas qui il n'a pas des sources des énergies renouvelables et aussi que la batterie d'alimentation est complètement déchargée (fin de batterie), le réseau électrique qui alimente la charge.

```
function [s2,s3] = fcn(soc,Ppv,Pload,Pbatt,Pgrid)
    s2=0; s3=0;
    socmin=43.1;
    socmax=43.5;
    Pgrid=0;

    if Ppv>Pload
        if soc>socmax
            Pbatt=0;
            s2=0;
            s3=1;
        else
            Pgrid=0;
            s2=1;
            s3=0;
        end
    else
        if soc<socmin
            Pbatt=0;
            s2=0;
            s3=1;
        else
            Pgrid=0;
            s2=1;
            s3=0;
        end
    end
end
end
```

Figure 77 : fonction batterie ou le réseau électrique qui alimente notre charge

En cas d'absence totale d'énergies renouvelables (PV + éolien + hydraulique + batterie) ou l'énergie disponible est insuffisante pour répondre à la demande de charge de 20 kW, nous activons la pile à combustible jusqu'à ce qu'une source renouvelable soit disponible (éolienne ou solaire) capable d'alimenter la charge. Une fois que cette source renouvelable est opérationnelle, nous effectuons le découplage de la pile à combustible dès que la batterie est

entièrement chargée, permettant ainsi à la batterie de prendre en charge l'alimentation de la charge.

```
function [S4,S5,S6] = fcn(Pload,ptotal)
    if ptotal < Pload
        S4=0;
        S5=1;
        S6=0;
    else
        S4=0;
        S5=0;
        S6=0;
    end
```

Figure 78 : fonction pile à combustible aliment la charge

2. Différentes commutations des interrupteurs pour la gestion d'énergie :

Des simulations sont effectuées sous l'environnement logiciel Matlab Simulink afin d'étudier le fonctionnement du système hybride proposé.

Un générateur solaire de puissance 50 Kw est proposé et l'éolienne de 40 Kw ainsi qu'une batterie chargée de 25kw et une pile à combustible avec un stock contenant 100% d'oxygène et 100% d'hydrogène de 100 Kw.

Les simulations sont réalisées en prenant en compte différentes conditions d'éclairement, de température et de vitesse du vent, qui est considérées comme variables. Cela permet de prendre en compte les variations naturelles et environnementales qui peuvent influencer les performances des systèmes énergétiques.

En ajustant ces paramètres, nous sommes en mesure d'évaluer et d'analyser les performances du système hybride dans différentes situations, ce qui contribue à une meilleure compréhension de son fonctionnement et de son efficacité globale.

Nous avons aussi utilisé une charge fixe qui représente un site isolé (Maison de 20 kw).

2.1 Scénario 1 l'énergie solaire alimente la charge ($P_{pv} \rightarrow P_{ch}$) :

Le premier scénario repose sur la priorité de l'énergie solaire qui est adaptée dans les sites ensoleillés.

Dans ce cas, l'énergie éolienne constitue la seconde énergie renouvelable dédiée à notre système hybride, elle est prise en compte dans le cas où la chaîne de conversion photovoltaïque ne répond pas à la demande de la charge.

Dans ce scénario le système solaire alimente la charge, le réseau électrique, la pile à combustible et la batterie n'intervenant pas pour l'alimentation de la charge.

Dans la figure 79 qui contient une courbe représentative concernant le premier scénario (l'énergie solaire alimente la charge).

On constate qu'au cours de la première période (0-0.1 heure), la batterie alimente la baisse d'énergie (représentée en bleu) jusqu'à ce que les sources solaires (représentées en vert) deviennent disponibles à 0.1 heure pour alimenter la charge.

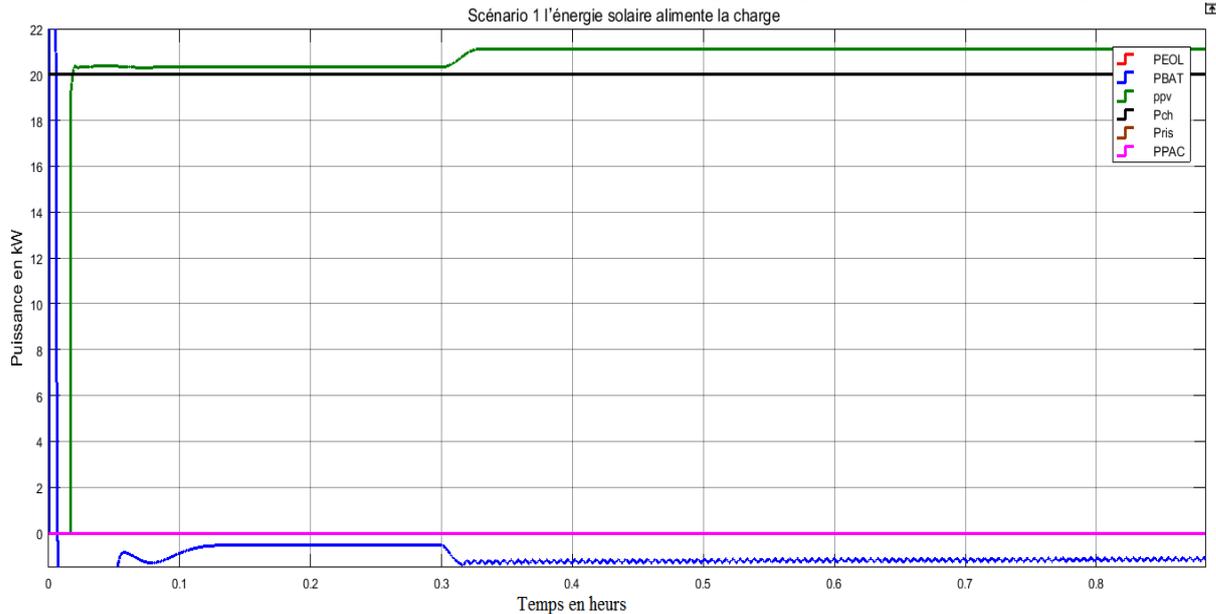


Figure 79: P.PV en vert alimente la charge (PPV > PEOL > Pch)

2.2 Scénario 2 l'énergie solaire alimente la charge avec la batterie (Ppv et Pabt → Pch) :

Dans ce cas, la puissance développée par le système solaire est supérieure à la puissance demandée par la charge, et la batterie est initialement déchargée. Dans la Figure 80, il est observé que le système solaire assure l'alimentation de la charge, et le reste de l'énergie est transféré pour charger la batterie. La quantité d'énergie injectée dans la batterie (Pbat), représentée en bleu, est proportionnelle à la différence entre l'énergie solaire (Ppv) et la demande énergétique de la charge (Pch). Ainsi, dans ce cas, la source d'énergie photovoltaïque permet simultanément d'alimenter la charge et de charger la batterie.

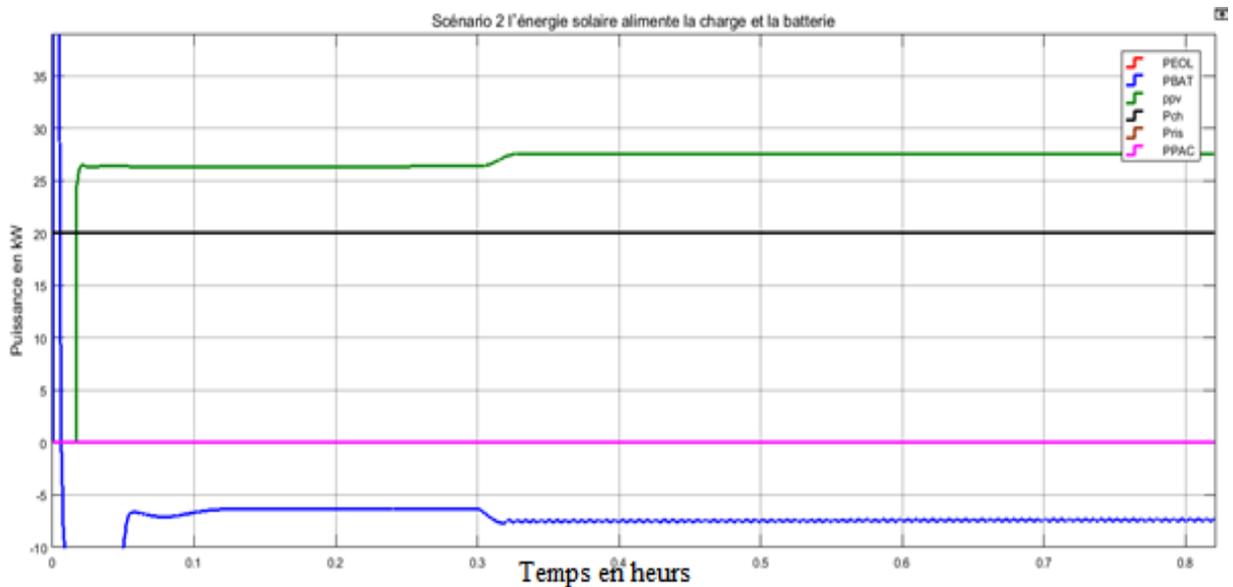


Figure 80: panneau photovoltaïque alimente la charge et la batterie

2.3 Scénario 3 la batterie alimente la charge (Pbat → Pch):

Dans cette situation, nous faisons face à une pénurie d'énergie solaire et éolienne, ce qui indique que les ressources renouvelables ne sont pas suffisantes pour répondre à nos besoins énergétiques. Dans de tels cas, nous recourons à un système de stockage pour alimenter la charge.

