

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

GESTION OPTIMALE DE L'ENERGIE DANS UN SYSTEME HYBRIDE MULTI SOURCES

Présenté par : BEKROU Houssam eddine

TRIDI Nourelhouda

Encadrant : LAKHDARA Amira

MCB

Université UBMA

Jury de Soutenance :

Bahi Tahar	Professeur	UBMA	Président
Lakhdara Amira	MCB	UBMA	Rapporteur
Zarzouri Nora	MCA	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre gratitude la plus sincère à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la patience, la force et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à notre encadrante, **Mme Lakhdara Amira**, pour son accompagnement précieux, la qualité de ses conseils, ainsi que pour son soutien constant tout au long de cette étude.

Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer notre travail. Leur intérêt pour notre recherche ainsi que leurs remarques et suggestions constructives ont grandement contribué à l'enrichissement de ce mémoire.

Enfin, nous remercions sincèrement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, par leur aide, leur soutien moral ou leur encouragement.

Dédicaces

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail ;

A ma cher mère AMOURA NADJETTE, qu'elle trouve ici toute ma gratitude pour son soutient tout au long de mes études. Que dieu la procure bonne santé et longue vie

A mon cher frère Mohamed Abd Errahmane qui je souhaite un avenir plein de réussite.

A mes chères sœurs Rania ; Fatima qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

Ma cousine d'amour Salsabil qui je souhaite tout le bonheur

Mes très chères copines (**Dina, Aya, Rahma, Lamis**)

Pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Merci d'être toujours là pour moi

Tous ceux et celles qui m'ont soutenu et me soutiennent de près ou de loin

Nour

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mon père Ahmed, pour son exemple de rigueur et de dévouement.

À ma mère Sonya, pour son soutien moral indéfectible et ses encouragements constants.

Ainsi qu'à ma soeur Sarra, dont la bienveillance et la présence ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours.

Houssam

Résumé

Ce travail porte sur la modélisation, la simulation et l'optimisation de la gestion d'un système hybride multi-sources constitué d'un panneau photovoltaïque, d'une turbine éolienne, d'une batterie de stockage et du réseau électrique, en utilisant l'environnement Matlab/Simulink. La modélisation comprend l'intégration des différents composants avec leurs convertisseurs dédiés : un boost pour le PV, un redresseur pour l'éolienne, un hacheur bidirectionnel pour la batterie, et un onduleur pour alimenter la charge. La simulation a été réalisée dans différents scénarios d'irradiation et de vitesse du vent, avec une charge fixe de 10 kW, permettant d'analyser les performances énergétiques du système. Dans un premier temps, une commande classique a été utilisée pour gérer la gestion à travers la commande de la batterie en fonction de seuils fixes du SOC et des puissances disponibles. Ensuite, cette stratégie a été remplacée par une commande intelligente basée sur l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO), permettant une répartition optimale de l'énergie entre les sources, la batterie et le réseau de distribution. Les résultats montrent que la méthode PSO permet une meilleure réponse dynamique, réduit les échanges inutiles avec le réseau de distribution, stabilise le fonctionnement du système, et améliore l'efficacité globale par rapport à la commande classique.

Summary

This work focuses on the modelling, simulation and optimization of the management of a multi-source hybrid system consisting of a photovoltaic panel, a wind turbine, a storage battery and the electrical grid, using the Matlab/Simulink environment. The modelling includes the integration of the different components with their dedicated converters: a boost for the PV, a rectifier for the wind turbine, a bidirectional chopper for the battery, and an inverter to supply the load. The simulation was carried out in different irradiation and wind speed scenarios, with a fixed load of 10 kW, allowing the analysis of the energy performance of the system. Initially, a conventional control was used to manage the management through the battery control according to fixed thresholds of the SOC and the available powers. Then, this strategy was replaced by an intelligent control based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm, allowing an optimal distribution of energy between the sources, the battery and the distribution network. The results show that the PSO method allows a better dynamic response, reduces unnecessary exchanges with the distribution network, stabilizes the operation of the system, and improves overall efficiency compared to conventional control.

ملخص

يركز هذا العمل على نبذة ومحاكاة وتحسين إدارة نظام هجين متعدد المصادر يتكون من لوحة كهروضوئية، وتوربين رياح، وبطارية تخزين، والشبكة الكهربائية، باستخدام بيئة (ماتلاب/سيمولينك). تتضمن النبذة دمج المكونات المختلفة مع محولاتها المخصصة: معزز للألواح الكهروضوئية، ومحول لتوربين الرياح، ومقطع ثانوي الاتجاه للبطارية، وعاكس لتزويد الحمل. أجريت المحاكاة في سيناريوهات مختلفة للإشعاع وسرعة الرياح، بحمل ثابت قدره 10 كيلوواط، مما يسمح بتحليل أداء الطاقة للنظام. في البداية، استُخدم نظام تحكم تقليدي لإدارة التوزيع من خلال التحكم في البطارية وفقاً لعتبات ثابتة لمستوى الشحن والقدرات المتاحة. ثم استُبدلت هذه الاستراتيجية بنظام تحكم ذكي يعتمد على خوارزمية تحسين سرب الجسيمات، مما يسمح بتوزيع أمثل للطاقة بين المصادر والبطارية وشبكة التوزيع. وتنظر النتائج أن الطريقة تسمح باستجابة ديناميكية أفضل، وتقلل من التبادلات غير الضرورية مع شبكة التوزيع، وتثبت تشغيل النظام، وتحسن الكفاءة الشاملة مقارنة بالتحكم التقليدي.

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Table des figures.....	
Liste des tableaux.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES HYBRIDES MULTI SOURCES	
1. Introduction.....	
1.2. Les énergies renouvelable.....	
1.3 Type des sources d'énergie renouvelable.....	
1.3.1 L'énergie éolienne.....	
1.3.2 L'énergie solaire.....	
1.4 Système d'énergie hybride.....	
1.4.1 Présentation du système d'énergie hybride étudie.....	

1.4.2 Classification.....
1.4.3 Principales configurations des systèmes hybrides.....
1.4.4 Description du stockage (Batterie).....
1.5 Conclusion.....

CHAPITRE 2 : MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION ET SYSTEME DE CONTROLE

2.1 Introduction.....
2.2 Modélisation.....
2.2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque.....
2.2.2 Modélisation d'une éolienne.....
2.2.2.1 Modélisation de la turbine.....
2.2.2.2 Modélisation de l'arbre de la machine.....
2.2.2.3 Choix de génératrice.....
2.2.2.4 Modélisation de la machine.....
2.2.3 Modélisation du système de stockage.....
2.2.4 Modélisation des composants.....
2.2.5 Convertisseur statique.....

2.2.5.1 Hacheur (convertisseur DC /DC)
2.2.5 Redresseur (convertisseur AC/DC)
2.2.7 Onduleur (convertisseur DC/AC).....
2.3 Contrôle du système.....
2.3.1 Technique de perturbation et observation.....
2.3.2 Contrôle de la batterie.....
2.4 Conclusion.....

CHAPITRE 3 : SIMULATION ET GESTION DU FLUX ENERGETIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

3.1 Introduction.....
3.2 Résultats de simulation et interprétation.....
3.2.1 Caractéristiques du PV.....
3.2.2 Caractéristiques de la turbine.....
3.2.3 Gestion de l'énergie avec une technique classique.....
3.2.4 Gestion de l'énergie avec la technique d'optimisation par essaim des particules (PSO)
3.3 Conclusion
CONCLUSION GENERALE.....

