



DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIÈRE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Gestion d'énergie d'un système multi-source pour une application autonome

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

FETTOUM Rayen

DAOUDI Lina

Sous la direction de :

TEGANI Ilyes

Grade

MCB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

HOUABES Mourad

Pr.

ESTI Annaba

Examineurs :

.....

MCB

ESTI Annaba

.....

MCB

ESTI Annaba

Remerciement

Au terme de notre projet fin d'étude, nos remerciements vont d'abord à Dieu, le créateur de l'univers qui nous a dotés d'intelligence et nous a maintenu en bonne santé pour mener à bien notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees à notre directeur de mémoire Monsieur TEGANI Ilyes, maître de conférences au sein de l'école supérieure de technologie industriel d'Annaba. Nous le remercions vivement pour sa présence, ses conseils judicieux et ses encouragements tout au long du travail.

Nous adressons aussi nos remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'accepter d'évaluer et d'examiner notre modeste travail.

Finalement nous tenons à exprimer nos remerciement à nos familles qui nous ont toujours encouragées et soutenues et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au succès de ce travail.

"Gestion d'énergie d'un système multi-source pour une application autonome"

Résumé

Le présent projet de fin d'étude consiste en conception d'une stratégie de commande d'un système renouvelable hybride destiné à répondre aux besoins énergétique d'un site rural et citadin, et composé de deux sources : les panneaux photovoltaïques et les éolienne ainsi que des batteries pour le stockage. La gestion de l'énergie de ce système hybride est réalisée par une commande basée sur la notion de platitude utilisée pour le contrôle de puissance entre les sources, avec des régulateurs PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur) et PI afin de contrôler le courant inductif de chaque convertisseur. La modélisation et le dimensionnement ont été étudiés .Les simulations graphiques sont réalisées à l'aide du programme MATLAB afin de valider le bon fonctionnement de notre gestionnaire d'énergie proposé.

Mots clés : Sources renouvelables, gestion de l'énergie, notion de platitude, régulateurs du courant, PID, batterie, modélisation, dimensionnement et commande, simulation.

" Energy management of a multi-source system for a stand-alone application "

Abstract

The present project consists of designing a control strategy for a renewable hybrid system to satisfy the electrical demands of a rural and urban site, consisting of two sources two sources: photovoltaic panels and wind turbine, as well as batteries for storage,. The energy management of our hybrid system is realized by using a control based on the notion of flatness used for power control between the sources, with PID (Proportional, Integrator and Derivative) and PI regulators to control the inductive current of each converter.. Modeling and sizing have been studied. Graphical simulations are performed using the MATLAB program to validate the proper functioning of our proposed energy manager.

Keywords: Renewable sources, energy management, flatness notion, current regulators, PID, battery, modeling, dimensioning and control, simulation.

" إدارة طاقة لنظام متعدد المصادر للتطبيقات المستقلة "

ملخص:

يتكون مشروع نهاية الدراسة هذا من نمذجة استراتيجية تحكم لنظام متجدد هجين لتلبية الاحتياجات الكهربائية لموقع معزول أو في المدينة، ويتألف من مصدرين متجددين: ألواح الطاقة الشمسية وتوربينات الرياح، والبطاريات المستخدمة للتخزين. يتم تنفيذ عملية التحكم للطاقة لهذا النظام الهجين من خلال عنصر تحكم يعتمد على فكرة التسطيح للتحكم في تدفقات الطاقة بين المصادر، مع استعمال النظام (النسبي، والتكامل، والإغلاق) للتحكم في التيارات المتعلقة بالمحولات. تمت دراسة النمذجة و التحجيم. تتم محاكاة هذا النظام باستخدام برنامج 'ماتلاب' للتحقق من صحة فعالية التحكم المقترح لتسيير الطاقة.

كلمات المفتاحية: المصادر المتجددة، إدارة الطاقة، نظرية التسطيح، منظمات التيار، نظام التناسبي التكاملي ، بطارية، النمذجة، التحجيم والتحكم، المحاكاة.

Table de matière

Introduction Générale.....	1
1. Généralités sur les sources électriques hybrides	3
1.1 Introduction	4
1.2 Généralité sur les systèmes hybrides	4
1.3 Générateur photovoltaïque.....	5
1.3.1 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	5
1.3.1.1 Cellules au silicium cristallin :.....	5
1.3.1.2 Cellules à base de couche mince :.....	6
1.3.1.3 Cellules à base de photovoltaïque organique	7
1.3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	7
1.3.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	9
1.3.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque	11
1.4 Les éoliennes	11
1.4.1 La production mondiale	14
1.4.2 Les différents types de génératrices éoliennes.....	15
1.4.3 Production d'énergie électrique par éolienne	18
1.5 Batteries électrochimiques.....	19
1.5.1 Liaisons des batteries	20
1.5.2 Différent types des batteries électrochimique :.....	21
1.5.3 Modélisation des batteries :	23
1.5.4 Avantages et inconvénient de stockage par batteries.....	24
1.6 Conclusion	25
2. Conception d'un système hybride	26
2.1 Introduction	27
2.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride	27
2.2.1 Modélisation de convertisseur boost.....	28
2.2.2 Modélisation de Convertisseur Buck-Boost	29
2.3 Modèle mathématique	31
2.4 Dimensionnement de système	32
2.4.1 Dimensionnement des panneaux solaires	32
2.4.2 Dimensionnement des éoliennes.....	33
2.4.3 Dimensionnement de la batterie (capacité).....	33
2.4.4 Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources	35

2.4.4.1	Convertisseurs Boost.....	35
2.4.4.2	Convertisseur Buck-Boost.....	36
2.5	Etude des sites d'implantation :.....	38
2.5.1	L'école supérieure de technologies industrielles –Annaba.....	38
2.5.1.1	Diagrammes des données météorologiques :	39
2.5.1.2	Les besoins électrique	40
2.5.1.3	Calculs et choix des éléments du système	42
2.5.2	Etude 2 : ville de Tamanrasset (village de Tahifet)	44
2.5.2.1	Diagrammes des données climatiques.....	44
2.5.2.2	Calculs et choix des éléments du système :.....	46
2.6	Conclusion	48
3.	Gestion de l'énergie et commande du système	50
3.1	Introduction	51
3.2	Stratégie de commande du système hybride proposé	51
3.2.1	Notion de la commande par platitude	52
3.2.2	Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence.....	53
3.2.3	Démonstration de la platitude du système hybride proposée.....	54
3.2.4	Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence	57
3.3	Le gestionnaire de l'énergie proposé (scénario et états proposés)	58
3.3.1	Algorithme de commande par énergie	58
3.3.2	Conception structurelle du système hybride	59
3.3.3	Régulateurs du courant par PID	60
3.4	Le contrôleur MPPT	61
3.5	Résultat de simulation	63
3.5.1	Simulation du système photovoltaïque avec batteries	63
3.5.2	Simulation du système photovoltaïque et éolienne avec les batteries	70
	Conclusion générale et perspective	78

Liste des figures

FIGURE 1-1 CELLULES SOLAIRE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN	6
FIGURE 1-2 CELLULE POLYCRISTALLINE	6
FIGURE 1-3 CELLULE AMORPHE	7
FIGURE 1-4 CARACTERISTIQUE I-V DE CELLULE SOLAIRE TYPE "SUNPOWER400W" EN FONCTION DE L'IRRADIATION.....	8
FIGURE 1-5 CARACTERISTIQUES P-V DE CELLULE SOLAIRE TYPE "SUNPOWER400W" EN FONCTION DE L'IRRADIATION	8
FIGURE 1-6 CARACTERISTIQUE I-V DE CELLULE SOLAIRE TYPE "SUNPOWER400W" POUR DIFFERENTES TEMPERATURE	9
FIGURE 1-7 CARACTERISTIQUE P-V DE CELLULE SOLAIRE TYPE "SUNPOWER400W" POUR DIFFERENTES TEMPERATURES	9
FIGURE 1-8 MODELE EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE	10
FIGURE 1-9 LES COMPOSANTS D'UNE GENERATRICE EOLIENNE.	12
FIGURE 1-10 PRODUCTION MONDIALE DE L'ENERGIE EOLIENNE EN 2018	14
FIGURE 1-11 PRODUCTION MONDIALE DE L'ENERGIE EOLIENNE ENTRE 2008-2018	15
FIGURE 1-12 GENERATRICE EOLIENNE A VITESSE FIXE [13]	16
FIGURE 1-13 GENERATRICE EOLIENNE A DOUBLE ALIMENTATION « MADA » [13]	16
FIGURE 1-14 GENERATRICE A BASE DE GENERATRICE SYNCHROME A AIMANT PERMANENT AVEC CONVERTISSEUR COMPLET [13].....	17
FIGURE 1-15 GENERATRICE A VITESSE VARIABLE [13].....	17
FIGURE 1-16 SCHEMA D'UNE BATTERIE ELECTROCHIMIQUE.....	20
FIGURE 1-17 LIAISON EN SERIE DES BATTERIES.....	20
FIGURE 1-18 LIAISON EN PARALLELE DES BATTERIES	21
FIGURE 1-19 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE BATTERIE AU PLOMB [17].....	22
FIGURE 1-20 MODELE R-C D'UNE BATTERIE AU PLOMB.....	23
FIGURE 2-1 ARCHITECTURE DU SYSTEME HYBRIDE AUTONOME.	28
FIGURE 2-2 ARCHITECTURE D'UN CONVERTISSEUR BOOST.....	28
FIGURE 2-3 ARCHITECTURE D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.....	30
FIGURE 2-4 PHOTO DU SITE SUR CARTE	38
FIGURE 2-5 RAYONNEMENT SOLAIRE MENSUELLE HORIZONTAL [VILLE D'ANNABA].....	39
FIGURE 2-6 TEMPERATURE MENSUELLE DE L' AIR (C°) [VILLE D'ANNABA].....	40
FIGURE 2-7 PROFILE DE CHARGE	42
FIGURE 2-8 PHOTO DU SITE SUR CARTE	44
FIGURE 2-9 RAYONNEMENT SOLAIRE MENSUEL HORIZONTAL [VILLE TAHIFET - TAMANGHASSET]	45
FIGURE 2-10 VITESSE DU VENT MENSUELLE (M/S) [VILLE TAHIFET - TAMANGHASSET]	45
FIGURE 2-11 TEMPERATURE DE L' AIR MENSUELLE (M/S) [VILLE TAHIFET - TAMANGHASSET].....	46
FIGURE 3-1 SCHEMA DE COMMANDE DE SYSTEME HYBRIDE.....	58
FIGURE 3-2 ALGORITHME MPPT P&O.....	62
FIGURE 3-3 PROFILE DE LA CHARGE	63
FIGURE 3-4 TENSION DE BUS CONTINU	64
FIGURE 3-5 ENERGIE DE BUS CONTINU ET SA REFERENCE.....	64

FIGURE 3-6 VARIATION DE L'ENERGIE ELECTROSTATIQUE DANS LE BUS CONTINU	65
FIGURE 3-7 BILAN DES PUISSANCES	65
FIGURE 3-8 LES PUISSANCES DEMANDEES	66
FIGURE 3-9 L'ENERGIE PRODUITE PAR LES BATTERIES ET SA REFERENCE.....	67
FIGURE 3-10 ENERGIE FOURNIT PAR LES BATTERIES	67
FIGURE 3-11 TENSIONS DES BATTERIES.....	68
FIGURE 3-12 PUISSANCE DELIVREE PAR LA SOURCE PV ET L'ALGORITHME MPPT	68
FIGURE 3-13 PUISSANCE DEMANDE PAR LA SOURCE PV ET L'ALGORITHME MPPT	69
FIGURE 3-14 COURANT ET TENSION DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE	69
FIGURE 3-15 TENSION DE BUS CONTINU	70
FIGURE 3-16 ENERGIE DE BUS CONTINU ET SA REFERENCE.....	70
FIGURE 3-17 VARIATION DE L'ENERGIE ELECTROSTATIQUE DANS LE BUS CONTINU	71
FIGURE 3-18 BILAN DES PUISSANCES	71
FIGURE 3-19 LES PUISSANCES DEMANDEES	72
FIGURE 3-20 ENERGIE FOURNIT PAR LES BATTERIES	73
FIGURE 3-21 COURANTS DES BATTERIES	73
FIGURE 3-22 TENSION DE LA BATTERIE	74
FIGURE 3-23 PUISSANCE DELIVREE PAR LA SOURCE PV ET CELLE CALCULEE THEORIQUEMENT VIA L'ALGORITHME MPPT	74
FIGURE 3-24 LA PUISSANCE DEMANDEE PAR LA COMMANDE PLATE ET CELLE GENEREE VIA L'ALGORITHME MPPT	75
FIGURE 3-25 LA TENSION DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIENNE.....	75
FIGURE 3-26 COURANTS DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE.....	76
FIGURE 3-27 COURANTS DE LA SOURCE EOLIENNE.....	76

Liste des Tableaux

TABLEAU 2-1 PARAMETRE DE LA SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE	32
TABLEAU 2-2 PARAMETRE DE LA SOURCE EOLIENNE	33
TABLEAU 2-3 CARACTERISTIQUES DE LA BATTERIE	34
TABLEAU 2-4 PARAMETRES DU SITE CHOISI -ESTI ANNABA.....	39
TABLEAU 2-5 ESTIMATION D'UNE CONSOMMATION D'ENERGIE DE L'ECOLE SUPERIEURE DES TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES –ANNABA	41
TABLEAU 3-1 EFFETS DES CORRECTEURS P, I ET D SUR LES REGIMES STATIQUE ET DYNAMIQUE DU SYSTEME EN BOUCLE FERMEE	61

Liste d'abréviation :

Symbole	Signification	Unité
V_{co}	La tension de circuit ouvert	V
I_{cc}	Le courant de court-circuit	A
V_{max}	La tension maximale	V
I_{max}	Le courant maximal	A
P_{max}	La puissance maximale	W
MPPT	Maximum power point tracking	-
R_s	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
I_{cell}	Le courant électrique produit par la cellule	A
I_{ph}	Le courant photonique	-
I_D	Le courant de polarisation de la jonction P-N	A
I_{sh}	Le courant des connexions parallèles	A
I_s	Le courant de saturation de la diode.	A
K	Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$).	J/K
n	Le facteur d'idéalité de la jonction P-N.	-
q	La charge d'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).	C
T	La température de la jonction	K
G	L'éclairement	W/m^2
E	L'énergie cinétique	J
V_{wind}	Vitesse d'éolienne	m/s
ρ	La densité de l'air est ρ	kg / m^3
α	La masse volumique de l'air	kg/m^3
β	Le débit volumique d'air	m^3/s
S	La surface du dispositif de récupération	m^2
P_d	La puissance disponible dans le vent	W
a	La masse volumique de l'air atmosphérique	Kg
b	La surface du capteur éolien	m^2
c	La vitesse incidente de l'air atmosphérique.	m/s
k	Le facteur de forme de la courbe	-
C	Le facteur d'échelle de la courbe.	m/s
V_{moy}	La vitesse moyenne du vent	m/s
C_b	La capacité interne de la batterie.	A/h
V_{Batt}	La tension de la batterie	V
I_{Batt}	Le courant de la batterie	A
α	Le rapport cyclique	-
U_{WT}	Les signaux de contrôle de la source éolienne	-
U_{Batt}	Les signaux de contrôle de la batterie	-
I_{PV}	Le courant de la source photovoltaïque	A

I_{WT}	Le courant de la source éolienne	A
V_{PV}	La tension de la source photovoltaïque	V
V_{WT}	La tension de la source éolienne	V
P_i	La Puissance d'éclairement aux conditions au STC	1Kw/m ²
P_c	La puissance crête	W
D	Décharge maximale admissible (0.8 pour les batteries au plomb)	-
C_t	La capacité totale de banc de batteries nécessaires	Ah
C_n	La capacité nominale d'une unité de batterie	Ah
N_{bp}	Le nombre de batteries parallèle	-
N_{bs}	Le nombre de batteries en série	-
P_{ch}	La puissance demandée	W
H_{day}	Le nombre des heures lesquelles la charge consomme la puissance	h/jour
D_{Week}	Le nombre de jours d'utilisation de la charge.	J/Week
P_{PV}	La puissance générée par la source photovoltaïque	W
P_{wt}	La puissance générée par la source éolienne	W
P_{Batt}	La puissance générée par la batterie	W
P_{PVref}	La puissance référence de la source photovoltaïque	W
P_{PVMPP}	La Puissance photovoltaïque délivrée par l'algorithme MPPT	W
$P_{Battref}$	La puissance référence de la batterie	W
P_{wtref}	La puissance référence de la source éolienne	W
r_{pv}	Les pertes statiques dans les convertisseurs de la source PV	-
r_{wt}	Les pertes statiques dans les convertisseurs de la source WT	-
r_{Batt}	Les pertes statiques dans les convertisseurs de la batterie	-
Y_{bus}	L'énergie stockée dans le bus continu	J
Y_{Batt}	L'énergie stockée dans la batterie	J
Y_T	L'énergie totale	J
V_{bus}	La tension de bus continu	V
$P_{BattLim}$	La puissance maximale limitée la de batterie	W

Introduction Générale

Introduction Générale

Aujourd'hui plus que jamais, le réchauffement climatique et la détérioration d'air nous affectent et ses effets néfastes ne cessent de s'accroître. Cela est dû en partie à l'activité humaine. En effet une grande partie de la production énergétique mondiale est assurée par des énergies fossiles. Pour réduire les effets nuisibles des énergies fossiles sur l'environnement et couvrir le besoin énergétique, le monde s'oriente vers le développement des énergies renouvelables.

Les sources d'énergie renouvelable ont une place importante et décisive, aussi bien aujourd'hui qu'à l'avenir, elles sont inépuisables et non polluantes d'où l'appellation d'énergies vertes. Parmi les différents systèmes renouvelables, les systèmes éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps et sont devenus de plus en plus accessibles en termes de technologies et de coût. Ces sources se prêtent particulièrement bien à la production d'électricité pour les systèmes à distance tels que les sites isolés, ou en micro réseau. Elles sont souvent associées à des systèmes de stockage comme les batteries pour pallier au caractère intermittent de ces énergies, en cas de production excédentaire ou pour compenser le manque momentané de puissance lors des pics de consommation.

L'objectif d'un tel système est d'assurer l'autonomie énergétique tout en restant économiquement et écologiquement fiable. Cependant, trois types de contraintes apparaissent. Premièrement les sources ont un coût important, et consomment beaucoup d'énergie lors de leur fabrication. Deuxièmement, le coût de stockage (les batteries) représente une importante contrainte économique et écologique, vu que ces dernières possèdent une durée de vie en nombre de cycles de charge-décharge limitée où ils doivent être changés. Enfin, le principal problème des énergies renouvelables est la dépendance entière aux conditions météorologiques qui ont un caractère aléatoire.

Pour résoudre ce problème énergétique la solution est l'hybridation. Les systèmes hybrides permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables, ce qui induit une production d'énergie stable et durable.

L'objectif du projet de fin d'études est le dimensionnement optimal, la modélisation, le contrôle commande et la simulation d'un système hybride (photovoltaïque, éolienne et

batterie) destiné à répondre aux besoins énergétique pour une application autonome. La première application consiste à alimenter une école supérieure de technologie industrielle par un système photovoltaïque avec un système de stockage qui est les batteries au plomb. La deuxième application consiste à alimenter un ensemble de foyers situés dans une région rurale isolée (village de Tahifet) dans la ville de Tamanrasset. La conception est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB, sur lequel sont élaborés des blocs en SIMILINK qui sont décrits par des équations mathématiques régissant le fonctionnement du système hybride des conditions métrologiques jusqu'aux données de gestion d'énergie.

Le manuscrit relatif à ce projet de fin d'études est présenté en trois chapitres. Le premier chapitre présente les différentes sources électriques du système hybride à savoir le photovoltaïque et l'éolienne en détaillant leurs caractéristiques, avantages et limites de chacune. Le dispositif de stockage sera également étudié et le choix de batterie au plomb sera justifié.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système hybride, ces différentes sources et les convertisseurs associés. Un modèle réduit du système sera présenté. L'objectif principal est le dimensionnement optimal de ce système en vue de rapprocher sa performance des besoins énergétiques du site d'étude, d'analyser sa réponse sous des conditions météorologiques réelles et de comprendre l'influence des principaux facteurs intrinsèques et extrinsèques.

Le troisième chapitre définit les méthodes de contrôle commande utilisées pour contrôler le système hybride étudié et qui se basent sur la notion de platitude avec des régulateurs de courant par PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur). Le chapitre se termine par une discussion des résultats de simulation sous l'environnement de Matlab/Simulink de la stratégie de commande pour la gestion du flux d'énergie de système hybride PV/WT/batteries.

Chapitre 1

Généralité sur les sources électriques hybrides

1.1 Introduction

Aujourd'hui les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et l'éolienne, sont considérées comme une alternative de production d'électricité intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde pour son respect environnemental et sa large disponibilité. Cependant ces sources ont un caractère aléatoire car elles dépendent des conditions météorologiques, souvent très variables et difficiles à prévoir avec précision, cela risque de diminuer leur fiabilité. Pour surmonter cet obstacle, la solution à retenir, pour les sites isolés, est certainement le recours et la combinaison de plusieurs sources, telles que les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien avec batterie.

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons à ce type de systèmes. Nous définissons, dans un premier temps, de manière générale les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques avec batteries, objet principal de ce projet fin d'étude. Puis, nous décrivons les principaux composants, avantages et inconvénients ainsi que leurs caractéristiques physiques et électriques.

1.2 Généralité sur les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybrides sont des systèmes d'approvisionnement en électricité qui combinent différentes sources renouvelables et/ou des sources conventionnelles (générateur diesel...), des différents éléments de stockage et de charges, en vue d'obtenir et de maintenir une production énergétique stable et durable et aussi permettre la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables [1]. Les systèmes hybrides permettent une possibilité d'autonomie énergétique vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source d'où leur intérêt essentiel. Ils peuvent être connectés aux réseaux électriques ou être autonomes. Dans le premier cas, l'électricité produite par ces énergies renouvelables (éoliennes, solaires...) est transportée via des lignes vers le réseau. La majorité des systèmes hybrides raccordés au réseau sont sans dispositifs de stockage. Le deuxième cas est utilisé pour les sites isolés où le réseau n'existe pas et la présence d'un dispositif de stockage s'impose.

Dans notre travail de recherche, nous nous intéressons principalement aux systèmes hybrides formés par deux sources renouvelables de type photovoltaïque et éolien et un stockage électrochimique de type batteries.

Ce type de systèmes est le plus répandus. La complémentarité de ces ressources est très significative que ce soit à l'échelle annuelle ou à l'échelle journalière. Effectivement, le soleil est intense en été tandis que le vent souffle plus pendant l'hiver et l'automne et moins au printemps. Aussi, sur une journée, le rayonnement solaire est plus fort pendant le jour alors que le vent peut souffler aussi la nuit. L'efficacité environnementale est un autre avantage de ce système. En effet, au cours de leur fonctionnement, ils ne génèrent, ni gaz polluants, ni émissions nocives. [2]

La description des composants du système hybride éolien-photovoltaïque avec stockage électrochimique est détaillé dans le cadre de chapitre I.

1.3 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué de cellules photovoltaïques appelées aussi composants optoélectriques qui sont considérés comme des éléments de base de celui-ci, et servent à convertir le rayonnement solaire incident en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à semi-conducteurs, généralement en silicium. Elles ne polluent pas et ne produisent aucun bruit.

1.3.1 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs technologies de cellules solaires chaque technologie à ses propres caractéristiques, mais toutes sont composées de matériaux semi-conducteurs.

1.3.1.1 Cellules au silicium cristallin :

- **Les cellules monocristallines :**

Les cellules de silicium monocristallin sont la première génération de photopiles. Ces cellules sont formées d'un seul cristal ordonné. Le silicium fondu lors du refroidissement se solidifie et forme un seul cristal de grande dimension.

Ce type de cellule généralement de couleur bleu uniforme a un rendement de 12 à 20% et de 25% en laboratoire avec une durée de vie importante de 25 à 30 ans. En revanche leur procédé de fabrication est difficile et onéreux.



Figure 1-1 Cellules solaire en silicium monocristallin

- **Les cellules multi cristallines (polycristallines) :**

Les cellules polycristallines sont constituées de plusieurs cristaux assemblés pendant le refroidissement du silicium, c'est ce qui explique l'hétérogénéité de leur structure. Elles sont caractérisées par un rendement de 11 à 15% et de 20% en laboratoire et un coût de production moins élevé. [1]

Le silicium polycristallin est la technologie la plus utilisée car il a le meilleur rapport « performance/ prix ».



Figure 1-2 Cellule polycristalline

1.3.1.2 Cellules à base de couche mince :

- **Cellules amorphe :**

Le silicium amorphe a une structure désordonnée, c'est-à-dire non cristallisée, et un coefficient d'absorption de la lumière supérieur à celui du silicium cristallin, il fait partie de la technologie « couche mince ». [1]

Ces cellules ont un coût de production bas et fonctionnent sous un éclairage faible. Cependant leur rendement est de 5 à 9% seulement et de 13% en laboratoire, et leurs performances diminuent avec le temps.



Figure 1-3 Cellule amorphe

- **Autres types de cellules à base de couche mince :**

La troisième génération fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs déposés sur la cellule en couche mince par des méthodes chimiques, comme le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium (Gallium) Sélénium (CIS et CIGS) ainsi que l'arséniure de gallium (GaAs). Cette technologie des multicouches a permis d'obtenir des photopiles avec un rendement de 30%.

1.3.1.3 Cellules à base de photovoltaïque organique

Les cellules organiques sont composées de molécules organiques pour transformer la lumière en électricité. Cette technologie est en voie de développement dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur point faible reste aujourd'hui leur durée de vie limitée et leur rendement qui est de l'ordre de 3 à 5%. Cependant leur faible coût et la facilité de fabrication présente un avantage important.

1.3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Les figures ci-dessous illustrent la courbe courant-tension qui représente la clé la plus importante de la cellule photovoltaïque, elle reflète la performance et caractérise la cellule photovoltaïque. On peut définir les points V_{oc} et I_{sc} qui sont respectivement la tension du circuit ouvert et le courant. Le point P_{max} qui permet de définir les valeurs maximales V_{max} et I_{max} est le point recherché par les algorithmes MPPT (maximum power point tracking).

Le comportement des panneaux dépend principalement de deux paramètres : l'irradiation et la température des cellules. Les figures 1-4, 1-5 démontrent les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairéments à température maintenue constante 25°C.

