



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

/...../...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الالية والكهر وميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

## Master

Domaine : Science et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energie Renouvelable en Electrotechnique

## Thème

Optimisation d'un système de production d'énergie multi source

Présenté par :

OULAD LAID AHLAM

OULAD NAOUI FAIZA

Soutenue publiquement le 31 /05/2025

Devant le jury composé de :

Fatma Bouchelga	MCA	Université de Ghardaïa	Président
Ahmed Bahri	MCB	Université de Ghardaïa	Encadrant
Fadila Barkat	MCB	Université de Ghardaïa	Examinateur
Bechouat Mohcen	Professeur	Université de Ghardaïa	Examinateur
Thameur Abdelkrim	Professeur	URAER - Ghardaïa	Co-Encadrant

Année universitaire 2024/2025

## Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation et la commande d'un système hybride combinant des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes et des batteries, dans le but d'assurer une alimentation électrique stable et durable. L'objectif principal est d'extraire la puissance maximale du panneau photovoltaïque à l'aide d'un nouveau convertisseur élévateur : le convertisseur élévateur à trois niveaux.

Le système tire parti des énergies renouvelables solaire et éolienne pour générer de l'électricité, qui est ensuite stockée dans des batteries. La tension du bus continu est régulée par des convertisseurs statiques afin d'assurer une intégration optimale des sources et de répondre aux besoins de charges variables. Une stratégie de gestion intelligente de la production et du stockage est mise en œuvre pour améliorer l'efficacité globale du système et minimiser le THD.

L'ensemble des travaux de modélisation et de simulation a été réalisé sous l'environnement MATLAB/Simulink.

**Mots-clés : Système multi-sources, énergie renouvelable, panneau photovoltaïque, turbine éolienne, batterie, convertisseur boost à trois niveaux, tension du bus DC,**

## Abstract

This thesis focuses on the modeling and control of a hybrid energy system combining photovoltaic panels, wind turbines, and battery storage to ensure a stable and sustainable power supply. The main objective is to extract the maximum power from the photovoltaic panel using a new type of boost converter: the three-level boost converter.

The system harnesses renewable energy sources—solar and wind—to generate electricity, which is then stored in batteries. The DC bus voltage is regulated using static converters to ensure optimal integration of the sources and to meet variable load demands. An intelligent management strategy for power generation and storage is implemented to enhance the overall system performance and minimize the harmonic distortion THD.

All modeling and simulation tasks were carried out using MATLAB/Simulink

**Keywords : Multi-source system, renewable energy, photovoltaic panel, wind turbine, battery, three-level boost converter, DC bus voltage**

## ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى نمذجة وتحكم نظام هجين يجمع بين الألواح الكهروضوئية والتوربينات الريحية ووحدة تخزين تعتمد على البطاريات، من أجل ضمان تغذية كهربائية مستقرة ومستدامة. يتمثل الهدف الرئيسي في استخراج الاستطاعة القصوى من اللوح الكهروضوئي باستخدام محول رافع جديد من نوع محول Boost ثلاثي المستويات. يعتمد النظام على مصادر الطاقات المتجددة (الشمس والرياح) لتوليد الكهرباء، التي تُخزن لاحقاً في البطاريات. ويتم التحكم في جهد ناقل التيار المستمر باستخدام محولات ساكنة لضمان تكامل فعال بين المصادر وتلبية متطلبات الأحمال المتغيرة. كما تم اعتماد استراتيجية ذكية لإدارة الإنتاج والتخزين بهدف تحسين أداء النظام ككل والتقليل من نسبة التشوه التوافقي تم تنفيذ أعمال النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. الكلمات المفتاحية: نظام متعدد المصادر، طاقة متجددة، لوح كهروضوئي، توربين ريحي، بطارية، محول رافع ثلاثي المستويات، جهد ناقل التيار المستمر.

## Remerciement

- Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous donner la santé et la patience pour réaliser le travail imposé et pour avoir terminé ce mémoire.
  
  - Nous avons tout à exprimer nos profondes reconnaissances à monsieur (**A. Bahri**), qui a assuré la direction de ce travail afin de finaliser ce mémoire.
  
  - Nous remercions ainsi le Dr (**F. Bouchelga**), enseignant à l'Université de Ghardaïa, d'avoir accepté de présider le jury. Nos vifs remerciements à Dr (**F. Barkat**) & (**M. Bechouat**), enseignants à l'Université de Ghardaïa, d'avoir accepté d'examiner ce travail.
  
  - Nous remercions ainsi Mr. (**Thameur Abdikrim**), Directeur de Recherche A à URAER Ghardaïa pour l'aide et la confiance qu'il nous a accordées pour mener ce travail à terme.
  
  - Un très grand merci spécial à nos parents, et à nos familles.
- Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Dédicace

- *À mes chers parents, source d'amour et de prières, je vous adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde reconnaissance, car sans vous, je ne serais pas arrivé jusqu'ici.*
- *À ma famille bien-aimée, votre soutien moral et spirituel a toujours été ma plus grande motivation.*
  - *À mes fidèles amis (**Ahlam ben, Fatiha ben, Halima ben, Walid kh**) compagnons de science et d'ambition, je vous remercie pour tout le soutien et l'encouragement que vous m'avez apportés.*
- *À mon collègue dans ce travail (**Oulad laid Ahlam**), merci pour votre esprit de coopération et de travail en commun ; votre contribution a été essentielle à la réussite de ce projet.*
- *À mon directeur de mémoire (**Bahri Ahmed**), à qui revient un grand mérite après Dieu pour ses conseils scientifiques constructifs et son encouragement constant.*
- *À l'assistant du directeur (**Thameur Abdelkrim**), pour tous les efforts et l'aide précieuse apportés tout au long des étapes de ce travail.*
- *À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu, j'offre ce couronnement comme un témoignage de gratitude et de reconnaissance*

## Dédicace

- *À ceux dont les prières ont guidé mes pas, et dont le soutien m'a accompagné à chaque étape, à qui les mots ne sauraient jamais rendre pleinement justice...*
- *À mes chers parents, ma tendre mère et mon précieux père, merci pour votre soutien inépuisable et vos prières sincères qui ont illuminé mon chemin. Vous êtes ma plus grande bénédiction, et aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude.*
- *À ma famille bien-aimée et à mes frères, votre présence constante a été pour moi une source de force et de sécurité. Merci pour votre affection et votre soutien sans faille.*
- *À mes cousines, je vous remercie du fond du cœur pour votre encouragement sincère et votre présence chaleureuse tout au long de ce parcours.*
- *À mes fidèles amis (**Halima Ben, fatiha Ben, Abdennour**) compagnons de science et d'ambition, je vous adresse ma profonde gratitude pour votre soutien et vos encouragements constants.*
- *À ma collègue dans ce travail (**Oulad Naoui faiza**), merci pour votre esprit de collaboration et votre implication sincère dans la réussite de ce projet.*
  - *À mon directeur de mémoire (**Bahri Ahmed**), recevez toute ma reconnaissance pour vos conseils scientifiques, votre encadrement précieux et votre soutien continu.*
  - *À l'assistant du directeur (**Thameur Abdelkrim**), merci pour votre accompagnement, votre disponibilité et vos efforts tout au long de ce travail.*
- *Et enfin, à mes camarades de la promotion "Énergies Renouvelables – Génie Électrotechnique", merci pour votre esprit d'équipe, votre camaraderie et les souvenirs inoubliables que nous avons partagés.*

## Tables des matières

Résume .....	I
Abstract .....	I
ملخص.....	I
Remerciement .....	II
Dédicace.....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	IX
Liste des abréviations .....	X
Liste des acronymes.....	XII
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les Systèmes Hybrides</b>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Production mondiale d'électricité.....	5
I.3. Situation énergétique en Algérie .....	7
I.4. Production d'énergie renouvelable en Algérie .....	7
I.5. Systèmes hybride .....	9
I.5.1. Définition .....	9
I.5.2. Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?.....	9
I.6. Importance de l'hybridati... ..	10
I.7. Classification .....	10
I.7.1. Le régime du fonctionnement .....	10
I.7.2. La structure du système hybride.....	11
I.7.3. Etudes des systèmes hybrides .....	11
I.8. Combinaisons de SHER... ..	12
I.8.1. Architecture à bus DC.....	12
I.8.2. Architecture à bus AC.....	13
I.8.3. Architecture mixte (DC&AC) .....	14
I.9. Présentation du SEH : PV/Eolien/Banc de batteries .....	15
I.9.1. Energie solaire photovoltaïque .....	16
I.9.2. Energie éolienne.....	22
I.10. Les systèmes de stockage .....	24
I.10.1. Régulateur de charge.....	25
I.11. Système de commande et de supervision .....	25
I.11.1. Contrôleurs MPPT .....	25
I.12. Système de supervision .....	25
I.13. Conclusion .....	26

**Chapitre II : Modélisation des systèmes multi-sources**

<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>28</b>
<b>II.2. Modélisation du système photovoltaïque</b> .....	<b>29</b>
<b>II.2.1. Équations régissant le comportement de la cellule photovoltaïque</b> .....	<b>29</b>
<b>II.2.2. Influence des paramètres d'une cellule PV</b> .....	<b>32</b>
<b>II.2.2.1. Influence de l'éclairement d'un module PV</b> .....	<b>32</b>
<b>II.2.2.2. Influence de la température d'un GPV.</b> .....	<b>33</b>
<b>II.2.3. MPPT dans les applications photovoltaïques</b> .....	<b>34</b>
<b>II.3. Modélisation du système éolien</b> .....	<b>36</b>
<b>II.3.1. Modèle de la turbine éolien</b> .....	<b>37</b>
<b>II.3.1.1. Modèle de l'arbre</b> .....	<b>38</b>
<b>II.3.1.2. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents</b> .....	<b>40</b>
<b>II.3.2. Algorithme MPPT pour le système éolien</b> .....	<b>41</b>
<b>II.4. Modélisation de batterie</b> .....	<b>43</b>
<b>II.5. Conclusion</b> .....	<b>46</b>

**Chapitre III : Modélisation et commande des convertisseurs statiques**

<b>III.1 .Introduction</b> .....	<b>48</b>
<b>III.2. Convertisseurs statiques</b> .....	<b>48</b>
<b>III.3. Modélisation et commande de la première chaîne de conversion</b> .....	<b>48</b>
<b>III.3.1. Convertisseur DC-DC boost a trois niveaux</b> .....	<b>48</b>
<b>III.3.1.1. Modélisation à trois niveaux</b> .....	<b>49</b>
<b>III.3.1.2. Méthode MPPT proposée</b> .....	<b>51</b>
<b>III.3.1.3. Contrôle de l'équilibrage des tensions</b> .....	<b>51</b>
<b>III.4. Modélisation et Commande de la deuxième chaine conversion</b> .....	<b>53</b>
<b>III.4.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel.</b> .....	<b>53</b>
<b>III.4.2. Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel</b> .....	<b>53</b>
<b>III.4.3. Contrôle de la tension du Bus continu Vdc</b> .....	<b>54</b>
<b>III.5. Modélisation de la troisième chaine conversion</b> .....	<b>55</b>
<b>III.5.1. Redresseur triphasé à diodes</b> .....	<b>55</b>
<b>III.6. Modélisation L'onduleur à trois niveaux (NPC)</b> .....	<b>58</b>
<b>III.6.1. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux</b> .....	<b>58</b>
<b>III.1.2. Commande complémentaire</b> .....	<b>60</b>
<b>III.7. Conclusion</b> .....	<b>63</b>

**Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats**

<b>IV.1. Introduction</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.2. Description du système</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.3. Paramètres du générateur photovoltaïque</b> .....	<b>66</b>
<b>IV.4. Simulation et discussion des résultats</b> .....	<b>67</b>
<b>IV.5. Conclusion</b> .....	<b>79</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>81</b>

## Listes des figures

## Chapitre I : Généralités sur les Systèmes Hybrides

Fig.I. 1 : Production mondiale nette d'électricité, 2007_2035[3]	6
Fig.I. 2 : répartition de la production nationale d'électricité en Algérie en 2024	7
Fig.I. 3 : Production d'énergie renouvelable en Algérie[6]	9
Fig.I. 4: Classification des système hybrides[6]	12
Fig.I. 5 : Structure à bus DC d'un système hybride	13
Fig.I. 6 : Structure à bus AC d'un système hybride	14
Fig.I. 7 : Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride	15
Fig.I. 8: Schéma global du système hybride proposé	15
Fig.I. 9 : Principe de conversion photovoltaïque	16
Fig.I. 10 : Système autonome avec stockage	18
Fig.I. 11 : Exemple d'un système PV hybride	19
Fig.I. 12: Crystalline cells, (a) mono-crystalline, (b) poly-crystalline	20
Fig.I. 13 : Cellule à couche mince	21
Fig.I. 14 : Multi-Junction and concentration celles, (a) concentration, (b) organic, (c) multilayer	22
Fig.I. 15: Conversion de l'énergie cinétique du vent	23
Fig.I. 16 : Turbines Darrieus classiques Turbines Darrieus (type H Turbine de type savonius	23
Fig.I. 17 : Composantes d'une éolienne à axe horizontal	24
Fig.I. 18 : Système de supervision	26

## Chapitre II : Modélisation des systèmes multi-sources

Fig.II. 1: Système hybride éolien –photovoltaïque	28
Fig.II. 2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	31
Fig.II. 3: Effet d'éclairement sur la courbe IPV (VPV) IPV (VPV) et PPV (VPV)	33
Fig.II. 4: Effet de la température sur la courbe $I_{PV}(I_{PV})$ et $P_{PV}(P_{PV})$	34
Fig.II. 5: Caractéristique $P_{PV}(P_{PV})$	35
Fig.II. 6: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)[8]	36
Fig.II. 7 : Schéma de la turbine éolienne	37
Fig.II. 8 : Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de la vitesse spécifique	38
Fig.II. 9 : Schéma bloc du modèle de la turbine	39
Fig.II. 10 : Schéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.	40
Fig.II. 11 : Structure de contrôle d'une turbine éolienne	43
Fig.II. 12: Modèle électrique de la batterie Plomb-Acide	44

### Chapitre III : Modélisation et commande des convertisseurs statiques

Fig. III. 1 : Convertisseur élévateur à trois niveaux.....	49
Fig. III. 2 : Formes d'onde 3LBC, (a) $D < 0,5$ , (b) $D > 0,5$ .....	50
Fig. III. 3 : Schéma bloc du MPPT avec contrôle de l'équilibre de tension.....	52
Fig. III. 4 : Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel.....	54
Fig. III. 5 : Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	55
Fig. III. 6: Pont redresseur de diode triphasé.....	56
Fig. III. 7 : Allure de la tension redressée.....	57
Fig. III. 8 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.....	58
Fig. III. 9 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.....	59
Fig. III. 10 : Commande MLI d'un onduleur à trois niveaux.....	60

### Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats

Fig.IV. 1 : Le système énergétique hybride.....	66
Fig.IV. 2 : Variations d'irradiance solaire.....	70
Fig.IV. 3: Profile de charge.....	70
Fig.IV. 4: Vitesse du vent.....	70
Fig.IV. 5 : Tension du bus continue $V_{dc}$ , $V_{dc1}$ , et $V_{dc2}$ .....	71
Fig.IV. 6: Tension et courant en pv array.....	71
Fig.IV. 7: Tension $V_{dc}$ et $V_{dcref}$ .....	72
Fig.IV. 8: Puissance du système d'énergie hybride.....	72
Fig.IV. 9: L'état de charge du banc de batterie.....	74
Fig.IV. 10 : courant ainsi que la tension du BB.....	74
Fig.IV. 11 : Tension de sortie d'éolien.....	75
Fig.IV. 12 : Courant de sortie d'éolien.....	75
Fig.IV. 13 : Vitesse du rotor.....	76
Fig.IV. 14 : Vitesse spécifique.....	76
Fig.IV. 15 : Coefficient de puissance $C_p$ .....	76
Fig.IV. 16 : Courant $i_{abc}$ de la MSAP.....	77
Fig.IV. 17: Tension de sortie de la charge.....	77
Fig.IV. 18 : Spectre harmonique de la tension de ligne.....	78
Fig.IV. 19: Courant de sortie de la charge.....	78
Fig.IV. 20 : Spectre harmonique du courant de ligne.....	79

## Listes des tableaux

## Chapitre I : Généralités sur les Systèmes Hybrides

Tab.I. 1: Capacités de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables [4]	6
Tab.I. 2: Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques	21

## Chapitre III : Modélisation et commande des convertisseurs statiques

Tab.III. 1: Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes	54
Tab.III. 2 : La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°1	61
Tab.III. 3 : La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°2	61
Tab.III. 4 : La table d'excitation associée à la commande complémentaire proposée	62

## Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats

Tab.IV. 1 : rassemble les différentes grandeurs électriques du GPV	66
Tab.IV. 2 : Paramètres du module HIP-225HDE	67
Tab.IV. 3: Paramètres du tableau PV Array	67
Tab.IV. 4: Paramètres de la batterie	68
Tab.IV. 5 : Paramètres du générateur éolien	68
Tab.IV. 6: Paramètres MSAP	68

### Listes des abréviations

AC : Alternative Curent  
BB : Banc de batteries.  
BBC : Banc de batteries control  
BBDC : Buck-boost bidirectionnel Converter.  
DC : Direct Curent  
DCC : Deuxième chaine de conversion.  
DG : Générateurs diesel.  
ER : Energie renouvelable.  
GAS : Générateurs asynchrones.  
GPV : Générateurs photovoltaïques.  
GSAP : Générateur synchrone à aimant permanent.  
MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion  
MOSFET : Metal Oxide Semi-conducteur Field Effect Transistor.  
MPPT : Maximum Power Point Tracking  
MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanents  
MSE: Mean Squared Error  
NPC: Neutral Point Clamped.  
P&O : Perturbation et observation.  
PAC : Pile à combustible.  
PCC : Première chaine de conversion.  
PI : Proportionnelle-Intégrale  
PID : Proportionnelle-Intégrale-Dérivée.  
PPM : Point de puissance maximale  
PV : Photovoltaïques.  
SCEM : Système de conversion d'énergie multi sources.  
SEH : Système d'énergie hybride.  
SOC : State of Charge  
SS : Système de stockage.  
SVM : Space Vector Modulation.

TCC : Troisième chaine de conversion.

THD : Total harmonic distortion

## Liste des acronymes

**A (V) : Tension exponentielle**

**A : Coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.**

**Ac : Le potentiel thermique.**

**$B(Ah^{-1})$ :Capacité exponentielle.**

**B (deg) : L'angle d'inclinaison des pâles de la turbine.**

**$C_{aer}$  (N.m) : Couple aérodynamique.**

**$C_{em}$  (N.m) : Couple électromagnétique.**

**$C_G$  (N.m) : Couple du multiplicateur**

**$C_{méc}$  (N.m) : Couple mécanique**

**$C_P$  : Coefficient de la puissance.**

**E (V) : Tension non linéaire de la batterie.**

**E,  $E_{ref}$ (W/m<sup>2</sup>) : Eclairage réel et éclairage dans les conditions normales**

**$E_0$ (V) : Tension constante de la batterie.**

**G : Gain du multiplicateur.**

**$I^*$  (A) : Dynamique du courant a basse fréquence.**

**$I_0$ (A) : Courant de saturation de la diode.**

**$I_1, I_2, I_3$  (A) : Courants alternatifs de l'onduleur.**

**$I_{Batt}$  (A) : Courant de batterie.**

**$I_{cc}$ (A) : Courant de court-circuit.**

**$I_{d1}, I_{d2}, I_{d3}$  (A) : Courants s continues d'entrée de l'onduleur.**

**$I_{mp}$  (A) : Courant au point de puissance maximale.**

**$I_{sat}$  (A) : Courant de saturation.**

**$I_{sr}$  (A) : Courant de saturation réversible.**

**it (Ah) : Capacité extraite.**

**$J_t$ : l'inertie de la turbine.**

**$kAh^{-1}$ Constante de polarisation.**

**K (J/K.) : Constant de Boltzmann =  $1.3806503 \times 10^{-23}$**

**m : L'indice de modulation.**

$P_{aer}$ : Puissance aérodynamique disponible sur l'arbre de la turbine.

$P_{in}(W)$  : Puissance incidente.

$P_{max}(W)$  : Puissance maximale.

$P_V$  (kg/m<sup>3</sup>) : Puissance de la masse d'air.

Q (Ah) : Capacité maximale de la batterie.

q (C) : Charge électrique élémentaire  $1.607 \times 10^{-19}$

R (m) : Rayon de la turbine.

r : Coefficient de réglage en tension

$R_{in}$  ( $\Omega$ ) : Résistance série interne de batterie.

$R_p$ : ( $\Omega$ ) Résistance parallèle

$R_s$  ( $\Omega$ ) : Résistance Série.

T : Temps de charge ou de décharge.

T(K°) : Température de la cellule

$T_{ref}$ : Température dans les conditions normale en kelvin ( $T_{ref}=298$  K)

V (m/s) : Vitesse du vent

$V_{ABC}$  (V) : Tension des nouds de l'onduleur.

$V_{AM}$  (V) : Tension simple d'onduleur.

$V_{Batt}(V)$  : Tension de la batterie.

$V_{c1}$  (V) : Tension demi bras supérieur.

$V_{c2}(V)$  : Tension demi bras inférieur.

$V_{CO}$  (V) : tension du circuit ouvert.

$V_{dc}(V)$  : Tension du bus DC.

$V_{dc*}$  (V) : Tension désirée du bus DC.

$V_{dc-simu}$  (V) : Tension du Bus DC de sortie.

$V_e$  (V) : Tension d'entrée du boost.

$V_{mp}$  (V) : Tension au point de puissance maximale.

$V_{ref}(V)$  : Tensions de référence.

$V_s$  (V) : Tension de sortie du boost.

$\alpha$ : Rapport cyclique variable.

$\lambda$ : Vitesse spécifique.

$\omega_e$  : Vitesse angulaire électrique.

$\Omega_t$  (rad/s) : Vitesse de rotation de la turbine.

PVI (A) : Courant de la sortie de la cellule ou le GPV.

PI(A) : Courant traversant la résistance parallèle.

PhI(A) : Photo courant ou le courant généré par l'éclairement.

dV(V) : Tension aux bornes de la diode.

$T_s$  (S) : Période d'échantillonnage de l'onduleur.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et à l'impact environnemental croissant de leur utilisation, la transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue une priorité mondiale. Parmi ces sources, l'énergie solaire et l'énergie éolienne occupent une place de choix en raison de leur disponibilité, de leur propreté et de leur potentiel à long terme.

Cependant, la nature intermittente et variable de ces énergies pose un défi majeur pour leur intégration efficace dans les systèmes électriques. C'est dans ce contexte que les systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergie renouvelable, associés à des unités de stockage, offrent une solution prometteuse pour assurer une alimentation électrique continue, stable et fiable.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette démarche et vise à étudier un système hybride composé de panneaux photovoltaïques, de turbines éoliennes et de batteries. L'objectif principal est de maximiser l'extraction de l'énergie solaire à travers l'utilisation d'un convertisseur élévateur innovant : le convertisseur boost à trois niveaux. Ce dernier permet une amélioration significative de l'efficacité de conversion, tout en maintenant une stabilité de la tension du bus continu.

Le système étudié est modélisé et simulé à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink, ce qui permet d'évaluer son comportement dynamique, de tester différentes stratégies de commande, et d'analyser sa capacité à répondre à des charges variables dans des conditions climatiques changeantes.

La structure de ce mémoire est organisée comme suit :

Chapitre I : présente les généralités sur les systèmes hybrides et leurs avantages, leurs classifications, architectures, et composants principaux, ainsi qu'un aperçu sur la situation énergétique mondiale et en Algérie.

Chapitre II : Traite la modélisation dynamique du système hybride incluant le générateur photovoltaïque, la turbine éolienne et le banc de batteries, avec l'introduction des algorithmes MPPT pour maximiser la puissance extraite.

Chapitre III : Concerne la modélisation et la commande des convertisseurs statiques (DC/DC et DC/AC), avec l'implémentation de régulateur PI pour assurer la stabilité et la gestion efficace de l'énergie.

Chapitre IV : Présente les résultats de simulation du système hybride proposé et l'évaluation de ses performances sous différentes conditions météorologiques, en mettant en évidence l'efficacité des stratégies de commande utilisées.

# **Chapitre I :**

## Généralités sur les Systèmes Hybrides

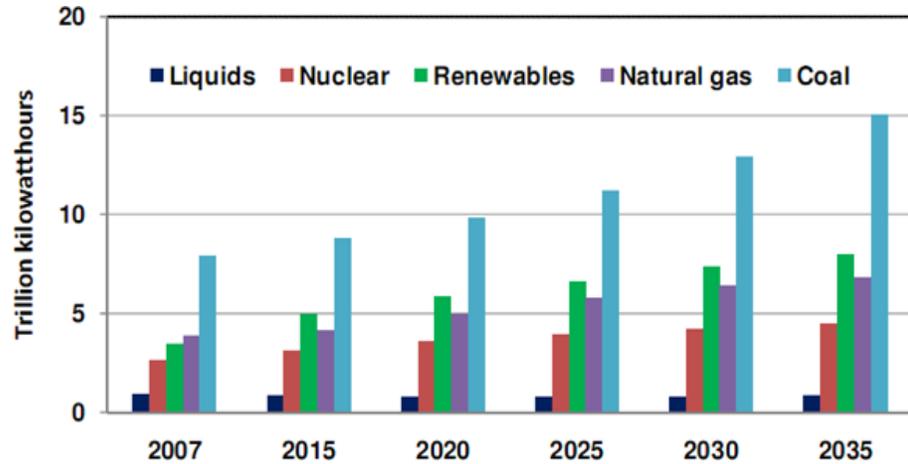
## **I.1. Introduction**

Un système hybride de production électrique est un système qui produit de l'électricité à partir de deux sources d'énergie (ou davantage) utilisées conjointement. Il inclut souvent, mais pas nécessairement, une unité de stockage, et raccordé à un réseau de distribution local, un mini-réseau pour assurer la continuité de puissance[1].