Table des figures

Figure 1.1	Système éolien	
Figure 1.2	À axe horizontale	
Figure 1.3	À axe verticale	
Figure 1.4	Composition d'une turbine éolienne	
Figure 1.5	Le panneau photovoltaïque	
Figure 1.6	Panneau solaire thermique	
Figure 1.7	Panneau thermodynamique	
Figure 1.8	Schéma de système hybride étudié	
Figure 1.9	Classification des systèmes hybrides d'énergie	
Figure 2.1	Système de conversion multi sources	
Figure 2.2	Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque	
Figure 2.3	Structure du système de conversion de l'énergie éolienne	
Figure 2.4	Schéma bloc d'une turbine éolienne	
Figure 2.5	Modèle R-C de la batterie	
Figure 2.6	Schéma de principe du filtre ($R_f L_f$)	
Figure 2.7	Schéma de principe d'un convertisseur boost	
Figure 2.8	Schémas équivalents de l'hacheur survolté : K(a) : fermé,(b) : ouvert	
Figure 2.9	Schéma du montage du convertisseur buck-boost	
Figure 2.10	Schéma équivalent du convertisseur AC/DC	
Figure 2.11	Symbol de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé	
Figure 2.12	Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux	
Figure 2.13	Principe de la technique P&O	

Figure 2.14	Algorithme de la méthode P&O	
Figure 2.15	Organigramme du fonctionnement du système classique de gestion de commande de batterie	
Figure 2.16	Organigramme du fonctionnement de l'algorithme de PSO	
Figure 3.1	Modélisation du système de conversion sous Simulink	
Figure 3.2	Caractéristiques du PV	
Figure 3.3	Irradiation	
Figure 3.4	Température	
Figure 3.5	Caractéristiques de la turbine éolienne	
Figure 3.6	Caractéristique coefficient $C_P=f(\beta)$	
Figure 3.7	Vitesses du vent	
Figure 3.8	Puissance de la charge	
Figure 3.9	Puissances PV	
Figure 3.10	Puissances éolienne	
Figure 3.11	Puissances batterie	
Figure 3.12	Soc de la batterie	
Figure 3.13	Puissances du réseau de distribution	
Figure 3.14	Courant du réseau de distribution	
Figure 3.15	Comportement des puissances du système	
Figure 3.16	Puissance de charge et puissance totale	
Figure 3.17	Soc de batterie (PSO)	
Figure 3.18	Puissance de la batterie avec PSO	
Figure 3.19	Puissance réseau avec PSO	

Liste des tableaux

Tableau 1.1 des avantages et inconvénients.....
Tableau 3.1 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau du SOC.....
Tableau 3.2 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau de la puissance de la batterie
Tableau 3.3 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau de la puissance du réseau de distribution.....

Introduction générale

La croissance démographique mondiale, l'industrialisation rapide et l'urbanisation ont entraîné une augmentation significative de la demande énergétique. Historiquement, cette demande a été largement satisfaite par des sources d'énergie conventionnelles, principalement issues des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) [1]. Cependant, ces sources présentent de nombreux inconvénients : épuisement progressif des réserves, volatilité des prix, forte dépendance géopolitique, et surtout, un impact environnemental sévère dû aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution qu'elles génèrent. Dans ce contexte mondial critique, la transition vers des solutions énergétiques durables est devenue une priorité à l'échelle planétaire [2].

Les énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien, la biomasse ou encore l'hydroélectricité apparaissent comme des alternatives viables et respectueuses de l'environnement. Elles sont inépuisables à l'échelle humaine, locales, et permettent de réduire considérablement l'empreinte carbone. Toutefois, leur nature intermittente (irradiation solaire variable, vent fluctuant, etc.) rend leur intégration complexe lorsqu'elles sont utilisées seules pour alimenter un système ou une communauté [3].

C'est dans ce cadre qu'interviennent les systèmes hybrides multi-sources, qui consistent à combiner plusieurs sources d'énergie renouvelables et non renouvelables avec des unités de stockage d'énergie (souvent des batteries), afin de garantir une alimentation électrique continue, stable et plus performante [4].

Cependant, la mise en place de tels systèmes soulève un enjeu majeur : la gestion optimale de l'énergie. Il s'agit de déterminer, à chaque instant, comment répartir la charge entre les différentes sources disponibles, en tenant compte de nombreux paramètres tels que la disponibilité des ressources, la demande en énergie, l'état de charge des batteries, les coûts d'exploitation, et les contraintes techniques propres à chaque composant. Une gestion inadéquate peut engendrer des pertes d'énergie, une dégradation prématuée des équipements ou encore une augmentation des coûts [5].

L'objectif principal de ce projet est donc de proposer et de simuler une stratégie de gestion énergétique optimale pour un système hybride multi-sources connecté au réseau, intégrant

Introduction générale

principalement des sources renouvelables et un stockage par batteries. L'étude portera sur la modélisation des différents composants du système, la définition d'une stratégie de contrôle énergétique, et l'analyse des performances de cette stratégie via une simulation sous MATLAB/Simulink.

Pour cela, le travail est structuré en trois chapitres :

- Le chapitre 1 présente une étude théorique des systèmes hybrides multi-sources, en introduisant notamment les définitions des énergies renouvelables, les types de sources utilisées, les architectures possibles, ainsi que les avantages et limites de ces systèmes.
- Le chapitre 2 est consacré à la modélisation de toute la chaîne de conversion et aux différentes stratégies de gestion et d'optimisation de l'énergie, depuis les approches simples à base de règles jusqu'aux méthodes avancées d'intelligence artificielle ou d'optimisation.
- Le chapitre 3 décrit la simulation du système hybride sous MATLAB/Simulink, suivi d'une analyse des résultats obtenus afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie de gestion proposée.

À travers ce travail, nous visons à démontrer l'intérêt et la faisabilité d'une gestion intelligente de l'énergie dans un contexte de transition énergétique, en alliant innovation technologique, efficacité énergétique et respect de l'environnement

Chapitre 1

Etude théorique des systèmes hybrides multi sources

1.Introduction

Les systèmes hybrides multi source apparaissent comme une solution prometteuse. Ces systèmes associent plusieurs sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien ou la biomasse... [6].

L'objectif de ce chapitre est de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension des systèmes hybrides multi-sources. Il s'agira d'explorer les différents types des systèmes hybrides, les sources d'énergie utilisées, leurs avantages et limitations, ainsi que les principes fondamentaux qui sous-tendent leur conception et leur fonctionnement. En étudiant la complémentarité des différentes sources d'énergie, ce chapitre mettra en lumière les enjeux liés à l'optimisation de la gestion de l'énergie, à la gestion des coûts, et à la réduction de l'empreinte écologique.

1.2 Les énergies renouvelables

L'énergie renouvelable fait référence à un ensemble de méthodes permettant de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées qui n'ont pas de limite de temps ou qui peuvent être reconstruites plus rapidement qu'elles ne sont consommées [7].

On parle généralement d'énergie renouvelable plutôt que d'énergie fossile, dont les réserves sont limitées et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... En revanche, les énergies renouvelables sont générées à partir de sources telles que les rayons du soleil ou le vent, qui sont théoriquement infinies à l'échelle du temps humain.

L'énergie renouvelable est parfois appelée à tort « énergie verte » ou « énergie propre ». En fait, même si les sources d'énergie renouvelables présentent souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas nécessairement « vertes » ou « propres » car elles ont également des conséquences environnementales importantes [8].

1.3 Types des sources d'énergies renouvelables

Dans la nature, on relève plusieurs types de sources renouvelables notamment, éoliennes, Hydrauliques, biomasses, géothermiques, solaires, ect...[9].

1.3.1 L'énergie éolienne

Une éolienne, communément appelée aérogénérateur, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui peut être utilisée sur un arbre de transmission. L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un générateur.



Figure 1.1 Système éolien

Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable et elle revêt une grande importance pour la transformation des systèmes de production [10].

De plus, c'est une source d'énergie qui ne produit aucune émission atmosphérique ni aucun déchet radioactif.

- **Principe de fonctionnement**

Les éoliennes assurent la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à travers un processus en trois étapes principales :

- Extraction de l'énergie mécanique : Les pales de l'éolienne, agissant comme capteurs d'énergie, captent une fraction de l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie mécanique par leur rotation.
- Conversion en énergie électrique : L'énergie mécanique ainsi produite est transmise à une génératrice électrique, qui se charge de la convertir en énergie électrique.
- Adaptation de l'énergie à la charge : L'énergie électrique issue de la génératrice est ensuite acheminée vers un convertisseur statique. Ce dispositif, généralement situé entre la génératrice et la charge, a pour fonction d'adapter la forme de l'énergie électrique (tension, fréquence, etc.) en fonction des exigences spécifiques de la charge.

La charge peut correspondre à divers équipements, tels qu'un système de chauffage électrique, un moteur, une pompe ou encore un réseau de distribution d'électricité.[11].

• Les différents types des éoliennes

Les générateurs éoliens peuvent être classés selon plusieurs critères techniques, chacun reflétant une caractéristique spécifique de leur conception ou de leur fonctionnement. Parmi les principales catégories de classification, on distingue :

- La nature du convertisseur électromécanique : Il peut s'agir d'une machine synchrone, asynchrone, ou encore d'un générateur à courant continu, selon le type de conversion requis.
- Le mode de régulation : Les éoliennes peuvent utiliser un système de régulation par variation de l'angle des pales (pitch control) ou par décrochage aérodynamique (stall control).
- La nature de l'accouplement mécanique : Ce critère distingue les systèmes dotés d'un multiplicateur de vitesse de ceux à entraînement direct (sans réducteur).
- Le type de fonctionnement : Il peut être à vitesse fixe ou à vitesse variable, en fonction de la stratégie de commande adoptée.
- Le type de capteur aérodynamique : On distingue principalement les éoliennes à axe horizontal de celles à axe vertical.