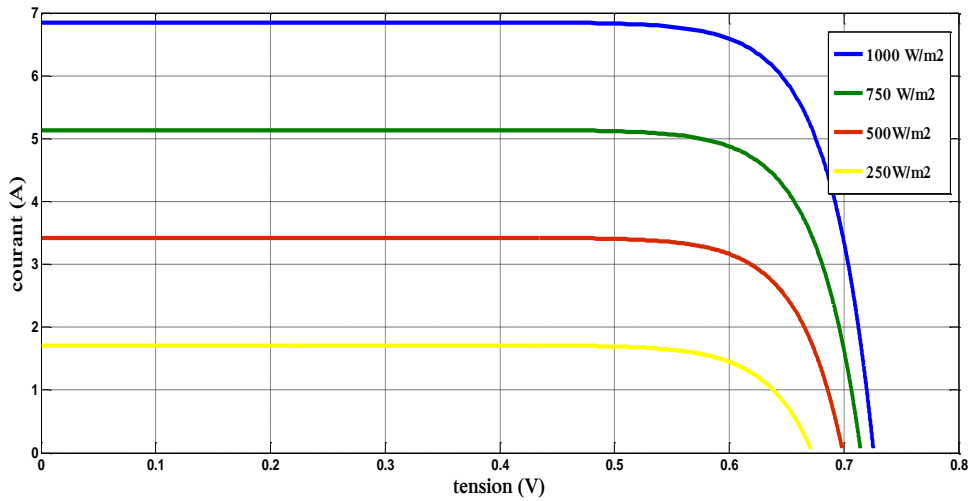


Figure 1-4 Caractéristique I-V de cellule solaire type "Sunpower400W" en fonction de l'irradiation

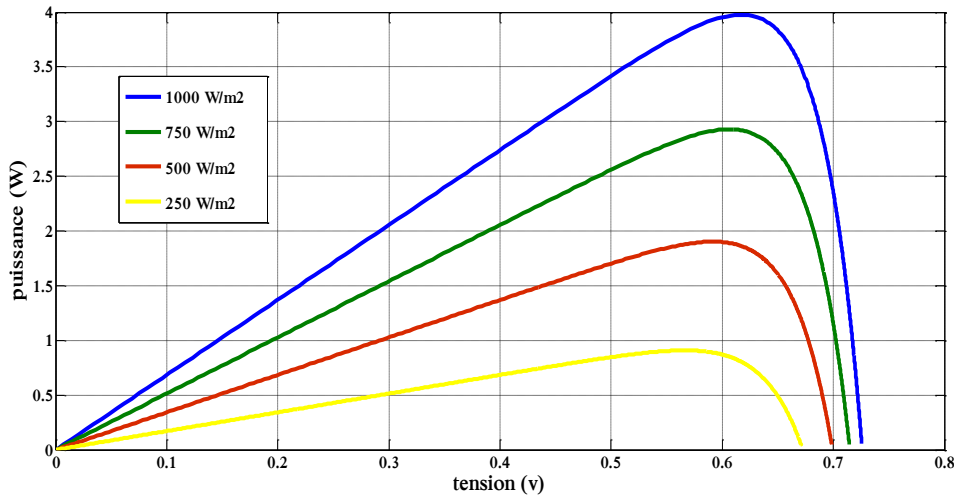


Figure 1-5 Caractéristiques P-V de cellule solaire type "Sunpower400W" en fonction de l'irradiation

La variation de l'irradiation pour une température constante implique une variation de courant de court-circuit I_{cc} de manière proportionnelle, quant à la variation de la tension du circuit ouvert V_{co} (à vide) elle est très faible. [2]

La température est un paramètre très important dans le comportement de la cellule solaire, et à également une influence sur ses caractéristiques : quand la température s'élève, la tension diminue et donc la puissance aussi.

Les courbes portées sur les figures 1.6 et 1.7 démontrent cette dérive des caractéristiques de la cellule en fonction de la température pour un éclairement fixé à 1000W/m^2 .

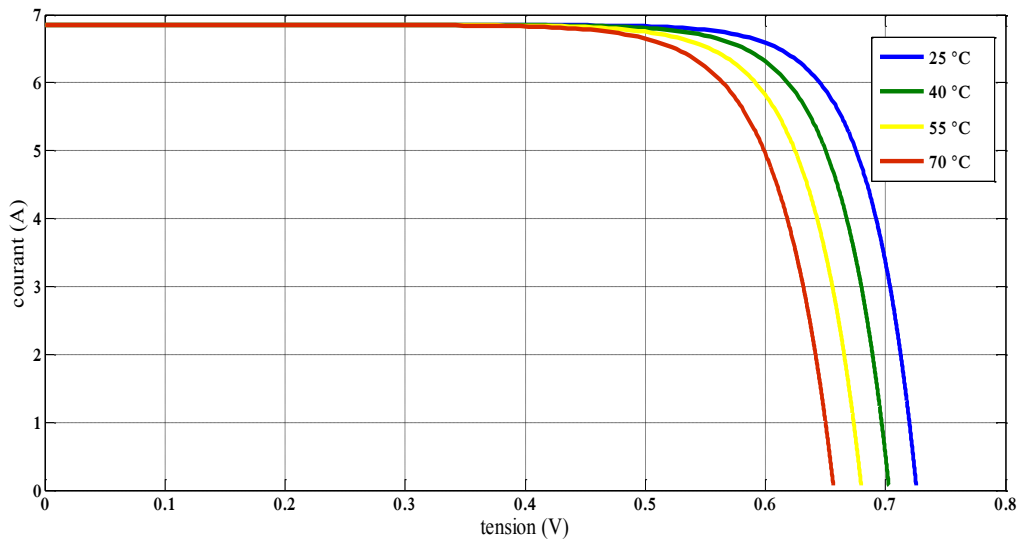


Figure 1-6 Caractéristique I-V de cellule solaire type "Sunpower400W" pour différentes température

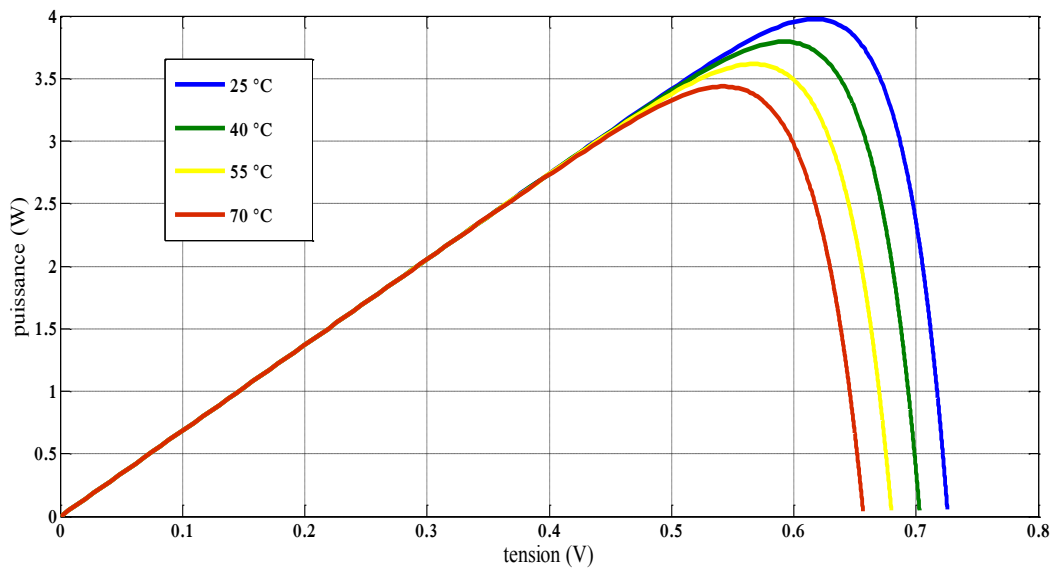


Figure 1-7 Caractéristique P-V de cellule solaire type "Sunpower400W" pour différentes températures

1.3.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous : [3]

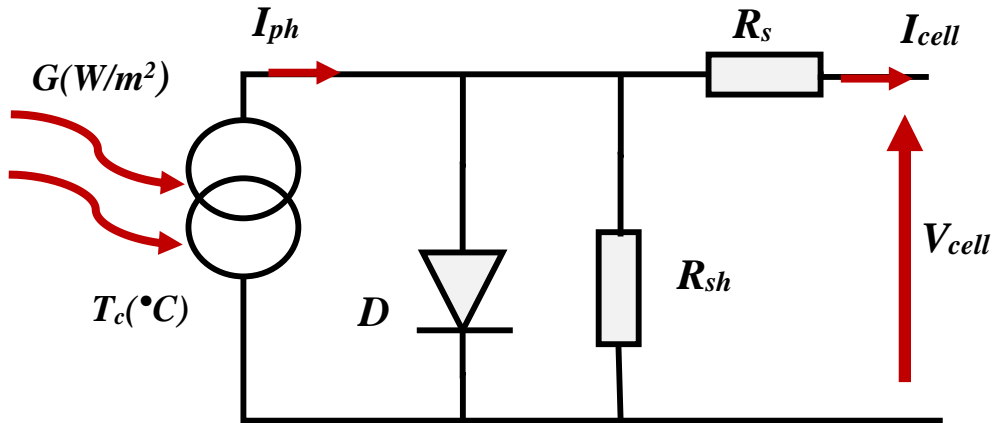


Figure 1-8 Modèle équivalent d'une cellule solaire

Le modèle se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, de deux résistances R_s résistance série et R_{sh} résistance shunt pour la modélisation des pertes.

D'après la loi de Kirchhoff, le courant électrique produit par la cellule est donné par l'expression suivante : [4]

$$I_{cell} = I_{ph} - [I_s \left(e^{\frac{q(V-I \times R_s)}{kTn}} - 1 \right)] - \left(\frac{V+I \times R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.1)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \times \frac{G}{1000} \quad (1.2)$$

L'équation de la diode est donnée par :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (1.3)$$

L'équation du courant de la résistance shunt :

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V+R_s \times I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Ou :

I_{ph} : Le courant photonique, dépend de l'ensoleillement et de la température des modules.

I_D : Le courant de polarisation de la jonction P-N de diode.

I_{sh} : Le courant des connexions parallèles.

I_s : Le courant de saturation de la diode.

V : La tension aux bornes de la cellule.

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

n : Le facteur d'idéalité de la jonction P-N.

q: La charge d'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

T : la température de la jonction en K

G : L'éclairement

1.3.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque

De nombreux avantages sont présentés par un générateur photovoltaïque :

- L'énergie produite par les cellules photovoltaïques est une énergie renouvelable, inépuisable, silencieuse et non polluante.
- Il est très fiable et adapté à des sites isolés et urbains.
- La durée de vie d'un module solaire est longue.
- Faible entretien, les générateurs photovoltaïques ne nécessitent pas un grand entretien, donc les frais de maintenance sont relativement faibles.

Ainsi que des inconvénients :

- Le coût d'installation des panneaux solaires est relativement élevé.
- Faible rendement de conversion.
- La production de l'énergie dépend des conditions météorologiques.
- Pour une utilisation autonome le coût d'installation augmente, car ces systèmes nécessitent un dispositif de stockage et une surface d'installation importante.

1.4 Les éoliennes

Depuis l'antiquité, l'énergie éolienne ou bien l'énergie de vent a été exploitée par l'homme pour la propulsion des navires et le pompage d'eau. Aujourd'hui, cette énergie connaît un fort développement, on parle de parcs éoliens qui servent à produire de l'électricité renouvelable en utilisant des aérogénérateurs (éoliennes), son exploitation est devenue au cours des dernières années la principale source d'électricité d'origine renouvelable, avec plus de 535.478 MW produits dans le monde en 2015[5].

L'éolienne est un dispositif destiné à transformé une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine éolienne, puis en énergie électrique via une génératrice électrique. Cette dernière peut couvrir une large gamme de puissance selon les besoins et le type de génération choisie [5].

Du point de vue de la modélisation, une éolienne se compose par :

- Rotor (composé des pales et moyeu)
- Entraînement (arbres, boîte de vitesses, frein mécanique et générateur électrique)
- Nacelle, et châssis principal
- Tour et fondation
- Système électrique (câbles, appareillage, transformateurs et convertisseurs électroniques de puissance)

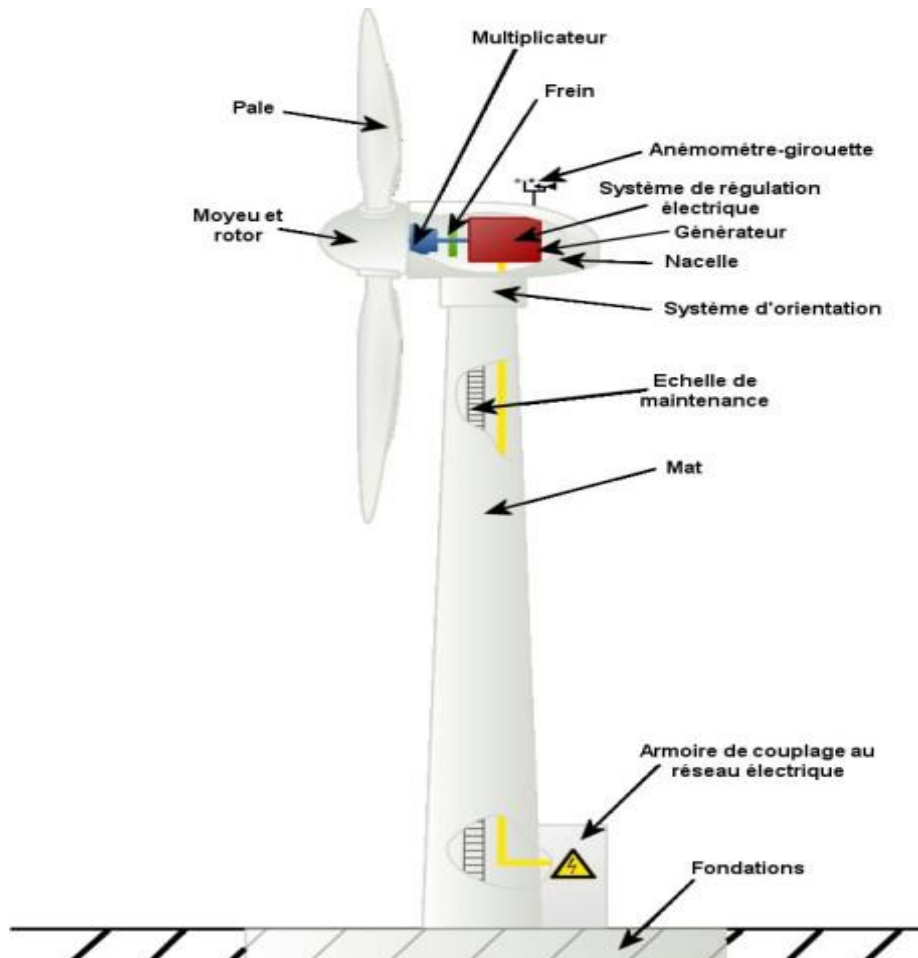


Figure 1-9 Les composants d'une génératrice éolienne.

C'est une énergie renouvelable et non polluante qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif, en revanche son principale inconvénient qu'elle est variable dans le temps à cause de la dépendance, car le vent ne souffle pas forcément quand on a besoin, et son manque de flexibilité [5].

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes se divisent en deux grandes familles celle à axe horizontal et celle à axe vertical.

- **Les éoliennes à axe horizontal :**

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus connues et les plus répandues, ils doivent leur nom du fait que leur axe de transmission est parallèle au sol. Ils sont caractérisés entre autre par leur nombre de pales, il existe des bipales, des tripales et des multipales. Les aérogénérateurs tripales sont les plus utilisés.

Elles produisent des puissances élevées (plusieurs mégawatts), car leurs turbines sont suffisamment en hauteur pour que la direction des flux d'air ne soit pas perturbée par l'environnement, et ont un rendement supérieur à celui de toutes les autres machines [6]. Cependant, ces éoliennes sont beaucoup plus difficiles à installer et plus coûteuses [7].

- **Les éoliennes à axe vertical :**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Ces pales tournent autour d'une tige positionnée verticalement, d'où le fait de leur appellation. Ces solutions ont pour avantage de pouvoir absorber les flux d'air dans n'importe quelle direction sans besoin de mécanisme d'orientation et tournent à faible vitesse. Aussi, elles demandent moins d'espace, sont plus esthétiques et moins bruyante que les éoliennes précédentes ce qui les rendent beaucoup plus adaptées pour un usage domestique. Cependant, elles ont une structure beaucoup plus fragile que celle à axe horizontal, ce qui les rend moins courantes pour générer de grandes puissances [8].

De nombreuses technologies d'éoliennes à axe vertical ont été conçues mais seulement deux modèles sont parvenues au stade de l'industrialisation ceux de Savonius et de Darrieus.

Dans notre travail, nous allons plutôt utiliser le premier type, les éoliennes à axe horizontal (tripales) pour leurs avantages remarquables.

1.4.1 La production mondiale

En 1890, la première génération de l'électricité de source éolienne a été appliquée dans une zone rurale aux Etats Unis, et depuis, cette dernière a connu une progression remarquable [9].

La figure ci-dessous montre la répartition de l'énergie éolienne installée dans le monde à la fin de l'année 2018. Ces statistiques sont puisées dans la source STATISTA

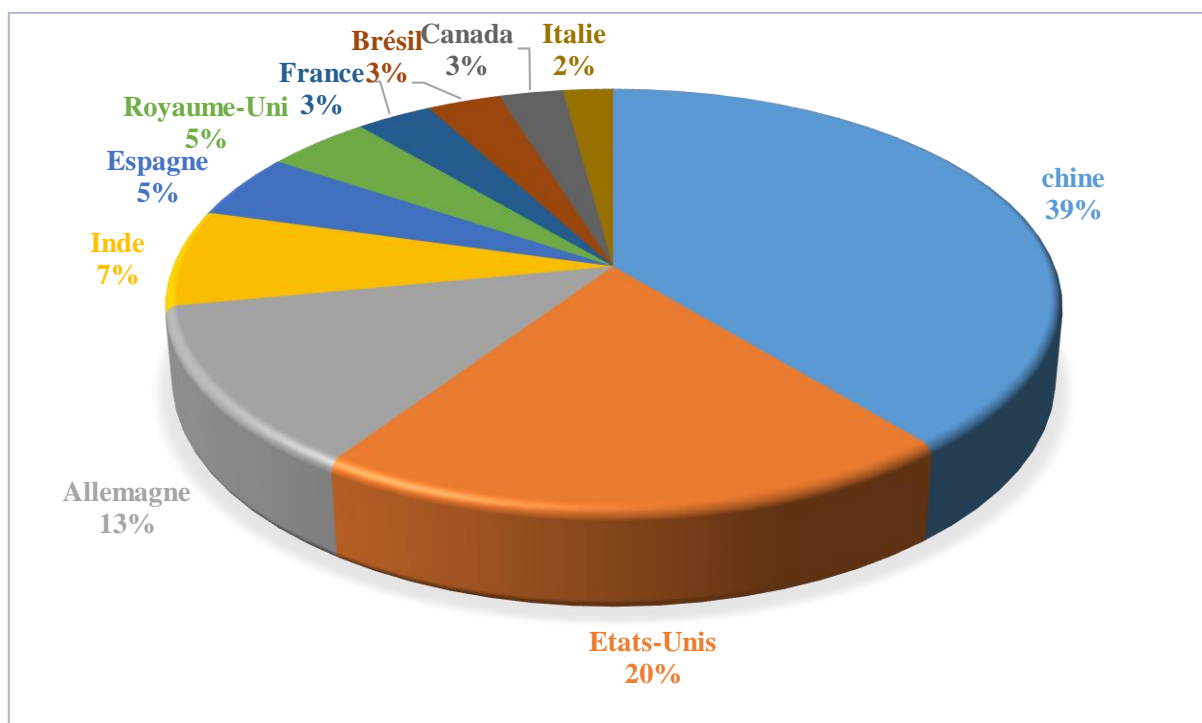


Figure 1-10 Production mondiale de l'énergie éolienne en 2018

En 2018, la Chine devance le classement mondial avec une capacité énergétique de source éolienne 184.3 MW (39% de la production mondiale), suivi par les Etats-Unis qui occupe la deuxième place avec 96.5 MW (soit 20 %). Et en troisième place, on trouve l'Allemagne avec une puissance de 59.3 MW (soit 13 % de la production mondiale).

Selon STATISTA, la courbe portée sur la Fig. 1-11 présente l'accroissement de la capacité de production de l'énergie éolienne dans le monde entre 2008-2018.

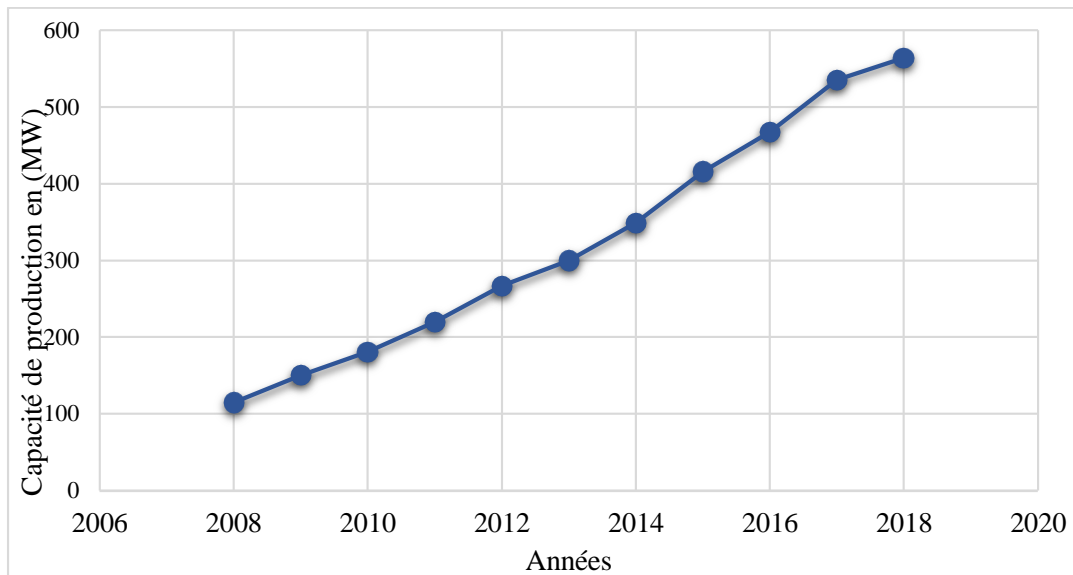


Figure 1-11 Production mondiale de l'énergie éolienne entre 2008-2018

1.4.2 Les différents types de génératrices éoliennes

Les turbines éoliennes peuvent être classifiées à des turbines à vitesse fixe et d'autres à vitesse variable.

Les éoliennes à vitesse fixe tournent à une vitesse constante qui est définie selon le générateur électrique utilisé (nombre de pôle) ainsi que la fréquence du réseau électrique. Bien que les éoliennes à vitesse fixe soient simples et robustes ainsi qu'un coût de construction faible, elles présentent un inconvénient important : elles ne peuvent pas extraire de manière optimale la puissance du vent (Fluctuation de la puissance) [10]

D'une autre part, les éoliennes à vitesse variable ont un fort rendement car ce dernier peut être atteint sur une vaste plage de vitesse de vent. La vitesse de rotation de cette turbine dépend de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Son principal inconvénient est son coût élevé et les pertes dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance.[11]

- **Eoliennes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont des systèmes qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à l'aide d'une simple machine à induction (cage d'écurie) directement connectée au réseau électrique triphasé. Pour tels système, Le rotor est couplé à l'arbre du générateur avec une boîte de vitesses à rapport fixe. Cependant, à tout point de fonctionnement donné, cette turbine doit essentiellement fonctionner à vitesse constante.[12]

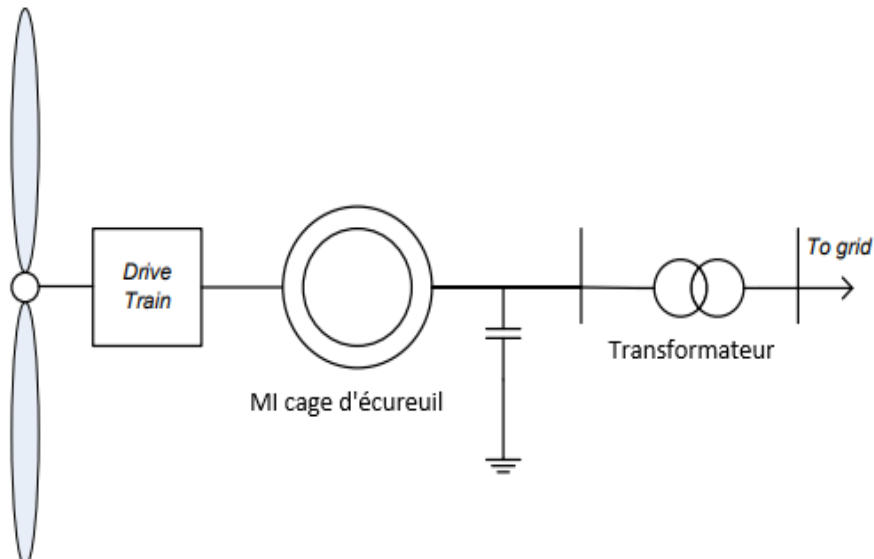


Figure 1-12 génératrice éolienne à vitesse fixe [13]

▪ **Eolienne à double alimentation « MADA »**

Les bagues collectrices sont remplacées par une deuxième machine asynchrone à double alimentation (MADA) mais beaucoup plus petite sur l'arbre de la machine principale.[14]. Elle utilise généralement un convertisseur « AC / DC / AC » tels que le rotor est alimenté via ce convertisseur tandis que le stator du générateur est directement connecté au réseau.