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Voici les courbes suivantes qui présentent le déficit de l'énergie et la phase de déchargement de batterie vers la charge (PPV en vert, PBAT en bleu).

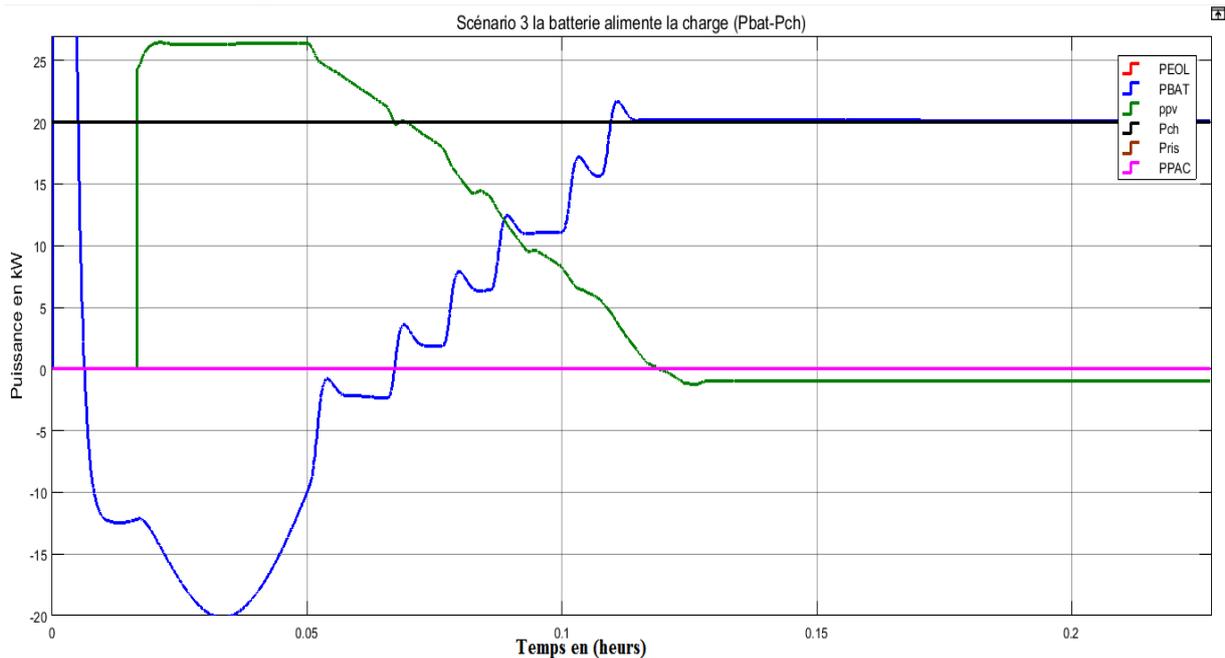


Figure 81 : courbes cas batterie alimente la charge

- **Des courbes représentatives sur la phase de déchargement de batterie :**

Les figures suivantes 82, 83 et 84 montrent les allures temporelles de la tension, courant et l'état de charge (Soc) aux bornes de la batterie dans sa phase de déchargement. On remarque ces allures (courant, tension, SOC) dégradant de la même façon afin d'alimenter la charge de 20 KW.

La figure 78 montre la dégradation de la tension de la batterie.

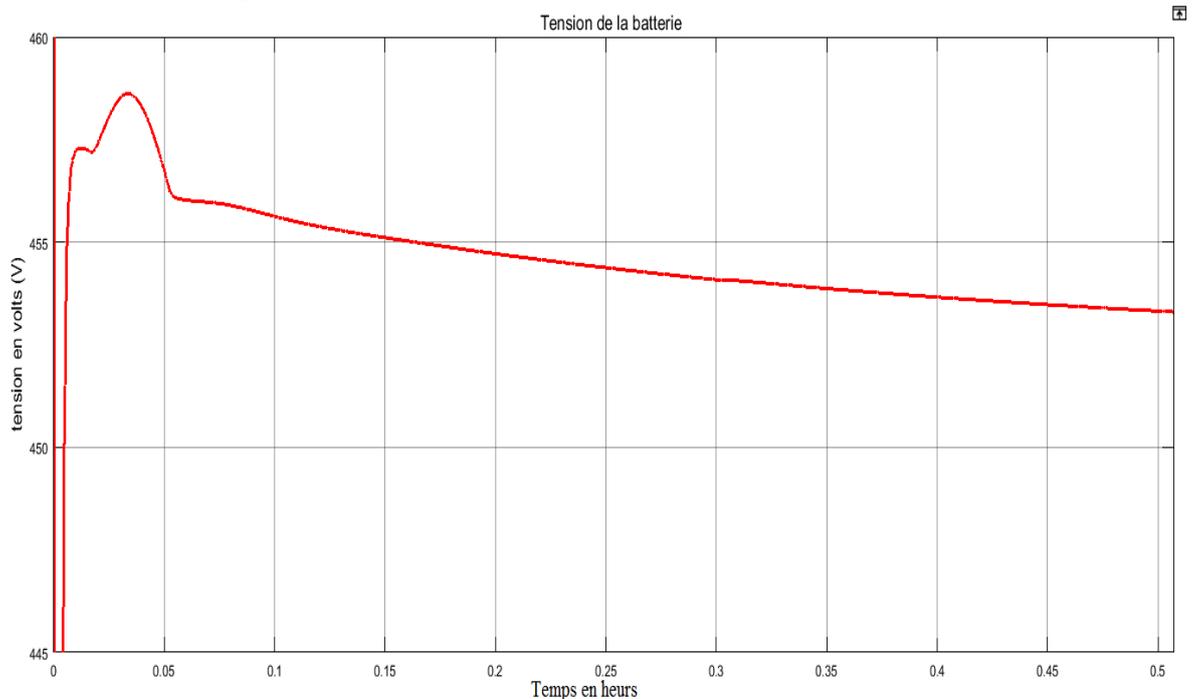


Figure 82 : caractéristique de la tension (V) de la batterie en état de déchargement

Cette figure 83 montre la dégradation du courant de la batterie (I. Bat) :

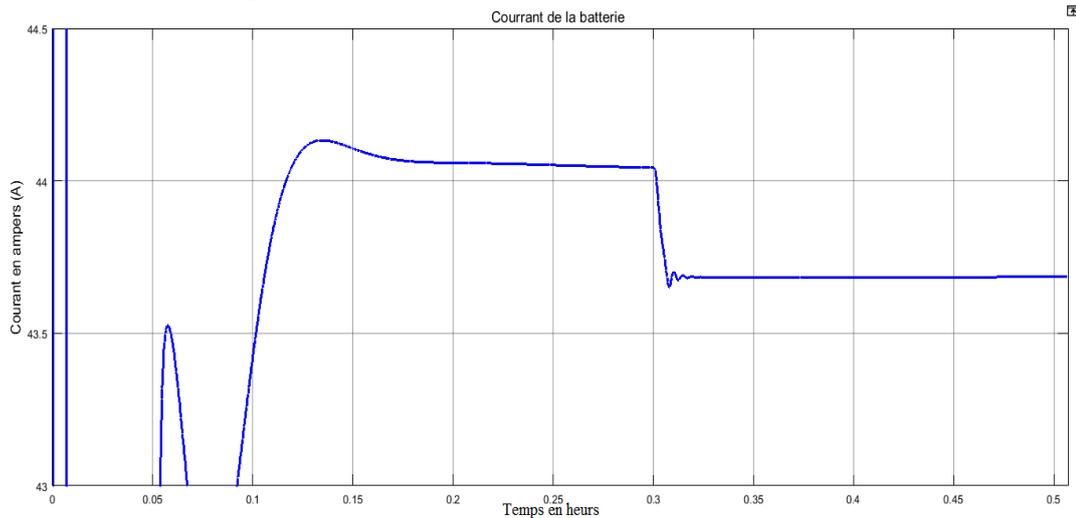


Figure 83 : caractéristique de l'intensité (I) de la batterie en état de déchargement

La figure 84 montre l'allure de l'état de charge de la batterie, on peut constater lors de déchargement l'état de charge de la batterie est décroissant.