Ces différentes classifications peuvent se combiner dans une même machine. Par exemple, une éolienne peut fonctionner à vitesse variable, être équipée d'un multiplicateur de vitesse, et utiliser une génératrice asynchrone.[12].

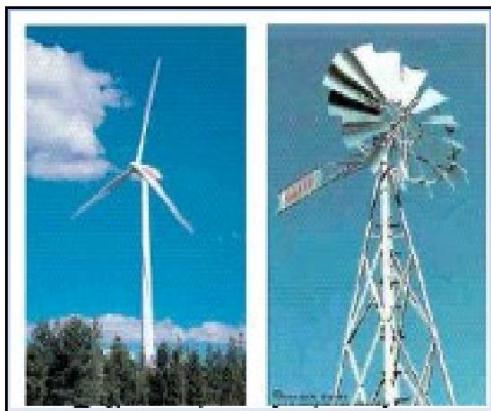


Figure 1.2 à axe horizontale



Figure 1.3 à axe verticale

• La constitution d'une éolienne

L'éolienne est un générateur d'électricité qui est activé par l'action du vent. Ce dernier fait bouger l'hélice. Grâce à son système mécanique d'engrenages, le rotor du générateur est mis en rotation et le courant est généré à partir de là. L'éolienne dispose d'un grand nombre de composantes :

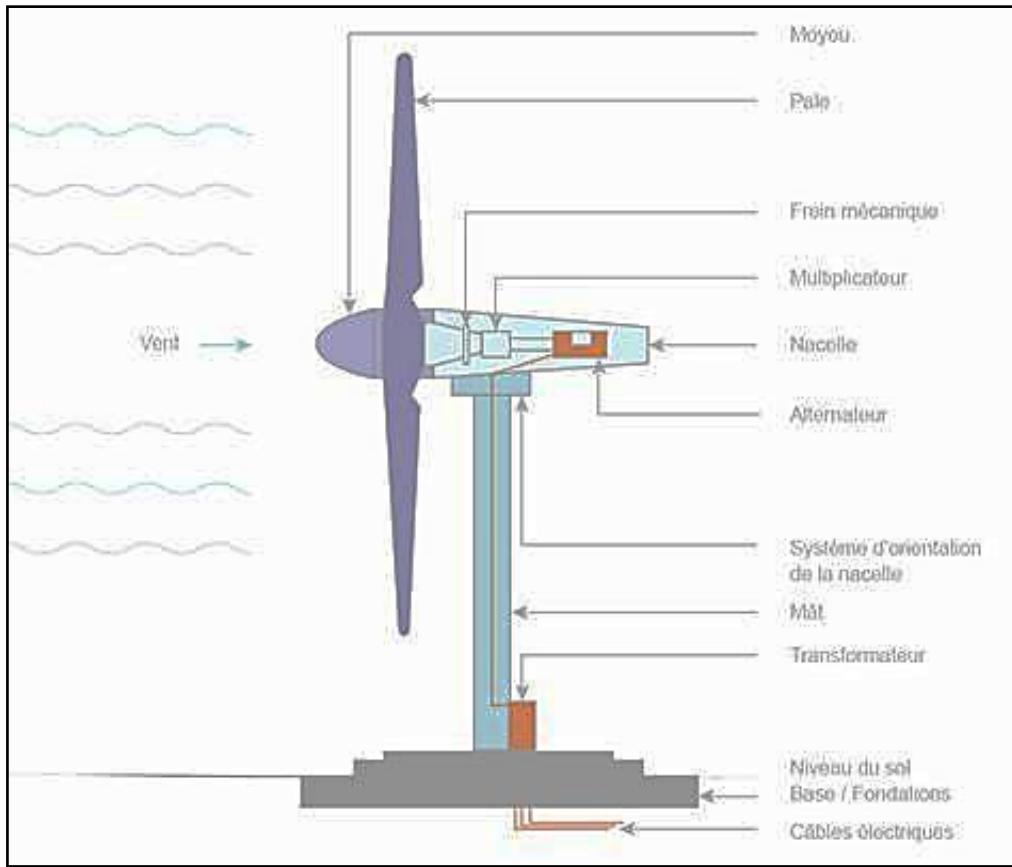


Figure 1.4 composition d'une turbine éolienne

- La nacelle : c'est l'enveloppe qui protège les composants fondamentaux de l'éolienne,
- Le rotor : il permet de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique. Il est composé du moyeu, des pales et d'un mécanisme permettant de modifier le pas des pales.
- Les lames : ce sont elles qui captent le vent et transmettent son énergie au concentrateur.
- L'arbre à basse vitesse : il est chargé de connecter le moyeu du rotor au multiplicateur correspondant.
- L'arbre à grande vitesse : il tourne à 1 500 tours par minute pour faire fonctionner le générateur.
- Un générateur électrique.
- Le multiplicateur : il augmente la vitesse de l'arbre à grande vitesse de sorte qu'il tourne jusqu'à 50 fois plus vite que l'arbre à faible vitesse.
- Le contrôleur électronique : il surveille et contrôle le mécanisme d'orientation.
- Le mât : il sert de soutien au rotor et à la nacelle.

- Le panneau et l'anémomètre : les signaux électroniques de l'anémomètre s'y connectent lorsqu'une vitesse de vent d'environ 5 m/s est produite,
- L'unité de refroidissement : son ventilateur est chargé de refroidir le générateur,
- Le mécanisme d'orientation : il contrôle la direction du vent avec le panneau [13].

- **Les avantages**

- L'énergie éolienne appartient à la catégorie des énergies renouvelables. Elle se caractérise par son absence de dégradation lors de son exploitation, sa répartition géographique diffuse, ainsi que par une corrélation saisonnière favorable. En effet, la demande en électricité atteint généralement son pic durant la période hivernale, coïncidant souvent avec des vitesses moyennes de vent plus élevées, ce qui renforce la pertinence de cette source d'énergie dans le mix énergétique.
- L'énergie éolienne est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor.
- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet [11].

- **Les inconvénients**

- La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante donc la qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau reste limité.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux -ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux -ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [11].

1.3.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie produite par rayonnement électromagnétique du soleil. Elle peut être captée et transformée en électricité ou en chaleur à l'aide de dispositifs spécifiques comme les panneaux photovoltaïques (pour produire de l'électricité) ou les capteurs thermiques (pour produire de la chaleur). C'est une source d'énergie renouvelable, propre et inépuisable [14].

- **Avantages et inconvénients de l'énergie solaire**

Comme toute source d'énergie, l'énergie solaire présente certains avantages et inconvénients. Nous vous en disons plus ci-dessous.

- **Les avantages**

- C'est une source d'énergie inépuisable.
- Il s'agit d'une source d'énergie propre car elle ne génère pas de déchets et n'a pas d'impact négatif sur l'environnement.
- Elle permet de produire de l'énergie même dans des lieux dépourvus de réseau électrique.
- À long terme, elle est plus économique que les autres types d'énergie.
- Les installations ne nécessitent pas beaucoup d'entretien.

- **Les inconvénients**

- L'énergie solaire n'est pas constante, elle dépend du moment de la journée et de la situation géographique.
- Comme elle est discontinue, des batteries solaires sont nécessaires pour stocker l'énergie.
- Les systèmes d'exploitation de l'énergie comme les panneaux solaires occupent une place considérable.
- Bien que ce soit économique à long terme, un investissement initial est nécessaire [15].

- **Les types d'exploitations de l'énergie solaire**

- a) **Le solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue à partir de l'énergie du rayonnement solaire. Plus précisément, le principe est de convertir l'énergie véhiculée par les photons de la lumière en énergie électrique. C'est pourquoi les panneaux photovoltaïques qui les collectent sont généralement installés sur des toitures avec une orientation optimale.

C'est là qu'interviennent les cellules photovoltaïques. Fabriqué en silicium, il absorbe l'énergie des photons visibles lorsqu'il est exposé à la lumière.

Ils génèrent du courant continu, qui est converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. L'électricité générée peut être utilisée immédiatement. Ainsi, toute installation solaire (sur bâtiment ou au sol) nécessite trois éléments pour garantir que la lumière transmise par le soleil soit récupérée puis transformée en électricité et distribuée :

- Panneaux photovoltaïques.
- L'onduleur convertit l'énergie électrique obtenue en courant alternatif.
- Instrument utilisé pour calculer la quantité de courant ainsi produite et distribuée [11].



Figure 1.5 le panneau photovoltaïque

b) Le solaire thermique

Les systèmes de production d'énergie solaire thermique recueillent et concentrent la lumière du soleil pour produire la chaleur à haute température nécessaire à la production d'électricité [16].