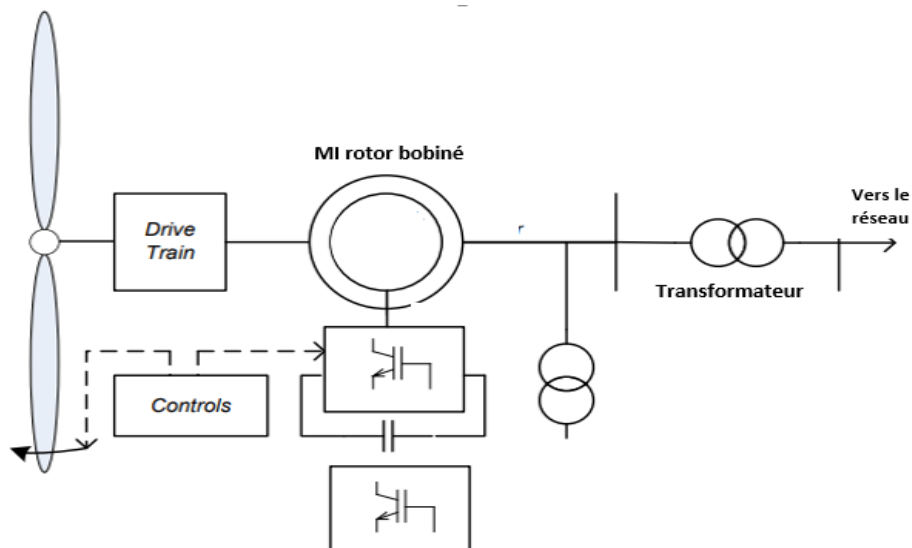


Figure 1-13 génératrice éolienne à double alimentation « MADA » [13]

▪ **Eolienne à vitesse variable avec convertisseur complet :**

Cette configuration permet d'utiliser plusieurs types de génératrices, le générateur que ce soit générateur asynchrone (à rotor bobiné) ou bien générateur synchrone (à aimants permanent) est connecté au réseau via un convertisseur AC/DC/AC.

La machine synchrone à aimant permanent reste la solution attractive dans cette configuration grâce à son fort rendement et sa meilleure fiabilité comparés aux autres machines.

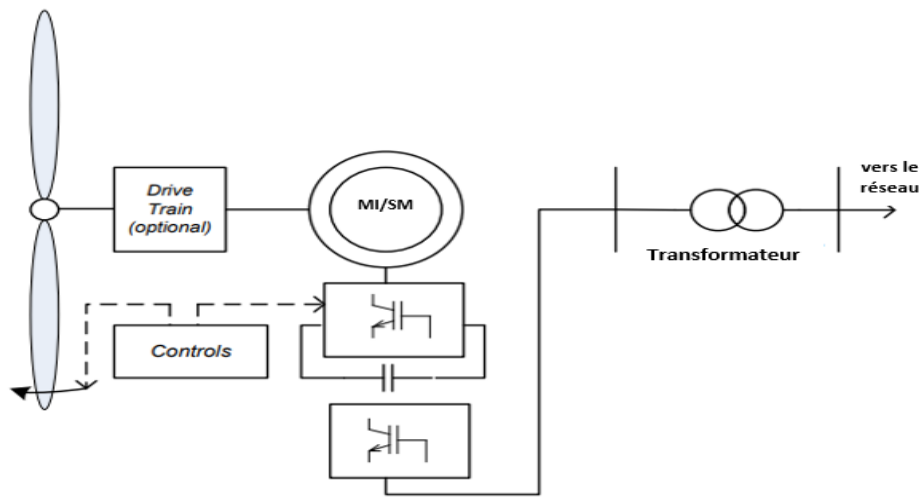


Figure 1-14 génératrice à base de génératrice synchrone à aimant permanent avec convertisseur complet [13]

▪ **Eolienne à vitesse variable :**

Les turbines à vitesse variable (à résistance dynamique du rotor) contrôlent la résistance dans le circuit du rotor, sa variation permet le fonctionnement sur une large gamme de variation de vitesse (jusqu'à 10%). Avec cette configuration, l'énergie que peut capturer le système est grande mais on ne peut pas négliger les pertes d'énergie sur la résistance du rotor.

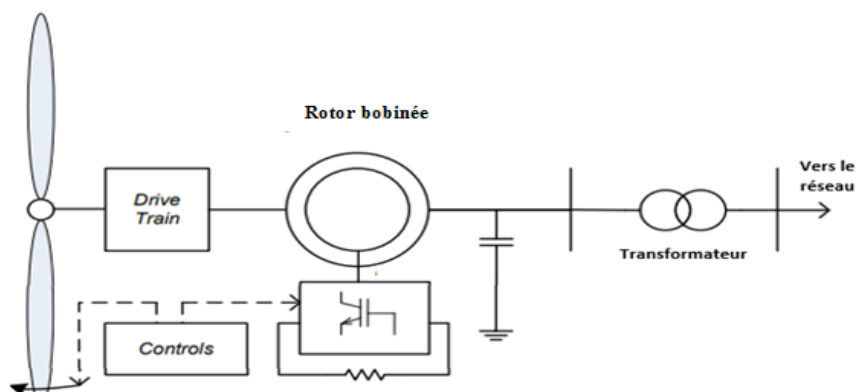


Figure 1-15 génératrice à vitesse variable [13]

1.4.3 Production d'énergie électrique par éolienne

La production d'énergie éolienne dépend de l'interaction entre le rotor de l'éolienne et le vent. La puissance de sortie moyenne est déterminée par la vitesse moyenne du vent.

La relation entre la puissance et la vitesse du vent est calculée comme suit :[13]

L'énergie cinétique E (en J) d'une masse d'air m (en kg) se déplaçant à une vitesse V_{wind} (en m/s) est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m \times V_{wind}^2 \quad (1.5)$$

Si la densité de l'air est ρ (kg / m³), le débit massique à travers une zone A est donné par :

$$\dot{m} = \rho \times A \times V_{wind} \quad (1.6)$$

Ainsi, la puissance éolienne(en W) disponible sur le site, qui peut être récupérée théoriquement par unité de surface, est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \alpha \times \beta \times S \times V^2 \quad (1.7)$$

Où α représente la masse volumique de l'air (kg/m³), β le débit volumique d'air (m³/s), S : la surface du dispositif de récupération (m²) et V la vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s).

Selon la loi de l'Allemand Albert Betz, démontré en 1919, la puissance maximale extractible par un rotor de la turbine avec des pales infinies du vent dans des conditions idéales est de 59,26% (0,5926 fois) de la puissance disponible dans le vent. Cette limite est connue sous le nom de limite Betz donné par :[15]

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_c \quad (1.8)$$

$$\text{Avec : } P_c = \frac{1}{2} \times a \times b \times c^3 \quad (1.9)$$

a : la masse volumique de l'air atmosphérique

b : la surface du capteur éolien exprimé en m² et

c : la vitesse incidente de l'air atmosphérique exprimé en m/s.

Pour une région définie, la fonction de Weibull, détermine généralement les changements du vent. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme :[16]

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \times \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k} \quad (1.10)$$

Avec : $P(V)$ est la densité de probabilité de la vitesse V .

K : Le facteur de forme de la courbe (sans dimension).

C : Le facteur d'échelle de la courbe en m/s.

La vitesse moyenne du vent peut être exprimée en intégrant la fonction densité de probabilité, par la formule suivante :

$$V_{\text{moy}} = \int V \times P(V) \times dv \quad (1.11)$$

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

1.5 Batteries électrochimiques

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système d'énergie hybride en site isolé vu le caractère aléatoire et variable dans le temps des énergies renouvelables. Les batteries nommées accumulateurs restituent l'énergie chimiquement stockée en énergie électrique par des réactions électrochimiques réversibles.

Aujourd'hui, il existe de nombreuses technologies d'accumulateur qui peuvent être différencié par différents facteurs comme la quantité d'énergie qu'ils peuvent stocker ainsi que la nature de leurs électrodes. Les batteries les plus utilisées sont :

- Au plomb
- Lithium-ion
- Ni-Cd.
- Ni-MH.

Une batterie est généralement composée de plusieurs cellules connectées ensemble et est constituée de deux électrodes : anode et cathode, immergés dans un électrolyte comme le représente la figure 1-16. La capacité de la batterie qui est exprimée en Ampère-heure (Ah) est définie comme la quantité d'énergie délivrée.

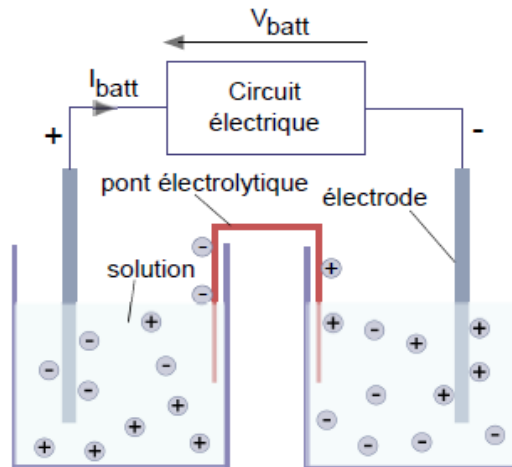


Figure 1-16 Schéma d'une batterie électrochimique

1.5.1 Liaisons des batteries

Les cellules de la batterie peuvent être connectées en série pour augmenter la tension, ou en parallèle pour augmenter le courant.

- **Connexion en série**

La connexion des batteries en série consiste à relier le pôle (+) d'une batterie au pôle (-) d'une autre. Ce branchement permet d'additionner les tensions (en volts) pour augmenter la tension globale à l'application demandée, et l'intensité de courant reste constante.

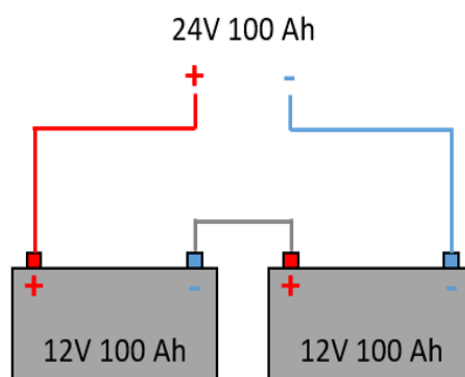


Figure 1-17 Liaison en série des batteries

- **Connexion parallèle**

La connexion des batteries en parallèle consiste à relier les pôles plus (+) ensemble et les pôles moins (-) ensemble. Ce branchement permet d'additionner les intensités de courant (en ampères, A) pour augmenter la capacité globale des systèmes de sorte que la même tension va traverser toutes les cellules.

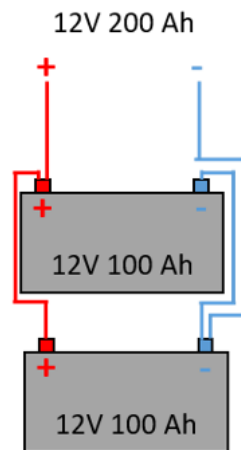


Figure 1-18 Liaison en parallèle des batteries

1.5.2 Différent types des batteries électrochimique :

Comme nous avons mentionné, les technologies de batterie sont nombreuses et variées, et les plus utilisées dans les systèmes hybrides sont celles à base de plomb, lithium et le nickel. Nous allons expliquer le principe de chacune et comparer leurs propriétés.

- **Les batteries au Plomb :**

La batterie au plomb est le plus ancien type de stockage de l'énergie électrique et le plus utilisé en raison de son faible coût, de sa large disponibilité de plus qu'il est presque entièrement recyclable.

La batterie se compose de deux électrodes : le 1^{er} au plomb (Pb), le 2^{ème} en oxyde de plomb (PbO₂), ainsi que l'électrolyte qui contient l'acide sulfurique dilué. Cet accumulateur exploite une oxydoréduction du plomb au cours de la charge et la décharge.

On a les réactions suivantes :

Décharge	Charge
A la anode (+) : $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	A la anode (+) : $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$
A la cathode (-) : $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	A la cathode (-) : $\text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
$2\text{Pb}^{2+} + 2\text{SO}_4^- \rightarrow 2\text{PbSO}_4$	$2\text{PbSO}_4 \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{SO}_4^-$
<u>Décharge :</u> $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{PbSO}_4$	
<u>Charge :</u> $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{PbSO}_4 \rightarrow \text{Pb} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^-$	

Figure 1-19 Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb [17]

Durant la décharge :

Les deux électrodes, qui sont plongées dans un électrolyte (acide sulfurique), se sulfatent c'est-à-dire le bioxyde de plomb se transforme en sulfate de plomb PbSO_4 , ainsi que le plomb. Les électrons libérés de l'électrode négative (Oxydation) vont être consommés par l'électrode positive qui va subir une réduction. Le courant se déplace du pôle positif vers le négatif. O_2 libéré par l'électrode positive, s'unit aux ions H^+ en solution pour former de l'eau.

Durant la charge :

Les 2 électrodes se désulfatent, c'est-à-dire que le sulfate de plomb est dissous par le passage du courant. La formation de PbO_2 et des ions sont libérés donc l'augmentation de la concentration du H^+ de l'électrolyte.

▪ **Batteries Lithium-Ion (Li-ion):**

C'est une batterie qui génère l'électricité grâce à l'échange réversible des ions de lithium entre les deux électrodes. Le matériau de l'électrode négative est fait d'un oxyde de métal d'une structure en couche comme l'oxyde de lithium et de cobalt, ou d'une structure en tunnel

tel que l'oxyde de manganèse de lithium. Le matériau de l'électrode positive est fait de carbone graphitique.

Lors de la décharge, les électrons se déplacent, à cause de la différence de potentiel, de l'électrode négative vers l'électrode positive par un circuit externe. Au même temps les ions de lithium chargés positivement quittent l'électrode négative pour aller au positive car ils sont attirés par les charges négatives des électrons.

Tans dit que pendant la charge, les électrons et les ions retournent vers l'électrode positive pour équilibrer la charge. Quand tous les ions passent, la batterie est complètement chargée.[18]

- **Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) et Nickel-Hydrure Métallique (Ni-MH) :**

Il existe plusieurs type de batteries au nickel qu'on peut les différencier par la constitution de l'électrode négative, mais les plus utilisées sont : Ni-Cd et Ni-MH. Elles sont plus robustes mais plus couteuses. La batterie Nickel-Cadmium à un impact environnementale car le cadmium est un métal polluant. On les utilise dans les applications mobiles et peuvent équiper les voitures hybrides.

1.5.3 Modélisation des batteries :

Le choix de la technologie (type de batterie) permet de fixer les caractéristiques de la batterie ainsi que le type de modèle. Dans ce mémoire il s'agit de la batterie au plomb.

Le schéma électrique de la batterie est représenté dans la figure suivante :

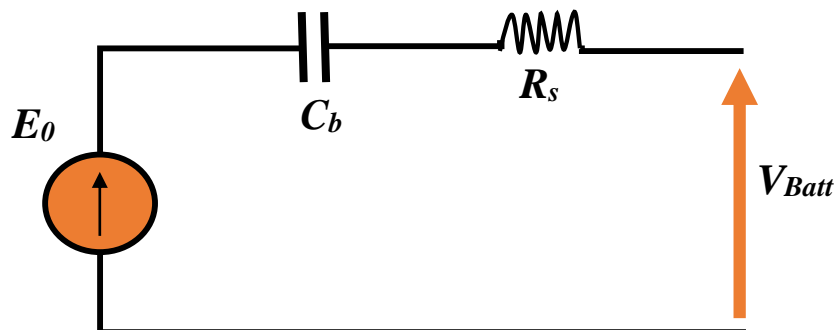


Figure 1-20 Modèle R-C d'une batterie au plomb

Le modèle est constitué d'une source de tension E_0 , modélisant la tension à vide de la batterie, en série avec une résistance R_s et un condensateur C_b qui modélise la capacité interne de la batterie.

La résistance R_s est constituée d'une résistance interne R_{int} d'une valeur variable qui représente la réaction chimique et correspond aux chutes de tension, et une résistance ohmique R_{ohm} de valeur constante et correspond à la résistance des conducteurs. [19]

L'équation modélisant la batterie au plomb est donnée par l'équation 1-12.

$$V_{batt} = E_0 - V_{cb} - R_{batt} \times I_{batt} \quad (1.12)$$

Où :

V_{batt} et I_{batt} représente la tension et le courant de la batterie.

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par l'équation 1-13. [10]

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (1.13)$$

Avec : C_b la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_b .

1.5.4 Avantages et inconvénient de stockage par batteries

Avantage

- Les batteries ont une densité d'énergie plus élevée.
- Les batteries maintiennent une tension relativement stable tout au long du cycle de décharge.
- Capacité de stockage élevée.
- Améliorer la fiabilité et la qualité d'approvisionnement de l'énergie électrique.

Inconvénient

- Faible densité de puissance.
- Les batteries sont lourdes, coûteuse et lente à charger.
- Durée de vie limité et souvent les batteries sont faite de manière toxique.
- Le système de stockage par les batteries dans les systèmes autonome nécessite une grande surface d'installation.

Pour les batteries au plomb :

Avantage :

- Le coût de la batterie au plomb est faible par rapport aux autres batteries (économique).
- Stockage de longue durée (autodécharge faible).
- Recyclage simple.
- Capable de fournir des courants élevés.

Inconvénients :

- Durée de vie faible.
- L'énergie spécifique est faible, généralement de 30 à 40 Wh / kg.
- Sensible aux décharges trop profondes.

1.6 Conclusion

Le premier chapitre a été consacré à la présentation des différentes sources électriques d'un système hybride. Nous avons précisé nos choix en termes de sources et de stockage à savoir : le générateur photovoltaïque, l'éolienne et les batteries pour répondre au mieux à la demande en énergie électrique au niveau de la charge.

Par conséquent, nous avons conclu qu'on peut utiliser comme source principale les générateurs photovoltaïques grâce à leur énergie spécifique élevée. Par ailleurs, l'intermittence et la dépendance de ses sources aux conditions météorologiques nous orientent vers une autre source qui est les éoliennes comme un système de backup. Les batteries sont employés comme sources auxiliaires destinées au stockage de l'énergie afin d'améliorer le comportement de notre système hybride en régime permanent et transitoire dans son application pour un site isolé.

Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation et à la conception du dimensionnement optimal du système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage.

Chapitre 2

Conception d'un système hybride

2.1 Introduction

Le chapitre précédant a permis de présenter en détail les sources électriques de notre système hybride autonome (photovoltaïque, éoliennes et les batteries de stockage).

L'objectif de ce chapitre est de justifier et de présenter l'architecture de ce système tout en développant une modélisation de son état complet et de ces différents composants. Ensuite, nous allons réaliser la conception du dimensionnement optimal des systèmes hybride autonomes PV-WT avec des batteries pour l'alimentation de deux sites en décrivant d'une part le profil de consommation de la zone à alimenter, et d'autre part le comportement d'énergie photovoltaïque sous les conditions météorologiques de l'ensoleillement et de la température ambiante, et celui d'énergie éolienne sous l'effet de la vitesse du vent.

Enfin, nous présentons le calcul des différents paramètres électriques des éléments d'installation photovoltaïque et éolienne, ainsi que le système de stockage pour chaque site donné.

2.2 Modélisation des convertisseurs associés au système hybride

La figure 2-1 représente la structure du système hybride étudié qui est composé de la combinaison de deux sources d'énergie : éolienne et générateur photovoltaïque, et les batteries pour le stockage.

Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs de type DC/DC Boost et Buck Boost afin d'alimenter une charge alternative à l'aide d'un onduleur. Ces convertisseurs sont les plus utilisés selon la littérature.

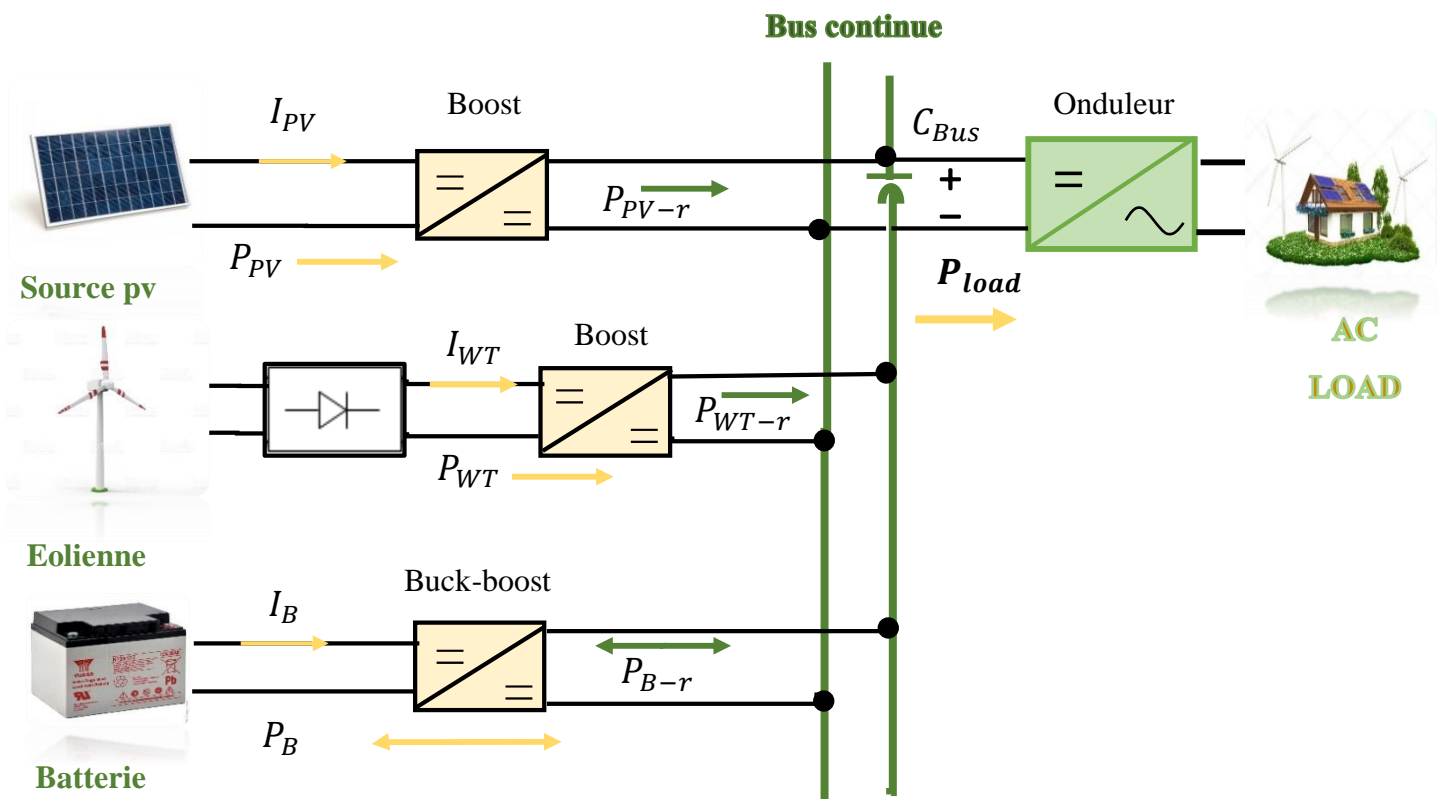


Figure 2-1 Architecture du système hybride autonome.

2.2.1 Modélisation de convertisseur boost

Le convertisseur survolteur (Boost) est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute. Son architecture est tracée sur la figure 2-2.

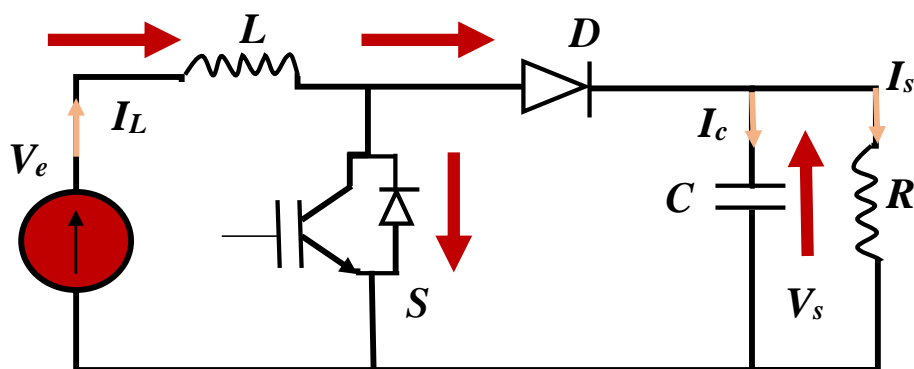


Figure 2-2 Architecture d'un convertisseur Boost

L'alimentation du circuit est assurée par une source de tension V_e , la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_s .

L'interrupteur S peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).[20]

Etude théorique

Dans une première étape on suppose les hypothèses suivantes :

- Les composants sont parfaits (idéales) et sans pertes.
- Le régime est continu.

▪ Phase 1 : ($0 < t < \alpha T$)

L'interrupteur S est fermé, la diode D est bloquée

$$V_L = V_e \quad (2.1)$$

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

$$\text{Et } C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} \quad (2.3)$$

▪ Phase 2 : ($\alpha T < t < T$)

L'interrupteur S est ouvert. La diode D devient conductrice

L'expression de la tension :

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

$$\text{Et } C \frac{dV_s}{dt} = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (2.5)$$

A l'état de commutation, l'équation d'état :

$$L \frac{dI_L}{dt} = dV_e + (1 - \alpha) \times V_s \quad (2.6)$$

$$C \frac{dV_s}{dt} = -(1 - \alpha)I_L - \frac{V_s}{R} \quad (2.7)$$

2.2.2 Modélisation de Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré sur la figure 2-3.

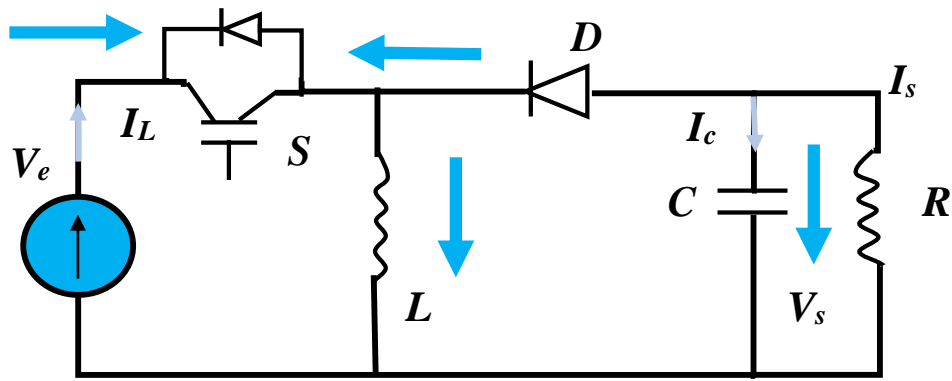


Figure 2-3 Architecture d'un convertisseur Buck-Boost

Le circuit est alimentée par une source de tension V_e , la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_s . L'interrupteur S caractérise un transistor de puissance.

▪ **Phase1 : ($0 < t < \alpha T$)**

L'interrupteur S est fermé et l'inductance L se charge avec une augmentation de courant qui la traverse.

La diode D est bloquée et V_d nul

On a:

$$V_L = V_e \quad (2.8)$$

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

$$C \frac{dV_s}{dt} = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (2.10)$$

▪ **Phase 2 : ($\alpha T < t < T$)**

L'interrupteur S est ouvert, La diode D devient conductrice, l'inductance L se décharge.

Cette phase correspond au décroissement de courant dans l'inductance L . L'énergie emmagasinée dans l'inductance précédemment est restituée à la charge.

