

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électrique

THÈME

---

---

**Contrôle avancé par la technique « Logique Floue -Type 2 »  
des performances d'un système hybride à base d'énergies  
renouvelables**

---

---

Préparé par : **BOUKHADIA Ahmed**  
**CHERIF Mohamed**

**Devant le Jury :**

Nom et prénoms	Grade	Qualité
HABRI.K	MAA	Président
ARARIA. R	MCB	Examineur
CHEHDA.R	MCB	Examineur
KOULALI .M	MCA	Encadrant
NEGADI.K	Pr	Co-Encadrant

Année universitaire: 2023/2024

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

*Ainsi, nous tiens également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Mr : KOULALI .M et à notre Co-encadrant Mr : NEGADI.K qui nous apporté une aide précieuse. Je lui exprime ma gratitude Pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et ces encouragements,*

*Et je remercie également les membres du jury d'avoir acceptés*

*les eximination des notre travail.*



# *Dédicaces*

*Au nom de Dieu le Miséricordieux*

*Je dédie ce travail à :*

*À Mes très chères parents*

*Grâce à leur gentillesse, leurs encouragements et leurs grands*

*Sacrifices, ils ont su créer une atmosphère affectueuse propice à la poursuite de*

*Mes études, aucune dédicace ne peut exprimer mon respect et mes sentiments*

*Profonds pour eux, je prie Dieu de les bénir, de veiller sur eux, dans l'espoir*

*Qu'ils le feront Je serai toujours fier de moi.*

*A mon partenaire Mohamed qui a partagé ce travail avec moi.*

*Mon cher frère Mohamed et mes sœurs.*

*A ma chère amie N. Fatima Zohra*

*A mon groupe de travail « Entreprise Boukhadia Mohamed »*

*A mes amis et toute la famille électrotechnique.*



**BOUKHADIA.AHMED**

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère, A mon cher père, Pour tous leurs sacrifices,*

*Leurs encouragements et leurs prières.*

*A mes chers frères Pour leur appui et leurs*

*Encouragements.*

*A mon partenaire ahmed qui a partagé ce travail avec moi.*

*A toute ma famille Pour leur soutien tout au long de mon parcours*

*Universitaire.*

*A tous mes amis.*



**CHERIF.MOHAMED**

---

---

# TABLE DES MATIERES

---

---



## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Chapitre I : état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides</b>	
I.1 Introduction .....	4
I.2 Les énergies renouvelables .....	4
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Différentes ressources des énergies renouvelables .....	4
I.2.2.1 Énergie Photovoltaïque .....	4
I.2.2.2 Éolienne.....	5
I.3 Principes de production de l'énergie photovoltaïque et éolienne .....	6
I.3.1 l'énergie photovoltaïque.....	6
I.3.1.1 Définition de la cellule photovoltaïque.....	6
I.3.1.2 Principe de fonctionnement de photovoltaïque.....	7
I.3.1.3 Association des cellules photovoltaïque.....	8
I.3.1.4 Les modules photovoltaïques.....	8
I.3.1.5 Générateur Photovoltaïque.....	9
I.3.2 l'énergie éolien.....	9
I.3.2.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	9
I.4 Avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne.....	12
I.5 Système hybride .....	13
I.5.1 Définition.....	13
I.5.2 Importance de l'hybridation.....	13
I.5.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	14
I.5.4 Classification des systèmes d'énergie hybride .....	14
I.5.4.1 Le régime du fonctionnement .....	14
I.5.4.2 La structure du système hybride.....	15
I.5.5 Configuration des systèmes hybrides.....	15
I.5.5.1 Architecture à bus continu.....	16
I.5.5.2 Architecture à bus alternatif.....	17
I.5.6 Critères d'optimisation du système hybride.....	18
I.5.7 Différents structures de systèmes hybrides.....	18
I.5.7.1 Systèmes hybrides avec source conventionnelle.....	18
I.5.7.1.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/source conventionnelle.....	18
I.5.7.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	20
I.5.7.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	21
I.6 Systèmes de stockage.....	21
I.6.1 Les Batteries.....	22
I.6.1.1 Principe de fonctionnement d'une batterie.....	23

I.6.1.2 Types des batteries.....	24
I.7 Les convertisseurs statiques.....	26
I.7.1 Types de convertisseurs statiques.....	26
I.7.2 Les familles de hacheurs.....	26
I.7.2.1 Convertisseur Buck.....	27
I.7.2.2 Convertisseur boost.....	27
I.7.2.3 Le convertisseur Buck-Boost.....	28
I.8 Conclusion.....	28

## **Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride**

II.1 Introduction.....	30
II.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	30
II.2.1 Module photovoltaïque utilisé.....	31
II.2.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	32
II.2.3 Caractéristiques de module photovoltaïque.....	33
II.2.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	35
II.2.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ).....	35
II.2.3.3 Puissance optimale et facteur de forme.....	35
II.2.4 constitution d'un générateur photovoltaïque.....	35
II.2.4.1 Association des cellules photovoltaïques.....	36
II.2.4.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV.....	36
II.3 Modélisation de la chaîne de production éolienne.....	38
II.3.1 Le vent .....	39
II.3.2 La turbine .....	40
II.3.3 Le multiplicateur de vitesse .....	41
II.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	42
II.3.5 Modélisation du hacheur boost (élevateur).....	44
II.4 Modélisation des éléments de stockage :.....	45
II.4.1 Modélisation de la batterie.....	45
II.4.1.1 Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage.....	46
II.5 Modélisation Bus Continu.....	46
II.6 Conclusion.....	47

## **Chapitre III : Contrôle, optimisation et gestion des éléments du système hybride**

III.1 Introduction.....	49
III.2 Description du schéma d'énergie proposé pour cette étude.....	49
III.3. Contrôle de la chaîne photovoltaïque.....	51
III.3.1 Contrôle du GPV.....	51
III.3.2. Les technique de contrôle MPPT.....	52
III.3.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	52

III.3.2.2 Les commandes MPPT classique.....	54
a) Méthode de logique floue.....	54
b) Méthode de logique floue type 2.....	56
c) la distinction entre "logique floue" et "logique flue type 2" .....	60
III.4 Contrôle de la chaîne éolienne .....	60
III.4.1 Contrôle de la turbine .....	61
III.4.2. Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse.....	63
III.4.3 Contrôle vectoriel du générateur GSAP .....	65
III.5. Contrôle de l'énergie du système de stockage hybride.....	67
III.5.1 Contrôle de la batterie .....	67
III.5.1.1 système de commande .....	67
III.6 Contrôle du bus continu.....	70
III.7 Système de supervision et de gestion .....	71
III.7.1 Schéma de supervision du SEH.....	71
III.7.2 Modes et scénarios du fonctionnement du système hybride.....	74
III.8 Résultats de simulation et interprétations .....	75
III.8.1 Performances du générateur PV.....	76
III.8.2 Performances du générateur éolien.....	78
III.8.3 Performances de la batterie.....	80
III.8.4 Performances Bus continu.....	82
III.8.5 Caractéristiques de la charge.....	82
III.8.6 Gestion de notre système hybride.....	85
III.9 Conclusion.....	87
Conclusion générale .....	89
Bibliographie .....	91

# Liste des Figures

## Chapitre I: état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides

Figure I.1: Principe de l'énergie photovoltaïque	5
Figure I.2 : Principe de l'énergie éolienne	5
Figure I.3: cellule photovoltaïque	6
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV	7
Figure I.5: Générateur photovoltaïque.	9
Figure I.6: Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.	10
Figure I.7 : Courbes de caractéristiques des puissances avec le respect de vitesse de la turbine.	10
Figure I.8: Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec liaison directe au réseau.	11
Figure I.9: Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec liaison indirecte au réseau.	12
Figure I.10: Structure d'un système hybride	13
Figure I.11: classification du système hybride.	15
Figure I.12: configuration du système hybride à bus continu.	16
Figure I.13: configuration du système hybride à bus Alternatif..	17
Figure I.14: système hybride avec connexion série.	19
Figure I.15: Système hybride avec connexion parallèle	20
Figure I.16: Système hybride photovoltaïque/stockage.	21
Figure I.17: Composants d'une batterie	23
Figure I.18: Principe d'un accumulateur électrochimique.	24
Figure I.19: Batteries plomb-acide	25
Figure I.20: Batteries Nickel-Cadmium	25
Figure I.21: Schéma du convertisseur Buck	27
Figure I.22: schéma équivalente du convertisseur boost	27
Figure I.23: Schéma équivalent du convertisseur buck-boost	28

## Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride

Figure II.1: Structure du système à énergie hybride (photovoltaïque, pile à combustible) avec stockage.	30
Figure II.2 : Schéma synoptique du système photovoltaïque	31
Figure II.3 : Modèle électrique du circuit électrique équivalent d'un PV.	31
Figure II.4 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque	34
Figure II.5 : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque	36
Figure II.6 : Caractéristique (I-V) et (P-V) pour différents éclaircissement	37
Figure II.7 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes températures	37
Figure II.8: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série	38
Figure II.9: Schéma synoptique de l'aérogénérateur	38
Figure II.10 : Caractéristiques du FSWT et du VSWT dans différentes conditions de vitesse du vent .	39
Figure II.11 : Tube de courant autour d'une éolienne	40
Figure II.12: Caractéristique $CP(\lambda)$ .	41
Figure II.13: Représentation de la GSAP dans le repère triphasé (a, b, c) et diphasé (dq)	42
Figure II.14 : schéma de Convertisseur Boost	44

Figure II.15: Modèle R-C de la batterie	45
Figure II.16 : Schéma d'un hacheur Buck-Boost	46
Figure II.16: Modèle du bus continu	47
<b>Chapitre III : Contrôle, optimisation et gestion des éléments du système hybride</b>	
Figure III.1: Synoptique du système hybride étudié connecté à une charge alternative	50
Figure III.2: Classification des techniques de contrôle utilisées dans les systèmes hybrides	51
Figure III.3: Convertisseur boost avec contrôle MPPT	52
Figure III.4 : Chaîne de conversion photovoltaïque	53
Figure III.5: Recherche de recouvrement du point de puissance maximale	53
Figure III.6: Fonctions d'adhésion	55
Figure III.7 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue	55
Figure III.8: Topologie de l'algorithme de logique floue type 2	57
Figure III.9: Structure finale du système de gestion de l'énergie	59
Figure III.10: La fonction d'appartenance de l'entrée $I_{PV}$ .	59
Figure III.11: La fonction d'appartenance de l'entrée $I_{eol}$ .	59
Figure III.12: La fonction d'appartenance de l'entrée $SOC_{bat}$ .	59
Figure III.13: La fonction d'appartenance de l'entrée $I_{bat}$ .	59
Figure III.14 : Schéma de contrôle pour le convertisseur côté générateur	61
Figure III.15: Schéma bloc du modèle de la turbine	62
Figure III.16: les Zones de fonctionnement d'une éolienne	62
Figure III.17: Schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique	63
Figure III.18 : Principe de base de la poursuite du MPP	65
Figure III.19: Contrôle vectoriel et contrôle de la tension continue	67
Figure III.20: Contrôle de la batterie	68
Figure III.21: Schéma de contrôle pour le convertisseur côté stockage rattaché à la batterie	69
Figure III.22: Structure proposée du système et contrôle du convertisseur coté réseau.	70
Figure III.23 : Dispositif de commande du convertisseur coté réseau	71
Figure III.24: Schéma de supervision du SEH proposé	72
Figure III.25: Organigramme de supervision de gestion	73
Figure III.26 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque puissance (a), courant (b) et tension (c)	77
Figure III.27: Caractéristiques du générateur éolien : (a) puissance délivrée, (b) courant, (c) tension	78
Figure III.28: Tension (a), Courant (b) délivrés par le générateur GSAP.	78
Figure III.29: Zoom Tension (a), Courant (b) délivrés par le générateur GSAP	79
Figure III.30: Caractéristiques mécanique du générateur éolien GSAP , courant(a), vitesse(b) et Puissance (c).	79
Figure III.31: Puissance (a), courant (b), tension (c) et SOC de la batterie (d).	81
Figure III.32: Tension et courant du bus continu, tension (a) et courant (b)	82
Figure III.33: Tensions triphasées de la charge	83
Figure III.34: Zoom des tensions triphasées de la charge	83

Figure III.35: Courants triphasés de la charge	84
Figure III.36: Zoom des courants triphasés de la charge	84
Figure III.37 : Zoom des courants triphasés de la charge	85
Figure III.38: Gestion de puissance du système hybride	86

# Liste des Tableaux

## **Chapitre I: état de l'art sur les énergies renouvelable et les systèmes de production hybrides**

Tableau I.1 avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne.	12
Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'un système hybride	14
Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage	22

## **Chapitre II : Modélisation des éléments du système hybride**

Tableau II.1 : Comparaison entre l'association série/ parallèle des cellules photovoltaïques	36
--	----

## **Chapitre III : optimisation et gestion des éléments du système hybride**

Tableau III.1 : Règles d'inférence de réglage flou	56
Tableau III.2: Règles de gestion d'énergie du system hybride	60
Tableau III.3: Caractéristiques du générateur éolien	75
Tableau III.4: Caractéristique du panneau photovoltaïque	76
Tableau III.5: Paramètres de la batterie	76
Tableau III.6: Caractéristiques de Bus continu	76
Tableau III.7: Caractéristiques de la charge	76
Tableau III.8: les variations de l'irradiation d'un générateur PV	77
Tableau III.9: les variations de l'irradiation d'un générateur	80

## Symboles et notation

### ***Panneaux***

$I_g$ : Le courant de sortie du générateur [A].

$V_g$ : La tension de sortie du générateur [V].

$I_L$ : le courant photonique [A].

$I_0$ : le courant de saturation inverse [A].

$\gamma$ : le facteur de qualité.

$R_s$ : la résistance série [ $\Omega$ ].

$K$ : Constante de Boltzmann,  $K = 1.3854 \cdot 10^{-23}$  [J/K].

$q$ : Constante de charge d'électron,  $q = -1.602 \cdot 10^{-19}$  [C].

$I$ : Le courant délivré par le module [A].

$I_{ph}$ : Photo courant [A].

$I_d$ : Courant de diode [A].

$I_{sh}$ : Le courant shunt [A].

$N_{oct}$ : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

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

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

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

$E_G$ : L'ensoleillement (irradiation solaire) [ $W/m^2$ ].

$E_{ref}$ : Irradiation de référence 1000 [ $W/m^2$ ].

$T_j$ : La température de jonction de la cellule [°C].

$T_{jref}$ : La température de jonction de référence [°C].

$T$ : La température ambiante [°C].

$I_s$ : Le courant de saturation [A]

$n$ : Le facteur de qualité de la diode.

$A$ : Coefficient d'idéalité de la cellule.

$E_g$ : Énergie de gap

$N_s$ : Nombre des panneaux en séries.

$N_p$ : Nombre des panneaux en parallèle.

### ***Eolienne***

$S$ : la surface de la turbine ( $S = \pi \cdot R^2$ )

$\rho$  : Représente la densité de l'air (dans les conditions normales,  $\rho = 1.225\text{Kg/m}^3$ ) ;

$V_v$  : La vitesse moyenne du vent.

S : la surface balayée par la turbine éolienne.

$\rho$  : la masse volumique de l'air.

$V_v$ : la vitesse du vent

$T_t$  : le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

$T_{em}$  : le couple électromagnétique développé par la MSAP.

G : le gain du multiplicateur.

$\Omega_t$  : la vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega$  : la vitesse de rotation à l'entrée de la génératrice

### ***Batterie:***

$C_{bat}$  : La capacité nominale de la batterie [Ah].

$Q_{bat}$  : La quantité de charge [C] manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

$E_0$  : f.e.m de la batterie [V].

$R_s$ : Résistance sériée de la batterie [ $\Omega$ ]

$I_b$ : Courant de batterie [A].

$I_{bréf}$ : Courant de référence [A].

$V_{bat}$ : Tension de la batterie [V].

$E_{bat}$ : Énergie de la batterie [Wh/jour].

$N_j$ : Nombre de jours d'autonomie de la batterie.

$\eta_{bat}$  : Rendement de la batterie.

**D** : Profondeur de la batterie.

$E'_0$  : f.e.m de group des batteries [V].

$C'_0$  : Capacité nominale de group des batteries [Ah].

$R'_s$  : Résistance série de groups des batteries [ $\Omega$ ].

$V_{dc}$ : Tension de bus [V].

$V_{dcréf}$ : Tension de référence [V].

.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---



## I. Introduction générale :

Les énergies renouvelables sont un ensemble des sources naturelles telles que le soleil, du vent, de la chaleur de la terre ou bien extraire d'une source naturelle comme l'hydrogène qui peut produire à partir de reformage du gaz naturel (conversion de molécules à l'aide de réactions chimiques par de la vapeur d'eau surchauffée) avec un rendement d'environ 80 % et peut aussi à partir l'électrolyssions de l'eau. Les énergies renouvelables offrent des nombreux avantages, tel que inépuisables, gratuites et sont compatibles avec certain respect environnemental. Cependant une des propriétés qui limite son utilisation, est due leurs capacités de remplacé de suivi les fluctuations de la charge demandé et leurs faibles autonomies, la solution à retenir est l'assemblage de plusieurs sources d'énergie, afin de constituer les systèmes d'énergies hybrides.

Parmi ces différents moyens de générer de l'électricité, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus utilisée. Elle présente l'avantage de s'intégrer facilement à l'habitat (façades de bâtiments, toits). L'absence de pièces mécaniques mouvantes réduit l'entretien de ces systèmes à un minimum et leur fiabilité (durée de vie d'environ 25 ans) a rapidement favorisé leur utilisation dans différentes applications.

Notre travaille se structure en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons vu les différentes ressources des énergies renouvelables, les Principes de production de l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolien, Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules. (GPV) et défini son rendement et le Facteur de forme. Apres on a motionné l'importances des systèmes hybrides ainsi le système de stockages qui contient la batterie on a aussi étudier les convertisseurs DC-DC (hacheurs séries)

Le second chapitre est consacré quant à lui, à la modélisation statique des différents éléments qui composent notre système notamment la cellules photovoltaïque, l'énergie éolien, la batterie, ainsi que les éléments d'électroniques de puissance convertisseur DC/DC Boost et Buck-Boost utilisés pour ce système,

Le troisième chapitre propose un schéma global de gestion du flux énergétique du système hybride photovoltaïque /éolien/batterie, afin de les appliquer dans un système photovoltaïque où les résultats de simulations sous différents scénarios sont donnés et discutés. Comme il présente l'ensemble des résultats des simulation obtenus au cours de cette étude.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale

---

# CHAPITRE I

## ÉTAT DE L'ART SUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLE & LES SYSTEME HYBRIDES

---



## **I.1 Introduction**

Le secteur des énergies renouvelables a enregistré une croissance remarquable ces dernières années et a connu un grand succès grâce aux progrès technologiques et à la prise de conscience mondiale de l'abandon des sources fossiles, nous concentrons dans ce chapitre, sur les sources les plus importantes d'énergies renouvelables et qui constituent vraiment une solution alternative pour répondre aux besoins de la société.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les Systèmes d'Énergie Hybrides Pour les régions isolées ou éloignées, ce terme fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. [1]

Dans le présent chapitre, nous allons présenter les différentes ressources des énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque. Cette dernière est la source d'énergie principale pour notre centrale étudiée. Ensuite, nous allons entamer le principe du fonctionnement du système d'énergie hybride, en introduisant l'architecture du système hybride proposée pour notre étude.

## **I.2 Les énergies renouvelables**

### **I.2.1 Définition**

L'énergie renouvelable est une énergie dérivée de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à ce qui est consommé. La lumière du soleil et le vent, par exemple, sont des sources constamment renouvelées. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont tout autour de nous. Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

### **I.2.2 Différentes ressources des énergies renouvelables**

Il y a principalement six sources d'énergie :

- Énergie photovoltaïque
- Solaire
- Éolienne
- La géothermie
- Biomasse
- Hydraulique

#### **I.2.2.1 Énergie Photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la

---

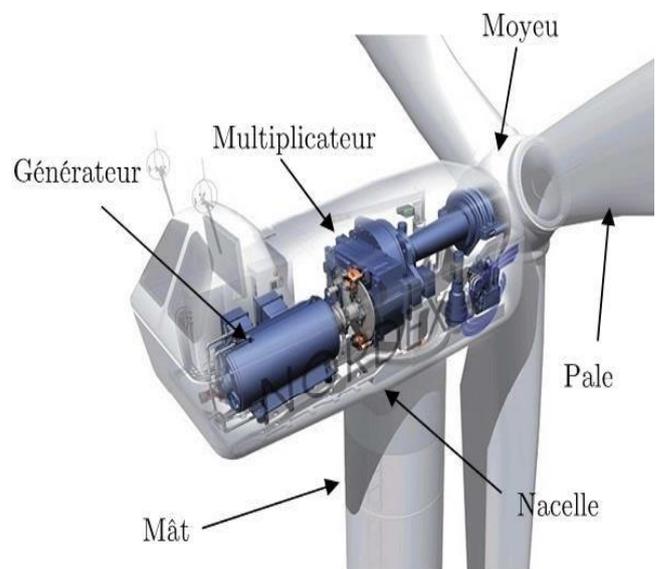
filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.[3].



**Figure I.1:** Principe de l'énergie photovoltaïque [19]

### I.2.2.3 Éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [14].



**Figure I.2 :** Principe de l'énergie éolienne [15]

Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.[15]

### I.3 Principe de production de l'énergie photovoltaïque et éolienne

#### I.3.1 l'énergie photovoltaïque

##### I.3.1.1 Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire est un dispositif semi-conducteur photosensible fabriqué en couches minces. Lorsque les radiations électromagnétiques solaires sont incidentes sur elle, de l'électricité est produite par effet photovoltaïque. Lorsque la cellule PV est exposée au soleil, des porteurs de charge sont produits qui créent un courant électrique si le circuit est fermé. Des charges sont générées lorsque l'énergie incidente du photon est suffisante (ayant une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite de l'électron) pour déplacer l'électron covalent du semi-conducteur. De ce fait, un champ électrique interne est créé. Ce champ électrique interne entraîne la séparation des porteurs de charge de charge opposée. Le mouvement de ces porteurs de charge crée un courant, appelé photo courante. Une cellule PV présente essentiellement des caractéristiques non linéaires, car on peut l'imaginer comme une combinaison d'une source de courant en parallèle avec une diode idéale [11].

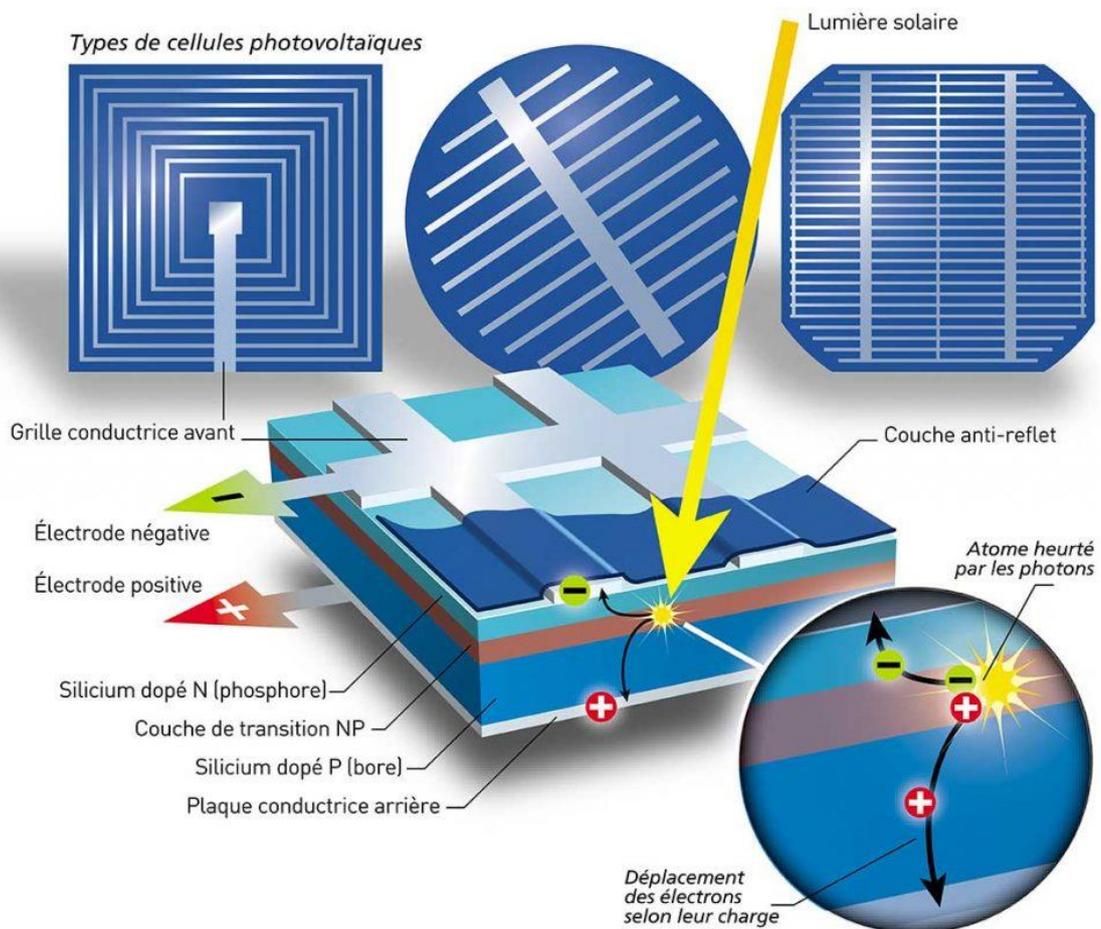
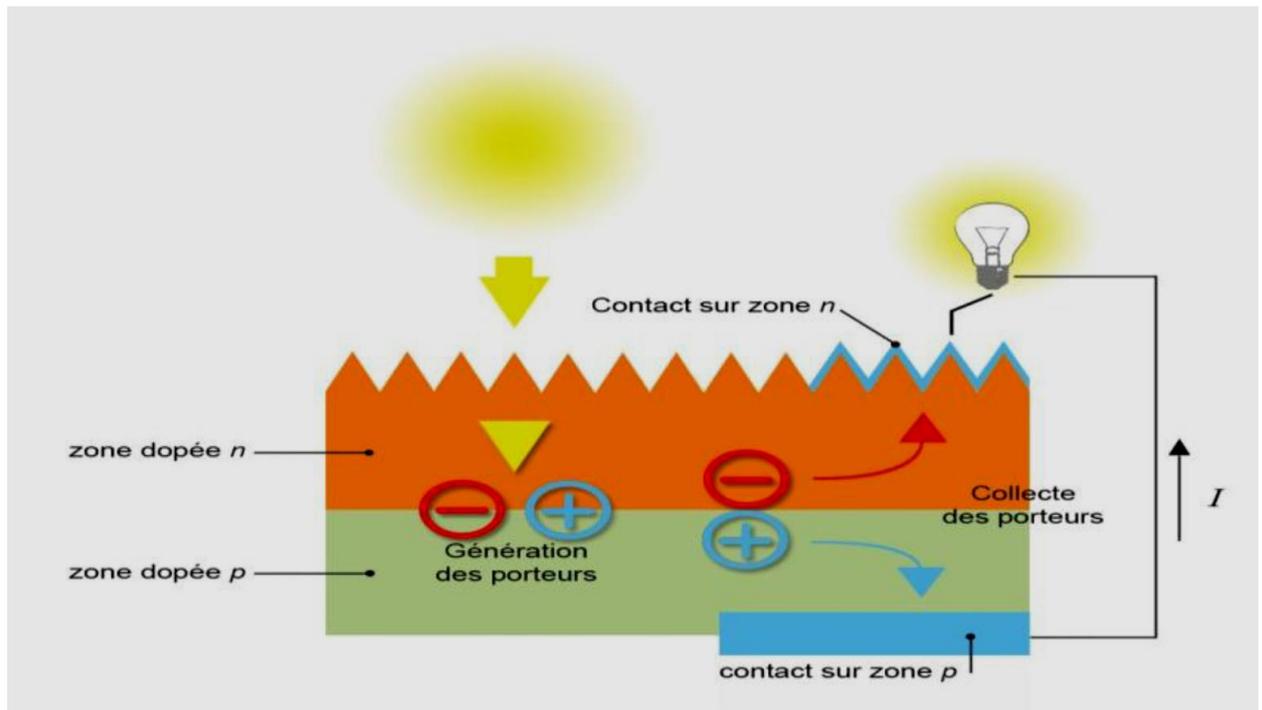


Figure I.3: cellule photovoltaïque [11]

### I.3.1.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner [12].



**Figure I.4 :** Principe de fonctionnement d'un cellule PV [12]

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. [13]. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface.

### I.3.1.3 Association des cellules photovoltaïque

Dans le cas d'une association en série, les cellules délivrent le même courant mais elles peuvent fonctionner avec des tensions différentes. Si on assemble en parallèle  $m$  cellules, le courant aux bornes de l'assemblage est égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

#### a) Association en série

Une association des cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

Ce système d'association est généralement le plus utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.[16]

#### b) Association en parallèle

Une association parallèle des cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [16]

#### c) Association mixte (en série et en parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $ns$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $np$  parallèlement à l'axe des courants,  $ns$  et  $np$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

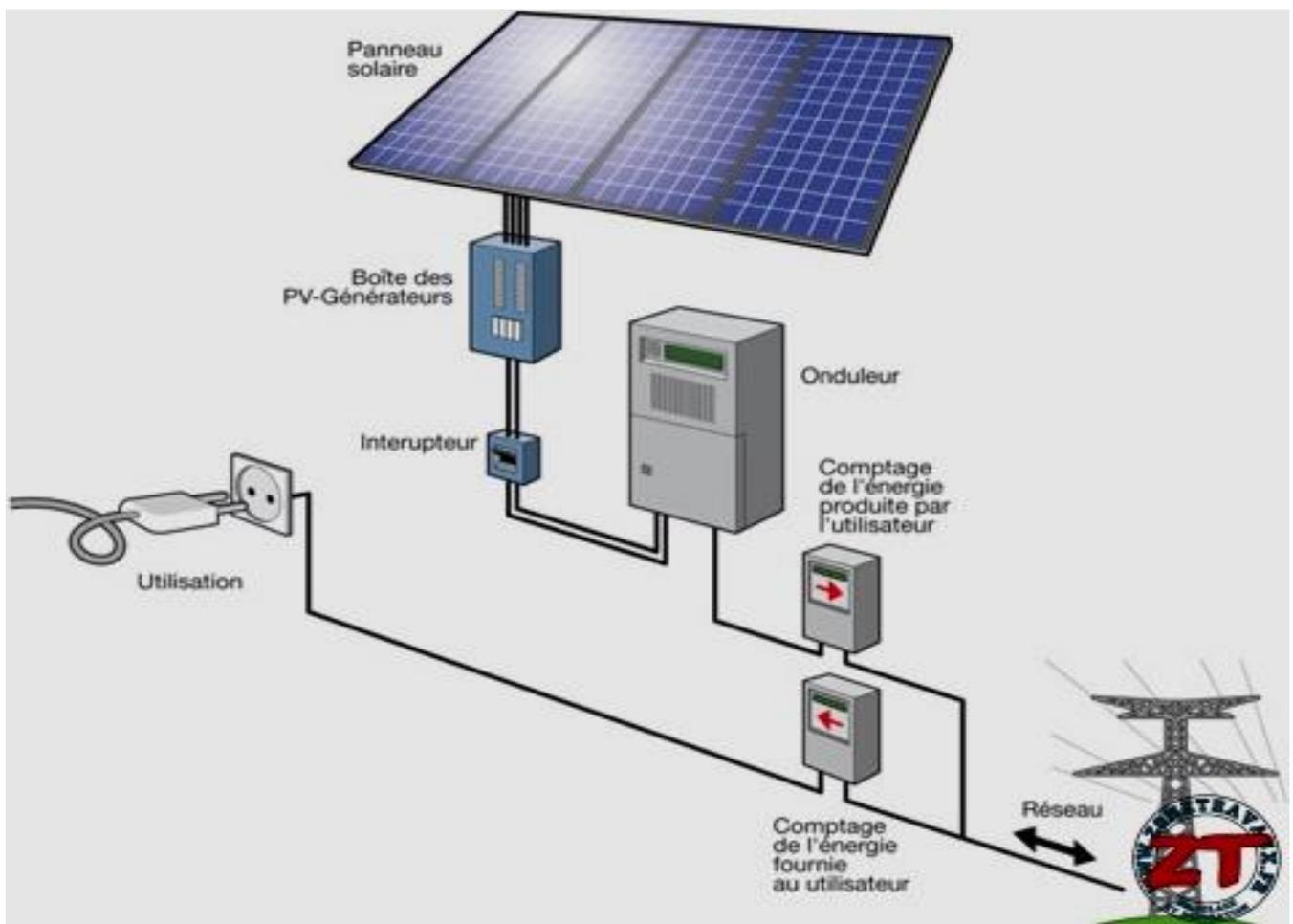
### I.3.1.4 Les modules photovoltaïques

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings. L'association des modules permet :

- ❖ D'obtenir une tension suffisante.
- ❖ De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité...).
- ❖ De protéger mécaniquement les cellules (chocs...). [16]

### I.3.1.5 Générateur Photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [17]

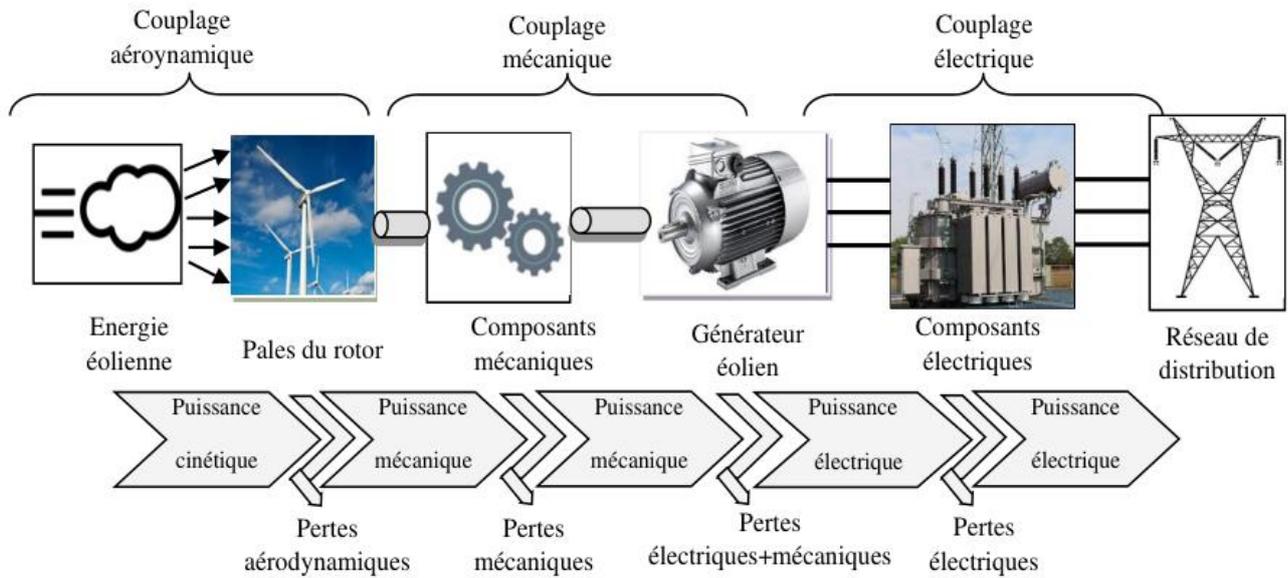


**Figure I.5:** Générateur photovoltaïque. [20]

### I.3.2 l'énergie éolien

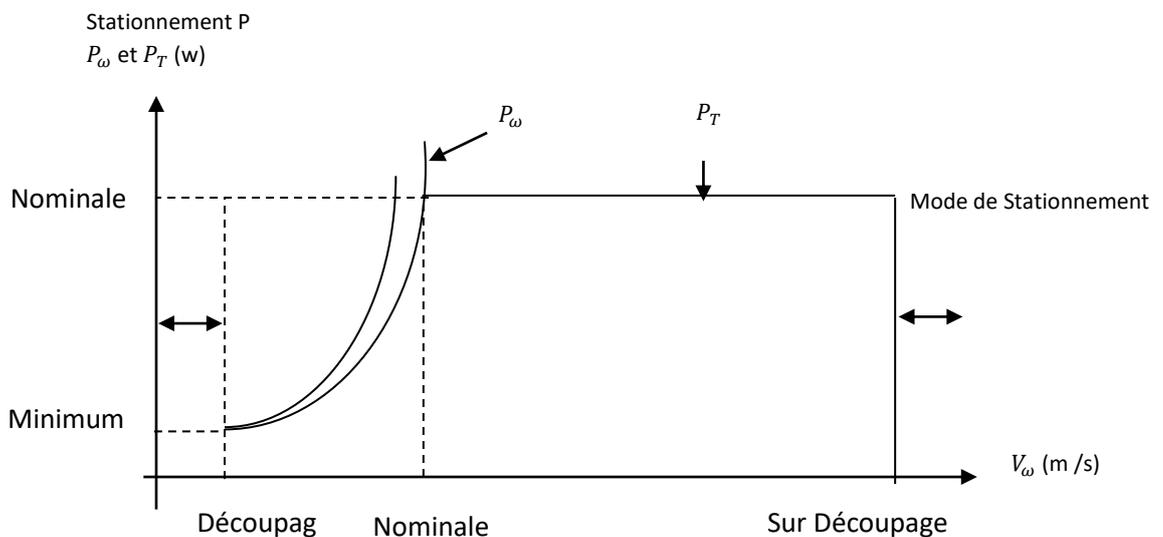
#### I.3.2.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne :

Comme l'illustre la figure (I.6) [11], les éoliennes convertissent une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette section traite le concept de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [12,13]. L'énergie cinétique est d'abord convertie en énergie mécanique par les pales du rotor.