Les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs. Une fois qu'ils sont chauffés par le soleil, les fluides commencent à chauffer le ballon d'eau chaude.

L'énergie solaire thermique sert aussi bien pour alimenter :

- Un chauffage solaire ;
- Un chauffe-eau ;
- Une cuisinière.

Elle ne produit pas d'électricité mais bien de la chaleur. Elle peut être utile dans certains usages industriels pour remplacer une partie des usages d'énergie fossile [17].



Figure 1.6 Panneau solaire thermique

c) Le solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire [17].



Figure 1.7 Panneau thermodynamique

Les panneaux solaires thermodynamiques exploitent la chaleur provenant de l'air ambiant ou du rayonnement solaire incident en l'absorbant via une plaque collectrice. Cette énergie thermique est ensuite transférée à un fluide caloporteur circulant dans le système. Le fluide, une fois chauffé, est comprimé par un compresseur afin d'en éléver la température. La chaleur ainsi générée peut ensuite être utilisée pour alimenter des systèmes de chauffage, qu'il s'agisse de l'air intérieur ou de l'eau sanitaire.[16].

Les avantages et les inconvénients

	Solaire photovoltaïque	Solaire thermique	Le solaire thermodynamique :
Les avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Impact environnemental réduit - Potentiel de rentabilité élevé sur le long terme - Durabilité et fiabilité - Polyvalence et flexibilité - Soutien aux réseaux locaux - Création d'emplois - Le cout est très faible - Non polluant, silencieux [18]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie renouvelable et durable - Réduction des émissions de gaz à effet de serre - Diminue la dépendance aux combustibles fossiles - Coûts d'exploitation réduits sur le long terme - Applications diverses - Technologie mature et fiable - Améliore l'efficacité énergétique des bâtiments - Valorisation de l'énergie solaire abondante et gratuite - Contribue à la transition vers une économie verte [19]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energie gratuite - Energie renouvelable - Energie préservant l'environnement - Produit plus que 60% de l'eau chaude sanitaire - Bien adapter au chauffage des locaux pour les réseaux de distribution de chaleur a basses températures - Bénéficie de subvention a l'investissement [20].
Les Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Coût initial élevé - Espace requis pour l'installation - Pollution et recyclabilité - Dépendance au soleil pour produire son énergie - Durée de vie limitée des panneaux solaires - Impact environnemental de la fabrication 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement initial élevé pour l'installation - Dépendance aux conditions météorologiques, notamment à l'ensoleillement, pour une efficacité optimale. - Nécessite de l'espace disponible pour l'installation des capteurs solaires, ce qui peut limiter son utilisation dans 	<ul style="list-style-type: none"> - Les centrales thermodynamiques nécessitent pas mal d'espace - Les coûts initiaux peuvent faire peur - L'utilisation de l'eau pour refroidir ça peut poser des soucis [20].

	<ul style="list-style-type: none"> - Performance fonction de la météo - Limitations des heures solaires qui varient selon la période de l'année [21]. 	<ul style="list-style-type: none"> les zones urbaines denses. - Certaines applications nécessitent un stockage de la chaleur pour une utilisation ultérieure, ce qui peut entraîner des pertes d'énergie [19]. 	
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

1.1 Tableau des avantages et inconvénients

1.4 Système d'énergie hybride

Les systèmes énergétiques hybrides sont des systèmes qui combinent différents systèmes de production [11]. C'est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles [22].

Les systèmes énergétiques hybrides actuels combinent au moins deux sources d'énergie pouvant être connectées au réseau ou fonctionner en mode isolé (mode autonome) [11], dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les réseaux et les différents systèmes de stockage, tels que les volants d'inertie, les supercondensateurs et les batteries, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue [22].

L'objectif des systèmes énergétiques hybrides est de générer la quantité maximale d'énergie à partir de sources renouvelables pour répondre à la demande de charge [11].

1.4.1. Présentation du système d'énergie hybride étudie

Dans notre étude, nous intéressons principalement aux systèmes hybrides formés par deux sources renouvelables de type photovoltaïque connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT, et éolien à basse d'une machine asynchrone à cage,

les configurations hybrides étudiées sont caractérisées par la présence d'un bus à courant continu (Bus CC) qui est adapté pour les micro-réseaux et à charges continues.

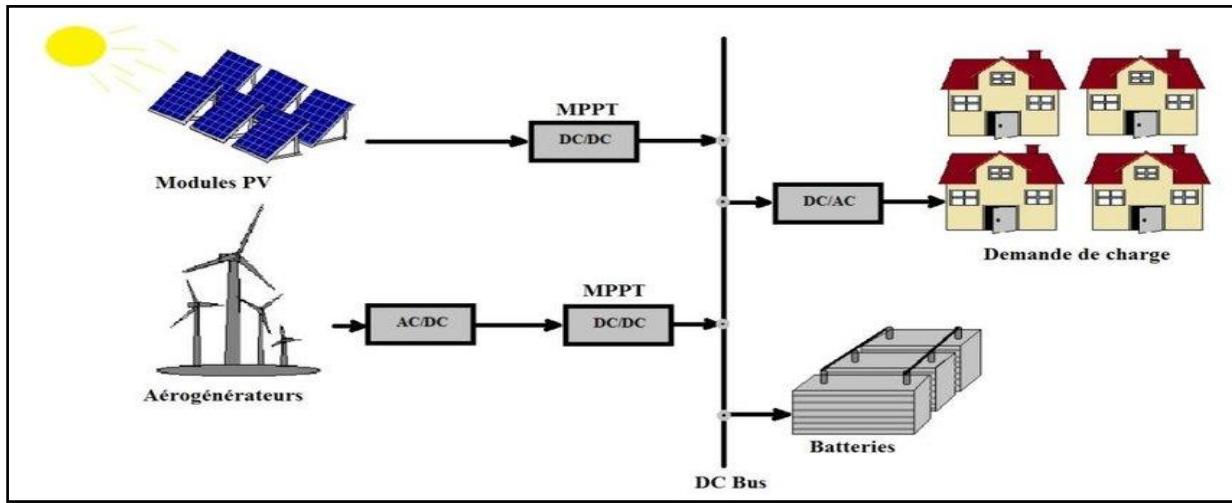


Figure 1.8 Schéma de système hybride étudié

1.4.2 Classification

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

a) Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides de production d'énergie peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les systèmes hybrides connectés au réseau : Ces installations fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique national. Elles injectent de l'énergie dans le réseau et participent à la couverture de la demande globale en électricité, contribuant ainsi à l'équilibre du système énergétique du pays.
- Les systèmes hybrides autonomes ou en site isolé : Fonctionnant indépendamment du réseau, ces systèmes sont conçus pour alimenter des zones non raccordées à l'infrastructure électrique conventionnelle. Ils sont particulièrement adaptés à des contextes géographiques spécifiques tels que les refuges de montagne, les îles, les villages reculés ou encore les dispositifs de signalisation routière [23].

b) Structure du système hybride

La classification des systèmes hybrides peut également s'effectuer en fonction de leur structure, en tenant compte de trois critères principaux : [24]

- La présence d'une source d'énergie conventionnelle : Ce critère permet de distinguer les systèmes intégrant une source d'appoint classique — telle qu'un générateur diesel, une microturbine à gaz, voire une centrale électrique complète dans le cas d'une interconnexion au réseau — de ceux qui en sont dépourvus.
- L'existence d'un dispositif de stockage d'énergie : La présence d'un système de stockage améliore la fiabilité de l'alimentation électrique, notamment durant les périodes où les ressources renouvelables sont indisponibles. Les technologies de stockage couramment utilisées incluent les batteries rechargeables, les supercondensateurs, les systèmes à hydrogène (électrolyseurs couplés à des réservoirs), ou encore les volants d'inertie.
- Le type de sources d'énergie renouvelables intégrées : La configuration d'un système hybride peut inclure diverses sources telles que le photovoltaïque, l'éolien, l'hydraulique (centrales hydroélectriques ou convertisseurs houlomoteurs), ou une combinaison de celles-ci. Le choix des sources dépend principalement du potentiel énergétique disponible sur le site d'implantation, ainsi que des caractéristiques de la charge à alimenter. En fonction des besoins énergétiques du consommateur, il peut s'avérer nécessaire d'intégrer une source conventionnelle, un dispositif de stockage, ou les deux. [24]