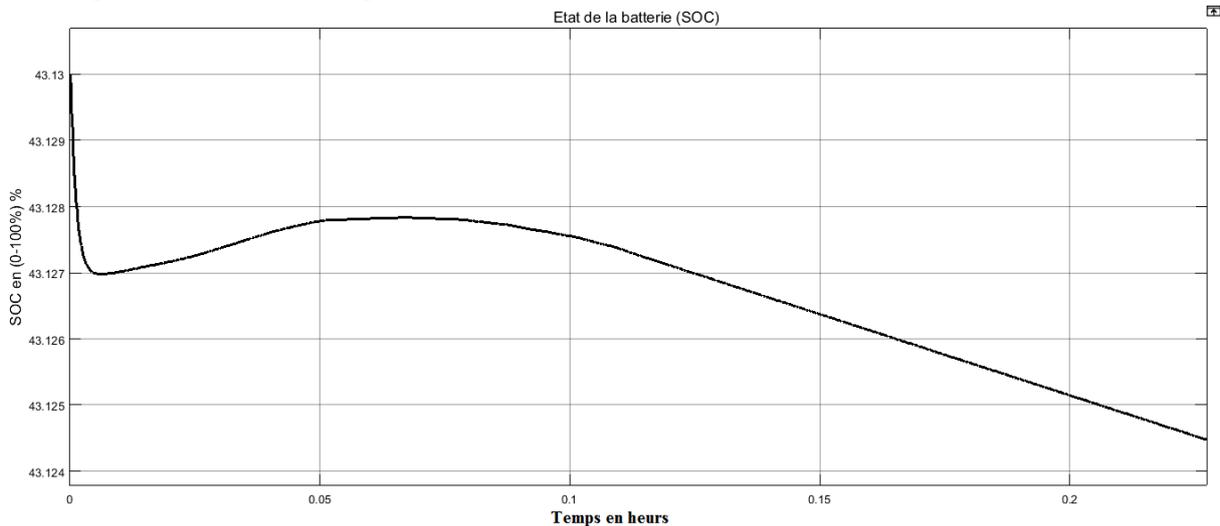


Figure 84 : SOC de la batterie en état de déchargement

2.4 Scénario 4 l'énergie éolienne alimente la charge (PEOL → Pch) :

Dans les régions ventées, il est primordial de donner la priorité aux énergies éoliennes, car l'efficacité d'une éolienne dépend étroitement de la vitesse du vent. Dans le cas où les éoliennes ne peuvent pas satisfaire pleinement la demande en puissance, l'énergie solaire prendra alors le relais pour compléter cette demande.

Il est essentiel de suivre de près les performances de l'éolienne, comme le montrent les figures suivantes. Dans les situations où la ressource solaire ne peut pas répondre aux besoins de charge et qu'une éolienne est disponible pour alimenter cette charge de 20 kW (POEL >> PPV << P LOAD) « en rouge » et (PPV « vert » < Pch « noir »), la batterie intervient pour compenser les pertes d'énergie si l'état de charge est inférieur à SOC_{max} .

À ce moment crucial, l'état de la batterie est en cours de recharge.

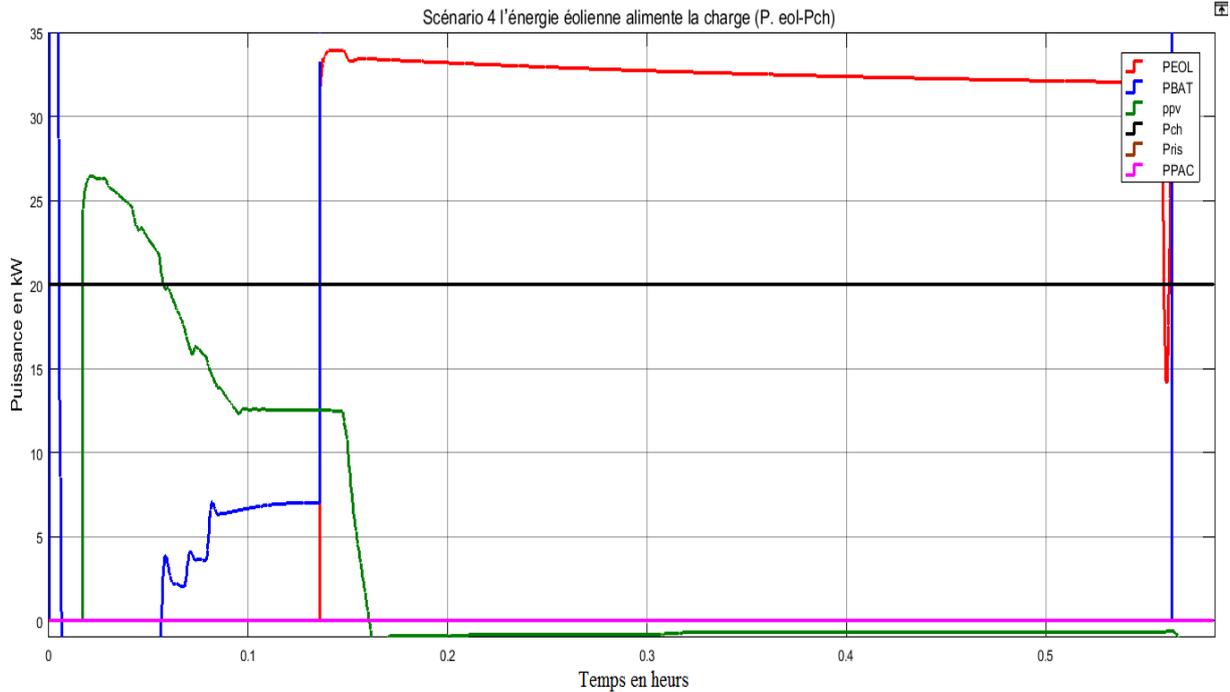


Figure 85 : éolienne alimente la charge

2.5 Scénario 5 : l'énergie éolienne alimente la charge avec batterie en simultanée :

Dans la figure 86 une courbe qui représente que si en cas de puissance électrique éolienne supérieur à la puissance électrique solaire dans ce cas nous regarderons que la batterie d'alimentation s'occupe ce temps de gaspillage et de manqué d'énergie pour aliment notre charge de 20 kW jusqu'au ce que l'énergie éolienne devenir valable pour alimente tout notre charge et le reste de l'énergie éolienne (la différence entre l'énergie éolienne et la demande énergétique « $Peol \rightarrow Pch$ et $Pbat$ ») sera injecter à la batterie pour le recharger.

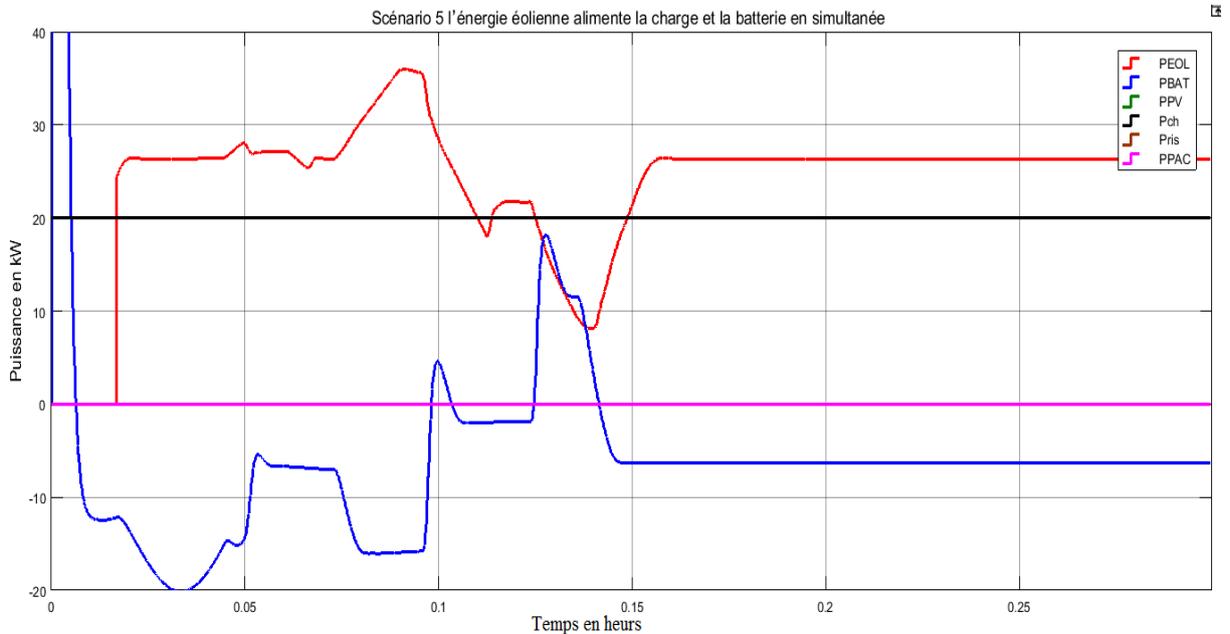


Figure 86 : Caractéristique des puissances dans le cas où alimentent la charge de 20kw et la batterie en état de recharge

CHAPITRE 3 : Stratégie de gestion du système hybride

Note : en cas du basculement entre les sources énergétique (le solaire et l'éolienne) toujours le système de stockage d'énergies « batterie » s'intervient pour recomposée tous les manques.

2.6 Scénario 6 : réseaux électriques alimente la charge (Pris → Pch) :

Dans ce scenario les énergies renouvelables (PEOL+PPV) sont totalement absentes et que la batterie est complètement déchargée, le réseau électrique (PRIS en marron) intervient pour alimenter la charge.