La tension de sortie est appliquée aux bornes de la bobine en inverse :

$$V_L = -V_s \quad (2.11)$$

$$V_s = -L \frac{di}{dt} \quad (2.12)$$

$$C \frac{dV_s}{dt} = I - \frac{V_s}{R} \quad (2.13)$$

À l'état de commutation, on constate que :

$$L \frac{dI_L}{dt} = dV_e + (1 - \alpha) \times V_s \quad (2.14)$$

$$C \frac{dV_s}{dt} = -(1 - \alpha)I_L - \frac{V_s}{R} \quad (2.15)$$

2.3 Modèle mathématique

Le modèle mathématique des convertisseurs Boost et Buck-Boost associés au panneau photovoltaïque, éolienne et le système de stockage, ainsi que le modèle du bus continu sont exprimés dans les équations [2.15-2.18] :

Les équations modélisant le convertisseur Boost associé à la source éolienne et photovoltaïque :

$$\begin{cases} L_{PV} \frac{dI_{PV}}{dt} = V_{PV} - (1 - U_{PV}) \times V_{bus} - r_{PV} \times I_{PV} \\ I_{PV} = I_{LPV} \end{cases} \quad (2.16)$$

V_{wt} peut être obtenu par le redresseur intermédiaire AC / DC utilisé pour ajuster et réguler la tension produite par l'éolienne.

$$\begin{cases} L_{wt} \frac{dI_{wt}}{dt} = V_{wt} - (1 - U_{wt}) \times V_{bus} - r_{wt} \times I_{wt} \\ I_{wt} = I_{Lwt} \end{cases} \quad (2.17)$$

Les équations modélisant le convertisseur Buck-Boost associé à la batterie sont représentées comme suite :

$$\begin{cases} L_{Batt} \frac{dI_{Batt}}{dt} = V_{Batt} - (1 - U_{Batt}) \times V_{bus} - r_{Batt} \times I_{Batt} \\ V_{batt} = E_0 - V_{cb} - R_{Batt} \times I_{LBatt} \end{cases} \quad (2.18)$$

Le bus continu est modélisé par l'équation suivante :

$$C_{bus} \frac{dV_{bus}}{dt} = -I_{load} + (1 - U_{PV})I_{LPV} + (1 - U_{wt})I_{Lwt} + (1 - U_{Batt})I_{Batt} \quad (2.19)$$

Où :

U_{PV} , U_{wt} et U_{Batt} sont les signaux de contrôle de la source photovoltaïque, l'éolienne et la batterie.

I_{PV} , I_{wt} et I_{Batt} , sont respectivement les courants de la source photovoltaïque, l'éolienne et la batterie.

2.4 Dimensionnement de système

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sources d'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- Assurer un équilibre entre la production et la consommation.
- Minimiser le coût d'énergie consommé par les utilisateurs.

De sorte que le système hybride puisse fonctionner dans des conditions optimales en termes d'investissement et de fiabilité vis-à-vis de l'exigence du système d'alimentation. [21]

2.4.1 Dimensionnement des panneaux solaires

Le modèle du système photovoltaïque choisi dans ce travail est le « SunPower 400W (Maxeon) » avec un prix de **418.58 \$** le panneau et une garantie de 25 ans. Dans les conditions d'essai standards (STC: ensoleillement 1000W/m², AM1.5 spectrum, la température ambiante 25°C) la puissance de ce modèle est 400W. Les caractéristiques de ce panneau sont précisées dans le tableau 2-1

Tableau 2-1 Paramètre de la source photovoltaïque

Type	Puissance nominale (w)	Nombre des cellules	Courant de court-circuit (A)	Tension de circuit ouvert (V)	Rendement (m)	Coût (\$)	Durée de vie (Ans)
Sunpower 400W	400	104	6.85	75.6	22.6%	418.5	25

Pour dimensionner le système photovoltaïque on doit d'abord calculer l'énergie produite par le générateur ainsi que la puissance crête pour pouvoir calculer le nombre de panneau et la surface nécessaire :

On peut calculer l'énergie produite par la relation (2.20). [22]

$$E_p = \frac{E_c}{K} \quad (2.20)$$

Où E_c représente l'énergie consommée, K est le coefficient traduisant les pertes et désadaptations fixée à 0.65.

La puissance crête P_c du générateur photovoltaïque nécessaire est donnée par l'équation (2.21).

$$P_c = \frac{E_p \times P_i}{I_r} \quad (2.21)$$

Où P_i est la puissance d'éclairement aux conditions au STC et égale à 1Kw/m^2

Le nombre de panneau est égal à la puissance crête du générateur photovoltaïque sur la puissance crête unitaire du panneau

$$N = \frac{P_c}{\text{Puissance crête unitaire panneau}} \quad (2.22)$$

2.4.2 Dimensionnement des éoliennes

Le modèle de la turbine éolienne choisi est de « **Aeolos-H 50kw** ». C'est une turbine à axe horizontal de puissance nominale 50kW, à trois pales, caractérisée par sa fiabilité, sécurité et efficacité. Ce type est particulièrement recommandé pour les vents faibles et modérés (2.5 m/s). Les caractéristiques de l'éolienne choisie, pour réaliser le dimensionnement, sont précisées dans le tableau (2-2) :

Tableau 2-2 Paramètre de la source éolienne

Type	Puissance nominal (Kw)	Vitesse de démarrage (m/s)	Vitesse du vent nominale (m/s)	Tension de sortie (V)	Diamètre de rotor (m)	Coût (€)	Durée de vie (Ans)
éolienne Aeolos-H 50kw	50	2.5	9.5	48	18	60 000	20

2.4.3 Dimensionnement de la batterie (capacité)

Les accumulateurs utilisés dans ce système sont « Surette 12CS11Ps ». Les caractéristiques de ce modèle sont données par le tableau (2-3).

Tableau 2-3 Caractéristiques de la batterie

Type	Tension nominale(V)	Capacité nominale (Ah)	Taux de décharge	Taux de charge	Coût \$	Durée de Vie (ans)
Surette 12CS11Ps	48	375	20%	80%	1300	10

Le dimensionnement de la batterie consiste à calculer la capacité des accumulateurs ainsi que leurs nombres nécessaires pour un système d'énergie hybride permettant de satisfaire les besoins pendant les variations climatiques temporaires.

La capacité de stockage (batterie) nécessaire (en Ah) peut être déterminée par l'équation (2.23) :[23]

$$C_b = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (2.23)$$

Où E_c est l'énergie consommée par jour (Wh/j)

N : nombre de jour d'autonomie

D : décharge maximale admissible (0.8 pour les batteries au plomb)

U : tension de batterie (V)

Le nombre des batteries qui doivent se connecter en parallèle pour atteindre les ampères heures peut être déterminé par la fonction (2.24).

$$N_{bp} = \frac{C_t}{C_n} \quad (2.24)$$

Où C_t représente la capacité totale de banc de batteries nécessaires (Ah) et C_n la capacité nominale d'une unité de batterie (Ah).

Le nombre des batteries qui doivent se connecter en série pour atteindre la tension requise par le système est donné par l'équation (2.25) :

$$N_{bs} = \frac{V_n}{V_{bat}} \quad (2.25)$$

Où V_n représente la tension du système DC (V) et V_{bat} la tension de la batterie (V).

2.4.4 Dimensionnement du bus continu et convertisseurs associés aux sources

Dans cette partie, nous allons voir comment choisir les éléments qui permettent de réaliser et d'assurer le fonctionnement d'un hacheur (boost et back-boost).

2.4.4.1 Convertisseurs Boost

Pour dimensionner les composants d'un hacheur élévateur, il faut connaître les grandeurs d'entrée et celles de la sortie (tension, courant et puissance).

La relation entre la tension d'entrée V_e et de sortie V_s du convertisseur est donnée par l'équation (2.26) :

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (2.26)$$

La tolérance du rapport cyclique est comprise entre 0 et 1, donc la tension V_s est supérieure à la tension d'entrée V_e .

▪ Ondulation du courant

L'ondulation du courant est déterminée par l'équation (2.27).

$$\Delta I = I_M - I_m \quad (2.27)$$

Où : I_M est courant maximale et I_m est le courant minimale de l'inductance.

$$i(t) = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (t - \alpha T) \quad (2.28)$$

A l'instant $t = T$ le courant dans l'inductance atteint sa valeur minimale :

$$I_m = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha) T \quad (2.29)$$

Donc l'expression de ΔI peut s'écrire par l'équation (2.30) :

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha) T \quad (2.30)$$

Où bien par l'expression (2.31).

$$\Delta I = \frac{\alpha V_e}{L \times f} \quad (2.31)$$

Comme : $V_s = V_e (1 - \alpha)$, on peut écrire comme suit :

$$\Delta I = \frac{\alpha(1-\alpha)V_s}{L \times f} \quad (2.32)$$

Cette expression démontre que l'ondulation en courant diminue quand la fréquence de commutation f ou la valeur de l'inductance "L" augmente.

▪ **Ondulation de la tension**

L'expression de l'ondulation de la tension est donnée par l'équation (2.33).

$$\Delta V = \frac{\alpha V_s}{R.C.f} \quad (2.33)$$

Cette expression démontre qu'en augmentant la fréquence de commutation ou la valeur du condensateur C, l'ondulation en tension diminue.

▪ **Dimensionnement des composants actifs (la diode et l'interrupteur S)**

La tension maximale supportée par l'interrupteur S et la diode D est donnée par l'équation (2.34).

$$V_{SM} = |V_{DM}| = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.34)$$

Le courant maximal qui peut être supporté par l'interrupteur S et la diode D est donné par l'équation (2.35).

$$I_{SM} = |I_{DM}| = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I}{2} \quad (2.35)$$

Le courant efficace traversant l'interrupteur S est donné par l'équation (2.36).

$$I_{SFF} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I^2}{12}\right)} \times \alpha \quad (2.36)$$

Le courant efficace traversant la diode D est exprimé par l'équation (2.37) :

$$I_{DFF} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I^2}{12}\right)} (1 - \alpha) \quad (2.37)$$

2.4.4.2 Convertisseur Buck-Boost

La tension de sortie est donnée par l'équation (2.38).

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (2.38)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique α .

- si $\alpha > 0.5$ le convertisseur est élévateur.

- si $\alpha < 0.5$ le convertisseur est abaisseur.

▪ **Ondulation du courant**

Soit ΔI est l'ondulation de courant dans l'inductance et est exprimée par l'équation (2.39).

$$\Delta I = \frac{V_e \times \alpha}{L \times f} \quad (2.39)$$

Pour $V_e \alpha = V_s (1 - \alpha)$, la formule de l'ondulation du courant sera exprimée par l'équation (2.40).

$$\Delta I = \frac{(1-\alpha)V_s}{L \times f} \quad (2.40)$$

▪ **Ondulation de la tension**

L'expression de l'ondulation de tension est donnée par l'équation (2.41).

$$\Delta V_s = \frac{\alpha^2 \times V_e}{(1-\alpha)R \times C \times f} \quad (2.41)$$

▪ **Dimensionnement des composants actifs (la diode et l'interrupteur S)**

La tension maximale supportée par l'interrupteur K et la diode D est donnée par l'équation (2-42).

$$V_{SM} = |V_{DM}| = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.42)$$

Le courant maximal qui peut être supporté par l'interrupteur S et la diode D est exprimé par l'équation (2-43) :

$$I_{SM} = |I_{DM}| = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I}{2} \quad (2.43)$$

Le courant efficace traversant l'interrupteur S est donné par l'expression (2.44)

$$I_{SFF} = \frac{I_s}{1-\alpha} \sqrt{\alpha} \quad (2.44)$$

Le courant efficace traversant la diode D est exprimé par l'équation (2.45).

$$I_{DFF} = \frac{I_s}{\sqrt{1-\alpha}} \quad (2.45)$$

2.5 Etude des sites d'implantation :

L'étude de pré faisabilité et le dimensionnement d'un système hybride sont des phases importantes de la conception du système d'approvisionnement en énergie électrique. L'objectif de cette étude est d'optimiser et dimensionner un système hybride de production d'énergie électrique afin de minimiser le coût global et d'augmenter son rendement pour satisfaire les besoins de la demande énergétique.

Notre choix est porté sur deux sites en Algérie de nature climatique différente, et qui sont :

- **Site d'Annaba** : L'école supérieure de technologies industrielles, alimenté par un système hybride -photovoltaïque et batterie (système de stockage)-.
- **Site de Tamanghasset** : Sur le village de Tahifet, alimenté par un système hybride Photovoltaïque, éolienne avec un système de stockage les batteries.

2.5.1 L'école supérieure de technologies industrielles –Annaba.

L'objectif de ce travail est d'analyser des facteurs de la consommation d'électricité par l'école supérieure des technologies industrielles d'Annaba d'une superficie de 7138.9 m², et de l'alimenter par un système hybride (photovoltaïque et batterie). La figure 2-4 présente une vue satellite du terrain.



Figure 2-4 Photo du site sur carte

Les caractéristiques du site choisi (ANNABA) pour notre étude sont données par les grandeurs météorologiques sur le tableau (2-4).

Tableau 2-4 Paramètres du site choisi -ESTI Annaba

Paramètre	Annaba
Latitude	36.86107°N
Longitude	7.8°E
Altitude	54m
Elévation	4m

D'après les paramètres du site présentés sur le tableau ci-dessus, Nous remarquons que le terrain choisi satisfait les conditions de stabilité et d'accessible. Il a une altitude suffisante pour éviter la pollution aux particules fines (poussières...etc). L'étude détaillée des données climatiques sur ce site sera présentée dans les graphes qui suivent.

2.5.1.1 Diagrammes des données météorologiques :

D'après les sources RETScreen et ArcGIS web application, les données climatiques annuelles du site sont obtenus et illustrés dans les figures 2-6 et 2-7.

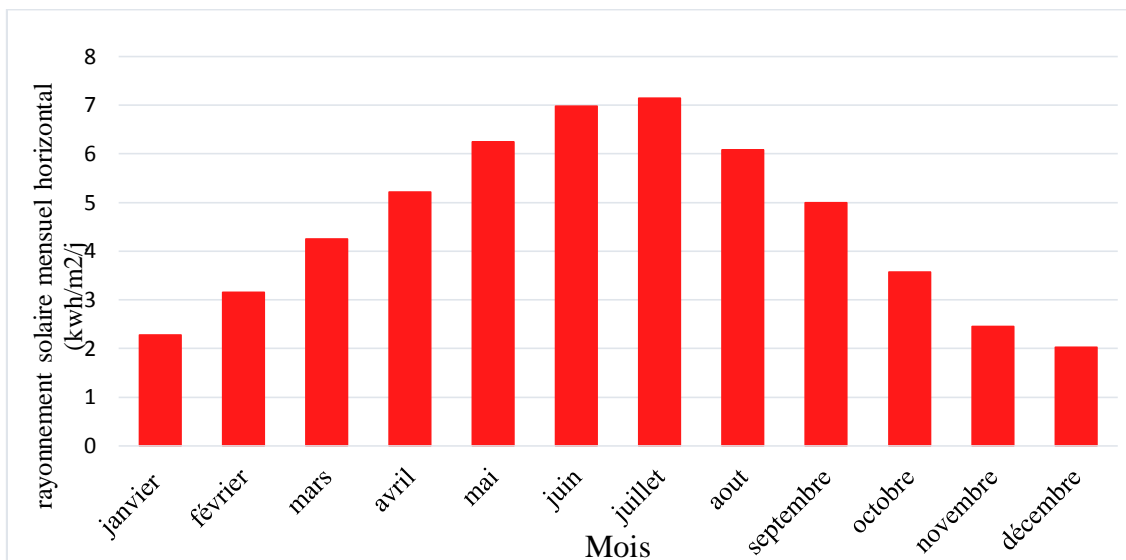


Figure 2-5 Rayonnement solaire mensuelle horizontal [ville d'Annaba]

La figure 2-6 présente l'évolution de l'ensoleillement mensuelle horizontal du site [ville d'Annaba]. A priori, il s'agit d'un site bien ensoleillé avec d'irradiation solaire comprise entre 2 KW/m²/j enregistrée pour décembre, et 7.14 KW/m²/j atteint en juillet. Les mois les plus ensoleillés sont Mai, Juin Juillet et Aout.

La température est aussi un paramètre essentiel qui doit être pris en considération lors de la conception de notre système hybride. La figure 2-6 illustre la variation de la température mensuelle de l'air (C°) du site.

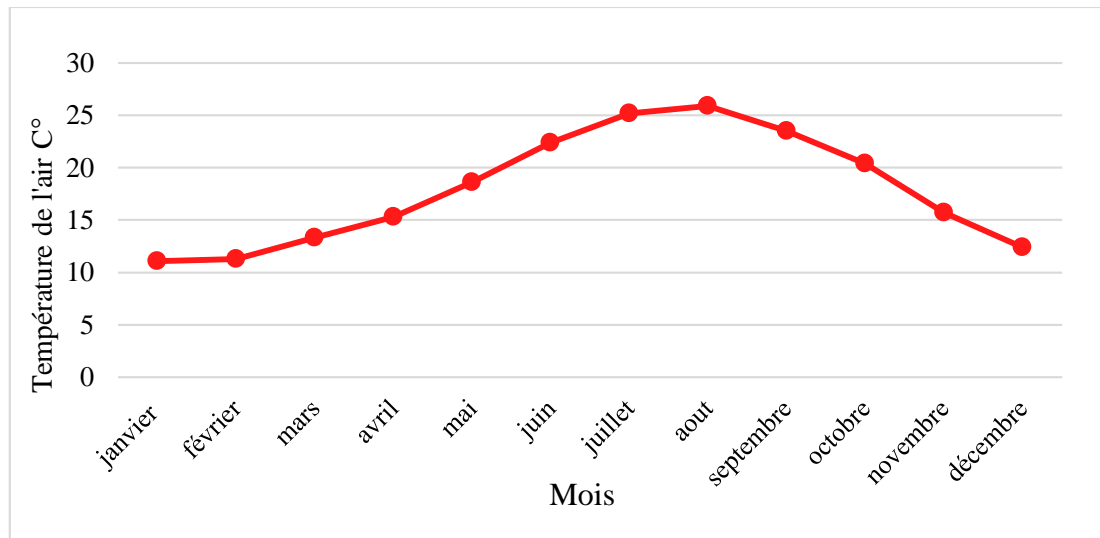


Figure 2-6 Température mensuelle de l'air (C°) [ville d'Annaba]

2.5.1.2 Les besoins électrique

La consommation d'énergie est la puissance électrique absorbée par les charges dans une période de temps (exprimée en kWh). Ces charges ont la plus grande influence sur la taille et le coût d'un système hybride, elles rendent utile la puissance électrique produite. Donc le dimensionnement et l'optimisation d'un système de production énergétique à base de ressources renouvelables dépendent du profil de la charge électrique à alimenter.

Le système hybride ici devra satisfaire une consommation d'énergie (exprimée en Kwh) qui ne peut pas être estimée que si l'énergie électrique moyennement quotidiennement utilisée en wattheures et la puissance totale demandée en watts sont déterminées.

La formule ci-dessous permet de calculer l'énergie consommée dans une journée.

$$\frac{\text{KWh}}{\text{Jour}} = \frac{N \times P_{\text{load}} \times H_{\text{day}} \times D_{\text{week}}}{7} \quad (2.46)$$

Où N signifie la quantité d'un type spécifique de charge, P_{load} est la consommation de puissance de ce type de charge, H_{day} est le nombre des heures durant lesquelles la charge consomme la puissance et D_{week} est le nombre de jours d'utilisation de la charge.

Le tableau 2-5 présente les charges électriques et le kWh total que l'école consomme pendant une semaine.

L'énergie estimée de l'école ESTI proposée dans le tableau ci-dessous est considérée comme la charge qui doit être alimentée par le système PV-Batteries, sachant que l'école

La quantification du besoin électrique en matière de puissance consommée au niveau de l'école supérieur sélectionné pour l'étude a été établie par un calcul basé sur l'évolution d'une courbe de charge unitaire de cette école en fonction du temps comme le montre la figure (2-5)

Tableau 2-5 Estimation d'une consommation d'énergie de l'école supérieure des technologies industrielles – Annaba

Les charges	Le nombre	Volts	Amps	Ac-watt	totale	h/jour	J/S	Jours	Ac-watt
Lumières (intérieur)	400	220	0.16	36	14400	8	5	7	82285
Lumières (extérieur)	31	220	0.54	120	3720	12	7	7	44640
Réfrigérateur	7	220	0.87	193	1351	24	7	7	32424
Climatiseur	60	220	9.1	2000	120000	8	5	7	685714.2
Ordinateur	200	220	0.9	200	40000	6	5	7	171428.5
Distributeur	1	220	2.3	510	510	24	7	7	12240
Machine à café	1	220	19	4200	4200	6	5	7	18000
Imprimante	40	220	1.72	380	15200	1	5	7	10857.1
DATA show	14	220	0.90	200	2800	4	5	7	8000
Caméra de surveillance	30	220	0.027	6	180	24	7	7	4320
TV LG led	1	220	1.9	420	420	1	2	7	120
Câble modem	14	220	0.08	17.6	246.4	8	5	7	1408
Scanner	5	220	0.16	36	180	1	2	7	51.42
Matériel TP	/	220	/	/	1000	4	5	7	2857.1
totale	/	/	/	/	/	/	/	/	1074345.3

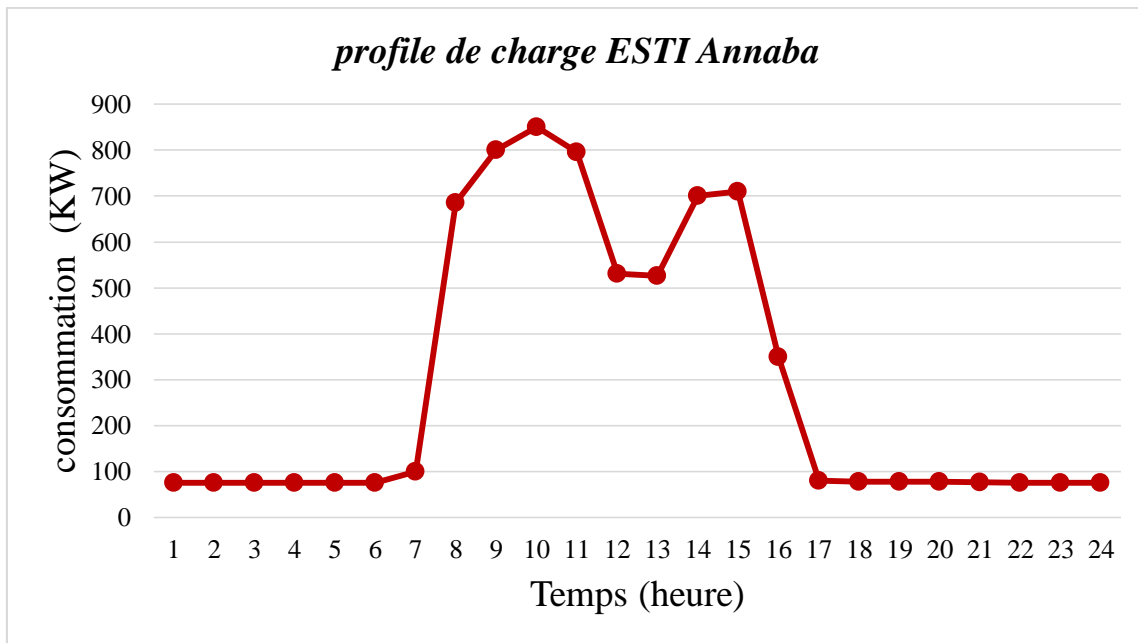


Figure 2-7 Profile de charge

Cette courbe unitaire de la charge démontre que la demande en puissance électrique connaît deux pics, un pic le matin à 10h et un autre à 15h, relativement moins importants que le premier.

2.5.1.3 Calculs et choix des éléments du système

Afin d'examiner les conditions météorologiques sur la performance du photovoltaïque il est important de calculer les éléments d'installation photovoltaïque pour le site donné.

✓ **L'énergie à produire E_p :**

$$E_p = \frac{E_c}{K}$$

$$E_p = 1074345.3 / 0.65 = 1652838.9 \text{ Wh/j}$$

✓ **La puissance crête P_c du générateur photovoltaïque nécessaire :**

L'irradiation annuelle moyenne est égale à 5.14 kWh/m² / j

$$P_c = \frac{E_p}{I_r}$$

$$P_c = 1791620.3 / 5.14 = 321564 \text{ Watt crête}$$

A partir de la puissance crête des panneaux SunPower 400 W le nombre de panneaux solaire nécessaire à l'installation :

$$N = \frac{P_c}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

$$N = 321564 / 400 = 804 \text{ panneaux}$$

✓ **Calcule de la surface :**

La surface d'un seul panneau (SunPower 400 W) est :

$$S = \text{longueur} * \text{largeur}$$

$$S = 1800 * 1016 = 1.8 \text{ m}^2$$

La surface exploitable est :

$$S_t = \text{Nbr_PV} * S$$

$$S_t = 1.8 * 804 = 1448 \text{ m}^2$$

D'après la position en Google Earth la surface disponible à l'école ESTI est 1877.31 m².

Les accumulateurs utilisés dans ce système sont « Surrette 12CS11Ps » (48V, 375 Ah)

✓ **La capacité des accumulateurs nécessaires à ce système ainsi que leur nombre**

$$C = \frac{E_c \times N}{D \times U}$$

$$C = (1074345.32 * 3) / (0.8 * 48) = 83933.22 \text{ Ah}$$

Le nombre de batteries qui doit connecter en parallèle est :

$$\text{Nbp} = \frac{C_t}{C_n}$$

$$\text{Nbp} = 83933.2 / 375 = 224 \text{ batt}$$

Le nombre de batteries qui doit être connecté en série est :

$$\text{Nbs} = \frac{V_n}{V_{\text{bat}}}$$

$$\text{Nbs} = 220 / 48 = 6 \text{ batt}$$

Le nombre total des batteries est obtenu en multipliant le nombre total de batteries en série (Nbs) et le nombre total des batteries en parallèle (Nbp), comme indiqué dans l'équation :

$$Nb = Nbp * Nbs$$

$$Nb = 6 * 224 = 1344 \text{ batt}$$

2.5.2 Etude 2 : ville de Tamanrasset (village de Tahifet)

Dans ce cas l'étude d'application est en site isolé, le but est d'alimenter ce site par une source de production hybride (PV-Wt-Batterie). Le village isolé de Tahifet est d'une superficie de 525 005,10 m² et composé 128 foyers, chaque une nécessite une puissance de 0.76 KWh par jour, donc 128 maisons exigeraient une demande de charge maximale de 97.28 KWh par jour.

La figure ci-dessous présente une vue satellite du terrain.