Dans ce chapitre nous commençons par présenter un bref aperçu sur les systèmes hybride. Par la suite nous présentons la classification ainsi que les différentes architectures des systèmes multi-sources. Puis, les principales composantes des systèmes multi-sources composés d'un générateur photovoltaïque, éolien et des batteries seront montrées.

## **I.2. Production mondiale d'électricité**

Figure I.1 illustre que la production d'électricité repose encore largement sur des sources d'énergie traditionnelles, qui seront éventuellement épuisées. Cette situation rend l'avenir particulièrement fragile, car la demande en combustibles fossiles devrait bientôt dépasser la capacité de production même des plus grands fournisseurs. De plus, la production d'énergie nucléaire, autrefois considérée comme une source d'énergie illimitée, est aujourd'hui très impopulaire et suscite des inquiétudes. Par ailleurs, le recours aux technologies conventionnelles pour la production d'électricité a eu de graves répercussions sur l'environnement au fil des décennies. Ainsi, le monde entier est désormais confronté au défi de réduire l'impact négatif de la production d'énergie sur notre planète et de trouver des moyens de produire la quantité nécessaire d'énergie à partir de sources propres [2] .



**Fig.I. 1** :Production mondiale nette d'électricité,2007\_2035[3]

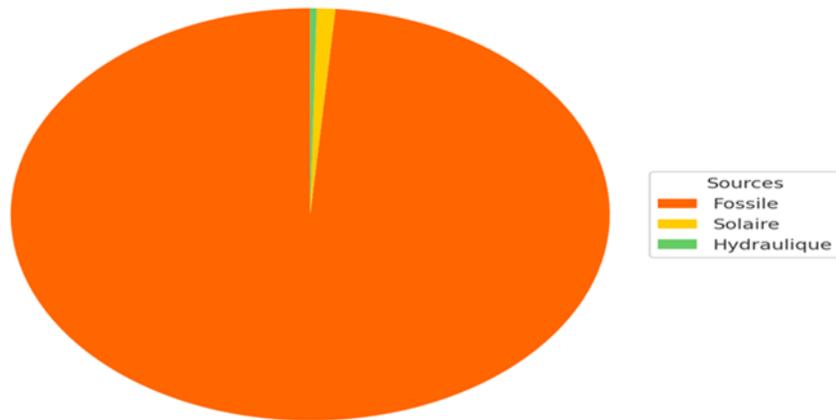
Ainsi, Le rapport annuel "Statistiques de capacité renouvelable 2020" de l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA) fournit un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricité à partir des principales ressources renouvelables dans le monde pour la période 2015-2019. Le Tableau I.1 présente les données pour chaque filière renouvelable, telles que l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité, la biomasse, etc [4].

**Tab.I. 1**:Capacités de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables[4]

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189
Eolien (On et Offshore)	416	467	514	564	623
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586
Biomasse	97	105	111	117	124
Géothermie	12	12	13	14	15
<b>Total</b>	<b>1846</b>	<b>2009</b>	<b>2183</b>	<b>2361</b>	<b>2537</b>

### I.3. Situation énergétique en Algérie

En Algérie, en 2024, la production d'électricité reste largement dominée par les combustibles fossiles, qui représentent plus de 95% du mix énergétique national, avec le gaz naturel comme principale source utilisée. Les énergies renouvelables contribuent très faiblement à la production totale. En effet, la part de l'énergie solaire photovoltaïque est estimée à environ 1,5%, tandis que l'hydroélectricité ne dépasse pas 0,5%. Cette répartition met en évidence la lenteur de la transition énergétique en Algérie malgré un fort potentiel en ressources renouvelables, notamment solaire. La répartition de ces ressources est illustrée dans le graphique ci-dessous[5].



**Fig.I. 2** : répartition de la production nationale d'électricité en Algérie en 2024

### I.4. Production d'énergie renouvelable en Algérie

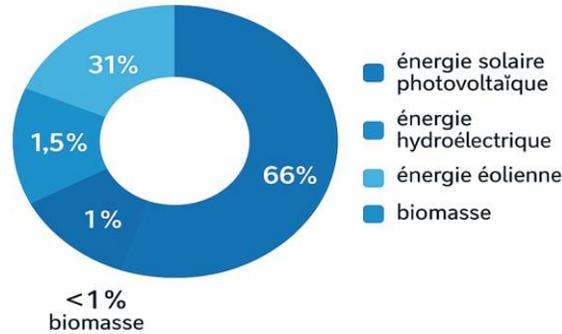
La production d'énergie renouvelable en Algérie est un objectif majeur du Programme algérien pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) de 2012. L'Algérie vise à atteindre une capacité installée en énergie renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030, avec 12 000 MW destinés à répondre à la demande nationale et 10 000 MW pour les exportations. En 2015, l'Algérie a annoncé l'installation de 270 MWc d'énergie solaire, portant sa production totale à 300 MWc. Le pays s'est également fixé des objectifs ambitieux pour diverses sources d'énergie renouvelable, notamment 13 575 MWc de photovoltaïque solaire, 5 010 MWc d'énergie éolienne, 2 000 MWc de thermodynamique solaire (CSP), 1 000 MWc de biomasse, 400 MWc de cogénération et 15 MWc d'énergie géothermique d'ici 2030. [4] Ces initiatives visent à faire en sorte que l'énergie renouvelable représente 37 % de la capacité installée et 27 % de la

production d'électricité pour la consommation nationale d'ici 2030. Le groupe Sone gaz, acteur majeur dans le secteur de l'énergie en Algérie, a investi dans des projets novateurs et durables, incluant la construction de 67 centrales solaires, comprenant des centrales photovoltaïques, hybrides, solaires thermiques et éoliennes, dans le cadre de son programme de développement des énergies renouvelables.

Le nouveau programme spécifie les objectifs d'installation d'ici 2030 :

- 3 575 MWc de photovoltaïque solaire.
- 5 010 MWc d'énergie éolienne.
- 2 000 MWc de thermodynamique solaire (CSP).
- 1 000 MWc de biomasse (récupération des déchets).
- 400 MWc de cogénération.
- 15 MWc d'énergie géothermique.

Dans le cadre du Programme algérien pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) de 2012, l'Algérie vise à atteindre une capacité installée en énergie renouvelable de 22 GW d'ici 2030, avec plus de 4,5 GW nécessaires d'ici 2020. L'objectif est que l'énergie renouvelable représente 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité pour la consommation nationale. Le groupe Sone gaz, acteur clé du secteur de l'énergie en Algérie, investit dans des sources d'énergie novatrices et renouvelables. Dans le cadre de son programme de développement des énergies renouvelables, Sone gaz prévoit la construction de 67 projets de centrales solaires, comprenant 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes[6].



**Fig.I. 3 :** Production d'énergie renouvelable en Algérie[6]

## I.5. Systèmes hybride

### I.5.1. Définition

L'expression « système d'énergie hybride » désigne les dispositifs de production électrique reposant sur plusieurs sources d'énergie. Ces systèmes, souvent complexes, intègrent à la fois des sources renouvelables, seules ou combinées à des sources conventionnelles telles que les générateurs diesel, ainsi que divers moyens de stockage et types de charges. Ils permettent de compenser l'intermittence des énergies renouvelables et d'améliorer l'efficacité énergétique globale. Leur principal atout réside dans la capacité à assurer une autonomie énergétique, grâce à l'indépendance vis-à-vis d'une source unique. Ces systèmes apportent une réponse significative au défi de la disponibilité énergétique. Ils peuvent fonctionner de manière autonome ou être raccordés aux réseaux électriques[6].

### I.5.2. Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?

En général, un système énergétique hybride est un système qui combine différentes sources pour produire de l'énergie. Par exemple, un système hybride qui combine l'énergie solaire et l'énergie diesel est un exemple de système d'alimentation hybride. Selon une source, les systèmes d'énergie hybrides actuels combinent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles, généralement des générateurs diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable. Ces systèmes électriques hybrides fonctionnent indépendamment des grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des zones isolées. Les systèmes d'énergie renouvelable hybrides sont fiables, non polluants et peuvent répondre à la demande énergétique pendant de longues périodes [3] [6].

## **I.6. Importance de l'hybridation**

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

D'après le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski, la combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu' économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie.
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site

D'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle[6].

## **I.7. Classification**

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues[4].

### **I.7.1. Le régime du fonctionnement**

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes.

Le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays[6].

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.7.2. La structure du système hybride**

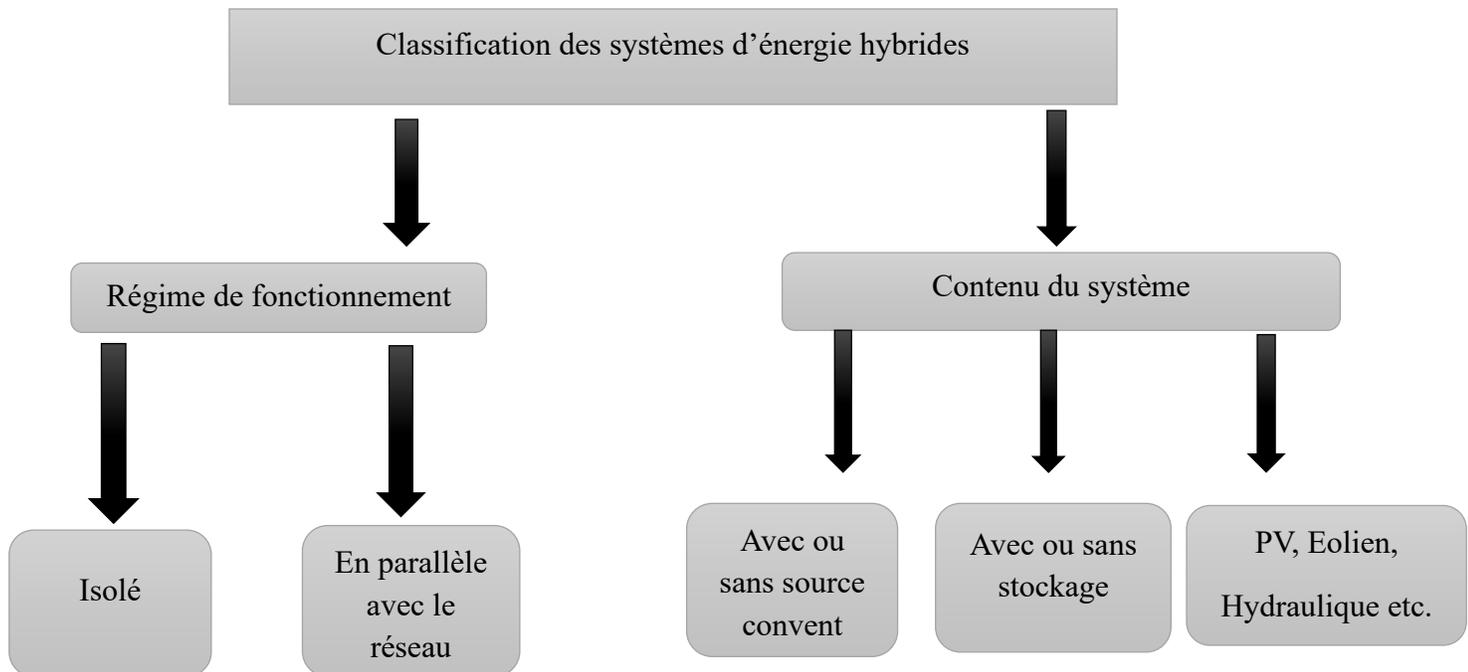
Lors de la classification d'un système hybride selon sa structure de système, trois critères sont pris en considération. Le premier critère est la présence ou non du dispositif de stockage. La présence de stockage garantit la disponibilité de l'énergie électrique pendant les périodes sans ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des batteries rechargeables, ...etc.

Le deuxième critère de classification d'un système hybride est le critère lié au type de sources d'énergie renouvelables utilisées, où la structure du système hybride peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un transducteur hydraulique (centrales hydroélectriques ou utilisation de vagues) ou une combinaison de ces sources. Pour choisir la source utilisée, un critère important à prendre en compte est la présence du potentiel énergétique disponible, qui dépend de la localisation du système hybride. L'autre facteur limitant est l'alimentation électrique du consommateur. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un périphérique de stockage, / ou d'une source conventionnelle, etc.

Le dernier critère de classification est la présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle. Cette source classique peut être un générateur diesel, une petite turbine à gaz...etc.

### **I.7.3. Etudes des systèmes hybrides**

Compte tenu de ces nombreux critères, il est facile d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe



**Fig.I. 4:** Classification des système hybrides[6]

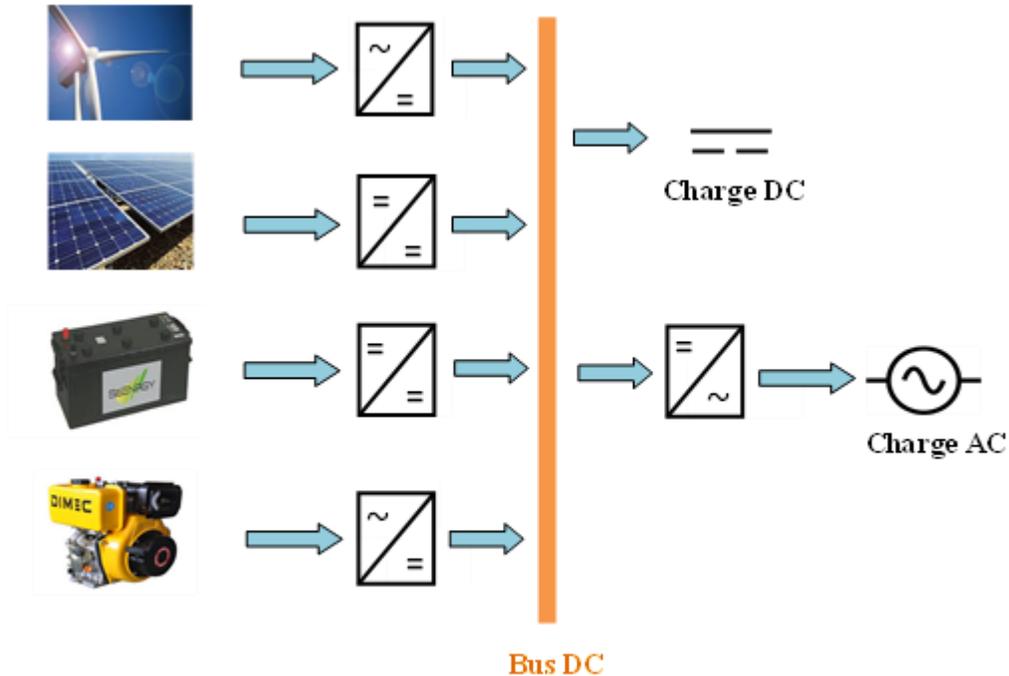
## I.8. Combinaisons de SHER

Il existe plusieurs configurations pour un système hybride. Basées sur une stratégie de contrôle et le type de bus, deux des plus fréquents sont : Couplage de bus en courant alternatif CA et Couplage de bus en courant direct CD. Une autre configuration pourrait être la combinaison des deux précédentes. Ces configurations doivent être intégrées dans le dimensionnement et la simulation d'un système hybride [6][7].

### I.8.1. Architecture à bus DC

La figure I.5 représente la structure à bus DC d'un système hybride. Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations[7].

L'avantage d'une telle architecture réside dans sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande. Cependant, 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[8].



**Fig.I. 5 :** Structure à bus DC d'un système hybride

### I.8.2. Architecture à bus AC

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs comme montrée dans la figure I.6 Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisqu'un découplage de différentes sources de production permettrait à celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation des convertisseurs statiques et ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée (c.-à-d. raccordée au réseau électrique)[7].

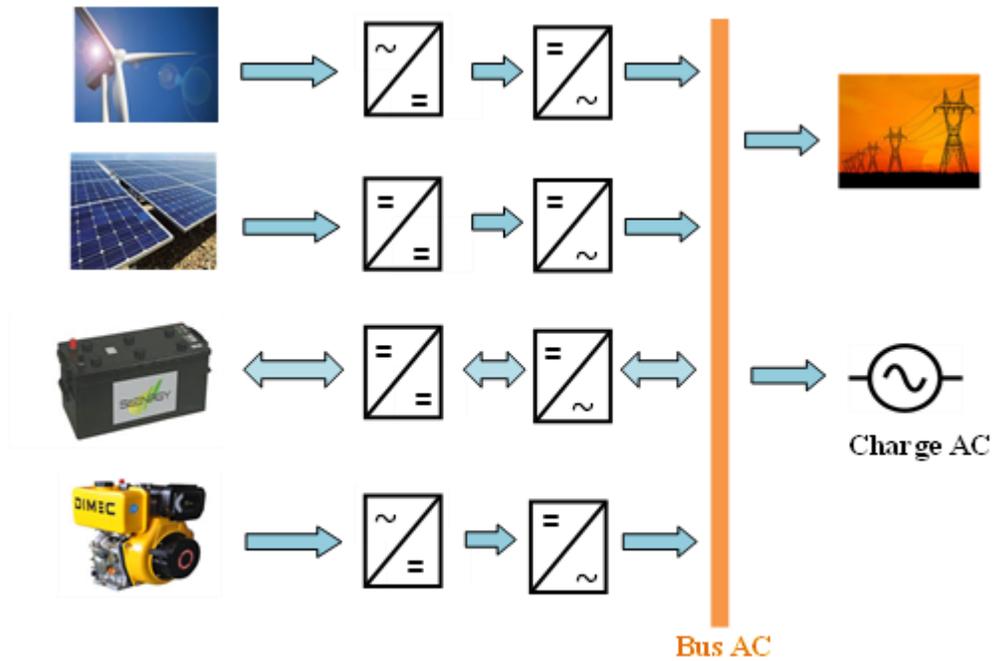
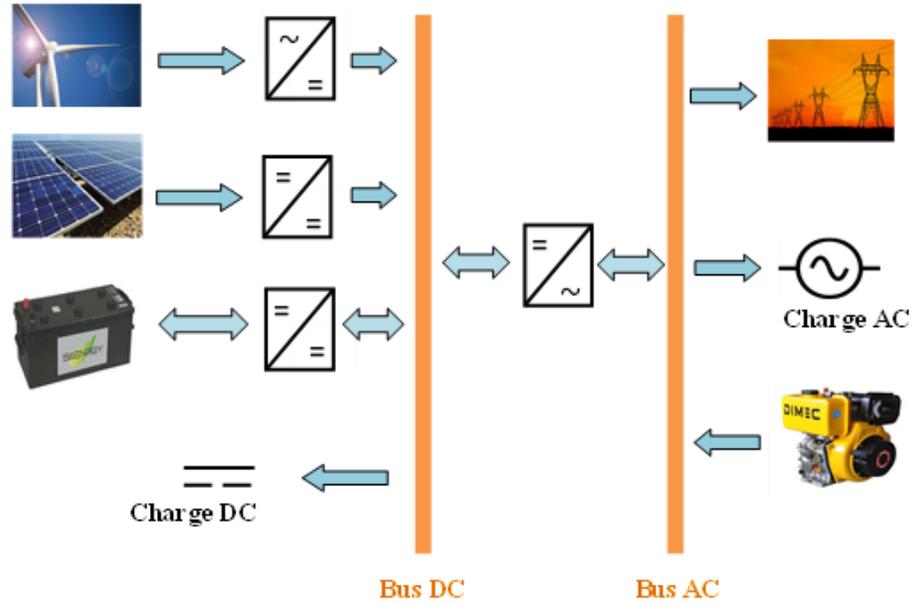


Fig.I. 6 : Structure à bus AC d'un système hybride

### I.8.3. Architecture mixte (DC&AC)

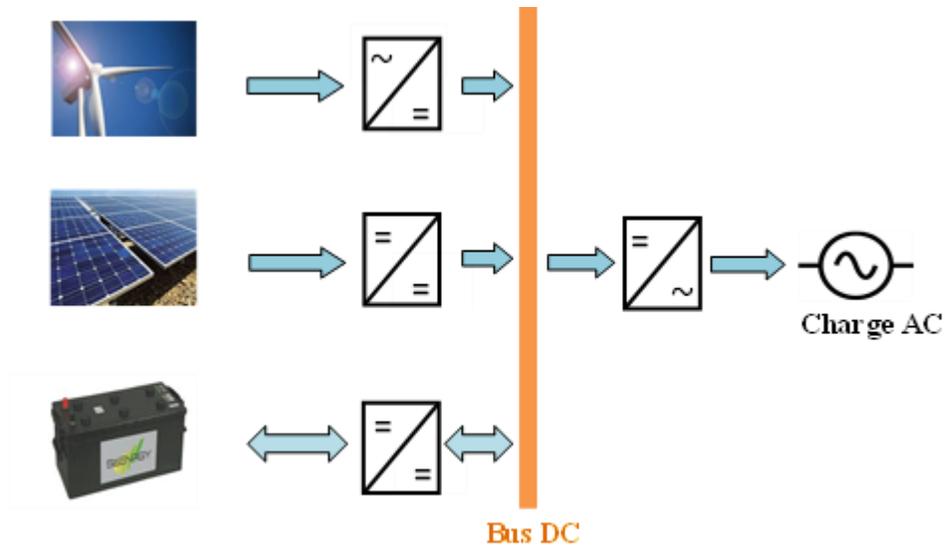
La figure I.7 représente la structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue- alternative et vice versa[7].



**Fig.I. 7 :** Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride

**I.9. Présentation du SEH : PV/Eolien/Banc de batteries :**

La figure I.9 décrit la configuration du système hybride proposé dans cette étude, qui se compose des systèmes photovoltaïque, pile à combustible et de stockage par batterie. Ces éléments travaillent ensemble pour fournir de l'électricité à une charge principale, qui est une charge alternative AC[9].



**Fig.I. 8:** Schéma global du système hybride proposé.

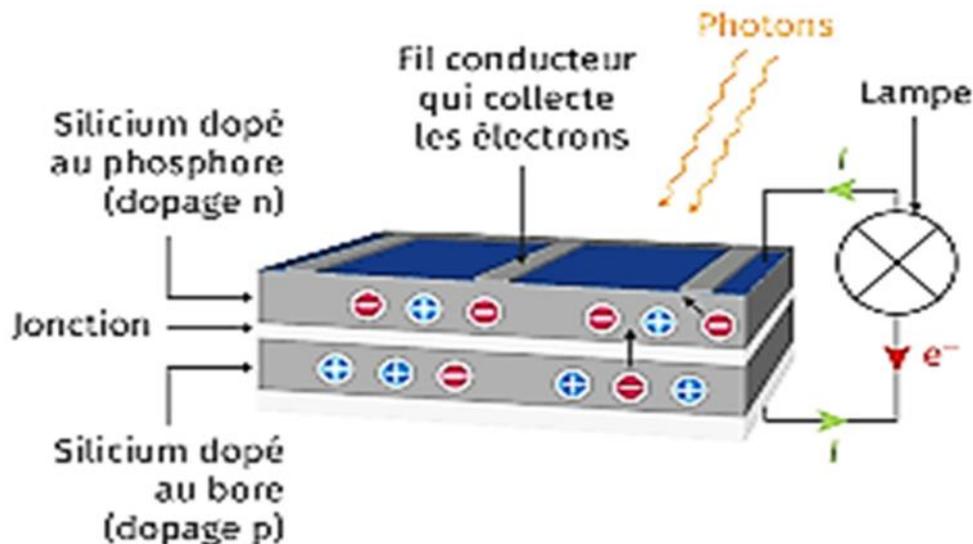
### I.9.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation d'une partie du rayonnement solaire en électricité, la conversion de cette énergie peut se faire grâce aux cellules photovoltaïques. Cela est basé sur un phénomène appelé effet photovoltaïque. Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots : « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière et « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro Volta, qui vient de « volt » et qui représente l'unité utilisée pour la fabrication des cellules solaires.

#### I.9.1.1.Principe de la conversion photovoltaïque

Lorsque la lumière du soleil, ou d'une autre source lumineuse, frappe la cellule photovoltaïque, les photons de la lumière sont absorbés par les atomes du matériau semi-conducteur. Cette absorption d'énergie lumineuse permet aux électrons de se libérer de leur orbite autour des atomes et de se déplacer librement dans le matériau semi-conducteur.

La jonction entre les deux couches semi-conductrices est conçue de telle sorte qu'une couche est dopée avec des électrons en excès (n-dopage) et l'autre avec des trous en excès (p-dopage). Les électrons libres produits par l'absorption de photons de lumière sont attirés vers la couche n-dopée, tandis que les trous sont attirés vers la couche p-dopée. Ce processus crée une différence de potentiel électrique, ou une tension, entre les deux couches.



**Fig.I. 9** : Principe de conversion photovoltaïque.

Lorsqu'une charge électrique externe est connectée aux deux couches semi-conductrices, les électrons et les trous se déplacent dans le circuit électrique, produisant ainsi un courant électrique.

Ce courant est alors disponible pour alimenter des appareils électriques ou stocké pour une utilisation ultérieure.

Le rendement de conversion de la lumière en électricité dépend de plusieurs facteurs, tels que (la qualité du matériau semi-conducteur, la conception de la cellule photovoltaïque, le spectre de lumière solaire, la température et l'intensité de la lumière solaire). Les cellules photovoltaïques sont souvent assemblées en modules pour augmenter la tension et la puissance de sortie.