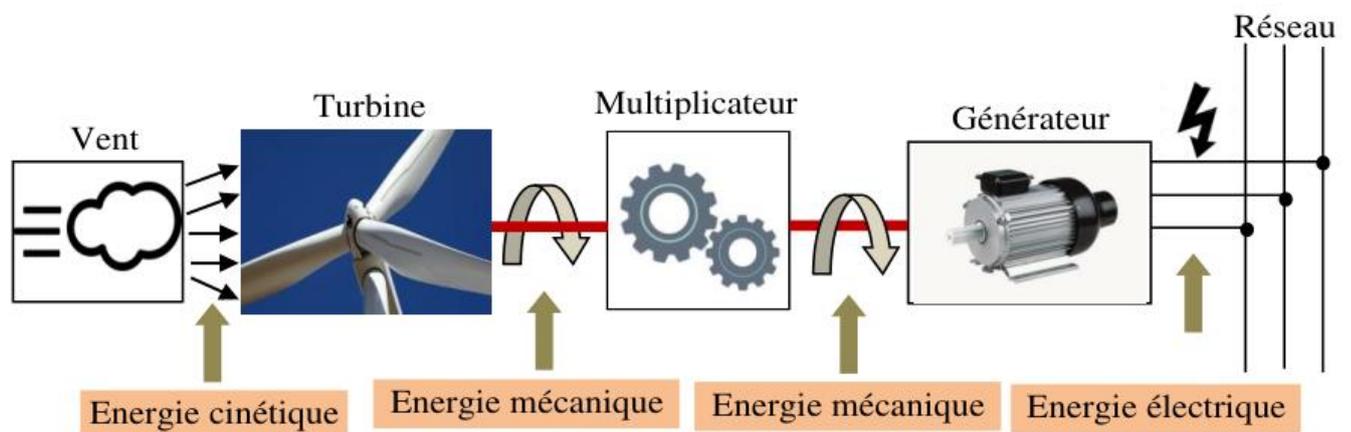
**Figure I.6:** Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Les courbes de la puissance cinétique du vent  $P_\omega$  et de la puissance mécanique de l'éolienne  $P_t$ , par rapport à la vitesse du vent  $V_\omega$ , sont tracées sur la figure (I.7). La valeur de  $P_t$  est toujours inférieure à la valeur  $P_\omega$  en raison des pertes de puissance aérodynamique. Les valeurs typiques de la vitesse du vent de coupure, nominale se situent dans la plage de 3 à 5 m/s, 10 à 15 m/s et 25 à 30 m/s, respectivement. Les éoliennes produisent une puissance négligeable lorsque la vitesse du vent est inférieure à la valeur de déclenchement ; ainsi, ces turbines sont généralement maintenues en mode parking.

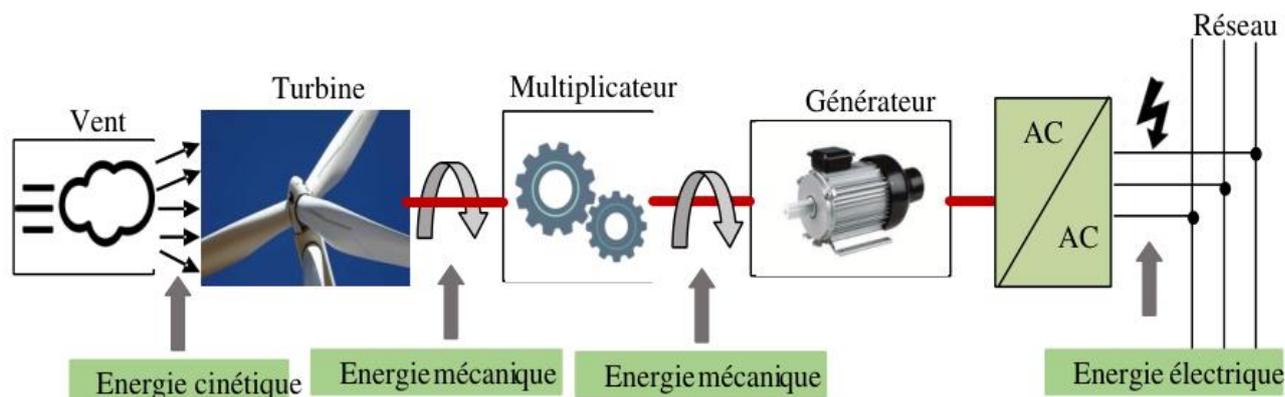


**Figure I.7 :** Courbes de caractéristiques des puissances avec le respect de vitesse de la turbine.

Pour assurer la sécurité, la turbine est arrêtée et maintenue en mode parking lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur de coupure ou en cas d'urgence. Pour les valeurs de vitesse du vent entre le seuil et la valeur nominale, la courbe  $P_t$  maintient une relation cubique par rapport à  $V_w$ . Lorsque la vitesse du vent se situe entre la valeur nominale et la valeur de coupure, la puissance de sortie de la turbine  $P_t$  est réglée à sa valeur de seuil (nominale) la plus élevée par la commande de puissance aérodynamique. La vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur pour accélérer la vitesse lente des pales. Le générateur peut être lié directement ou indirectement au réseau électrique. S'il est lié directement (figure (I.8)), le générateur tourne à vitesse fixe ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone. On mentionne que dans ce cas l'utilisation de la machine synchrone est impossible, car la vitesse de rotation du rotor doit être un multiple de fréquence des courants [12,13,14]. Si le générateur est lié indirectement au réseau (figure (I.9)), il faut rajouter une interface d'électronique de puissance pour ajuster la fréquence des courants imposée par le réseau à celle de générateur et justifier le fonctionnement à vitesse variable.



**Figure I.8 :** Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec liaison directe au réseau.



**Figure I.9:** Chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec liaison indirecte au réseau.

#### I.4 Avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne :

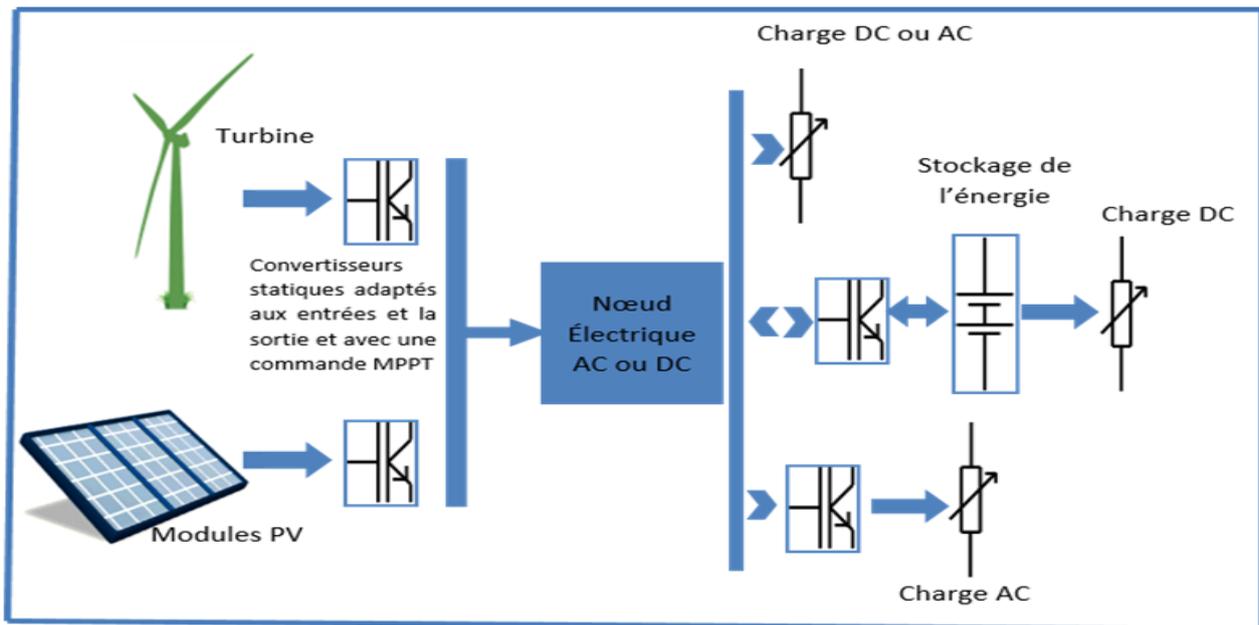
Technologies	Avantages	Inconvénients
<b>Solaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Les panneaux solaires nécessitent très peu d'entretien et réduisent considérablement la facture domestique d'électricité.</li> <li>✚ Ils sont simples et rapides à installer</li> <li>✚ Le système est silencieux et sans danger pour la santé ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Les coûts de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés</li> <li>✚ Il Est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement</li> <li>✚ Le rendement énergétique est plutôt faible</li> </ul>
<b>Eolienne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne génère aucun gaz à effet de serre et ne produit pratiquement aucun déchet</li> <li>✚ Les frais de fonctionnement sont limités et les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme</li> <li>✚ La ressource principale (le vent) est à 100% renouvelable et son exploitation comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières</li> <li>✚ Impossibilité d'emmagasiner la source (le vent)</li> <li>✚ La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie</li> <li>✚ Des dispositifs externes de stabilisation sont en général nécessaires.</li> </ul>

**Tableau I.1** avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne.

## I.5 Système hybride

### I.5.1 Définition

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, qui sont les plus utilisés parmi les différents types des technologies des ressources renouvelables, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue.



**Figure I.10:** Structure d'un système hybride. [22]

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer des convertisseurs, des charges et des éléments de stockage [21]

### I.5.2 Importance de l'hybridation

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable [23]. Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie sont influencés en partie par sa conception (dimensionnement des composants, types de composants, architecture) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Classification des systèmes d'énergie hybrides Régime de fonctionnement Contenu du système Isolé En parallèle avec le réseau Avec ou sans source convent. Avec ou sans stockage PV, Eolien, hydraulique etc. La puissance délivrée par les SEH peut varier

de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte combinant bus à courant alternatif (CA) et bus à courant continu (CC) avec des batteries de stockage est très répandue [L. Satayanov]. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries de stockage pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient des générateurs diesel. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (< 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Les systèmes plus grands (puissance > 100 kW) sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés. Dans les SEH, les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesel sont souvent utilisés. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice ou l'énergie contenue dans l'hydrogène ; ces systèmes comportent aussi des convertisseurs, des charges et une forme de gestion de l'énergie. Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie [21]

### I.5.3 Avantages et inconvénients d'un système hybride [21]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Ne repose pas sur une seule source d'énergie.</li> <li>❖ Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision.</li> <li>❖ Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé.</li> <li>❖ Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation</li> </ul>

**Tableau I.2 :** Avantages et inconvénients d'un système hybride. [21]

### I.5.4 Classification des systèmes d'énergie hybride [21]

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

#### I.5.4.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent

répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

#### I.5.4.2 La structure du système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

- ❖ La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc.
- ❖ La présence ou non de dispositifs de stockage. La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.
- ❖ La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.

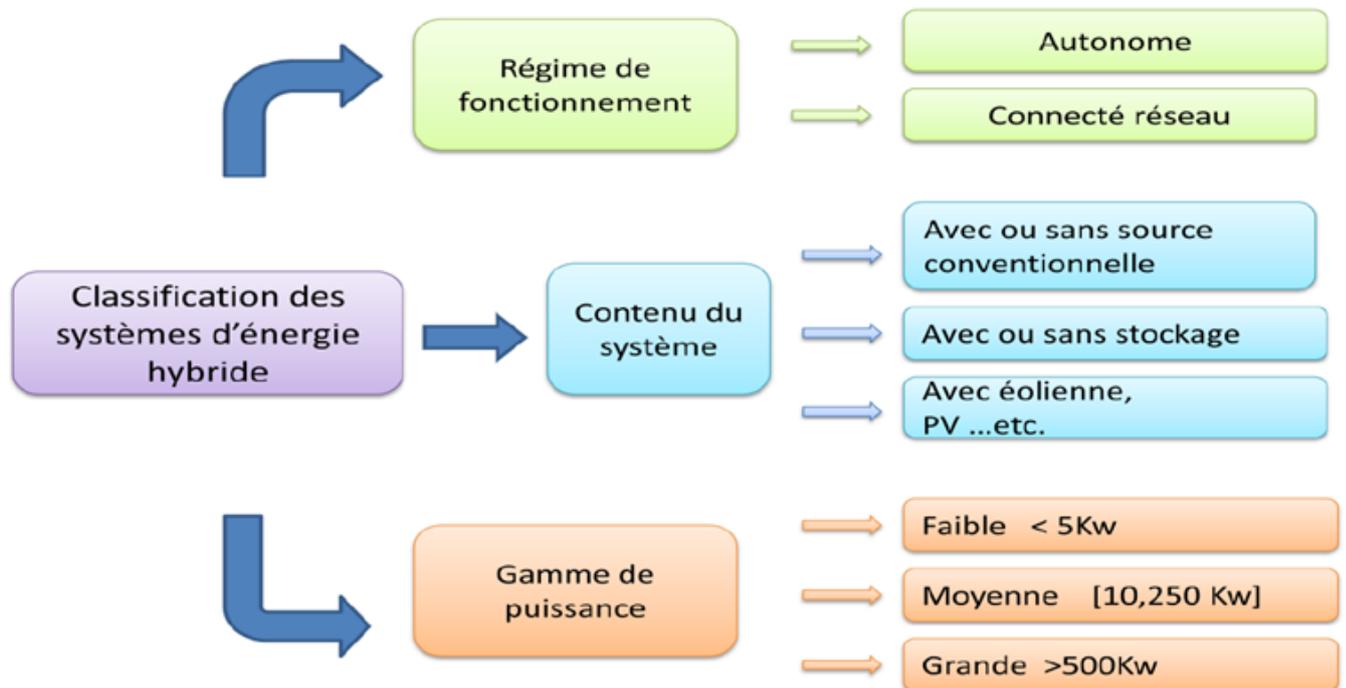


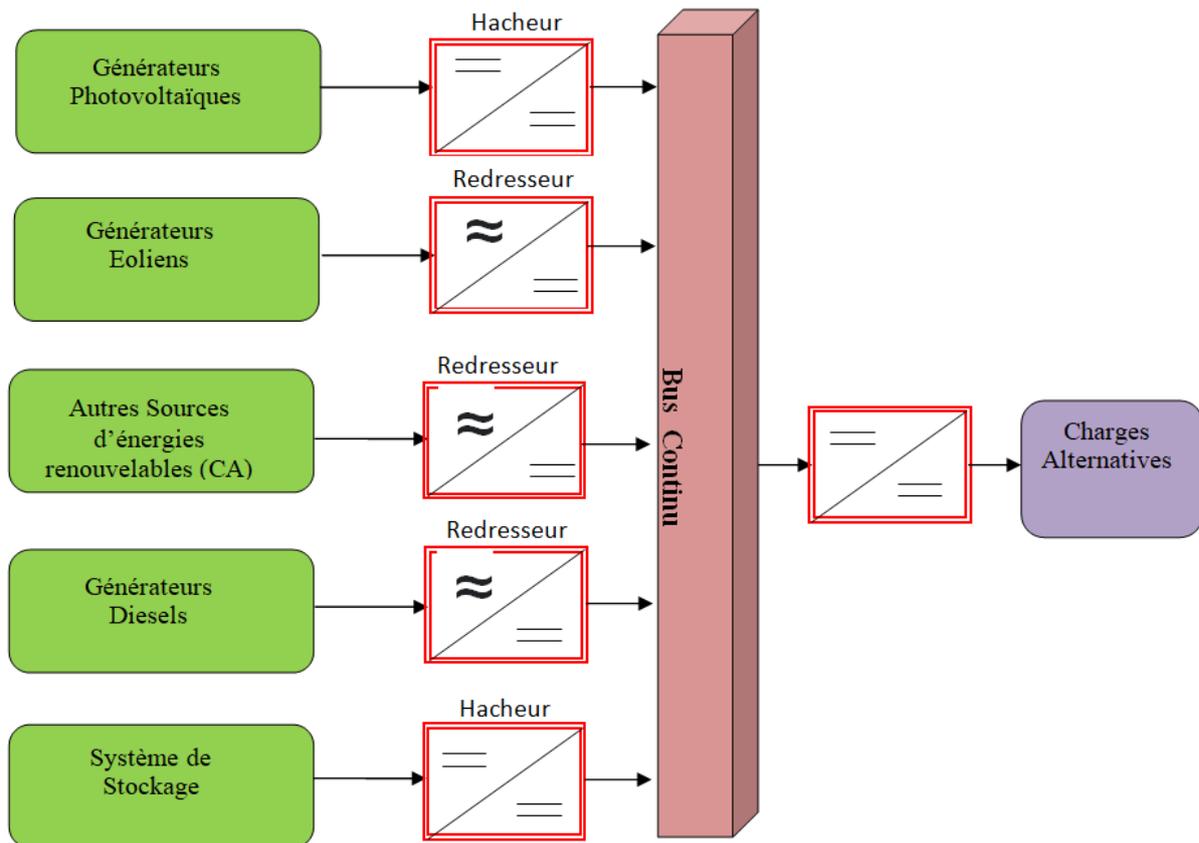
Figure I.11: classification du système hybride.[21]

#### I.5.5 Configuration des systèmes hybrides

Il y a deux configurations dans Les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés

### I.5.5.1 Architecture à bus continu [1]

Dans le système hybride présenté dans la figure I.12, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu



**Figure I.12:** configuration du système hybride à bus continu. [21]

#### Avantages

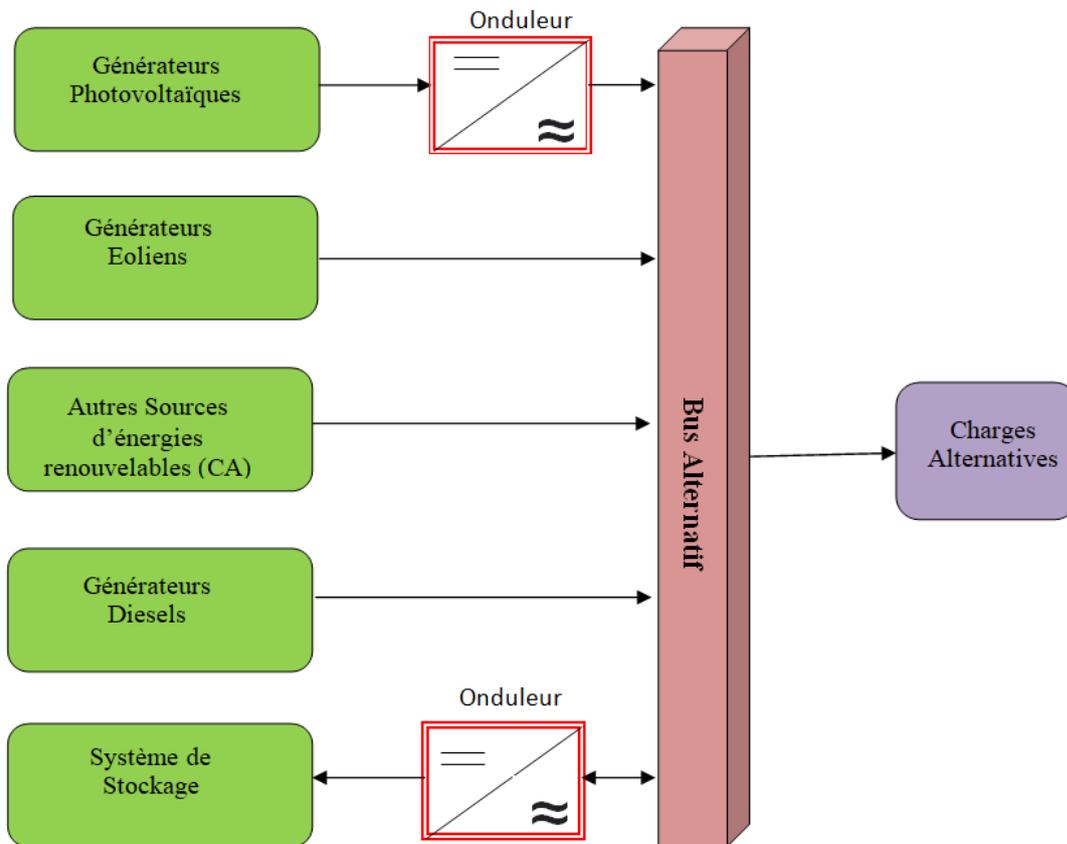
- ❖ La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- ❖ Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

#### Inconvénients

- ❖ Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- ❖ Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

### I.5.5.2 Architecture à bus alternatif [21]

Dans cette topologie, tous les composants du système hybrides sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.13). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs, Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge



**Figure I.13:** configuration du système hybride à bus Alternatif. [21]

#### a) Avantages :

- ❖ Un rendement global plus élevé que celui en bus CC.
- ❖ Une taille réduite de l'unité de conditionnement d'énergie.
- ❖ Un niveau élevé de disponibilité énergétique.
- ❖ Un fonctionnement optimal du générateur diesel grâce à la réduction de son temps de fonctionnement et, par conséquent, de son coût de maintenance

**b) Inconvénients [21]**

- ❖ Cette configuration nécessite un dispositif de synchronisation entre les différentes sources.
- ❖ La synchronisation entre les différentes sources exige une tension de même fréquence, amplitude et déphasage.
- ❖ Vieillesse prématurée des batteries en raison d'une forte sollicitation

**I.5.6 Critères d'optimisation du système hybride**

Différents critères sont utilisés pour optimiser le système en fonction du site d'installation. Les critères les plus fréquemment utilisés sont [21] :

**✚ La probabilité de perte de la charge**

(lost of load probability) ou la probabilité de perte d'approvisionnement (loss of power supply probability). Ces deux critères sont univoques et rendent compte du rapport de l'énergie non satisfaite et de l'énergie totale consommée sur la période d'étude choisie. En général, le calcul de ce paramètre est réalisé en utilisant l'équation (I.1)

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^m (E_{load,i} - E_{prod,i})}{\sum_{i=1}^m E_{load,i}} \quad (I.1)$$

Où  $E_{load,i}$  est l'énergie demandée par le consommateur pour la période  $i$ ,  $E_{prod,i}$  est l'énergie produite, et  $m$  est le nombre de périodes pour lesquelles la recherche est réalisée [21].

**✚ Le coût d'énergie produite**

Diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride) etc. [21]

**I.5.7 Différents structures de systèmes hybrides****I.5.7.1 Systèmes hybrides avec source conventionnelle****I.5.7.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle**

Ce type de système hybride est le plus couramment utilisé dans les climats chauds comme l'Algérie, les Maldives et l'Arabie Saoudite. Car le potentiel de l'énergie solaire est énorme. Lorsqu'ils fonctionnent en mode autonome, ces systèmes ont pour but de fournir une alimentation électrique ininterrompue aux habitations, aux bâtiments résidentiels ou administratifs ou aux villages.

D'autres systèmes alimentent des centres de recherche également connectés au réseau. Les systèmes autonomes contiennent généralement des batteries, mais aussi d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et les panneaux photovoltaïques génèrent du courant continu. Les moteurs diesel, en revanche, peuvent entraîner des générateurs à courant continu ou à courant alternatif. Dans la plupart des cas, le consommateur a besoin de courant alternatif ; ensuite, différentes configurations de système peuvent être distinguées en fonction du type de moteur électrique connecté au moteur diesel. Ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques en plusieurs configurations chaque une à des avantages et des inconvénients [21]

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure (I.14). Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie [32] [33]

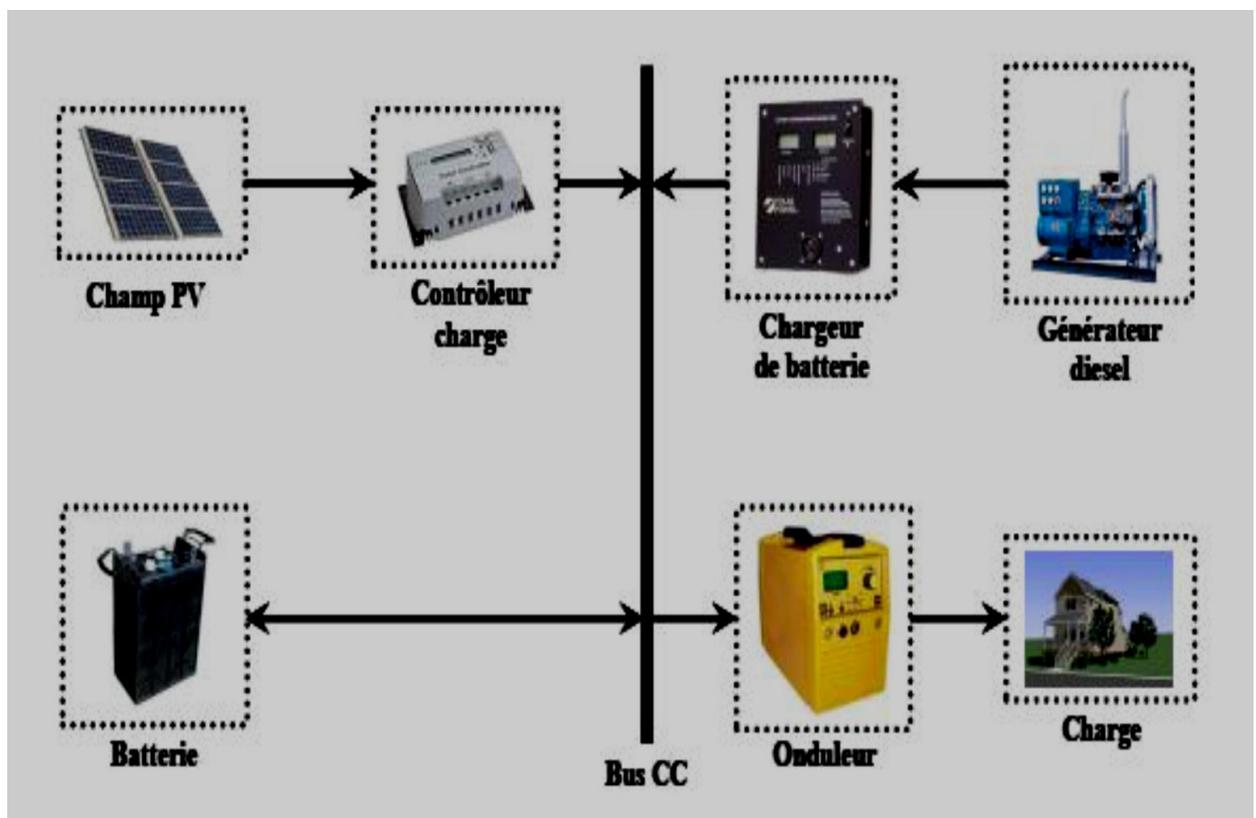
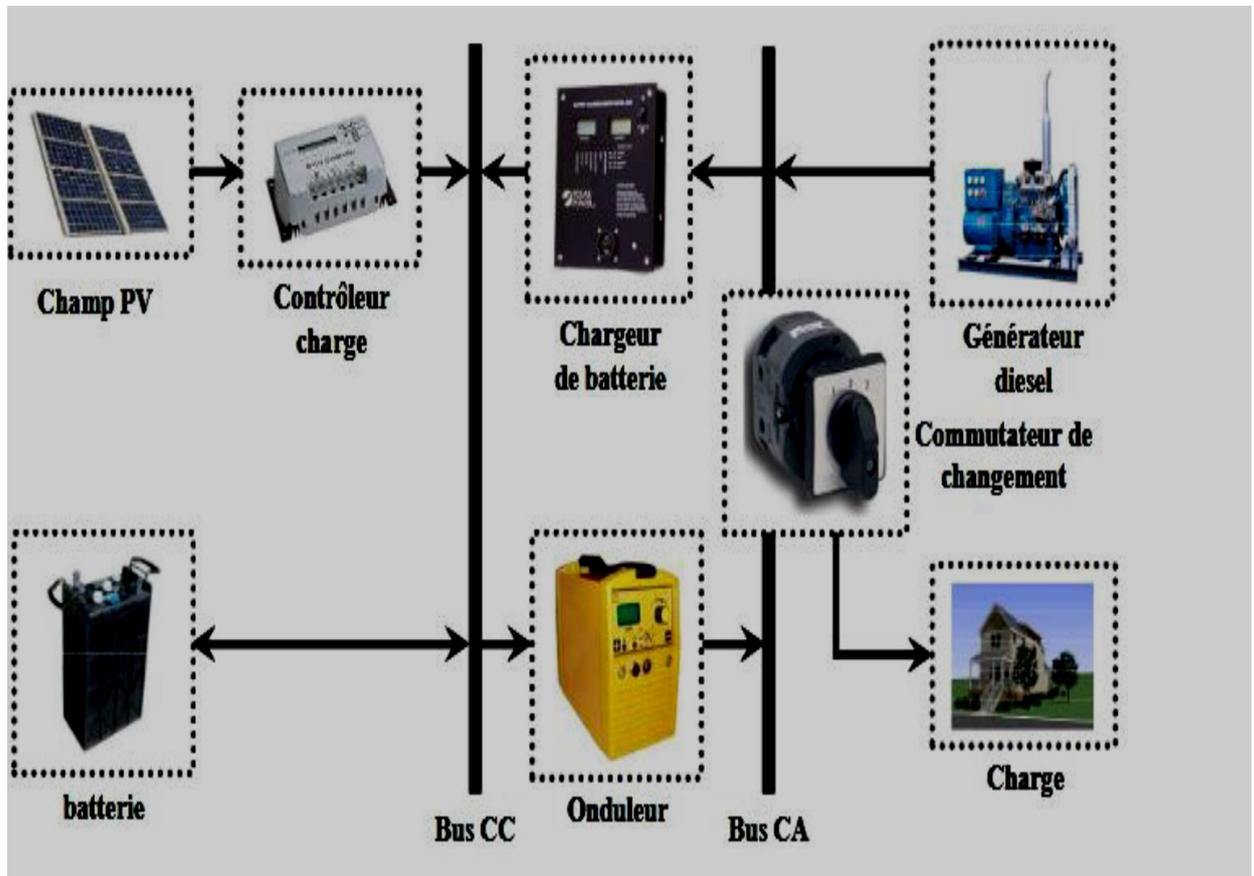


Figure I.14: système hybride avec connexion série.[21]

Deuxième configuration connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus – de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.



**Figure I.15:** Système hybride avec connexion parallèle. [21]

Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure (15) [21]

### I.5.7.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées trois configurations de système hybride avec ou sans stockage [21]

### I.5.7.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons soit des villages. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation. Le stockage est parfois idéal, un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et super condensateur.