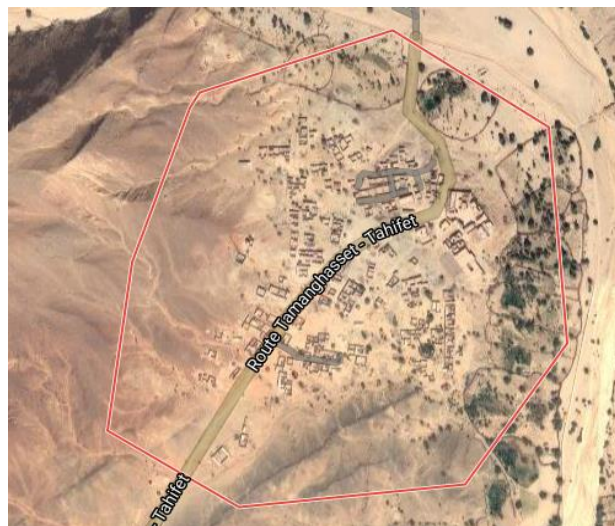


Figure 2-8 Photo du site sur carte

Les caractéristiques géographiques de la ville de Tamanrasset peuvent être citées comme suit :

Latitude 22.8°N, longitude 5.4°E, Elévation 1412m.

2.5.2.1 Diagrammes des données climatiques

D'après les sources RETscreen et ArcGIS web application, les données climatiques du site sont obtenus et illustrés dans les figures 2-9 et 2-10.

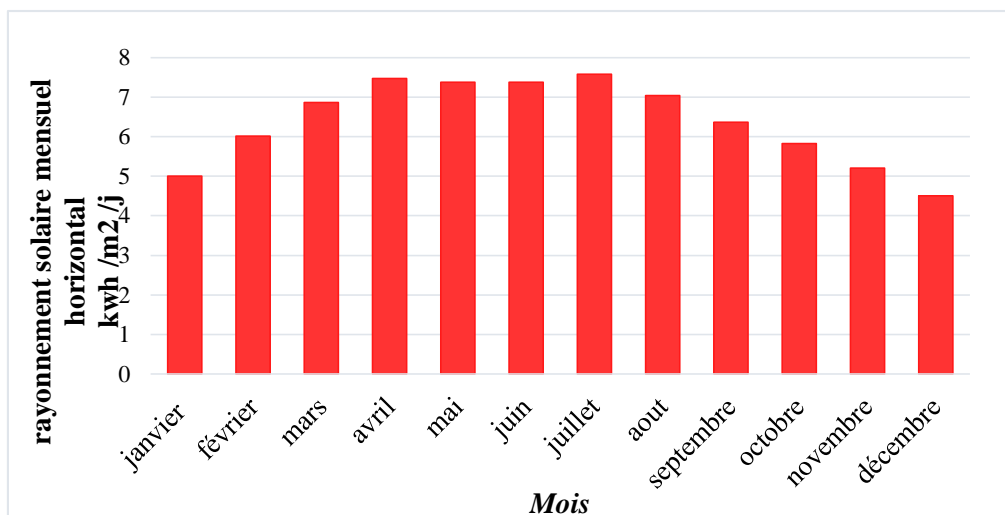


Figure 2-9 Rayonnement solaire mensuel horizontal [ville Tahifet - Tamanghasset]

La figure 2-9 présente les variations du rayonnement solaire mensuel horizontal du site [ville Tahifet – Tamanghasset]. Le site de Tahifet dispose d'un gisement solaire assez important, ces valeurs sont comprises entre 4.5 KW/m²/j enregistrée pour décembre, et de 7.57 kW/m²/j atteint en juillet. Les mois les plus ensoleillés sont Mai, Juin Juillet et Aout.

La figure 2-10 représente le profil du vent pour le village. Ce site jouit d'un gisement éolien modéré, où la vitesse moyenne du vent varie entre 2.6 (m/s) en décembre, et 4.4 (m/s) atteint en juillet. Ce gisement peut être exploité afin de produire une énergie électrique complémentaire à la production solaire en formant un système hybride ainsi que les batteries.

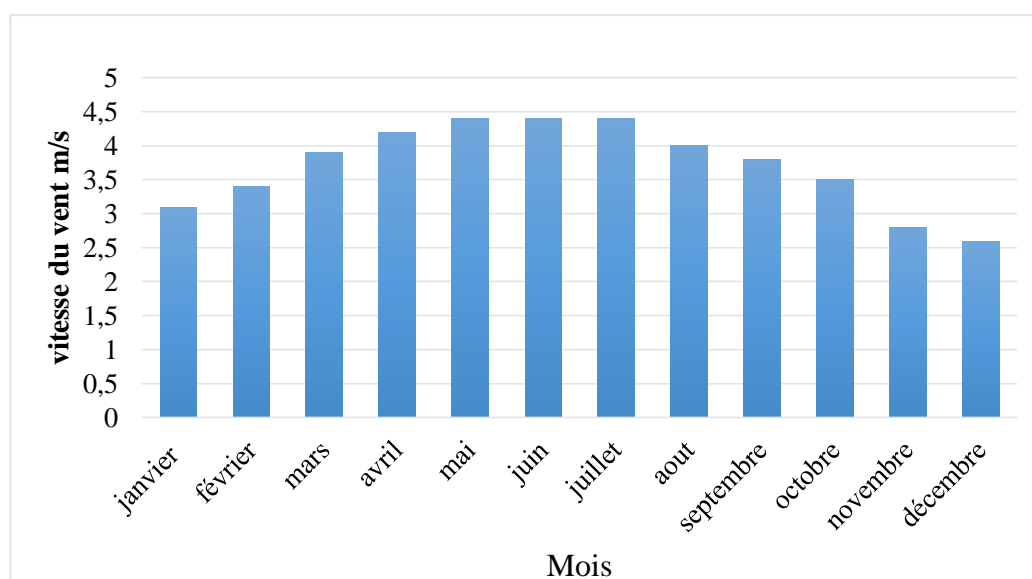


Figure 2-10 Vitesse du vent mensuelle (m/s) [ville Tahifet - Tamanghasset]

La figure 2-11 présentes les variations de la température mensuelle de l'air (C°) du site.

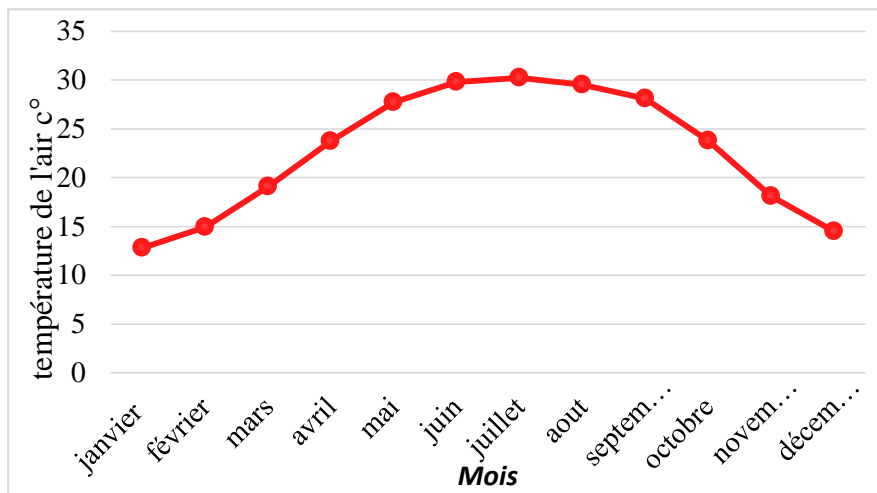


Figure 2-11 Température de l'air mensuelle (m/s) [ville Tahifet - Tamanghasset]

2.5.2.2 Calculs et choix des éléments du système :

✓ L'énergie produite par la source photovoltaïque :

$$E_p = \frac{E_c}{K}$$

$$E_p = 97280 / 0.65 = 149661 \text{ Wh/j}$$

✓ La puissance crête P_c du générateur photovoltaïque nécessaire :

L'irradiation annuelle moyenne est égale à 6.39 kWh/m² / j

$$P_c = \frac{E_p}{I_r}$$

$$P_c = 149661 / 6.39 = 23421.21 \text{ Watt crête}$$

A partir de la puissance crête des panneaux SunPower 400 W le nombre de panneaux solaire nécessaires à l'installation :

$$N = \frac{P_c}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

$$N = 23421.2 / 400 = 59 \text{ panneaux}$$

✓ Calcule de la surface :

La surface d'un seul panneau (SunPower 400 W) est :

$$S = \text{longueur} * \text{largeur}$$

$$S = 1800 * 1016 = 1.8 \text{ m}^2$$

La surface exploitable est :

$$S_t = \text{Nbr_PV} * S$$

$$S_t = 1.8 * 59 = 106.2 \text{ m}^2$$

✓ L'énergie produite par la source éolienne

Pour une seule éolienne :

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

$\rho = 1.292$ en moyenne et 1.2 pour un air humide

$$S = \pi \times r^2 = \frac{D^2}{4} \times \pi$$

$$S = 254.34 \text{ m}^2$$

Avec $D = 18 \text{ m}$

V (annuelle) = 3.7 m/s

On a $P = 7.72 \text{ kW}$

mois	Vitesse du vent	Puissance (KW)
janvier	3,1	4.54
février	3,4	5.99
mars	3,9	9.05
avril	4.2	11.3
mai	4.4	12.9
juin	4.4	12.9
juillet	4.4	12.9
août	4	9.76
septembre	3.8	8.37
octobre	3,5	6.54

novembre	2.8	3.34
décembre	2.6	2.68

✓ **La capacité des accumulateurs nécessaire pour ce système et leurs nombres :**

$$C = \frac{E_c \times N}{D \times U}$$

$$C = (97280 * 3)(0.8 * 48) = 7600 \text{ Ah}$$

Le nombre de batteries qui doivent se connecter en parallèle est :

$$N_{bp} = \frac{C_t}{C_n}$$

$$N_{bp} = 7600 / 375 = 21 \text{ batt}$$

Le nombre de batteries qui doivent se connecter en série est :

$$N_{bs} = \frac{V_n}{V_{bat}}$$

$$N_{bs} = 220 / 48 = 6 \text{ batt}$$

Le nombre total des batteries est obtenu en multipliant le nombre total de batteries en série (N_{bs}) et le nombre total des batteries en parallèle (N_{bp}), comme l'indique l'équation suivante :

$$N_b = N_{bp} * N_{bs}$$

$$N_b = 6 * 21 = 126 \text{ batt}$$

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le modèle mathématique du système hybride proposé, la modélisation des convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux sources, et aussi d'optimiser le dimensionnement des différents composants de ce système pour une application autonome. Une étude de deux sites en Algérie de nature climatique différente a été réalisée, avec deux types d'alimentation hybride différente : la première avec un système PV-Batterie, et la deuxième avec un système PV-WT-Batterie.

Le chapitre suivant est dédié à la description mathématique ainsi que la conception optimale de la commande proposée de ce système, et le dimensionnement optimal qui sera simulé par le logiciel MATLAB-Simulink pour les deux cas d'étude.

Chapitre 3

Gestion de l'énergie et commande du système

3.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, une étude des systèmes hybrides éolien-photovoltaïque avec batteries a été effectuée à savoir : l'évaluation des sources, la modélisation et le dimensionnement optimal de ce système autonome.

Ce chapitre s'intéresse à la commande nécessaire à la gestion de l'énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride qui gère les flux de puissance échangés entre les différents modules.

Dans la première partie, on présentera une commande basée sur la notion de platitude dans laquelle une boucle d'énergie est utilisée pour contrôler le flux d'énergie dissipé par les différentes sources installées (gestion de l'énergie). Cette méthode nécessite une connaissance exacte des paramètres de système pour générer la trajectoire de référence de la sortie plate choisie. Des estimateurs paramétriques doivent alors être utilisés pour assurer une erreur statique nulle en régime permanent, aussi nous présenterons la boucle de courant associé au contrôleur plat qui est basé sur un régulateur PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur).

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on exposera les critères nécessaires qu'il faut respecter lors de la gestion et de la répartition des puissances entre les sources et la charge dans un système hybride.

A la fin, les résultats de la simulation par MATLAB SIMULINK seront présentés pour valider la stratégie de gestion proposée.

3.2 Stratégie de commande du système hybride proposé

La stratégie de commande à définir pour le système de production hybride photovoltaïque/éolien/batteries doit permettre de réaliser certains objectifs [15]

- Maximiser la puissance produite dans chaque source.
- La puissance produite par le système hybride doit être générée d'une façon ordinaire en commençant par les sources principales (les panneaux photovoltaïque et l'éolienne), ensuite le système de stockage (batteries).
- La puissance demandée par la charge doit être satisfaite à chaque instant.
- Quand le système fonctionne en boucle fermée et pour n'importe quelle perturbation ou défaillance dans le système, la stabilité et les performances dynamiques doivent être assurés

- La tension de bus continu doit être ajustée et régulée pour chaque instant, et pour diverses variations continues de la charge alimentée.

3.2.1 Notion de la commande par platitude

La notion de platitude introduite en 1992, proposée et développée par M.Fliess, J.Lévine, P. Martin et P. Rouchon [24], est un concept récent en automatique qui est initialement été développée dans le cadre des systèmes non linéaires à travers différents disciplines d'ingénierie tels que le véhicule hybride, le contrôle de robot et les systèmes hybrides de production par des énergies renouvelables, puis elle a été étendue sur plusieurs systèmes et devenue une méthode de commande répandue dans les applications industrielles.

La platitude différentielle est une propriété des systèmes de contrôle dynamiques [25] fondée sur la mise en évidence et la description d'un ensemble de variables fondamentales du système représentant ses sorties plates.

Cette approche fournit un cadre d'analyse unifié pour le contrôle prédictif et la planification de la trajectoire, la première étape de la commande par platitude comprendra une génération de trajectoire désirée, ensuite, l'évolution de cette dernière est poursuivie et contrôlée par un bouclage adéquat qui corrige l'entrée [15, 26].

On peut définir un système plat par un système où toutes les variables d'état et de contrôle peuvent être exprimées en termes de trajectoire de sortie et un nombre fini de ses dérivées sans intégration d'aucune équation différentielle [15].

Un système est différentielle ment plat si et seulement s'il existe un ensemble fini de variables indépendantes, égales au nombre d'entrées, appelé sorties plates de telle sorte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = f(x, u) \\ u = [u_1, u_2, \dots, \dots, u_m]^T u \in \mathbb{R}^m \\ x = [x_1, x_2, \dots, \dots, x_n]^T x \in \mathbb{R}^n \\ Y = [Y_1, Y_2, \dots, \dots, Y_m]^T Y \in \mathbb{R}^m \end{array} \right. \quad (3.1)$$

x est le vecteur des variables, u est le signal d'entrée de commande et Y est le vecteur des sorties plates et $(n, m) \in \mathbb{N}^2$.

Le vecteur Y peut être écrit en fonction de x et u : [27]

$$Y = \phi(x, u, \dot{u}, \dots, \dots, u^{(s)}) \quad (3.2)$$

Où (s) est le nombre déterminé des dérivés

Les vecteurs x et u peuvent être exprimé en employant les vecteurs de sorties plats Y et de ses dérivées successives :[26]

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \varphi(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(r)}) \\ u = \psi(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(r+1)}) \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

(r) est le nombre prédéterminé des dérivés (r pour les composantes du vecteur d'état x et $r + 1$ pour les composantes du vecteur de commande u)

Il n'y a aucune équation différentielle de la forme :

$$\zeta(Y, \dot{Y}, \dots, Y^{(k)}) \quad (3.4)$$

Où (k) est un nombre prédéterminé des dérivés

3.2.2 Régulation de l'énergie du système hybride et planification de la trajectoire de référence

La commande par platitude donne la possibilité de planifier toutes les trajectoires de la sortie plate et la modélisation de système sans aucune erreur.[28]

Pour notre système hybride photovoltaïque, éolienne et batteries on suppose que les courants des trois sources suivent leurs signaux de référence et peuvent être donné par les équations (3-5), (3-6) et (3-7).

$$I_{pv} = I_{wtref} = \frac{P_{pv}}{V_{pv}} = \frac{P_{pvref}}{V_{pvref}} \quad (3.5)$$

$$I_{wt} = I_{wtref} = \frac{P_{wt}}{V_{wt}} = \frac{P_{wtref}}{V_{wtref}} \quad (3.6)$$

$$I_{Batt} = I_{Battref} = \frac{P_{Batt}}{V_{Batt}} = \frac{P_{Battref}}{V_{Battref}} \quad (3.7)$$

Où : P_{PV} , P_{WT} et P_{Batt} sont les puissances générées par la source photovoltaïque, éolienne et les batteries.

r_{PV} , r_{WT} , et r_{Batt} sont les seules pertes statiques dans les convertisseurs de la source photovoltaïque, éolienne et les batteries .

V_{PV} , V_{WT} , V_{Batt} , I_{PV} , I_{WT} , et I_{Batt} sont respectivement les tensions et les courants de la source photovoltaïque, éolienne et les batteries de stockage.

On défini l'énergie Y_{bus} stockée dans le bus continu et peut être donnée par l'équation suivante :

$$Y_{bus} = \frac{1}{2} C_{bus} \times V_{bus}^2 \quad (3.8)$$

Ainsi l'énergie stockée dans la batterie peut être exprimée par l'équation 3-9.

$$Y_{Batt} = \frac{1}{2} C_{Batt} \times V_{Batt}^2 \quad (3.9)$$

Par conséquent, l'énergie totale Y_T stockée dans le condensateur de bus continu C_{bus} et dans la batterie donné par l'équation (3-10).

$$Y_T = \frac{1}{2} C_{bus} \times V_{bus}^2 + \frac{1}{2} C_{Batt} \times V_{Batt}^2 \quad (3.10)$$

L'énergie capacitive de bus continue Y_{Bus} peut être décrite en utilisant P_{PV-r} , P_{WT-r} et P_{Batt-r} par une équation différentielle.

L'énergie Y_{Bus} est donnée par l'équation (3-11) :

$$Y_{Bus}^{\cdot} = P_{PV-r} + P_{WT-r} + P_{Batt-r} - P_{ch} \quad (3.11)$$

$$\text{Tel que : } P_{PV-r} = P_{PV} - r_{PV} \times I_{PV}^2 = P_{PV} - r_{PV} \times \left(\frac{P_{PV}}{V_{PV}}\right)^2 \quad (3.12)$$

$$P_{WT-r} = P_{WT} - r_{WT} \times I_{WT}^2 = P_{WT} - r_{WT} \times \left(\frac{P_{WT}}{V_{WT}}\right)^2 \quad (3.13)$$

$$P_{Batt-r} = P_{Batt} - r_{Batt} \times I_{Batt}^2 = P_{Batt} - r_{Batt} \times \left(\frac{P_{Batt}}{V_{Batt}}\right)^2 \quad (3.14)$$

La puissance demandée par la charge peut être exprimée par l'équation 3-15.

$$P_{ch} = V_{bus} \times I_{ch} = \sqrt{\frac{2 \times Y_{bus}}{C_{bus}}} \times I_{ch} \quad (3.15)$$

La puissance fournie par les batteries peut également être donnée par l'équation 3-16.

$$P_{Batt} = \sqrt{\frac{2 \times Y_{Batt}}{C_{Batt}}} \quad (3.16)$$

3.2.3 Démonstration de la platitude du système hybride proposée

Les sorties plat "Y", les variables d'entrée de commande "u" et les variables d'état "x" peuvent être données par les formules suivantes :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} V_{bus} \\ V_{Batt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{\text{bus}} \\ Y_{\text{tot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$u = \begin{bmatrix} P_{\text{Batt}} \\ P_{\text{PVload}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Nous supposons l'énergie électrostatique du bus continu Y_{Bus} du système est constante et définie comme une sortie plate Y_1 , par conséquent :

$$\dot{Y}_{\text{bus}} = 0 = P_{\text{PV}_r} + P_{\text{WT}_r} + P_{\text{Batt}_r} - P_{\text{ch}} \quad (3.20)$$

Et, Y_T est l'énergie électrostatique totale stockée dans le condensateur du bus continu C_{Bus} et dans les batteries, est constante et définit comme une sortie plate Y_2 :

$$\dot{Y}_2 = 0 = P_{\text{PV}_r} + P_{\text{WT}_r} - P_{\text{ch}} \quad (3.21)$$

La tension de bus continu est la première variable d'état $V_{\text{Bus}} = x_1$ et la puissance de la batterie (définie comme une variable d'entrée de commande u_1) peuvent être données par une fonction algébrique suivante :

$$x_1 = V_{\text{bus}} = \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} = \varphi(Y_1) \quad (3.22)$$

Le calcul des variables de contrôle est réalisé en fonction des mécanismes de sortie (Y) du système et leurs dérivés. Les formules de calcul sont données comme suit :

$$\dot{Y}_{\text{bus}} = P_{\text{PV}_r} + P_{\text{WT}_r} + P_{\text{Batt}} - r_{\text{Batt}} \times \left(\frac{P_{\text{Batt}}}{V_{\text{Batt}}} \right)^2 - \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.23)$$

$$P_{\text{Batt}} = \dot{Y}_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + r_{\text{Batt}} \times \left(\frac{P_{\text{Batt}}}{V_{\text{Batt}}} \right)^2 + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.24)$$

$$\text{On veut que : } u_1 = P_{\text{Battref}} = P_{\text{Batt}} \quad (3.25)$$

Par conséquent

$$u_1 = \dot{Y}_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + r_{\text{Batt}} \times \left(\frac{u_1}{V_{\text{Batt}}} \right)^2 + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.26)$$

$$u_1 - r_{\text{Batt}} \times \left(\frac{u_1}{V_{\text{Batt}}} \right)^2 = \dot{Y}_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.27)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4 \frac{V_{\text{Batt}}^2}{r_{\text{Batt}}}} = \dot{Y}_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.28)$$

Avec :

$$P_{\text{BattLim}} = \frac{V_{\text{Batt}}^2}{4.r_{\text{Batt}}} \quad (3.29)$$

$$u_1 - \frac{u_1^2}{4.P_{\text{BattLim}}} = Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}} \quad (3.30)$$

$$\frac{u_1}{P_{\text{BattLim}}} - \frac{u_1^2}{4.P_{\text{BattLim}}^2} = \frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}} \quad (3.31)$$

$$-\frac{u_1}{P_{\text{BattLim}}} + \left(\frac{u_1}{2.P_{\text{BattLim}}}\right)^2 = -\left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right) \quad (3.32)$$

$$-\frac{u_1}{P_{\text{BattLim}}} + \left(\frac{u_1}{2.P_{\text{BattLim}}}\right)^2 + 1 - 1 = -\left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right) \quad (3.33)$$

$$\left(1 - \frac{u_1}{2.P_{\text{BattLim}}}\right)^2 - 1 = -\left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right) \quad (3.34)$$

$$1 - \frac{u_1}{2.P_{\text{BattLim}}} = \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right)} \quad (3.35)$$

$$u_1 = 2P_{\text{BattLim}} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \sqrt{\frac{2 \times Y_{\text{bus}}}{C_{\text{bus}}}} \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right)}\right) \quad (3.36)$$

$$u_1 = 2P_{\text{BattLim}} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{\text{bus}} - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r} + \varphi(Y_1) \times I_{\text{ch}}}{P_{\text{BattLim}}}\right)}\right) \quad (3.37)$$

$$u_1 = 2P_{\text{BattLim}} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{Y}_1 + i_{\text{load}} \times \varphi(Y_1) - P_{\text{PV}_r} - P_{\text{WT}_r}}{P_{\text{BattLim}}}\right)}\right] \quad (3.38)$$

$$u_1 = \psi(Y_1, \dot{Y}_1) = P_{\text{Battref}} \quad (3.39)$$

D'après l'équation ci-dessus, Le signale de commande u_1 est écrit en fonction de la première sortie plate et sa dérivé

P_{BattLim} est la puissance maximale limitée du convertisseur Buck-Boost de batterie et peut être défini par :

$$P_{\text{BattLim}} = \frac{V_{\text{Batt}}^2}{4r_{\text{Batt}}} \quad (3.40)$$

La deuxième variable d'état x_2 est La tension de batterie V_{Batt} et la puissance PV définie comme la deuxième variable d'entrée de commande u_2 , peuvent être écrites par la fonction algébrique suivante :

$$x_2 = V_{\text{Batt}} = \sqrt{\frac{2(Y_{\text{Tot}} - Y_{\text{bus}})}{C_{\text{Batt}}}} = \varphi_2(Y_1, Y_2) \quad (3.41)$$

$$u_2 = 2P_{\text{PVLim}} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{Y}_2 + i_{\text{load}} \times \varphi(Y_1)}{P_{\text{PVLim}}} \right)^2} \right] \quad (3.42)$$

Par conséquent et d'après les équations de variables de contrôle, ainsi que les équations de définition des systèmes plats, le système hybride peut être considéré comme un système plat.

3.2.4 Loi de contrôle asymptotique et planification de la trajectoire de référence

Cette partie consiste à suivre la sortie Y plate à sa référence Y_{ref} , par la loi de contrôle asymptotique de rétroaction suivante :

$$(\dot{Y}_{1\text{Ref}} - \dot{Y}_1) + k_1(Y_{1\text{Ref}} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1\text{Ref}} - Y_1) \quad (3.43)$$

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_{1\text{Ref}} + k_1(Y_{1\text{Ref}} - Y_1) + k_2 \int (Y_{1\text{Ref}} - Y_1) \quad (3.44)$$

$$\dot{Y}_2 = \dot{Y}_{2\text{Ref}} + k_3(Y_{2\text{Ref}} - Y_2) \quad (3.45)$$

Avec :

$$k_1 = 2\varepsilon\omega \quad (3.46)$$

$$k_2 = \omega^2 \quad (3.47)$$

Les variables de contrôle (u_1, u_2) sont utilisées pour poursuivre la trajectoire du système hybride proposé et assurer que le système suit bien le chemin de référence.

La fréquence et l'impulsion d'amortissement sont ajustées à la dynamique souhaitée.

Où k est un paramètre de contrôle de correction.