### **I.9.1.2. Configuration des systèmes PV**

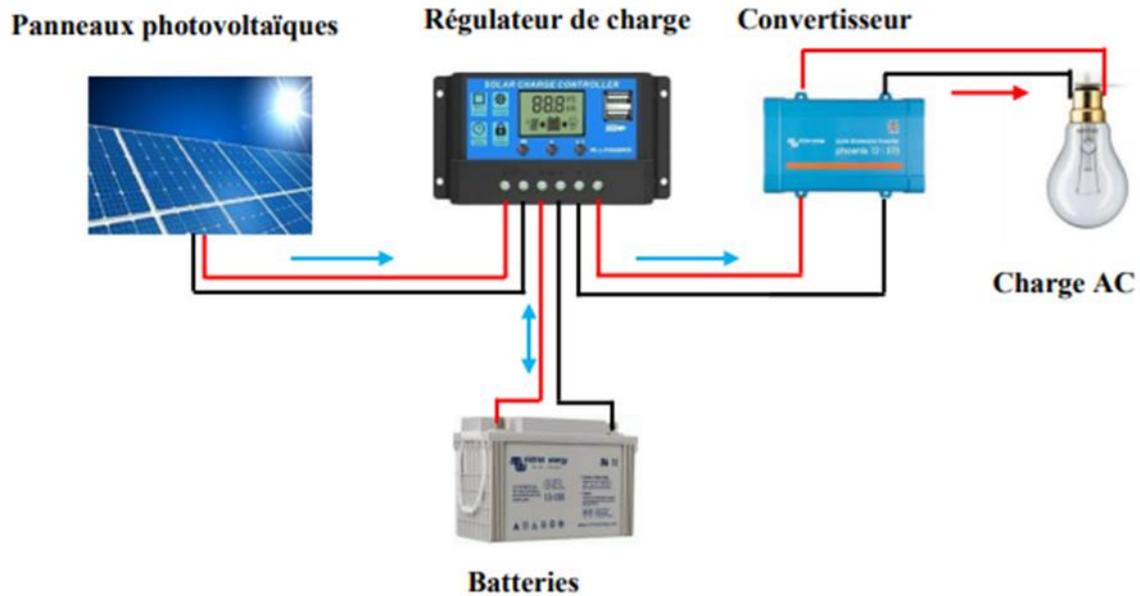
Les configurations des systèmes solaires PV sont prédéfinies pour que chaque système soit rentable et utile répondant aux besoins d'utilisations.

Il existe quatre configurations, chacune d'elles dépend du besoin exprimé :

- Système autonome avec stockage.
- Système autonome hybride.
- Système connecté au réseau.

#### **1. Système autonome avec stockage**

Un système photovoltaïque isolé Figure I.9 alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible, par exemple les maisons en site isolé, sur des îles en montagne, ou en désert. Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries.



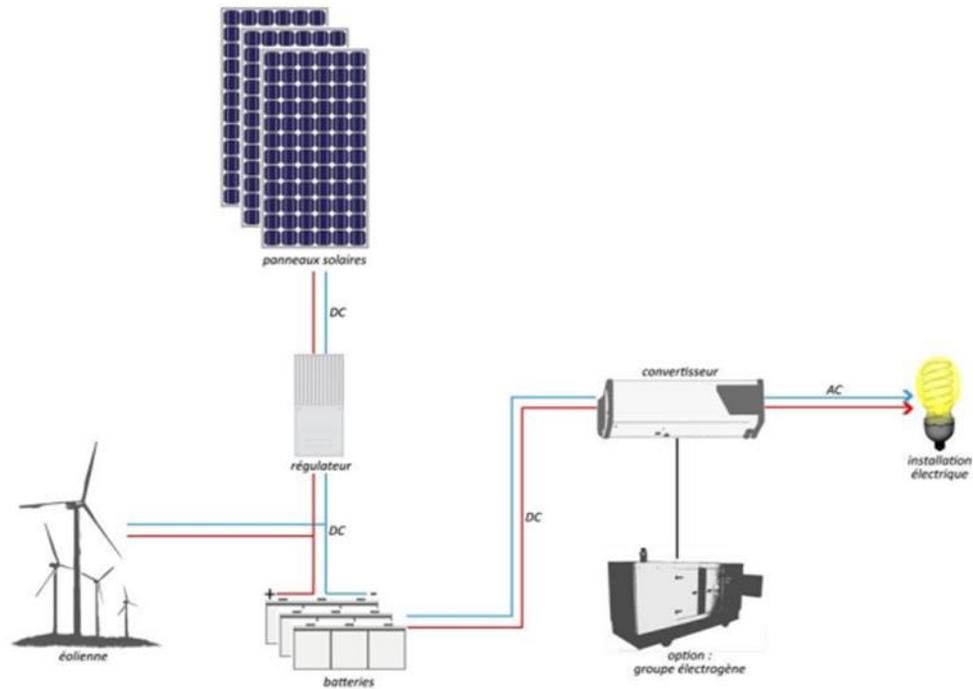
**Fig.I. 10** : Système autonome avec stockage

## 2. Système autonome hybride

Les habitants de certaines régions reculées ont encore du mal à se déplacer en raison de la distance et du manque d'électricité pour la vie quotidienne. Dans ce cas, la solution la plus appropriée est une centrale photovoltaïque hybride, qui, en plus de la consommation d'urgence du groupe électrogène, combine également le domaine de l'énergie photovoltaïque ; ainsi, elle peut contenir une autre ressource renouvelable telle que des éoliennes et des composants hydrauliques.

Dans la Figure I.11, deux sources d'énergies sont utilisées :

- Champs photovoltaïque.
- Groupe électrogène.



**Fig.I. 11** : Exemple d'un système PV hybride.

### 3. Système raccordé au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, on entend un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

Dans le cas de systèmes connectés au réseau, il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau. Pour effectuer cette conversion, on utilise un onduleur. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%. Il en existe de différentes puissances et les onduleurs sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques. L'onduleur possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche d'injecter du courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas en fonctionnement et une fonction de protection contre les surtensions.

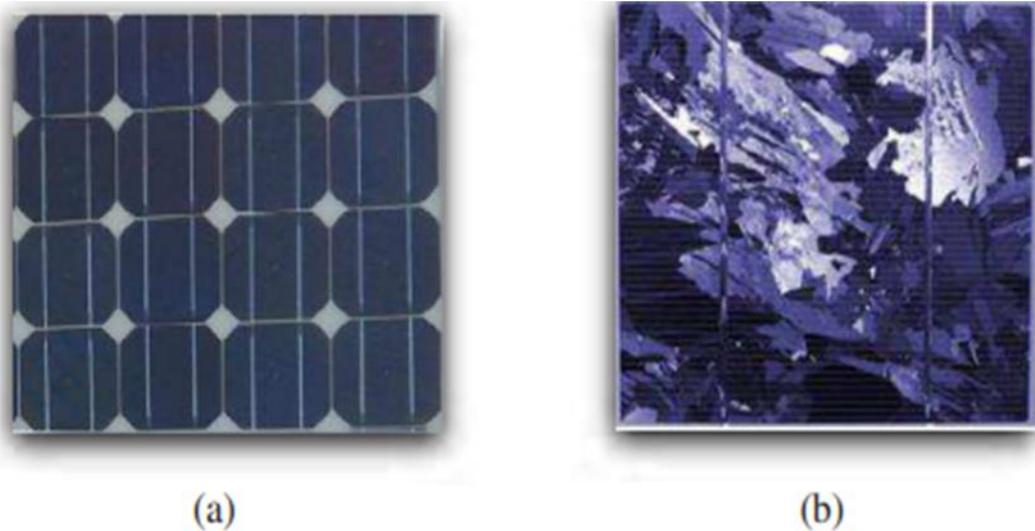
#### I.9.1.3. Technologies des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque peut être conçue en utilisant divers semi-conducteurs. Actuellement, On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements

technologiques selon leur procédé de fabrication : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

### 1. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin[7].



**Fig.I. 12:** Crystalline cells, (a) mono-crystalline, (b) poly-crystalline

### 2. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince

Plus, récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS)



**Fig.I. 13 :** Cellule à couche mince

### 3. Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques »

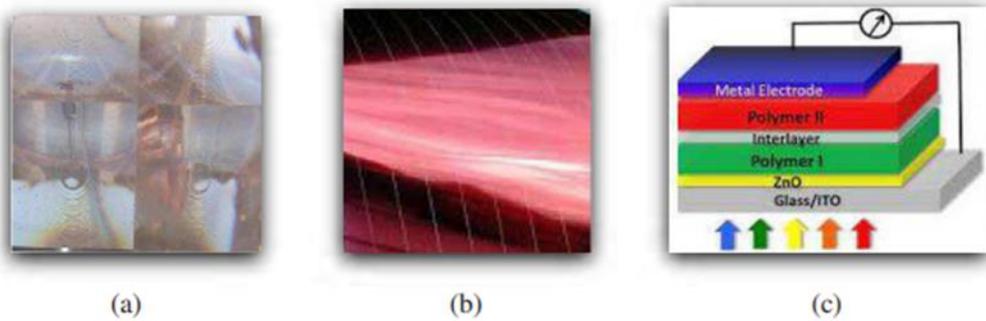
Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules : les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement

Dans le tableau (I.3), ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment[4].

**Tab.I. 2:** Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Type de cellule	Avantage	Inconvénient
Silicium monocristalline	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
Silicium Polycristallin	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
Silicium Amorphe Organiques	Facile à fabriquer Absorbe 90% des photons incidents	Mauvais rendement

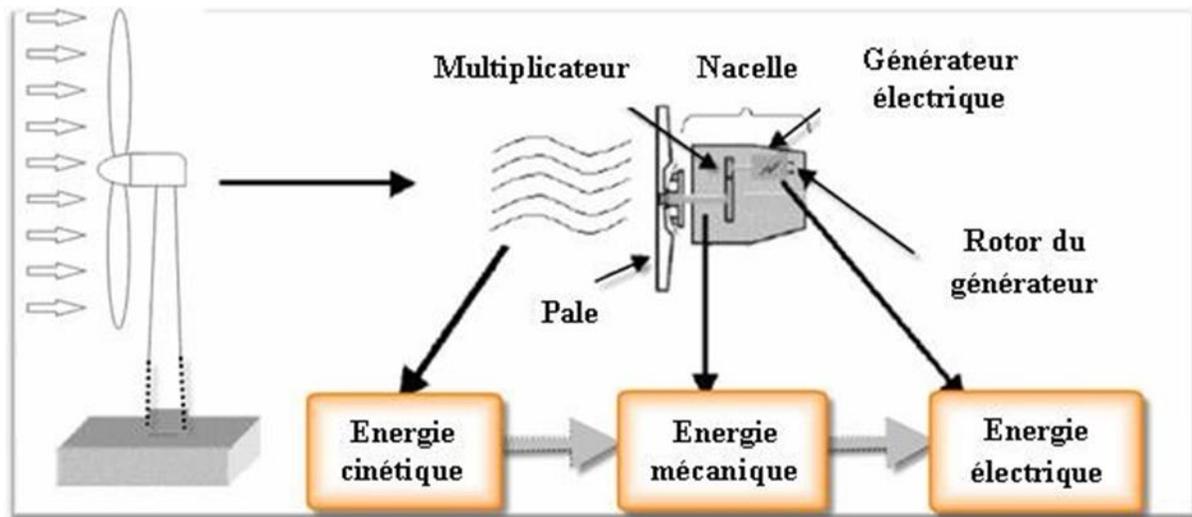
CdTe	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant
CIGS	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Cadmium très polluant Manque de matière première Rendement encore trop bas
Cellules Organiques	Faible cout de fabrication, flexible	Manque de matière première Rendement encore trop bas



**Fig.I. 14 :** Multi-Junction and concentration celles, (a) concentration, (b) organic, (c) multilayer

### I.9.2 Energie éolienne

Une éolienne est un appareil conçu pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est principalement utilisée pour générer de l'électricité et fait partie des énergies renouvelables



**Fig.I. 15:** Conversion de l'énergie cinétique du vent

### I.9.2.1. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [10].

#### 1. Éoliennes à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc facilement accessibles. Certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage, pour cette raison, ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Il existe principalement trois technologies : turbines Darrieus classiques, turbines Darrieus à pâles droites (type H), turbine de type Savonius voir figure [4].



**Fig.I. 16 :** Turbines Darrieus classiques Turbines Darrieus (type H) Turbine de type savonius

## 2. Éoliennes à axe horizontal

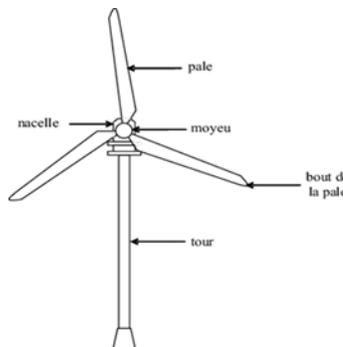
Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées, parce qu'elles.

- Présentent un rendement aérodynamique plus élevé.
- Démarrent de façon autonome ;
- Présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Malgré cela, elles possèdent certains inconvénients :

- Coût de construction très élevé.
- Appareillage se trouve au sommet de la tour, ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Une éolienne à axe horizontales généralement constituée par les trois éléments de base qui sont : le mât (tour ou pylône), le rotor (moyeu et pales) et la nacelle voir figure[11].



**Fig.I. 17 :** Composantes d'une éolienne à axe horizontal

### I.10. Les Systèmes de stockage

Le stockage d'énergie (banque de batteries) est un élément crucial dans un système hybride en site isolé ou pour une utilisation autonome. Dans la plupart des cas, le stockage par le biais de batteries est la solution la plus économique. Les batteries les plus couramment utilisées sont celles au plomb-acide. Cette technologie bénéficie de coûts relativement bas par rapport à d'autres technologies et d'une longue expérience, étant la plus ancienne technologie de stockage d'énergie [3].

Le stockage d'énergie est essentiel lorsque la demande en énergie n'est pas synchronisée avec la disponibilité de l'énergie externe. Il permet de répondre aux besoins de charge sur une période prolongée, allant d'un jour à plusieurs semaines. En raison de la variabilité des ressources renouvelables, les accumulateurs doivent être capables de supporter de nombreux cycles de charge

et de décharge sans dommage. La profondeur de décharge à laquelle une batterie est soumise dépend de son type. La durée de vie des batteries est fortement influencée par l'état de charge, le nombre de cycles de charge/décharge, la température, les phénomènes de corrosion, les conditions d'utilisation, etc[12][13].

### **I.10.1. Régulateur de charge**

Le régulateur de charge constitue un élément fondamental dans les systèmes de production d'énergie autonomes. Il assure le contrôle des cycles de charge et de décharge du banc de batteries, garantissant ainsi leur protection et leur durabilité.

Sa principale fonction est de prévenir les surtensions en interrompant la charge lorsque la tension atteint un seuil critique, ce qui permet d'éviter la surcharge des batteries. Une surcharge prolongée peut en effet provoquer la corrosion des plaques en plomb, la perte d'électrolyte et une dégradation prématurée des éléments internes.

Par ailleurs, le régulateur limite également la décharge profonde des batteries en évitant que leur niveau d'énergie ne descende en dessous de 60 à 70 % de leur capacité, ce qui contribue à prolonger leur durée de vie utile et à améliorer les performances globales du système[7].

## **I.11. Système de commande et de supervision**

On peut distinguer deux types différents dans la stratégie de contrôle d'un système de production d'énergie hybride : le contrôle des sources d'ER (PV, éolien, batterie) par des contrôleurs MPPT et le système de gestion d'énergie du SEH [4].

### **I.11.1. Contrôleurs MPPT**

À cause de la nature aléatoire des sources d'énergie renouvelable, en particulier le photovoltaïque et l'éolien, les chercheurs ont développé des stratégies pour extraire le plus d'énergie possible par des algorithmes MPPT quelles que soient les variations dans les conditions climatiques. En général, ce contrôleur nécessite un convertisseur de commutation afin de contrôler son rapport cyclique. Cette partie de commande est décrite plus en détail dans le chapitre [4].

## **I.12. Système de supervision**

La commande d'un système hybride nécessite l'application d'un système de supervision. Ce dernier est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer de manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, prenant des décisions quant à l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries, générateur diesel) en fonction de la demande de la charge et de la disponibilité des énergies renouvelables.

Il existe plusieurs stratégies de gestion et de supervision proposées dans la littérature pour répondre aux différentes problématiques des systèmes multi-sources. Ces stratégies visent à optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie disponibles, à garantir la fiabilité du système et à minimiser les coûts d'exploitat[8][14].

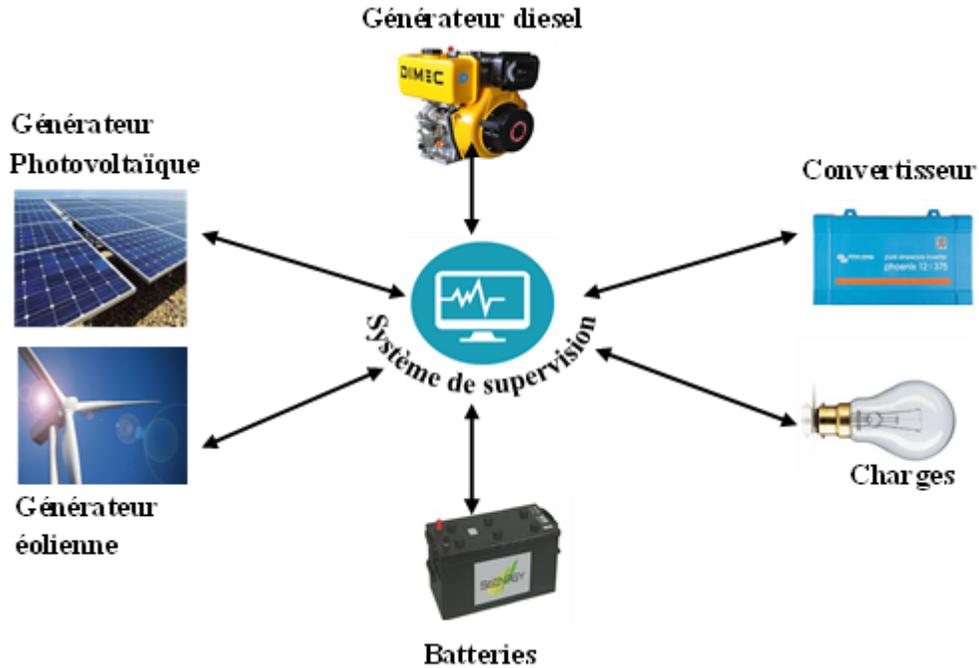


Fig.I. 18 : Système de supervision

### I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général de la production d'énergie à l'échelle mondiale et internationale. Nous avons commencé par exposer l'importance d'utiliser un système de production d'énergie multi-sources. Ensuite, les classifications et les différentes architectures des systèmes multi-sources ont été présentées. Par la suite, les composants principaux du système multi-sources, qui seront le sujet des chapitres deux et trois, à savoir le générateur photovoltaïque, éolien et les batteries, ont été examinés. Enfin, nous avons exposé la situation énergétique actuelle de l'Algérie et le programme ciblé pour la réalisation et le développement des énergies renouvelables. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation des architectures du système multi-source.

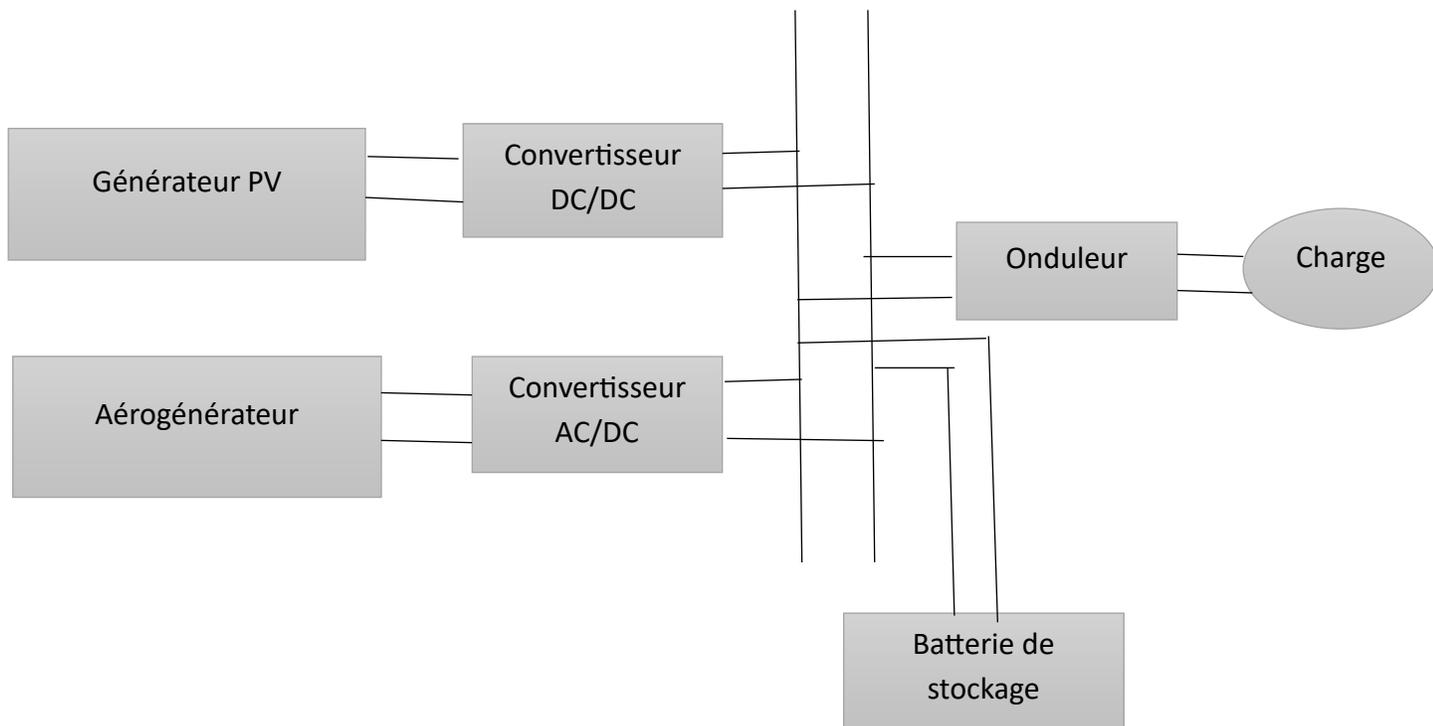
## **Chapitre II :**

Modélisation des systèmes multi-sources

## II.1. Introduction

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. A cet effet, la modélisation du système d'énergie multi-source PV-Eolien -Batterie est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par le système et la demande de l'utilisateur. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année est obtenue à partir d'une étude théorique et expérimentale.

Dans ce cadre, nous présenterons dans ce chapitre d'abord, la modélisation du système hybride PV-Eolien -Batterie, en ce proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les systèmes de production, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue des écoulements des puissances de production en fonction des conditions météorologiques données ou estimées.



**Fig. II. 1:** Système hybride éolien –photovoltaïque

## II.2. Modélisation du système photovoltaïque

Le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque repose sur la modélisation de la cellule photovoltaïque, qui en est l'élément fondamental. Celle-ci permet de représenter le comportement électrique, du générateur à partir de ses caractéristiques physiques.

### II.2.1. Équations régissant le comportement de la cellule photovoltaïque

À partir du schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque, on peut effectivement dériver les relations caractéristiques qui décrivent son comportement, et cela en utilisant la loi de Kirchhoff appliquée au circuit de cette cellule.

Voici un aperçu des étapes nécessaires pour obtenir les formules caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

**Schéma équivalent :** Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque comprend figure II.2 :

- Un générateur de courant **I<sub>ph</sub>** qui représente le courant généré par la cellule sous l'effet de la lumière
- Une diode **D**, représentant la jonction PN de la cellule photovoltaïque
- Une résistance **R<sub>s</sub>** qui prend en compte la résistance interne de la cellule, incluant les pertes liées à la résistance du matériau semi-conducteur et les résistances de contact
- Une résistance parallèle **R<sub>sh</sub>**, qui représente les courants de fuite au niveau de la jonction et dépend de la qualité de fabrication de la cellule.

**Application de la loi de Kirchhoff :** En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff au circuit équivalent, on peut écrire l'expression pour la tension  $V$  et le courant  $I$  dans le circuit, en tenant compte des éléments suivants

**I<sub>ph</sub>** : le courant photo courant généré par la cellule.

**I<sub>D</sub>** : le courant circulant à travers la diode, qui suit la relation exponentielle caractéristique d'une diode.

**I<sub>sh</sub>** : le courant de fuite à travers la résistance parallèle

L'équation de base du courant  $I$  à travers la cellule photovoltaïque peut être écrite sous la forme

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

Où est donné par la diode modèle, généralement exprimée sous la forme :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{v + I R_s}{n v_T}} - 1 \right) \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

**$I_0$**  : le courant de saturation de la diode.

**$V_t$**  : la tension thermique, qui dépend de la température et de la constante de Boltzmann.

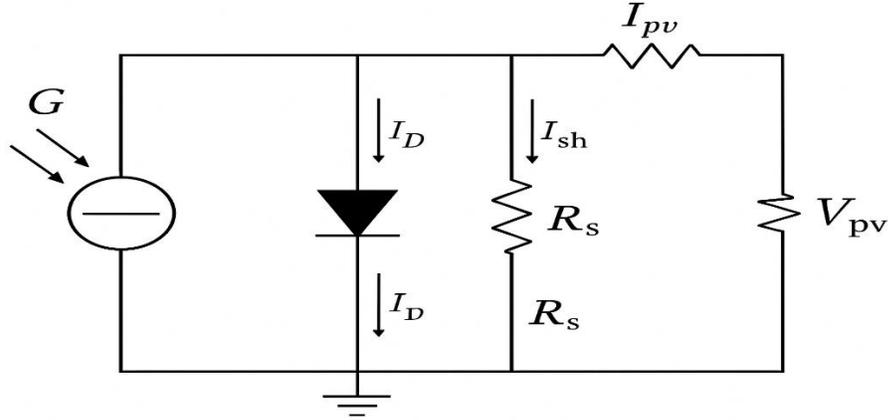
**$n$**  : le facteur d'idéalité de la diode

**Courant et tension de la cellule photovoltaïque** : En réarrangeant les termes et prenant en compte les pertes dans les résistances série et parallèle, on obtient l'expression générale pour le courant  $I$  en fonction de la tension  $V$  :

$$I = I_{Ph} - I_0 \left( e^{\frac{v - I R_s}{n V_{TR}}} - 1 \right) - \frac{v}{R_{sh}} \quad (\text{II. 3})$$

Cette équation permet de modéliser la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque, qui est la courbe essentielle pour analyser le rendement d'une cellule photovoltaïque.