L'utilisation de super condensateurs est de conception très récente et sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent.[21]

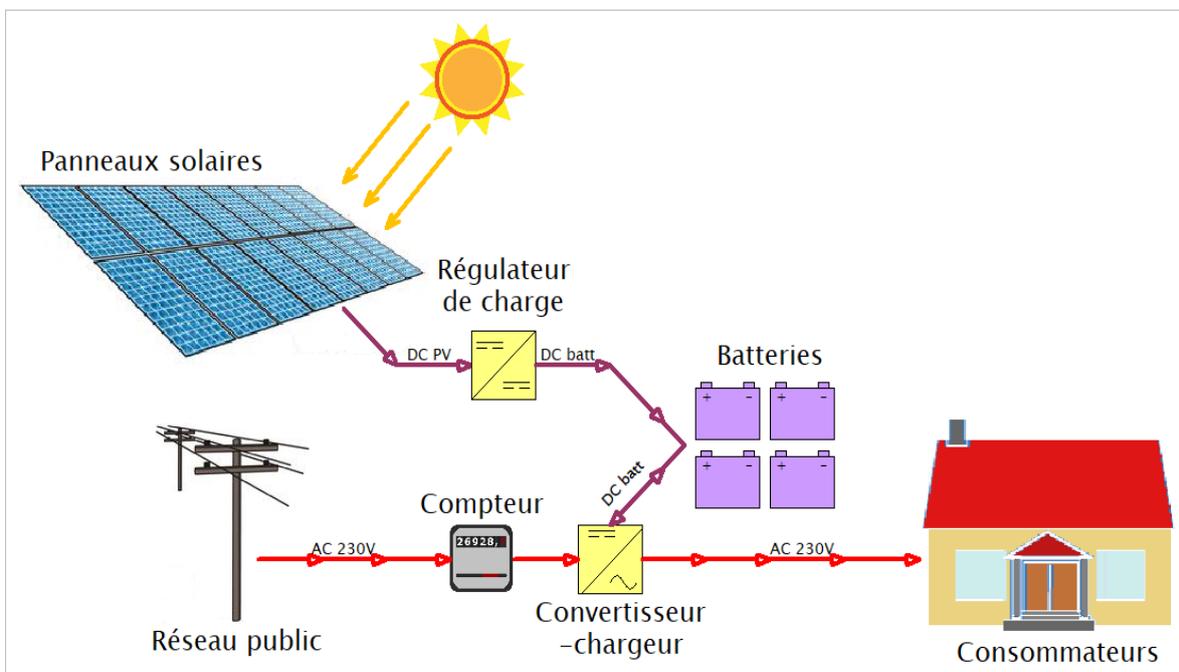


Figure I.16: Système hybride photovoltaïque/stockage. [22]

## I.6 Systèmes de stockage

Pour les systèmes autonomes utilisant une source renouvelable comme seul apport d'énergie, la présence du stockage est indispensable pour pallier l'intermittence de la production d'électricité. Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à confiner, telle l'énergie chimique, l'énergie mécanique, l'air comprimé ou le stockage à base d'hydrogène par exemple. Seuls le stockage électromagnétique

(supraconducteurs) et le stockage électrostatique (supera condensateurs) stockent l'électricité sous forme de charges électriques [21].

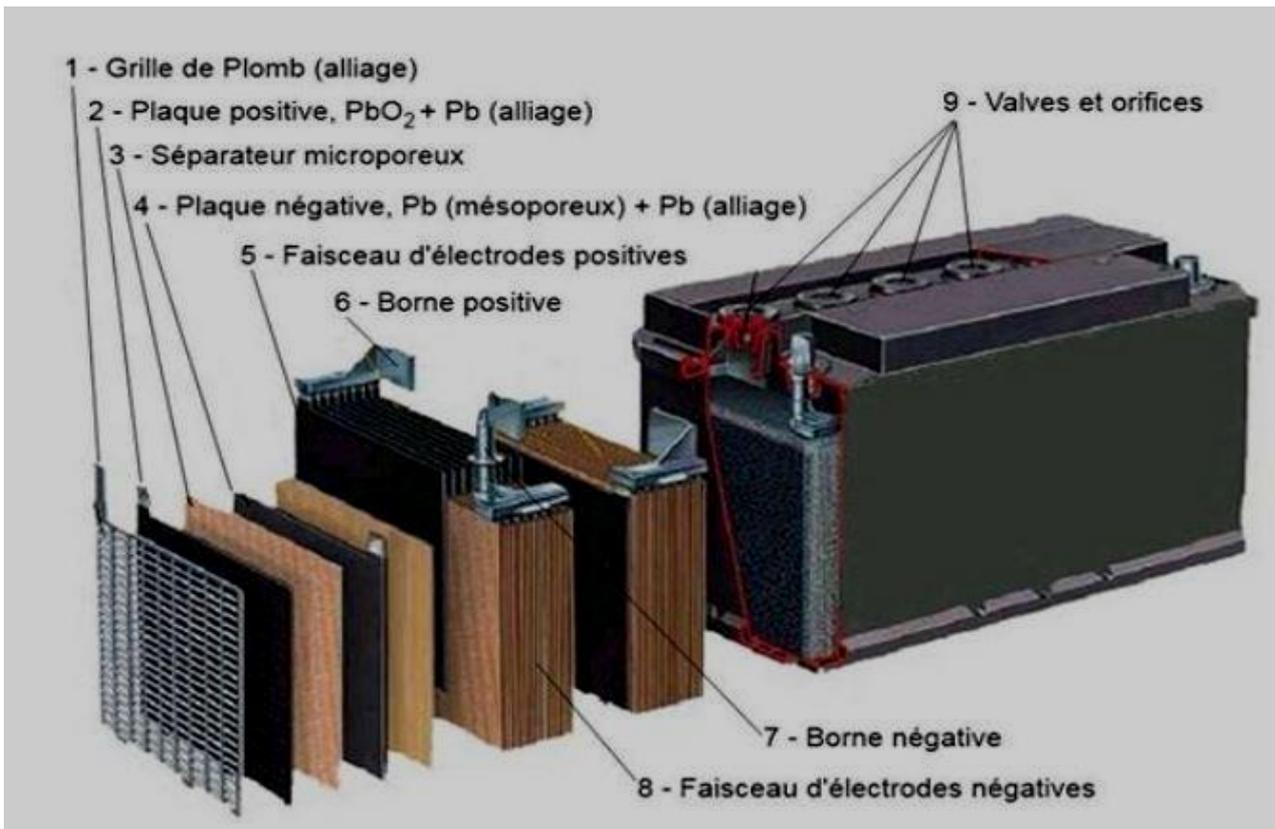
Le tableau I.3 regroupe les principales caractéristiques des différentes technologies de stockage de l'énergie électrique.

Technologie De stockage	Inductances Supra-conductrices	Super condensateurs	Volants d'inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène (via PAC)	Batteries électrochimiques
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	Mécanique	Mécanique	Carburant	Chimique
Densité énergétique	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg à 200 bars	300 à 600 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg
Capacité	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh	Qlqs kWh à qlqsMWh	Qlqs kWh
Rendement	>90%	80% a >90%	80% a >90%	30 a 50%	30 a 50%	70 a 80%
Constante de temps	Qlqsscds à 1min	Qlqsscds à 1min	Qlqsmins A 1 hrs	1 hr à qlqs Jours	1 hr à qlqs jours	10 min(Cd) à 10 hrs (Pb)

**Tableau I.3** : Caractéristiques des différentes technologies de stockage[21]

### I.6.1 Les Batteries

La batterie est souvent intégrée aux générateurs photovoltaïques, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit ou les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée.



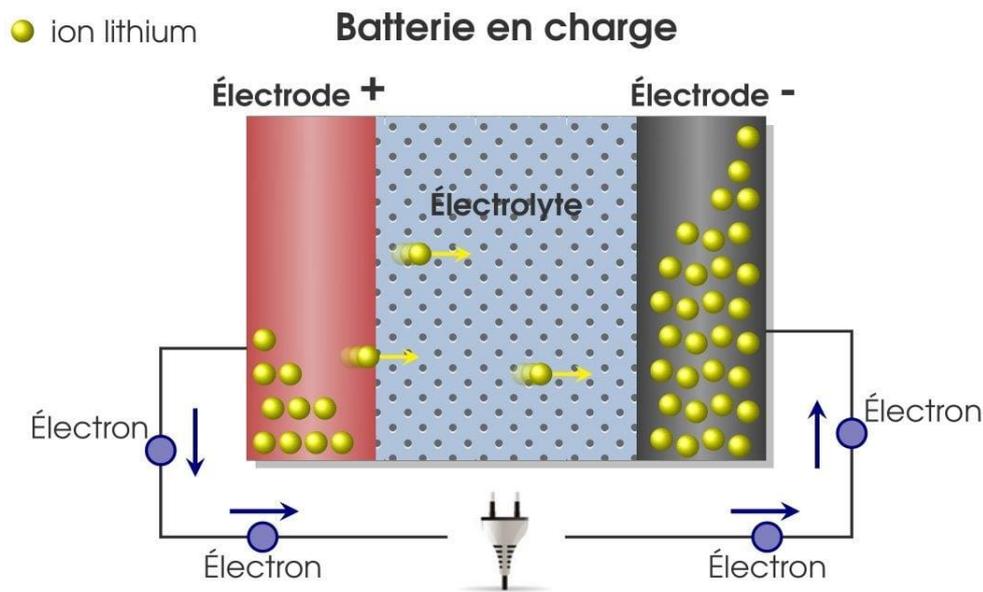
**Figure I.17:** Composants d'une batterie [15,16].

### I.6.1.1 Principe de fonctionnement d'une batterie

Les accumulateurs sont constitués de deux électrodes, l'une positive (la cathode) et l'autre négative (l'anode) séparée par un électrolyte (figure I.18). Aux deux interfaces interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes.

- ❖ À l'anode, (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la Relation suivante :  $M_1 \rightarrow M_1^{n^+} + ne^-$ , de potentiel redox  $E_1$ ,  $M_1$  étant l'espèce active de l'anode.
- ❖ Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon :  

$$M_2^{n^+} + 2e^- \rightarrow M_2$$
, de potentiel redox  $E_2$ ,  $M_2$  étant l'espèce active de la cathode.
- ❖ L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :  $M_1 + M_2^{n^+} \rightarrow M_1^{n^+} + M_2$ .
- ❖ Le transport engendre une force électromotrice  $E = E_2 - E_1$



**Figure I.18:** Principe d'un accumulateur électrochimique. [21]

### I.6.1.2 Types des batteries

Il existe plusieurs types de stockage actuellement. Mais le seul stockage d'énergie électrique possible dans le système PV est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés sont :

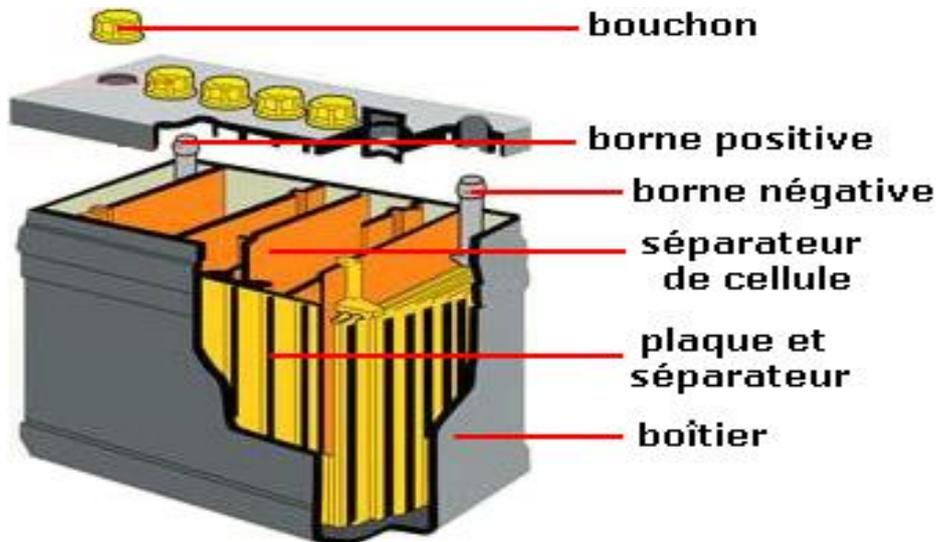
#### a) Batteries plomb-acide

Une batterie plomb-acide consiste en une électrode négative en plomb spongieux ou poreux. Le plomb est poreux pour faciliter la formation et la dissolution du plomb. L'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb. Les deux électrodes sont immergées dans une solution électrolytique d'acide sulfurique et d'eau. Dans le cas où les électrodes entrent en contact l'une avec l'autre par le mouvement physique de la batterie ou par des changements d'épaisseur des électrodes, une membrane électriquement isolante mais chimiquement perméable sépare les deux électrodes. Cette membrane empêche également les courts-circuits électriques à travers l'électrolyte. Les batteries au plomb stockent de l'énergie par la réaction chimique réversible illustrée ci-dessous. La réaction chimique globale est:



Les batteries au plomb sont le type de batterie le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Bien que les batteries au plomb aient une faible densité d'énergie, une efficacité modérée et des exigences de maintenance élevées, elles ont également une longue durée de vie et des coûts faibles par rapport aux autres types de batteries. L'un des avantages singuliers des batteries au plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus singuliers des batteries au

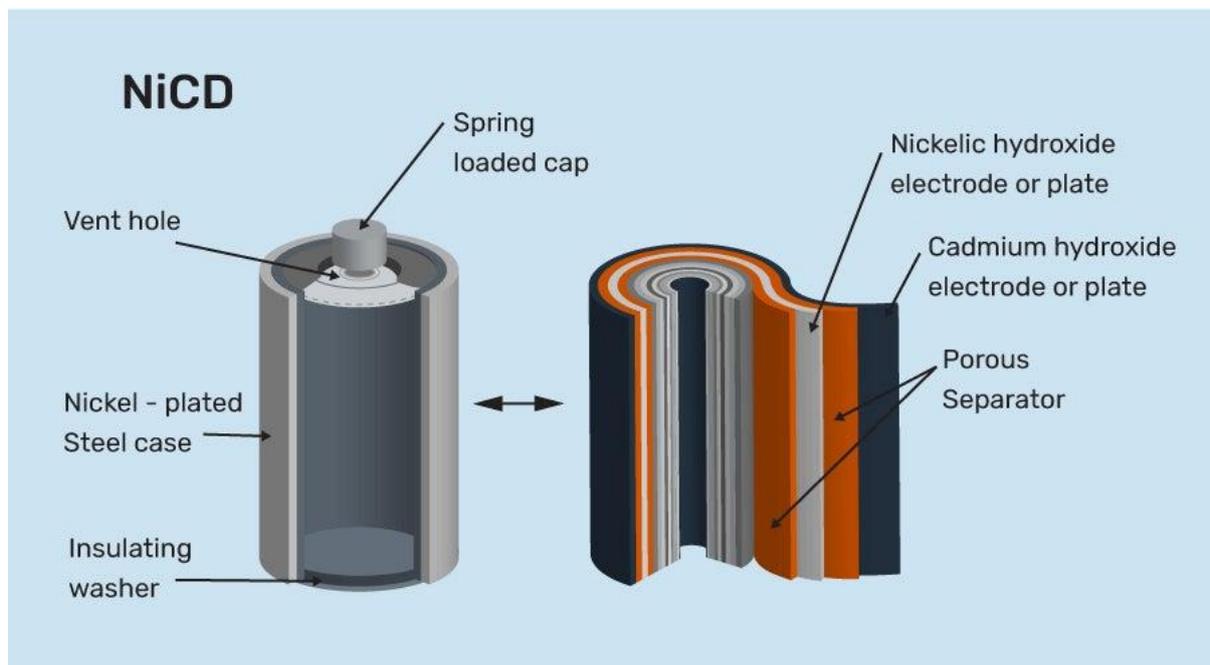
plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus couramment utilisée pour la plupart des applications de batteries rechargeables (par exemple, pour démarrer des moteurs de voiture) et qu'elles disposent donc d'une base technologique bien établie et mature [21]



**FigureI.19:** Batteries plomb-acide [21]

#### b) Batteries Nickel-Cadmium

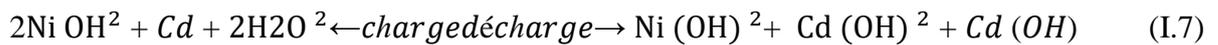
Cette batterie utilise de l'oxyde de nickel dans son électrode positive (cathode), un composé de cadmium dans son électrode négative (anode) et une solution d'hydroxyde de potassium comme électrolyte. La batterie au nickel-cadmium est rechargeable, elle peut donc fonctionner à plusieurs reprises. Une batterie au nickel-cadmium convertit l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge et reconvertit l'énergie électrique en énergie chimique lors de la recharge.



**FigureI.20:** Batteries Nickel-Cadmium[21]

Dans une batterie *NiCd* complètement déchargée, la cathode contient de l'hydroxyde de nickel  $[\text{Ni}(\text{OH})^2]$  et de l'hydroxyde de cadmium  $[\text{Cd}(\text{OH})^2]$  dans l'anode.

Lorsque la batterie est chargée, la composition chimique de la cathode est transformée et l'hydroxyde de nickel se transforme en Oxhydroxyde de nickel  $[\text{NiOOH}]$ . Dans l'anode, l'hydroxyde de cadmium est transformé en cadmium. Lorsque la batterie est déchargée, le processus est inversé, comme indiqué dans la formule suivante [50]:



## I.7 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs devenus des composantes essentielles dans de nombreuses applications industrielles et militaires au cours des dernières décennies. Grâce à leurs rendements de plus en plus élevés leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et couts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.[21]

### I.7.1 Types de convertisseurs statiques [23]

On distingue deux types de convertisseurs :

#### a) Les convertisseurs continus alternatif (onduleurs)

Les convertisseurs DC/AC sont utilisés pour une conversion de la tension continue fournie par le GPV en une tension alternative et parfois ils peuvent avoir, en plus, la fonction d'adaptation de la charge pour une utilisation rationnelle de la puissance fournie par le GPV.

#### b) Les convertisseurs continu – continu (appelés hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs.

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour une exploitation rationnelle (maximale) de la puissance fournie par le générateur PV et parfois pour l'adaptation de la tension continue du générateur à la charge.

### I.7.2 Les familles de hacheurs

On distingue trois familles de hacheurs : [21]

- ❖ Hacheur série ou abaisseur (ou Buck),
- ❖ Hacheur parallèle ou élévateur (ou Boost),
- ❖ Hacheur série-parallèle ou abaisseur-élévateur (Buck–Boost)

### I.7.2.1 Convertisseur Buck

L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. 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). [63]

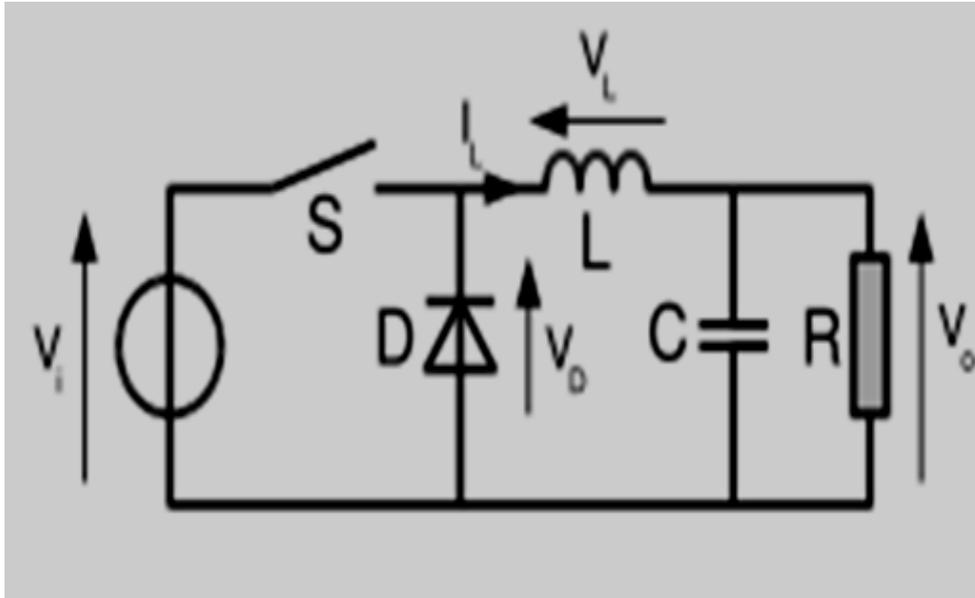


Figure I.21: Schéma du convertisseur Buck [21]

C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée. La structure du convertisseur abaisseur est présentée sur la figure (I.21).

### I.7.2.2 Convertisseur boost

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge sortie est de type tension continu l'interrupteur 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) [64]

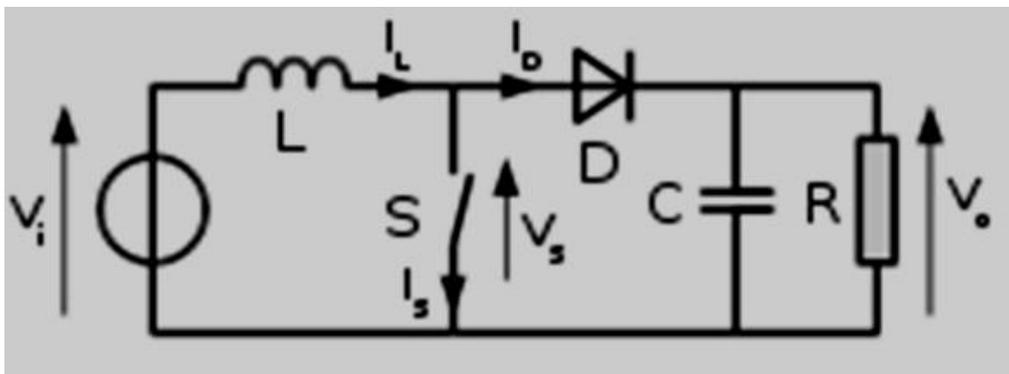
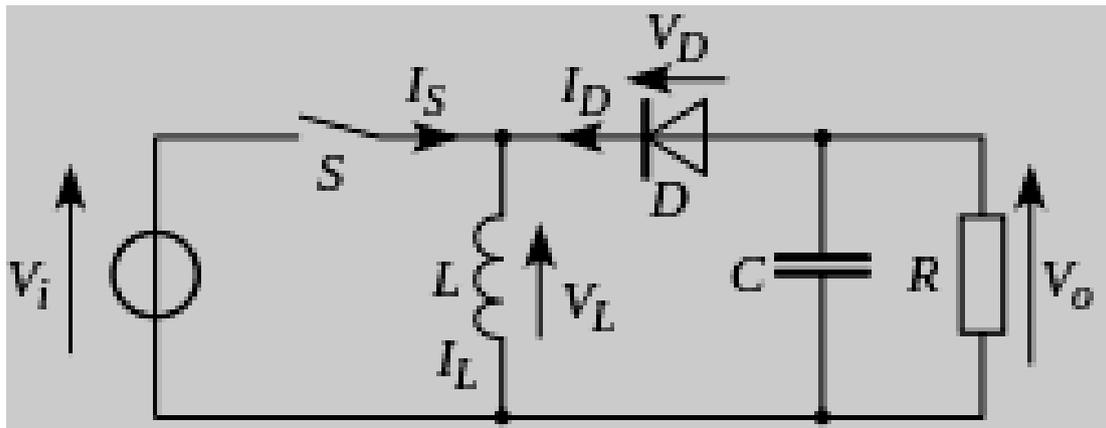


Figure I.22: schéma équivalente du convertisseur boost.[21]

### I.7.2.3 Le convertisseur Buck-Boost

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, hacheur de type Buck-boost. L'hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée [21]



**Figure I.23:** Schéma équivalent du convertisseur Buck-boost [21]

### I.8 Conclusion

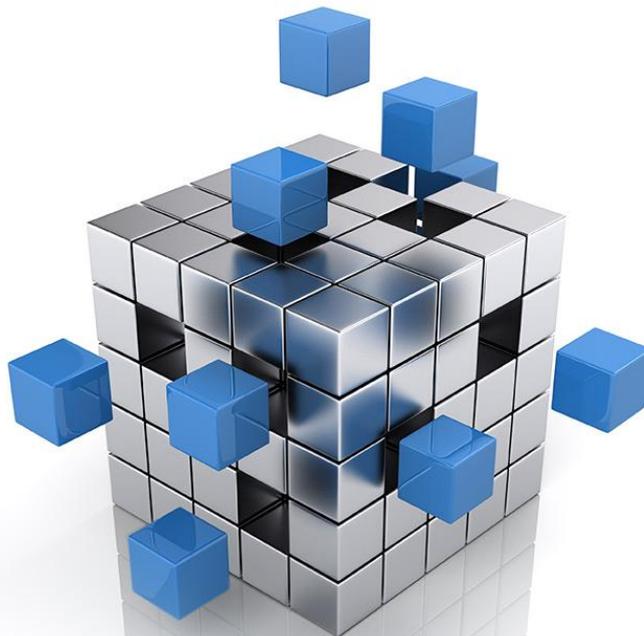
Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les énergies renouvelables en particulier l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolien son exploitation ensuite nous avons d'écrit moyen de stockage (batteries). Nous avons aussi présenté une brève description des différents composants de base du système hybride.

# Chapitre II

---

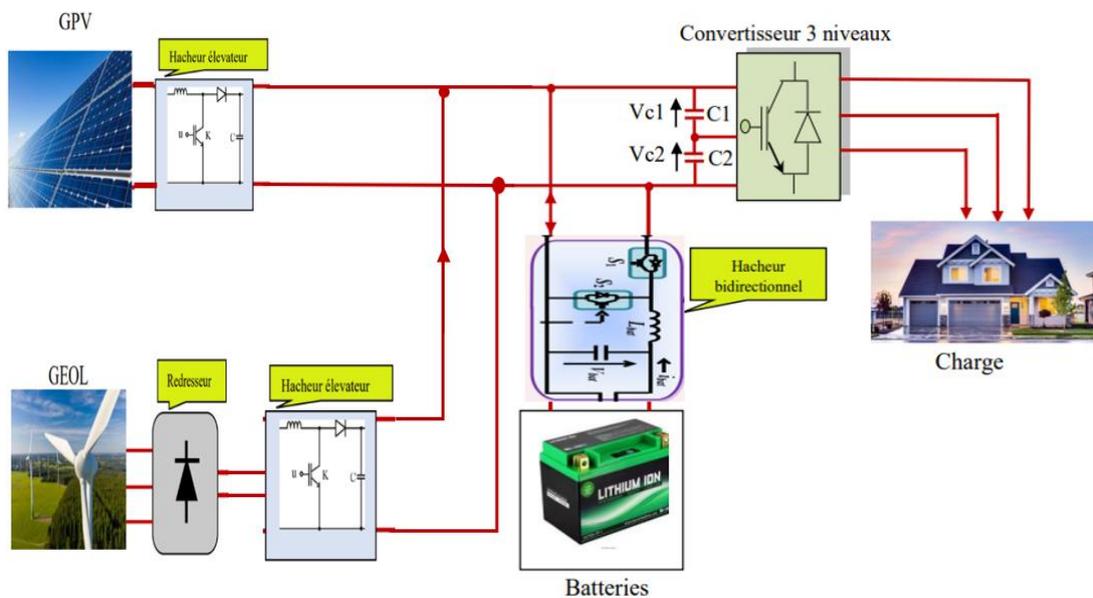
## MODELISATIONS DES ELEMENTS DU SYSTEME HYBRIDE

---



## II.1 Introduction :

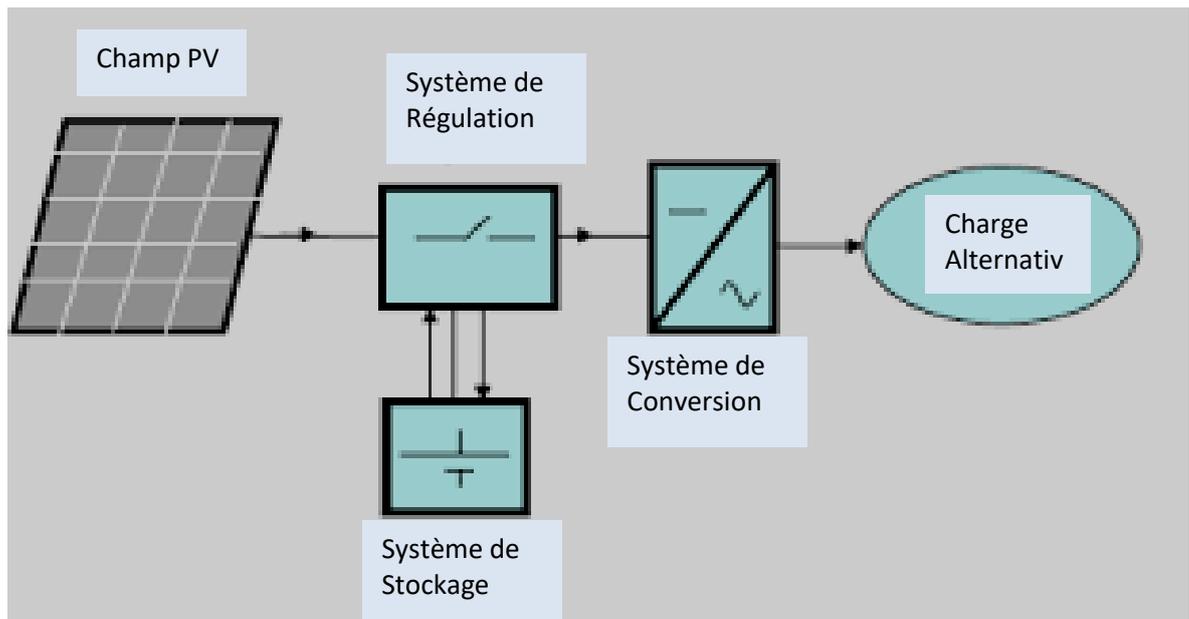
Pour déterminer une stratégie de gestion adéquate, il faut connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation et la simulation. Ce chapitre nous allons détailler les différentes parties du système PV, éolien au voisinage du point de puissance maximale MPPT, aussi le stockage (batterie). Dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques bien détaillés de chacun de ces différents éléments du système.



**Figure II.1:** Structure du système à énergie hybride (photovoltaïque, éolien) avec stockage.

## II.2 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

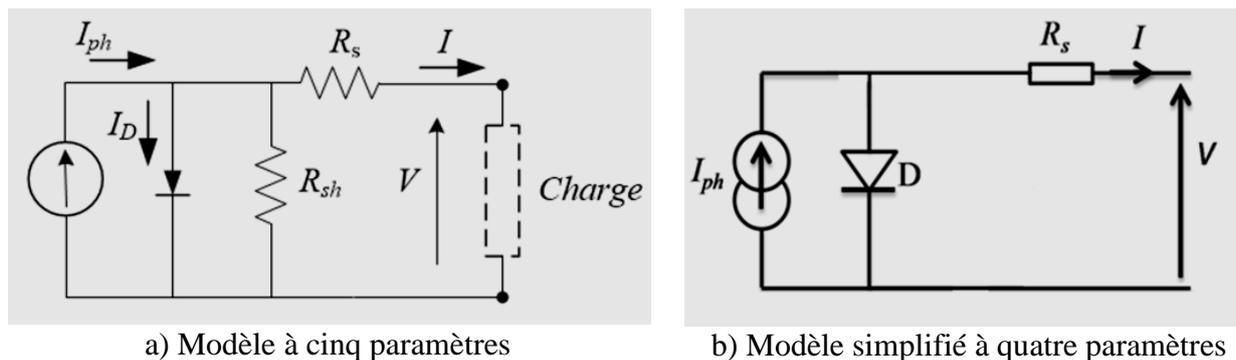
Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre la figure (II.2). Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), le second bloc est un convertisseur statique DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande.



**Figure II.2 : Schéma** synoptique du système photovoltaïque.[3]

### II.2.1 Module photovoltaïque utilisé

Le modèle le plus couramment utilisé pour une cellule PV est le circuit équivalent à une diode comme illustré à la figure (II.3) [66], Ce circuit est constitué d'une source de courant photoélectrique  $I$ , d'une diode, d'une résistance  $R_{sh}$  exprimant le courant de fuite en parallèle et d'une résistance  $R_s$  en série décrivant une résistance interne au passage du courant [67] [68], Comme la résistance de shunt  $R_{sh}$  est grande, elle peut normalement être négligée. Le modèle à cinq paramètres présentés à la figure II.3 (a) peut donc être simplifié dans celui illustré à la figure II.3 (b).



**Figure II.3 : Modèle** électrique du circuit électrique équivalent d'un PV. [66]

### II.2.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires connectés en série et en parallèle. Un groupe de panneaux PV est constitué de  $N_s$  cellules montées en série et  $N_p$  cellules en parallèle.

Le modèle à une diode est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (éclairage et température ambiante). [69]

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

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

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

Le courant de diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+I.R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant l'équation (II.2) (qui est une formule expliquée par la thermodynamique statistique dans (II.1)), le courant de sortie s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+I.R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

La résistance shunt  $R_{sh}$  est inversement proportionnelle au courant de fuite, l'efficacité du PV est insensible à une variation de la résistance shunt [70, 71]. D'autre part, une faible variation de la résistance série  $R_s$  va affecter de manière significative la puissance de sortie du PV. Alors, le modèle se simplifie et l'équation (II.4) ci-dessus peut être réécrite comme suit :

$$I = -I_0 \left[ e^{\left(\frac{V+I.R_s}{\alpha}\right)} - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- ❖  $I_{ph}$  (A) : Courant photovoltaïque et dépend de l'irradiation solaire ;
- ❖  $I_0$  (A) : Courant de saturation inverse de la diode ;
- ❖  $I$  (A) : Courant de sortie de la cellule photovoltaïque, c'est le courant de charge ;
- ❖  $V$  (V) : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque ;
- ❖  $R_s$  ( $\Omega$ ) : Résistance série et elle a une petite valeur ;
- ❖  $R_{sh}$  ( $\Omega$ ) : Résistance parallèle et elle a une petite valeur ;
- ❖  $\alpha$  (V) : Facteur de saturation thermique et dépend de la température de jonction.

Le courant  $I_{ph}$  dépend énormément de l'irradiation solaire et de la température de la cellule et peut être donné par [70] :

$$I_{ph} = I_{ph(T_1)} (1 - K_0(T - T_1)) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$I_{ph(T_1)} = (G I_{cc(T_1)} / G_{nom}) \quad (\text{II.7})$$

$$K_0 = \frac{(I_{cc(T2)} - I_{cc(T1)})}{I_{cc(T1)}(T2 - T1)} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- ❖  $G$  Est l'irradiation en  $\text{W/m}^2$  ;
- ❖  $G_{\text{nom}}$  Est l'irradiation nominale de la cellule photovoltaïque en  $\text{W/m}^2$  ;
- ❖  $I_{cc(T1)}$  Est le courant de court-circuit à la première température de référence (A) ;
- ❖  $I_{cc(T2)}$  Est le courant de court-circuit à la deuxième température de référence (A) ;
- ❖  $T1$  et  $T2$  des températures de référence (K) ;
- ❖  $T$  est la température de la cellule solaire (K).

Le courant de saturation de la diode est donné par :

$$I_0 = I_{0(T1)} \left( \frac{T}{T1} \right)^{\frac{3}{n}} \left[ \exp \left( \frac{-V_g}{\alpha} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T1} \right) \right) \right] \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$I_{0(T1)} = I_{cc(T1)} \left[ \exp \left( \frac{-V_g}{\alpha} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T1} \right) \right) \right] \quad (\text{II.10})$$

D'où :

- ❖  $n$  est le facteur de qualité de la diode (sans unité) ;
- ❖  $V_g$  est la tension de la bande interdite « Band gap » en V ;
- ❖  $V_{ocT1}$  est la tension en circuit ouvert à la température  $T1$  de la cellule PV.