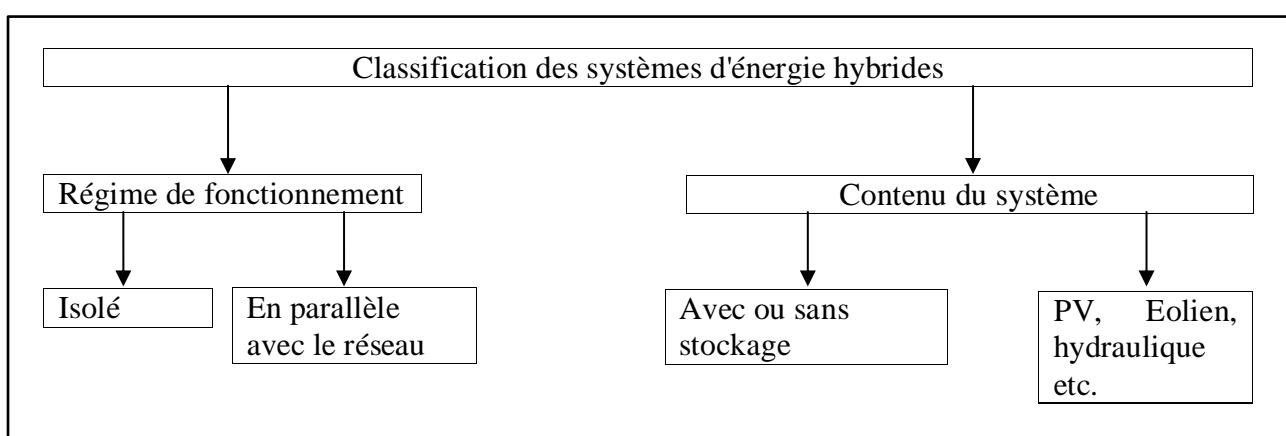


Figure 1.9 classification des systèmes hybrides d'énergies

1.4.3 Principales configurations des systèmes hybrides

a) Système hybride photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système.

b) Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion entre un dispositif de stockage d'énergie et un générateur éolien peut répondre à deux objectifs principaux, selon le mode de fonctionnement du système :

- En mode connecté au réseau, le dispositif de stockage joue un rôle de tampon. Il permet d'atténuer les fluctuations rapides de la puissance électrique produite par l'éolienne, contribuant ainsi à stabiliser l'injection d'énergie dans le réseau.
- En mode autonome, le stockage assure une fonction de réserve énergétique à long terme. Il permet de garantir la continuité de l'alimentation du consommateur durant les périodes où la vitesse du vent est insuffisante pour produire de l'électricité [23].

c) Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

Le principal inconvénient des deux types de systèmes hybrides précédemment décrits réside dans la faible diversité des sources d'alimentation, du fait de l'utilisation d'une seule ressource primaire. Cette limitation entraîne plusieurs conséquences négatives, notamment le surdimensionnement des composants du système afin de garantir une alimentation continue, ce qui se traduit par un coût d'investissement initial élevé et, par conséquent, une augmentation du coût du kilowattheure (kWh) produit. Ces contraintes économiques et techniques freinent le déploiement de tels systèmes à grande échelle. L'intégration d'une seconde source d'énergie renouvelable constitue une solution pertinente pour atténuer, voire éliminer, ces inconvénients. Les recherches dans ce domaine portent soit sur des systèmes existants et des bancs d'essai expérimentaux, soit sur des approches théoriques. Dans ce dernier cas, les études consistent à analyser l'impact de l'ajout d'une seconde source à un système déjà en place, ou à concevoir une nouvelle architecture hybride multi-sources. La majorité des travaux se focalise sur l'optimisation de la configuration du système hybride en fonction de plusieurs critères : réduction de la probabilité de perte de charge, minimisation du coût du kWh produit, ou combinaison de ces deux objectifs. D'autres études intègrent des critères supplémentaires tels que la réduction de l'énergie excédentaire non utilisée, assurant ainsi un équilibre optimal entre performance technique et viabilité économique [23].

d) Système hybride photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride demeure peu répandu, principalement en raison de son incapacité à garantir une sécurité d'alimentation satisfaisante. En effet, l'absence soit d'une source d'énergie conventionnelle, soit d'un dispositif de stockage, limite fortement sa fiabilité. En conséquence, les recherches portant sur ce type d'architecture sont relativement peu nombreuses, compte tenu de ses performances restreintes et de sa faible adaptabilité aux besoins énergétiques continus [23].

1.4.4 Description du stockage hybride (batterie)

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé et non isolé. Elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez (cas de batteries). Elles sont aussi obligatoires pour assurer à chaque instant l'équilibre énergétique dans le circuit électrique en stockant ou déstockant la différence entre puissance produite et puissance consommée à chaque instant (cas de supra condensateurs) [25].

- Principe de fonctionnement

Les batteries représentent la solution la plus couramment utilisée pour le stockage électrochimique à petite échelle. Leur fonctionnement repose sur une réaction d'oxydoréduction, suivant le principe électrochimique des piles. Lors de la phase de charge, l'énergie électrique est stockée sous forme chimique, puis restituée lors de la décharge avec un rendement énergétique relativement élevé, pouvant atteindre environ 85 %, selon la technologie de batterie utilisée.

- Les différentes technologies

Trois grandes familles de batteries sont aujourd'hui utilisées par les industriels, selon la nature de leurs électrodes :

- les batteries Plomb-acide
- les Nickel et

- les Lithium.

Les batteries sont caractérisées par deux éléments

- par une tension nominale en charge
- la capacité C_{batt} en Ah. Deux principaux critères permettent de juger si elles sont adaptées à l'application recherchée :
 - leur durée de vie .
 - leur énergie spécifique.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes hybrides d'énergie renouvelable ont été données. Notre travail portant sur un système qui regroupe les deux sources d'énergie renouvelable (éolien-photovoltaïque) avec stockage (batterie) connecté au réseau de distribution, une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et de stockage. Les différents types d'architectures existants, ainsi que les différentes structures des systèmes d'énergie hybride ont également été présentés.

Chapitre 2

Modélisation de la chaîne de conversion et système de contrôle

2.1 Introduction

Ce chapitre aborde la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion, en mettant l'accent sur les sources d'énergie renouvelable les plus fréquemment utilisées dans les systèmes hybrides : les panneaux photovoltaïques et les éoliennes. L'objectif est de représenter mathématiquement leur comportement électrique afin de permettre leur intégration dans un système de conversion d'énergie.