**Formules pour un module ou panneau PV** : Pour un module ou un panneau PV, les mêmes principes s'appliquent, mais on doit prendre en compte l'assemblage en série et en parallèle des cellules. La caractéristique I-V d'un module photovoltaïque peut être obtenue en multipliant la caractéristique d'une cellule par le nombre de cellules en série (pour la tension) et en parallèle (pour le courant)



**Fig. II. 2 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

L'équation devient une formule qui relie le courant d'entrée à la tension de sortie comme le suivant. En remplaçant le courant  $I_D$  traversant la diode,  $I_p$  traversant la résistance parallèle et  $I_s$  le courant circulant dans la résistance série par ses expressions on obtient [15].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times \left( \exp^{\frac{q(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{ac}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 4})$$

$$I_{ph} = \left( \frac{E}{E_{ref}} \right) \times (I_{cc} + k_i \times (T - T_{ref})) \quad (\text{II. 5})$$

$$I_0 = I_{sr} \times \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \times \left( \exp \left( \left( \frac{q \cdot E \cdot g}{A \cdot K} \right) \times \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (\text{II. 6})$$

$$I_{sr} = \frac{I_{ccref}}{\left( \exp \left( \frac{qV_{co}}{N_s A K T} \right) - 1 \right)} \quad (\text{II. 7})$$

AC : le potentiel thermique ;

$I_0$  : Courant de saturation de la diode.

A : coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

q : Charge électrique élémentaire  $1.607 \times 10^{-19}$  C

K : Constant de Boltzmann =  $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K.

T : Température de la cellule en Kelvin

$T_{ref}$  : Température dans les conditions normale en kelvin ( $T_{ref} = 298$  K)

E, Eref : Eclairement réel et éclairement dans les conditions normales

Isr : Courant de saturation réversible

A partir l'équation (II.5) on peut faire la simulation de notre générateur photovoltaïque.

Pour un générateur photovoltaïque composé de Ns cellules montées en série et de Np cellules montées en parallèle les équations caractéristiques d'un GPV sont données par[16][17]:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \times \left[ \exp \frac{q \left[ \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{N_s + \frac{R_s \times I_{pv}}{N_p}} \right]}{N_s A K T} - 1 \right] - \frac{\frac{N_s}{N_p} V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II. 8})$$

Puisque Rp est très grande pour un générateur comprenant plusieurs cellules PV, l'équation (II.8) devient [18]

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \times \left( \exp \frac{q \left( \frac{N_p}{N_s} V_{pv} + R_s \times I_{pv} \right)}{N_s A K T} - 1 \right) \quad (\text{II. 9})$$

## II.2.2. Influence des paramètres d'une cellule PV

En un point donné de la surface de la terre, l'éclairement et la température varient au cours de la journée et selon la saison, mais aussi en raison de causes très locales. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement et en fonction de la température. A l'aide de la caractéristique courant -tension / puissance -tension d'une cellule PV, sous éclairement et température bien déterminée, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque[19].

### II.2.2.1. Influence de l'éclairement d'un module PV

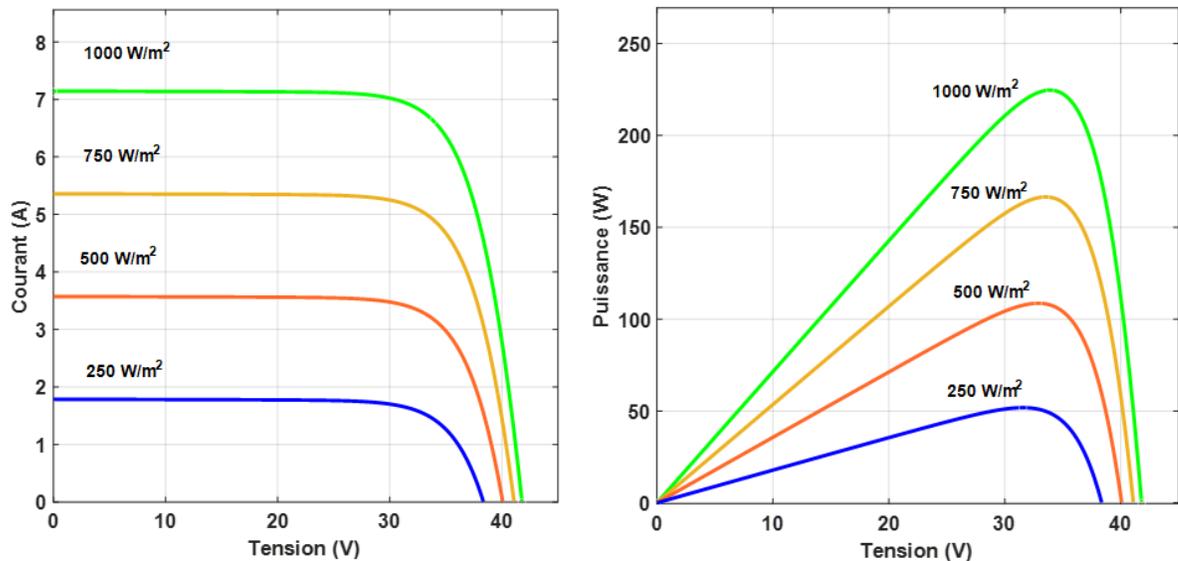
Sous une température constante de 25°C, les variations de l'éclairement (de 250 W/m<sup>2</sup> à 1000 W/m<sup>2</sup>) entraînent des changements significatifs dans le courant de court-circuit (Icc), tandis que les variations de la tension en circuit ouvert (Vco) restent faibles. Le courant de court-circuit varie de manière linéaire avec l'éclairement, tandis que la tension en circuit ouvert suit une variation logarithmique[20].

De plus, l'éclairement a un effet négatif sur la puissance et le rendement du panneau photovoltaïque. La puissance optimale (Pm) est proportionnelle à l'éclairement, mais le point de puissance maximale reste à peu près à la même tension, quelle que soit l'intensité lumineuse. Bien

que l'éclairement augmente la production d'énergie, son effet sur le rendement est atténué par l'augmentation de la température, réduisant ainsi l'efficacité du système.

En résumé, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente linéairement avec l'éclairement, tandis que la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) évolue logarithmiquement, ce qui signifie que la tension optimale

r



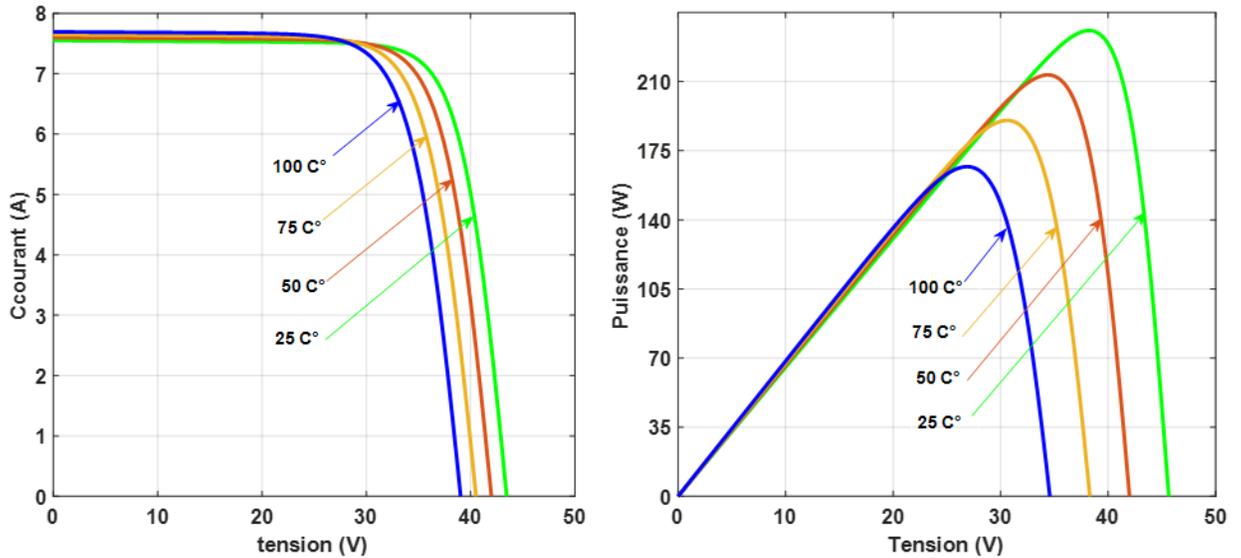
este stable, mais le rendement peut diminuer à cause de l'effet thermique.

**Fig. II. 3:** Effet d'éclairement sur la courbe IPV (VPV) et PPV (VPV)

### II.2.2.2. Influence de la température d'un GPV.

Lorsque l'éclairement est maintenu constant à  $1000 \text{ W/m}^2$  pour différentes températures ( $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ), les courbes caractéristiques montrent que l'augmentation de la température entraîne une légère augmentation du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et une baisse significative de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Cela affecte directement le rendement du module photovoltaïque.

Avec l'augmentation de la température, la tension maximale ( $V_m$ ) diminue, tandis que le courant maximal ( $I_m$ ) augmente légèrement, ce qui entraîne une baisse de la puissance maximale ( $P_m$ ) sur la courbe de puissance (PPV). En résumé, la température a un impact notable sur la tension et le rendement du module, bien que son effet sur le courant soit faible.



**Fig. II. 4:** Effet de la température sur la courbe IPV(VPV) et PPV(VPV)

### II.2.3. MPPT dans les applications photovoltaïques

Dans les systèmes photovoltaïques, la puissance maximale générée par un panneau solaire dépend fortement de l'ensoleillement et de la température. Pour exploiter au mieux cette énergie, il est essentiel d'utiliser une stratégie de suivi du point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking).

Un système MPPT permet d'extraire la quantité maximale d'énergie possible en ajustant dynamiquement le point de fonctionnement du générateur PV. Le contrôleur MPPT est généralement associé à un convertisseur DC/DC, qui adapte la tension et le courant pour atteindre ce point optimal. Parmi les nombreuses méthodes existantes, les algorithmes de type heuristique sont largement utilisés, en particulier l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) en raison de sa simplicité et de son efficacité.

#### II.2.3.1. Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme P&O repose sur le principe suivant : il consiste à perturber la tension de fonctionnement du générateur PV, puis à observer la variation de la puissance produite.

- Si la puissance augmente après la perturbation, cela signifie que le système s'est rapproché du point de puissance maximale, donc la perturbation continue dans le même sens.

- Si la puissance diminue, cela signifie que le système s'éloigne du MPP, donc la direction de la perturbation est inversée.

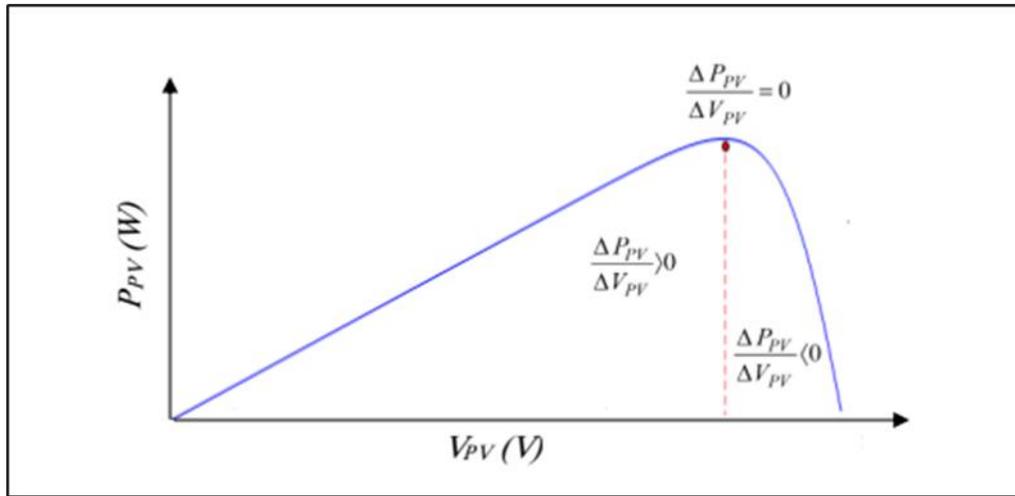
$$\Delta v_{pv} = V_{pv}(k) \quad (\text{II. 10})$$

$$\Delta I_{pv} = I_{pv}(k) - I_{pv}(k - 1) \quad (\text{II. 11})$$

$$\Delta p_v = p_{pv}(k) - P_{pv}(k - 1) \quad (\text{II. 12})$$

Le point de fonctionnement déterminé par l'équation (II.26).

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \begin{cases} = 0, \text{ à PPM} \\ > 0, \text{ à gauche de PPM} \\ < 0, \text{ à droite de PPM} \end{cases}$$



**Fig. II. 5:** Caractéristique PPV (VPV)

Dans la figure II.5 le point de fonctionnement à puissance maximale PPM, est nul le point de fonctionnement est à gauche du PPM, la tension doit être augmentée en diminuant le rapport cycle  $\Delta D$  et si le point de fonctionnement est du côté droit du PPM, la tension doit être diminuée en augmentant le rapport cycle de  $\Delta D$ . Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que PPM soit atteint. La figure 2.9 montre l'organigramme de l'algorithme P&O[21].

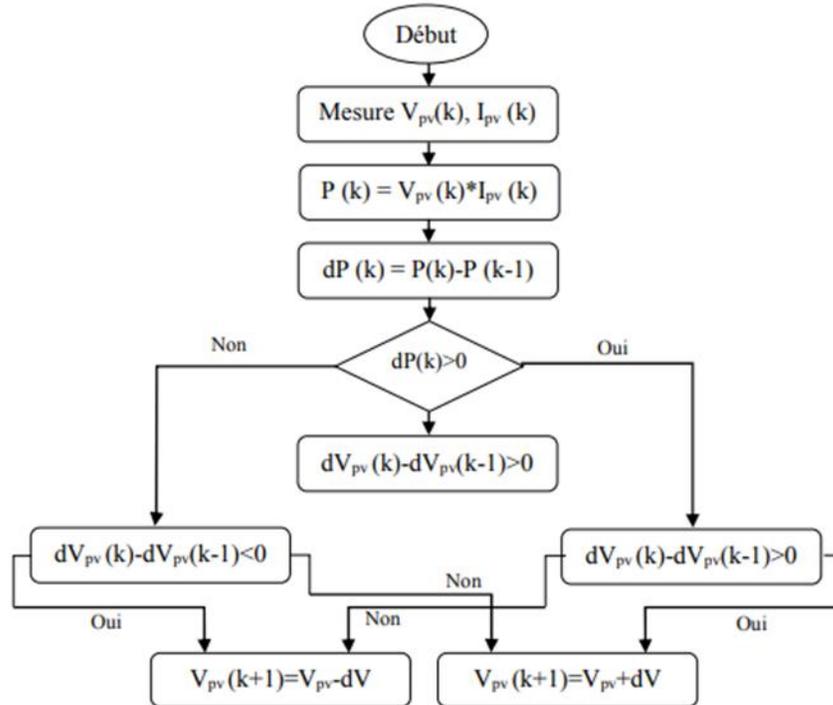


Fig. II. 6: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)[22].

### II.3. Modélisation du système éolien

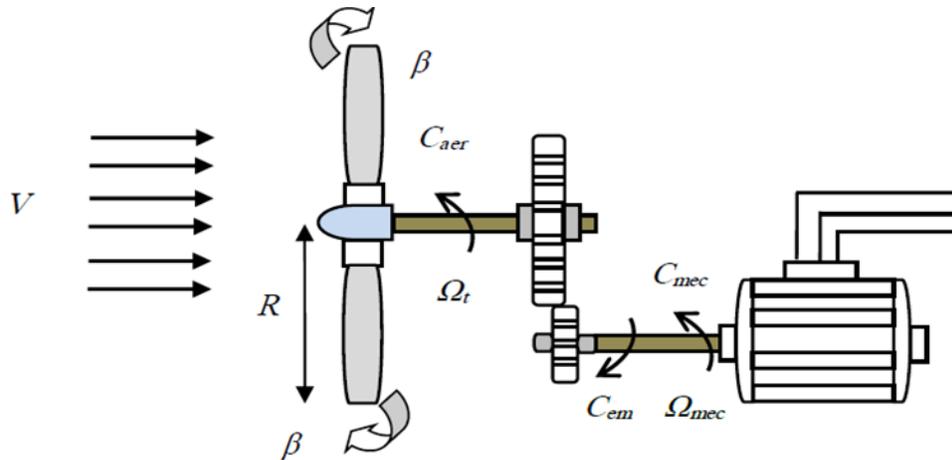
L'énergie éolienne est actuellement l'une des sources d'énergie renouvelable les plus compétitives et en forte croissance. Elle permet de convertir l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des éoliennes conçues pour maximiser cette conversion par une adéquation optimale entre le couple et la vitesse de la turbine et du générateur.

Pour assurer une exploitation optimale, deux systèmes de contrôle sont utilisés : le contrôle électrique, basé sur une machine électrique avec commande, et le contrôle mécanique, qui ajuste l'orientation des pales et de la nacelle selon la direction du vent.

Une description du nouveau système sera présentée, suivie de la modélisation de l'éolienne et du générateur synchrone à aimants permanents, puis l'intégration de l'algorithme MPPT afin d'extraire le maximum d'énergie du vent en toutes circonstances.

### II.3.1. Modèle de la turbine éolien

Dans cette étude, nous supposons que l'éolienne étudiée est constituée de trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_t$  entraînant un générateur, comme le montre la Figure II.7 [23].



**Fig. II. 7 :** Schéma de la turbine éolienne

En fonction de la vitesse du vent, de la densité surfacique et de la section transversale de la surface active  $S$  de la voile, la puissance de la masse d'air est représentée par : [15]

$$p_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II. 13})$$

Où

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \text{ Avec } V_1 \text{ et } V_2 \text{ sont respectivement les vitesses du vent en amont et en aval de l'éolienne.}$$

$\rho$ : Densité d'air

La force du vent n'est pas entièrement captée par les pales, la force aérodynamique est donc inférieure à la force du vent. Les deux forces sont liées par l'expression suivante :

$$p_{aer} = p_v C_p = \frac{1}{2} (\rho \pi R^2 v^3) cP \quad (\text{II. 14})$$

Avec  $C_p$  est le coefficient de puissance. Cela dépend de l'angle d'inclinaison de la pale  $\beta$  et du rapport de vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale de ce coefficient est de 0,59 (16/27), appelée limite de Betz et donnée par la relation (II. 31) :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left[ \left( C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + \lambda C_6 \right] \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

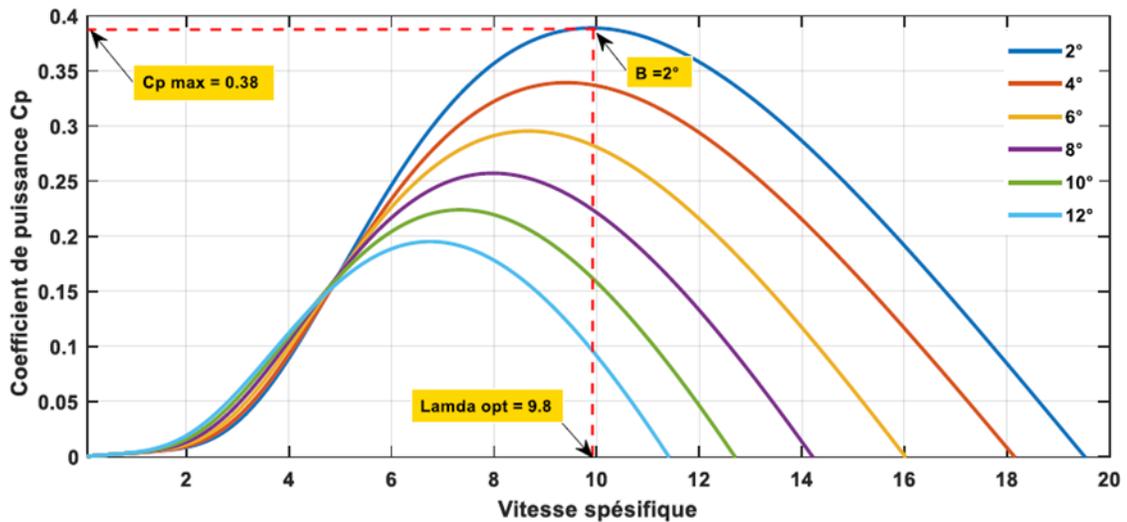
$$C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = -21, C_6 = 0.0068$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II. 16})$$

$$\lambda = \frac{\Omega_i R}{v} \quad (\text{II. 17})$$

Les caractéristiques  $C_p(\lambda)$  des différentes valeurs  $\beta$  de l'angle d'inclinaison de la pale sont présentées dans la figure II.8. La valeur maximale de  $C_p \text{ max} = 0,38$  est obtenue lorsque  $\beta = 2^\circ$  et  $\lambda = 8,9$ . Le moment du vent est donné par [24][25] :

$$c_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \pi R^2 v^3 \cdot c_p \right) \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II. 18})$$



**Fig. II. 8 :** Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique

### II.3.1.1. Modèle de l'arbre.

Les équations dynamiques de base caractérisant le comportement mécanique des composants de la turbine et du générateur sont données par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II. 19})$$

Avec : J est l'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur. Elle est donnée par :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g = J_t + J_g \quad (\text{II. 20})$$

$J_t$  : est l'inertie de la turbine, G : est le gain du multiplicateur, qui dans notre cas est égal à 1,  $J_g$  : est l'inertie du générateur. A noter que le moment d'inertie du générateur est négligeable par rapport à l'inertie de la turbine.

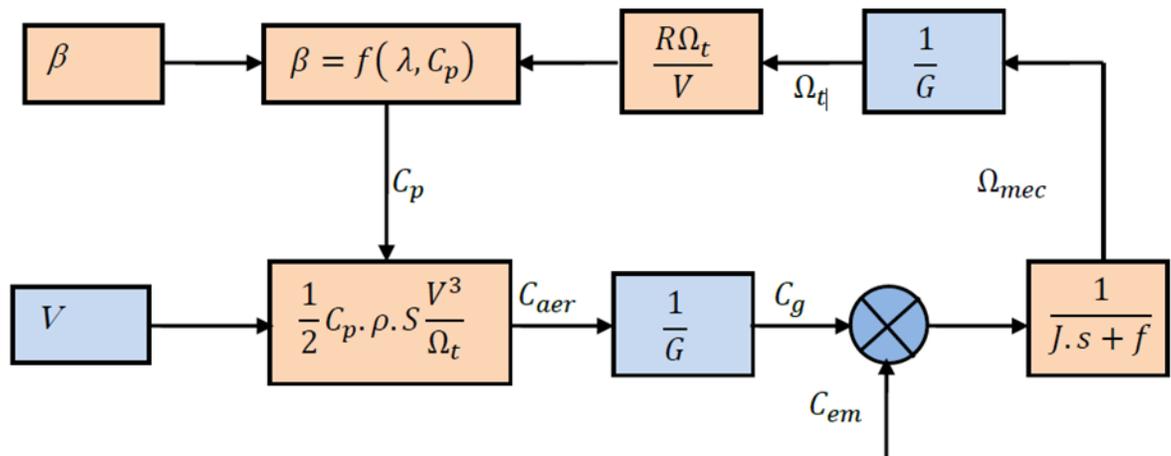
$C_{mec}$  : est le couple mécanique, qui prend en compte : le couple  $C_g$  issu du multiplicateur, le couple électromagnétique  $C_{em}$  généré par le générateur, et le couple  $C_r$  issu du frottement visqueux.

$$C_{mec} = c_g - c_{em} - c_r \quad (\text{II. 21})$$

Le couple de frottement est donné par :

$$c_r = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II. 22})$$

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de cette turbine est issu des équations précédentes et est présenté à la Figure II.9[20].



**Fig.II. 9 :** Schéma bloc du modèle de la turbine.

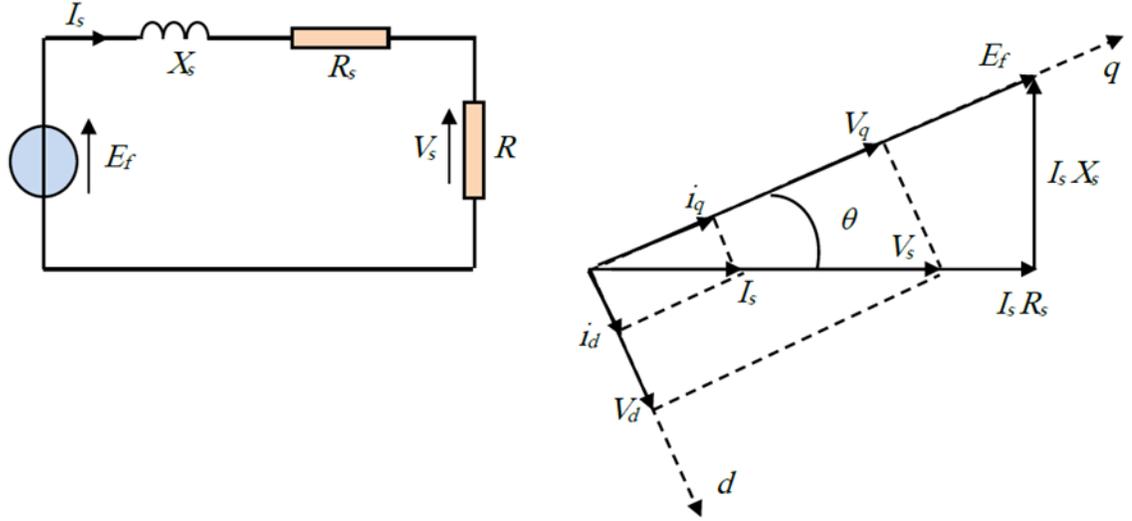
Le schéma fonctionnel montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée en agissant sur deux entrées :

- Couple mécanique du générateur.
- Vitesse du vent.

L'angle d'orientation de la pale est considéré comme une entrée destructrice du système.