Notez que si les panneaux solaires et l'éolienne ne peuvent pas fournir la puissance nécessaire à la charge, la batterie four

3.3 Le gestionnaire de l'énergie proposé (scénario et états proposés)

3.3.1 Algorithme de commande par énergie

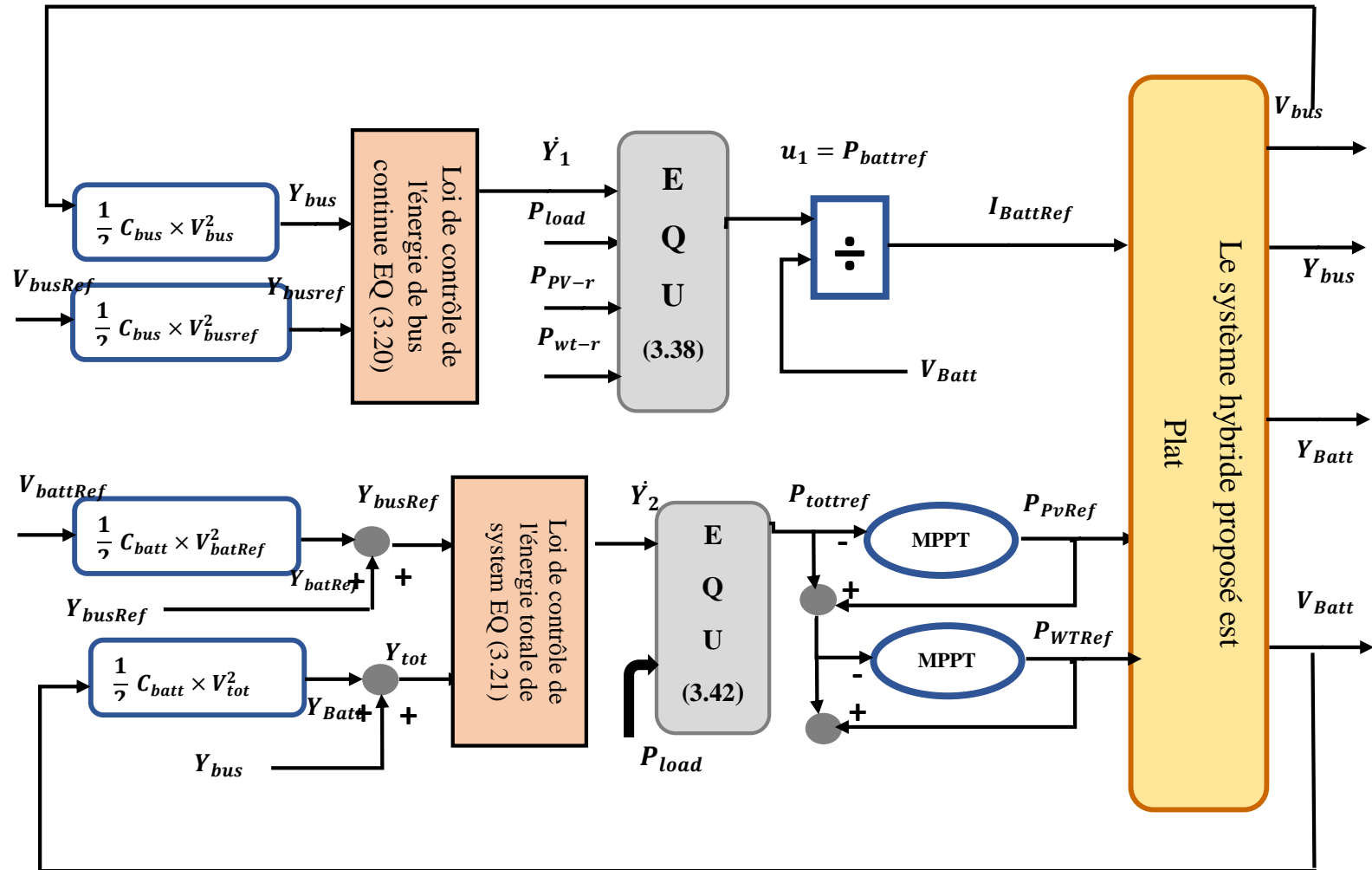


Figure 3-1 Schéma de commande de système hybride

La figure (3-1) illustre le fonctionnement détaillé du plan de contrôle (par commande platitude) du système hybride renouvelable photovoltaïque, éolienne et les batteries de stockage.

Ce système de contrôle présente deux boucles énergétiques à contrôler :

- L'énergie du bus continu DC qui est la variable (boucle) la plus importante.
- L'énergie du système de stockage de la batterie Y_{Batt} .

Dans la première boucle, la loi de contrôle de l'énergie de la liaison CC défini par l'équation (3.38) crée une référence de puissance de batterie $P_{Battref}$ par l'équation (3.20). Ce signal est ensuite divisé par la tension mesurée de la batterie V_{Batt} en conservant cette

tension dans son intervalle de contrainte maximale et minimale pour les raisons de limitation du courant de charge ou de décharge et protéger la sensibilité du système de stockage, il en résulte un courant de référence I_{Battref} .

Dans la deuxième boucle, La loi de contrôle de l'énergie totale défini par l'équation (3.42) génère une référence de puissance totale P_{TOTref} par l'équation (3.21). Elle est considérée comme la référence de puissance P_{PVref} . Ce signal est limité dans un intervalle où le maximum est défini par l'algorithme de suivi des points de puissance maximum (MPPT) et le minimum fixé à 0 W. Il en résulte un courant de référence I_{PVref} et I_{WTref} . Ensuite, l'algorithme calcul la différence entre la puissance totale de référence du système de génération P_{totref} et la puissance P_{PVref} de photovoltaïque, afin d'attribuer un autre signal de référence qui à son tour va contrôler la production de puissance de la source éolienne P_{WTref} . La source éolienne doit également être limitée dans le niveau avec une limitation de la dynamique.

3.3.2 Conception structurelle du système hybride

La conception structurelle de ce système hybride de production de l'énergie comprend deux sources renouvelables à savoir les panneaux solaires et les éoliennes, des batteries, des dispositifs de protection tel que les onduleurs, les convertisseurs DC/DC, le contrôleur MPPT ainsi que des câbles, pour gérer l'énergie électrique produite d'une manière optimale.

Le raison de cette combinaison de ce système hybride qui permet une production stable est de minimiser le coût du stockage et des installations [29]. La représentation de ce système hybride est illustrée dans la figure (3-1).

La source éolienne et photovoltaïque produit une puissance nécessaire à la demande de la charge, lorsque cette puissance est excédentaire, le surplus sera orienté vers les batteries pour assurer leurs charge, dans le cas d'un déficit de puissance les batteries aideront à combler ce manque jusqu'à leurs épuisement.

Pour une protection et une dynamique élevées, une stratégie de contrôle des convertisseurs par les boucles de courant de référence généré par la commande plate s'avère être nécessaire, afin de garantir la stabilité du système, satisfaire les besoin de la charge et de maximiser le rendement énergétique global.

3.3.3 Régulateurs du courant par PID

Dans la plupart des applications industrielles, le type de contrôleur le plus utilisé est la commande Proportionnelle-Intégrale-Dérivée (PID) et ses variantes la Proportionnelle-Intégrale (PI) et la Proportionnelle-Dérivée (PD).

Le régulateur PID, est un nom couramment donné au contrôle à trois termes, il fait référence aux premières lettres des noms des termes individuels qui composent le contrôleur standard à trois termes « P pour le terme proportionnel, I pour le terme intégral et D pour le terme dérivé dans le contrôleur ».[30]

Ce régulateur PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur) est utilisé afin de contrôler le courant inductif de chaque convertisseur et assurer le suivi du MPPT. Il permet de régler à l'aide de ces trois paramètres des performances (amortissement, temps de réponse, dépassement, erreur...) d'un processus et remplir les fonctions suivantes : [31]

- Fonction proportionnelle donne un système plus précis, plus rapide (réagit à l'apparition d'un écart de réglage)
- Fonction intégrateur élimine l'erreur statique.
- Fonction dérivée accélère la correction (s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation)

La loi de commande de régulateur PID est de la forme : ([32])

$$C(t) = k_p \times e(t) + K_I \times \int e(\tau) \times t_0 \times d\tau + K_d \cdot d e(t) dt \quad (3.48)$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$C(p) = k_p \times e(p) + K_I \times e(p) \times p + K_d \times P \times e(p) \quad (3.49)$$

Régulateur à action proportionnel (K_p) : apporte de la rapidité au système en réduisant le temps de montée et l'erreur statique (sans l'éliminer)

Régulateur à action intégrale (K_i) : en éliminant l'erreur statique il ramène de la précision, en revanche il dégrade la réponse transitoire.

Régulateur à action dérivée (K_d) : améliore la stabilité du système ainsi que le régime transitoire, et réduit les dépassements

Les effets de chaque correcteur (K_P , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau 3-1.

Tableau 3-1 Effets des correcteurs P, I et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée

	Temps de montée	Dépassement	Temps d'établissement	Erreur statique
Si Kp croit	diminue	Augmente	(peu de changements)	diminue
Si KI croit	diminue	augmente	augmente	Éliminée
Si Kd croit	(peu de changements)	diminue	diminue	(peu de changements)

3.4 Le contrôleur MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. [33]

Il existe différents type d'algorithmes de maximisation de puissance appliqués aux systèmes photovoltaïques. Dans notre cas, l'algorithme retenu pour la mise en œuvre est P&O (Perturbe and observe). La méthode P&O est généralement la plus utilisée pour sa simplicité, son principe est d'effectuer une perturbation sur le système et d'observer l'impact sur la puissance à la sortie du GPV, d'où le fait de son nom. Elle consiste à incrémenter la tension de référence des panneaux selon un pas positif ou négatif et d'observer si la puissance photovoltaïque croît ou décroît en réponse. Dans le premier cas, la référence évolue dans le bon sens et le pas continu à être ajouté à la référence avec le même signe. Dans le second, l'algorithme évolue dans le mauvais sens, le pas doit changer de signe pour retrouver une puissance croissante. Le point de fonctionnement en arrivant au sommet de la caractéristique de puissance doit osciller autour de la puissance maximale avec une amplitude qui correspond au pas imposé. [34]

L'algorithme MPPT est représenté à la figure (3-2) :

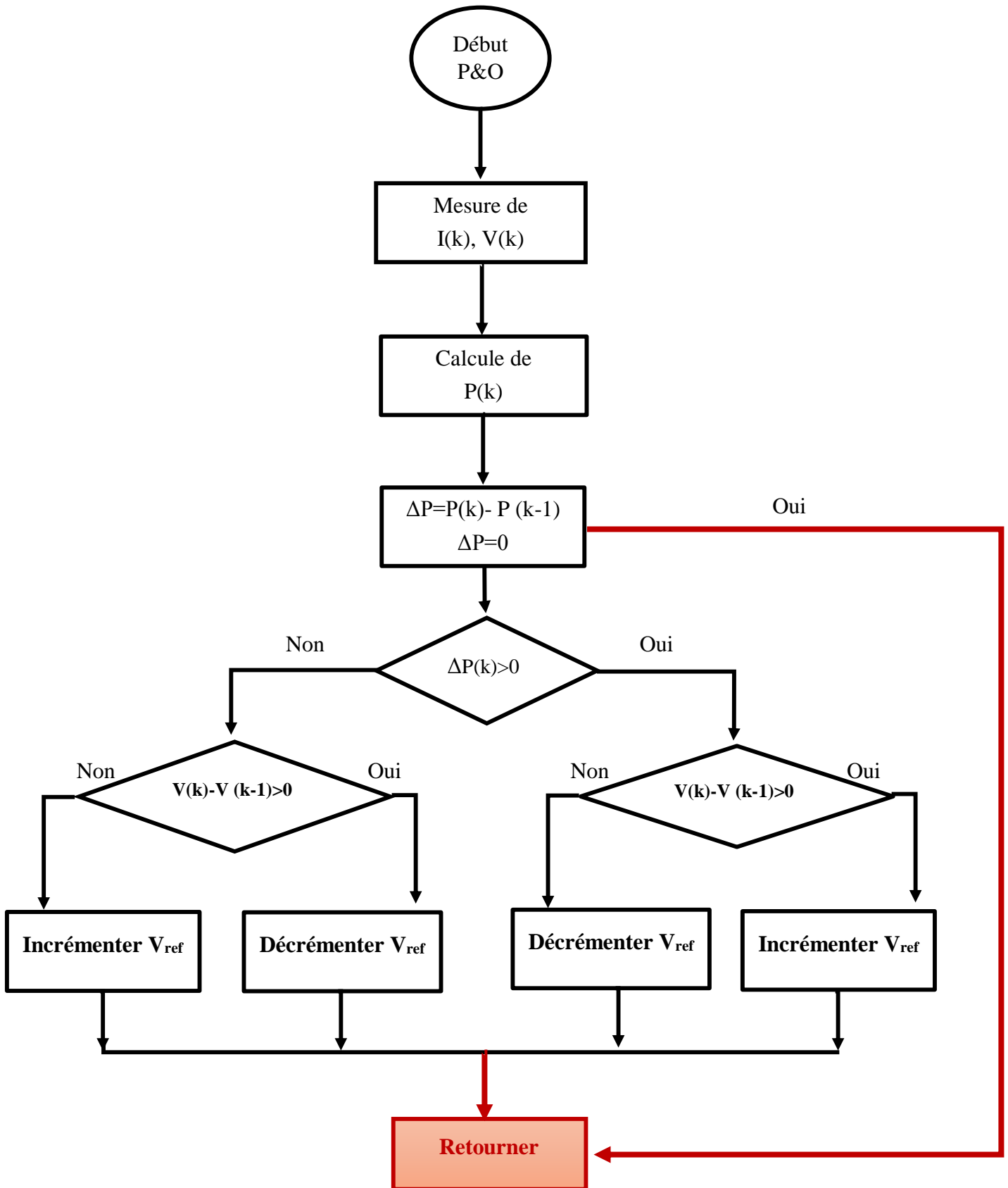


Figure 3-2 Algorithme MPPT P&O

3.5 Résultat de simulation

Nous avons synthétisé toutes les commandes nécessaires à la réalisation de nos objectifs, de stratégie de contrôle par platitude et les régulateurs PID et PI ainsi l'algorithme MPPT de manière globale, pour comparer leurs performances. Elles doivent donc maintenant être validées par simulations effectuées avec le MATLAB-SIMULINK. Dans cette partie nous avons présenté les résultats de simulation des deux cas d'étude, Notons la présence des hypothèses suivantes :

1. La tension référence du bus continu est prise égale à 120V.
2. La tension de référence des batteries est considérée égale à 48V.
3. L'erreur statique acceptable au niveau de la tension de sortie doit être dans la marge $[-1.5 \div 1.5V]$.
4. L'énergie électrostatique au niveau du bus continu doit être constante.
5. La fréquence de découpage égale à 12khz.
6. La capacité du bus continu C_{bus} est : 3200uF.

3.5.1 Simulation du système photovoltaïque avec batteries

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

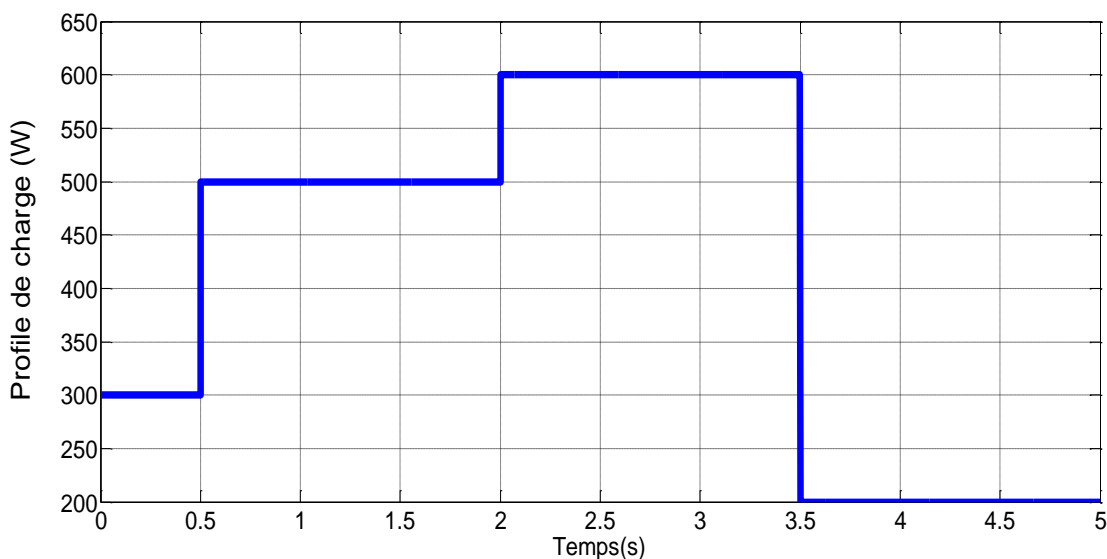


Figure 3-3 Profil de la charge

La figure 3-3 présente la puissance de la charge demandée (profile de charge), où nous distinguons 4 cas à étudiées.

Au démarrage du système hybride la demande de la puissance débute ($t=0s$) avec une valeur de 300 W, ensuite à $t=0.5s$ on provoque une augmentation de cette puissance vers une valeur de 500W qui dure jusqu'à 2s, puis un échelon positif de 100W a été engendré où la valeur de la charge augmente à 600W. A $t = 3.5s$ un échelon négatif de 800W a été produit vers une valeur de charge égale à 200W.

La figure 3-4 démontre la tension du bus continu et sa référence. Elle suit pratiquement sa référence avec une erreur statique maximale ne dépassant pas les 0.020% (0.025V), donc le correcteur de tension rattrape bien les erreurs.

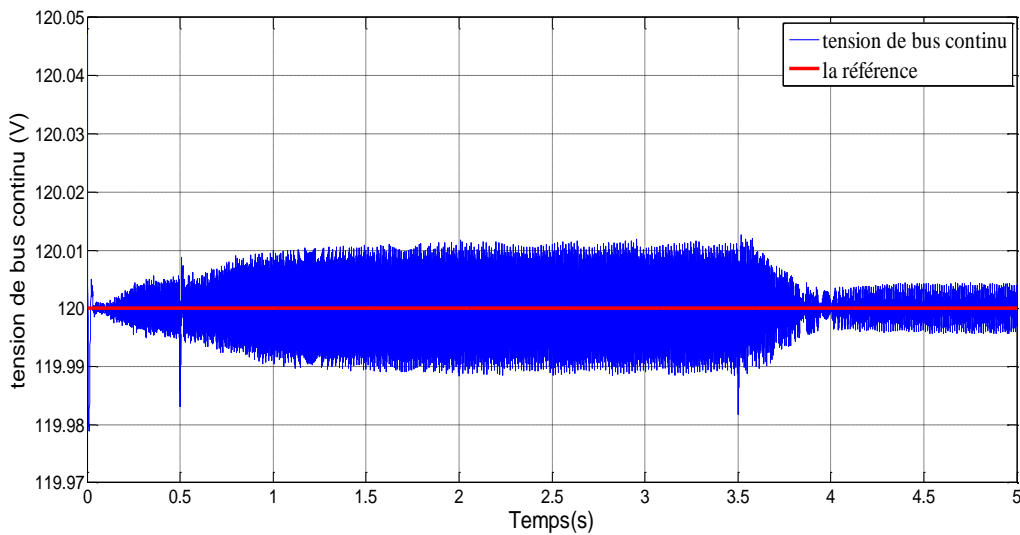


Figure 3-4 Tension de bus continu

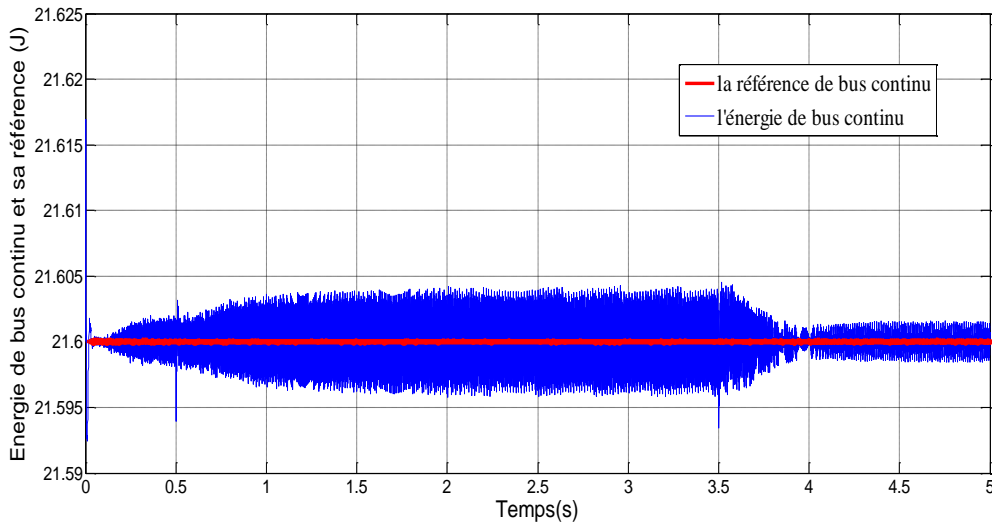


Figure 3-5 Energie de bus continu et sa référence

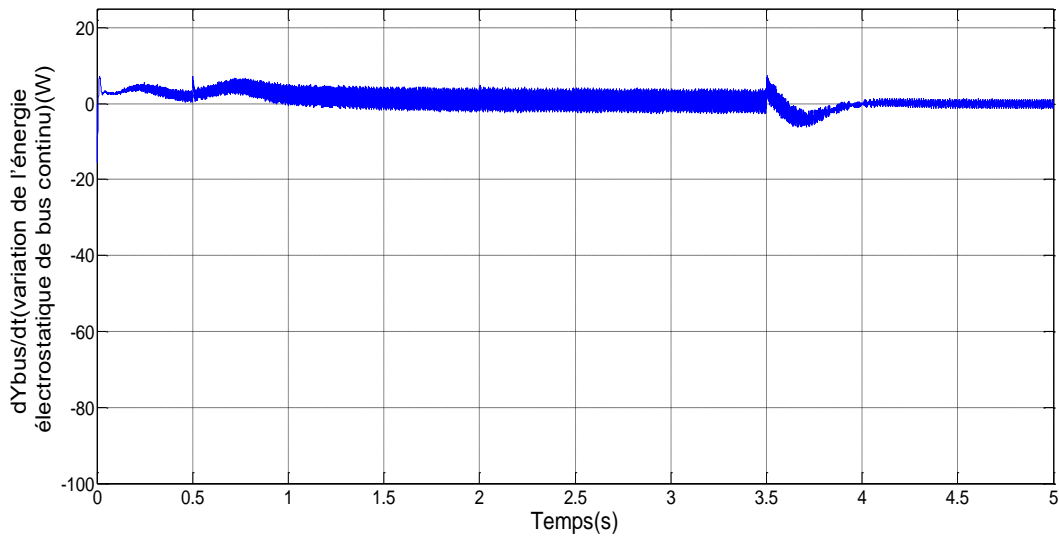


Figure 3-6 Variation de l'énergie électrostatique dans le bus continu

La figure 3-5 démontre l'évolution de l'énergie électrostatique du bus continu et de sa référence quand la puissance de charge évolue. La sortie plate (y_1) suit parfaitement la trajectoire de sa référence avec une marge d'erreur statique trop étroite pour une tension de sortie, ainsi qu'une bonne précision et stabilité confirmant l'efficacité d'asservissement de la commande proposée.

La deuxième figure 3-6 montre la variation d'énergie électrostatique qui est presque nulle d'où le bon fonctionnement de la commande plate et des régulateurs de courant par PI.

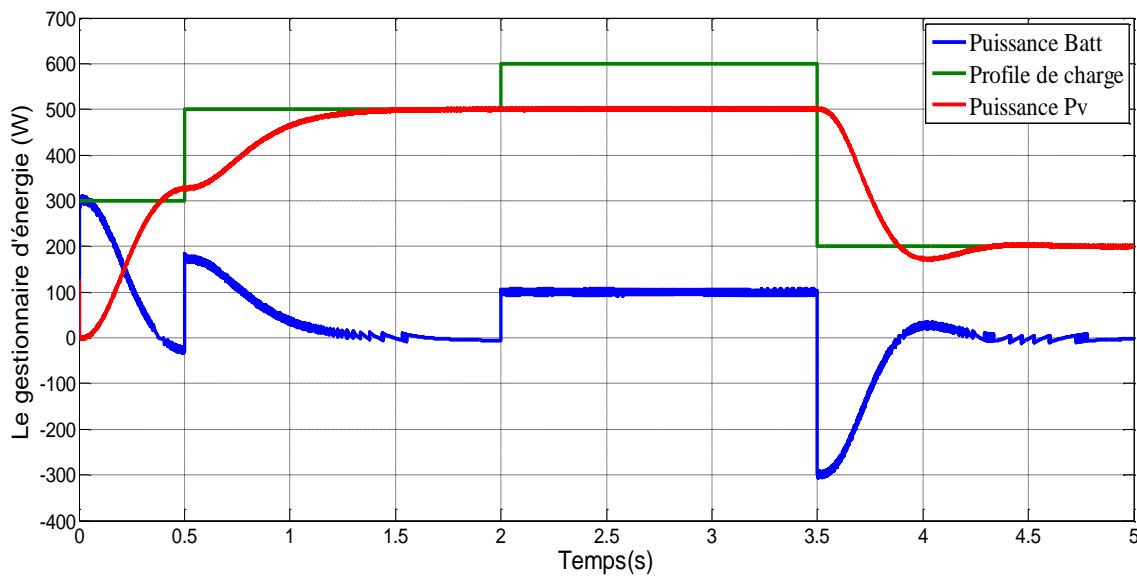
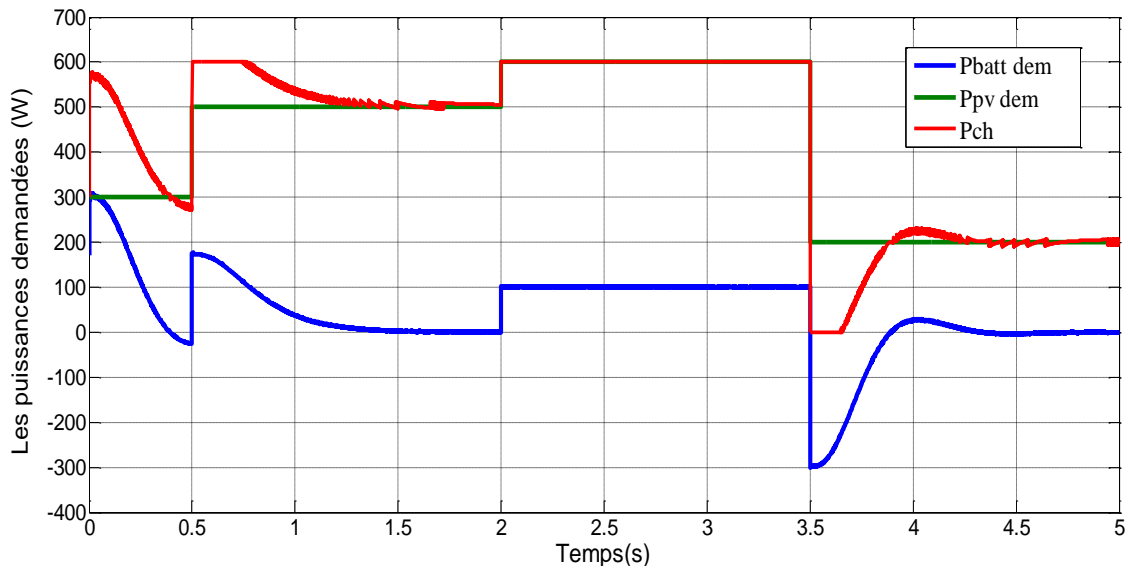


Figure 3-7 Bilan des puissances

La figure 3-7 montre une comparaison entre les formes d'onde des puissances fournies par le système d'énergie hybride (photovoltaïque et les batteries de stockage) et la puissance de la charge imposée. L'équilibre énergétique du système dans chaque instant est toujours atteint ($P_{pv} + P_{Batt} = P_{ch}$). De plus, les flux d'énergie sont bien dispatchés.