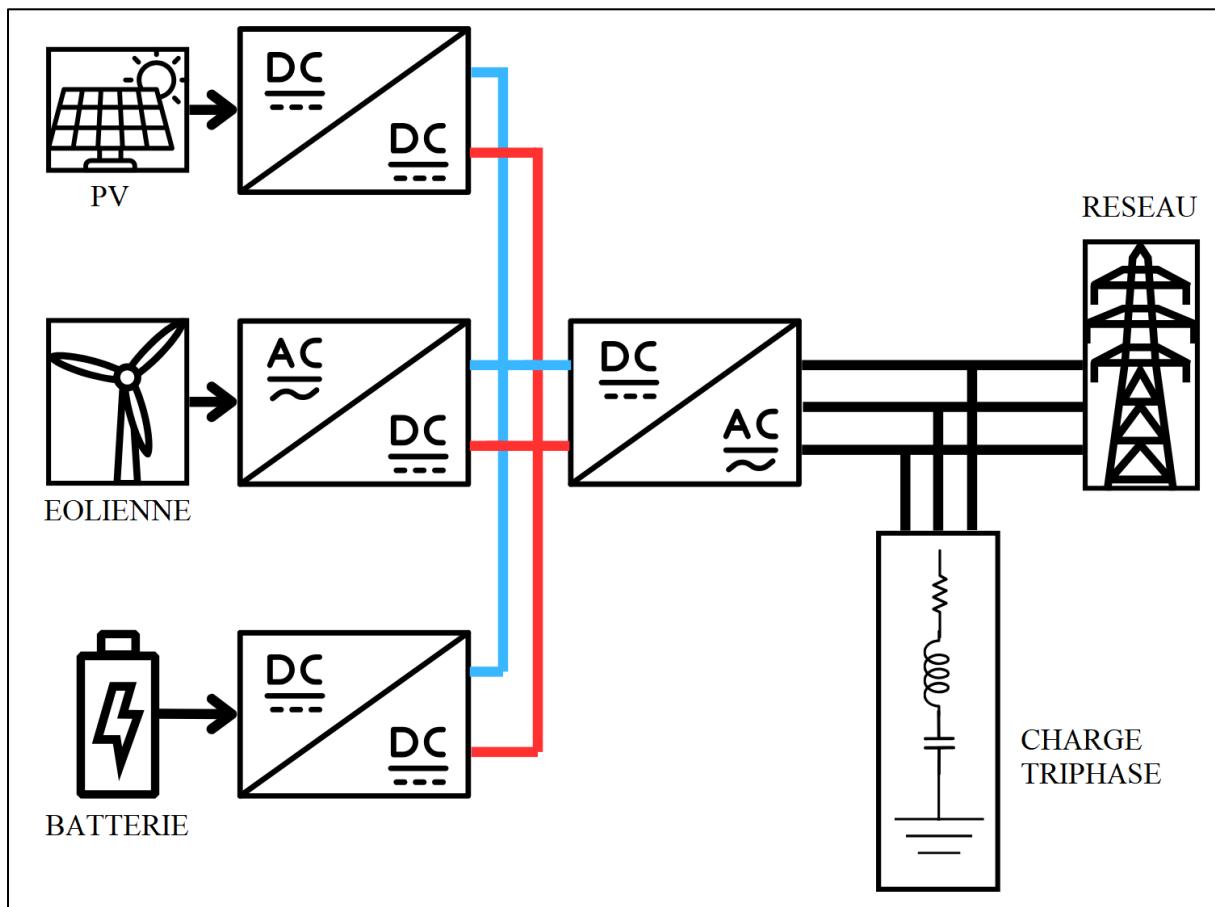


Figure 2.1 Système de conversion multi sources

2.2 Modélisation

Dans un premier temps, la cellule photovoltaïque est modélisée à l'aide d'un circuit équivalent incluant une source de courant, une diode, et des résistances parasites. L'équation caractéristique courant-tension (I-V) et puissance – tension (P-V) sont développées en tenant compte des paramètres influents comme l'irradiation solaire et la température.

Ensuite, la modélisation de l'énergie éolienne est abordée à travers l'expression de la puissance extraite du vent en fonction de la vitesse, de la surface balayée par les pales et du coefficient de puissance aérodynamique. La relation entre la vitesse du vent, la vitesse de rotation et la puissance électrique générée par la turbine est également précisée.

Enfin, les différents types de convertisseurs statiques nécessaires pour adapter, redresser ou inverser les tensions issues des sources renouvelables sont présentés : l'hacheur (DC-DC), l'onduleur (DC-AC), et le redresseur (AC-DC). Ces dispositifs sont essentiels pour assurer la compatibilité entre les sources, les charges, les systèmes de stockage ou le réseau [26].

2.2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques repose sur le choix approprié d'un circuit électrique équivalent. Le modèle de base considère une cellule comme une source de courant en parallèle avec une diode. Pour intégrer les effets dissipatifs, deux résistances parasites sont ajoutées : une résistance série et une résistance shunt.

L'élaboration d'un circuit équivalent précis nécessite une compréhension approfondie de la configuration physique des composants de la cellule, ainsi que de leurs caractéristiques électriques, avec un niveau de détail variable selon les objectifs de modélisation. Dans cette optique, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire des jonctions semi-conductrices, qui sont au cœur du fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ces modèles se distinguent principalement par les approches adoptées dans leurs formulations.

Parmi eux, le modèle à une seule diode constitue une représentation simplifiée du comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Il s'agit d'un modèle empirique qui intègre une diode idéale, des résistances parasites et une source de courant, permettant de reproduire les caractéristiques courant-tension (I-V) de la cellule [27].

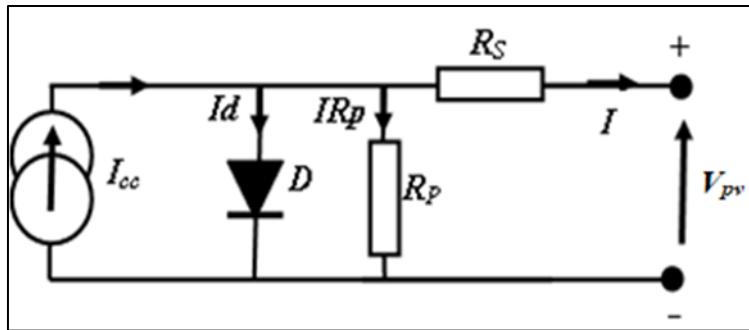


Figure 2.2 Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

Le schéma du modèle à une seule diode (figure 2.2) comprend les éléments suivants :

- Source de courant I_{cc} : Représente le courant généré par l'effet photovoltaïque dans la cellule. Sa valeur dépend de l'intensité lumineuse et des caractéristiques de la cellule.
- $R_p(\Omega)$: résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction
- $R_s(\Omega)$: résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion.
- Diode idéale (D) : Modélise la jonction p-n de la cellule.
- V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule
- $I_d(A)$: courant à travers la diode
- $I_{R_p}(A)$: courant à travers la résistance parallèle

$$I = I_{cc} - I_d - I_{R_p} \quad (2.1)$$

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

$$I_{cc(T)} = I_{cc(T_{ref})} [1 + k_i (T_c - T_{ref})] \quad (2.2)$$

- $I_{cc(T_{ref})}$: Courant de court-circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de 1000W/m^2 et qui est donné par la fiche technique du constructeur.
- T_{ref} : Température de référence de la cellule exprimée en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) correspondante à la température standard $25\ ^{\circ}\text{C}$, soit $T_{ref}({}^{\circ}\text{K}) = 25 + 273.15 {}^{\circ}\text{K}$
- k_i : Coefficient de température du courant I exprimé en $(\%/{}^{\circ}\text{C})$ (selon la fiche du constructeur)
- Le courant I_{cc} est proportionnel à l'irradiation(E). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc}(E) = I_{cc}(E_0) \cdot \frac{E}{E_0} \quad (2.3)$$

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

L'expression (2.1) peut s'écrire :

$$I = I_{cc} - I_d - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

Avec,

$$I_d = I_0(e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv}+I.R_s)} - 1) \quad (2.5)$$

En supposant que la cellule photovoltaïque soit de bonne qualité, la R_p aura une valeur très élevée et donc le troisième terme de la partie droite de l'équation (2.4) peut être négligé

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

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

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

Ainsi, on retient de (2.7) que :

$$e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv}+I.R_s)} \gg 1 \quad (2.7)$$

Pour le modèle précédent, l'expression du courant I de sortie est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_{cc} - I_{01}[e^{q(\frac{V_{pv}+I.R_s}{n_1.k.T})} - 1] - I_{02}[e^{q(\frac{V_{pv}+I.R_s}{n_2.k.T})} - 1] - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.8)$$

2.2.2 Modélisation d'une éolienne

Le système de conversion d'énergie éolienne se compose de trois principales parties :

- La partie mécanique, incluant le rotor aérodynamique et la boîte de vitesses ;
- La partie électrique, constituée du générateur, des convertisseurs d'électronique de puissance et des charges électriques ;
- Le système de commande, chargé de la régulation et du pilotage de l'ensemble [28].

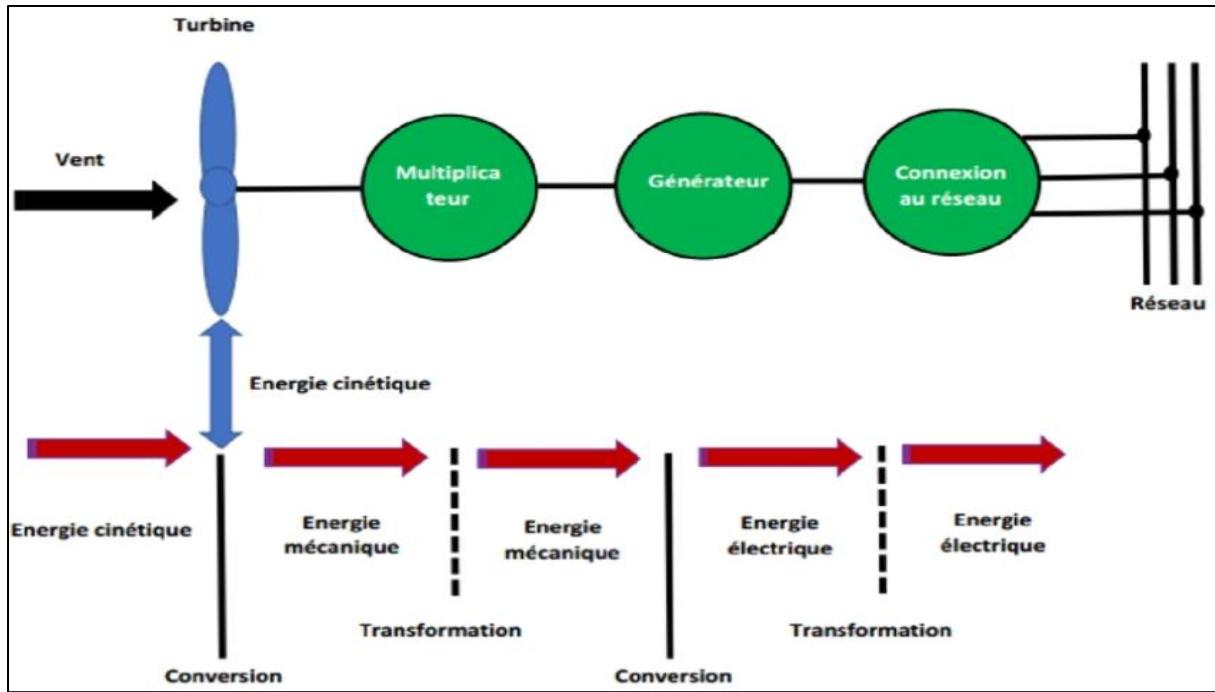


Figure 2.3 Structure du système de conversion de l'énergie éolienne

2.2.2.1 Modélisation de la turbine

L'éolienne transforme l'énergie cinétique du vent, captée à travers la surface S balayée par les pales, en puissance mécanique [29].