### II.3.1.2. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents

En raison des nombreux avantages de MSAP, nous sommes intéressés par son utilisation dans notre système. Généralement, le générateur synchrone à aimant permanent GSAP est modélisé à l'aide d'une source de tension à impédance série. Le circuit équivalent et le diagramme vectoriel sont présentés dans la figure II.10[25].



**Fig. II. 10** : Schéma équivalent du GSAP et le diagramme vectoriel associé.

Le modèle dynamique de la GSAP décrite dans le repère d'axe d-q donné par : [26] [27]

$$\begin{cases} v_q = -R_s i_q - L_q s i_q - \omega_e L_q i_d + \omega_e \varphi_e \\ v_d = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega_e L_d i_q \\ C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_e i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \end{cases} \quad (II.23)$$

Avec :

$L_q, L_d$  : sont l'inductance du stator sur l'axe d-q,  $S$  : est l'opérateur laplacien, et  $C_{em}$  est le couple électromagnétique. À l'aide de diagrammes vectoriels, l'équation (II- 22) peut être exprimée en termes de tension du générateur  $V_s$  comme suit :

$$\frac{v_s i_q}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s - L_q s i_q - \omega_s L_q i_d + \omega_s \varphi_s \quad (II.23)$$

$$\frac{v_s i_q}{\sqrt{i_q^2 + i_d^2}} = -R_s i_d - L_d s i_d - \omega L_s d_i q \quad (\text{II. 24})$$

D'autre part, nous avons  $L_d = L_q = L_s$ , donc l'équation du couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) réduit à :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\phi_s i_q) \quad (\text{II. 25})$$

La tension aux bornes du MSAP peut être contrôlée en modifiant le cycle de service du boost.

La tension  $V_s$  est donc donnée par :

$$V_s = \frac{\pi V_{red} i_d}{3\sqrt{3}} S \quad (\text{II. 26})$$

Par conséquent, les équations (III- 24) peuvent être réécrites sous la forme :

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( -R_s i_q - \omega_s L_s i_d + \omega_s \phi_s - \frac{v_{red} i_d}{3\sqrt{3L_s\sqrt{i_q^2 + i_d^2}}} S \right) \quad (\text{II. 27})$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{L_s} \left( -R_s i_d + \omega_s L_s i_q - \frac{V_{red} i_d}{3\sqrt{3L_s\sqrt{i_q^2 + i_d^2}}} S \right) \quad (\text{II. 28})$$

$$\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{p}{2J} (C_{em} - \frac{3p}{4} \phi_s i_q) \quad (\text{II. 29})$$

Parmi eux :  $i_d$  et  $i_q$  : sont respectivement les courants continu et secondaire du stator,  $\omega_e$  : est la vitesse angulaire électrique,  $R_s$  et  $L_s$  sont respectivement : la résistance de phase et l'inductance du stator,  $P$  : est le nombre de pôles du générateur,  $J$  : est l'inertie du générateur,  $\phi_e$  : est le flux d'aimant permanent par pôle,  $V_{red}$  : est la tension redressée,  $S$  : est le rapport cyclique du convertisseur boost.

### II.3.2. Algorithme MPPT pour le système éolien.

La puissance produite par une éolienne dépend de plusieurs facteurs, notamment ses caractéristiques techniques, les conditions atmosphériques et la vitesse de rotation du rotor. Contrairement à un fonctionnement à vitesse fixe, qui limite l'éolienne à un seul point de la courbe de puissance — souvent loin du point optimal — le mode à vitesse variable offre la possibilité d'ajuster la vitesse du rotor pour atteindre le point de fonctionnement optimal. Lorsque cette vitesse est correctement réglée, la puissance extraite est maximale. Ainsi, la stratégie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) devient primordiale pour les éoliennes à vitesse variable. Cette stratégie s'appuie sur la corrélation entre la vitesse du rotor et la puissance générée. Le

système de commande s'en sert pour déterminer la puissance optimale correspondant à chaque vitesse de vent, et adapte la vitesse du rotor afin de réduire l'écart entre la puissance réelle et la puissance maximale théorique. Dans le cas d'une éolienne connectée à un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP), cette régulation de la vitesse du rotor peut être réalisée en ajustant la tension de sortie du GSAP[28].

Il existe deux structures de commande MPP pour les systèmes éoliens : les méthodes indirectes et les méthodes directes

#### **II.3.2.1. Méthodes directes**

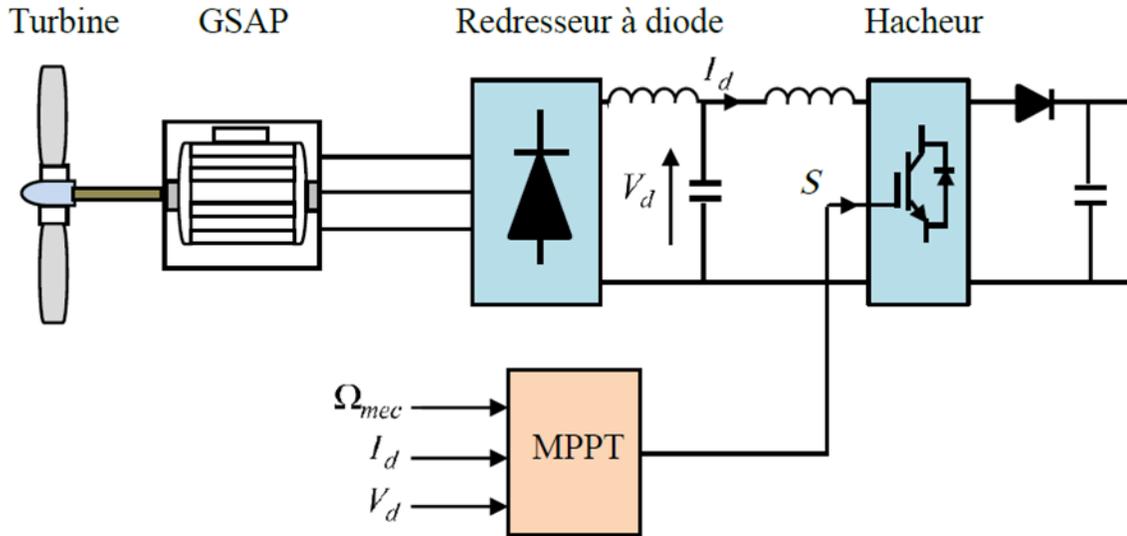
Les méthodes directes sont indépendantes de la connaissance des courbes de puissance et de la vitesse du vent. Ils s'appuient sur des études extrêmes appliquées avec succès aux systèmes photovoltaïques (méthode P&O, méthode Hill Climbing, etc...). Cependant, le processus de conversion de l'énergie éolienne est plus complexe en raison de la nature stochastique du vent, de l'aérodynamique complexe et du comportement non linéaire des générateurs et des systèmes électriques. L'application de ces méthodes aux systèmes de conversion de l'énergie éolienne nécessite donc des modifications et des adaptations[28].

#### **II.3.2.2. Méthodes indirectes**

Les méthodes indirectes de contrôle des éoliennes se basent sur la courbe de puissance de l'éolienne. En analysant cette courbe, il est possible de déterminer la vitesse optimale en fonction de la vitesse du vent et de commander le rotor pour suivre cette vitesse optimale. Dans cette approche, on distingue deux structures de commande.

- Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique

Dans notre modèle d'éolienne, nous supposons que les caractéristiques de la turbine sont bien définies et nous choisissons d'utiliser le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique. Un contrôleur MPPT est implémenté pour optimiser la puissance de sortie de l'éolienne en ajustant le rapport cyclique du convertisseur boost, comme illustré à la figureII.11.



**Fig.II. 11** : Structure de contrôle d'une turbine éolienne

#### II.4. Modélisation de batterie

La Troisième chaîne de conversion de notre système est composée d'un banc de batteries solaires associé à un convertisseur élévateur abaisseur DC/DC, le tout relié au bus continu commun du dispositif hybride.

Ces batteries ont à supporter des conditions de fonctionnement tel que les taux variables de charge et de décharge, la fréquence et la profondeur de décharge, les fluctuations de température, etc. Ces variations rendent très difficile de prédire avec précision les performances de la batterie dans le système à d'énergies renouvelables. Les taux de charge et de décharge élevés et la température sont les principales sources de défaillance de la batterie. Compte tenu de ces paramètres, un bon contrôleur de charge et de décharge est exigé pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement de la batterie Par conséquent, la modélisation de la batterie devient très nécessaire afin d'améliorer ces performances en intégrant un dispositif de commande.

Il existe deux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans les systèmes d'énergies renouvelables : les accumulateurs au Plomb-Acide et les accumulateurs au Nickel-Cadmium. La batterie au plomb-acide est la forme la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa large disponibilité. Par contre, les batteries Nickel-Cadmium sont plus chères,

elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi la batterie au Plomb-Acide compte tenu de l'avantage offert pour les systèmes isolés de production d'énergie.

#### II.4.1. Le modèle électrique de la batterie Plomb-Acide

Le modèle de la batterie au plomb utilisé est composé d'une source de tension contrôlée et d'une résistance série  $R_{in}$ , comme illustré à la figure II.12.

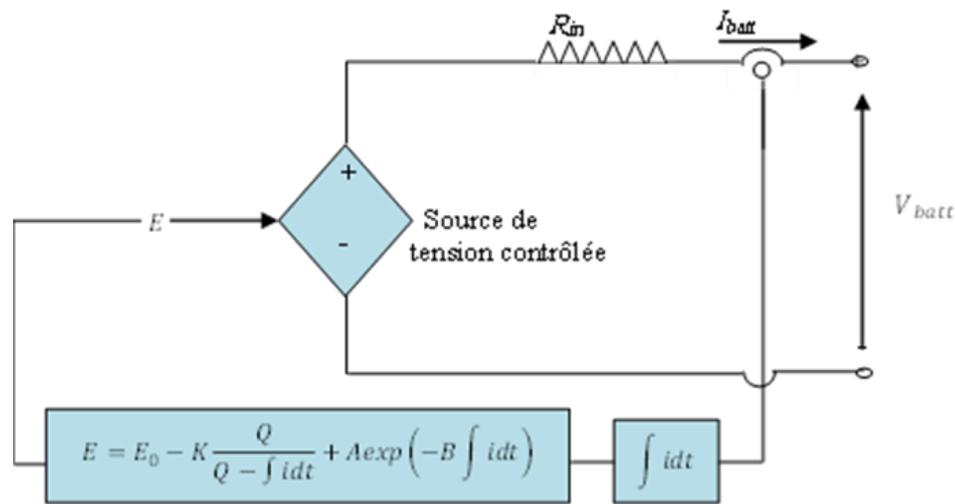


Fig. II. 12: Modèle électrique de la batterie Plomb-Acide

L'entrée de commande  $E$  dépend non seulement du courant mais aussi de l'état de charge de la batterie (SOC). Connaissant ces caractéristiques techniques données par le fabricant, il est très facile de trouver les valeurs de paramètres comme  $E_0$  et  $K$ . La tension à ces bornes est décrite par l'équation suivante[29][30].

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i dt} + A \exp(-B \int i dt) \quad (\text{II. 30})$$

$$v_{Batt} = E - R_{in} I_{Batt} \quad (\text{II. 31})$$

La tension interne de la batterie  $E$  peut être décrite de la manière suivante :

- Pendant la charge.

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* + \alpha(t) \quad (\text{II. 32})$$

- Pendant la décharge

$$E = E^{\circ} - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* + \alpha(t) \quad (\text{II. 33})$$

Où la variable  $\alpha(t)$  est définie par l'équation ci-dessous :

$$\alpha(t) = \int_0^T \frac{B}{t \cdot (A \cdot I_{Batt} - \alpha(t-1))} \cdot dt \quad (\text{II. 34})$$

Avec :

$V_{Batt}$  : Tension de la batterie (V).

Bât : Courant de batterie (A).

Rin : La résistance interne de la batterie (Ohms).

E : Tension non linéaire (V).

E0 : Tension constante (V).

K : Constante de polarisation (Ah-1).

$i^*$  : Dynamique du courant a basse fréquence (A).

it : Capacité extraite (Ah).

Q : Capacité maximale de la batterie (Ah).

T : Temps de charge ou de décharge.

A : Tension exponentielle (V)

B : Capacité exponentielle ( $Ah^{-1}$ )

L'état de charge de la batterie (SOC en anglais) est décrit comme étant le rapport entre la Capacité totale de la batterie et la capacité de la batterie après une décharge temporelle. Deux batteries conçues pour fournir la même énergie ont des tailles différentes si elles sont utilisées pour différents SOC. Par exemple, une batterie utilisée entre 80% et 30% de SOC devrait être plus petite qu'une autre utilisée entre 100% et 50% de SOC. Afin d'éviter la dégradation de la batterie et prolonger sa durée de vie, son état de charge doit être maintenu dans un certain intervalle défini comme suit [25]:

$$SOC_{min}(t) \leq SOC \leq SOC_{max}(t) \quad (\text{II. 35})$$

SOC max : Etat de charge maximale de la batterie et SOC min : Etat de charge minimale de la batterie L'état de Charge SOC de la batterie est exprimé par :

$$SOC(t) = 100 \left( 1 - \frac{1}{Q} \int i dt \right) \quad (\text{II. 36})$$

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la modélisation des différentes composantes du système hybride, notamment le générateur photovoltaïque, l'éolienne et le banc de batteries. Ces modèles mathématiques nous permettent de mieux comprendre le comportement de chaque sous-système en fonction des conditions environnementales et des paramètres techniques. Cette étape est essentielle pour la simulation et l'optimisation globale du système multi-sources, en vue d'assurer une production d'énergie stable, fiable et adaptée aux besoins. Le chapitre suivant portera sur la commande et la modélisation e des convertisseurs statiques.

## **Chapitre III :**

Modélisation et commande des  
convertisseurs statiques

### **III.1. Introduction**

Les systèmes hybrides associant plusieurs sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, l'éolien et le stockage par batteries, nécessitent une gestion intelligente et flexible de l'énergie. Cette gestion repose en grande partie sur l'utilisation de convertisseurs statiques, qui assurent l'interfaçage électrique entre les différentes sources, les systèmes de stockage, la charge et éventuellement le réseau.

Dans ce contexte, la modélisation précise et la commande efficace de ces convertisseurs sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement du système, optimiser le rendement énergétique et assurer une alimentation électrique fiable et de qualité. Les convertisseurs tels que le Hacheur élévateur DC-DC à trois niveaux, le convertisseur bidirectionnel DC/DC, le redresseur triphasé à diodes, et le convertisseur NPC à trois niveaux sont au cœur de cette architecture.

Ce chapitre vise donc à présenter les modèles mathématiques de ces convertisseurs ainsi que les stratégies de commande associées, en tenant compte des interactions dynamiques dans un environnement multi-sources.

### **III.2. Convertisseurs statiques**

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques de puissance permettant de transformer une forme d'énergie électrique en une autre, sans partie mobile, d'où le qualificatif "statique". Ils assurent la conversion entre différentes natures ou niveaux de tension et de courant (AC/DC, DC/AC, AC/AC, ou DC/DC), en utilisant principalement des composants semi-conducteurs (tels que les diodes, transistors IGBT, MOSFET, etc.).

Ces convertisseurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes de production, de transport et de gestion de l'énergie, en particulier dans les systèmes hybrides utilisant des sources renouvelables comme le solaire photovoltaïque, l'éolien, et le stockage par batteries. Ils permettent d'adapter l'énergie produite par les sources aux besoins du réseau ou des charges

### **III.3. Modélisation et commande de la première chaîne de conversion**

#### **III.3.1. Convertisseur DC-DC boost a trois niveaux**

Les hacheurs élévateurs sont fréquemment utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie en raison de leur topologie simple et de leur mécanisme de contrôle. Le TLBC est particulièrement avantageux dans les applications de forte puissance grâce à la réduction des pertes de commutation et de recouvrement inverse de la diode.[31][32]

De plus, le TLBC peut fonctionner avec une inductance plus petite que les convertisseurs boost classiques grâce à une ondulation réduite du courant d'inductance [33].

### III.3.1.1. Modélisation à trois niveaux

La figure.1 illustre la configuration du convertisseur élévateur à trois niveaux, composé de deux convertisseurs élévateurs connectés au milieu des transistors ( $S_{b1}$ ,  $S_{b2}$ ) et des condensateurs ( $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$ ). Les transistors sont commandés avec un décalage de  $T_s/2$  [34].

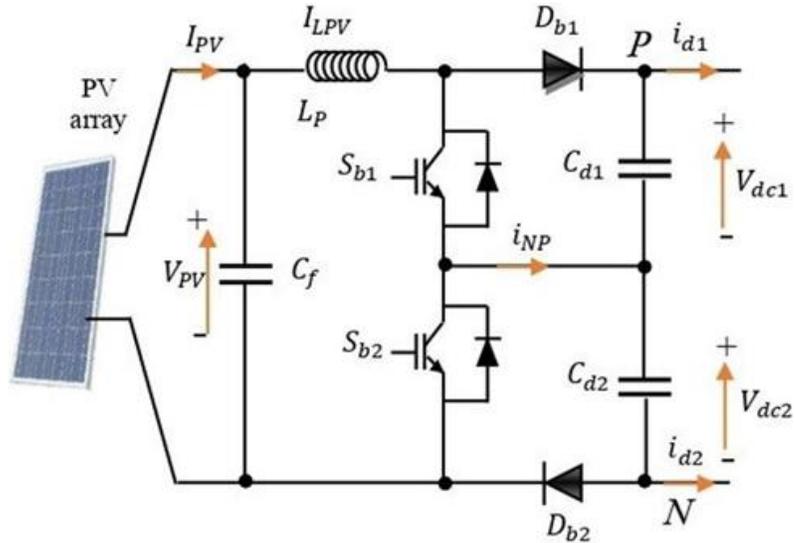


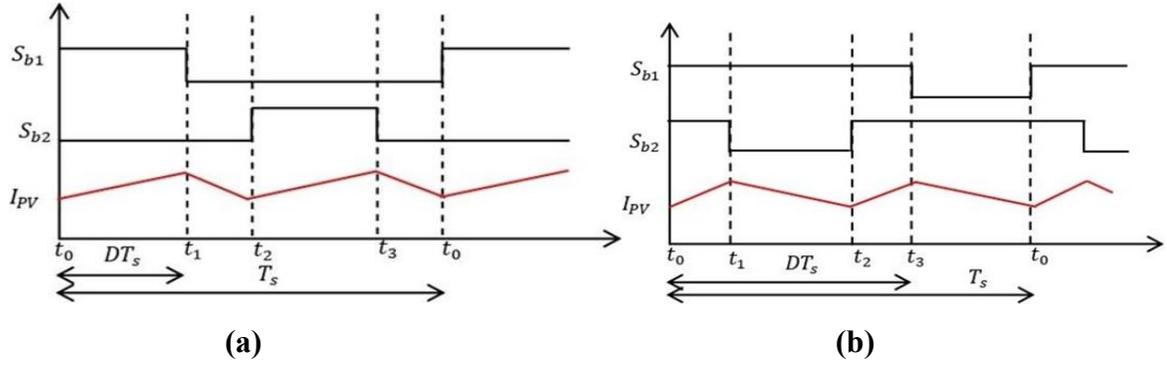
Fig. III. 1 : Convertisseur élévateur à trois niveaux

Le modèle moyenné constitue un outil d'analyse efficace permettant de modéliser le comportement dynamique des grandeurs électriques clés telles que la tension d'entrée  $V_{pv}$ , le courant traversant l'inductance  $I_{pv}$ , ainsi que le courant circulant au point neutre  $NP_i$  [31]

$$\begin{cases} Lb \frac{di_{lpv}}{dt} = V_{pv} - (1 - D_1)V_{dc1} - (1 - D_2)V_{dc2} \\ Cf \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_{lpv} \\ i_{NP} = (D_1 - D_2)i_{lpv} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

$D_1$  : Cycle de service du commutateur  $S_{b1}$

$D_2$  : Cycle de service du commutateur  $S_{b2}$



**Fig. III. 2** : Formes d'onde 3LBC, (a)  $D < 0,5$ , (b)  $D > 0,5$

La figure 5(a) montre les formes d'onde du convertisseur 3LBC lorsque  $D < 0,5$ . Avant l'instant  $t_0$ , les deux interrupteurs  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  restent ouverts. À  $t_0$ , l'interrupteur  $S_{b1}$  est activé, et le courant circule à travers  $L_b$ ,  $S_{b1}$ ,  $C_{d2}$  et  $D_{b2}$ . Cela provoque une augmentation du courant du générateur photovoltaïque  $I_{pv}$ , comme exprimé dans l'équation (III.2)[31].

$$I_{pv}(t) = I_{pv}(t_0) + \frac{V_{pv} - \frac{V_{dc}}{2}}{L_b}(t - t_0) \quad (\text{III. 2})$$

Où,

$$V_{dc} = V_{dc_1} + V_{dc_2} \quad (\text{III. 3})$$

Lorsque le temps atteint  $t_1$ , l'interrupteur  $S_{b1}$  est ouvert, et le courant circule à travers  $L_b$ ,  $D_{b1}$ ,  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  et  $D_{b2}$ . Par conséquent, le courant du générateur photovoltaïque  $I_{pv}$  diminue.

$$I_{pv}(t) = I_{pv}(t_1) - \frac{V_{dc} - V_{pv}}{L_b}(t - t_1) \quad (\text{III. 4})$$

Pendant l'intervalle de temps  $t_2$ , lorsque l'interrupteur  $S_{b2}$  est fermé, le courant circule à travers  $L_b$ ,  $D_{b1}$ ,  $C_{d1}$  et  $S_{b2}$ , ce qui entraîne une augmentation du courant du générateur photovoltaïque  $I_{pv}$ . En revanche, à l'instant  $t_3$ , l'interrupteur  $S_{b2}$  est ouvert, les deux interrupteurs sont ouverts, et le courant passe par  $L_b$ ,  $D_{b1}$ ,  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  et  $D_{b2}$ , provoquant une diminution du courant du générateur PV  $I_{pv}$ , comme indiqué dans l'équation(III.4) [31].

La figure 5(b) montre les formes d'onde théoriques du convertisseur 3LBC lorsque le rapport cyclique dépasse 0,5. Avant l'instant  $t_0$ , l'un des interrupteurs,  $S_{b1}$ , est ouvert tandis que l'autre,  $S_{b2}$ , est fermé. À  $t_0$ ,  $S_{b1}$  se ferme, et les deux interrupteurs deviennent conducteurs. En conséquence, le courant traversant le générateur photovoltaïque augmente, comme indiqué dans l'équation (III.5) [34].

$$I_{pv}(t) = I_{pv}(t_0) + \frac{V_{pv}}{L_b}(t - t_0) \quad (\text{III. 5})$$

À l'instant  $t_1$ , l'interrupteur Sb2 est ouvert, et le courant circule à travers Lb, Sb1, Cd2 et Db2. Par conséquent, le courant traversant le générateur photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) diminue, comme indiqué dans l'équation (III.6).

$$I_{pv}(t) = I_{pv}(t_2) - \frac{\frac{V_{dc}}{2} - V_p}{L_b} (t - t_1) \quad (\text{III. 6})$$

À l'instant  $t_2$ , l'interrupteur Sb2 est fermé, permettant aux deux interrupteurs de conduire le courant. En conséquence, le courant traversant le générateur photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) augmente, comme indiqué dans l'équation(III.5) .À l'instant  $t_3$ , Sb1 est ouvert, et le courant circule à travers Lb, Db1, Cd1 et Sb2.Cela entraîne à son tour une diminution du courant traversant le générateur photovoltaïque ( $I_{pv}$ ), comme indiqué dans l'équation (III.6) [31].

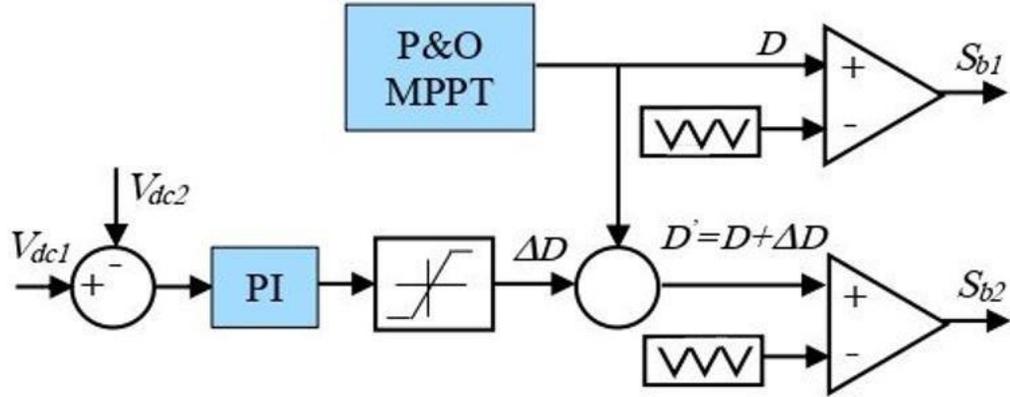
### III.3.1.2. Méthode MPPT proposée

La méthode P&O, également connue sous le nom de Perturbation et Observation, est largement utilisée pour maximiser la puissance photovoltaïque et équilibrer les tensions des condensateurs en assurant le suivi du point de puissance maximale (MPPT) des systèmes photovoltaïques. Cette technique s'adapte aux variations de l'irradiance solaire, comme discuté dans les sources [35][36].