En fin, la résistance série  $R_s$  peut être déterminée comme suit [72 , 73]:

$$R_s = \frac{-dV}{dI_{voc}} - \frac{1}{X_V} \quad (\text{II.11})$$

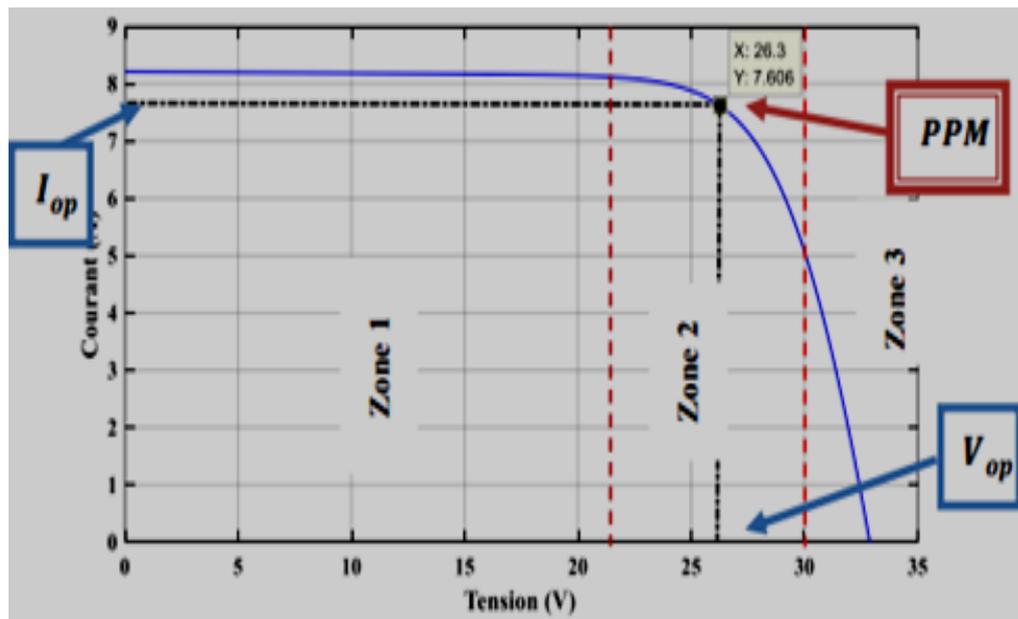
Avec :

$$X_V = I_{0(T1)} \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left( \frac{V_{oc(T1)}}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{II.12})$$

Le terme  $\frac{dV}{dI_{voc}}$  représente la dérivée de la tension par rapport au courant lorsqu'on atteint la tension en circuit ouvert.

### II.2.3 Caractéristiques de module photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule). Figure (II.4)

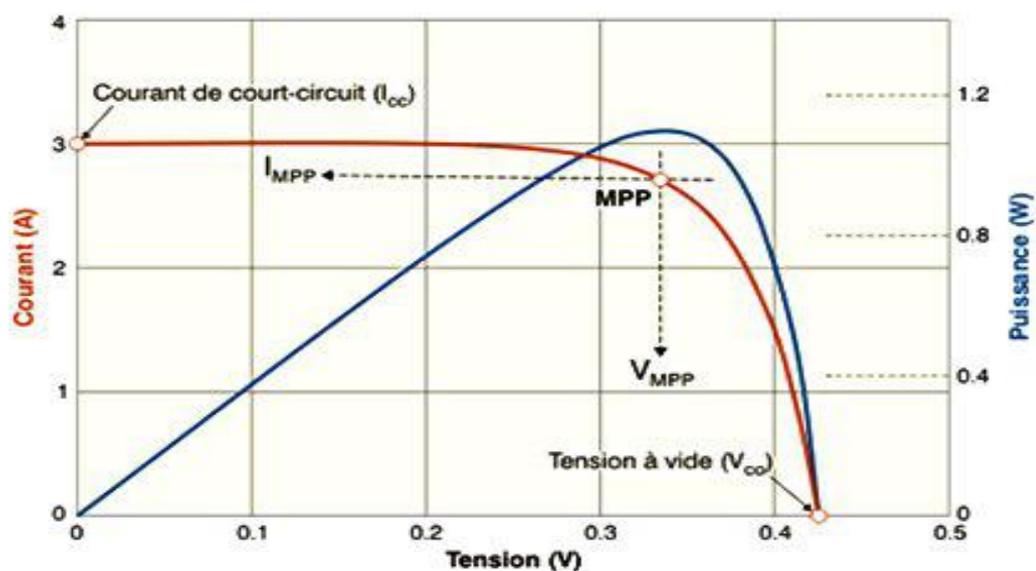


**Figure II.4 :**Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.[42]

On peut résumer le fonctionnement du générateur PV en se basant toujours sur la caractéristique  $I(V)$  par trois zones de fonctionnement comme suit [73, 74] :

- ❖ **Zone 1 :** le GPV est un générateur de courant (le courant est constant).
- ❖ **Zone 2 :** c'est la zone de travail du GPV (puissance maximale).
- ❖ **Zone 3 :** le GPV est un générateur de tension (la tension est presque constante).

Nous pouvons aussi représenter la caractéristique puissance-tension qui nous permet de bien voir l'emplacement de la puissance maximale du panneau solaire. Cette dernière ne pourra être qu'un seul point de fonctionnement.



**Figure II.5 :** Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque. [42]

A partir de la figure (II.5), on peut déterminer les paramètres les plus usuels et qui sont :

### II.2.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule PV est nulle. Dans le cas où  $R_s$  est nulle et  $R_{sh}$  est infinie, ce courant sera confondu avec le photo-courant  $I_{ph}$ . Si non, ce courant est obtenu en annulant la tension  $V$  dans l'équation II.13, on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{I_{cc} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.13})$$

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

$I_0 \left[ \exp\left(\frac{I_{cc} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.14})$$

### II.2.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite en annulant le courant  $I$  dans l'équation II.3 :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.15})$$

### II.2.3.3 Puissance optimale et facteur de forme

La puissance utile maximale  $P_M = V_M I_M$ , s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left( \frac{dI}{dV} \right)_M \quad (\text{II.16})$$

Le facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, il est donné par:

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{cc} V_{oc}} \quad (\text{II.17})$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe  $I(V)$  par rapport au rectangle de longueur  $V_{oc}$  et largeur  $I_{sc}$  qui correspond à la photopile idéale.

## II.2.4 constitutions d'un générateur photovoltaïque

Dans les conditions standardisées de test (une insolation de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ ) la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de  $100 \text{ cm}^2$  (10 sur 10) tourne aux

alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires [75]

**II.2.4.1 Association des cellules photovoltaïques**

❖ **Association en série / en parallèle**

Association en série	Association en parallèle
<p>Pour une association en série de <math>N_s</math> cellules PV identiques, ces dernières sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante est obtenue par addition des tensions à courant donné.</p> <p>On aura donc : <math display="block">\begin{cases} I_{Sc} = I_{cc} \\ V_{Sc} = N_s V_{oc} \end{cases} \quad (II.19)</math></p>	<p>Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont obtenues en appliquant la règle de dualité par rapport au groupement en série. Pour l'association de <math>N_p</math> cellules en parallèle, ces dernières sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante est obtenue par addition des courants à tension donnée. On écrit : <math display="block">\begin{cases} V_{Poc} = V_{oc} \\ I_{Pcc} = N_p I_{cc} \end{cases} \quad (II.20)</math></p>

**Tableau II.1 :** Comparaison entre l'association série/ parallèle des cellules photovoltaïques.[76]

❖ **Association mixte**

L'équation relative à une association mixte formée par la mise en série de  $N_s$  cellules et de  $N_p$  en parallèle est la suivante[76]:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s}{\alpha} \right) \right] - \frac{N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh}} \quad (II.21)$$

Par déduction, la puissance extractible est donnée par :

$$N_{pv} = N_s N_p IV \quad (II.22)$$

La caractéristique électrique d'une association mixte est analogue à celle d'une cellule élémentaire,

**II.2.4.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV**

❖ **Influence de l'irradiation :**

La figure (II.6) représente les caractéristiques (P-V) et (I-V) pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante :

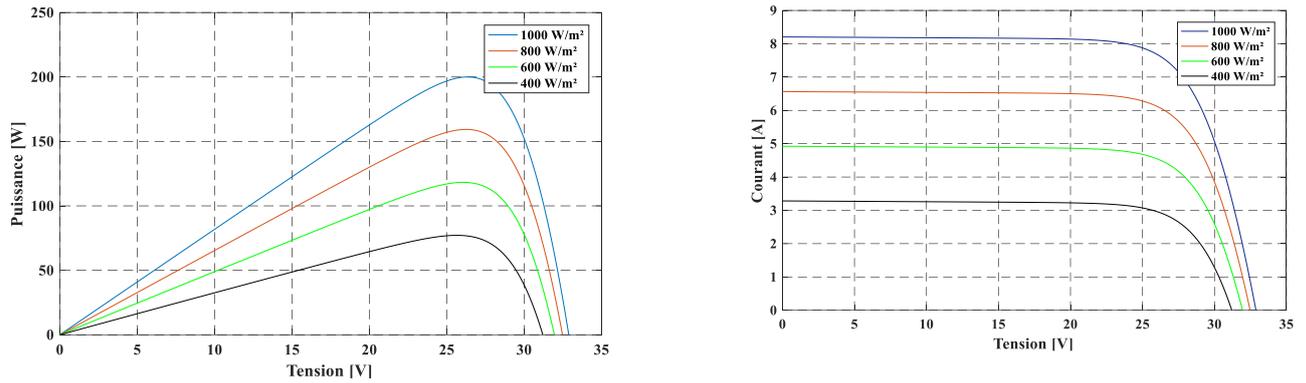


Figure II.6 : Caractéristique (I-V) et (P-V) pour différents éclairements

On remarque que la variation de l'éclairément influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM est proportionnelle à l'éclairément.

❖ Influence de la température Tc

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. La figure (II.7) donne l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairément constant. On remarque, que lorsque la température augmente, le courant photo-généré augmente très légèrement alors que la tension de circuit ouvert diminue considérablement.

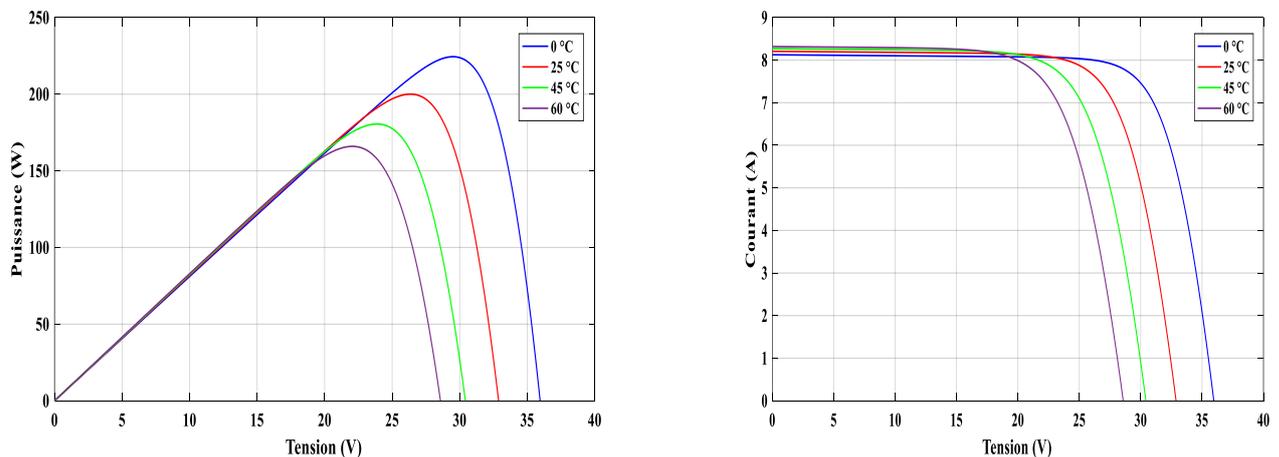
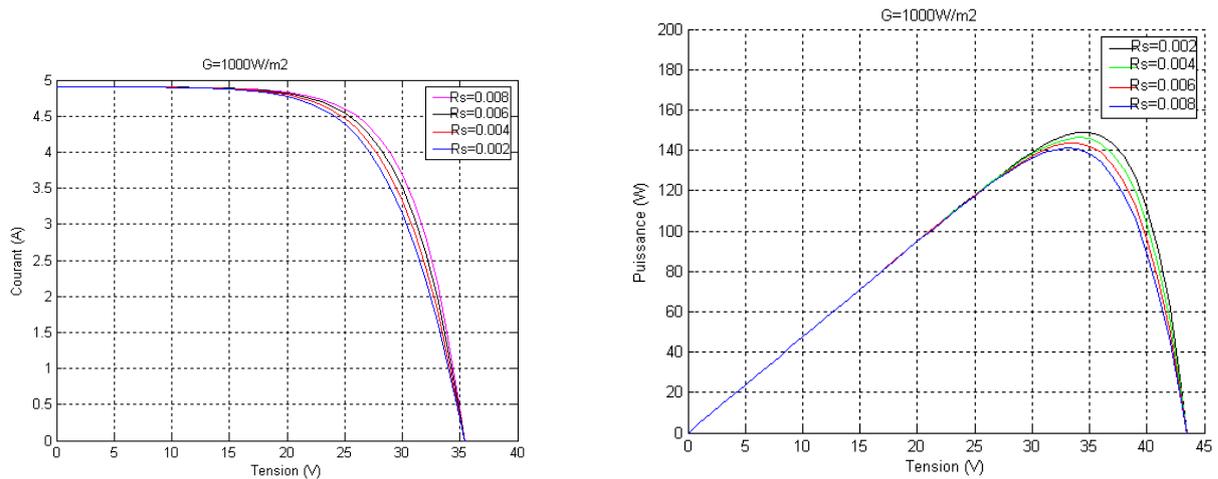


Figure II.7 : Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  pour différentes températures

❖ Influence de la résistance série RS

Nous avons tracé les caractéristiques (P-V) et (I-V), avec la variation de la résistance série, et nous avons obtenu la figure (II.8) :

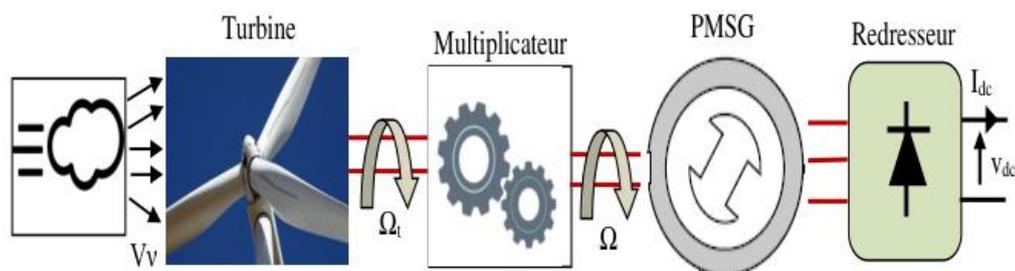


**Figure II.8:** Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un module photovoltaïque pour différentes valeurs de la résistance série

D'après ces résultats, nous remarquons que la résistance série provoque des pertes localisées dans le panneau photovoltaïque, ce qui engendre la délocalisation de point de puissance maximale.

### II.3 Modélisation de la chaîne de production éolienne

Dans cette partie nous allons modéliser tous les éléments électromécaniques qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne. Cette modélisation permet de trouver la variation instantanée de la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de vent. La figure (II.15) donne le schéma synoptique d'une chaîne éolienne abordée dans notre travail [58].

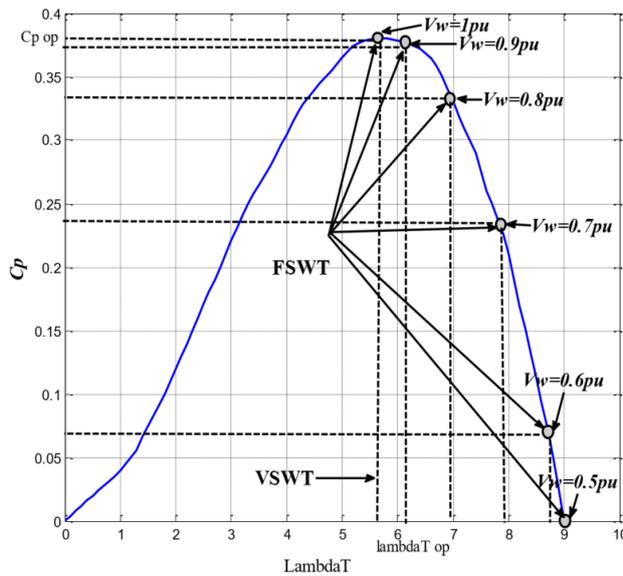


**Figure II.9:** Schéma synoptique de l'aérogénérateur

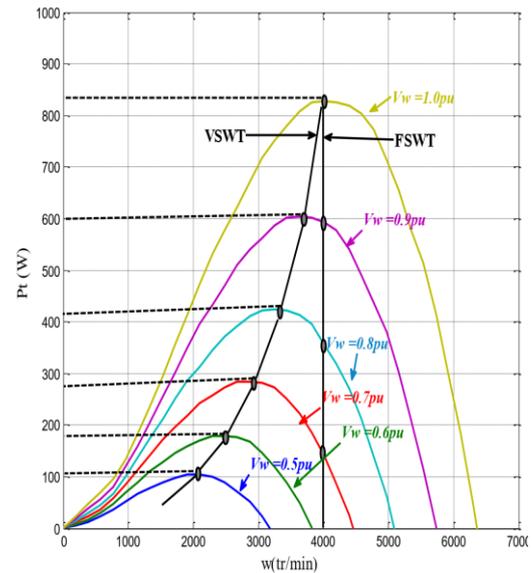
#### a).Turbines à vitesse fixe et à vitesse variable :

Les turbines raccordées au réseau sont classées FSWT et VSWT. Pour faciliter la discussion, le ratio de vitesse de pointe (TSR), qui est un paramètre vital dans la conception des éoliennes, est présenté ici. TSR est défini comme le rapport entre la vitesse tangentielle de la pointe de la lame et la vitesse du vent [61, 53] :

Dans les VSWT, la vitesse du rotor  $\omega_T$  est modifiée en fonction de la vitesse du vent  $V_W$ , de sorte que la turbine fonctionne toujours à une valeur TSR optimale  $\lambda_{opt}$ . Par conséquent, l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne dans les VSWT est supérieure à celle des FSWT. Le coût initial des VSWT est élevé en raison du convertisseur de puissance ; cependant, le rendement énergétique élevé des VSWT compense le coût initial élevé et les pertes de puissance dans le convertisseur [61,53]



(a) Courbe  $C_p$  en fonction de  $\lambda_T$



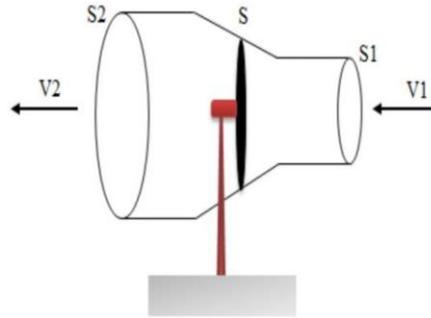
(b) Courbe  $P_T$  en fonction  $\omega_T$

**Figure II.10:** Caractéristiques du FSWT et du VSWT dans différentes conditions de vitesse du vent [59].

### II.3.1 Le vent

Considérons le système éolien à axe horizontal qui est représenté sur la figure (II.17) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre  $V_1$  et  $V_2$ , soit [20]

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.23)$$



**Figure II.11 : Tube de courant autour d'une éolienne**

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.24})$$

La puissance  $P_v$  alors extraite du vent par la turbine s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_v = m \frac{(V_1^2 + V_2^2)}{2} \quad (\text{II.25})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.26})$$

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace avec une vitesse  $V_1$  pouvait être complètement récupérée par une turbine, la puissance instantanée serait :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_2^3}{2} \quad (\text{II.27})$$

### II.3.2 La turbine

Pour simuler la turbine, on utilise la relation du couple associée à la caractéristique  $CP(\lambda)$ . Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [11] :

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{V_v^3}{G \cdot \Omega_t} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$S$  : la surface de la turbine ( $S = \pi \cdot R^2$ )

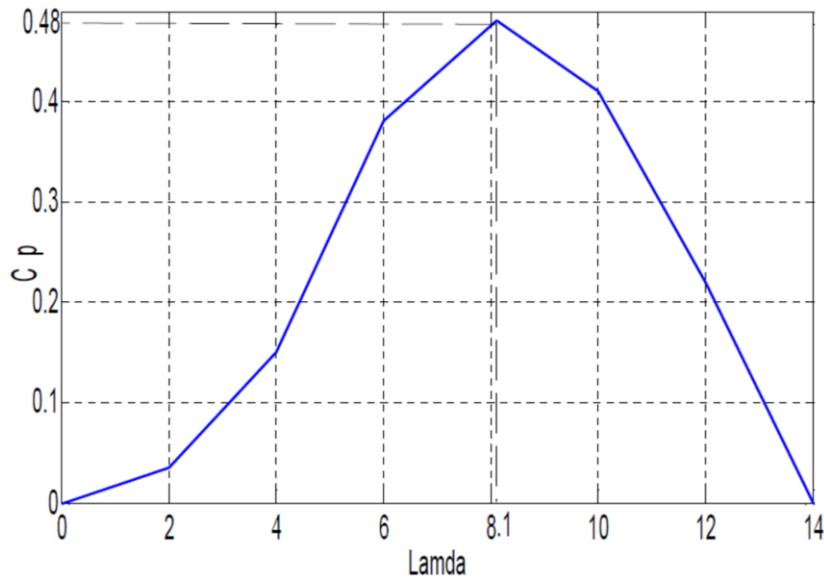
$\rho$  : Représente la densité de l'air (dans les conditions normales,  $\rho = 1.225 \text{Kg/m}^3$ ) ;

$V_v$  : La vitesse moyenne du vent.

#### 3.1.3 Caractéristique $C_p(\lambda)$

La courbe caractéristique  $C_p(\lambda)$  utilisée pour l'étude de ce système éolien est présentée sur la figure (II.18). Les points remarquables de cette courbe sont (le rapport de la vitesse en bout de

paies ( $\lambda_{opt}$ ) optimale et le coefficient de puissance maximal ( $C_{opt}$  P) sont donnés respectivement par [36] :



**Figure II.12 : Caractéristique  $CP(\lambda)$ .**

A partir de l'équation (II.25), l'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\gamma) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.29})$$

Avec :

S : la surface balayée par la turbine éolienne.

$\rho$  : la masse volumique de l'air.

$V_v$  : la vitesse du vent

La vitesse de la turbine éolienne est donnée par :

$$\Omega_t = \frac{V_v \cdot \gamma}{R} \quad (\text{II.30})$$

### II.3.3 Le multiplicateur de vitesse

La puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice synchrone à aimant Permanent. Un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse. Le modèle du multiplicateur peut être décrit par les équations suivantes :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.31})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

- $T_t$  : le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
- $T_{em}$  : le couple électromagnétique développé par la MSAP.
- $G$  : le gain du multiplicateur.
- $\Omega_t$  : la vitesse de rotation de la turbine.
- $\Omega$  : la vitesse de rotation à l'entrée de la génératrice

### II.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La modélisation de la génératrice synchrone et primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performantes, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique, la génératrice à aimant permanent dans sa configuration exacte est complexe. La structure générale d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents est présentée par la figure (II.13) :

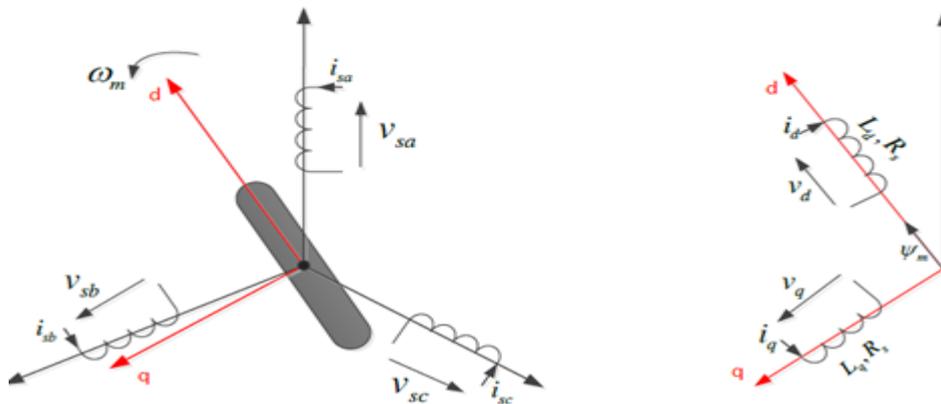


Figure II.13: Représentation de la GSAP dans le repère triphasé (a, b, c) et diphasé (dq)

Il s'agit d'une machine multi pôle. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [57].

- La non saturation du circuit magnétique.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air.
- Le rotor est donc (lisse) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position du rotor.
- La tension magnéto motrice engendrée par les trois phases est à répartition sinusoïdale.

- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

Les équations électriques et magnétiques de la machine :

Les équations des tensions et du couple :

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle [34, 62]. Les équations des tensions (convention moteur) sont données par

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Où :

- $v_a, v_b, v_c$  : Les tensions de phase de la machine ;
- $i_a, i_b, i_c$  : Les courants de phase de la machine ;
- $L_c$  : L'inductance cyclique ;
- $R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique ;
- $E_a, E_b, E_c$  : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_{em} = \frac{p}{\omega} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \quad (\text{II.34})$$

Où :

$p$  : Le nombre de pair de pôle,

$\omega$  : La vitesse du rotor avec ( $\omega = p \cdot \Omega$ ).

La résolution de L'équation matricielle de la machine obtenue est trop complexe ; pour simplifier cette équation, on fait appel à la transformation de Park, qui permet une économie considérable du temps de calcul. Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP : En reportant la transformation de PARK, dans le système d'équations (II.44), on obtient l'équation matricielle suivante [34,44] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

L'expression des f.é.m. est donnée par :

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Ou :  $\Phi_f$  est le flux de l'aimant permanent

L'expression du couple :

$$T_{em} = \frac{p}{\omega} (E_d \cdot i_d + E_q \cdot i_q) \quad (II.37)$$

Le système d'équations (II.47) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_c \frac{di}{dt} - L_c I_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L_c \frac{di}{dt} - (L_c I_d + \phi_f) \omega \end{cases} \quad (II.38)$$

L'expression du couple se réduit à :

$$T_{em} = \frac{p}{\omega} (E_q \cdot i_q) = p \phi_f \cdot I_q \quad (II.39)$$

### II.3.5 Modélisation de l'hacheur boost (élevateur)

La tension de la pile à combustible est inférieure à la tension de bus continue. Ainsi, nous utilisons un convertisseur Boost pour réguler la tension de sortie de la pile à combustible. La Figure (II.12) montre l'adaptateur DC-DC composé d'une inductance L, d'une capacité C, d'une diode D et d'un commutateur Mosfet. La sortie est chargée avec les propriétés de résistance de l'adaptateur de lot DC-DC, comme montre la figure présentée ci-dessous : [81]

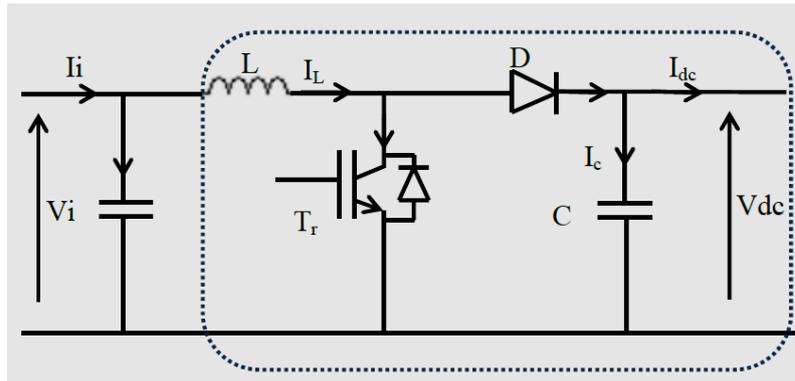


Figure II.14 :schéma de Convertisseur Boost.[82]

Les équations électriques de l'hacheur Boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_1}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (II.40)$$

$$(1 - \alpha)I_1 = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (II.41)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (II.42)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_1 \quad (II.43)$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

Dans le fonctionnement continu de le hacheur et pour une ondulation de courant et de tension donnée, les valeurs des capacités et de la bobine du hacheur peuvent être déterminées comme suit :[83]

$$\begin{cases} L = \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{f \Delta I_{pv}} \\ C_s = \frac{V_{pv} I_{dc} \cdot \alpha}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta V_s \cdot (1-\alpha)} \\ C_e = \frac{I_{dc} \cdot \alpha \cdot (1-\alpha)}{f \cdot V_{pv} \cdot \Delta I_{pv}} \end{cases} \quad (II.44)$$

#### II.4.Modélisation des éléments de stockage :

##### II.4.1 Modélisation de la batterie [84]

Il existe différents types de modèles de batteries dans la littérature. Le modèle de la batterie choisi dans cette présente étude utilise une source idéale de tension mise en série avec une résistance et une capacité comme la montre la figure suivante :

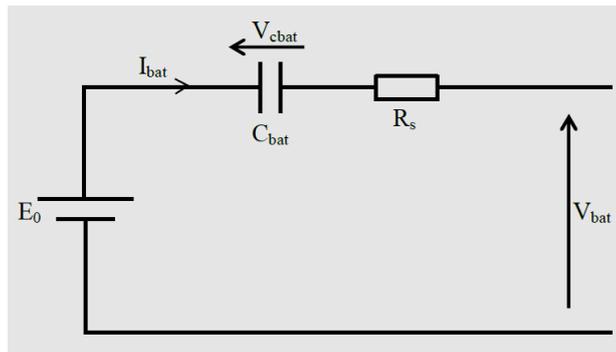


Figure II.15:Modèle R-C de la batterie.[84]

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \quad (II.45)$$

On définit également l'état de charge (Soc) de la batterie, est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie

$$SOC = \left(1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}}\right) * 100 \quad (II.46)$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} * t_{bat} \quad (II.47)$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \quad (II.48)$$

On peut écrire les équations suivantes : [85]

$$E'_0 = N_s * E_0 \quad (II.49)$$

$$C'_0 = \frac{N_p}{N_s} * C_{bat} \quad (II.50)$$

$$R'_s = \frac{N_p}{N_s} * R_s \quad (II.51)$$

Pour déterminer la capacité ( $C_{bat}$ ) de batterie :

$$C_{bat} = \frac{E_{bat} * N_j}{V_{bat} * \eta_{bat} * D} \quad (II.52)$$

#### II.4.1.1 Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [42]. Tandis que lorsque le transistor est fermé le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

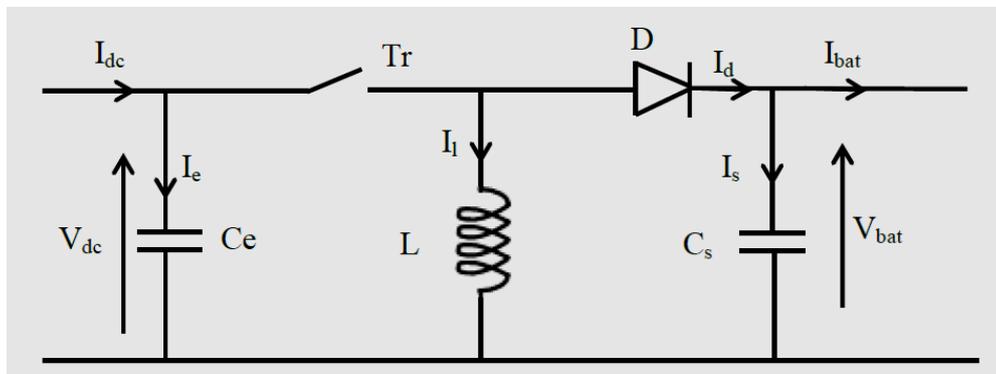


Figure II.16: Schéma d'un hacheur Buck-Boost[42]

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{bat} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \quad (II.53)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$I_{bat} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \quad (II.54)$$

Avec  $I_{dc}$ , le courant qui traverse le condensateur

#### II.5 Modélisation Bus Continu [42]

Le couplage du système hybride constitue un système photovoltaïque, éolien aussi un banc de batteries est effectué par l'intermédiaire d'un bus continu, Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.55})$$

$$I_{dc} = I_{pv} + I_{pac} \pm I_{batt} - I_{charge} - I_{elect} \quad (\text{II.56})$$

Où :

- ❖  $I_{pv}$ : est le courant du système photovoltaïque.
- ❖  $I_{pac}$ : courant de la pile à combustible.
- ❖  $I_{batt}$ : est le courant de charge/décharge de la batterie.
- ❖  $I_{charge}$ : est le courant de la charge.
- ❖  $I_{elect}$ : est le courant de l'électrolyseur.

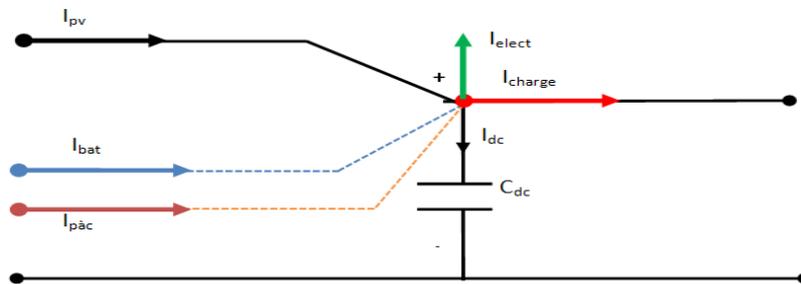


Figure II.17: Modèle du bus continu. [42]

Le système d'énergie hybride étudié est connecté avec le système de stockage d'énergie à travers un bus continu, où ce dernier est lié à un onduleur pour la conversion du courant continu en courant alternatif, pour puisse être relié au réseau électrique. Un filtre  $RL$  est connecté à la sortie de l'onduleur qui permet d'éliminer les harmoniques engendrés à cause de la commutation.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre système électrique hybride proposer (photovoltaïque, éolien, batterie et les convertisseurs statiques). Cette modélisation est une étape essentielle qui nous permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer les caractéristiques de chaque élément de notre système.

Afin de bien exploiter l'énergie fournie par ces sources on doit les commander par des techniques de maximisation de puissance. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande permettant le contrôle et la commande optimale et a gestion de tous les sous-systèmes, ainsi que l'optimisation de leurs énergies produites.