Dans l'intervalle [0-0,2 s], c'est la batterie qui assure l'alimentation de la charge vue que la production photovoltaïque est nulle (pas d'ensoleillement). Par la suite, la source PV avec la compensation des batteries dans certaines périodes prend le relais pour assurer l'alimentation



de la charge. Donc, l'objectif principal (répondre à la demande de la charge) est bien atteint et la méthode de gestion proposée fonctionne correctement.

Figure 3-8 les puissances demandées

La figure 3-8 démontre les puissances demandées par la batterie et la source photovoltaïque ainsi que la puissance de la charge. La source primaire de ce système qui est le photovoltaïque alimente la charge et peut la couvrir par son énergie produite qui varie principalement selon le profil d'éclairement et les signaux de commande du convertisseur Boost associé, or, à des instants déterminés, sa puissance générée diminue à cause des conditions météorologique ce qui permet à la batterie d'intervenir et compensé le manque d'énergie.

La figure 3-9 représente l'énergie produite par les batteries et sa référence. Cette dernière suit parfaitement sa référence avec une erreur statique maximale ne dépassant pas les 0.03% confirmant l'efficacité de l'asservissement.

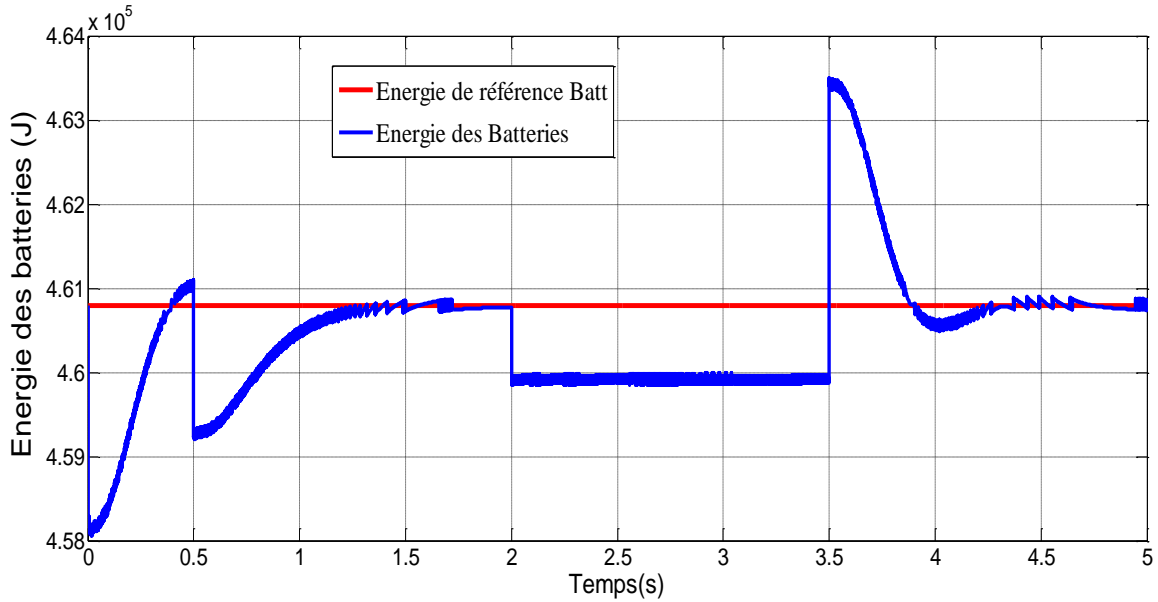


Figure 3-9 l'énergie produite par les batteries et sa référence

La figure 3-10 montres que l'évolution du courant produit par les batteries à chaque instant suit exactement le courant de sa référence avec une erreur quasi nulle d'où le bon comportement des régulateurs de courant.

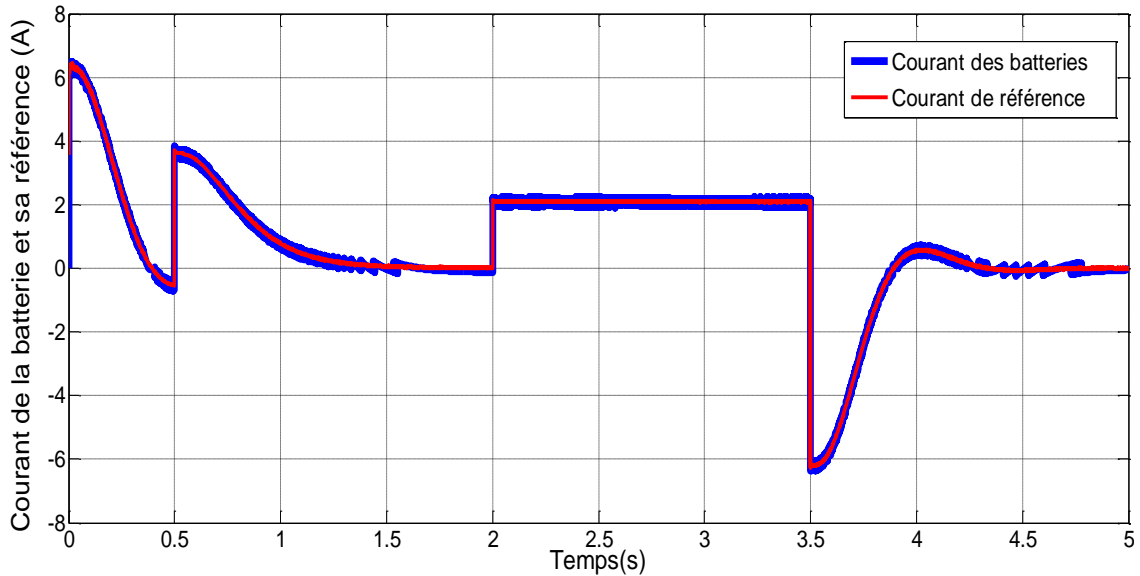


Figure 3-10 Energie fournit par les batteries

La figure 3-11 montre que la tension mesurée aux bornes du dispositif de stockage (batterie) balance dans l'intervalle [47.85V ÷ 48.2V] avec une diminution remarquable au moment du démarrage du système provoquée par le fort appel du courant.

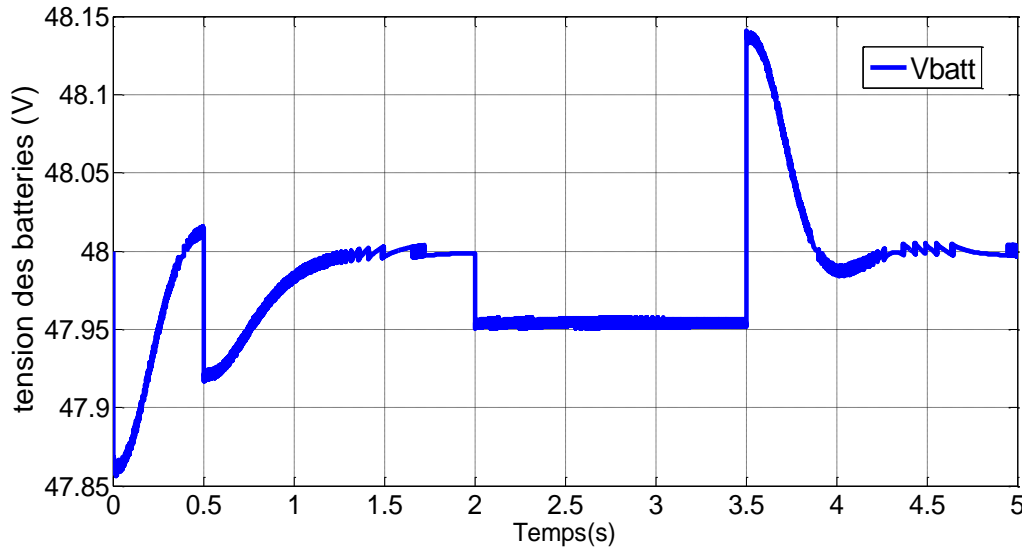


Figure 3-11 tensions des batteries

Les figures 3-12 et 3-13 démontrent l'évolution de la puissance délivrée par la source photovoltaïque et la puissance demandée par la commande plate et celle demandée par l'algorithme MPPT. D'après la figure 3-9, la puissance générée par la source photovoltaïque est la même que celle demandée par l'algorithme MPPT (avec une bonne précision et stabilité). Par ailleurs, la figure 3-10, pendant des instants précis, démontre que la puissance demandée par la commande plate peut être supérieure ou inférieure (différentes) comparée celle produite par la source PV ce qui explique le lancement de la source secondaire du système hybride (les batteries).

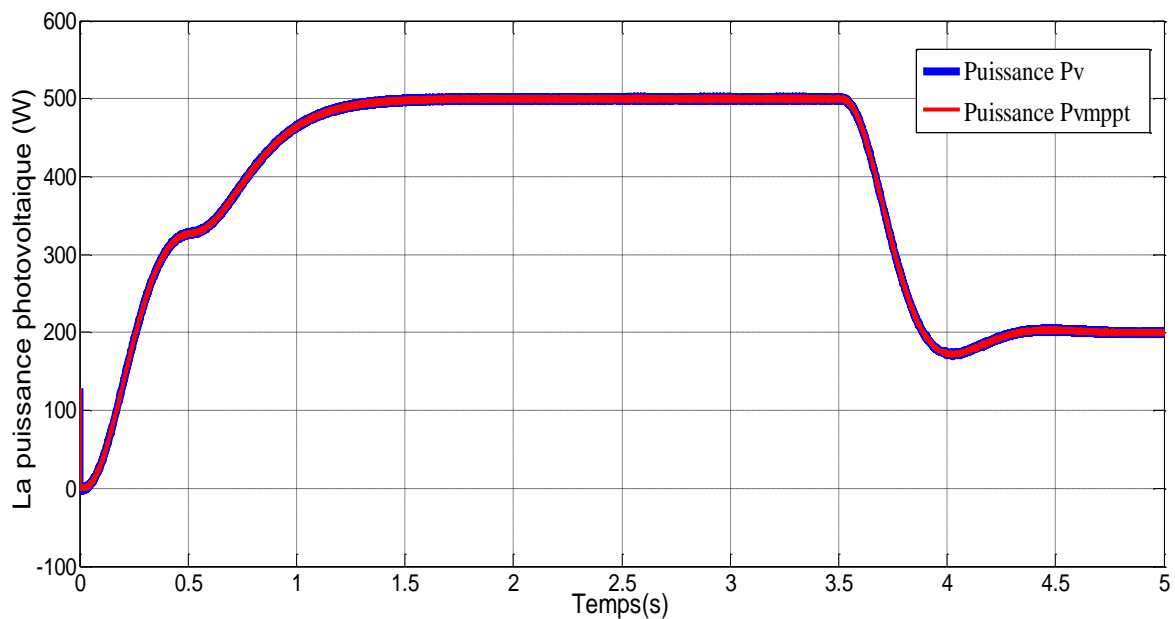


Figure 3-12 Puissance délivrée par la source PV et l'algorithme MPPT

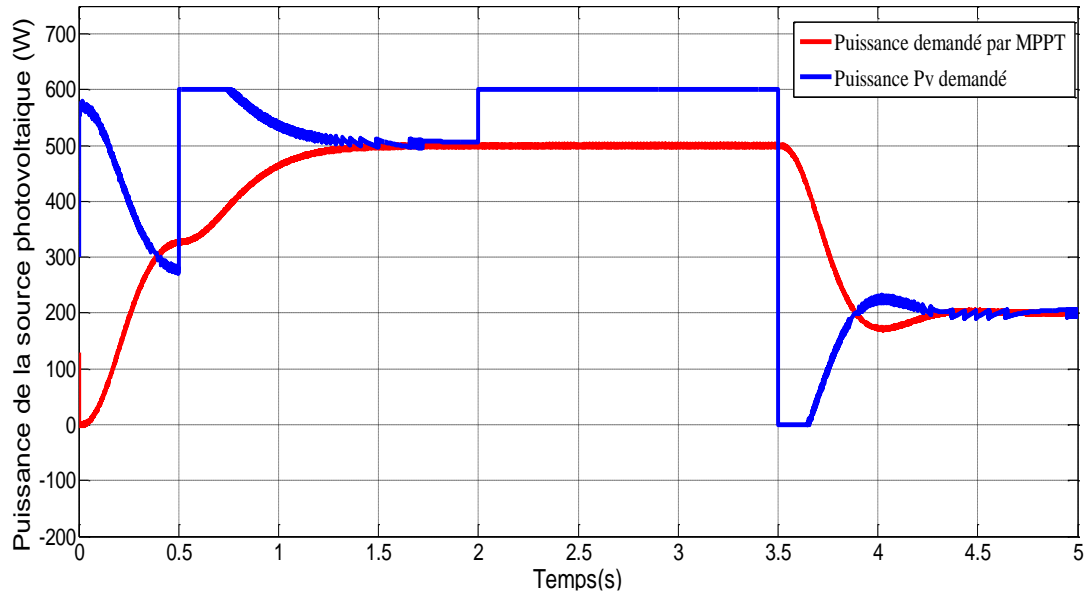


Figure 3-13 Puissance demandé par la source PV et l'algorithme MPPT

Les figures 3-14 présentent la tension et le courant photovoltaïque pour un fonctionnement dans des conditions d'ensoleillement et un profil de charge constant durant une journée.

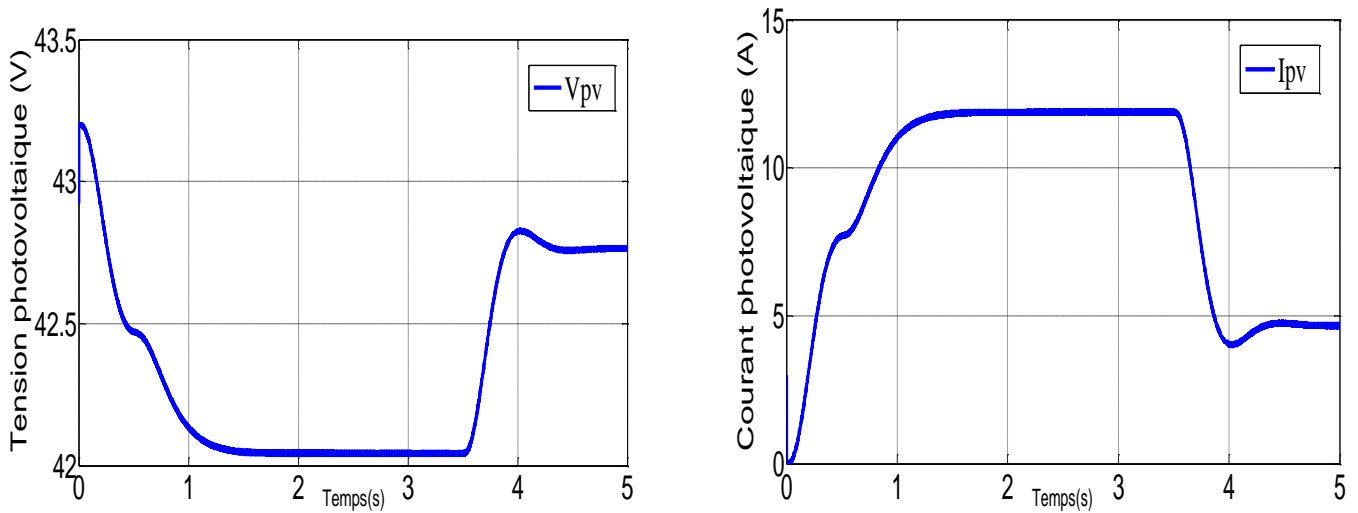


Figure 3-14 courant et tension de la source photovoltaïque

3.5.2 Simulation du système photovoltaïque et éolienne avec les batteries

Les résultats de simulation obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

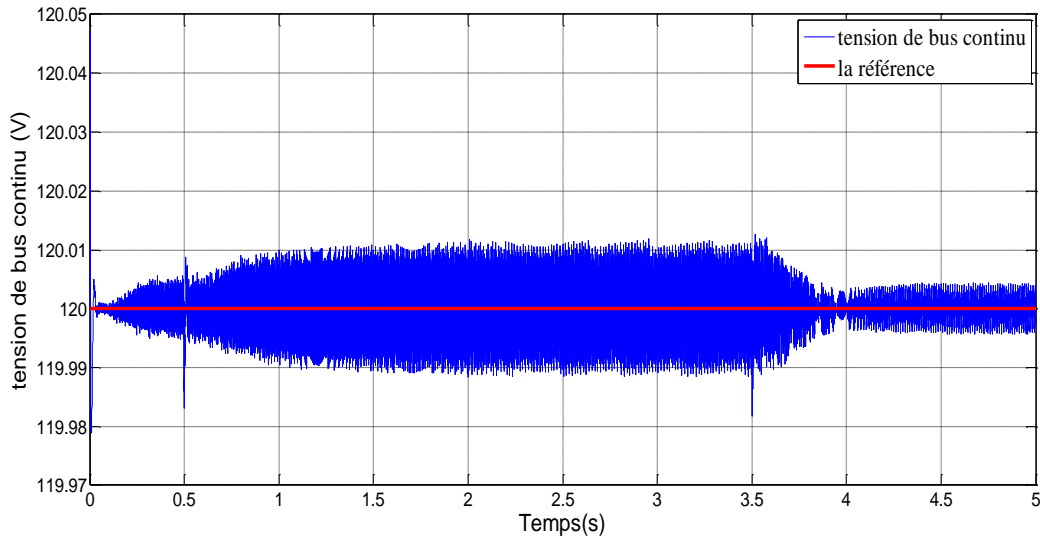


Figure 3-15 Tension de bus continu

La figure 3-16 illustre la tension du bus continu réglée à 120V. Elle est parfaitement asservie à sa valeur de référence avec une erreur statique maximale de 0.020% (0.025V) quel que soit le transfert de puissance dans la source hybride.

Dès lors, il est à noter que la stratégie de contrôle par la commande platitude permet de garantir une tension de charge constante et rattrape bien les erreurs avec une bonne performance dynamique pour des variations diverses de la puissance de charge.

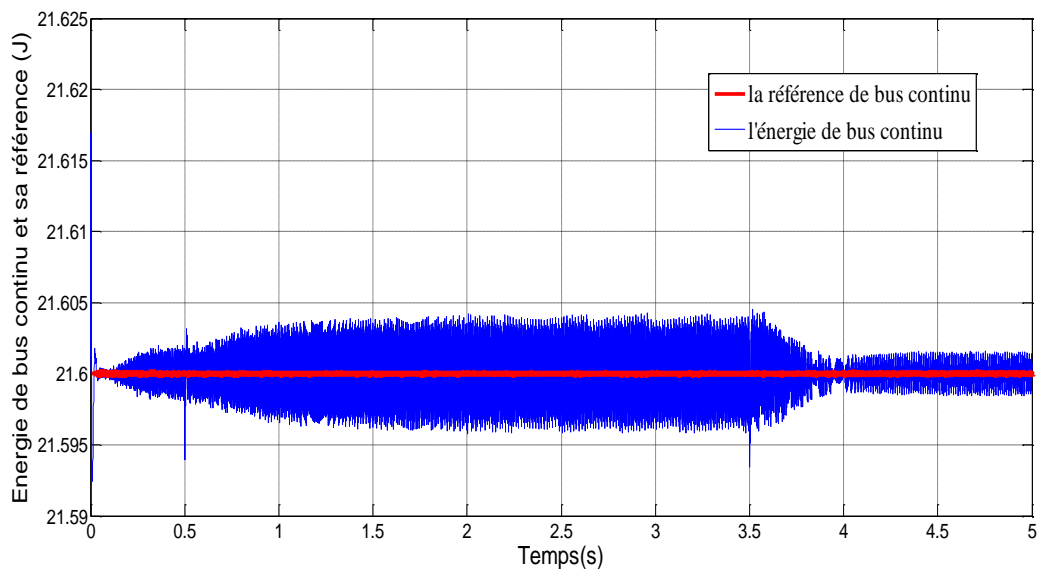


Figure 3-16 Energie de bus continu et sa référence

La figure 3-17 démontre l'évolution de l'énergie électrostatique du bus continu et de sa référence quand la puissance de charge évolue. La sortie plate (y_1) suit parfaitement la trajectoire de sa référence avec une marge d'erreur statique trop étroite pour une tension de sortie, ainsi qu'une bonne précision et stabilité confirmant l'efficacité d'asservissement de la commande proposée.

La deuxième figure 3-18 montre la variation d'énergie électrostatique au niveau de bus continu qui est presque nulle d'où le bon fonctionnement de la commande plate et des régulateurs de courant par PI.

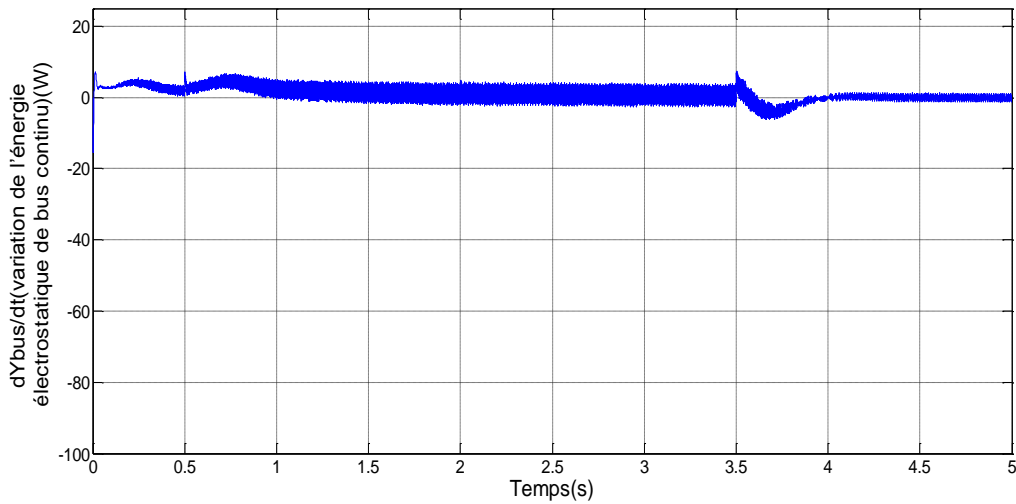


Figure 3-17 Variation de l'énergie électrostatique dans le bus continu

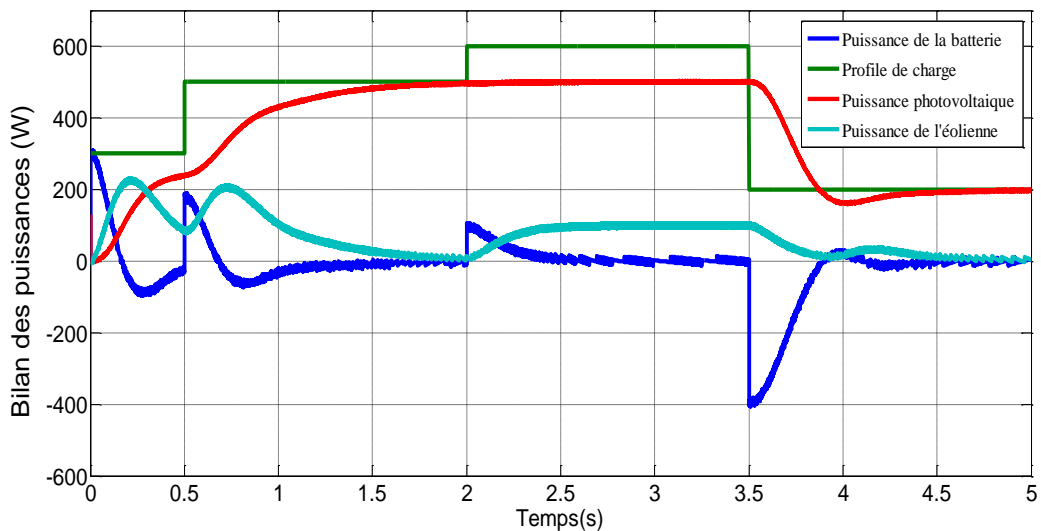


Figure 3-18 Bilan des puissances

La figure 3-18 présente les puissances générées par les différentes sources du système hybride (Photovoltaïque-éolienne-batterie) et celle de la charge imposée. On constate que ce système a atteint son objectif pour la gestion de l'énergie dont la charge est complètement couverte par l'énergie produite à tout instant ($P_{pv} + P_{wt} + P_{batt} = P_{ch}$). Cette figure démontre également le mode de fonctionnement de ce système.

A l'état initial du système ($t=0-0.1s$), la batterie assure l'alimentation de la charge avec une puissance de 400W pour couvrir la puissance demandée. En revanche, la production énergétique des sources primaire, à savoir les panneaux solaires et les éoliennes, fournit une valeur de 0W. Le développement de la production de ces sources dépend essentiellement du profil de l'éclairement et du vent.

Par la suite, la source PV (photovoltaïque) et WT (éolienne) prennent le relais et génèrent des puissances qui se complètent pour atteindre la charge demandée, alors que, la puissance générée des batteries commence à diminuer.