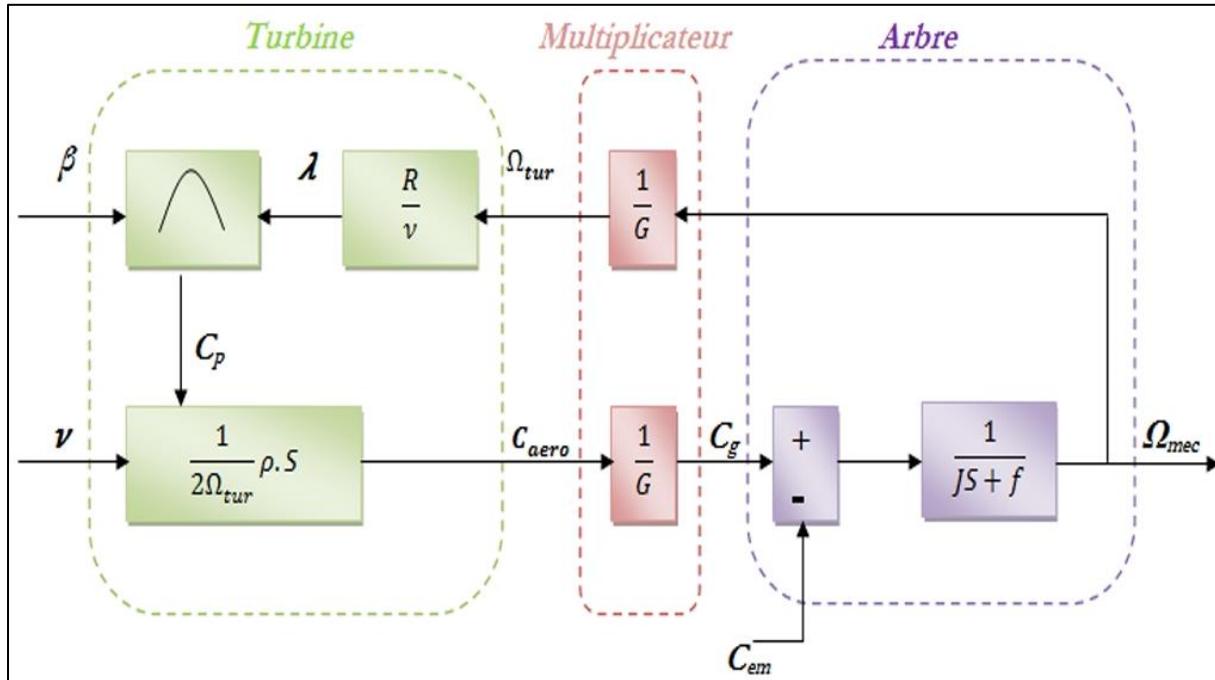


Figure 2.4 Schéma bloc d'une turbine éolienne

La puissance éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2.9)$$

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

$$S = 2 \cdot R \cdot H \quad (2.10)$$

R : rayon de la voilure (m), H : hauteur de la turbine (m).

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

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_T}{V_v} \quad (2.11)$$

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

L'équation (2.12) définit la « limite de Betz » correspondant à la puissance maximale pouvant être extraite d'un vent donné :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \right) \quad (2.12)$$

et,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.13)$$

La puissance éolienne s'écritra :

$$P_{éol} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (2.14)$$

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

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

$$C_T = \frac{P_{éol}}{\Omega_T} \quad (2.15)$$

La puissance maximale théorique ($P_{éolmax}$) qui peut être exploitée est approximativement comprise entre 60% et 70% et le (C_p^{opt}) est la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance (C_p). Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale (λ_{opt}) pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant la vitesse du vent nominale (V_{vn}) et la vitesse de rotation nominale(Ω_t).

2.2.2.2 Modélisation de l'arbre de la machine

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

$$J \left(\frac{d\Omega_T}{dt} \right) = C_T - C_{em} - K_f \cdot \Omega_T \quad (2.16)$$

J : moment d'inertie de l'ensemble, K_f : coefficient de frottement, C_{em} : couple électromécanique.

2.2.2.3 Choix de génératrice

Pour une application éolienne, il existe trois types de machines utilisées :

- **Machine asynchrone à cage**

Simple et robuste, cette machine est couramment utilisée dans les éoliennes de grande puissance. Elle nécessite généralement un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de rotation des pales au générateur. Elle est adaptée aux environnements où les conditions de vent sont variables.

- **Machine synchrone (à rotor bobiné ou à aimants permanents)**

Cette machine peut être utilisée en entraînement direct, c'est-à-dire sans multiplicateur de vitesse. Elle est généralement couplée au réseau via un convertisseur de fréquence. Les génératrices synchrones sont efficaces et nécessitent peu de maintenance, ce qui les rend adaptées aux installations offshore.

- **Machine asynchrone à rotor bobiné (double alimentation)**

Cette machine combine les avantages des machines asynchrones et synchrones. Elle permet une régulation efficace de la puissance et est utilisée dans les éoliennes de grande puissance.

➤ **Moteur à courant continu (DC)**

Bien que techniquement possible, l'utilisation d'un moteur à courant continu comme génératrice n'est généralement pas recommandée pour les éoliennes. Les moteurs à courant continu nécessitent des balais et des bagues, ce qui peut entraîner une usure et une maintenance accrues.

Le choix dépend entre autres, de la gamme de puissance et le lieu d'utilisation.

Il y a la machine synchrone et la machine asynchrone à double alimentation qui sont les plus efficaces.

La machine DC peut être utilisée comme génératrice, mais à cause de l'existence du système bague-balais, et le fait qu'elle produit un courant continu rend leur utilisation dans les systèmes éoliens inadéquate.

2.2.2.4 Modélisation de la machine

La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique qui produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine [35]. Elle est définie par les équations différentielles des tensions du stator, où les flux correspondants sont exprimés par les équations (2.17) et (2.18), respectivement :

➤ **Équations de tension**

$$\begin{cases} V_a = Ri_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = Ri_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = Ri_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (2.17)$$

➤ **Équations de flux**

$$\begin{cases} \phi_a = L_s i_a + \phi_{fa} \\ \phi_b = L_s i_b + \phi_{fb} \\ \phi_c = L_s i_c + \phi_{fc} \end{cases} \quad (2.18)$$

Avec;

$$L_s = L * M$$

R est la résistance d'une phase du stator ;

ϕ_a , ϕ_b , ϕ_c sont les flux traversant les phases du stator;

L est l'inductance propre du stator ;

M est l'inductance mutuelle entre deux phases du stator ;

Φ_a, Φ_b, Φ_c sont les flux totaux envoyés par l'inducteur dans les trois phases ;

L_s est l'inductance statorique cyclique ou inductance synchrone.

L'équation dynamique est

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_{em}$$

2.2.3 Modélisation du système de stockage

Les systèmes de conversion d'énergie renouvelable produisent de la puissance en fonction, principalement, des conditions météorologiques telles que l'irradiation solaire, la température et la vitesse du vent. Étant donné que la demande énergétique de la charge peut être inférieure à l'énergie produite par le système hybride à certains moments, il devient nécessaire et avantageux d'intégrer un système de stockage d'énergie.

Ce système permet de stocker l'excès d'énergie produite (via la charge des batteries) lorsque la production dépasse les besoins de la charge. Inversement, lorsque la demande devient supérieure à la capacité de production instantanée du système, l'énergie stockée est alors utilisée (décharge des batteries) afin de garantir l'alimentation continue de la charge, indépendamment des variations climatiques. Ainsi, l'énergie stockée est exploitée aux moments opportuns pour assurer la stabilité de l'alimentation [30].

Les batteries, en tant que dispositifs de stockage, nécessitent un suivi et des efforts constants pour optimiser leur performance. Parmi les caractéristiques essentielles à prendre en compte, on distingue : la résistance interne (R_i), la tension à vide (E_0), la tension nominale, la tension de fin de décharge, la capacité, les taux de charge et de décharge, la profondeur de décharge, l'impact des conditions environnementales, la durée de vie, ainsi que le nombre de jours d'autonomie.