# Chapitre III

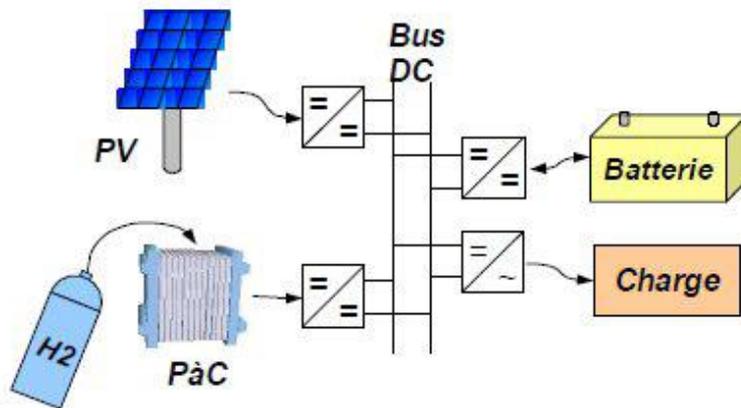
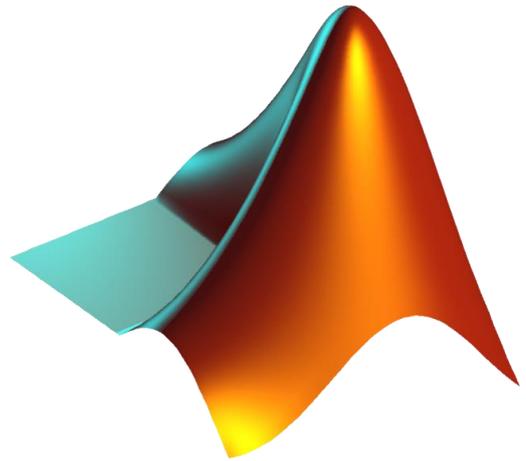
---

---

## CONTROLE OPTIMISATION ET GESTION DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME HYBRIDE

---

---



### III.1 Introduction

Le but principal d'un système de production électrique est de répondre à la demande énergétique de manière fiable, indépendamment des variations de la production. Les fluctuations dans la production sont souvent dues à la nature imprévisible des ressources renouvelables, tandis que les fluctuations de la demande peuvent varier selon des cycles annuels ou quotidiens et ne sont pas nécessairement synchronisées avec la disponibilité de ces ressources. Étant donné que nous ne pouvons pas contrôler les conditions météorologiques ni dicter la quantité d'énergie que les consommateurs utiliseront, il est essentiel d'avoir une stratégie de contrôle pour gérer efficacement l'énergie produite et assurer la continuité du service électrique [28]. La finalité de la régulation d'un système d'énergie hybride est d'assurer un approvisionnement constant en énergie conforme à la demande de la charge, même en présence de fluctuations significatives dans la production d'énergie résultant de l'aspect aléatoire des ressources renouvelables [21]. Le principe de commande appliqué vise à maintenir les tensions des sources d'énergie renouvelable égales à celle du bus à courant continu, indépendamment des variations d'éclairement et de vitesse du vent, afin d'extraire le maximum de puissance des sources renouvelables. Pour améliorer l'efficacité de notre système multi-source, il est essentiel de répondre de manière ininterrompue aux exigences de la charge, tout en protégeant le système de stockage (élément crucial dans les systèmes d'énergie hybrides) contre les surcharges et les décharges profondes. Cela permet de prolonger sa durée de vie tout en optimisant la répartition de la puissance entre les différents éléments composant le système d'énergie hybride. Une stratégie de gestion énergétique se révèle indispensable. Dans le chapitre précédent, nous avons élaboré les modèles mathématiques de chaque composant du système multi-source : photovoltaïque, éolien, super condensateur, batterie, ainsi que des convertisseurs statiques. Dans ce chapitre, nous allons concevoir les contrôles nécessaires pour chaque élément constitutif de notre système de production hybride autonome, puis procéder à la simulation du système complet et à la gestion du flux énergétique entre les différentes sources et la charge. Étant donné que la puissance générée par une source renouvelable est sujette à des fluctuations inhérentes (dépendantes des conditions météorologiques), le stockage de l'énergie devient essentiel. Pour notre système, une gestion en temps réel du flux énergétique provenant des différentes sources est requise pour répondre à la demande à tout moment.

### III.2 Description du schéma d'énergie proposé pour notre étude

Notre système multi-sources est constitué d'un GPV connecté au bus continu (CC) via un convertisseur boost DC/DC unidirectionnel, et une pile à combustible au même bus via le

convertisseur bidirectionnel DC/DC Buck-boost, il consiste d'un système de stockage (la batterie, super condensateur). Le SEH est conçu afin d'alimenter une charge DC variable et/ou alternative comme présentée à la figure III.1

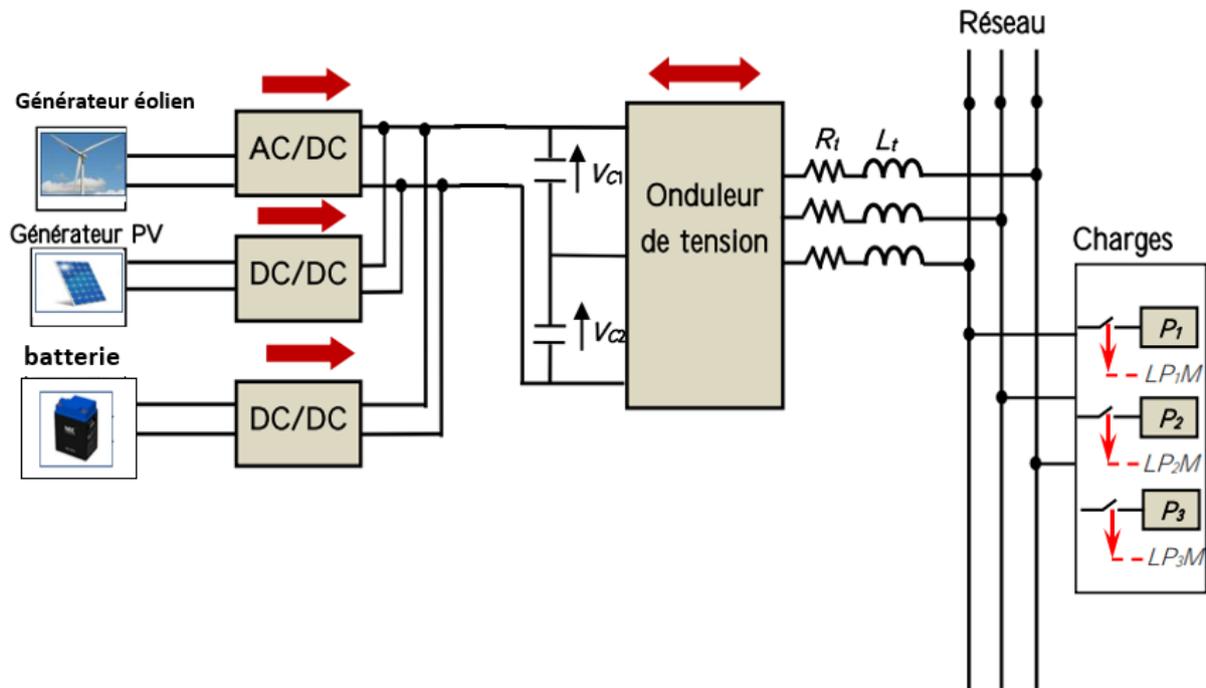


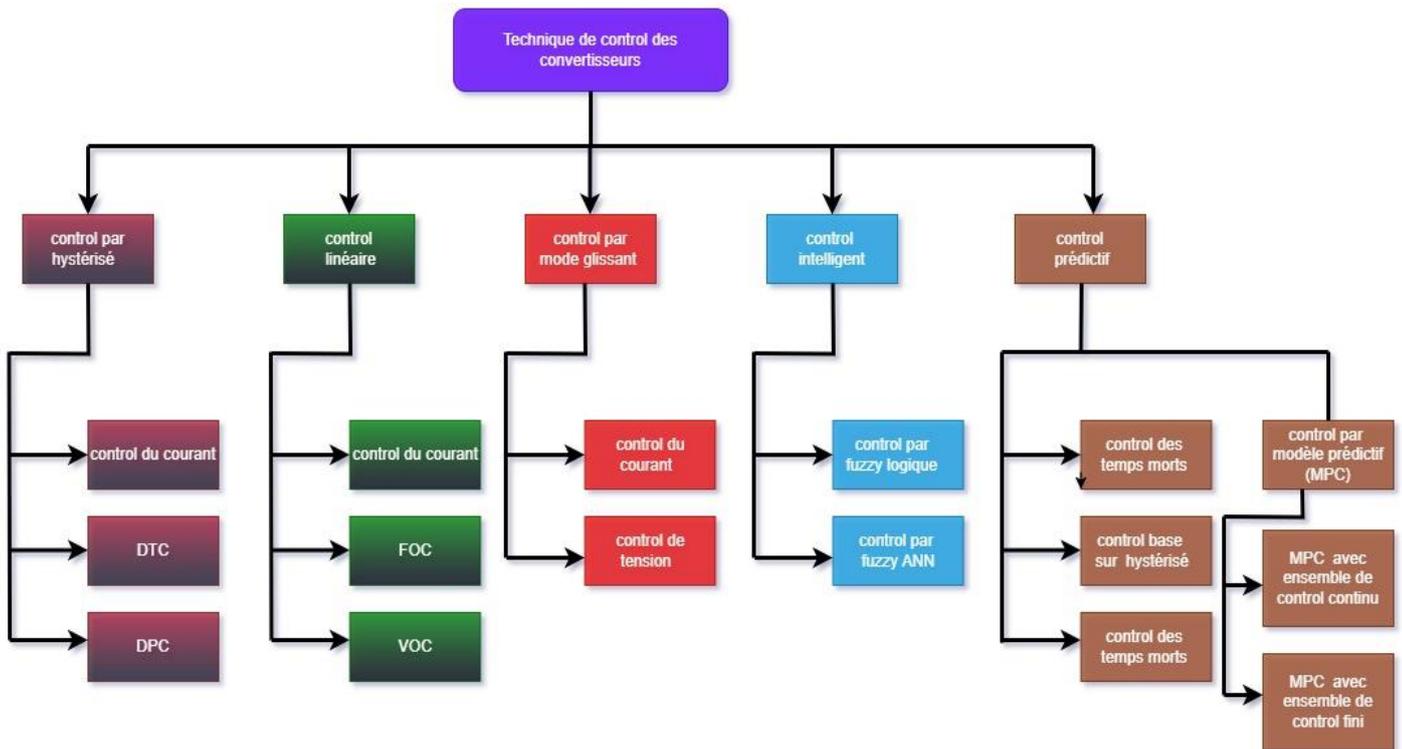
Figure III.1: Synoptique du système hybride étudié connecté à une charge alternative

Comme évoqué précédemment, la mise en place de systèmes de contrôle avancés s'avère indispensable pour satisfaire aux normes du réseau électrique et optimiser l'efficacité de la chaîne hybride. Le contrôle des convertisseurs de puissance constitue un domaine de recherche et de développement actif. La figure (III.2) synthétise les différentes méthodes de contrôle connues. Le contrôle en mode glissant, intelligent et prédictif représente des approches avancées, tandis que l'hystérésis et le contrôle linéaire sont des méthodes classiques.

De nombreuses études se sont penchées sur les techniques de contrôle classique des convertisseurs multiniveaux utilisés dans les systèmes d'énergies renouvelables. Ces contrôleurs classiques font souvent appel à des régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) en cascade et à une modulation de largeur d'impulsion ou vectorielle spatiale (PWM/SVM). L'utilisation d'une fréquence de commutation fixe est privilégiée dans cette approche. Pour les applications à grande échelle, maintenir une fréquence de commutation basse est essentiel pour minimiser les pertes de commutation. Cependant, l'exploitation à une fréquence de découpage inférieure soulève plusieurs défis techniques et opérationnels tels que [21] :

- ❖ Caractéristiques des performances non symétriques dues à la nature non linéaire prédominante de convertisseurs de puissance.
- ❖ Harmoniques d'ordre inférieur significatifs qui provoque une mauvaise qualité de l'alimentation et des conflits avec les codes de réseau.
- ❖ Réponse transitoire lente en raison de l'étalement de modulation à faible bande passante.
- ❖ Couplage de variables de contrôle telles que les courants de grille des axes d et q.
- ❖ Performances dégradées en raison des harmoniques de tension du réseau et du retard de contrôle
- ❖ Approche compliquée pour inclure les contraintes du système dans la conception du contrôleur.

Text



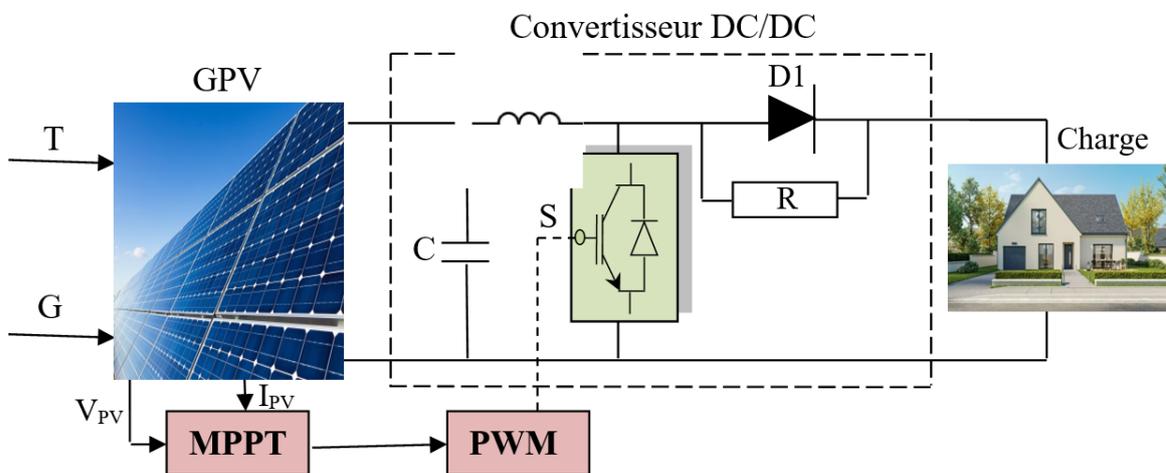
**Figure III.2:** Classification des techniques de contrôle utilisées dans les systèmes hybrides [21].

### III.3 Contrôle de la chaîne photovoltaïque

#### III.3.1 Contrôle du GPV

Le panneau solaire photovoltaïque (GPV) est relié au bus continu principal via un convertisseur élévateur DC/DC contrôlé, conçu pour atteindre le point de puissance maximale. Ce convertisseur boost augmente la tension du générateur PV jusqu'à la tension de sortie requise, en fonction des besoins de la charge. Le schéma de principe est présenté dans la figure III.3 et

comprend une tension d'entrée DC, une inductance L, un commutateur S, une diode D1, un condensateur C pour le filtrage, ainsi qu'une résistance R [21]. Lorsque le commutateur S est activé, l'inductance de suralimentation accumule l'énergie fournie par la source de tension d'entrée. Pendant cette période, le courant de charge est maintenu constant par le condensateur, assurant ainsi une charge continue. Lorsque le commutateur S est désactivé, la tension d'entrée ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance sont délivrées à la charge. En conséquence, la tension de sortie est augmentée. Par conséquent, la tension de sortie est influencée par la position du commutateur S (activé ou désactivé) ainsi que par le rapport cyclique.



**Figure III.3:** Convertisseur boost avec contrôle MPPT

L'efficacité du panneau solaire est considérablement améliorée par l'application de la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui repose sur l'utilisation du théorème de transfert de puissance maximale. Cette technique vise à garantir que la charge reçoive la puissance maximale lorsque l'impédance de la source est équivalente à celle de la charge. Le MPPT agit en extrayant la puissance maximale de la cellule solaire et en ajustant le rapport cyclique du convertisseur DC/DC pour adapter l'impédance de la charge à celle de la source [21].

### III.3.2 Les techniques de contrôle MPPT

#### III.3.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale

Le concept fondamental de la commande MPPT réside dans la recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en garantissant une parfaite correspondance entre le générateur et sa charge, afin de transférer le maximum de puissance disponible.

La figure III.4 illustre une chaîne de conversion photovoltaïque couplée à une commande MPPT. Pour simplifier le fonctionnement de cette commande, une charge DC est sélectionnée

[21]. La mise en œuvre de la commande MPPT nécessite l'utilisation d'un quadripôle, qui peut être réalisé dans le cas de la conversion solaire à l'aide d'un convertisseur DC-DC. Cela garantit que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque correspond à la puissance maximale disponible (P<sub>MAX</sub>).

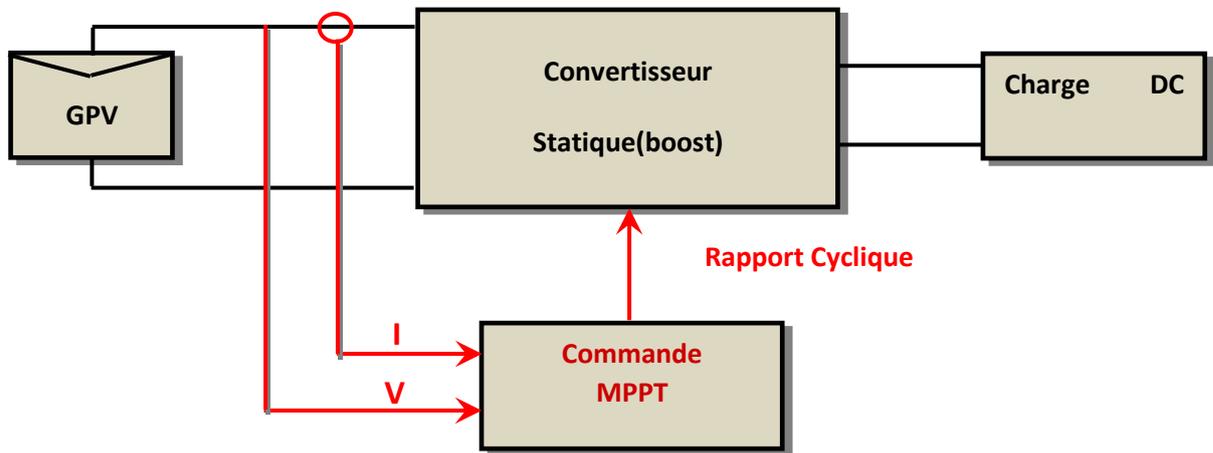


Figure III.4 Chaîne de conversion photovoltaïque [21]

Pour contrôler le système PV, on agit sur le rapport cyclique de manière à amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soit les conditions météorologiques ou variations de charges

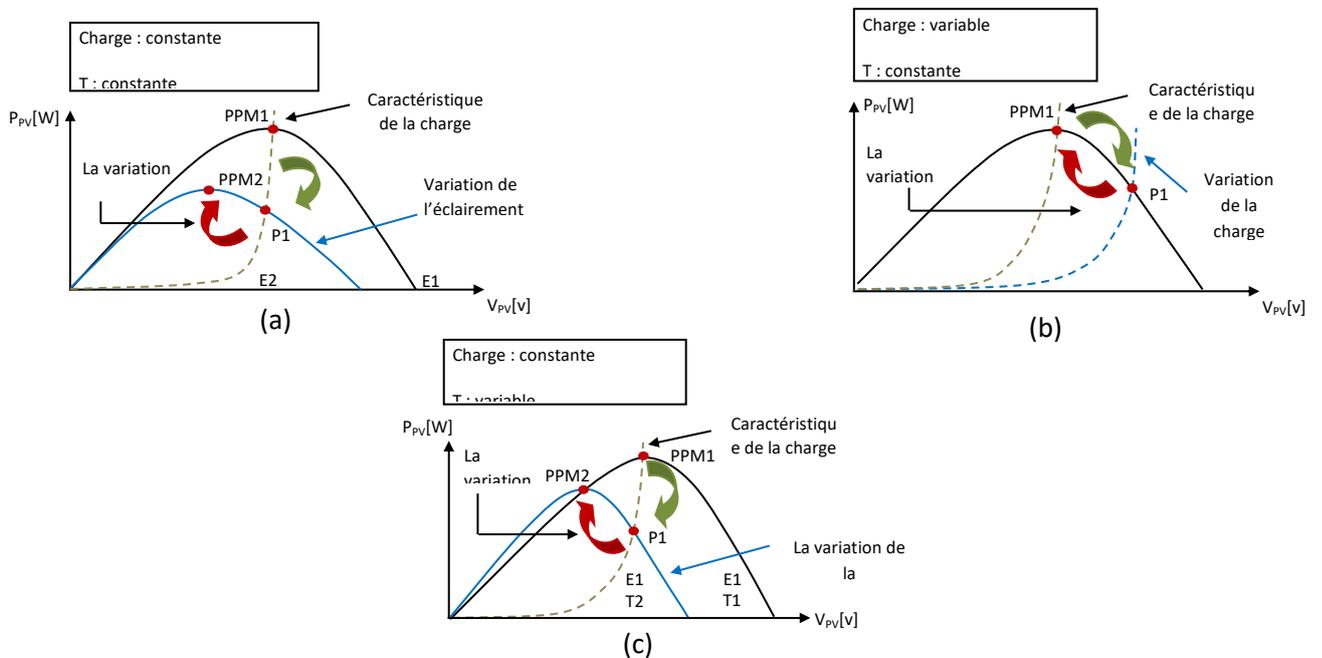


Figure III.5: Recherche de recouvrement du point de puissance maximale [21]

(a) Suite à une variation d'ensoleillement, (b) Suite à une variation de charge, (c) Suite à une variation de température.

Dans la figure III.5 ET pour les 3 cas de variation de l'ensoleillement (cas : a), de la charge (cas : b) et de la température (cas : c), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Donc

Pour poursuivre et atteindre le PPM dans diverses situations de fonctionnement du GPV [21], il faut agir sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS).

### III.3.2.2 Les commandes MPPT classique

Actuellement, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale [21]. Les plus utilisés sont :

- ❖ Algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- ❖ Algorithmes de la conductance incrémentale (INC).
- ❖ Méthode de logique floue.
- ❖ Méthode de logique floue type 2.

#### a) Méthode de logique floue

L'utilisation de la logique floue est devenue populaire au cours de la dernière décennie car elle permet de traiter des entrées imprécises, ne nécessite pas de modèle mathématique précis et peut gérer la non-linéarité. La logique floue comprend trois étapes : la fuzzification, le système d'inférence et la défuzzification. La fuzzification est le processus de transformation des entrées numériques précises en variables linguistiques basées sur le degré d'appartenance à certains ensembles. Les fonctions d'appartenance, comme celles illustrées dans la figure (III.10), permettent d'associer une valeur à chaque terme linguistique. Le nombre de fonctions d'appartenance utilisées dépend de la précision souhaitée pour le contrôleur, mais varie généralement entre 5 et 7. Dans la figure (III.6), sept niveaux flous sont utilisés : NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) et PB (Positive Big). Certaines commandes ajoutent deux autres valeurs aux précédentes : NM (Negative Means) et PM (Positive Means) [76]. Dans certains cas, les fonctions d'appartenance sont choisies de manière moins symétrique, voire optimisées pour l'application spécifique afin d'obtenir une meilleure précision [30].

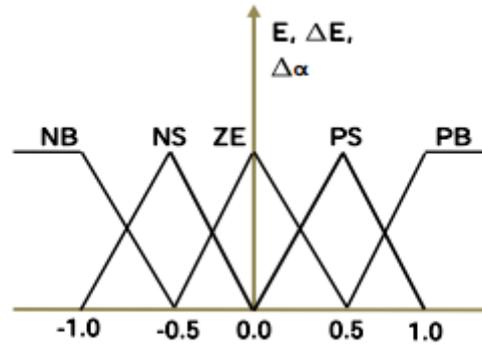


Figure III.6: Fonctions d'adhésion [21].

En général, la présentation de la logique floue se divise en trois parties : la fuzzification, le cœur du régulateur et la défuzzification. La fuzzification permet de convertir des variables réelles en variables floues. Le cœur du régulateur est constitué des règles reliant les entrées aux sorties. Ensuite, l'inférence et la défuzzification permettent de déterminer la valeur réelle de sortie à partir des ensembles flous d'entrée [21]. La figure (III.7) illustre le schéma synoptique de base de l'algorithme flou.

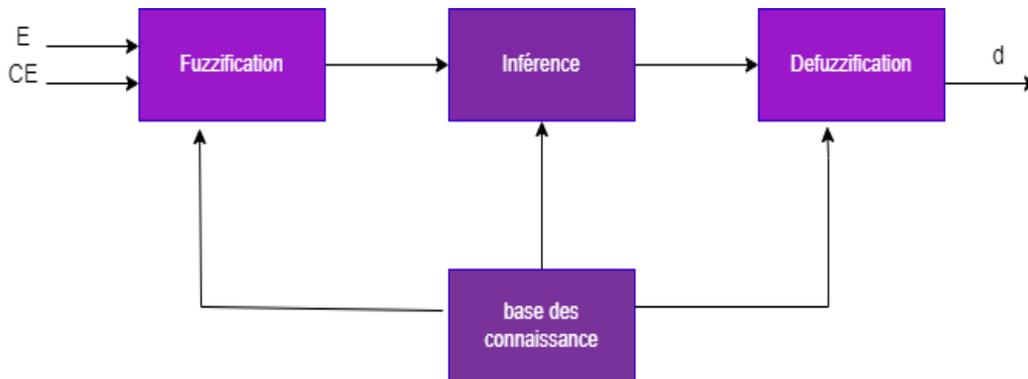


Figure III.7 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue [21].

### Fuzzification

La fuzzification permet de rendre floues les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrée. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Généralement, on utilise deux variables d'entrée : l'erreur  $E(k)$  et la variation de l'erreur  $CE(k)$ , définies comme suit [21] :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III.4})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.5})$$

**L’inférence**

La stratégie de réglage dépend des inférences adoptées, liant les variables d’entrée à une variable de sortie. Cette étape consiste à établir une relation logique entre les entrées et la sortie ( $\alpha$ ) [21]. Les règles d’inférence utilisées dans le cadre de la logique floue sont illustrées dans le Tableau III.2.

**La défuzzification**

La défuzzification consiste en la réalisation de l’opération inverse de la fuzzification. Cela signifie calculer une valeur numérique compréhensible par l’environnement extérieur à partir d’une définition floue. C’est le but de la défuzzification [21].

de e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

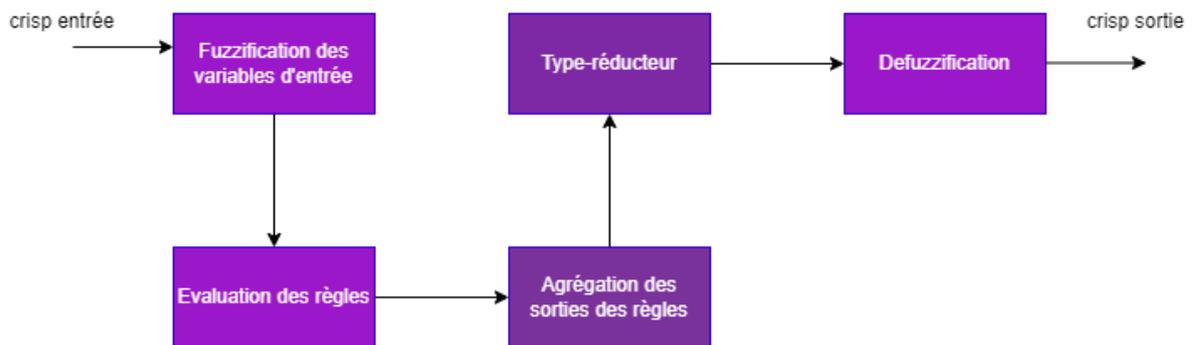
**Tableau III.1** Règles d’inférence de réglage flou [21]

Dans cette partie de notre synthèse, nous nous sommes concentrés sur la sélection des cinq techniques classiques de MPPT les plus répandues, telles que citées dans la littérature : les algorithmes Perturber and Observe (P&O), les algorithmes de la conductance incrémentale (INC), la méthode de la logique floue et la méthode de la logique floue type 2 . Cependant, bon nombre de ces techniques se révèlent défaillantes en cas d'ombrage partiel en raison de la présence d'un optimum local sur la courbe caractéristique. D'autres méthodes sont plus performantes en cas d'ombrage, telles que les techniques d'optimisation méta-heuristiques comme le PSO (Particle Swarm Optimization).

**b) Méthode de logique floue type 2**

La logique floue de type 2 est une évolution de la logique floue traditionnelle, conçue pour traiter l'incertitude de manière plus efficace. Dans ce type de logique floue, l'incertitude est représentée par une variable supplémentaire appelée variable d'appartenance. Cette variable permet de représenter différents niveaux d'incertitude et leurs variations. Ainsi, les

ensembles sont définis non pas par des points caractéristiques comme dans la logique floue traditionnelle, mais par des membres. La logique floue de type 2 suit les mêmes étapes que la logique floue traditionnelle : la fuzzification, le système d'inférence et la défuzzification. Cependant, la variable d'appartenance est prise en compte lors de ces processus, ce qui permet de mieux représenter et gérer l'incertitude dans les résultats. La logique floue de type 2 est un outil efficace pour traiter les systèmes comportant de multiples variables ou une grande incertitude. Cette approche permet de prendre des décisions plus précises et efficaces dans des conditions floues et complexes.



**Figure III.8:** Topologie de l'algorithme de logique floue type 2 [24].

Le processus de prise de décision dans un système de logique floue de type 2 est défini par cinq étapes principales, représentées dans la Fig. III.8 [24] :

**La fuzzification :** Cette étape constitue la principale différence entre les systèmes de logique floue des deux types, le premier et le deuxième. Elle implique la transformation du signal numérique en variables linguistiques portant des valeurs basses et élevées pour les fonctions d'appartenance principale et secondaire. Chacune de ces fonctions peut prendre des valeurs entre 0 et 1, de manière similaire à toute fonction d'appartenance du premier type. La fonction d'appartenance principale représente les valeurs maximales possibles pour l'ensemble d'incertitude du degré d'appartenance, tandis que la fonction d'appartenance secondaire représente les valeurs minimales de cette plage. L'intervalle entre les deux valeurs est appelé l'empreinte d'incertitude.

**Évaluation des règles :** Elle comprend un ensemble de règles floues, où la partie résultante de ces règles peut inclure des fonctions d'appartenance de type 2 ou des constantes numériques.

**Agrégation des sorties des règles :** Elle nécessite l'exécution d'opérations de logique floue, telles que l'intersection, l'union et la négation, sur les résultats des règles floues, avant de procéder à la prise de décision finale.

**Type-Réducteur :** Il représente la seconde différence majeure et convertit la sortie floue issue du processus de prise de décision de type 2 en une sortie de type 1. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer cette conversion, et l'une des méthodes les plus courantes consiste à déterminer le centre de gravité pour chaque partie du groupe flou résultant du type 2.

**Défuzzification :** Il s'agit de transformer la sortie floue après sa réduction de type en une sortie numérique finale en utilisant l'une des méthodes courantes, telles que le calcul du centre de gravité ou des méthodes basées sur la valeur maximale d'appartenance.

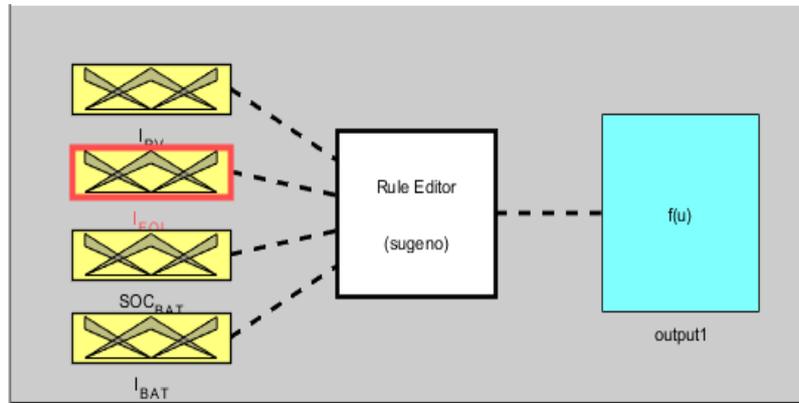
### **Gestion de l'énergie à contrôle basée sur une logique floue de type 2**

Dans cette étude, le modèle de contrôleur flou de type 2 (Sugeno) est employé pour mettre en œuvre le contrôle flou du système de gestion de l'énergie. Cette méthode se révèle particulièrement adaptable aux systèmes non linéaires, aux processus temporellement variables, à l'hystérésis et à d'autres processus complexes [65]. Son avantage réside dans le fait qu'elle ne requiert pas une représentation mathématique précise du système. L'état de charge de la batterie  $SOC_{bat}$  et le courant de charge de l'énergie photovoltaïque et éolienne  $I_{load}$  sont les entrées du contrôleur flou. Et le courant de sortie  $I_{OUT}$ .

Le système de logique floue pour la source d'énergie hybride utilisé dans cette étude a été conçu comme suit : en utilisant un contrôleur flou de type Sugeno. Les fonctions d'appartenance des entrées et des sorties ont été adoptées de manière trapézoïdale et triangulaire pour faciliter le processus de contrôle pendant le cycle de conduite. Assurer la satisfaction des exigences en énergie est crucial tout au long de la conduite. L'amélioration de la plage de fonctionnement du système hybride à plusieurs sources d'énergie à travers ce système de gestion de l'énergie est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la chaîne de traction et optimiser l'économie générale [24].

Afin de tirer pleinement parti de l'énergie stockée et absorbée par la batterie et d'augmenter sa durée de vie, il est nécessaire de maintenir le niveau de charge de la batterie  $SOC_{bat}$  près de la valeur prévue. Il est essentiel de réduire le courant de sortie  $I_{out}$  lorsque le  $SOC_{bat}$  est élevé et que  $I_{load}$  est faible (soit le I de GPV ou l'éolien), et de l'augmenter lorsque le  $SOC_{bat}$  est faible et que  $I_{load}$  est élevée. Les règles de commande floues, élaborées en utilisant les idées susmentionnées ainsi que la littérature et l'expérience [24]. À des fins

d'illustration, l'effet équivalent du centre de la région est utilisé dans la Fig. III.9, montrant la relation entre les entrées et les sorties de ce système de gestion de l'énergie.

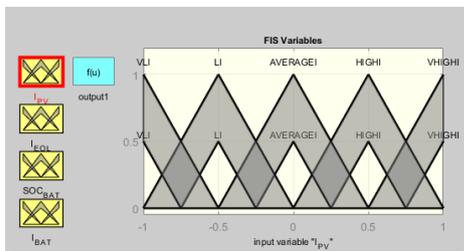


**Figure III.9:** Structure finale du système de gestion de l'énergie.

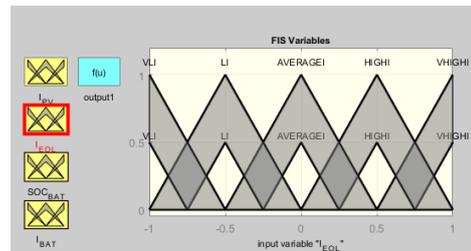
Les illustrations dans les figures Fig. III.10 et Fig. III.11 et Fig. III.12 et Fig. III.13 ont été utilisées pour intégrer pleinement la signification réelle de chaque entrée et sortie.