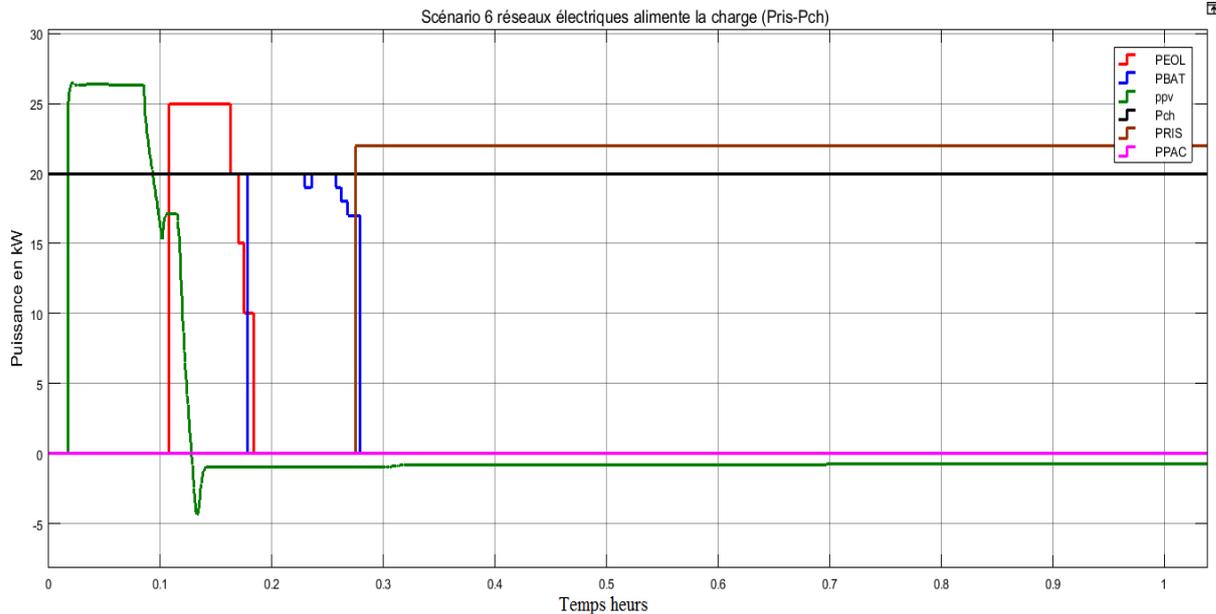


Figure 87 : Caractéristique des puissances dans le cas où réseau électrique alimente la charge.

2.7 Scénario 7 : cas urgence pile à combustible aliment la charge (Pac → Pch) :

Nous sommes dans un cas de manque totales des tous les énergies renouvelable et non renouvelable (PBAT+PEOL+PPV+PRIS>PCH) dans ce cas on alimente la charge par l'activation de pile à combustible qui va aussi alimente la batterie de stockage.

Dans ce scénario, la pile à combustible reste toujours désaccouplée de notre système après chaque charge complète de la batterie. Ensuite, la batterie réapprovisionne la charge jusqu'à ce qu'une seule source d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire, éolienne ou le réseau électrique, soit présente.

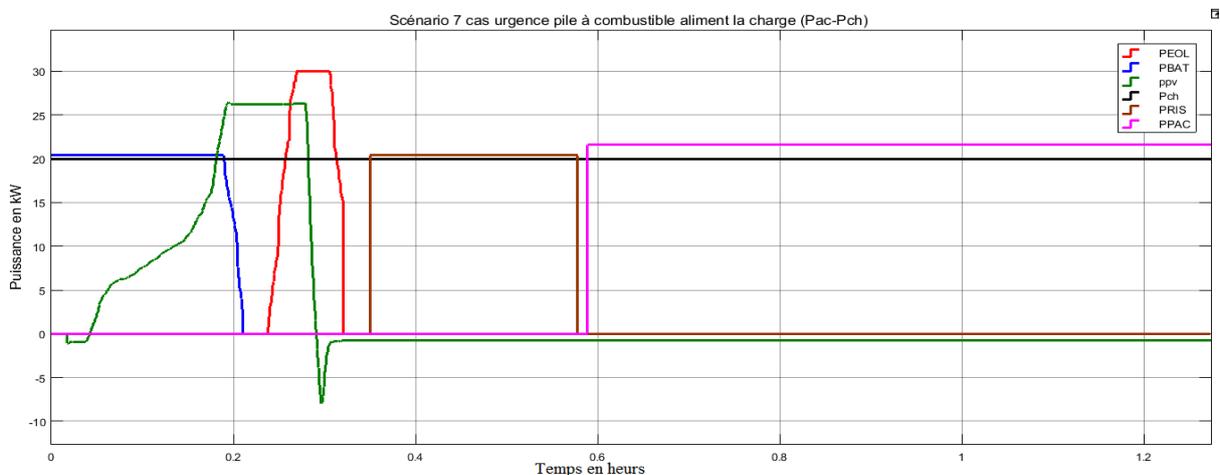


Figure 88 : Caractéristique des puissances dans le cas où la PAC intervienne pour l'alimentation et charger la batterie

III. Interprétation :

D'après la simulation, il est observé que chaque source d'énergie contribue à la production d'électricité, ce qui permet au système hybride de répondre à la demande énergétique en termes de puissance de la charge. Chaque source d'énergie intervient à des moments spécifiques, ce qui assure la satisfaction de la demande énergétique.

Le système hybride repose principalement sur les chaînes de conversion d'énergie renouvelable, comme cela a été souligné dans l'analyse précédente. Une grande partie de la puissance de la charge est produite par ces sources grâce à une régulation de la puissance.

Cependant, il est constaté que les régulations ne peuvent pas répondre aux variations brusques de puissance. Pour remédier à ce problème, une chaîne de stockage, représentée par la batterie installée, est intégrée en parallèle au système. Cette batterie a pour objectif de fournir ou d'absorber les fluctuations de puissance, permettant ainsi de maintenir l'équilibre du système.

Enfin, la pile à combustible joue un rôle crucial en tant que source de secours dans les systèmes hybrides. Elle garantit que la puissance de la charge est toujours satisfaite, indépendamment des conditions climatiques ou des variations de charge.

Dans la figure 89 ci-jointe, vous pouvez observer les courbes représentatives qui décrivent le comportement de notre système hybride, en montrant les différentes sources d'énergie et leurs performances individuelles.

- 1^{er} cas : « PV alimente la charge » : $PPV > (PEOL+PBAT) > Pch$.
- 2^{ème} cas : « PEol alimente la charge » : $PEOL > (PPV+PBAT) > Pch$.
- 3^{ème} cas : « batterie alimente la charge » : $PBAT > (PPV+PEOL) < PLOAD$.
- 4^{ème} cas : « réseau électrique » : $PRIS > (P.PV+P.EOL+PBAT) < PLOAD$.
- 5^{ème} cas : urgence PAC alimente notre charge » : $(P.PV+P.EOL+PBAT+P.STEG) < PLOAD$.
- 6^{ème} cas temps intermittente de basculement entre les sources énergétique pour L'alimentation de notre charge : « PEol »-« PPV »-« PSTEG » \leq (fluctuation) Pch.

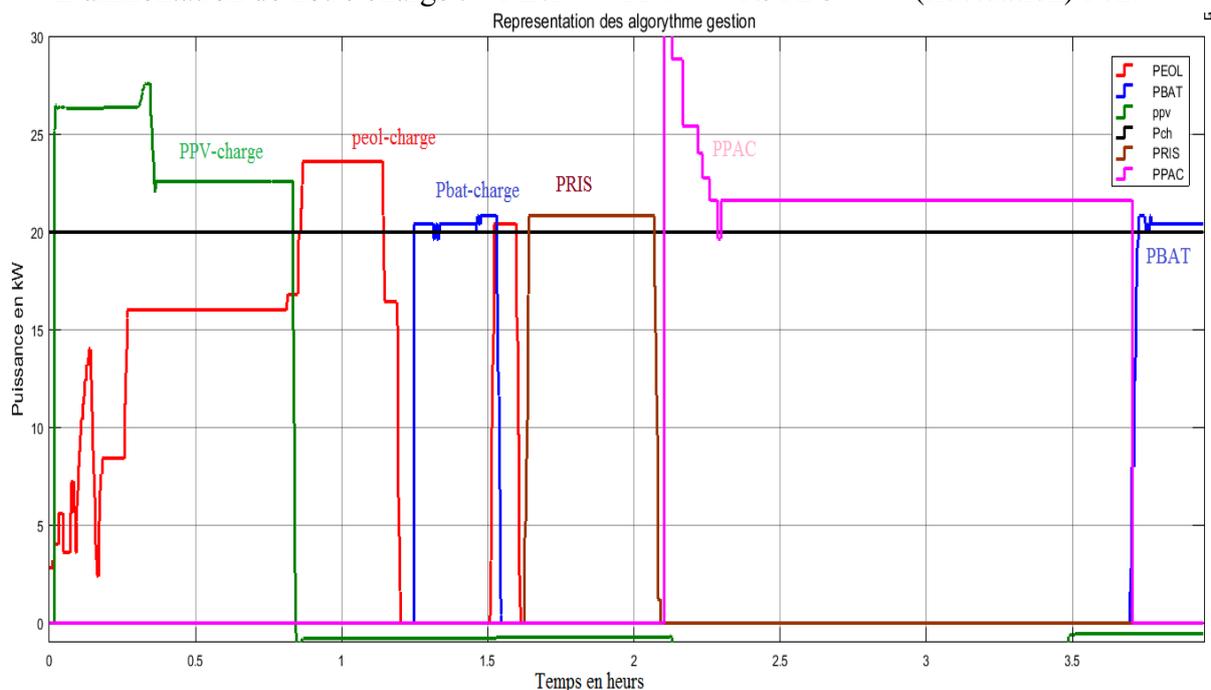


Figure 89 : illustration des six fréquents scénarios possibles

IV. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de stockage, ainsi qu'à l'association des chaînes de conversion d'énergie électrique (**photovoltaïque-éolien-stockage-combustible-réseau électrique**) au bus continu formant notre système hybride.

Nous avons effectué des simulations couvrant deux scénarios distincts. Le premier scénario simule la priorisation de l'énergie photovoltaïque (PV), tandis que le deuxième scénario accorde la priorité à l'énergie éolienne. En cas de déficit de ces sources d'énergie renouvelable, la batterie intervient pour combler ces lacunes.