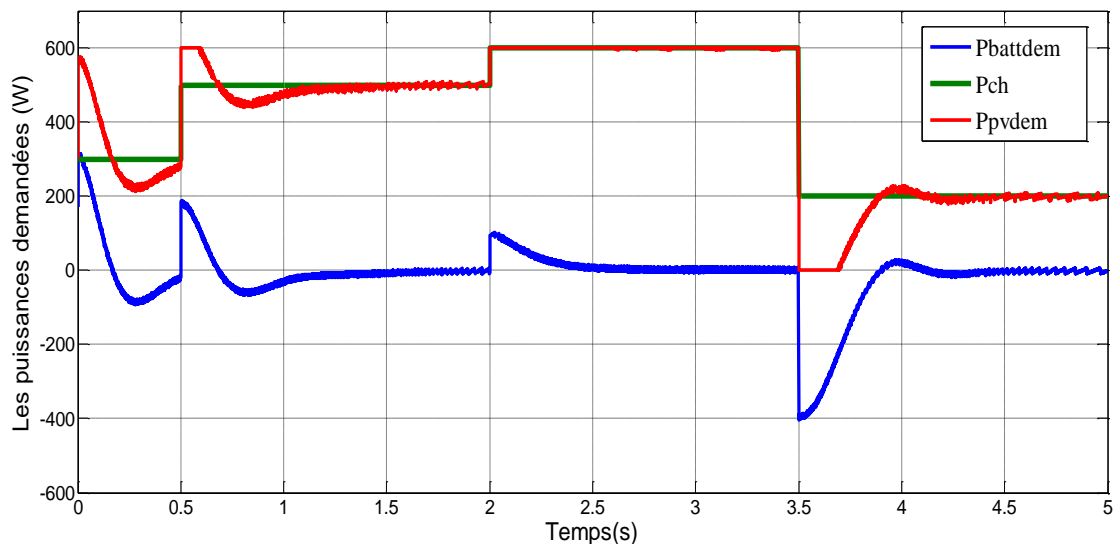


Figure 3-19 Les puissances demandées

La figure 3-19 démontre les puissances demandées par la batterie et la source photovoltaïque ainsi que la puissance de la charge. La source primaire de ce système qui est le photovoltaïque alimente la charge et peut la couvrir par son énergie produite qui varie principalement selon le profil d'éclairement et les signaux de commande du convertisseur Boost associé, or, à des instants déterminés, sa puissance générée diminue à cause des conditions météorologique ce qui permet à la batterie d'intervenir et compensé le manque d'énergie.

La figure 3-20 représente l'énergie produite par les batteries et sa référence. L'énergie des batteries balance entre son intervalle désirée pour maintenir la stabilisation du système et sa tension de sortie à 120V.

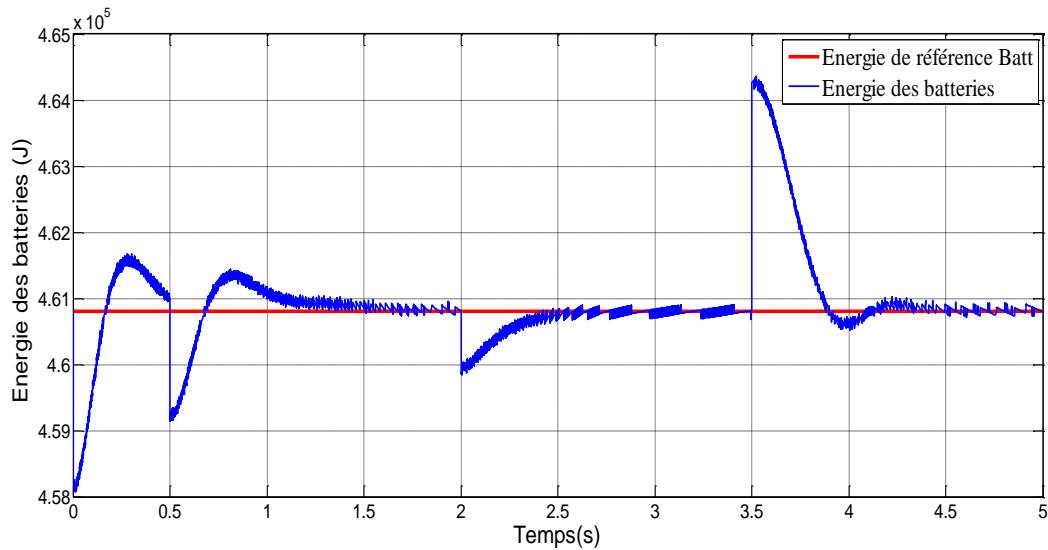


Figure 3-20 Energie fournit par les batteries

La figure 3-21 illustre le courant produit par la batterie qui suit parfaitement le signal de référence à chaque instant, et pendant les perturbations sévères de la charge, tout en maintenant une erreur quasi nulle, d'où le bon suivi du régulateur du courant, ce qui prouve sa bonne performance transitoire.

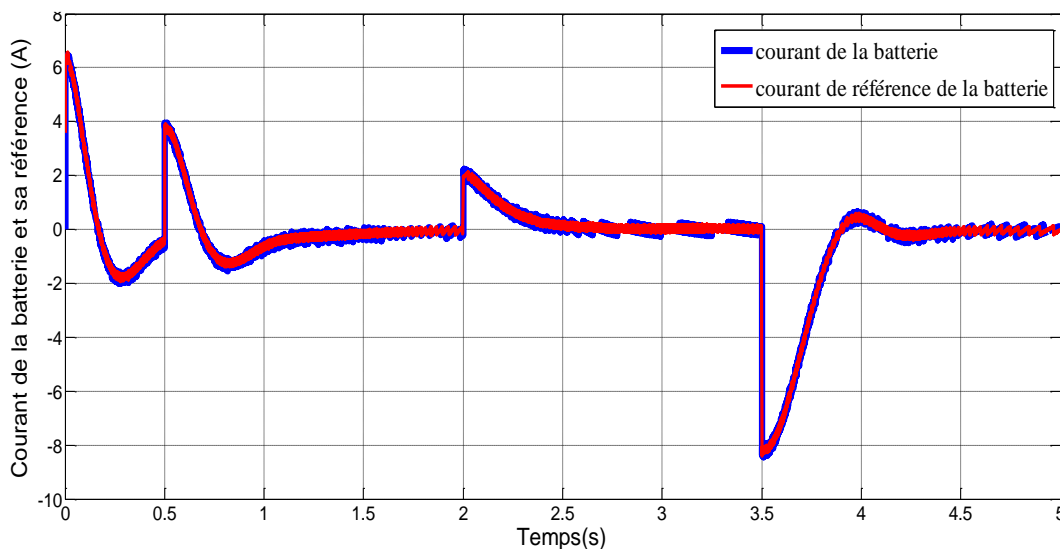


Figure 3-21 Courants des batteries

La figure 3-22 montre que la tension mesurée aux bornes du dispositif de stockage (batterie) balance dans l'intervalle $[47.85V \div 48.2V]$ avec une diminution remarquable au

moment du démarrage du système provoqué par le fort appel du courant (qui est instantanément alimenté par le banc des batteries)

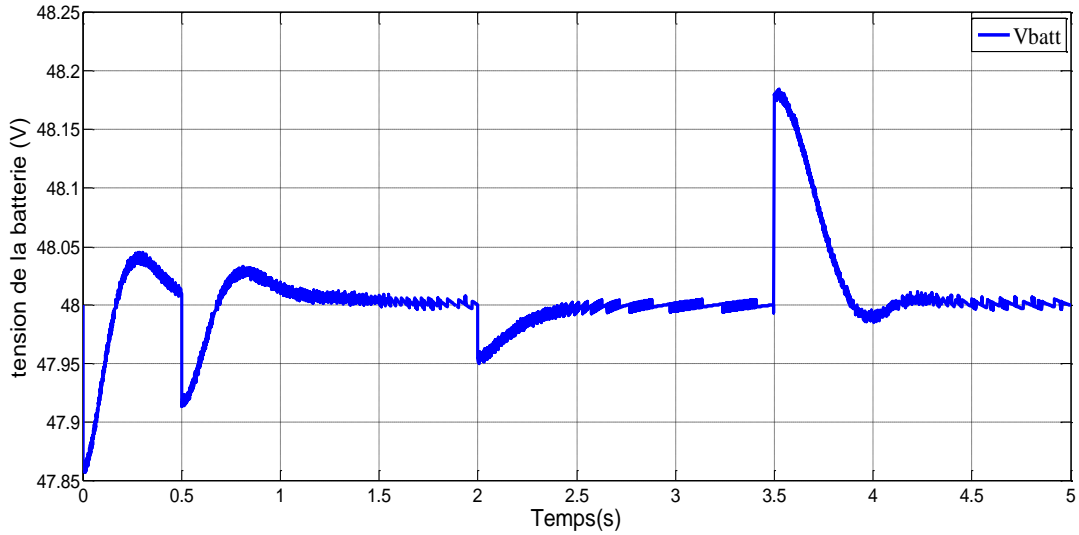


Figure 3-22 Tension de la batterie

Les figures 3-23 et 3-24 présentent la puissance délivrée par la source photovoltaïque comparée à celle demandée par la commande plate et celle générée via l'algorithme MPPT par la méthode P&O. D'après la figure (3-23) les deux puissances sont les mêmes, la puissance photovoltaïque fonctionne pratiquement en mode MPPT. Cependant, en se référant sur la figure 3-24, il est à noter qu'ils existent des instants déterminés de fonctionnement où l'énergie requise par notre commande plate est supérieure à celle produite par le système photovoltaïque cela est dû à une simulation d'un profil d'éclairement qui n'atteint pas les valeurs désirées partiellement, ce qui entraîne le lancement des sources secondaires de notre système hybride

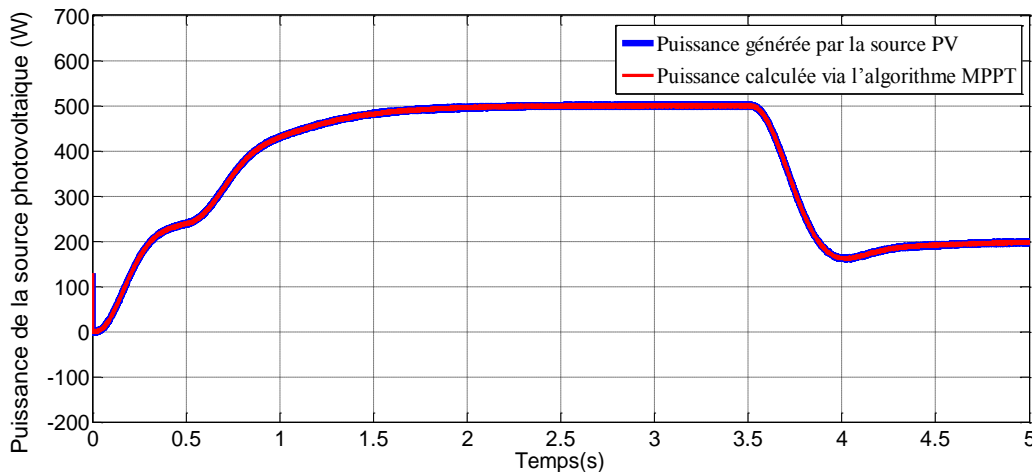


Figure 3-23 Puissance délivrée par la source PV et celle calculée théoriquement via l'algorithme MPPT.

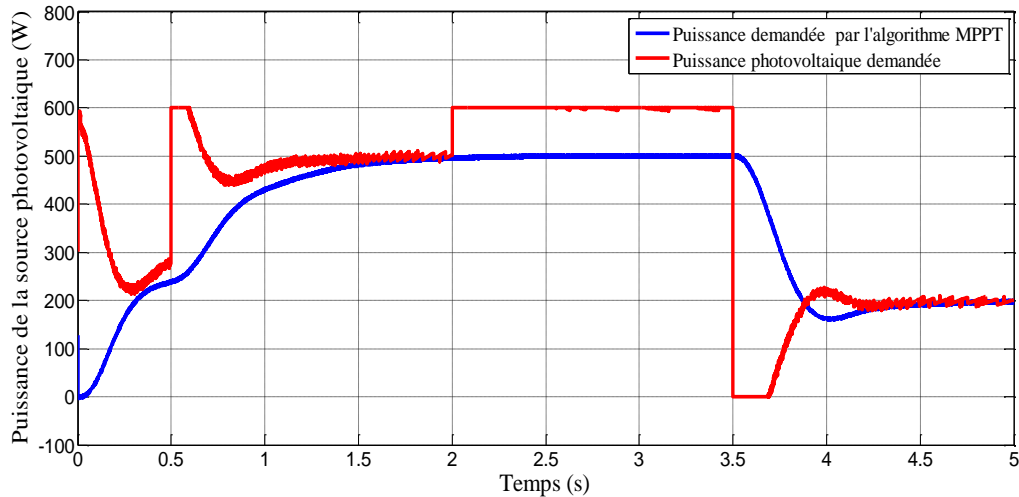


Figure 3-24 La puissance demandée par la commande plate et celle générée via l'algorithme MPPT

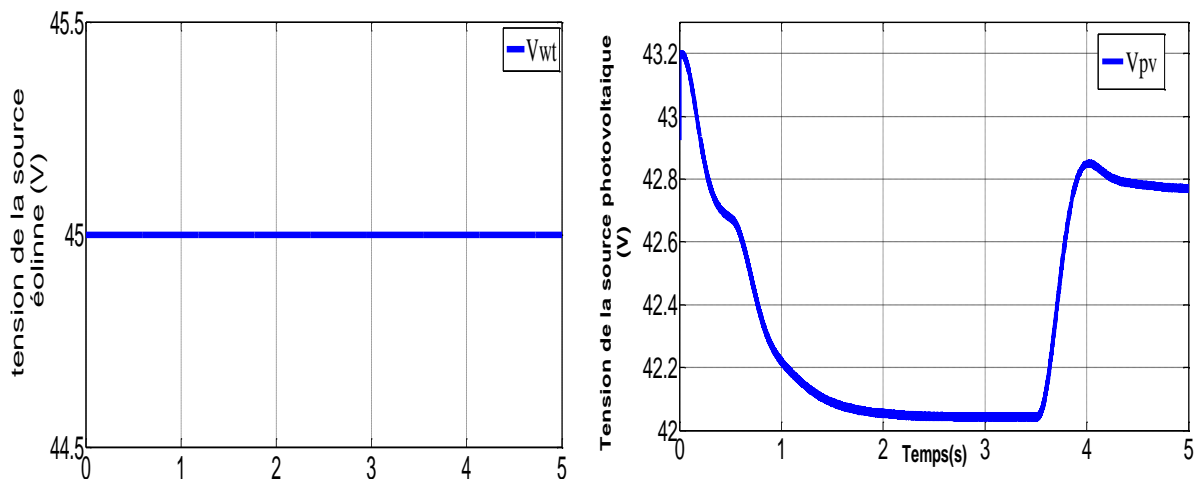


Figure 3-25 La tension de la source photovoltaïque et éolienne

La figure 3-25 illustre une représentation des formes d'onde de la tension générée par la source photovoltaïque et éolienne. La tension de l'énergie éolienne reste stabilisée et régulée à 45V, or la tension de la source photovoltaïque varie selon les variations du profil de l'éclairement et des signaux de commande (algorithme MPPT) du convertisseur Boost associé.

Les figures 3-26 et 3-27 représentent la valeur du courant généré par la source photovoltaïque et éolienne pour chaque instant.

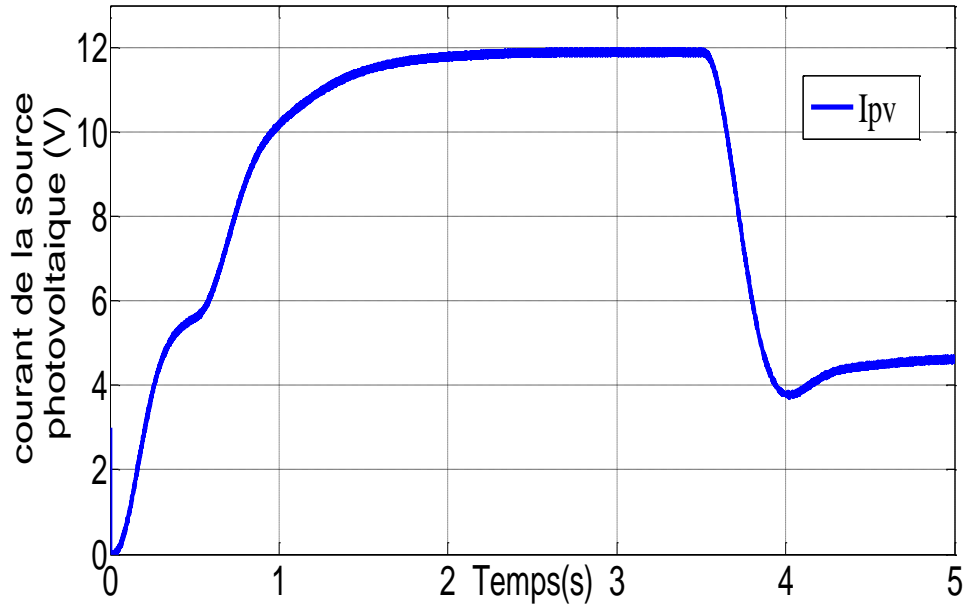


Figure 3-26 Courants de la source photovoltaïque

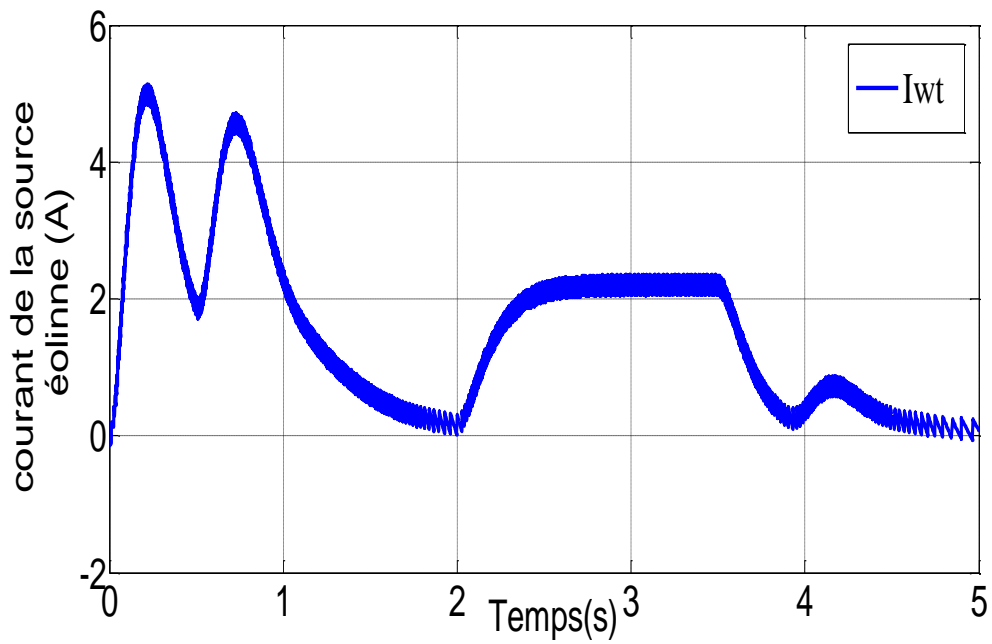


Figure 3-27 Courants de la source éolienne

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception du système hybride proposé et la commande par platitude appliquée, dans laquelle les formules mathématiques et les signaux de commande des convertisseurs de cette dernière ont été exprimés. L'analyse de l'utilisation des régulateur PID a été expliquée, en tirant ses équations de contrôle adaptées aux différents convertisseurs associés.

La simulation est faite par le logiciel MATLAB-Simulink, où les résultats obtenus présente des résultats intéressants, soit au niveau de la régulation de tension sur le bus continu, où bien concernant la gestion de l'énergie produite par les diverses sources. Plusieurs scénarios sont examinés et analysés pour la gestion du flux de puissance générée par le système hybride. Les résultats des différents scénarios proposés à la simulation montrent que notre approche basé sur la notion de platitude s'avère très robuste vis-à-vis des fortes variations de charge ou paramétriques avec une haute dynamique qui nous permet d'obtenir un système très stable.

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective

Les travaux de recherche présentés dans le cadre de ce projet fin d'étude avaient pour objective de développer un gestionnaire d'énergie pour un système hybride qui se compose de deux différentes sources renouvelables, à savoir le photovoltaïque et l'éolienne en utilisant un dispositif de stockage, ce système est commandé, modélisé et dimensionné afin d'assurer une bonne alimentation autonome pour les habitats résidentiel.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les systèmes hybrides et les différentes sources renouvelables qui le composent. On commence par étudier les panneaux photovoltaïques, leurs différents modèles, leurs caractéristiques et leurs modélisations. Puis, un rappel détaillé sur les différents types d'éoliennes existants avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Ensuite nous avons traité l'accumulateur chimique utilisé pour le stockage ainsi que le modèle mathématique employé et ses types. Les générateurs photovoltaïques et les éoliennes ont été choisis comme une source de production primaire pour leurs énergies spécifiques élevées, mais leur intermittence nous mène vers un ajout de batteries comme source auxiliaires pour augmenter la fiabilité de notre système hybride.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique du système hybride proposé, puis modélisé et dimensionné les convertisseurs «Boost» et « Buck-Boost» associés aux différentes sources. Nous avons ensuite réalisé une étude de deux sites en Algérie : le premier a été sélectionné dans la périphérie de la wilaya d'Annaba est alimenté par un système PV-Batterie et le deuxième dans le village de Tahifet à Tamanghasset avec un système PV-WT-Batterie.

Dans le dernier chapitre, une stratégie de commande qui se base sur la notion de platitude avec les régulateurs de courants par PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur) pour notre système hybride a été présentée. La stratégie proposée repose sur la génération d'un modèle d'ordre réduit du système et la gestion des flots d'énergie via des trajectoires de référence de certaines grandeurs énergétiques du système.

Les résultats obtenus par simulation confirment la validité des stratégies de commande et de supervision énergétique élaborées aux chapitres 2 et 3. La tension de sortie du système hybride électrique reste toujours constante même lors de variations de charge importante. Les stratégies de gestion d'énergie utilisées montrent l'efficacité de la méthode de gestion du flux d'énergie mais il reste pas mal de point à traiter et de précision à apporter dans les futures

travaux. Les algorithmes de commande basés sur le concept de platitude peuvent être appliqués à toute architecture de source hybride et à la plupart des topologies de convertisseurs d'interface.

Les résultats de ce travail nous permettent de distinguer de nombreuses perspectives dans le but d'améliorer ce genre de systèmes, et qui sont citées ci-dessous.

- ✓ Valider les résultats obtenus par des essais expérimentaux, car il est très intéressant de tester les performances dynamiques des stratégies de commande ainsi que l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel.
- ✓ Ajouter une deuxième source de stockage comme les supercondensateurs pour ses fortes densités d'énergie et ses dynamiques rapides dans les régimes transitoires.
- ✓ Ajouter une troisième source comme la pile à combustible pour assurer plus de production d'électricité et utiliser le surplus d'énergie pour alimenter d'autres charges tel que le pompage de l'eau.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Labouret, P. Cumunel, J.-P. Braun, and B. Faraggi, *Cellules solaires-5e éd.: Les bases de l'énergie photovoltaïque*: Dunod, 2010.
- [2] K. Helali, "Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative," Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [3] M. Belatel, "Etude d'un Système Photovoltaïque Hybride avec un Groupe Diesel pour un Développement Durable."
- [4] Z. SAADA, S. ZEBIRATE, and I. TAIBI, "Surveillance, diagnostic et localisation du défaut d'ombrage partiel dans une centrale photovoltaïque avec une approche par réseaux de neurones artificiels."
- [5] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," 2013.
- [6] J. Girod, *L'énergie en Afrique: la situation énergétique de 34 pays de l'Afrique subsaharienne et du Nord*: KARTHALA Editions, 1994.
- [7] P. Leconte, M. Rapin, and E. Szechenyi, "Eoliennes," *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, pp. BM4640. 1-BM4640, 2001.
- [8] O. Krug, X. Phan, and E. Issartel, "Small-scale wind energy: situation and survey on the role of collectivities in the wind sector development," 2011.
- [9] M. Patel, "Wind and solar power systems: design, analysis, and operation, 2nd edn, CRC Taylor & Francis," *ISBN-10: 0-8493-1570-0, ISBN-13*, pp. 978-0, 2006.
- [10] A. T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome," Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [11] A. Zaimi, "Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents," *mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc*, 2014.
- [12] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129)*, 2000, pp. 2249-2254.
- [13] M. Singh and S. Santoso, "Dynamic models for wind turbines and wind power plants," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)2011.

- [14] P. Bauer, S. De Haan, C. Meyl, and J. Pierik, "Evaluation of electrical systems for offshore windfarms," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129)*, 2000, pp. 1416-1423.
- [15] I. Tegani, "Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque," Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [16] H. Faïda, J. Saadi, M. Khaider, S. El Alami, and M. Monkade, "Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne Cas d'un site au nord du Maroc," *Revue des énergies renouvelables*, vol. 13, pp. 477-483, 2010.
- [17] M. Zandi, "Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [18] M. Urbain, "Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Li-Ion. Estimation en ligne de la SOC et de la SOH," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [19] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," 2002.
- [20] A. ZEMOURI, "Etude expérimentale D'un Convertisseur DC/DC Contrôler par une commande robuste," Université de Batna 2, 2014.
- [21] M. M. M. Al Anfaf, "Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges," 2016.
- [22] N. Fellah and O. Sidibe, "Intitulé du sujet Etude de dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST," 2019.
- [23] H. Belmili, M. Ayad, E. Berkouk, and M. Haddadi, "Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes-Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil," *Revue des Energies Renouvelables CICME*, vol. 8, pp. 27-39, 2008.
- [24] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Sur lessystèmesnon linéaires différentiellement plats," *CR Acad. Sci. Paris*, p. 619, 1992.
- [25] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples," *International journal of control*, vol. 61, pp. 1327-1361, 1995.

- [26] A. Payman, "Contribution à la gestion d'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [27] A. Battiston, "Commande par Platitude à Une Boucle d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Protections en cas de Saturation des Commandes," *Journées des jeunes chercheurs en génie électrique*, 2013.
- [28] I. Tegani, A. Aboubou, R. Saadi, M. Y. Ayad, and M. Becherif, "Differential Flatness Using the Predictive Neural Network Control Law for Hybrid Power System," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 5, pp. 635-647, 2015.
- [29] M. Belhamel, S. Moussa, and A. Kaabeche, "production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diesel)," *Rev Energ Ren Zones Arides*, vol. 1, pp. 49-54, 2002.
- [30] M. A. Johnson and M. H. Moradi, *PID control*: Springer, 2005.
- [31] K. Malik, "Etude et Implémentation d'une Commande PID en Utilisant le PIC18F2550 Pour le Contrôle de Vitesse d'un MCC," Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [32] B. Oussama, "Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent," UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [33] H. Abbas, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, and M. Abid, "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17, pp. 435-445, 2014.
- [34] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene, and S. Mouhadjer, "Design of a library of components for autonomous photovoltaic system under Matlab/Simulink," *International Journal of Computer Applications*, vol. 53, 2012.