### III.3.1.3. Contrôle de l'équilibrage des tensions

Les condensateurs Cd1 et Cd2 sont chargés alternativement aux tensions Vdc1 et Vdc2. Bien qu'ils aient la même capacité, un déséquilibre de tension apparaît en raison des différences réelles entre les condensateurs et leur résistance série équivalente (ESR). Un contrôleur d'équilibrage de tension est donc nécessaire pour égaliser les tensions des condensateurs en ajustant le rapport cyclique, comme illustré dans la Figure III 3. Sb1 et Sb2 représentent les impulsions de commande des interrupteurs. Dans les convertisseurs DC-DC à trois niveaux à cellules volantes (3LBC), le rapport cyclique détermine la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie.

$$\frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1 - 0,5D_1 - 0,5D_2} \quad (\text{III. 7})$$



**Fig. III. 3 :** Schéma bloc du MPPT avec contrôle de l'équilibre de tension

SI  $D_1=D_2=D$  Alors

$$\frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{III. 8})$$

La tension  $V_{pv}$  générée par le champ photovoltaïque est sujette à des fluctuations dues aux variations des conditions environnementales telles que l'irradiance solaire et la température. Pour maximiser la puissance extraite, un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est intégré. Celui-ci calcule le rapport cyclique  $D$  pour l'interrupteur boost  $S_{b1}$

Cependant, dans une architecture multi-convertisseurs où plusieurs branches partagent le même bus CC, un déséquilibre de tension entre les condensateurs de sortie peut survenir. Pour pallier à cela, un contrôleur PI supplémentaire est mis en œuvre afin de réguler le rapport cyclique  $D'$  de l'interrupteur  $S_{b2}$ , en fonction de l'erreur de tension ( $V_{dc1}-V_{dc2}$ ) Ce mécanisme vise à équilibrer les tensions aux bornes des condensateurs de sortie.

$$\Delta D = k_p + \frac{k_i}{s} (V_{dc1} - V_{dc2}) \quad (\text{III. 9})$$

La fonction de transfert du régulateur PI est exprimé par :

$k_p + \frac{k_i}{s}$  Le rapport cyclique corrigé  $D' = D + \Delta D$  permet d'ajuster dynamiquement la commande de  $S_{b2}$ , assurant ainsi une égalisation précise des tensions.

Un déséquilibre des tensions entre les condensateurs de sortie peut induire une distribution asymétrique de la puissance entre les branches, entraînant une augmentation des pertes par commutation et par conduction dans les convertisseurs. Cela se traduit par une dégradation du rendement global du système, d'où l'importance d'un contrôle efficace du déséquilibre de tension

### **III.4. Modélisation et Commande de la deuxième chaine conversion.**

#### **III.4.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel.**

L'hacheur utilisé pour effectuer la charge et la décharge de la batterie ainsi que le transfert de puissance (courant) doit être réversible. Le schéma électrique équivalent est illustré par la figure III.4 Afin d'effectuer la réversibilité du flux de puissance, les commutateurs du convertisseur doivent idéalement transférer le courant dans les deux directions. La première direction correspond au mode décharge où le convertisseur transfère l'énergie de la batterie vers le bus DC lorsque la production d'énergie renouvelable est déficitaire. Le second représente le mode charge. Quand il y a un excès de production d'énergie renouvelable où le convertisseur bidirectionnel transfère l'excès de puissance du bus DC vers la batterie. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (Boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur (Buck) pendant la charge de la batterie [37].

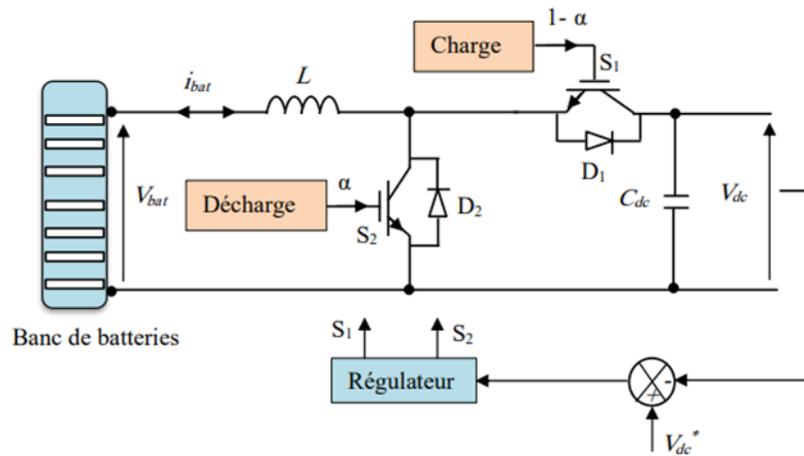
#### **III.4.2. Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel.**

La stratégie de commande du convertisseur bidirectionnel repose sur deux objectifs principaux :

Le premier consiste à contrôler le sens du flux de puissance. Cela signifie déterminer à quel moment la batterie doit fonctionner comme une source d'énergie, et à quel moment elle doit passer en mode de charge (stockage d'énergie). Ce choix dépend de l'état actuel du système hybride et de son évolution. Cette décision est prise par l'algorithme de gestion de l'énergie, qui détermine le mode de fonctionnement approprié pour la batterie.

Le second objectif est la régulation de la tension  $V_{dc}$  au niveau du bus à courant continu (bus DC).

Le principe de commande du convertisseur bidirectionnel est illustré dans la figure suivante.



**Fig. III. 4 :** Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel

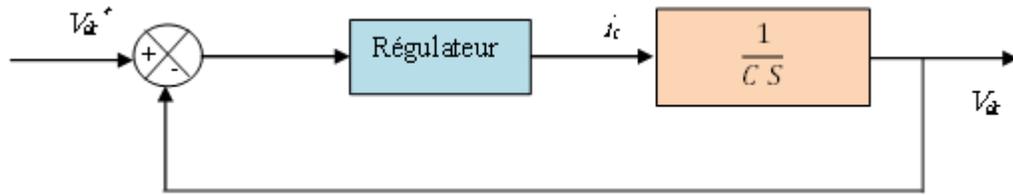
Le convertisseur bidirectionnel joue le rôle d'interface entre la batterie et le bus à DC, il admet deux modes de fonctionnements : charger et décharger la batterie

**TAB. III. 1:** Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes

	<b>Commande</b>	<b>S2</b>	<b>D2</b>
Mode décharge ( $i_{bat} > 0$ )	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$	ON	OFF
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$	OFF	ON
	<b>Commande</b>	<b>S1</b>	<b>D1</b>
Mode charge ( $i_{bat} < 0$ )	$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$	ON	OFF
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$	OFF	ON

### III.4.3. Contrôle de la tension du Bus continu $V_{dc}$ .

Le régulateur de la tension du bus continu a pour objectif de maintenir cette tension à une valeur de référence  $v_{dc}^*$ , en contrôlant le processus de charge et de décharge de la batterie. Dans un premier temps, le bus continu est considéré comme étant piloté par le courant injecté dans le condensateur  $i_c$  ce qui permettra de déterminer les coefficients du correcteur à adopter pour le système.



**Fig. III. 5 :** Boucle de régulation de la tension du bus continu.

Dans cette partie, nous utilisons un type de régulateur, à savoir le régulateur PI (Proportionnel-Intégral)

#### III.4.3.1. Régulateur PI–(Proportionnel-Intégral)

Le régulateur PI est un type de contrôleur utilisé dans les systèmes de régulation automatique pour améliorer la stabilité et la précision du système. Il est composé de deux termes :

Terme proportionnel (P) : agit en fonction de l'erreur instantanée entre la consigne et la sortie du système.

Terme intégral (I) : agit sur l'accumulation de l'erreur dans le temps afin d'éliminer l'erreur statique permanente.

La fonction de transfert d'un régulateur PI est généralement exprimé comme suit :

$$\frac{K_i}{s} + K_p = C(s) \quad (\text{III. 10})$$

Où :

**K<sub>p</sub>** : est le gain proportionnel.

**K<sub>i</sub>** : est le gain intégral.

**S** : est la variable de Laplace.

Le régulateur PI est largement utilisé en raison de sa simplicité et de son efficacité dans de nombreux systèmes industriels où une réponse rapide sans dépassement excessif est souhaitée.

### III.5. Modélisation de la troisième chaîne conversion.

#### III.5.1. Redresseur triphasé à diodes.

Étant donné que les générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) produisent des tensions dont la fréquence et l'amplitude varient, il est nécessaire d'utiliser une électronique de puissance additionnelle afin d'adapter cette énergie aux besoins de la charge. Une solution couramment adoptée

consiste à redresser la tension alternative générée, puis à la convertir et la réguler sous forme continue, avant de l'injecter comme tension d'entrée dans un onduleur.

Dans le cadre de cette étude, un pont redresseur triphasé à diodes est utilisé pour transformer la tension délivrée par le GSAP en tension continue [38]

Considérons alors le circuit illustré dans la figure III.6 composés d'un pont de diodes. En supposant que les diodes sont idéales (commutation parfaite) et que le courant en sortie du redresseur est continu – ce qui est le cas lorsqu'on utilise une charge fortement inductive – on peut analyser le fonctionnement de ce système dans ces conditions.

- Lorsque  $V_1 > V_2 > V_3$ ,  $D_1$  et  $D_3'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_1 - V_3$ .
- Lorsque  $V_1 > V_3 > V_2$ ,  $D_1$  et  $D_2'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_1 - V_2$ .
- Lorsque  $V_2 > V_1 > V_3$ ,  $D_2$  et  $D_3'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_2 - V_3$ .
- Lorsque  $V_2 > V_3 > V_1$ ,  $D_2$  et  $D_1'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_2 - V_1$ .
- Lorsque  $V_3 > V_1 > V_2$ ,  $D_3$  et  $D_2'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_3 - V_1$ .
- Lorsque  $V_3 > V_2 > V_1$ ,  $D_3$  et  $D_1'$  conduisent  $\rightarrow V_d = V_3 - V_2$ .

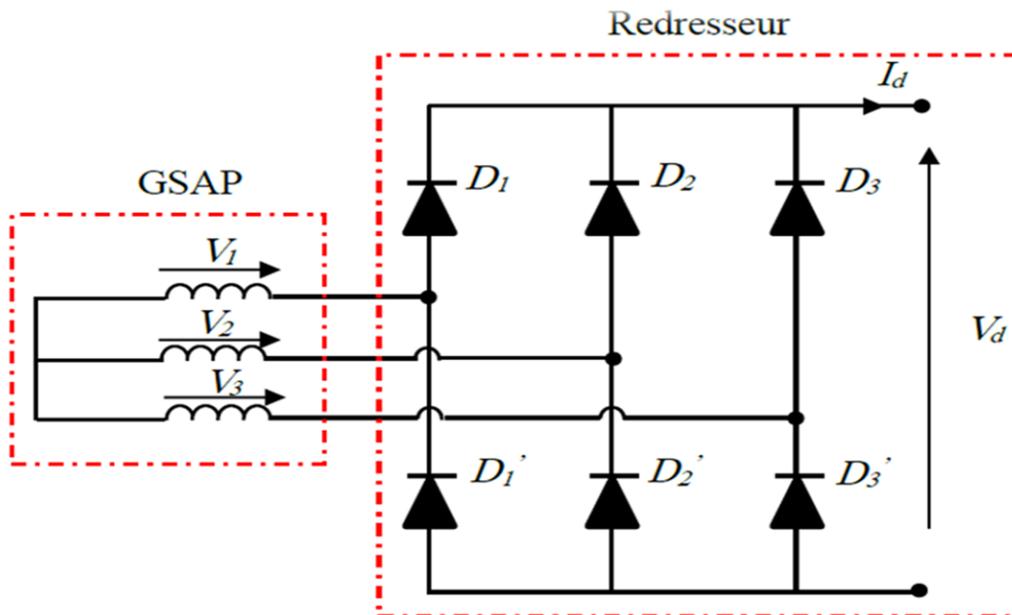


Fig. III. 6: Pont redresseur de diode triphasé.

Par conséquent, chaque diode conduit pendant un tiers de la période et la tension redressée est constituée de six parties de l'onde sinusoïdale pour chaque période T. Sur la figure (III.12), nous représentons l'apparition de la tension redressée Vd.[39]

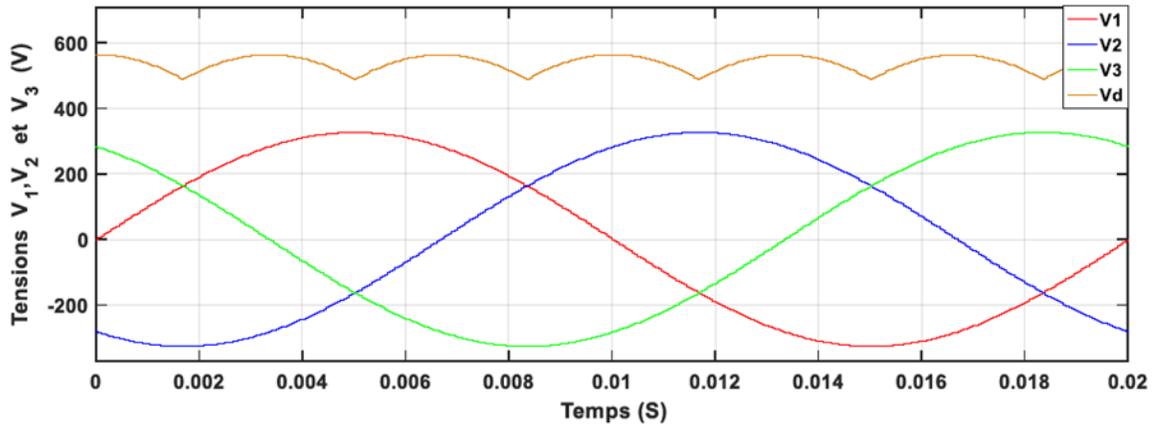


Fig. III. 7 : Allure de la tension redressée

Nous supposons que l'alimentation et le redresseur sont parfaits, et que la tension redressée Vd est périodique de période T/6. Entre 0 et T/6, l'expression de cette tension est :

$$Vd = Vs \sqrt{2} \cos (wt) \quad (\text{III. 11})$$

Où Vs est la valeur efficace de la tension d'entrée. Les composants n'étant pas parfaits, cela se traduira par une valeur plus faible de la tension redressée Vd. Cette chute peut être ignorée.

Dans ce cas nous avons.

$$\langle Vd \rangle = \frac{1}{\left(\frac{T}{6}\right)} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} Vd dt = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{GSAP} \quad (\text{III. 12})$$

$$\langle I_d \rangle = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{GSAP} \quad (\text{III. 13})$$

Son facteur d'ondulation est donné par :

$$k\% = \frac{V_{dmax} - V_{dmin}}{2\langle V_d \rangle} = 7\% \quad (\text{III. 14})$$

Ou  $\langle V_d \rangle$  et  $\langle I_d \rangle$  sont les valeurs moyennes de la tension et du courant de sortie du redresseur, VGSAP et IGSAP sont les valeurs efficaces de la tension fondamentale et du côté AC.

### III.6. Modélisation L'onduleur à trois niveaux (NPC)

L'onduleur à trois niveaux (NPC), illustré à la figure 9, est composé de deux sources de tension continue et de trois bras. Chaque bras est équipé de quatre interrupteurs bidirectionnels à courant contrôlé et de deux diodes de point médian pour atteindre une tension de sortie nulle. Des interrupteurs contrôlables gèrent la mise en marche et l'arrêt de l'onduleur.

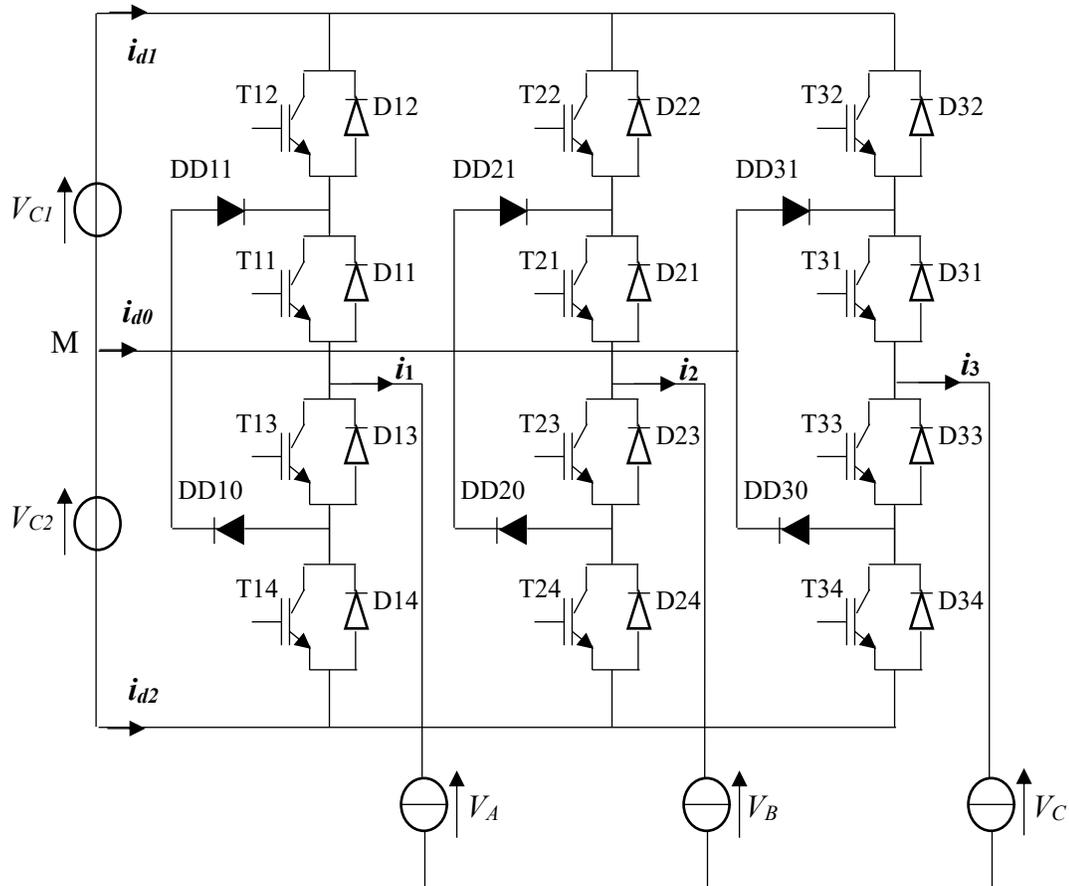


Fig. III. 8 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

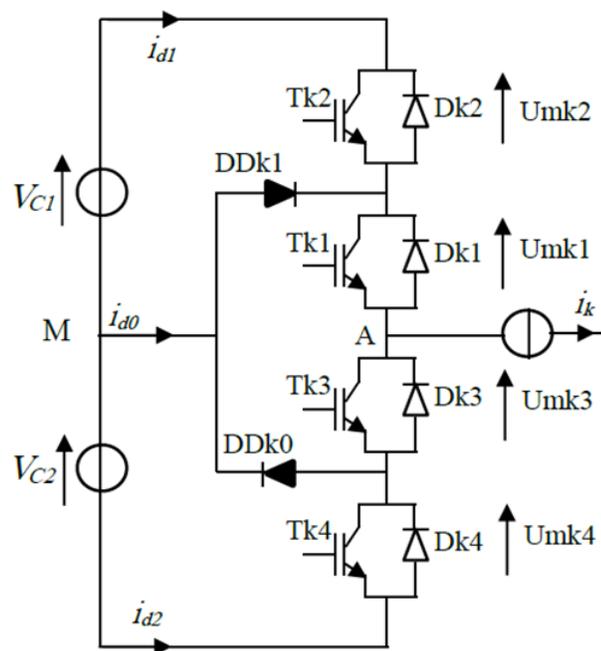
#### III.6.1. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Il est important de déterminer les différentes valeurs que peut prendre la tension simple VAM mesurée entre la borne "A" de la charge et le point neutre M. Cette tension dépend directement de l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs du bras : TDk1, TDk2, TDk3 et TDk4.

La direction du transfert d'énergie au sein du convertisseur est déterminée par le sens des courant  $i_{d1}, i_{d2}$  et  $i_{d3}$ .

Lorsque le réseau agit en tant que source d'énergie (génératrice) et que la source de courant en sortie se comporte comme une charge (réceptrice), le transfert d'énergie se fait à travers les transistors. En revanche, si l'énergie circule de la sortie vers l'entrée, ce sont les diodes qui permettent le passage du courant.

Pour analyser les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur, il convient donc d'étudier d'abord les différentes valeurs que peut prendre la tension VAM, définie exclusivement par l'état des quatre interrupteurs du bras concerné.



**Fig. III. 9 :** Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

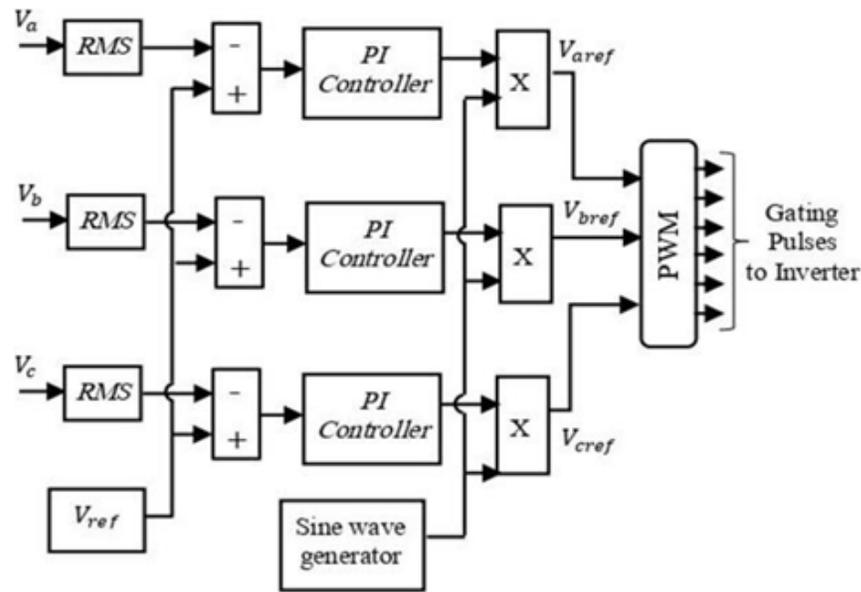


Fig. III. 10 : Commande MLI d'un onduleur à trois niveaux

Un onduleur triphasé côté charge fournit une tension et une fréquence stables. Dans les réseaux de distribution, les charges monophasées déséquilibrées créent des différences de courant de phase et des déséquilibres de tension. Pour réguler la tension de charge, un ajustement vectoriel de tension alimente un régulateur PI en fonction de l'erreur entre les tensions efficaces de phase et la tension de référence, comme illustré à la figure 10. Le régulateur multiplie la sortie par un générateur d'onde sinusoïdale unitaire afin d'obtenir les tensions de phase de référence ( $V_{aref}$ ,  $V_{bref}$ ,  $V_{cref}$ ) pour générer les impulsions PWM destinées à l'onduleur [40].

### III.1.2. Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras  $k$  de l'onduleur triphasé à trois niveaux et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit :

$$\begin{cases} Bk_1 = \bar{B}k_2 \\ Bk_3 = \bar{B}k_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Bk_1 = \bar{B}k_3 \\ Bk_2 = \bar{B}k_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_{k_1} = \bar{B}_{k_4} \\ B_{k_2} = \bar{B}_{k_3} \end{cases}$$

**Commande N° 1.**

- Soit la commande complémentaire suivante.
- $B_{km}$  : Commande du transistor (T)<sub>km</sub> du bras K.

La table logique correspondante à cette commande est définie dans le tableau.

**TAB. III. 2 :** La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°1.

$B_{k_1}$	$B_{k_2}$	$B_{k_2}$	$B_{k_3}$	Tension de sortie du bras k " $V_k$ "
0	1	0	1	Inconnue (dépend de la charge)
0	1	1	0	V=0 ou I = 0 (inconnue)
1	0	0	1	V= 0 ou I = 0 (inconnue)
1	0	1	0	V=0

Cette commande rend le système pratiquement in commandable.

**Commande N°2**

Soit la commande complémentaire suivante :

**TAB. III. 3 :** La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°2

$B_{k_1}$	$B_{k_2}$	$B_{k_3}$	$B_{k_4}$	$v_k$
0	0	1	1	$-V_{c_2}$
0	1	1	0	Inconnue
1	0	0	1	Inconnue
1	1	0	0	$+V_{c_1}$

La commande dans ce cas n'est possible qu'à deux niveaux.

La même chose pour cette commande, le système est pratiquement incommandable.

**Commande N°3**

Soit la commande complémentaire suivante :

La table logique correspondante à cette commande est définie dans le Tableaux III .4 :

**TAB. III. 4 :** La table d'excitation associée à la commande complémentaire proposée.

$B_{k_1}$	$B_{k_2}$	$B_{k_3}$	$B_{k_4}$	$V_k$
0	0	1	1	$-V_{c_2}$
0	1	0	1	Inconnue
1	0	1	0	$V=0$
1	1	0	0	$+V_{c_1}$

Cette commande complémentaire rend le système totalement commandable à trois niveaux. La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras  $V_{c_1}, 0, V_{c_2}$ , avec  $V_{c_1} = V_{c_2}$ . C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

On commence par définir l'état de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire, c'est-à-dire la fonction de connexion  $F_{km}$  de l'interrupteur est :

$$f_{km} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{km} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{km} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par cette relation :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases}$$

On définit la fonction de connexion  $F_{km}^b$  du demi-bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases}$$

$F_{k1}^b$  Est associée au demi-bras du haut (la paire  $(TD_{k1}, TD_{k2})$ ) et  $F_{k0}^b$  au demi-bras du bas (la paire  $(TD_{k3} = TD_{k4})$ ).

On désigne par :

$$m = \begin{cases} 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \\ 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \end{cases}$$

Le système d'équation (2.31) montre que la fonction de connexion du demi-bras  $F_{km}^b$  vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs du demi-bras associés à  $F_{km}^b$  sont tous fermés et nulle dans tous les autres cas.

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la commande des différents convertisseurs statiques utilisés dans un système hybride combinant des sources photovoltaïques, éoliennes et un système de stockage par batterie. L'étude s'est concentrée sur le convertisseur DC-DC Boost à trois niveaux, utilisé pour l'adaptation de la tension des panneaux solaires, le convertisseur DC/DC bidirectionnel permettant la gestion de l'énergie avec la batterie, le redresseur triphasé à diodes pour le couplage de la source éolienne, ainsi que le convertisseur NPC à trois niveaux, assurant un transfert d'énergie stable et de qualité vers la charge ou le réseau.