Un profil de charge a été sélectionné de manière à prendre en compte tous les cas probables, tels que la charge et la décharge de la batterie, ainsi que l'éventuelle sollicitation du réseau électrique en tant que source d'énergie non renouvelable (PRIS).

Puis on implante un système d'urgence piles à combustible de 100kw qui interfère en cas d'absence totale des sources des énergies renouvelables et non renouvelables.

Conclusion Générale

Conclusion générale

En conclusion, ce projet de Master a permis d'approfondir notre compréhension et notre expertise dans le domaine des systèmes hybrides de production d'énergie, en mettant l'accent sur l'intégration de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries de stockage. Nous avons réalisé un état de l'art exhaustif dans le premier chapitre, ce qui nous a permis de mieux comprendre les avancées, les tendances et les défis actuels dans le domaine des systèmes hybrides. Notre objectif principal était d'étudier et d'analyser un système hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries de stockage, avec pour but d'alimenter une charge fixe de manière efficace et durable.

Le chapitre 2 a été consacré à la modélisation et à l'analyse des différents éléments du système hybride. Nous avons élaboré des modèles analytiques pour les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et les batteries de stockage. Ces modèles nous ont permis de prédire les performances énergétiques du système dans différentes conditions, d'évaluer l'impact des variations climatiques et des fluctuations de charge, et d'optimiser la conception et la configuration du système. Ces modèles nous ont également fourni des outils précieux pour évaluer l'impact de différentes configurations et paramètres sur le fonctionnement global du système hybride.

Nous avons également tenu compte des pertes énergétiques, de l'efficacité des convertisseurs d'énergie et des caractéristiques de charge et de décharge des batteries.

Le chapitre 3 a porté sur l'étude de scénarios de gestion énergétique pour assurer le bon fonctionnement du système hybride. Nous avons défini des critères de priorité en termes d'utilisation des sources d'énergie. Dans l'ordre de priorité, nous avons cherché à maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien, en fonction de leur disponibilité. Si ces sources renouvelables ne sont pas suffisantes pour répondre à la demande de la charge, nous avons étudié la possibilité de se tourner vers le réseau électrique traditionnel en tant que source d'énergie non renouvelable. Enfin, en l'absence de toutes les sources précédentes, nous avons envisagé l'utilisation de piles à combustible comme solution de secours pour garantir une alimentation continue de la charge fixe.

Les résultats obtenus à travers ces scénarios ont démontré l'efficacité et la fiabilité du système hybride étudié. Nous avons constaté que la combinaison optimale des différentes sources d'énergie et des stratégies de gestion énergétique permettait de répondre aux besoins de la charge fixe tout en minimisant la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables.

Cependant, nous reconnaissons que ce projet présente certaines limites, notamment en ce qui concerne la modélisation de certains paramètres et la prise en compte de variations climatiques spécifiques. Ces limitations offrent des perspectives d'amélioration pour de futures recherches, telles que l'utilisation de modèles plus précis et la collecte de données en temps réel pour une meilleure adaptation aux conditions réelles.

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire de Master a contribué de manière significative à notre compréhension des systèmes hybrides de production d'énergie. Les résultats obtenus et les recommandations formulées offrent des perspectives prometteuses pour l'intégration plus efficace et durable des sources d'énergie renouvelable dans les systèmes énergétiques. Nous espérons que ce rapport pourra servir de référence et inspirer d'autres chercheurs et praticiens dans leurs futurs projets visant à promouvoir une transition énergétique plus respectueuse de l'environnement.

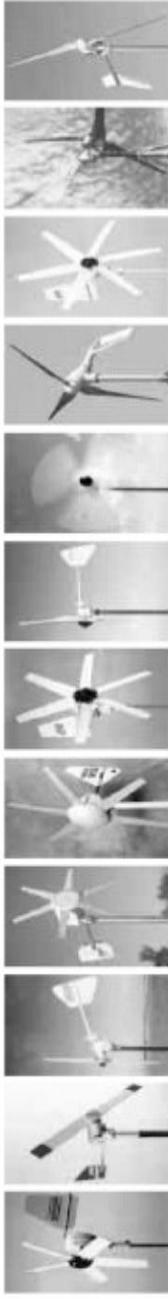
Références Bibliographiques

- [1] TIAR Mourad, Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable Année 2017.
- [2] M. Higueta Cano, "Système de gestion de l'énergie basé sur l'incertitude pour un système hybride à sources d'énergie renouvelable autonome avec production d'hydrogène", Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2017.
- [3] M. Sadaoui, M. Meddouri «Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque -Eolien) » Mémoire de Master en électrotechnique, Université – Bejaia, 2012.
- [4] M. Higueta Cano, "Système de gestion de l'énergie basé sur l'incertitude pour un Système hybride à sources d'énergie renouvelable autonome avec production d'hydrogène", Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2017.
- [5] HC Maru, « Systèmes de piles à combustible et applications potentielles », Actes du symposium : Statut et applications de la technologie des piles à combustible, Institute of Gas Technology, Chicago, IL, pp. 33-44, novembre 1981.
- [6] B.Sedik, B.Djaber, Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaïque défectueux, (Juin 2015).
- [8] DEKKICHE ABDELILLAH Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, 2008.
- [9] Andrea, D. (2010). Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Artech house.
- [10] N. A. Zambri, A. Mohamed, H. Shareef, and M. Z. C. Wanik« Design of a Hybrid Fuel Cell with Battery Energy Storage for Stand-Alone Distributed Generation Applications » Article, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013.
- [11] Madjid, SI BRAHIM « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone » thèse de Doctorat de l'UMMTO, juin 2015.
- [12] Adam MIRECKI, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,» INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.

Références bibliographiques

- [13] M. Patel, Wind and solar power systems, design analysis and Operation, Taylor and Francis, 2006.
- [14] S. TURBINE, «Sway Turbine | SWAY TURBINE UNVEILS ST10 DETAILS, » October 2012. [En ligne]. Available: <http://www.swayturbine.no/?page=219>.
- [15] M. Sadaoui, M. Meddouri «Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque-Eolien) » Mémoire de Master en électrotechnique, Université – Bejaia, 2012.
- [16] I.Tegani « Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque » Thèse Doctorat LMD, Université Mohamed Khider – Biskra, 04/06/2016.
- [17] J.L. Santos, F. Antunes, A. Chehab, C. Cruz, «A maximum power point tracker for pv systems using a high performance boost converter», Solar Energy, Vol. 80, N°7 , 772778, 2006.
- [18] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyil, “Wind Energy Handbook” , Chapter 4 , wind -Turbine performance, page 173, edition 2001;
- [19] R. G. D. e. J. M. RECHKA S., «Modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machine asynchrone, à l'aide des outils MATLAB et EMTP,» Ecole polytechnique de Montréal, 2004.
- [20] K. Kassmi, M. Hamdaoui, F. Olivié (2007) Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique, Revue des Energies Renouvelables, Vol.10.
- [21] TIAR Mourad, Mémoire présenté en vue de l'obtention Du Diplôme de Magister Commande Optimale d' un Système de Génération Photovoltaïque Hybride Mourad année 2011.
- [22] «Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » mémoire de fin d'étude, université de Québec, juillet 2016.
- [23] A.Borni « Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie Électrique » Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique, 2015.
- [24] Bouafia ABDELOUAHAB « Technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : Application aux redresseurs à MLI » thèse de Doctorat de l'université de Ferhat Abbas.

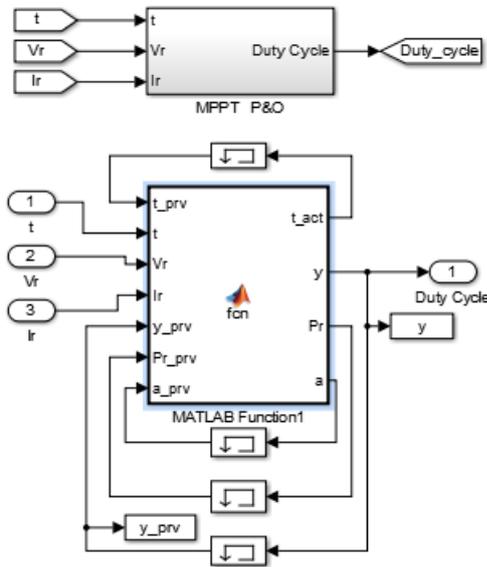
Annexe 1 - Exemples et caractéristique d'éoliennes de petite puissance :