L'équation suivante définit la période de variation pour les quantités d'entrée et de sortie :

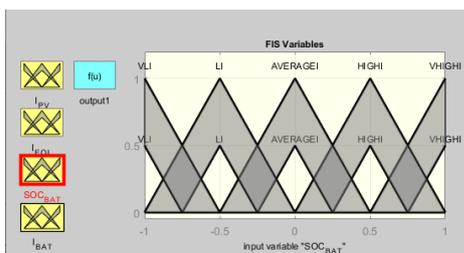
$$\begin{cases} SOC_{bat} \in [0,1] \\ I_{load} \in [-3,10] \\ I_{out} \in [0,10] \end{cases} \quad (III.6)$$



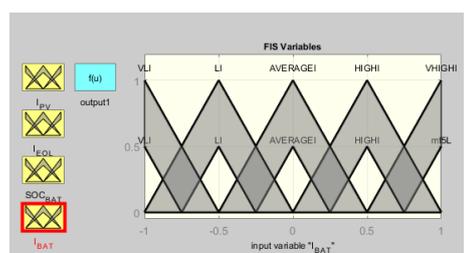
**Figure III.10:** La fonction d'appartenance de l'entrée  $I_{PV}$ .



**Figure III.11:** La fonction d'appartenance de l'entrée  $I_{eol}$ .



**Figure III.12:** La fonction d'appartenance de l'entrée  $SOC_{bat}$ .



**Figure III.13:** La fonction d'appartenance de l'entrée  $I_{bat}$ .

Dans un système de logique floue de type 2, nous avons deux entrées : le courant de charge et l'état de charge de la batterie, ainsi qu'une sortie, le courant de sortie. La compréhension des variables linguistiques est présentée sous forme d'un ensemble de règles, indiquant au système ce que devrait être la sortie en fonction d'un ensemble de conditions. Les exemples suivants sont utilisés pour expliquer comment définir les règles floues en utilisant les libellés linguistiques disponibles dans le Tableau III.2. Si  $SOC_{bat}$  est élevé et que  $I_{load}$  est faible, alors  $I_{out}$  est moyen : une quantité d'énergie plus importante que nécessaire. Le système de stockage est relativement chargé et peut également fournir une énergie supplémentaire pour répondre à la demande totale. Si  $SOC_{bat}$  est très bas et que  $I_{load}$  est moyen, alors  $I_{out}$  est élevé : les valeurs actuelles des quantités d'entrée et de sortie correspondent aux limites et aux références de courant, de couple et de vitesse. Par conséquent, il est nécessaire de garantir une fourniture supplémentaire d'énergie.

$I_{out}$		$SOC_{bat}$				
		VL	L	AV	H	VH
$I_{load}$	VL	AV	AV	L	L	VL
	L	H	H	AV	AV	L
	AV	H	H	H	AV	L
	H	VH	VH	H	H	AV
	VH	VH	VH	H	H	H

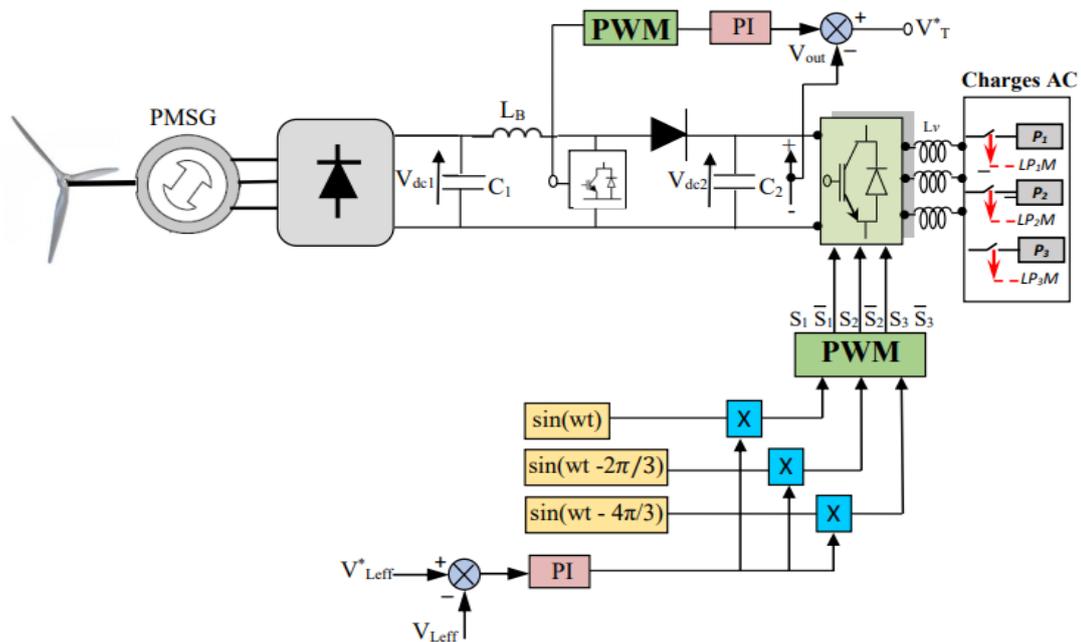
**Tableau III.2:** Règles de gestion d'énergie du system hybride

**c) la distinction entre "logique floue" et "logique flue type 2"**

la logique floue est une discipline bien établie qui traite de la représentation de l'incertitude et de la gradation de la vérité, tandis que la "logique flue type 2" semble être une variante ou une spécification particulière qui nécessiterait une définition plus précise pour en comprendre les différences spécifiques par rapport à la logique floue standard.

**III.4 Le contrôle de la chaîne éolienne**

Le système de contrôle revêt une importance capitale pour les performances des éoliennes. Il vise à optimiser la puissance tirée du vent à travers l'ensemble des composants, tout en garantissant que l'énergie fournie au réseau électrique et aux charges respect les exigences d'interconnexion [81]. Selon le schéma fonctionnel illustré à la figure (III.14),



**Figure III.14:** Schéma de contrôle pour le convertisseur côté générateur [21].

Il y a trois stratégies de contrôle essentielles pour gérer une éolienne [11]. La première stratégie se concentre sur le contrôle de la turbine. Elle agit d'abord sur la vitesse de rotation pour maximiser la puissance extraite du vent, utilisant la technique du Maximum Power Point Tracking (MPPT). Ensuite, elle ajuste l'angle de calage des pales ( $\beta$ ) pour contrôler la puissance de sortie de l'éolienne, ce qui est réalisé par le contrôle de l'angle de calage (pitch control) [21]. La deuxième stratégie de commande s'applique au convertisseur hacheur boost. Du fait de sa nature, la tension continue  $V_{dc2}$  est généralement supérieure ou égale à  $V_{dc1}$ . La tension continue  $V_{dc1}$ , produite par le redresseur à diodes, varie avec la vitesse du générateur, tandis que  $V_{dc2}$  reste constante, car elle est régulée par un contrôleur PI qui compare les mesures de  $V_{dc2}$  avec sa référence  $V_{dcr}$ .

La troisième stratégie de commande est employée pour réguler le convertisseur onduleur du côté de la charge. Cette stratégie permet de contrôler à la fois la tension et la fréquence fournies à la charge [84].

#### III.4.1 Contrôle de la turbine

Le schéma correspondant à la modélisation de la turbine se déduit de l'équation (II.39) et il est donné à la figure (III.15) [21].

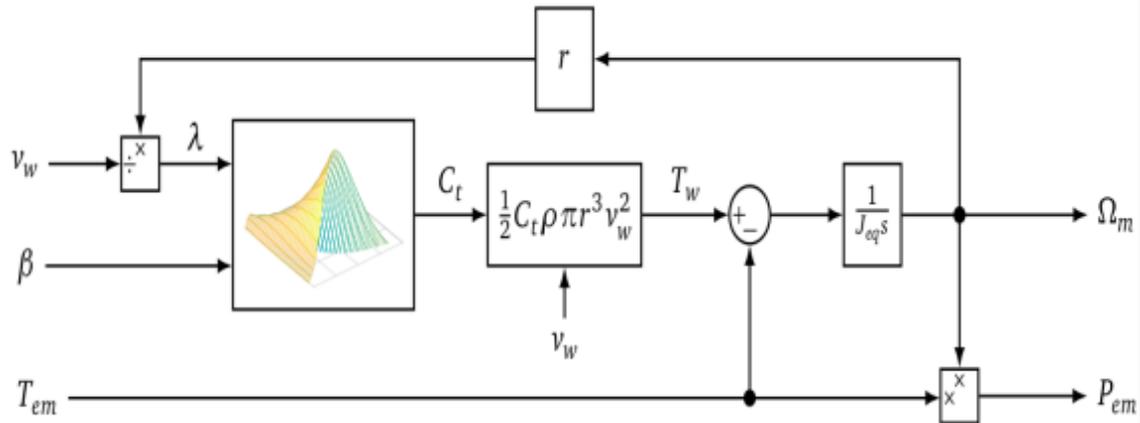


Figure III.15: Schéma bloc du modèle de la turbine [21].

Les caractéristiques de puissance de l'éolienne à vitesse variable peuvent être définies en fonction de la vitesse du vent selon quatre régions de fonctionnement, comme le montre la figure (III.16) [21].

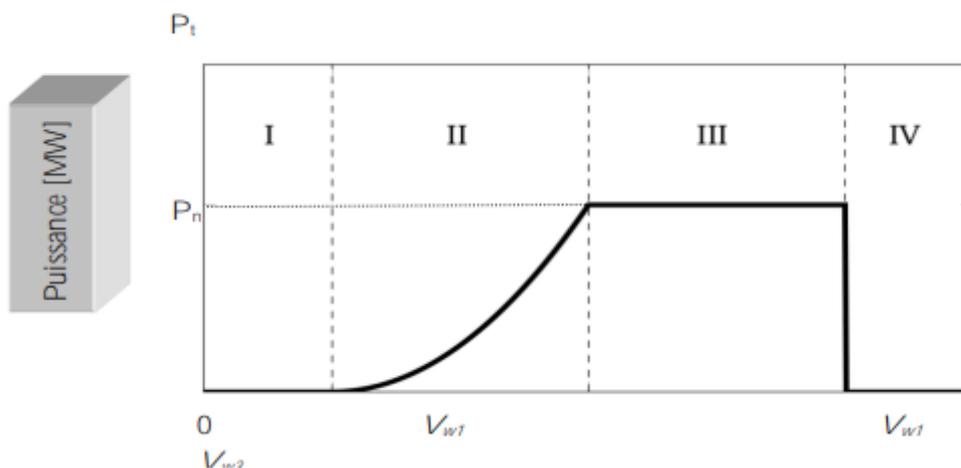


Figure III.16: les Zones de fonctionnement d'une éolienne [21].

**Zone I :**  $v < v_1$  : La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie captée est trop faible.

**Zone II :**  $v_1 < v < v_2$  : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite (appelées généralement MPPT). Cette zone correspond au fonctionnement dit « à charge partielle ».

**Zone III :**  $v_2 < v < v_3$  La puissance incidente devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de  $P_n$ . Cette zone correspond au fonctionnement dit « à pleine charge ». **Zone IV :**  $v > v_3$  La vitesse du vent devient trop forte

pour les capacités opérationnelles de l'installation ce qui implique que la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle. Les considérations de base seront les suivantes : V1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. V2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. V3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.

### III.4.2 Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse

Les perturbations causées par les fluctuations naturelles du vent affectent le système de conversion éolienne, entraînant des variations constantes de la puissance. Pour compenser cela, on suppose que le couple électromagnétique produit par la machine reste constant, quelle que soit la quantité d'énergie générée [21].

$$T_{em} = T_{em}^* \quad (III.7)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence [21].

$$T_{em}^* = PI(\Omega_{méc}^* - \Omega_{méc}) \quad (III.8)$$

$$\Omega_{méc}^* = G\Omega_{tur}^* \quad (III.9)$$

PI : est le régulateur de la vitesse mécanique

$\Omega_{méc}^*$  : est vitesse mécanique de référence.

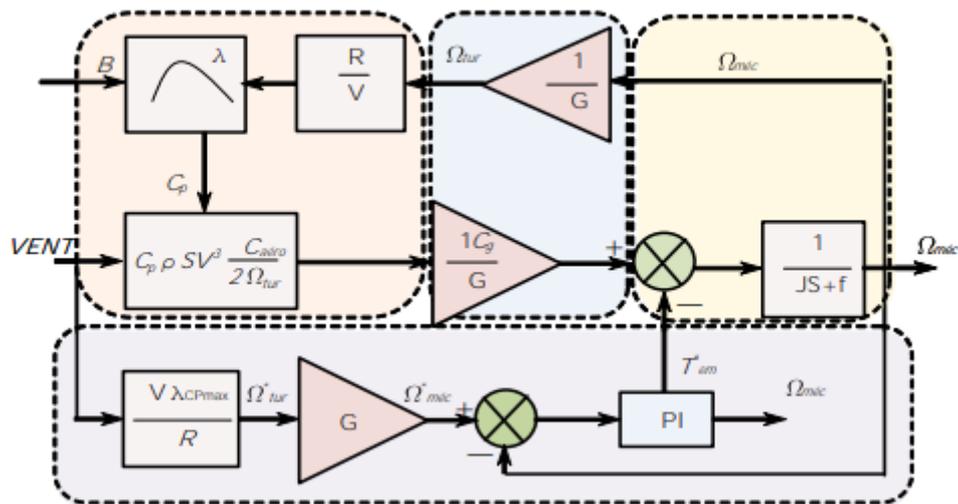
La vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{tur} = \frac{\lambda V}{R} \quad (III.10)$$

La vitesse de référence de la turbine peut être obtenue à partir de la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda$  optimale qui correspond à la valeur de coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$ , elle s'exprime par la relation suivante :

$$\Omega_{tur}^* = \frac{\lambda C_{pmax} V}{R} \quad (III.11)$$

Dans ce cas l'asservissement de la vitesse est assuré par un régulateur intégral proportionnel, ce dernier est inséré dans le schéma bloc du modèle de la turbine dont le but est de contrôler la vitesse mécanique. Le schéma de principe est représenté sur la figure (III.17) [21].

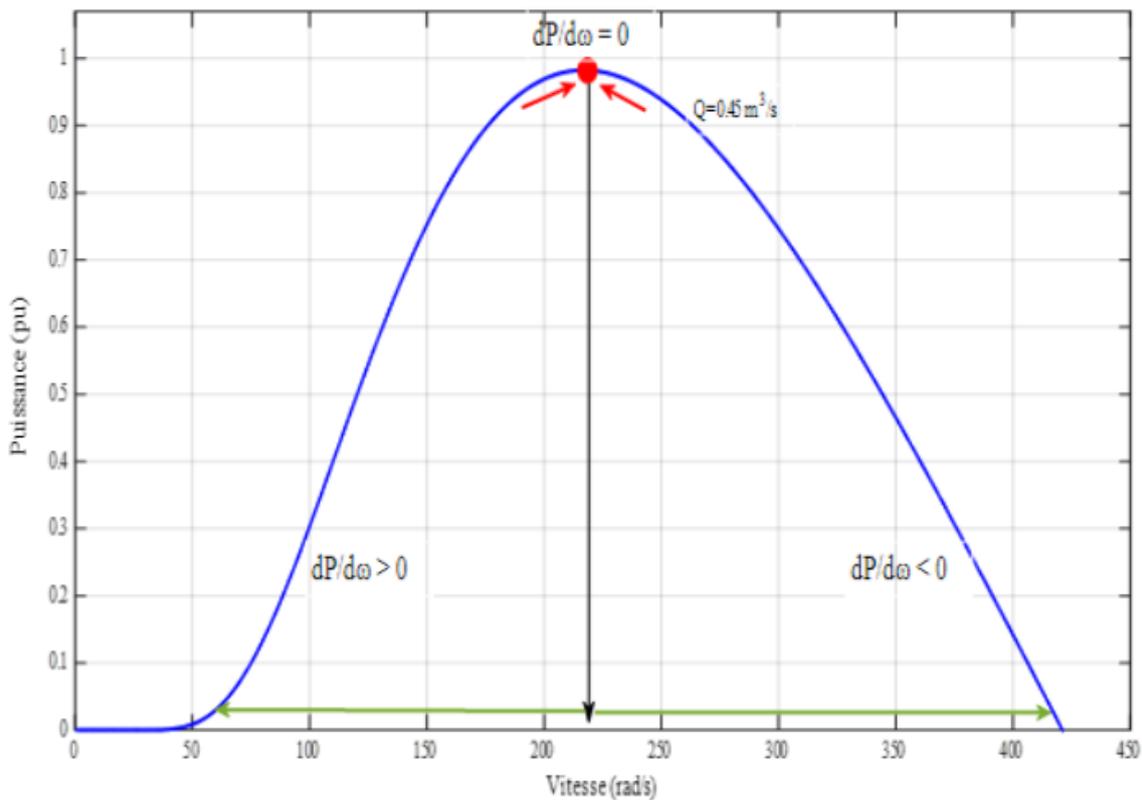


**Figure III.17:** Schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique [21]

Le pic de puissance se trouve au sommet de la courbe de puissance par rapport à la vitesse (figure (III.17)), laquelle varie selon la vitesse du vent à l'entrée de la turbine. L'algorithme MPPT peut identifier ces variations en temps réel et ainsi ajuster la turbine pour qu'elle opère à son rendement optimal [31].

Quand on se trouve du côté gauche du point de fonctionnement, une augmentation de la vitesse de rotation conduit à une augmentation de la puissance. Ainsi, pour se rapprocher du point optimal, il est nécessaire d'augmenter la vitesse [31].

Au-delà du point optimal, une augmentation de la vitesse entraîne une diminution de la puissance, ce qui signifie qu'il faut réduire la vitesse pour revenir au point optimal. Cela est souligné par des références [21].



**Figure III.18** : Principe de base de la poursuite du MPP [21].

Compte tenu de la lenteur de la variation du débit par rapport à la dynamique du système éolien, il est essentiel de considérer l'évolution temporelle de deux paramètres clés : la vitesse de rotation et la puissance, comme indiqué dans la référence [21].

### III.4.3 Contrôle vectoriel du générateur GSAP

Cette étude se concentre principalement sur le générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) en raison de ses avantages techniques et économiques par rapport à d'autres types de machines. Le GSAP ne nécessite pas de circuit externe pour son excitation et peut être de taille réduite en utilisant un pas polaire plus faible. Cependant, l'absence d'amortisseur peut poser des problèmes de stabilité en cas de surcharge ou de transitoires. Malgré cela, sa modélisation demeure relativement simple. Peu importe l'objectif de la commande, il est crucial de contrôler instantanément le couple [21], ce qui peut être réalisé en agissant sur les courants statoriques réels ou sur leurs composantes directes et en quadrature. Le principe de la commande vectorielle simplifie ce processus en choisissant un repère d'axe  $(o_d, o_q)$ , généralement lié au rotor dans le cas d'une machine synchrone, pour décrire le comportement de manière plus simple.

Le contrôle du générateur synchrone à aimant permanent repose sur le pilotage vectoriel des tensions statoriques [30]. Ce principe vise à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en

dissociant le courant statorique en deux composantes ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant. Ainsi, l'une des composantes ( $i_{qs}$ ) commande le couple électromagnétique tandis que l'autre ( $i_{ds}$ ) commande le flux. Ce concept est soutenu par des références [30].

La commande des tensions statoriques est réalisée en imposant des tensions de référence à l'entrée du convertisseur côté réseau offshore (onduleur). Ces tensions de référence sont utilisées pour définir les signaux de commande des bras de l'onduleur afin que les tensions aux bornes du stator du générateur soient aussi proches que possible des tensions de référence [21]. La structure de cette commande est présentée dans la figure (III.19) [81]. Les tensions du générateur GSAP dans le repère  $d_q$  sont exprimées par les équations III.12 :

$$\begin{cases} i_{qr}^* = 0 \\ i_{dr}^* = T * k \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec

$$k = \frac{2}{3p\psi} \quad (\text{III.13})$$

Le choix d'imposer  $i_{dr}^*$  à zéro permet d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'induit selon l'axe d et de réduire les pertes Joule.



est dicté en réalité, par l’algorithme de gestion qui décide dans quelle configuration la batterie doit fonctionner. Le deuxième objectif est de régler la tension du bus continu  $V_{dc}$ .

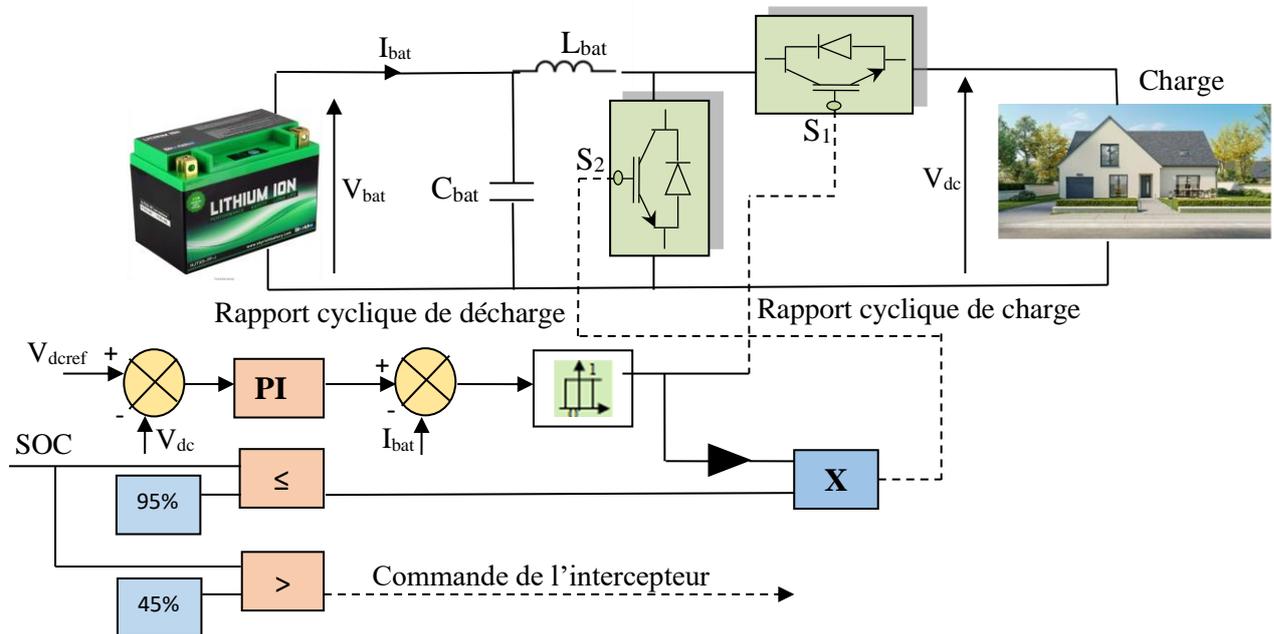
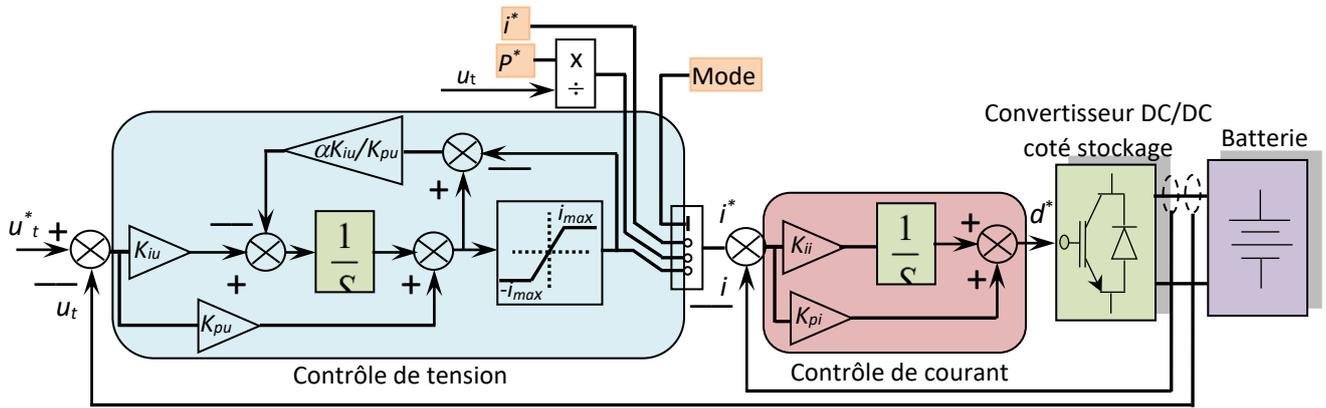


Figure III.20: Contrôle de la batterie [21]

La régulation de la tension du bus continu est mise en œuvre par l’hacheur réversible en courant à travers un régulateur classique PI (Proportionnel-Intégral). Comme le montre le schéma principal de la commande du convertisseur illustré dans la figure III.20 [21]. La tension du bus continu devient inférieure à la valeur de référence en cas où elle est insuffisante pour satisfaire les exigences de la charge. L’énergie manquante est obtenue à partir de la batterie, à condition que l’état de charge de la batterie se trouve dans les limites prédéfinies.

Typiquement, l’état de charge (SOC) de la batterie Lithium est compris entre 45 % et 95 %. En effet, dans notre étude, pendant le fonctionnement normal de la batterie, le SOC est considéré dans la plage ( $SOC_{min} = 45\%$ )  $<SOC<$  ( $SOC_{max} = 95\%$ ).



**Figure III.21:** Schéma de contrôle pour le convertisseur côté stockage rattaché à la batterie [21]

La batterie fonctionnera en mode charge, décharge ou flottant selon les besoins énergétiques, et ces modes sont gérés en fonction de la tension du bus continu au point de couplage de la batterie. Ainsi, la batterie doit fournir le niveau de tension continue requis sous différents modes de fonctionnement de la charge [21]. Le courant de référence est limité par le système de gestion de batterie à des fins de protection. Le profil de référence d'un courant, ainsi que la conception du contrôleur, dépendent fortement de l'application finale de la batterie. L'objectif du convertisseur de la batterie est de maintenir une tension constante sur le bus continu, garantissant que l'ondulation de la tension du condensateur reste bien inférieure à la tension en régime permanent [21].

La batterie lithium est connectée au bus continu commun via le convertisseur continu abaisseur. La tension de liaison continue détectée ( $V_{dc}$ ) est comparée à la référence de liaison continue ( $V_{dc}^*$ ), et l'erreur est transmise au contrôleur PI pour obtenir la référence de courant de batterie ( $i_{bat}$ ) selon [91].

$$i_{bat}^* = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (III.14)$$

Où :  $k_p$  et  $k_i$  sont les gains proportionnels et intégraux pour la boucle de contrôle externe.

Le courant de référence de la batterie est comparé au courant de batterie détecté ( $i_{bat}$ ), et l'erreur est transmise au contrôleur PI pour obtenir le signal de commande ( $d_{s3,s4}$ ) comme suit :

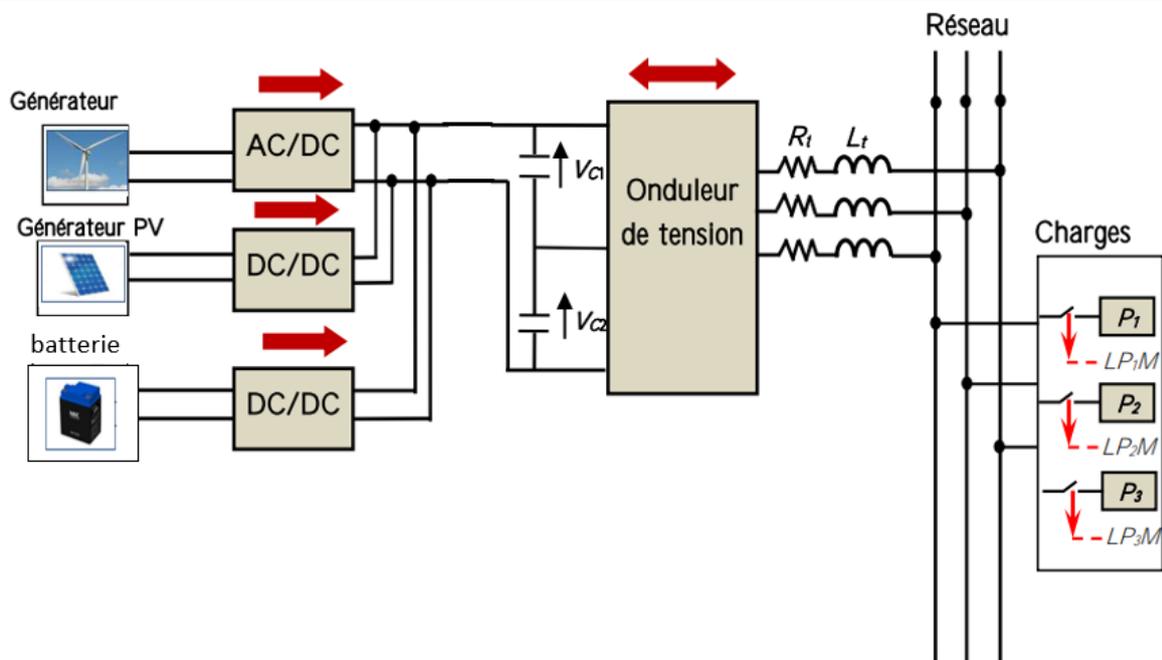
$$d_{s3,s4} = k_p (i_{bat}^* - i_{bat}) + k_i \int (i_{bat}^* - i_{bat}) dt \quad (III.15)$$

où :  $k_p$  et  $k_i$  sont les gains proportionnels et intégraux de la boucle de régulation interne. Comme indiqué, en mode « charge à courant constant », un courant constant est appliqué aux bornes de la batterie, ceci est assuré par la boucle de contrôle de courant du convertisseur DC-

DC auquel la batterie est connectée. La cellule de la batterie doit être correctement surveillée afin d'éviter une surcharge et une décharge excessive. Une fois que la tension de la cellule atteint la tension de charge maximale, le contrôleur passe en mode tension constante [21].

### III.6 Contrôle du bus continu

Nous envisageons l'utilisation d'un convertisseur à trois niveaux pour connecter le système hybride au réseau, comme illustré dans la Figure III.26, en utilisant un filtre RL pour éliminer les harmoniques générées par la commutation du convertisseur. La structure proposée du système global offre l'avantage d'assurer l'équilibrage du bus continu sans nécessiter l'utilisation de l'algorithme des vecteurs redondants dans la commande du convertisseur à trois niveaux.



**Figure III.22:** Structure proposée du système et contrôle du convertisseur coté réseau.

L'utilisation d'un convertisseur électronique à source de tension pour se connecter à la charge permet de régler les courants envoyés vers la charge et donc d'échanger la puissance active et réactive avec celle-ci, ajustant ainsi leurs phases et amplitudes. La commande de ce convertisseur, illustrée dans la Figure III.22, est conçue pour atteindre deux objectifs principaux : régler la tension du bus continu et contrôler la fréquence et l'amplitude de la tension [93]. Pour transmettre ces puissances de référence, les courants de référence peuvent être déterminés selon les équations suivantes :

$$i_{td-ref} = \frac{P_{t-ref}u_{sd} + Q_{t-ref}u_{sq}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \quad (III.16)$$

$$i_{tq-ref} = \frac{P_{t-ref}u_{sq} + Q_{t-ref}u_{sd}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \quad (III.17)$$

La structure du dispositif de commande du convertisseur présentée par la figure (III.23) comprend trois fonctions de régulation successives : la régulation de la tension du bus continu (boucle externe) et la régulation des puissances et des courants transités (boucle interne).

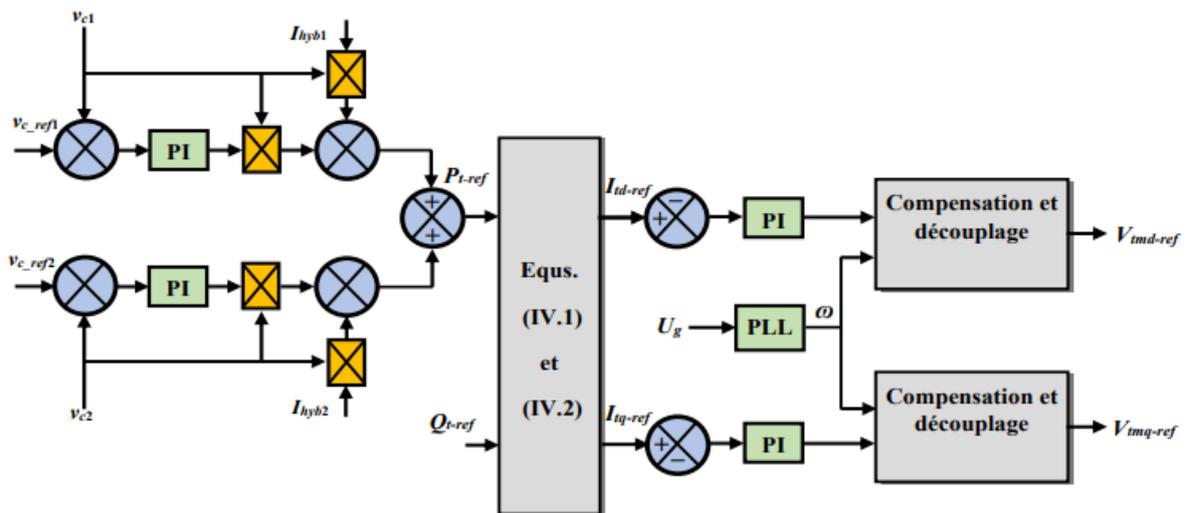


Figure III.23: Dispositif de commande du convertisseur coté réseau [21]

### III.7 Système de supervision et de gestion

#### III.7.1 Schéma de supervision du SEH

Le module de supervision représente la partie la plus importante du système global proposé puisqu'il supervise les modes de fonctionnement tout en gardant une transition lissée entre ces derniers, d'autre part, il gère l'échange de puissance entre les différents composants du système multi-sources, stockage et le réseau/charge [21]. En outre, le superviseur assure le fonctionnement optimal des différents composants du système hybride par action sur leurs convertisseurs associés (les contrôleurs locaux) comme le montre la figure III.28.

L'algorithme proposé est conçu de telle sorte à garder un équilibre entre le système hybride et la charge/réseau pour tout échange de puissance ou scénario possible, dans le but d'augmenter l'efficacité énergétique du système hybride, sa fiabilité ainsi son taux de pénétration.