La modélisation mathématique de ces composants nous a permis de mieux comprendre leur comportement dynamique au sein d'un système multi-sources. Par ailleurs, des stratégies de commande adaptées ont été appliquées afin de garantir la stabilité du système, l'optimisation de l'énergie, ainsi qu'un fonctionnement coordonné entre les différentes sources et le stockage.

Le prochain chapitre portera sur la modélisation globale du système hybride, suivie par l'analyse des résultats issus de la simulation, afin d'évaluer les performances du système dans divers scénarios de fonctionnement.

## **Chapitre IV :**

Simulation et discussion des résultats

## IV.1. Introduction

Ce chapitre présente un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable un générateur photovoltaïque pour la conversion de l'énergie solaire et un générateur éolien pour exploiter l'énergie du vent. Ce système est conçu pour alimenter en électricité des zones isolées, où le raccordement au réseau électrique s'avère coûteux et peu rentable.

En l'absence de soleil et de vent, des batteries assurent la continuité de l'alimentation électrique. L'intégration d'un contrôleur PI dans un convertisseur Buck-Boost, couplé à une charge variable via un onduleur NPC triphasé, constitue une solution innovante et intelligente pour la gestion de l'énergie renouvelable.

En combinant de manière synergique des stratégies de contrôle avancées, des dispositifs de stockage d'énergie et une conversion efficace, ce système répond aux défis posés par l'intermittence des sources renouvelables et par les variations de la demande énergétique. Il ouvre ainsi la voie à un futur énergétique plus propre, plus durable et plus fiable.

Ce chapitre abordera les considérations de conception, les stratégies de commande, ainsi que les performances obtenues avec ce système hybride.

## IV.2. Description du système

Le système d'énergie hybride illustré dans la figure IV.1 combine des panneaux solaires photovoltaïques et des générateurs éoliens connectés à un stockage de batterie avec des unités de contrôle PI (proportionnelle-intégrale) pour réguler la tension. Une unité de contrôle P&O est utilisée pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) dans le système photovoltaïque. Un onduleur triphasé à trois niveaux est assuré entre le NPC et la charge DC. L'objectif du système est d'améliorer l'utilisation de l'énergie, de renforcer la stabilité et d'optimiser les performances globales.

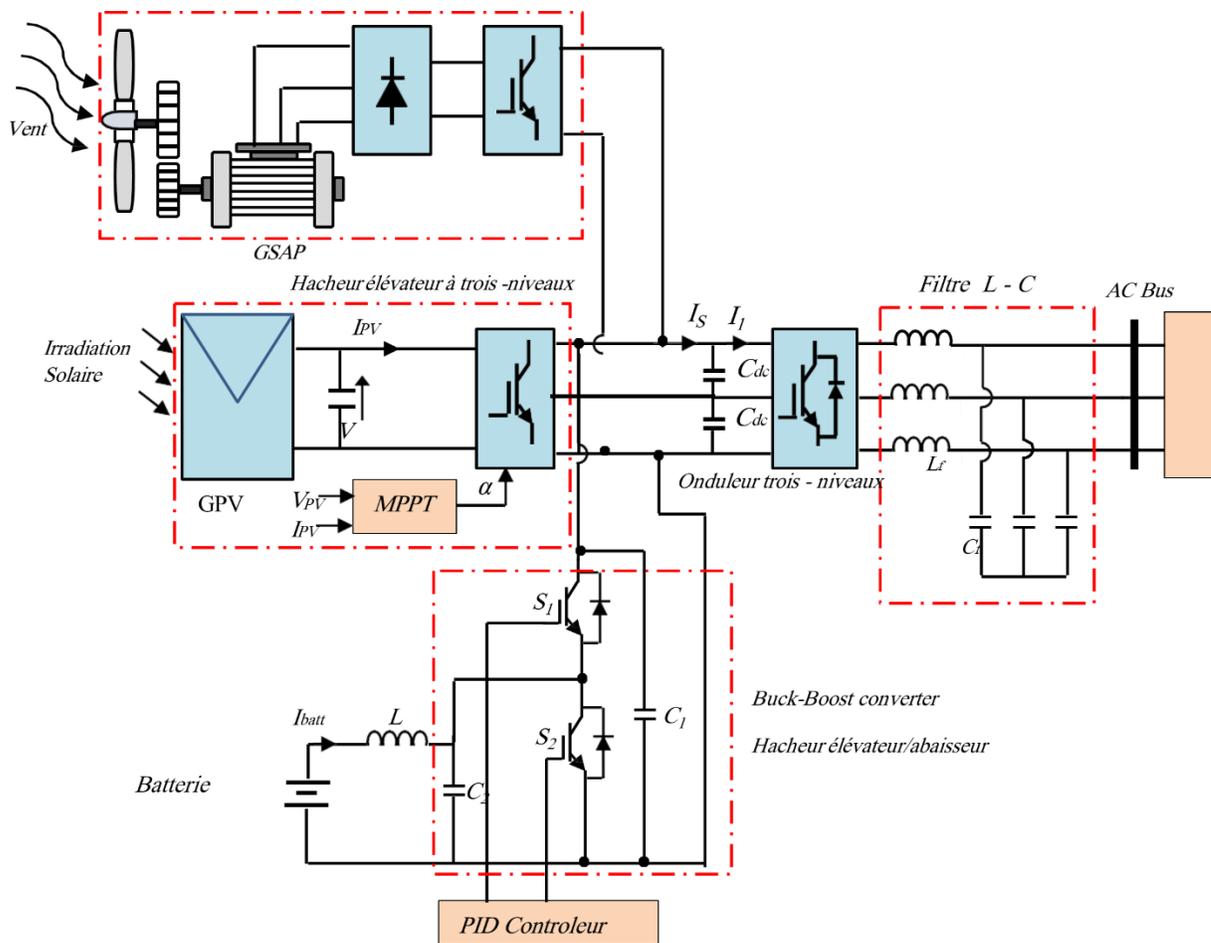


Fig. IV. 1 : Le système énergétique hybride

### IV.3. Paramètres du générateur photovoltaïque

Les paramètres du générateur photovoltaïque utilisée dans notre étude est résumé dans les tableaux II.1 et II.2 :

Tab.IV. 1 : rassemble les différentes grandeurs électriques du GPV

Paramètre	Identification de la quantité (unité)	Valeur correspondante
Voc	Tension du circuit ouvert (V)	41.7984
Isc	Courant de court-circuit (A)	7.13383
Vmp	Tension au point de puissance maximale (V)	33.9

Imp	Courant au point de puissance maximale (A)	6.63419
Pmm	Puissance maximale (W)	224.9
Rs	Résistance série ( $\Omega$ )	0.2043
R	Résistance parallèle ( $\Omega$ )	1830.7
Isat	Courant de saturation (A)	3.0815e-07
Iph	Photon courant (A)	7.145
Qd	Facteur d'idéalité	1.6
Q	Charge élémentaire (c)	1.6*10 <sup>-19</sup>
K	Constante de Boltzmann (J/K)	1.38*10 <sup>-23</sup>
Vg	L'énergie de gap (e-V)	1.2

**Tab. IV. 2 :** Paramètres du module HIP-225HDE

Paramètres	Valeurs
Nombre de cellules par module	60
Nombre de modules connectés en série	6
Nombre de panneau connectés parallèles	6

#### IV.4. Simulation et discussion des résultats

**Tab. IV. 3:** Paramètres du tableau PV Array

Composants	Valeurs de notation
Type de module	Sanyo HIP-225HDE1
Number de cellules	60
Module série	06
Module parallèle	06
Voc, Isc, Vmmp, Immp	41.79V, 7.13A, 33.9V, 6.63A

Rs, Rp, Isoat, Iph,	00.204 $\Omega$ , 1830.7 $\Omega$ , 3.0815e-07A, 7.145A,
---------------------	--

**Tab. IV. 4:** Paramètres de la batterie

Type de batterie	Valeurs de notation
Type de batterie	Lead-Acid
Tension nominale	300 V
Capacité nominale	6.5 Ah
État de charge initial	60%

**Tab. IV. 5 :** Paramètres du générateur éolien

Composants	Valeurs de notation
Puissance mécanique nominale	8.5 KW
Densité de l'air	1.225 Kg/m <sup>3</sup>
Zone balayée	1.06 m <sup>2</sup>
Vitesse du vent nominal	12 m/s

**Tab. IV. 6:** Paramètres MSAP

Composants	Valeurs de notation
Nombre de phases	3
Paires de bâtons	5
Inductance [ Ld Lq ]	[0.0082 H 0.0082H]
Vitesse nominale	153 rad/sec
Résistance statorique	0.425 $\Omega$

Flux efficace	0.433 Wb
Type de rotor	Salient pole

La stratégie de contrôle du système inverse PV/éolien/batterie utilisant un 3LBC et un 3LI avec stockage, illustrée à la figure IV.1, comprend :

- Un contrôleur MPPT de type P&O est utilisé pour optimiser l'extraction d'énergie solaire et éolienne, tandis qu'un contrôleur PI est employé dans le convertisseur élévateur à trois niveaux (3LBC) pour stabiliser la tension du bus continu.
- Un régulateur PI associé à l'algorithme de gestion de la batterie pour contrôler le convertisseur abaisseur-élévateur.

Les résultats de simulation sont présentés pour les facteurs suivants :

La figure montre l'évolution de l'irradiance solaire en fonction du temps, utilisée pour tester les performances du système de contrôle d'un générateur photovoltaïque couplé à un convertisseur Boost.

La tension efficace de sortie est de  $V_{eff} = 220$  V.

La tension de référence du bus DC est de  $V_{dc\_ref} = 700$  V.

La température ambiante reste constante à 25°C tout au long de la simulation.

Description du profil d'irradiance :

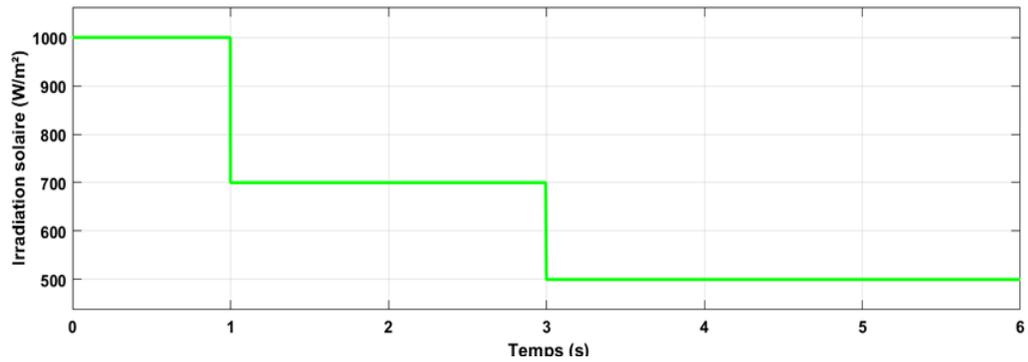
De 0 s à 1 s, l'irradiance solaire est à son maximum, 1000 W/m<sup>2</sup>.

Entre 1 s et 3 s, une baisse est observée jusqu'à 700 W/m<sup>2</sup>, simulant une diminution d'ensoleillement.

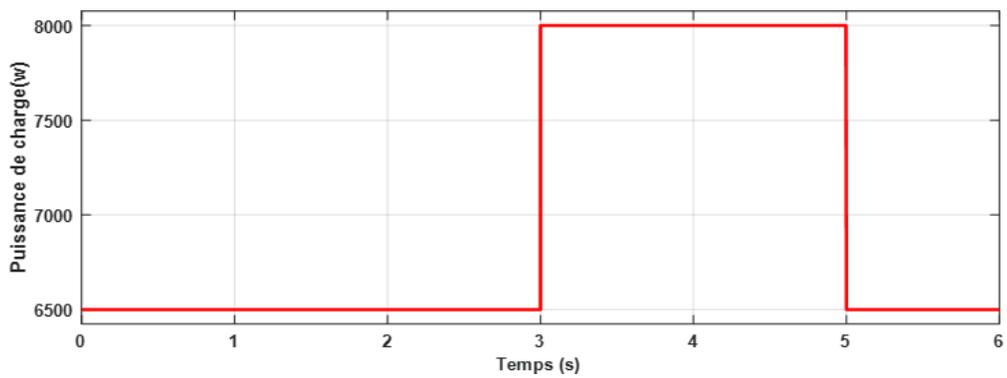
De 3 s à 6 s, l'irradiance solaire diminue de 700 W/m<sup>2</sup> à 500 W/m<sup>2</sup>.

Dans la suite Figure. IV.2, une transition de charge est introduite, avec une augmentation de la puissance demandée de 6500 W à 8000 W entre 3 et 5 secondes, afin d'analyser la robustesse du système de commande face aux perturbations du réseau.

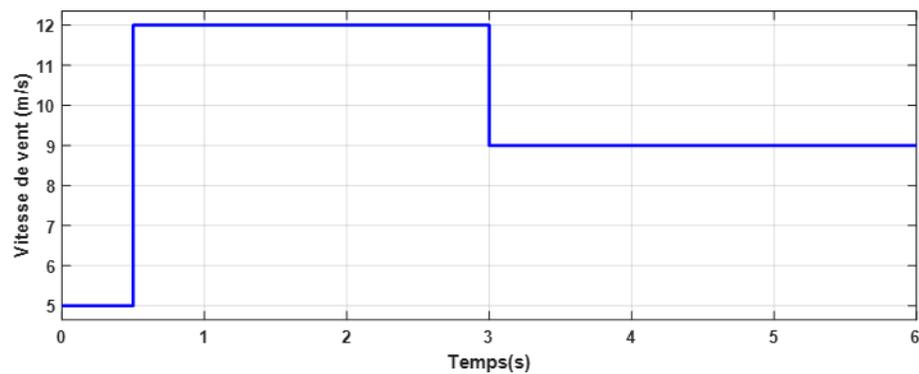
Les profils de rayonnement solaire, de vitesse du vent et de charge appliquée utilisés dans notre simulation sont illustrés respectivement dans les Figures IV.2, IV.3 et IV.4



**Fig. IV. 2 :** Variations d'irradiance solaire

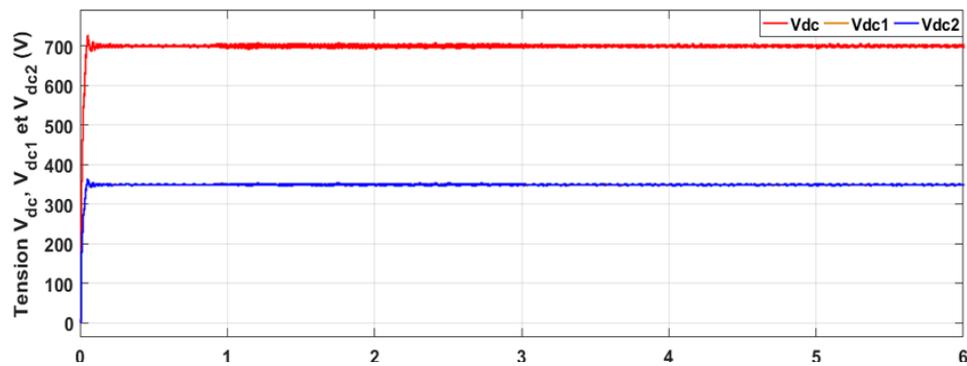


**Fig. IV. 3:** Profil de charge



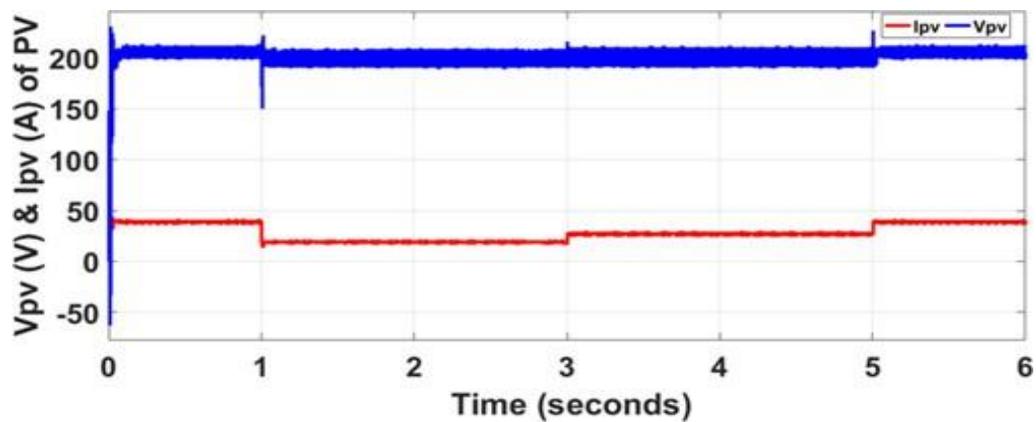
**Fig. IV. 4:** Vitesse du vent

La Figure IV.5 présente la tension du bus DC ainsi que les deux tensions  $V_{dc1}$  et  $V_{dc2}$ . La tension  $V_{dc}$  illustrée est égale à la somme des deux tensions  $V_{dc1}$  et  $V_{dc2}$  est presque constante.



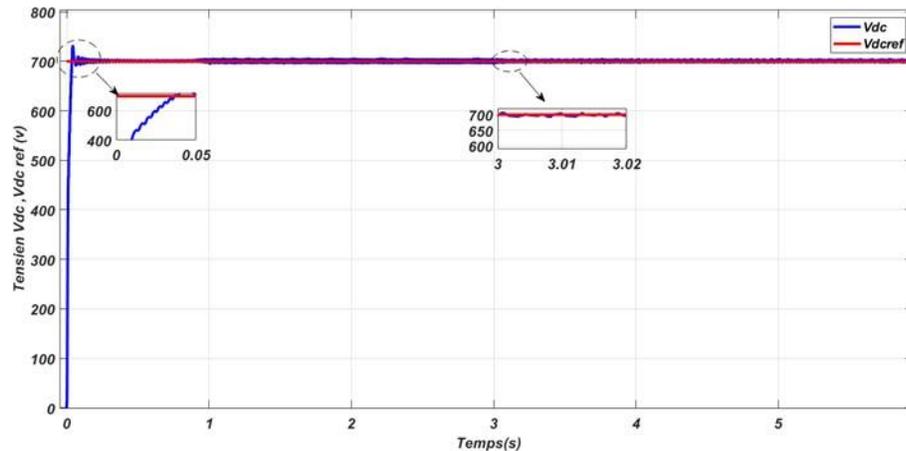
**Fig.IV. 5 :** Tension du bus continue  $V_{dc}$ ,  $V_{dc1}$ , et  $V_{dc2}$

La Figure IV.10 représente le courant et la tension du GPV pendant toute la période opérationnelle.



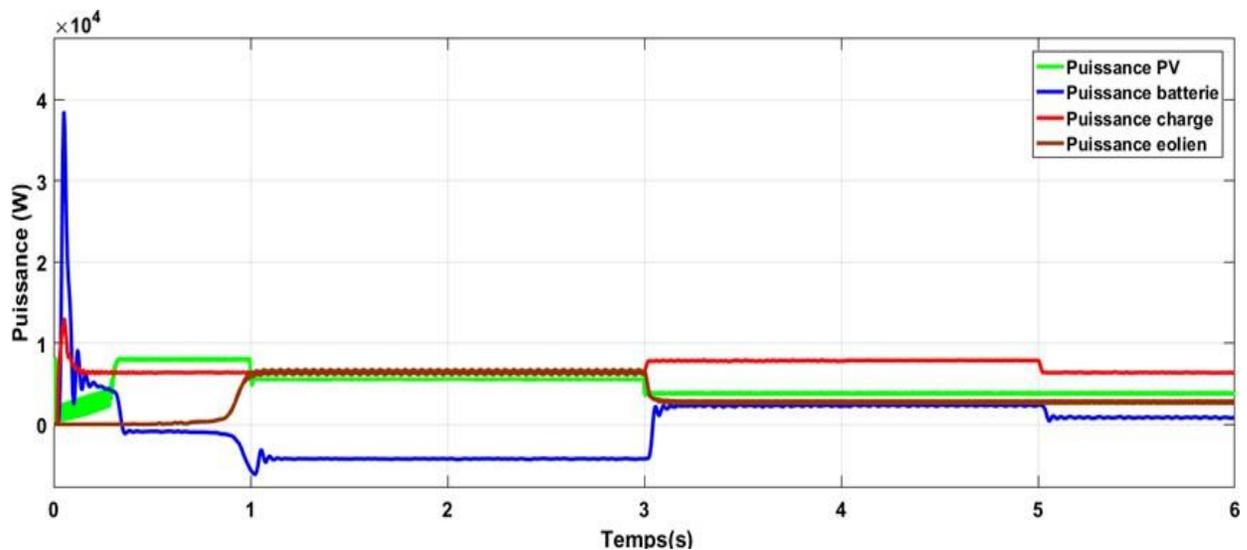
**Fig. IV. 6:** Tension et courant en pv array

La Figure IV.7 présente la tension de sortie  $V_{dc}$  du bus DC comparée à la tension de référence  $V_{dref}$ .



**Fig. IV. 7:** Tension Vdc et Vdcref

La Figure IV.8 donne le résumé des puissances produites par les différents éléments constituant le système hybride PV/Batteries/Eolienne superposé sur le même graphe.



**Fig. IV. 8:** Puissance du système d'énergie hybride

- De 0 à 0.1 s :

On observe un pic important de la puissance de la batterie, indiquant que la batterie est la source principale à cet instant, fonctionnant en mode décharge.

Cela s'explique par le fait que les sources renouvelables PV et éolienne ne sont pas encore opérationnelles.

- À partir de  $t \geq 0.1$  s jusqu'à  $t \approx 1$  s :

La puissance de charge reste stable autour de  $\approx 6500$  W

Le générateur photovoltaïque (PV) fournit  $\approx 8000$  W, soit un surplus d'environ 1500 W, qui est stocké dans la batterie, passée en mode charge (valeurs négatives de la courbe bleue)

- À partir de  $t \geq 1$  s jusqu'à  $t \approx 3$  s :

La puissance de charge demeure à  $\approx 6500$  W.

Elle est assurée par :

Le PV à hauteur de  $\approx 6000$  W,

Et l'éolienne à environ 6200 W.

Le total dépasse les besoins de charge, générant un excédent  $\approx 5700$  W, stocké dans la batterie (toujours en charge)

- À partir de  $t \geq 3$  s jusqu'à  $t \approx 5$  s :

La puissance de charge augmente à  $\approx 8000$  W.

Le PV ne produit que  $\approx 5000$  W,

L'éolienne produit moins qu'auparavant  $\approx 2000$  W.

Cette insuffisance énergétique est comblée par la batterie, qui passe alors en mode décharge.

- À partir de  $t \geq 5$  s jusqu'à la fin (6 s) :

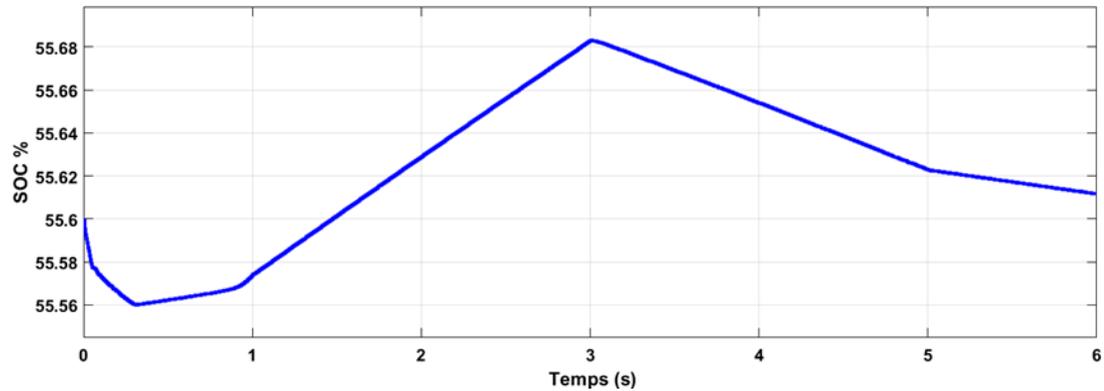
La puissance de charge revient à  $\approx 6500$  W.

Le PV fournit  $\approx 5000$  W,

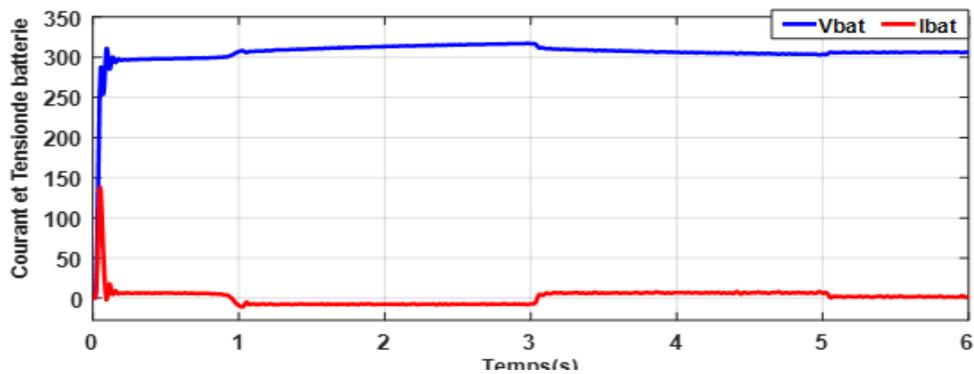
L'éolienne  $\approx 2000$  W.

Le surplus  $\approx 500$  W est stocké dans la batterie, qui repasse en mode charge

L'état de charge est représenté sur la Figure IV. 9, il est fortement influencé par la charge et la décharge de la batterie matérialisée par sa tension. Ce qui montre bien la variabilité dynamique de la batterie en mode charge d'énergie entre 0.1 et 3s ou encore en mode décharge entre 0et 0.1s ,3et 6s.