Model	Manufacturer	Rated Output	Rated Wind Speed	Rated Rotation Speed	Cut-in Wind Speed	Rotor Diameter	Number of Blades	Blade Material	Yaw?	Latest Thrust	Governor System	Governing Wind Speed	Shut-down Mechanism	Tower Top Weight	Mainie Option Available?	Generator Type	Cost	Dollars per Rated Watt	Battery Systems (voltagess)	Utility Interie Available?	Resistance Heating?	Water Pumping?	Est. Mo. Energy @ 10mph (CF)	Est. Mo. Energy @ 12mph (CF)	Years in production (business)	Routine Maintenance	Controls	Notes
Windseeker 502	SWWP	500 watts	26 mph	2000 rpm	5 mph	5 feet	2	Basswood	True	True	None	35 mph	None	20 pounds	Yes	PM alternator	\$875	\$1.75	12 or 24 or 48	No	No	No	60 kWh (17%)	90 kWh (25%)	2 years	None recommended	Built-in regulator	
Mariner H500	WPT	500 watts	26 mph	1700 rpm	7.5 mph	5 feet	3	Injection molded polycarbonate	True	True	70 pounds	28 mph	Dynamic brake	29 pounds	Standard	PM 3 phase alternator	\$1,300	\$2.78	12-48	No	No	No	36 kWh (10%)	60 kWh (17%)	2 years	Annual inspection	Included	
AeroGen	LVM	420 watts	52 mph	750 rpm	5 to 6 mph	4 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	120 pounds	None	None	28 pounds	Standard	PM 3 phase alternator	\$684	\$2.06	12-48	No	No	No	20 kWh (7%)	30 kWh (10%)	3 years	Annual inspection	Optional	Non-governing model
AIR	SWWP	300 watts	26 mph	2000 rpm	6 mph	3.75 feet	3	Carbon reinforced thermoplastic	True	True	150 pounds	48 mph	Dynamic brake	13 pounds	Yes	PM alternator	\$550	\$1.63	12 or 24 or 48	No	No	No	35 kWh (16%)	45 kWh (20%)	3 years	None recommended	Built-in regulator	
AeroGen-F	LVM	280 watts	29 mph	600 rpm	5 to 6 mph	5 feet	3	Laminated wood	True	True	75 pounds	29 mph	None	40 pounds	No	PM 3 phase alternator	\$1,437	\$5.13	12-48	No	No	No	30 kWh (15%)	41 kWh (20%)	3 years	Annual inspection	Optional	
AeroGen-F	LVM	280 watts	46 mph	600 rpm	5 to 6 mph	4 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	50 pounds	46 mph	None	35 pounds	No	PM 3 phase alternator	\$1,066	\$3.85	12-48	No	No	No	20 kWh (10%)	30 kWh (15%)	3 years	Annual inspection	Optional	
AeroGen	LVM	280 watts	70 mph	950 rpm	5 to 6 mph	2.8 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	100 pounds	None	None	19 pounds	Standard	PM 3 phase alternator	\$612	\$2.18	12-36	No	No	No	15 kWh (5%)	15 kWh (8%)	3 years	Annual inspection	Optional	Non-governing model
WG 913	ME	90 watts	22 mph	600 rpm	6 mph	3 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	90 pounds	None	None	23 pounds	Yes	PM alternator	\$780	\$8.67	12 or 24	No	No	Yes	15 kWh (14%)	22 kWh (20%)	1 year	Visual inspection	Purchased separately	Non-governing model
FM 910	ME	90 watts	22 mph	600 rpm	6 mph	3 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	90 pounds	Side-facing	None	36 pounds	No	PM alternator	\$909	\$11.10	12 or 24	No	No	Yes	15 kWh (14%)	22 kWh (20%)	1 year	Visual inspection	Purchased separately	
AeroGen-F	LVM	140 watts	46 mph	600 rpm	5 to 6 mph	2.8 feet	6	Glass reinforced nylon	True	True	25 pounds	Side-facing	None	24 pounds	No	PM 3 phase alternator	\$788	\$5.63	12-36	No	No	No	10 kWh (19%)	15 kWh (15%)	3 years	Annual inspection	Optional	
Windstream	WPS	120 watts	32 mph	1900 rpm	7.5 mph	3.25 feet	2	Epoxy coated basswood	True	True	30 pounds	Tilt-up	None	18 pounds	Standard	PM DC generator	\$497	\$4.14	12	No	No	Yes	18 kWh (13%)	17 kWh (20%)	2 years	Annual inspection	Optional voltage regulator	
AeroGen	LVM	50 watts	46 mph	1200 rpm	5 to 6 mph	1.9 feet	5	Glass reinforced thermoplastic	True	True	30 pounds	Thermal switch	None	11 pounds	Standard	PM alternator	\$393	\$19.65	12 or 24	No	No	No	4 kWh (3%)	5 kWh (4%)	3 years	Annual inspection	Optional	Non-governing model

Annexe 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

a) Script du programme de l'algorithme P&O (Perturb and Observe)



Le bloc MATLAB_Function1

```

fonction [t_act,y,Pr,a] = fcn(t_prv,t,Vr,Ir,y_prv,Pr_prv,a_prv)
y_step=0.05; %Pas du rapport cyclique
Pr_now=Vr*Ir; %Puissance actuelle
diff=Pr_now-Pr_prv; %Différence entre la puissance actuelle et précédente
tolerance=Pr_prv/100; %Valeur de laquelle il n'y aura pas de changement de signe du rapport
cyclique
y=y_prv;
a=a_prv;
if (t<2)
y=0;
a=0;
t_act=t;
Pr=Pr_now;
elseif (t<10)
y=y_prv; a=0; t_act=t_prv;Pr=Pr_prv;
if(Pr_now<3000)
if(a_prv==0)
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (a_prv==1)
if (t-t_prv)<0.5
y=y_prv; a=1; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
else
y=y_prv; a=2; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
elseif (a_prv==2)
if (diff>tolerance)

```

ANNEXE 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

```
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (diff<-tolerance)
y=y_prv-y_step; a=3; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
end
elseif (a_prv==3)
if (t-t_prv)<0.5
y=y_prv; a=3; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
else
y=y_prv; a=4; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
elseif (a_prv==4)
if (diff>tolerance)
y=y_prv-y_step; a=3; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (diff<-tolerance)
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
end
end
else
y=y_prv; a=a_prv; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
else
y=y_prv; a=0; t_act=t_prv;Pr=Pr_prv;
if(Pr_now<3000)
if(a_prv==0)
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (a_prv==1)
if (t-t_prv) <0.5
y=y_prv; a=1; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
else
y=y_prv; a=2; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
elseif (a_prv==2)
if (diff>tolerance)
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (diff<-tolerance)
y=y_prv-y_step; a=3; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
end
elseif (a_prv==3)
if (t-t_prv)<0.5
y=y_prv; a=3; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
else
y=y_prv; a=4; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
elseif (a_prv==4)
```

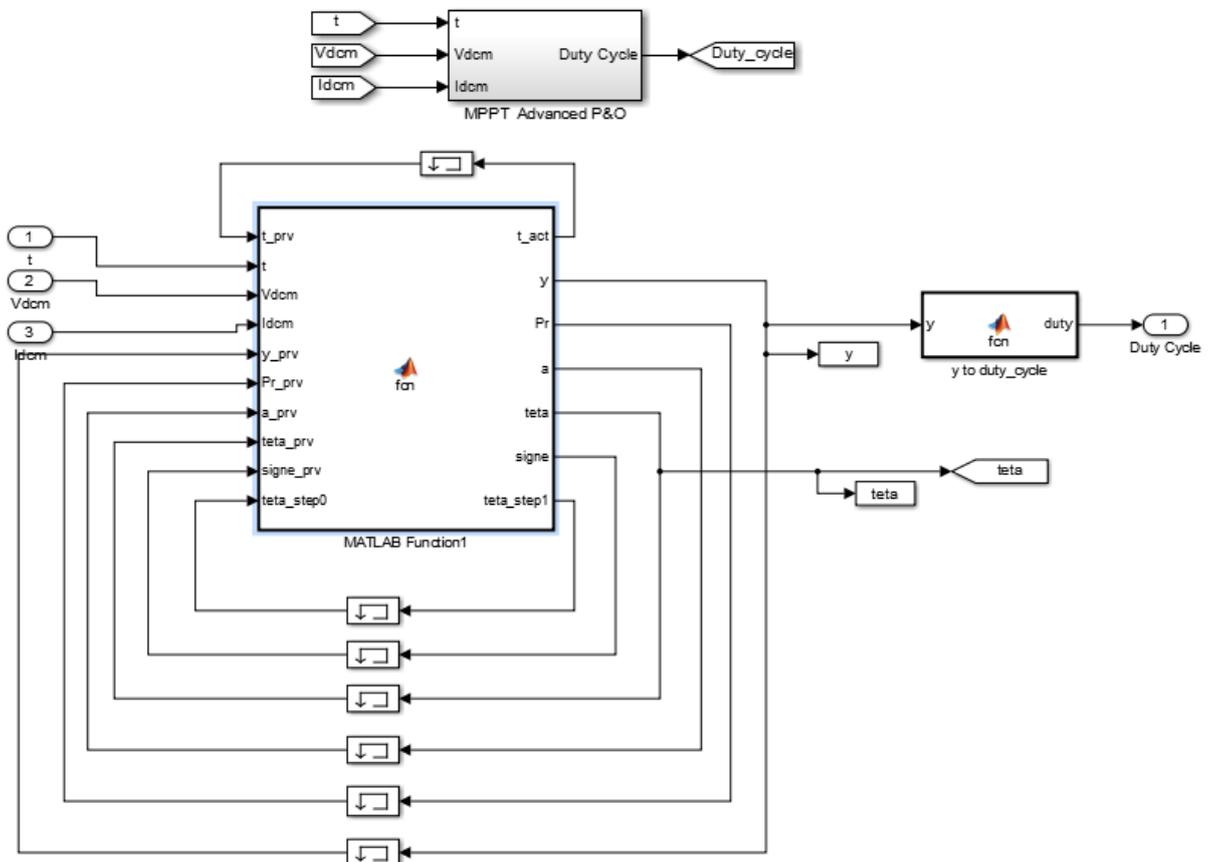
ANNEXE 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

```

if (diff>tolerance)
y=y_prv-y_step; a=3; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
elseif (diff<-tolerance)
y=y_prv+y_step; a=1; t_act=t; Pr=Vr*Ir;
end
end
else
y=y_prv; a=a_prv; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv;
end
end
end