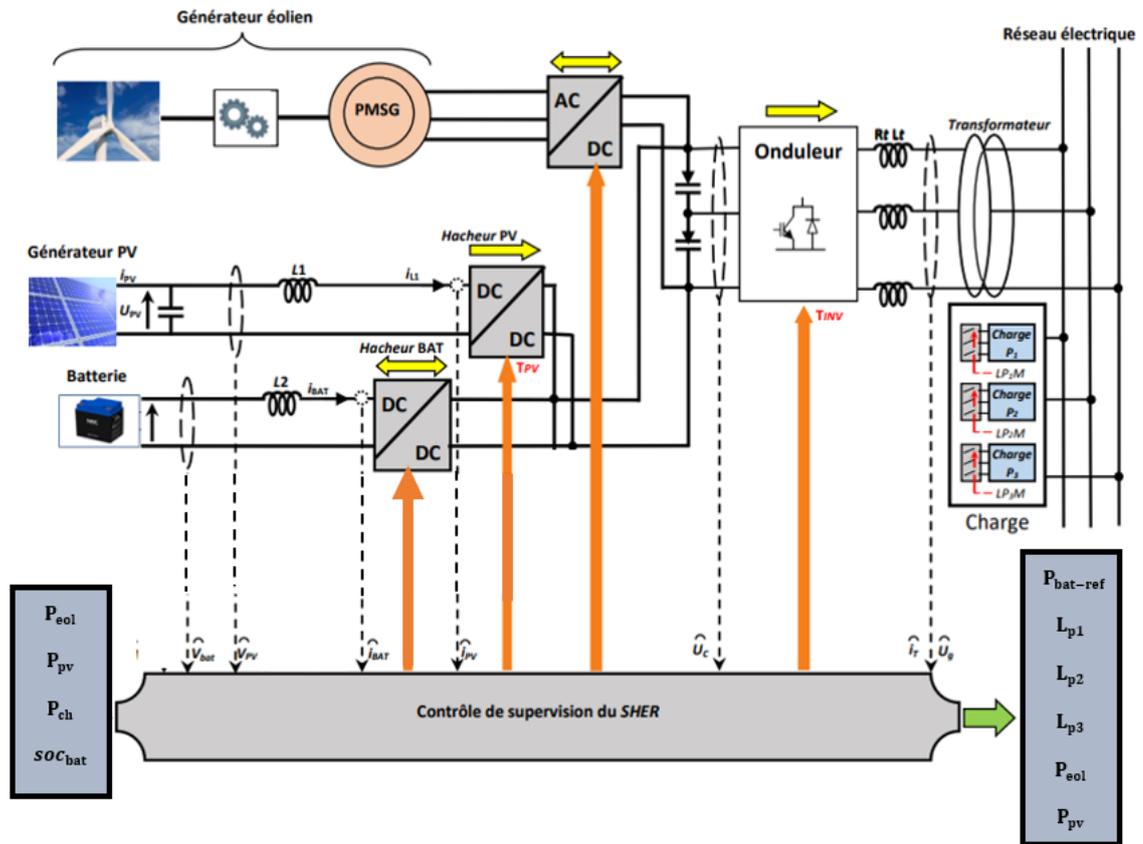


Figure III.24: Schéma de supervision du SEH proposé

La supervision du système global peut se résumer comme suit [21]:

- 1- Initialement, le système de stockage est chargé ;
- 2- Selon l'état de charge global du système de stockage, le profil de la charge, la puissance produite PV/éolienne, le superviseur dirige le système global vers un mode de fonctionnement bien déterminé ;
- 3- Une flexibilité entre les différents modes de fonctionnement doit être assurée ;
- 4- Le système global proposé peut fonctionner en mode isolé ainsi en mode connecté ;
- 5- Le contrôleur sera capable de superviser une source d'énergie renouvelable seule ou des systèmes multi-sources ;
- 6- Si le système multi-stockage est complètement chargé (SOC atteint son Max), il sera déconnecté et le surplus d'énergie produite par le système multi-sources est injecté vers le réseau. Ce surplus doit être limité d'une façon équilibrée entre les unités de production en cas où la charge impose une limite ;
- 7- Dans le cas de déficit de production et le système de stockage en état de décharge, les charges seront déconnectées selon l'ordre de priorité. Si le système de stockage continu

à se décharger jusqu’au minimum, ce dernier sera déconnecté afin d’éviter une décharge profonde et seule la charge principale (avec haute priorité) sera soutenue par le réseau ; La gestion d’énergie entre les différentes sources constituant notre système hybride : PV, éolien, batterie est assurée par une technique bien déterminée. Elle a été conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de l’ensemble SEH autonome mentionnés ci-dessus. Le principe de fonctionnement de la stratégie de gestion de l’énergie proposée est représenté par l’organigramme de la figure III.25.

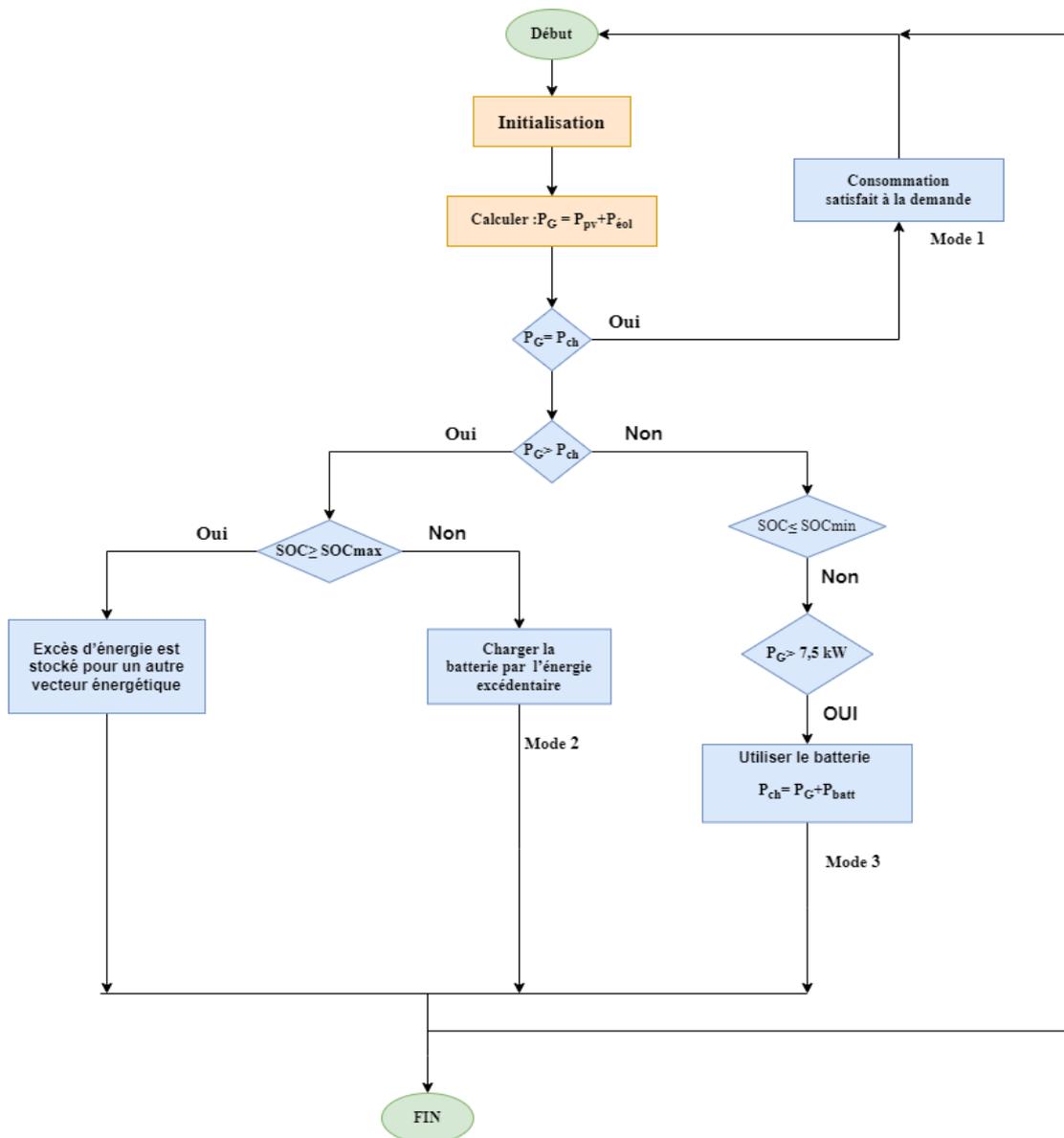


Figure III.25: Organigramme de supervision de gestion

Nous commençons par l’initialisation des :

- ✚ Paramètre des différents sous-systèmes,
- ✚ Données climatiques : la température, l'éclairement et la vitesse du vent.

Pour le système autonome intégré PV/éolien/batterie, les sources d'énergie renouvelables photovoltaïques et éoliennes ont été désignées comme source d'alimentation principale, tandis que le composant de pile à combustible est installé comme source d'énergie de secours. La stratégie de gestion de l'énergie adoptée dans la recherche se concentre sur l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelables photovoltaïques et éoliennes et sur l'état de charge de la batterie de stockage.

### III.7.2 Modes et scénarios du fonctionnement du système hybride

#### 1. Mode 1 : Etat de charge constante et alimentation d'un autre vecteur énergétique

Ce mode est illustré sur la figure III.25. il y a une égalité entre la puissance totale produite par les sources principales et la puissance requise par la charge (production  $P_G$  = consommation  $P_{ch}$ ). Par effet, l'état de charge de la batterie reste constant (batterie au repos), à condition de supposer que le phénomène d'auto- décharge est négligé. Les unités de production PV/éolien produisent de l'énergie électrique suivant les conditions climatiques en se fonctionnant en mode MPPT. Le système hybride satisfait la demande.

#### 2. Mode 2 : Charge de la batterie

Le système passe en mode 2, comme il est indiqué sur la figure III.25, lorsque la puissance globale générée par le panneau PV et l'éolienne est supérieur à la puissance demandée pour satisfaire la charge ( $P_G > P_{ch}$ ). Cela signifie que la puissance générée par les sources principales disponibles (PV et éolien) est supérieure à la demande de la charge et il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et stocker l'énergie excédentaire dans la batterie jusqu'à SOCmax. Dans ce mode, la puissance suffisante disponible à partir du panneau PV est utilisée pour satisfaire la charge et la puissance de l'éolienne est alimentée à l'aide d'une commande adéquate. L'énergie excédentaire de l'éolienne peut être utilisée pour charger la batterie. Il est nécessaire de limiter la puissance produite en balance entre le générateur éolien et le générateur PV.

#### 3. Mode 3 : Décharge de la batterie à un niveau très bas

Ce mode qui est présenté sur la figure III.25, est survenu quand la différence entre la puissance générée et la puissance demandée, est inférieure à zéro ( $P_G - P_{ch} < 0$ ), cela indique que l'énergie produite par les sources renouvelables n'est pas suffisante pour faire alimenter la charge. Dans ce cas, la batterie intervient pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge jusqu'à sa limite inférieure SOCmin. En

effet, la pile à combustible est déconnectée (source de secours). Pour éviter une décharge rapide et conserver l'équilibre du système hybride, l'algorithme de supervision déconnecte la charge attribuée à la plus faible priorité.

Si le SEH ne peut pas répondre à la puissance requise pour la Charge initiale, des batteries seront utilisées pour couvrir la demande de charge jusqu'à ce qu'elles soient réduites à leur niveau minimum  $E_{B_{min}}$  [10]. La Charge secondaire CHS non satisfaite sera reportée au moment de la génération de surplus

### III.8 Résultats de simulation et interprétations

La simulation du système hybride, combinant des panneaux solaires (PV), des éoliennes et des batteries de stockage, a produit des résultats prometteurs quant à sa performance énergétique et sa fiabilité. Effectuée dans le but de vérifier et valider le schéma proposé, elle est évaluée à l'aide du logiciel MATLAB/Sim Power System.

Les paramètres du système proposés sont répertorié dans les tableaux suivants :

Désignation	Symbole	Valeur
Masse volumique de l'air	$\rho$	1.225 Kg/m <sup>3</sup>
Surface balayée	S	1.225 Kg/m <sup>3</sup>
Coefficient optimal	$K_{opt}$	1.67*10-3 Nm/ (rad/s) <sup>2</sup>
Vitesse du vent nominal	V	12 m/s
Vitesse en bout de pales	$\lambda$	8,1
Paires de pôles	$p$	18
Vitesse nominale	$\Omega$	153 rad/sec
Résistance statorique	$R_s$	0.17 $\Omega$
Flux efficace	$\Phi$	0,526 Wb
Inductance statorique	$L_s$	8,3 mH
Puissance nominale	$P_n$	200 kW
Inertie du générateur	$i_g$	50 kg.m <sup>2</sup>
Couple nominale	$C_n$	40 Nm
Type	Synchrone à aimant permanent 3 ~	

**Tableau III.3:** Caractéristiques du générateur éolien

Désignation	Symbole	Valeur
La puissance maximale	$P_{max}$	200W
La puissance nominale	$P_n$	200W
Nombre de celle/module	$N_{c/m}$	40500
Nombre de module connectés en série/chaine	$N_s$	300
Nombre de chaines parallèles	$N_p$	135
Tension du circuit ouvert	$V_{oc}$	33,2 V
Le courant de court-circuit	$I_{sc}$	8,36
La tension au point de puissance maximale	$V_{cmax}$	660V
Le courant au point de puissance maximale	$I_{cmax}$	7,52A
Résistance série	$R_s$	0.005 $\Omega$
Résistance parallèle	$R_{sh}$	250 $\Omega$
Courant de saturation de diode	$I_{o,n}$	1,2.10-7 A
Courant de photo-généré	$I_{ph}$	7,145 A

**Tableau III.4:** Caractéristique du panneau photovoltaïque

Type	Lithium-ion	
Désignation	Symbole	Valeur
Tension	$V_n$	250 V
Capacité nominale	$C_n$	600Ah
Résistance	$R_{bat}$	0.001 $\Omega$

**Tableau III.5:** Paramètres de la batterie

Désignation	Symbole	Valeur
Tension nominale du bus continu	$V_{dc}$	450 V
Capacité équivalente	$C_{bc}$	12 $\mu$ F

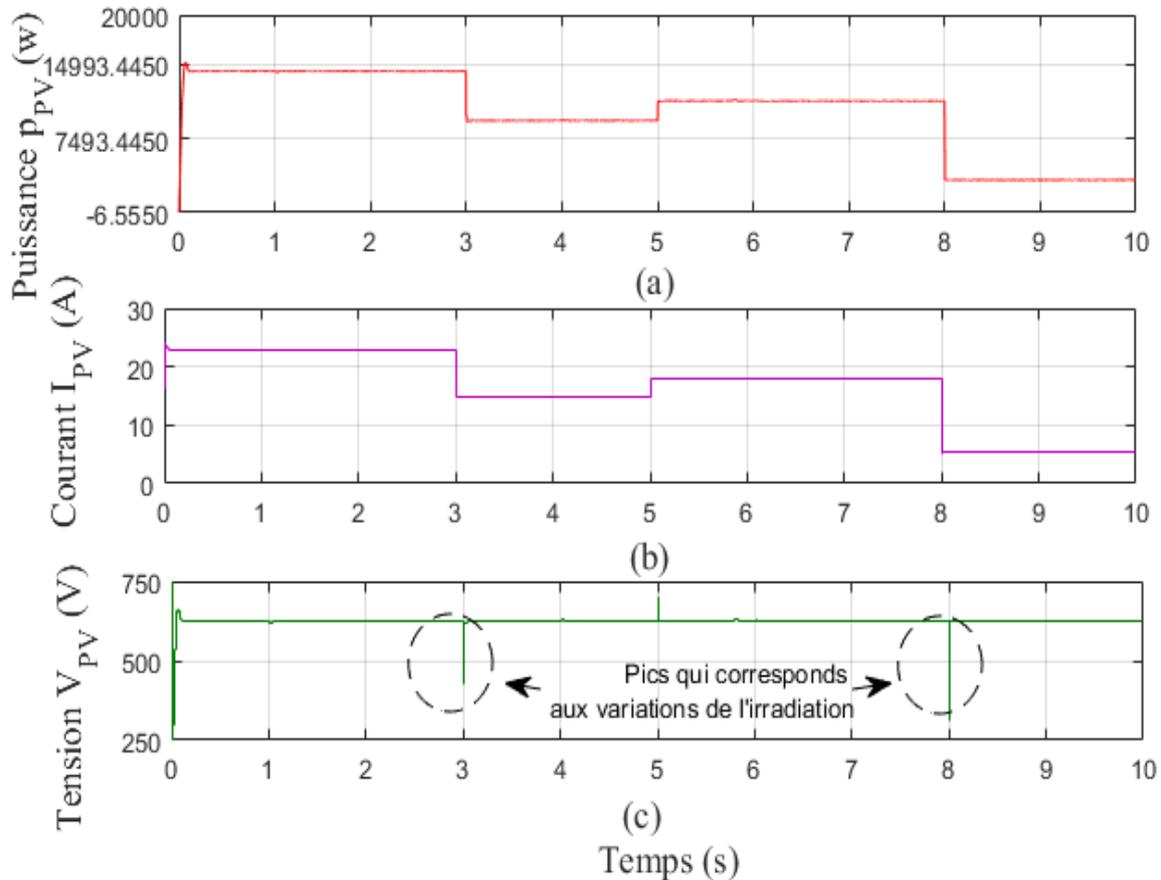
**Tableau III.6:** Caractéristiques de Bus continu

	Désignation	Symbole	Valeur
	Fréquence	f	50 Hz
<b>Charge 1</b>	Tension entre phases nominale	$U_{nch1}$	385V
	Puissance nominale	$P_{nch1}$	6 kW
<b>Charge 2</b>	Tension entre phases nominale	$U_{nch2}$	385V
	Puissance nominale	$P_{nch2}$	5 kW
<b>Charge 3</b>	Tension entre phases nominale	$U_{nch3}$	385V
	Puissance nominale	$P_{nch3}$	4 kW
<b>Charge 4</b>	Tension entre phases nominale	$U_{nch4}$	385V
	Puissance nominale	$P_{nch4}$	2.5 kW

**Tableau III.7:** Caractéristiques de la charge

### III.8.1 Performances du générateur PV

Le modèle proposé a été validé dans différentes conditions de fonctionnement liées au profil de l'irradiation et de la température. Des outils de MATLAB/Simulink ont été utilisés pour simuler le modèle du panneau solaire. En conséquence, cette section présente et examine les résultats obtenus en utilisant les modèles suggérés. Nous nous concentrons sur l'efficacité du contrôle de puissance et la gestion du système.



**Figure III.26 :** Caractéristiques du générateur photovoltaïque puissance (a), courant (b) et tension (c)

Variation de temps	Générateur PV
[0 s, 3 s]	L'irradiation frappe le générateur photovoltaïque avec une intensité remarquable de 1500 watts par mètre carré. Les panneaux solaires captent cette énergie solaire abondante, la convertissant efficacement en électricité.
[3 s, 5 s]	L'irradiation diminue légèrement à 1000 watts par mètre carré. Bien que cette diminution soit perceptible, les panneaux solaires continuent de fonctionner efficacement, adaptant leur production d'électricité pour correspondre à cette nouvelle condition d'irradiation.
[5 s, 8 s]	L'irradiation connaît une légère augmentation, remontant à 1200 watts par mètre carré. Cette variation témoigne de la nature dynamique de l'énergie solaire, influencée par des facteurs tels que la position du soleil et les conditions météorologiques.
[8 s]	D'irradiation mettent en évidence l'importance de la gestion dynamique de l'énergie solaire dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que la capacité des panneaux solaires à s'adapter aux conditions changeantes pour assurer une production d'électricité continue et fiable.

**Tableau III.8:** les variations de l'irradiation d'un générateur PV

Les résultats soulignent la capacité des générateurs photovoltaïques à fonctionner efficacement dans une gamme variée de conditions d'irradiation, démontrant ainsi leur polyvalence et leur potentiel à fournir une source d'énergie fiable et renouvelable

### III.8.2 Performances du générateur éolien

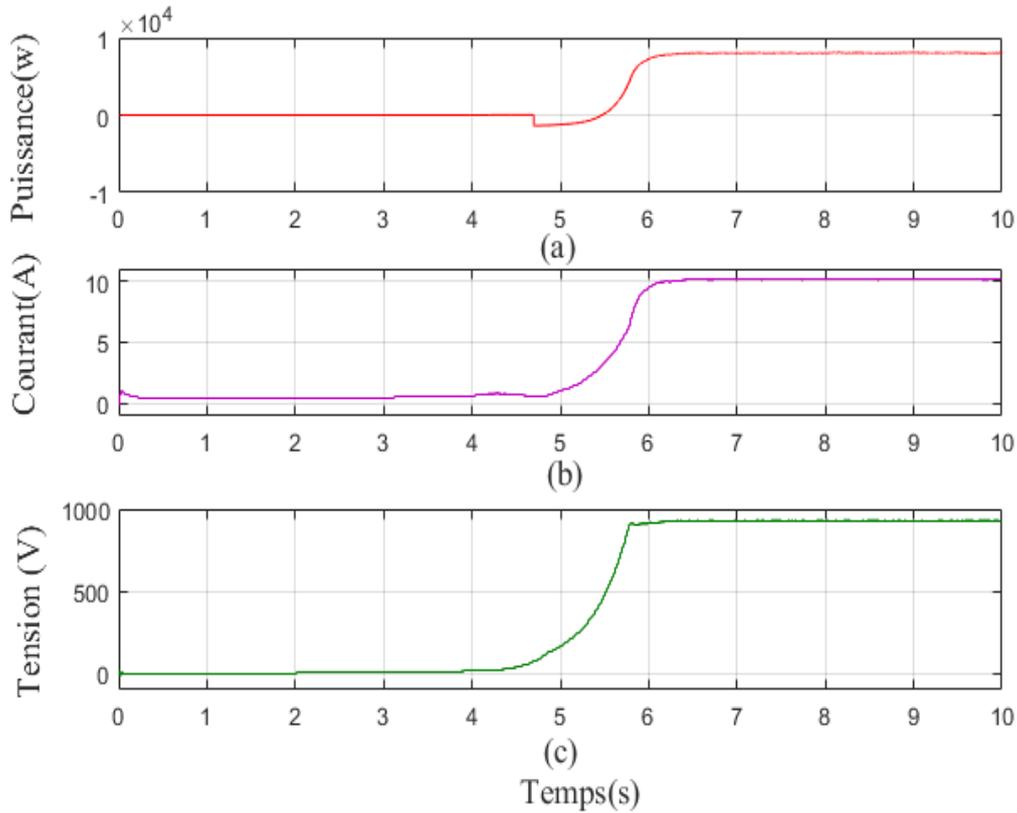


Figure III.27: Caractéristiques du générateur éolien : (a) puissance délivrée, (b) courant, (c) tension

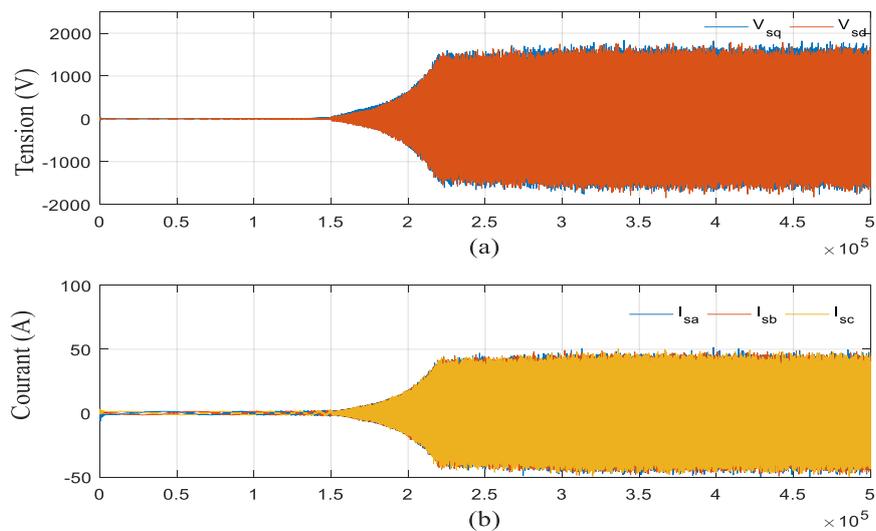


Figure III.28: Tension (a), Courant (b) délivrés par le générateur GSAP.

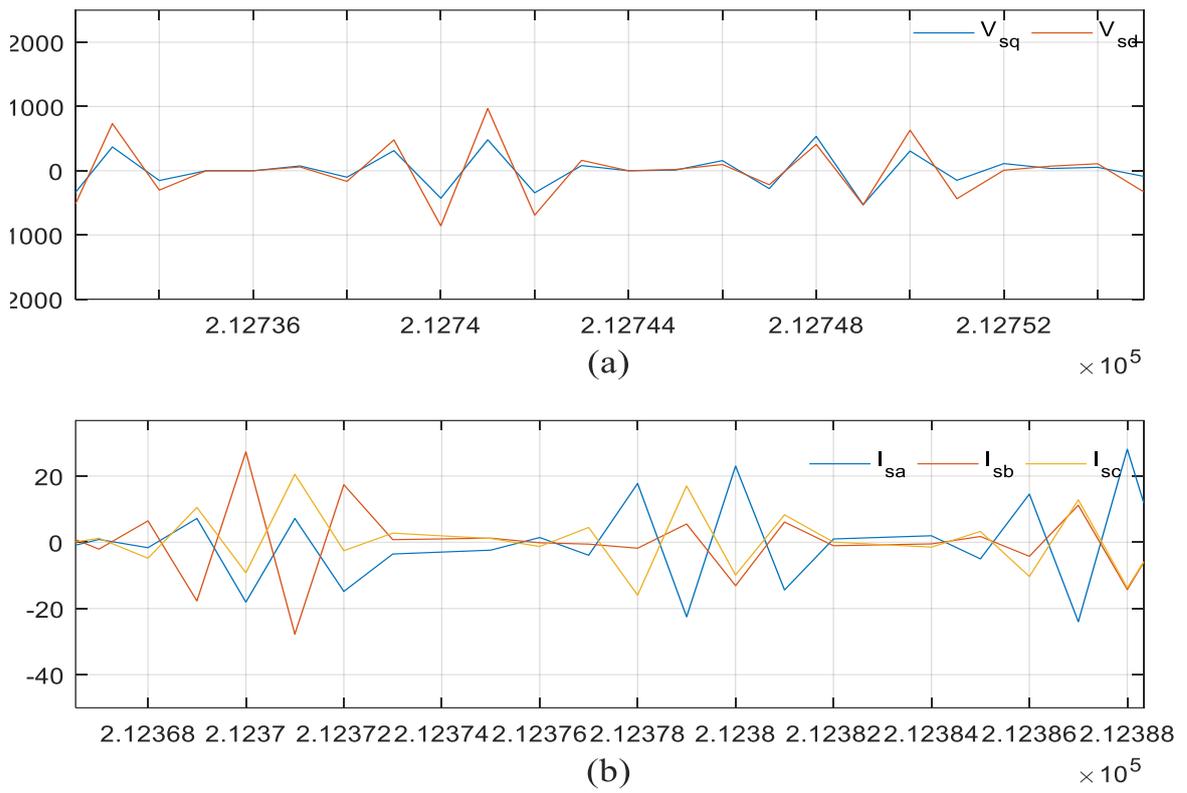


Figure III.29: Zoom Tension (a), Courant (b) délivrés par le générateur GSAP.

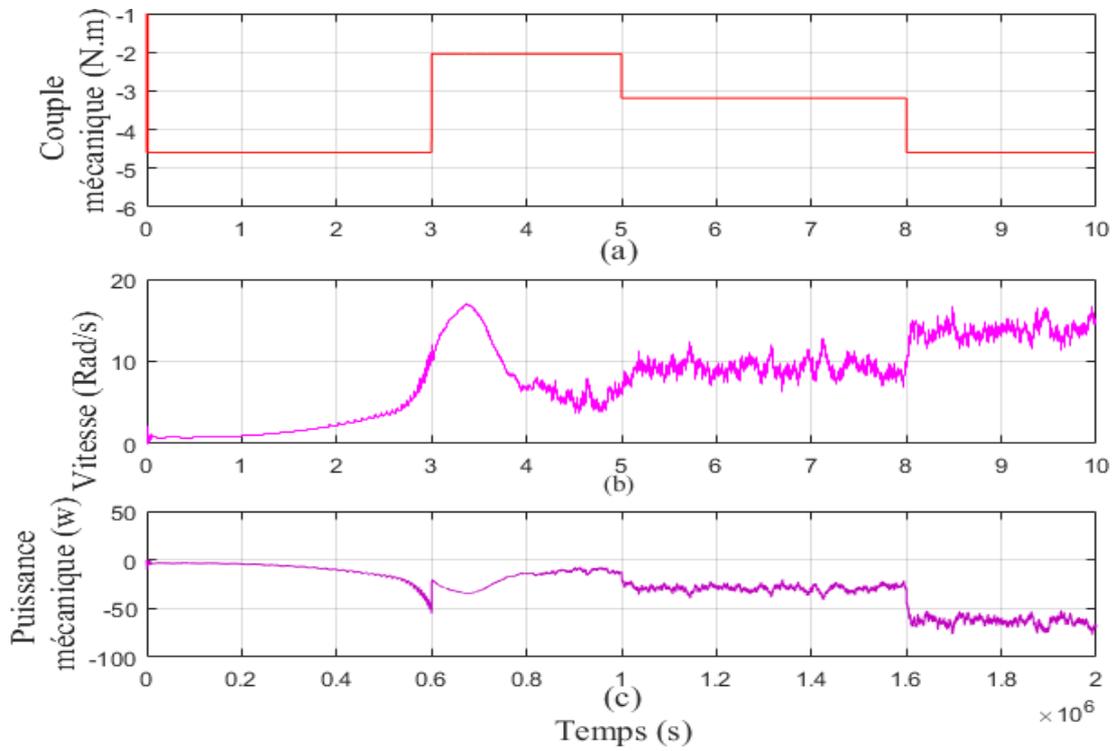


Figure III.30: Caractéristiques mécanique du générateur éolien GSAP , courant(a), vitesse(b) et Puissance (c).

Variation de temps	Générateur éolien
[0 s, 3 s]	Le générateur éolien est exposé à une vitesse du vent de 7 m/s. À cette vitesse, le vent commence à exercer une force sur les pales du rotor, entraînant une rotation qui initie la production d'électricité. Bien que la vitesse du vent soit relativement modérée, le générateur éolien commence à générer de l'électricité.
[3 s, 8 s]	La vitesse du vent augmente à 8 m/s. Cette augmentation de la vitesse du vent entraîne une augmentation de la production d'électricité du générateur éolien. Les pales du rotor captent davantage d'énergie cinétique du vent, augmentant ainsi la rotation du rotor et la production d'électricité.
[5 s, 8 s]	La vitesse du vent atteint 10 m/s. À cette vitesse, le générateur éolien fonctionne à son rendement optimal. Les pales du rotor sont soumises à une force de vent idéale, ce qui permet une conversion maximale de l'énergie cinétique du vent en électricité. La production d'électricité du générateur éolien est à son maximum.
[8 s]	la vitesse du vent diminue légèrement à 9 m/s. Bien que la vitesse du vent ait diminué par rapport au maximum atteint précédemment, le générateur éolien continue de fonctionner efficacement. Les pales du rotor continuent de tourner et de produire de l'électricité, bien que la production puisse être légèrement réduite par rapport au pic observé précédemment.

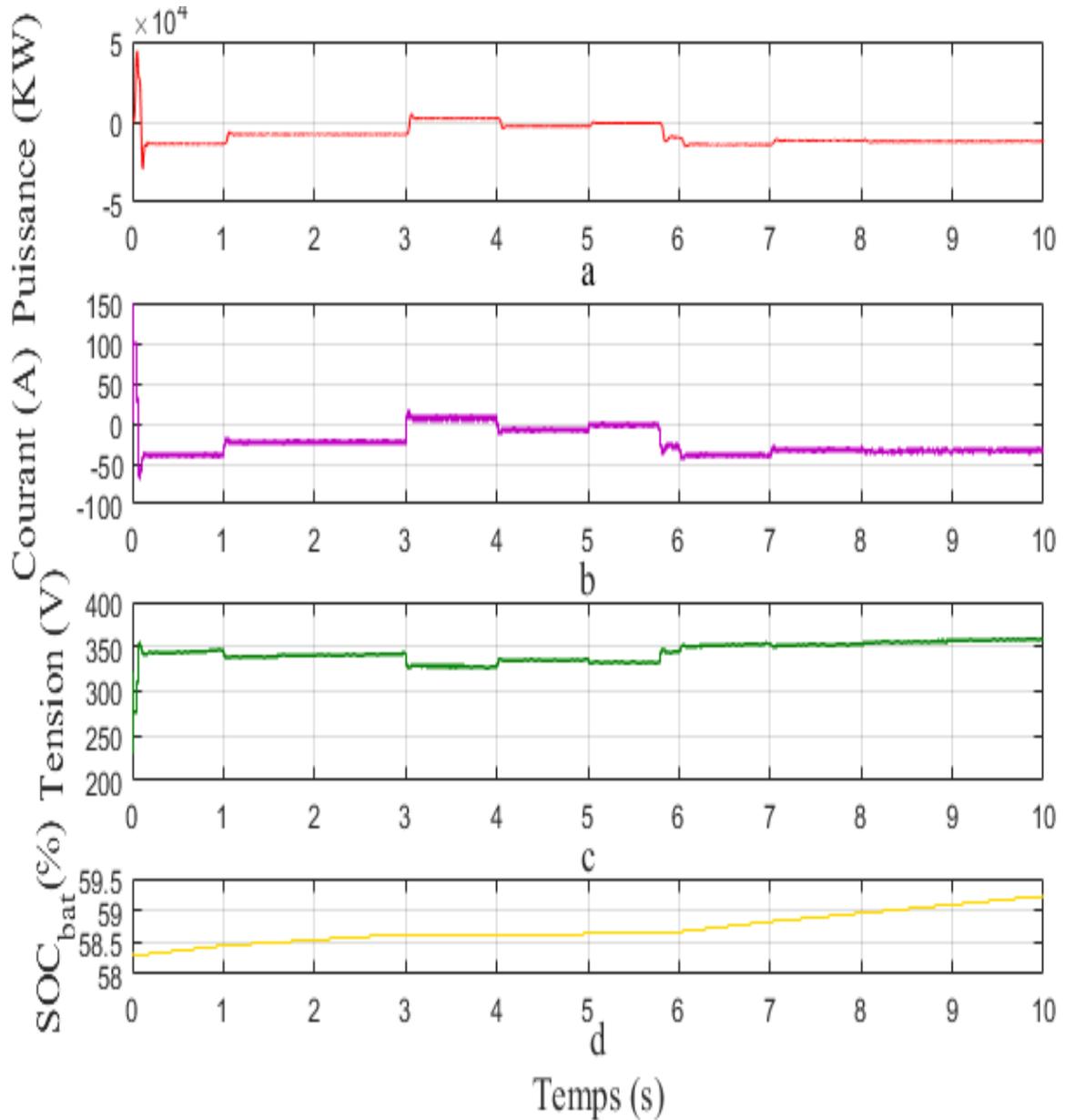
**Tableau III.9:** les variations de l'irradiation d'un générateur

Ces variations de vitesse du vent mettent en évidence l'impact direct sur la production d'électricité d'un générateur éolien. La capacité du générateur à s'adapter aux variations de la vitesse du vent lui permet de fournir une source d'énergie stable et fiable, même dans des conditions météorologiques changeantes.