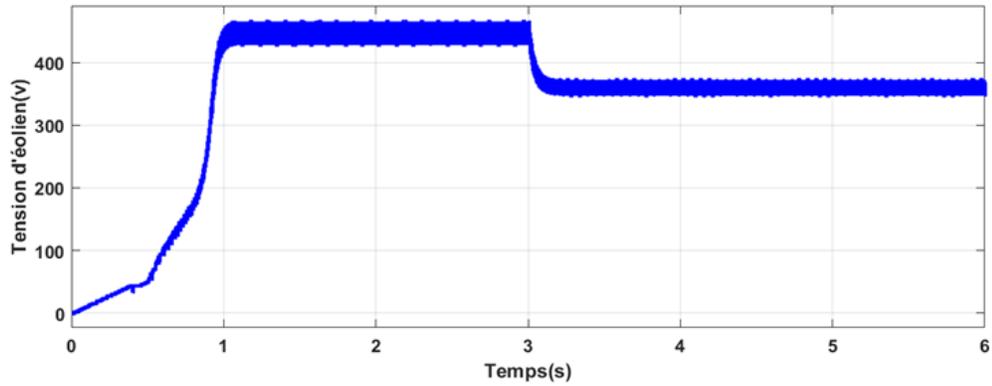


**Fig. IV. 9:** L'état de charge du banc de batterie

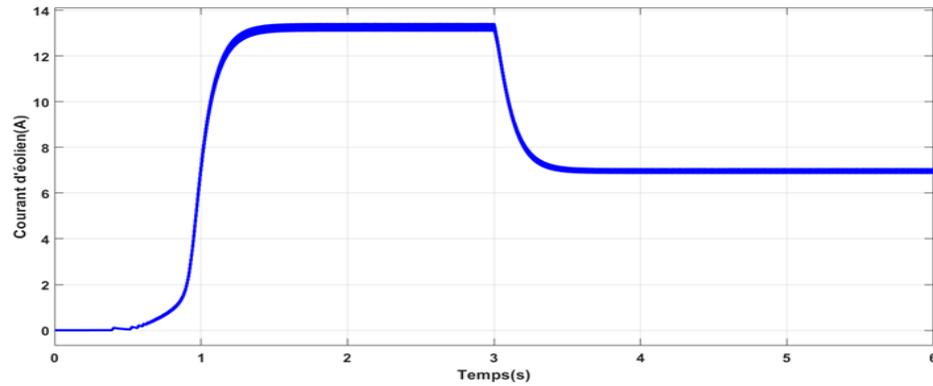


**Fig. IV. 10 :** courant ainsi que la tension du BB

Basés sur les résultats de la simulation, nous observons que le courant du GPV exprime l'irradiance solaire, tandis que la tension reste presque constante. Les figures IV.12 et IV.13 ci-dessous représentent, respectivement, la tension de sortie et le courant de l'éolienne.

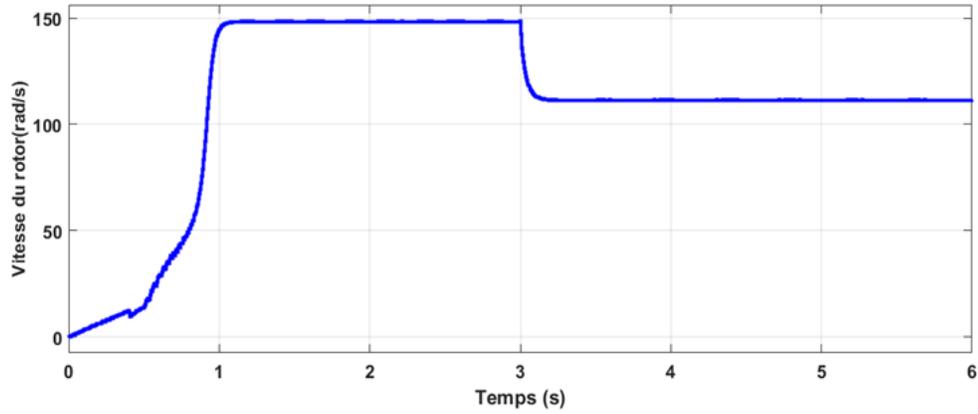


**Fig. IV. 11 :** Tension de sortie d'éolien

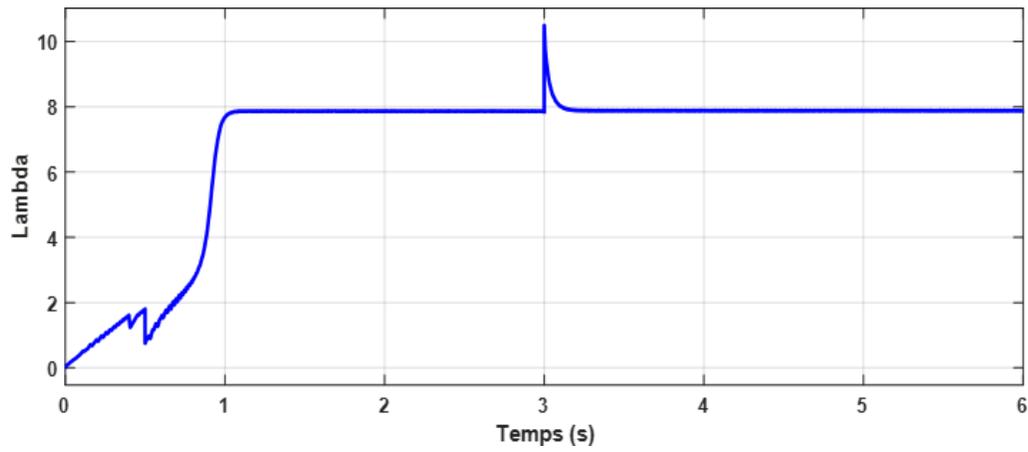


**Fig. IV. 12 :** Courant de sortie d'éolien

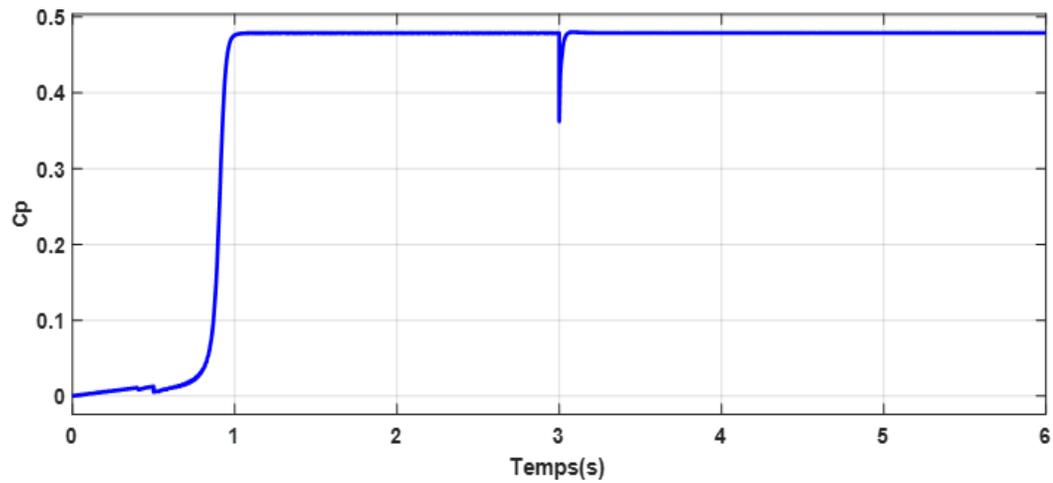
La vitesse de rotation de la turbine, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance  $C_p$ , les courant  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  de la MSAP sont presente par les figures suivantes.



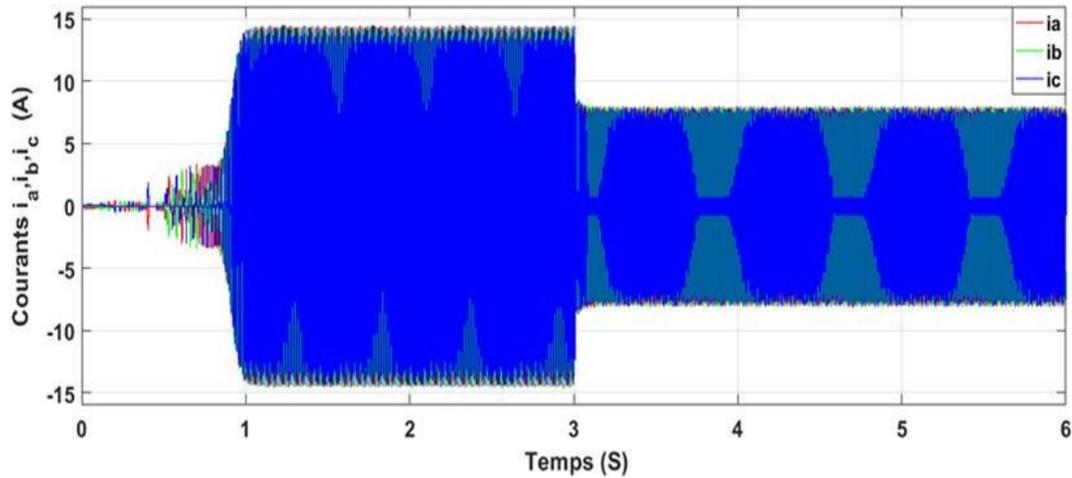
**Fig.IV. 13 :** Vitesse du rotor



**Fig.IV. 14 :** Vitesse spécifique

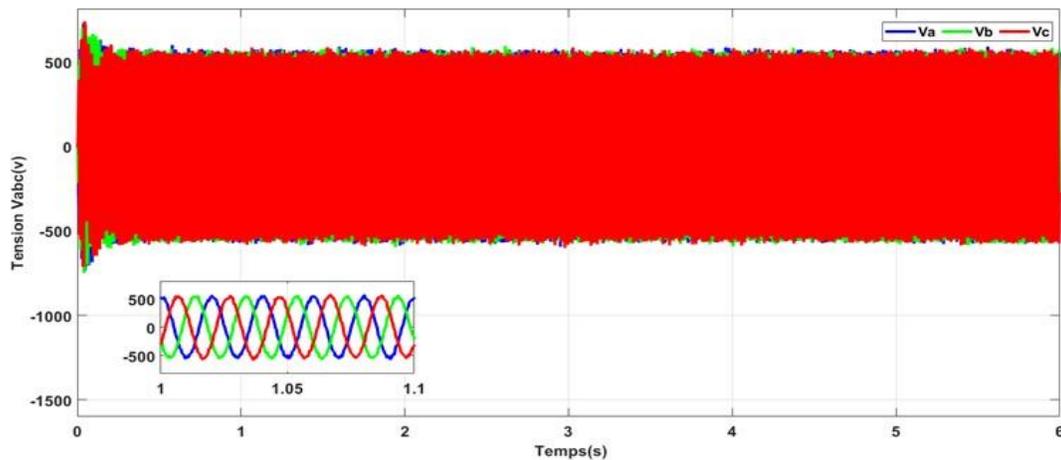


**Fig. IV. 15 :** Coefficient de puissance  $C_p$

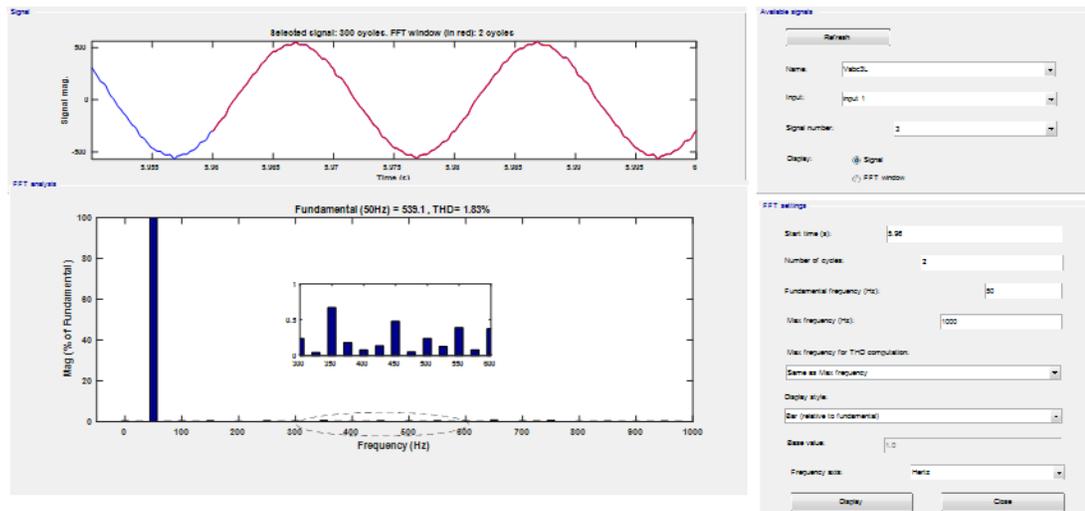


**Fig.IV. 16 :** Courant iabc de la MSAP.

Les résultats de la simulation montrent clairement que la vitesse de rotation et la puissance de sortie s'adaptent aux changements de vitesse du vent. Ceci est confirmé par la vitesse spécifique, qui est bien réglée sur sa valeur optimale de 7,9, ce qui correspond à un facteur de puissance (CP) de 0,479. Les figure IV.17montrent les formes d'onde de la tension de sortie de charge Vabc et se concentrent sur une petite période (1 s à 1,1 s).



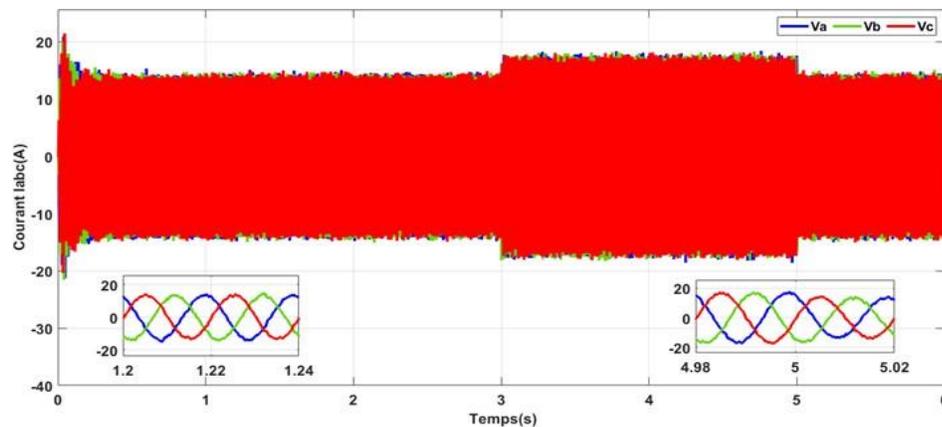
**Fig.IV. 17:** Tension de sortie de la charge



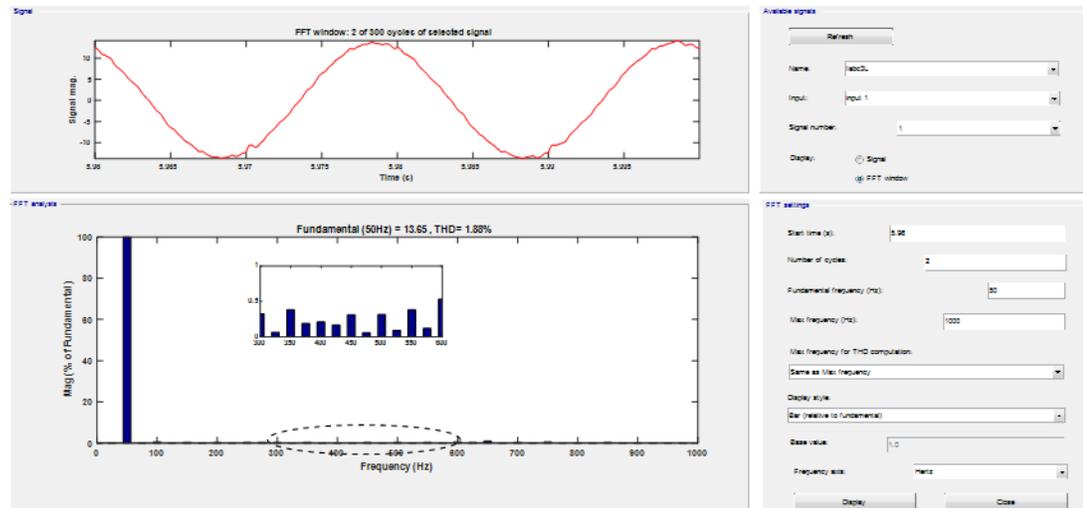
**Fig. IV. 18 :** Spectre harmonique de la tension de ligne

L'analyse spectrale de la tension de charge découvre que les formes d'onde sont déformées et présentent un taux de distorsion harmonique acceptable ( $\text{THD}=1,83\% < 5\%$ ).

La Figure IV.19 représente la forme d'onde du courant  $i_{abc}$  du côté de la charge. Il y a également un zoom sur une courte période (de 1 s à 1,1 s).



**Fig. IV. 19:** Courant de sortie de la charge



**Fig. IV. 20 :** Spectre harmonique du courant de ligne

Le courant de ligne ia est presque sinusoïdal avec un faible taux de distorsion harmonique THD égal à :  $1,88 \% < 5 \%$ . Ces simulations démontrent que notre contrôleur PID produit de bons résultats. Il a répondu à la demande de charge malgré les conditions météorologiques changeantes, fournissant une puissance constante tout en respectant les processus de charge et de décharge de la batterie

#### IV.5. Conclusion

La combinaison des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes constitue une solution efficace pour exploiter de manière complémentaire les ressources énergétiques solaire et éolienne. Ce système multi-sources permet d'améliorer l'efficacité énergétique globale, de réduire la dépendance à une seule source et de renforcer la fiabilité du système.

L'intégration des régulateurs PI joue un rôle fondamental dans le maintien de la stabilité du système et dans l'optimisation de ses performances. Ces contrôleurs assurent une régulation précise du flux d'énergie, ce qui permet de limiter les fluctuations de tension et de fréquence.

Les résultats des simulations ont démontré la capacité du convertisseur à extraire la puissance maximale fournie par le système photovoltaïque, même en cas de variations des conditions climatiques.

En résumé, l'intégration conjointe des contrôleurs PI, des convertisseurs de tension et des onduleurs triphasés dans un système hybride combinant énergie solaire, éolienne et unités de stockage par batteries, constitue une solution complète. Elle permet d'optimiser l'exploitation des ressources, d'assurer une meilleure stabilité du système et d'atteindre une performance fiable dans divers

environnements. Cette approche représente une voie prometteuse pour le développement de systèmes énergétiques renouvelables durables et efficaces.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

En conclusion de ce mémoire, il est possible d'affirmer que les systèmes de production d'énergie multi-sources constituent une solution prometteuse et efficace face aux défis liés à la dépendance excessive aux sources d'énergie conventionnelles, notamment dans un contexte d'intérêt mondial croissant pour les énergies renouvelables.

Ce travail a mis en évidence l'importance cruciale de l'adoption d'un système hybride combinant l'énergie solaire, l'énergie éolienne et des unités de stockage, offrant ainsi une grande flexibilité d'exploitation et une meilleure stabilité dans l'alimentation des charges.

Nous avons commencé par une analyse approfondie de la situation énergétique mondiale et nationale, en soulignant la nécessité urgente de transition vers des sources d'énergie propres et durables, en particulier en Algérie, qui dispose d'un potentiel considérable encore sous-exploité.

Par la suite, nous avons procédé à la modélisation mathématique des composants du système hybride (PV/Éolien/Batterie), ce qui nous a permis de comprendre le comportement de chaque sous-système dans différentes conditions environnementales. Un chapitre a été spécifiquement consacré à l'étude de la modélisation et du contrôle des convertisseurs de puissance, éléments clés dans l'intégration des sources d'énergie. Une attention particulière a été portée au convertisseur boost à trois niveaux, choisi pour son efficacité dans la réduction des ondulations et l'équilibrage de la tension sur les éléments de commutation, contribuant à améliorer les performances de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Nous affirmons que l'intérêt de ces systèmes ne se limite pas à l'aspect environnemental, mais touche également les dimensions économiques et sociales, notamment pour l'électrification des zones isolées non raccordées aux réseaux traditionnels.

Enfin, nous espérons que cette étude contribuera à ouvrir de nouvelles perspectives aux chercheurs et aux acteurs du secteur, et qu'elle servira de référence pour le développement futur de systèmes énergétiques plus intelligents, durables et performants.

## Références

- [1] L. Stoyanov, G. Notton, and V. D. Lazarov, "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables," *J. Renew. Energies*, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2007.
- [2] L. Stoyanov, G. Notton, and V. D. Lazarov, "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables," *J. Renew. Energies*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.54966/jreen.v10i1.794.
- [3] A. Borni and R. Chenni, "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique," 2015.
- [4] A. BEN ALLA and M. S. BEN YAHIA, "Optimisation d'un système autonome (éolienne-photovoltaïque)," 2024, université Ghardaia.
- [5] "Rapport d'activités 2023 1," 2023.
- [6] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables," 2011, Université Pascal Paoli.
- [7] C. E. Partielle, "Université du Québec à Trois-Rivières," 2016.
- [8] F. Mentouri, "Présentée et soutenue par MADACI BOUTHAINA Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs," 2018.
- [9] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management," *Sol. energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143–157, 1999.
- [10] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, no. 11, pp. 5708–5718, 2007.
- [11] Bouchareb Khalil and Touati Ayyoub, "Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant.," *MASTER Académique*, Univ. 8Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [12] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," 2013, Université de Poitiers.

- [13] M. BENCHERIF, “Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension,” 2014, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- [14] J. Lagorce, “Modelisation, dimensionnement et optimisation des systemes d'alimentation decentralises Ã energie renouvelable-application des systemes multi-agents pour la gestion de l'energie,” 2009, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard.
- [15] L. Stoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables,” 2011, Université Pascal Paoli.
- [16] A. Kouam and G. Tchuen, “Optimisation d'un système hybride de production d'énergie pour site isolé: cas de la ville de Ngaoundéré,” *J. Renew. Energies*, vol. 18, no. 4, pp. 529–538, 2015.
- [17] M. A. CHETOUANE, “Contribution à la gestion de l'énergie d'un système multi sources dans les véhicules électriques,” Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [18] H. S. E. et N. IYAD, “Etude et commande d'un système solaire photovoltaïque Soutneu,” p. 13/59, 2022.
- [19] N. E. H. KADRI and A. FERDJI, “Etude comparative entre les différentes structures des installations hybrides.,” 2022, Directeur: Mme. LASSOUANI Fatiha/Co-directeur: Mme. FARADJI Djamila Née ....
- [20] A. Belkaid, “onception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome,” 2018.
- [21] I. Electriques, “Optimisation d ' un système de production d ' énergie multi -sources,” 2022.
- [22] E. GOUAMID and M. S. BENHADJIRA, “Etude de L'influence de l'angle d'inclinaison de panneau solaire sur le rendement d'un système PV en zone de Ouargla.”
- [23] Z. L. Mahri, “Etude Dynamique Et Optimisation Des Pales D'Un Aerogenerateur,” p. 118, 2010.
- [24] Y. Chalabi, “Etude de Deux Modèles d'Eoliennes Placées Dans un Même Vent,” 2016, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

- [25] B. Madaci, R. Chenni, and K. E. Hemsas, “Architectures intégrées de gestion de l’énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs.,” 2018, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [26] N. H. Samrat, N. Ahmad, I. A. Choudhury, and Z. Taha, “Technical study of a standalone photovoltaic-wind energy based hybrid power supply systems for island electrification in Malaysia,” *PLoS One*, vol. 10, no. 6, pp. 1–35, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0130678.
- [27] F. POITIERS, “ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L’UTILISATION DE L’ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” pp. 1–80, 2003.
- [28] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau,” 2003, Université de Nantes.
- [29] A. K. Traoré, “Gestion d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles,” 2016, Université du Québec à Trois-Rivières.
- [30] P. Shaw, P. K. Sahu, S. Maity, and P. Kumar, “Modeling and control of a battery connected standalone photovoltaic system,” in 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [31] K. Benamrane et al., “New optimized control of cascaded multilevel converters for grid tied photovoltaic power generation,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 54, no. 5, pp. 769–776, 2021, doi: 10.18280/JESA.540512.
- [32] R. Abdullah, N. A. Rahim, S. R. Sheikh Raihan, and A. Z. Ahmad, “Five-level diode-clamped inverter with three-level boost converter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5155–5163, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2297315.
- [33] C. Balakishan, N. Sandeep, M. V. Aware, and P. Bauer, “Design and implementation of three-level DC-DC converter with golden section search based MPPT for the photovoltaic applications,” *Adv. Power Electron.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/587197.
- [34] C. E. S. Feloups, A. I. M. Ali, and E. E. M. Mohamed, “Single-phase seven-level PWM inverter for PV systems employing multi-level boost converter,” *Proc. 2018 Int. Conf.*

Innov. Trends Comput. Eng. ITCE 2018, vol. 2018-March, no. May, pp. 403–409, 2018, doi: 10.1109/ITCE.2018.8316658.

[35] A. Borni, N. Bouarroudj, A. Bouchakour, and L. Zaghba, “P&O-PI and fuzzy-PI MPPT controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system : A comparative study,” *Int. J. Power Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 300–322, 2017, doi: 10.1504/IJPELEC.2017.085199.

[36] T. Abdelkrim, K. Benamrane, T. Benslimane, O. Abdelkhalek, and A. Borni, “Stability Study of Output Voltages of Two-Stage PV System Based Three Levels Inverter,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 658–663, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.268.

[37] A. Bahri, K. Benamrane, T. Abdelkrim, M. Bechouat, N. Mezhoud, and B. Ayachi, “Three-Level Boost Converter with Fuzzy Logic for PV-Battery Energy Systems in DC Voltage Control,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 58, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.18280/jesa.580101.

[38] P. Yadav, B. Tripathi, M. Lokhande, and M. Kumar, “Effect of temperature and concentration on commercial silicon module based low-concentration photovoltaic system,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, 2013, doi: 10.1063/1.4790817.

[39] I. Electricques, “Optimisation d ’ un système de production d ’ énergie multi -sources,” 2022.

[40] L. Carlos, D. O. S. Santos, P. Curricular, P. O. Curso, and D. E. L. Plena, “Université du quebec,” *Economia*, vol. III, 1988, [Online]. Available: <https://depote.uqtr.ca/id/eprint/1249/1/030032987.pdf>