```

b) Script du programme de l'algorithme de dressage (Advanced P&O)



Le bloc Matlab Function 1

```

Function [t_act, y, Pr, a, teta, signe, teta_step1]=
fcn(t_prv,t,Vdcm,Idcm,y_prv,Pr_prv,a_prv,teta_prv,signe_prv,teta_step0)
teta_step=10; % valeur en degré du pas de l'angle teta
delta_teta=2; % Valeur limite du pas de l'angle teta
Pr_now=Vdcm*Idcm; % Puissance actuelle mesurée
diff=Pr_now-Pr_prv; % Différence entre la puissance actuelle et précédente
tolerance=Pr_prv/1000;
Rl=60; % 25*18/pi^2;
tempo=0.5;
Vin=10/290^2;

```

ANNEXE 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

```
y=y_prv; a=a_prv; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv; signe=signe_prv;
teta_step1=teta_step0;
if (t<2)
y=0;
a=0;
t_act=t;
Pr=Pr_now;
teta=0;
elseif (t<10)
%Etape d'initialisation
if(a_prv==0)
signe=[0;0];
teta_step1=teta_step;
y=y_prv; a=10; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% Mesure
Pr=Pr_now;
k0=Idcm/Vdcm^2;
teta0=atand(k0/VIn);
% Changement de consigne
teta1=teta0+teta_step0;
teta=teta1;
% Etape de Mesure
elseif (a_prv==10)
teta1=teta_prv+teta_step0;
% Sortie "nouvelle teta"
y=y_prv; a=11; t_act=t_prv; Pr=Pr_now; teta=teta1;
elseif (a_prv==11)
% Action
k1=(10/290^2)*tand (teta_prv);
Vdc1=sqrt(Idcm/k1);
Rdc1=Vdc1/Idcm;
d=1/(1+sqrt(Rdc1/RI));
% Sortie "nouveau y"
y=(d*2)-1; a=12; t_act=t; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
elseif(a_prv==12)
% Verifier teta actuelle
km=Idcm/Vdcm^2;
tetam=atand(km/10*290^2);
if(abs(tetam-teta_prv)>delta_teta)
% Sortie "répétition d'étape 11"
y=y_prv; a=11; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
else
% Sortie "étape 120 tempo 0.5s"
y=y_prv; a=120; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
elseif (a_prv==120) % Temporisation
if (t-t_prv)<tempo
y=y_prv; a=120; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
else
```

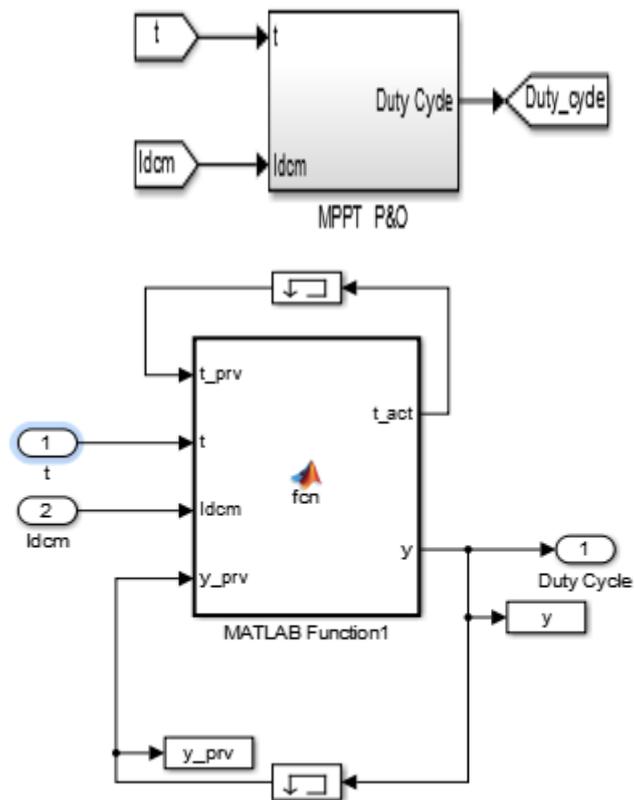
ANNEXE 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

```
y=y_prv; a=13; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
elseif (a_prv==13)
% Vérification de Delta P
% signe=circshift(signe,1);
signe(1)=sign(diff);
% S=sum(signe);
% if (S>=0)
% %Sortie " passage étape 10"
% y=y_prv; a=10; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% elseif (S<0)
% %Sortie " passage étape 20"
% y=y_prv; a=20; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% end
if (diff>tolerance)
%Sortie " passage étape 10"
y=y_prv; a=10; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
elseif (diff<-tolerance)
%Sortie " passage étape 20"
y=y_prv; a=14; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
elseif (a_prv==14)
teta_step1=teta_step0/2;
y=y_prv; a=20; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% -----
% ***** Inversion de consigne *****
% -----
elseif (a_prv==20)
teta1=teta_prv-teta_step0;
%Sortie "affectation de nouvelle teta"
y=y_prv; a=21; t_act=t_prv; Pr=Pr_now; teta=teta1;
elseif (a_prv==21)
% Action
k1=(10/290^2)*tand(teta_prv);
Vdc1=sqrt(Idcm/k1);
Rdc1=Vdc1/Idcm;
d=1/(1+sqrt(Rdc1/RI));
%Sortie "Affectation nouveau y"
y=(d*2)-1; a=22; t_act=t; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
elseif(a_prv==22)
% Verifier teta actuelle
km=Idcm/Vdcm^2;
tetam=atand(km/10*290^2);
if (abs(tetam-teta_prv)>delta_teta)
%Sortie "répétition d'étape 21"
y=y_prv; a=21; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
else
%Sortie "étape 23 tempo 0.5 seconde"
y=y_prv; a=220; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
```

ANNEXE 2 - Chaînes Script des différents programmes MPPT sur SIMULINK

```
elseif (a_prv==220) % Temporisation
if (t-t_prv)<tempo
y=y_prv; a=220; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
else
y=y_prv; a=23; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
elseif (a_prv==23)
% Vérification de Delta P
% signe=circshift(signe,1);
% signe(1)=sign(diff);
% S=sum(signe);
% if (S>=0)
% %Sortie " passage étape 10"
% y=y_prv; a=20; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% elseif (S<0)
% %Sortie " passage étape 20"
% y=y_prv; a=10; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
% end
if (diff>tolerance)
%Sortie " passage étape 10"
y=y_prv; a=20; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
elseif (diff<-tolerance)
%Sortie " passage étape 20"
y=y_prv; a=10; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
end
else
y=y_prv; a=a_prv; t_act=t_prv; Pr=Pr_prv; teta=teta_prv;
end
end
function duty = fcn(y)
duty=(y+1)/2;
end
```

c) Script du programme de l'algorithme Routine (ORB control)



Le bloc MATLAB_Function1

```
function [t_act, y] = fcn (t_prv,t,Idcm, y_prv)
Rl=25*18/pi^2;
Kopt=2.2926e-4;
if (t<2)
y=0;
a=0;
t_act=0;
else
if (t-t_prv)<0.1
y=y_prv; a=0; t_act=t_prv;
else
Vdc1=sqrt(Idcm/Kopt);
Rdc1=Vdc1/Idcm;
d=1/(1+sqrt(Rdc1/Rl));
y=(d*2)-1; t_act=t; a=0;
end
end
end
```

Annexe 3: Rechargeable 48V 50Ah Lithium Ion Battery 2560Wh 16S1P Power Storage

Annexe 3: Rechargeable 48V 50Ah Lithium Ion Battery 2560Wh 16S1P Power Storage:

Deep Cycle Lithium Ion Battery Pack 48V 50Ah Lifepo4 Rechargeable Storage Batteries			
Electric Characteristics			
Nominal Voltage:	51.2V	Energy:	2560Wh
Rated Capacity:	50Ah	Specifi Energy:	120.5Wh/kg
Internal Resistance:	≤40mΩ	Cycle Life:	3000+
Charging and Discharging Parameters			
Charge cut-off volt:	58.4V	Discharge cut-off volt:	40V
Maximum Charge current:	50A	Maximum Discharge current:	50A
Peak Discharge current:	100A	Suggested charge Volt:	58.4V
Operation Temperature Parameters		Storage Temperature Parameters	
Charge:	0~45°C	Less than a year:	0~25°C
Discharge:	-20~60°C	Less than three months:	-10~35°C
Recommended:	18~28°C		

48V 50AH Lithium Battery Pack



A5 : Nous offrons une garantie de 2 à 5 ans pour toutes nos batteries. Nous assurons une durée de vie d'au moins 3000 cycles pour les batteries LiFePO4, ce qui signifie qu'après 3000@80% de DOD, il restera encore environ 80% de capacité. Vous pouvez l'utiliser pendant au moins 5 ans pour 1 charge normale et décharge quotidienne.