### III.8.3 Performances de la batterie

Dans la figure (III.31), nous présentons les courants, les tensions et l'état de charge global (SOC) du périphérique de stockage. Le modèle de la batterie alimente une charge de 6.5 ohms par l'intermédiaire d'une source de tension de 500 V. À ce stade, la diode est coupée car la tension de la batterie est inférieure à 471 V. Entre les instants 100 et 700 secondes, la tension de la source diminue à 100 V, permettant à la diode de commencer à conduire ; la tension de charge est alors déterminée par la tension de la batterie qui se décharge. Lorsque la tension de la source est rétablie, le processus de recharge de la batterie commence et se termine lorsque la montée de la tension s'arrête ou atteint 475 V. Le processus simulé est illustré à la Figure (III.31). On observe qu'au moment où la tension de la source est rétablie, la tension de la batterie passe de 470 à 410 V, et la charge diminue de 15 %. L'état de la batterie revient à son niveau initial vers 2500 s.

La figure (III.28) illustre la réponse de la commande pour maintenir la tension du bus constante  $V_{bus} = 400V$  face à la variation du courant de la charge. Le mode de fonctionnement du convertisseur (charge ou décharge) est régi par le sens du courant. En effet, pour le mode charge, le courant de la batterie est considéré positif, tandis que pour le mode décharge, il est négatif.

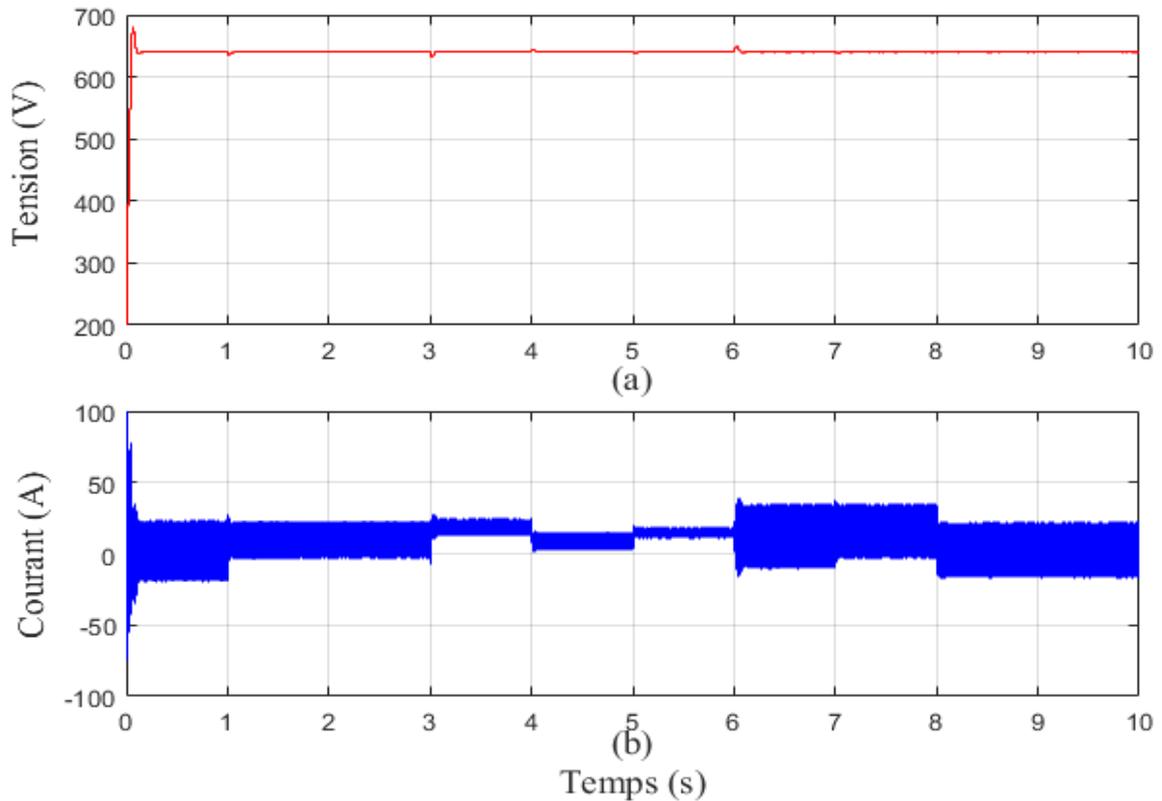


**Figure III.31:** Puissance (a), courant (b), tension (c) et SOC de la batterie (d).

Le passage entre les deux modes est géré par l'algorithme de gestion, qui décide en fonction du sens du courant (positif ou négatif) d'activer le convertisseur abaisseur (buck) ou élévateur (boost) pour charger ou décharger la batterie. Pour tester la commande du convertisseur bidirectionnel (en mode décharge), nous avons considéré une variation du courant de la charge. Cette variation se traduit par une perturbation au niveau de la tension du bus continu.

**III.8.4 Performances Bus continu :**

A partir de la figure III.32, on constate que la tension du bus continu suit convenablement sa référence dans l'intervalle de simulation avec un régime transitoire très rapide et sans dépassement même en présence des contraintes de fonctionnement. Comme on peut le voir sur la même figure, la tension et le courant à la sortie du redresseur, ces grandeurs sont maintenues dans ses valeurs nominales.



**Figure III.32:** Tension et courant du bus continu, tension (a) et courant (b)

**III.8.5 Caractéristiques de la charge**

Le raccordement de la chaîne de conversion hybride à la charge donne les résultats de simulation ci-dessous. Les tensions et les courants triphasés sont exposés sur les figures III.33, III.34, III.35, III.36 et III.37. Des agrandissements de ces grandeurs sont représentés sur les figures III.33, III.34, III.35, III.36 et III.37.

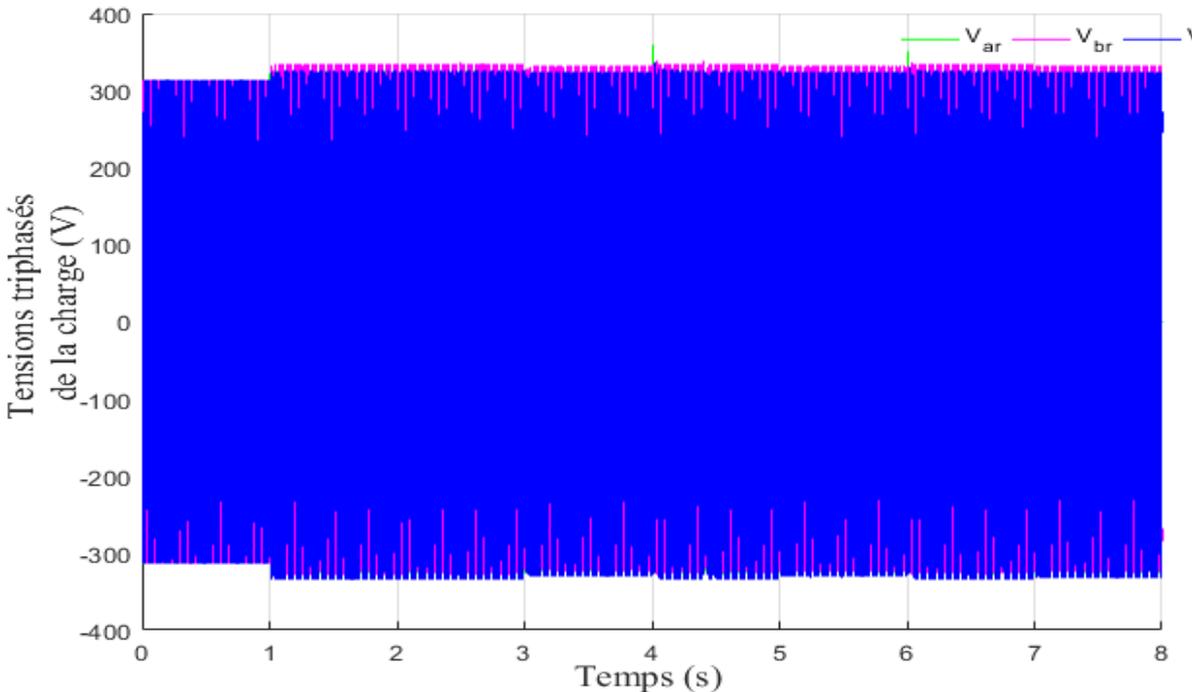


Figure III.33: Tensions triphasées de la charge

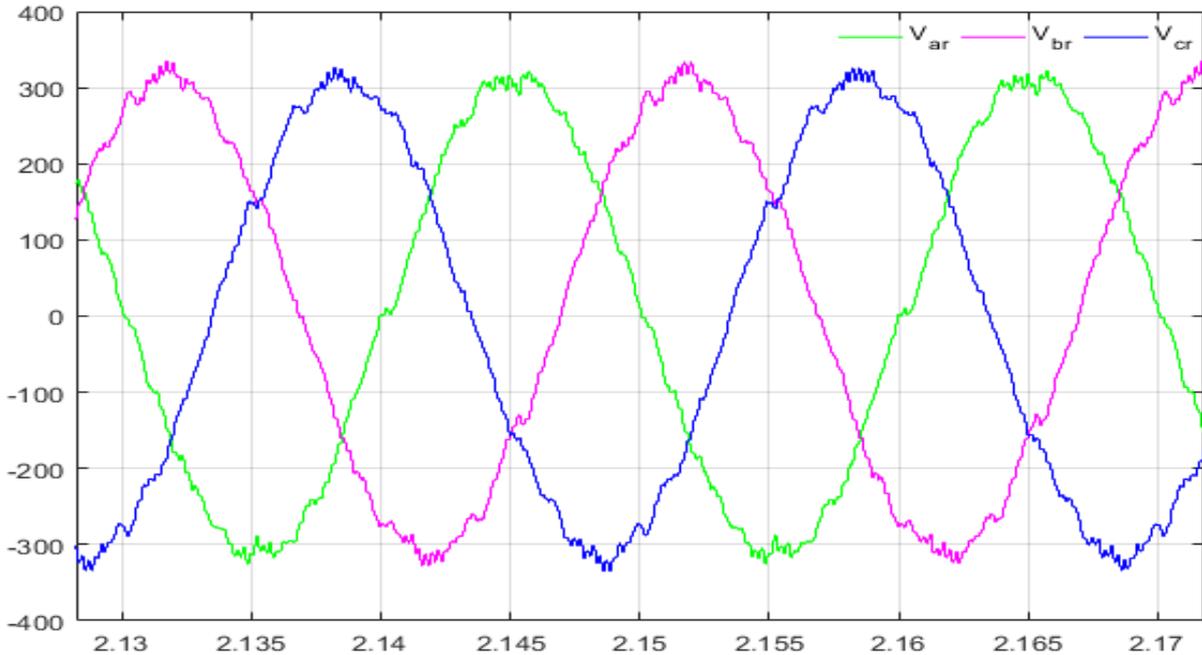


Figure III.34: Zoom des tensions triphasées de la charge

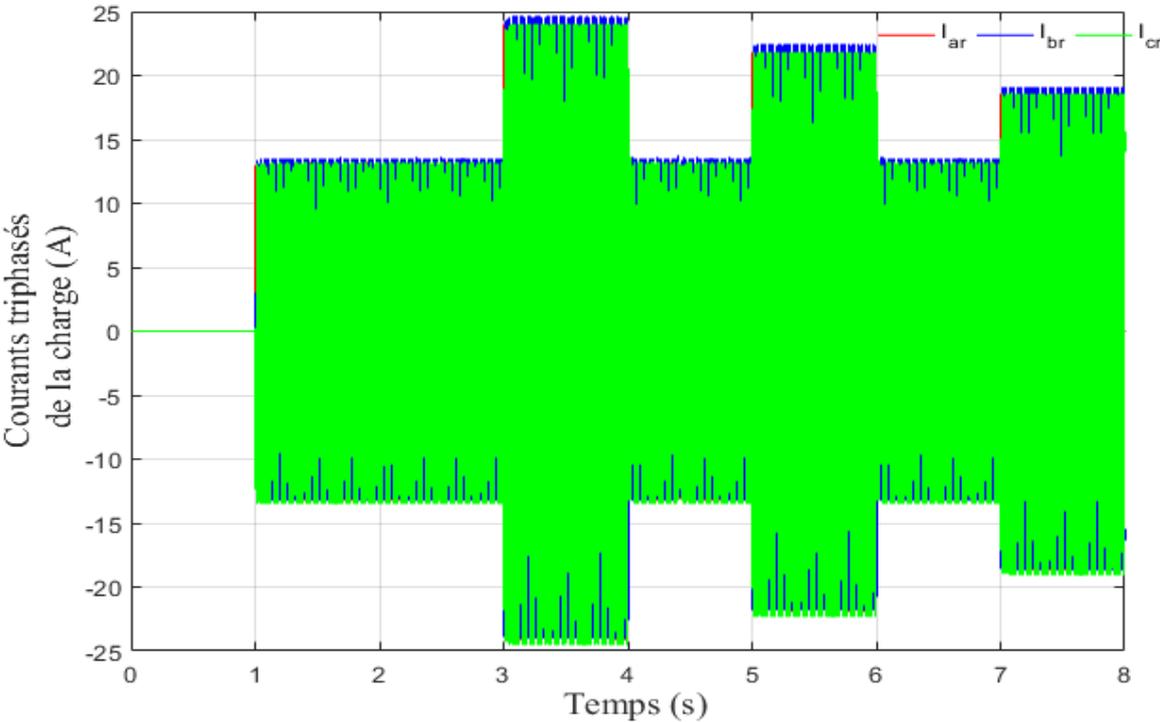


Figure III.35: Courants triphasés de la charge

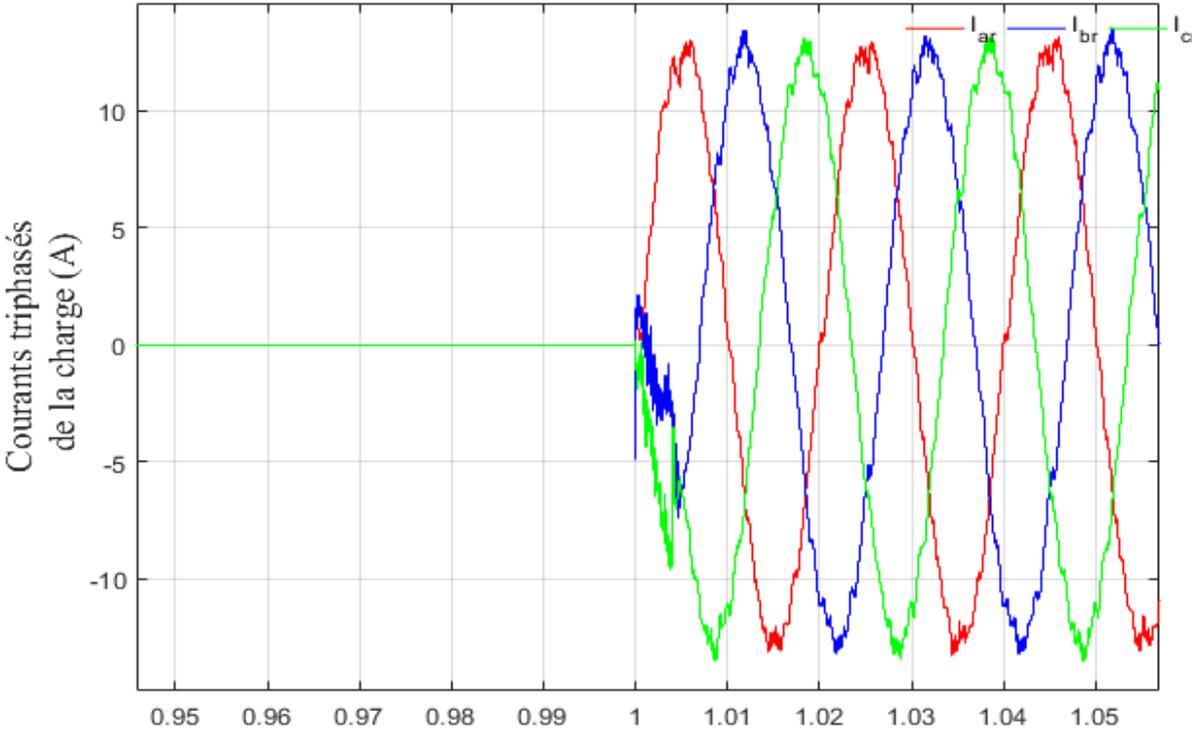
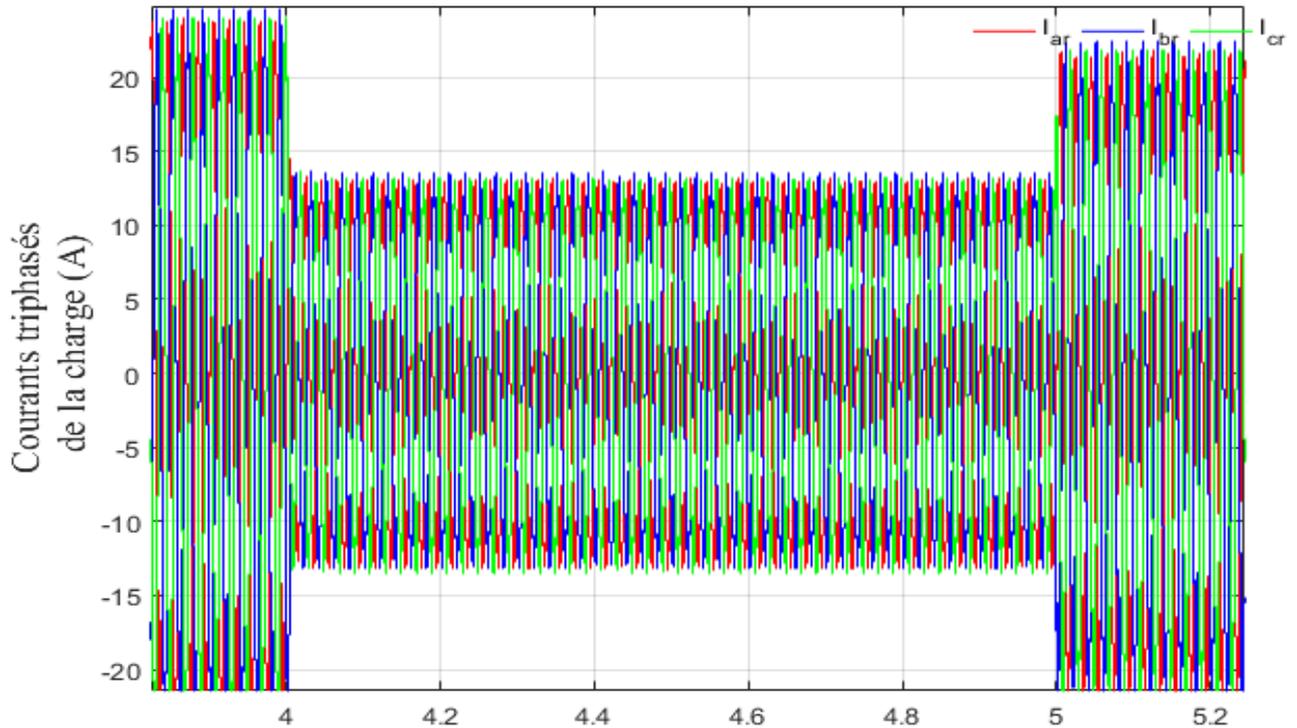


Figure III.36: Zoom des courants triphasés de la charge



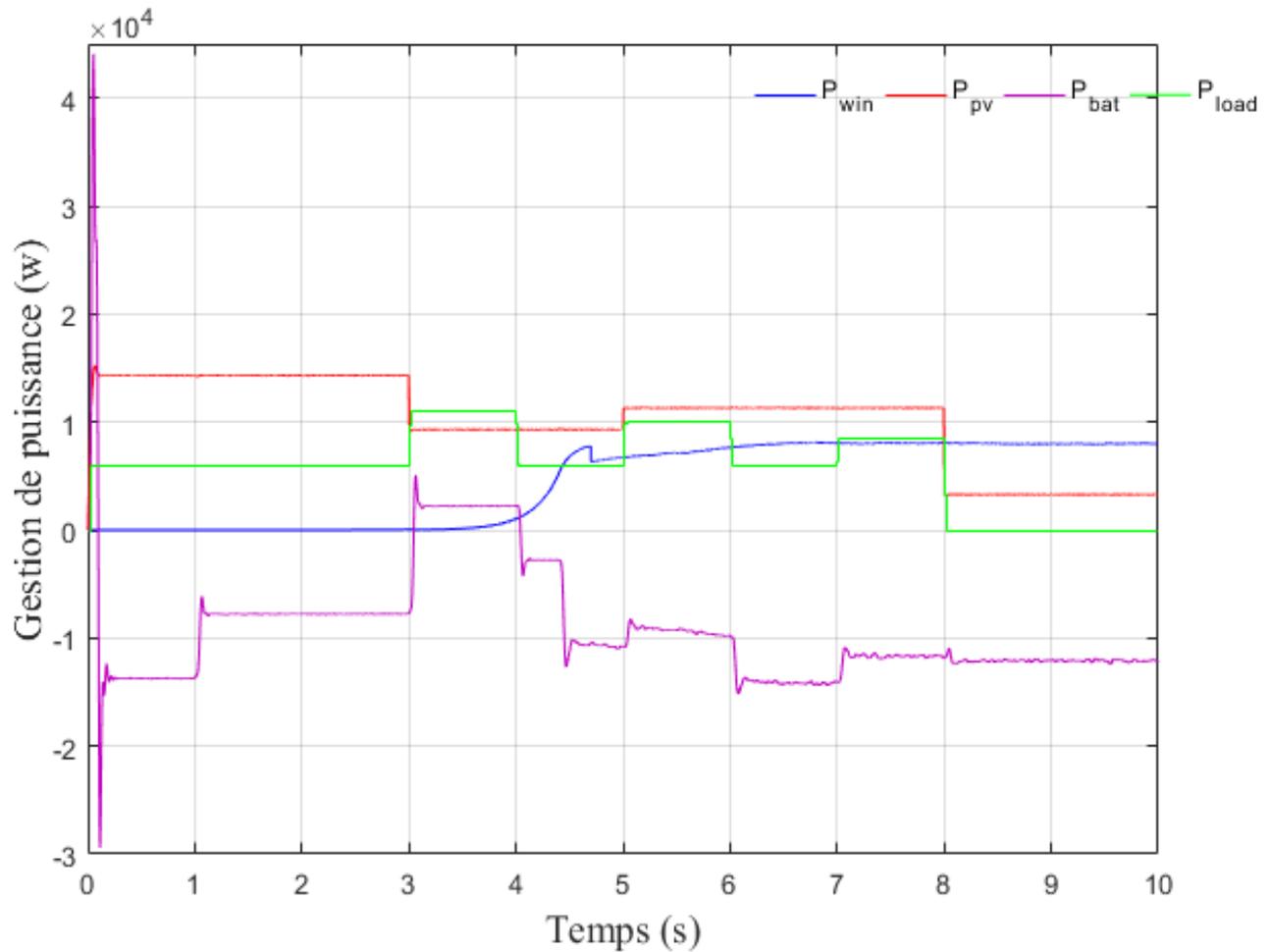
**Figure III.37 :** Zoom des courants triphasés de la charge

Les figures III.33, III.34, III.35, III.36 et III.37 montrent le courant et la tension de la charge avec leur zoom, elles sont purement sinusoïdales ce qui montre l'efficacité de la stratégie de contrôle appliquée au convertisseur qui donne une meilleure qualité d'énergie à la charge. Sur la même figure, on observe la tension efficace de la charge. Elle a une valeur proche de 155 V.

### III.8.6 Gestion de notre système hybride

À l'instant 0 seconde, le système hybride commence à fonctionner alors que les panneaux solaires et l'éolienne commencent à générer de l'électricité en fonction des conditions météorologiques actuelles. À ce stade, la production d'électricité peut varier en fonction de la luminosité solaire, de la vitesse du vent et d'autres facteurs environnementaux.

Trois secondes plus tard, à l'instant 3 secondes, le système hybride évalue la production actuelle d'électricité ainsi que les besoins en énergie. Si la production d'électricité des panneaux solaires et de l'éolienne est supérieure à la demande, l'excès d'électricité est dirigé vers la batterie pour être stocké en vue d'une utilisation ultérieure. Si la demande en électricité est supérieure à la production actuelle, la batterie peut alors être utilisée pour compléter l'offre et répondre aux besoins.



**Figure III. 38:** Gestion de puissance du système hybride

À l'instant 5 secondes, le système hybride continue de surveiller la production et la demande en électricité. Si la production d'électricité est toujours suffisante pour répondre à la demande, le surplus est stocké dans la batterie pour une utilisation future. En revanche, si la production est inférieure à la demande, la batterie peut être utilisée pour fournir l'électricité supplémentaire nécessaire pour maintenir l'alimentation.

Enfin, à l'instant 8 secondes, le système hybride continue de maintenir l'équilibre entre la production et la demande en électricité. La batterie peut être utilisée pour fournir de l'électricité supplémentaire si nécessaire, ou pour stocker tout excès d'électricité si la production est supérieure à la demande. Cette gestion dynamique de la puissance permet au système hybride de maintenir une alimentation électrique stable et fiable, tout en maximisant l'utilisation des énergies renouvelables disponibles.

Les résultats obtenus avec la structure proposée sont très satisfaisants. Ils nous ont permis de valider l'étude théorique présentée. D'une part, les performances de réglage dans l'ensemble de constituants du système hybride,

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons simulé le comportement du système complet de production d'énergie SEH qui contient GPV, générateur éolien ainsi que le système de stockage représenté par la batterie. Nous avons conclu de la simulation qu'il est possible d'utiliser un système hybride en utilisant une commande pour gérer chaque composant du système selon les besoins spécifiques. Cette approche permet de maximiser l'efficacité et d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie disponibles, Nous avons conclu que la gestion de l'énergie dans un système hybride est essentielle pour assurer une utilisation optimale des différentes sources d'énergie. Cela implique de surveiller en temps réel la production et la demande d'énergie, et de prendre des décisions intelligentes pour acheminer l'énergie vers les composants appropriés du système. Les algorithmes de gestion de l'énergie peuvent être utilisés pour optimiser la consommation, minimiser les pertes d'énergie et garantir un fonctionnement stable du système hybride.

---

# CONCLUSION GENERALE

---



### **Conclusion générale**

Ce travail de recherche se concentre sur l'exploitation d'un système hybride pour la production d'électricité, en mettant en avant l'importance des énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne, dans le contexte énergétique actuel. L'étude, menée en Algérie, met en lumière le potentiel de ce pays en matière de production d'énergies renouvelables, grâce à son ensoleillement généreux.

La méthodologie de recherche est structurée en trois parties principales :Ce premier chapitre examine en détail les différentes pièces du système hybride, comprenant les panneaux photovoltaïques, les générateurs éoliens, les batteries de stockage et les convertisseurs statiques.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation du système, en intégrant les générateurs photovoltaïques et éoliens, les régulateurs de tension et les batteries de stockage. Cette modélisation sert de base pour la simulation réalisée dans le dernier chapitre.

Le dernier chapitre présente la simulation du système hybride. Les différentes parties du système, notamment les panneaux photovoltaïques, les générateurs éoliens et les batteries de stockage, sont simulées individuellement avant de simuler l'ensemble du système.

En conclusion, bien que le système hybride présente des avantages indéniables en matière de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, il est également sujet à des limitations. Pour améliorer ses performances et réduire ses inconvénients, il est recommandé d'implémenter une gestion appropriée.

---

---

# REFERENCES

# BIBLIOGRAPHIQUES

---

---



- [1] I. Vechiu, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.
- [2] <https://www.edf.fr/groupe-edf>, Consulté le : 21/05/2023, 16h :30.
- [3] Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal, Aziz Derouich , « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM » hal-01351493f, Submitted on 6 Apr 2020
- [4] A. Labouret, P.cumunel, J-P.Braun, « Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque », Dunod, Paris 2001
- [5] [http://www.ciele.org/filieres/solaire\\_photovoltaïque.htm](http://www.ciele.org/filieres/solaire_photovoltaïque.htm) , 11/05/2023 à 14h :30
- [6] A. Behalilmohcène, b. Khayreddine, «étude et comparaison des différentes configurations des panneaux photovoltaïques sous l'effet de l'ombrage partiel », thèse master, université badjimokhtar Annaba, 2018/2019
- [7] Yacine KESSAI. «Refroidissement par la géothermie des eaux d'irrigation échangeur eau/sol forme serpentín». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra. 2020
- [8] Dd magazine le développement durable en pratique
- [9] Olivier Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, 2009
- [10]<http://www.economie-denergie.wikibis.com>, Consulté le : 02/05/2023 à 19h:15.
- [11]B. Lakhdar, M. Ammar «Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS. Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS». These Master, Universite Kasdi Merbah Ouargla, 2020/2021
- [12]Planète énergies (Toutes les énergies en clair et en live), « La cellule photovoltaïque : comment ça marche ? », <https://www.planete-energies.com>, consulté le 20 /06 /2021
- [13]A.Lamiss, D.Sara, «Elaboration D'un Code De Calcul Pour L'etude Des Cellules Solaires Photovoltaïques A Haut Rendement Application A La Cellule A L'arseniure De Gallium (Gaas) », These Master, Universite Larbi Ben M'hidi, 2021
- [14]C.Bennour. «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation». Thèse de doctorat. Université de Biskra-Mohamed Khider. 2012

- [15] M. KASDI Rafik, M. HANTAT Brahim «Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connectée au réseau» Mémoire de master ,2011/2012.
- [16] A. Riadh, A.Mohieddine, «Identification des paramètres d'un module photovoltaïque », Mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021/2022.
- [17] A.ngel, Cid Pastor«Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». INSA de Toulouse, 2006
- [18] B.Bilal, H.IbtissemKarima , «Modélisation d'un Capteur Photovoltaïque /Thermique» these master, Université KasdiMerbah d'Ouargla , 2018
- [19] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12/> Consulté le 23/04/202 à 20h :00.
- [20] A.MohammedBrahim , A. Cheikh Bachir, «optimisation de la puissance d'un générateur Photovoltaïque» , mémoire d'ingénieur en électrotechnique, Université D'oum El Bouaghi 2009.
- [21] koulali Mostefa « Modélisation et optimisation d'un system hybride (Eolien /Photovoltaïque /Pile a combustible),thèse de doctorat en électrotechnique, Université de saida « Dr.MOULAY TAHER » 22-06-2022.
- [22] ASKRI Abdallah, SOUDA El Mekki, «Étude de Défauts et Défaillances sur les Panneaux Photovoltaïques et leur Maintenance», Université Echahid Hamma Lakhdar- El Oued, 202
- [23] <http://staff.univ-batna2.dz/>, Consulté le 27/05/2023 à 18h :40.
- [24] Thèse Younes Djaballah « stockage hybride et gestion d'énergie dans un véhicule électrique basées sur les nouvelles structures de convertisseurs de puissance ) Université ziane achour de djelfa 2024.pdf
- [25] Caisheng Wang; « Modeling And Control Of Hybrid, Wind/Pv/Fuel Cell Distributed Generation Systems” , Montana State University Bozeman, Montana ,July 2006.,
- [26] SEVAN Geitmann « Énergies renouvelables & carburants alternatifs », article, hydrogeitverlage, août 2017.
- [27] M. Koulali, A.Berkani, K.Negadi, M.Mankour, A.Mezouar, « Sliding Fuzzy Controller for Energy Management of Residential Load by Multi-sources Power System Using Wind PV and Battery » , Journal Européen des Systèmes automatisés.

- [28]A. Bentaïllah, « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique, Tlemcen, 1994.
- [29]A.Meharrar, « Modélisation, Optimisation et Contrôle des Systèmes Hybrides : Eolienne/Pile à combustible », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de technologie d'Oran, 2012.
- [30]L.Croci, « Gestion De L'Energie dans un Système Multi-Sources Photovoltaïque et Eolien Avec Stockage Hybride Batteries/Supercondensateurs », Thèse de Doctorat, Université De Poitiers, 2013.
- [31]Y.Abdelhak ,T. Belkacem, «Modélisation d'une pile à combustible de type PEM », Thèse de Master, Universite Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016 /2017.

## ملخص

المهدف الرئيسي من هذا العمل هو النمذجة والمحاكاة والتحكم الأمتثل والإدارة والإشراف على نظام طاقة هجين مستقل يعتمد على الطاقة المتجددة و يتكون هذا النظام من طاقة الرياح و خلية كهروضوئية مولد ونظام تخزين هجين مكون بطارية. أولاً ، تم نمذجة المكونات المختلفة لنظامنا الهجين SEH ومحاكاتها بشكل منفصل من أجل تأكيد صحتها. ثم نمر الى المرحلة الثانية من هذا العمل و تتمثل في ربط النماذج المختلفة لكل مكون لبناء النموذج الكامل لنظام SEH الهجين قيد الدراسة. أتاحت المحاكاة على MATLAB-SIMULINK لتغيرات حمل معينة اختبار صلاحية وسائل التحكم المقترحة ، وتؤكد أيضاً جدوى مثل هذا النظام بنتائج مرضية.

### الكلمات المفتاحية:

المجال الكهروضوئي ، تخزين الطاقة الهجين ، البطارية ، وحدات تحكم PI الكلاسيكية ، التحسين ، التحكم ، المحاكاة ، MPPT

## Abstract

The main objective of this work concerns a proposal thus the management of energy flow of a hybrid SEH system, of autonomous power based on renewable energy of structure coupling with DC bus connected to an alternative load the latter consists of wind energy, a PV photovoltaic generator and a hybrid storage system composed of battery. First, the different components of our SEH hybrid system were modeled and simulated separately in order to confirm their validity. The second phase of this work consists in associating the different models of each component to build the complete model of the SEH hybrid system under consideration. The simulation on MATLAB-SIMULINK for given load variations made it possible to test the validity of the proposed means of control, and also confirms the feasibility of such a system with satisfactory results.

### Key words :

, photovoltaic field, hybrid energy storage, battery, Supercapacitor, Classic PI controllers, optimization, control, simulation, MPPT

## Résumé

L'objectif principal de ce travail concerne une proposition ainsi la gestion de flux énergétique d'un système hybride SEH, de puissance autonome à base d'énergie renouvelable de structure couplage avec bus continu relié à une charge alternative, un générateur photovoltaïque PV et un système hybride de stockage composé de super condensateur et batterie. Dans un premier temps, les différents composants de notre système hybride SEH ont été modélisés et simulés séparément afin de confirmer leurs validités. La deuxième phase de ce travail consiste à associer les différents modèles de chaque composant pour construire le modèle complet du système hybride SEH considéré. La simulation sur MATLAB-SIMULINK pour des variations de charge données a permis de tester la validité des moyens de contrôle proposés, et confirme aussi bien la faisabilité d'un tel système avec des résultats satisfaisants.

### Mots clés :

Champ photovoltaïque, stockage hybride d'énergie, batterie, énergie éolien , Contrôleurs classiques PI, optimisation, commande, simulation, MPPT