Annexe 4: 3000 Times 3.2V 50Ah Prismatic Cells M8 LiFePO4 Lithium Iron Phosphate Battery

Annexe 4: 3000 Times 3.2V 50Ah Prismatic Cells M8 LiFePO4 Lithium Iron Phosphate Battery

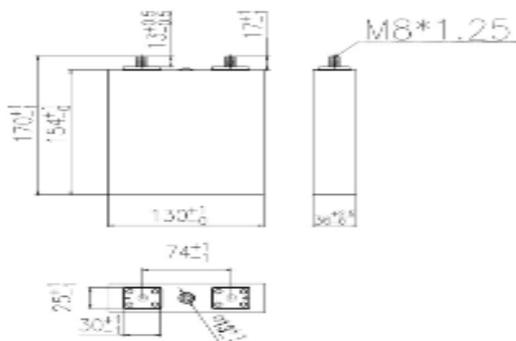
3.2V 50AH Lifepo4 Battery Cells Prismatic Type for Telecom Station Solar System

3.2V 50Ah Lifepo4 Cells BJN-LFP50AHP

Specification

Product Type	Lithium Iron Phosphate Cell
Shell Type	Aluminium shell
Brand Name	Benergy
Voltage	3.2V
Nominal Capacity	50AH
Minium Capacity	50AH
IR	≤2mΩ
Size	36*130*170mm (W,L,H)
Weight	1250g±150g
Charge Mode	CC/CV (Continuous current/Continuous Voltage)
Max Charge Current	25A (0.5C)
Charge Cut Off Voltage	3.65V±0.05
Standard Discharge Current	25A (0.5C)
Max Continuous Discharge Current	100A (2C)
Discharge Cut Off Voltage	2.5V
Cycle Life	>2000 Times (0.5C charge/discharge, 100% DOD)
Discharge Temperature	0 ~ 45°C
Charge Temperature	0 ~ 45°C
Application	Telecom sation building, solar system , energy storage, golf cart, EV etc.
Warranty	2 Years
OEM/ODM	Yes(Accepted)

Cell Diagram



Cell Picture:



Annexe 5: Datasheet de la batterie lithium-ion pour système PV-éolien-batterie

Annexe 5: Datasheet de la batterie lithium-ion pour système PV-éolien-batterie



Batterie Lithium Ion 48V 200AH

Produit: Batterie au Lithium Ion 48V 200AH Poids: 262 lb

QUANTITÉ [Ajouter au panier](#)

PREX **10 399,92 \$** à partir de LA LAFIK

PARTAGER CETTE [Facebook](#) [Twitter](#) [LinkedIn](#) [Print](#)

[Ajouter](#) [Ajouter](#)

DÉTAILS DU PRODUIT

Cette batterie intelligente au lithium-ion à batterie 48V 200AH est dotée d'un système de protection de la batterie (BPS) intégré qui rend cette batterie prête à l'emploi qui convient à presque toutes les applications.

PUISSANCE ET ÉNERGIE L'AVANTAGE ÉLECTRIQUE

Tension nominale	51,2V
Tension de charge	58,4V
Pic de décharge (1 sec)	2000A
Taux de charge / décharge continue	100A
Capacité (ampères-heures)	200AH
Capacité (wattH)	2160WH

TAILLE ET AVANTAGE DU POIDS

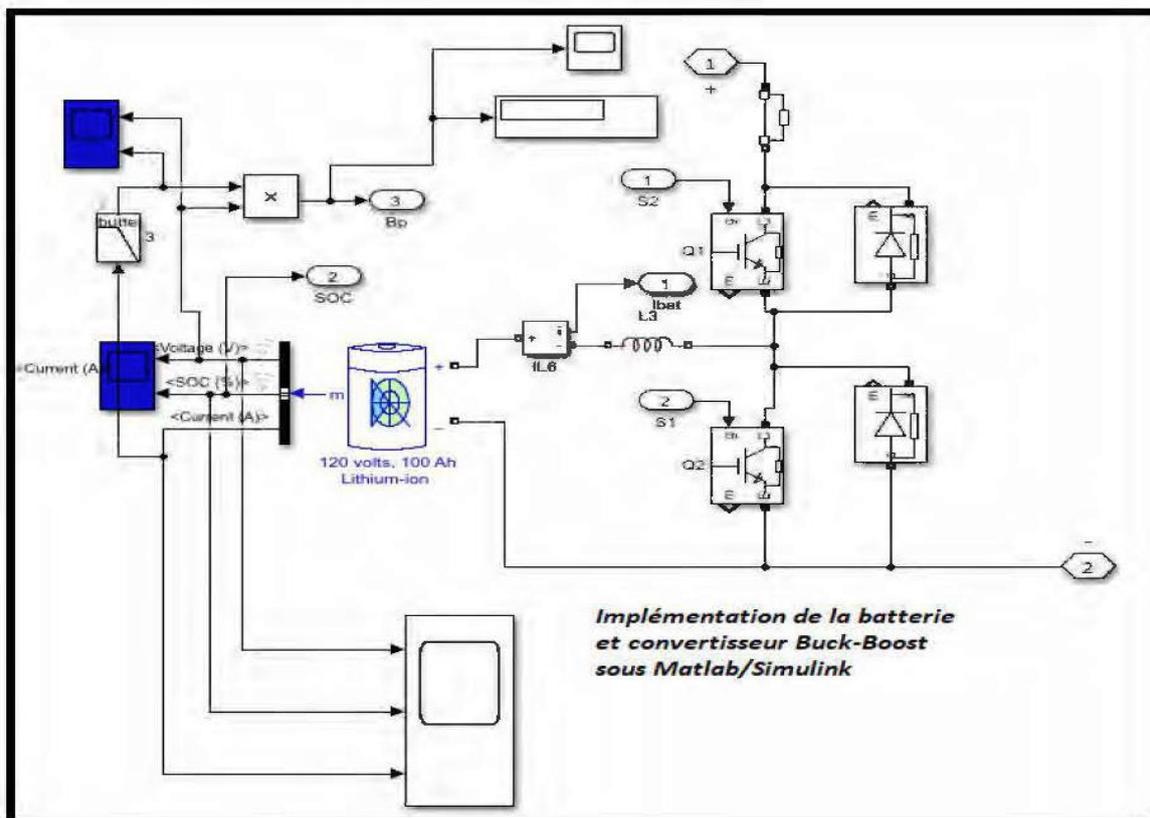
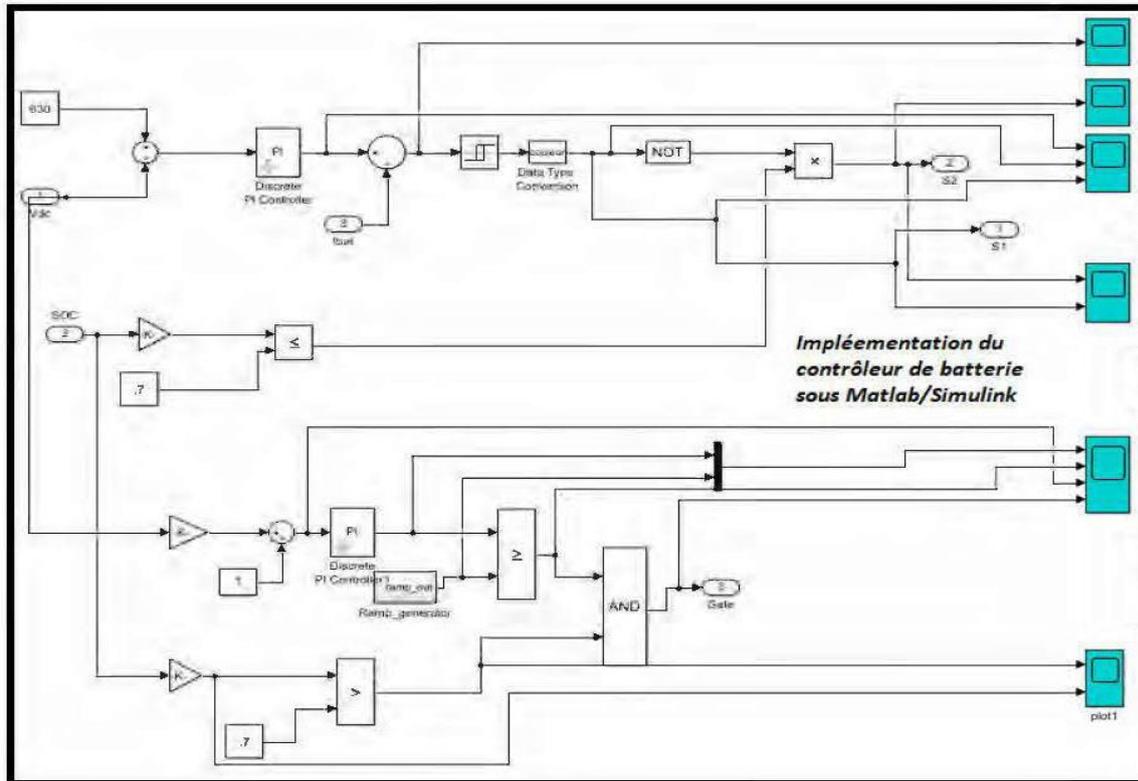
Poids	262 lb
Longueur	26,77"
Largeur	19,68"
Hauteur	11,6"

AVANTAGE TECHNOLOGIQUE

Capacité utilisable (AHD)	216AH
Profondeur de décharge	100% DOD
Minutes de réserve à 20A	600 min
Minutes de réserve à 50A	240 min
Autodécharge	<3% par mois
Chimie	Phosphate de fer au lithium (LiFePO4)
Type de cellule	Cylindrique
Modulaire	Connexion série ou parallèle

Annexe 6: implémentation du contrôleur de charge et de la batterie dans Matlab/Simulink

Annexe 6: implémentation du contrôleur de charge et de la batterie dans Matlab/Simulink



Annexe 7: implémentation du système hybride dans le scénario PV -batterie-charge continue dans Matlab/Simulink

Annexe 7: implémentation du système hybride dans le scénario PV -batterie-charge continue dans Matlab/Simulink