L'état de charge (EDC), ou State of Charge (SOC) en anglais, est exprimé en pourcentage. Il indique le niveau de charge de la batterie, permettant ainsi de prévenir les décharges profondes ou les surcharges, qui peuvent réduire considérablement sa durée de vie. La surveillance de l'EDC vise à ralentir le vieillissement de la batterie et à prolonger au maximum sa durée d'exploitation.

L'EDC est défini comme le rapport entre la capacité disponible et la capacité nominale, exprimé en pourcentage, selon la relation suivante :

$$\text{EDC} = \frac{\text{Capacité disponible [AH]}}{\text{Capacité / nominale [AH]}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

La batterie peut être représentée par son circuit équivalent montré par la figure 2.5.

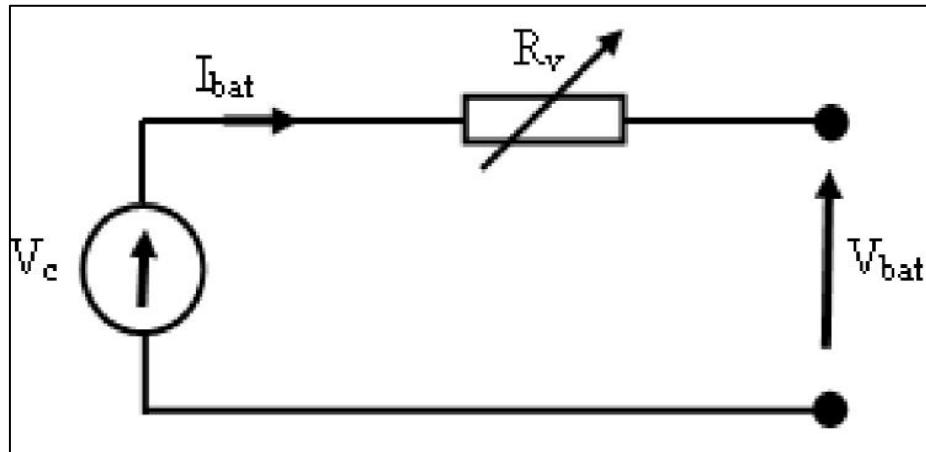


Figure 2.5 Modèle R-C de la batterie

Où,

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

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

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

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

Avec,

$$R_v = R_i + k_b \frac{\frac{C_{bat}}{t} - \int_0^t I_{bat} dt}{C_{bat} - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (2.20)$$

R_i : résistance interne (Ω);

k_b : coefficient de polarisation ;

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

De la figure 2.5, on déduit l'équation de la tension aux bornes de la batterie:

$$V_{bat}(t) = V_c - R_v I_{bat}(t) \quad (2.21)$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (2.22)$$

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

2.2.4 Modélisation des composants

Les charges représentent les consommateurs d'énergie électrique, dont le comportement dépend de leurs caractéristiques spécifiques. Le système d'équations associé à une source triphasée est défini par l'équation (2.23), où E désigne la valeur efficace de la tension fournie par la source

$$\begin{cases} E_a(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \\ E_b(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ E_c(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.23)$$

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution, l'utilisation d'un onduleur est indispensable. La connexion de cet onduleur au réseau s'effectue à travers un filtre ($R_f L_f$) dont le schéma de principe est présenté à la figure 2.6.

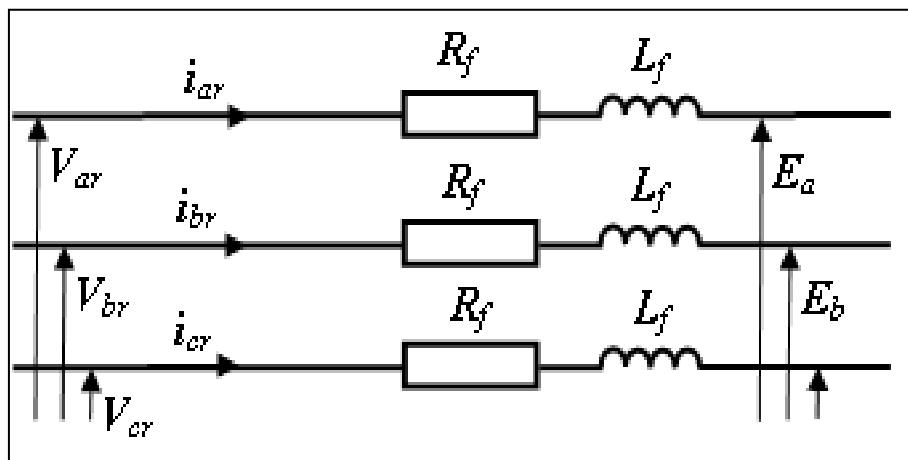


Figure 2.6 Schéma de principe du filtre ($R_f L_f$)

L'application de la loi des mailles à chaque phase, au niveau du point de raccordement du filtre, permet d'établir les équations reliant les tensions modulées par le convertisseur aux courants circulant à travers le filtre :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_f i_{ar} + L_f \frac{di_{ar}}{dt} + E_a \\ V_{br} = R_f i_{br} + L_f \frac{di_{br}}{dt} + E_b \\ V_{cr} = R_f i_{cr} + L_f \frac{di_{cr}}{dt} + E_c \end{cases} \quad (2.24)$$

D'où, sous forme de Laplace

$$\begin{cases} I_{ar} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{ar} - E_a) \\ I_{br} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{br} - E_b) \\ I_{cr} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{cr} - E_c) \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec, S : opérateur de Laplace

2.2.5 Convertisseurs statiques

2.2.5.1 Hacheur (convertisseur DC/DC)

Un hacheur est un convertisseur statique qui transforme une source continue en une autre source continue à sa sortie. Appelé convertisseur DC/DC, il se décline principalement en deux topologies : la topologie isolée et la topologie Fly back.

La topologie isolée nécessite un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence et est principalement utilisée dans les alimentations à découpage. En revanche, la topologie Fly back, non isolée et sans transformateur d'isolement, est couramment employée dans les entraînements des machines à courant continu ainsi que dans les chaînes d'alimentation des systèmes photovoltaïques.

Les convertisseurs non isolés se répartissent en trois catégories principales : abaisseur, élévateur, et mixte (élévateur-abaisseur), respectivement désignés en anglais par Buck, Boost et Buck-Boost.

- La topologie Buck est utilisée pour obtenir une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée. Dans les applications photovoltaïques, elle est souvent employée pour la charge des batteries et les systèmes de pompage d'eau.

- La topologie Boost permet d'augmenter la tension d'entrée et est fréquemment utilisée dans les systèmes de production d'énergie pour relever la tension à l'entrée de l'onduleur.
- Enfin, certaines topologies, telles que le Buck-Boost, sont capables à la fois d'augmenter et de diminuer la tension selon les besoins.

a) Hacheur Boost

Connu également sous le nom de « Boost » ou hacheur élévateur, le schéma de principe de base de son circuit électrique, où K, désigne le composant semi-conducteur, est présenté à la figure (2.7). Sa principale application consiste à convertir une tension d'entrée en une tension de sortie plus élevée.

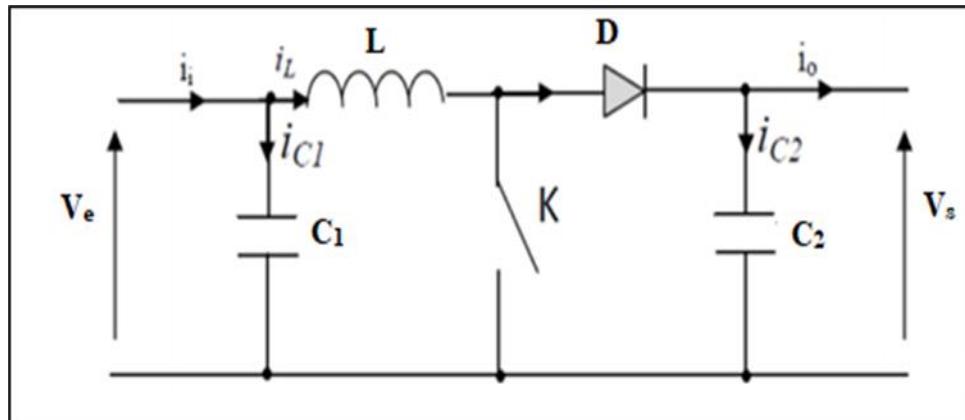


Figure 2.7 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

La figure 2.8 montre les configurations relatives aux deux phases de fonctionnement

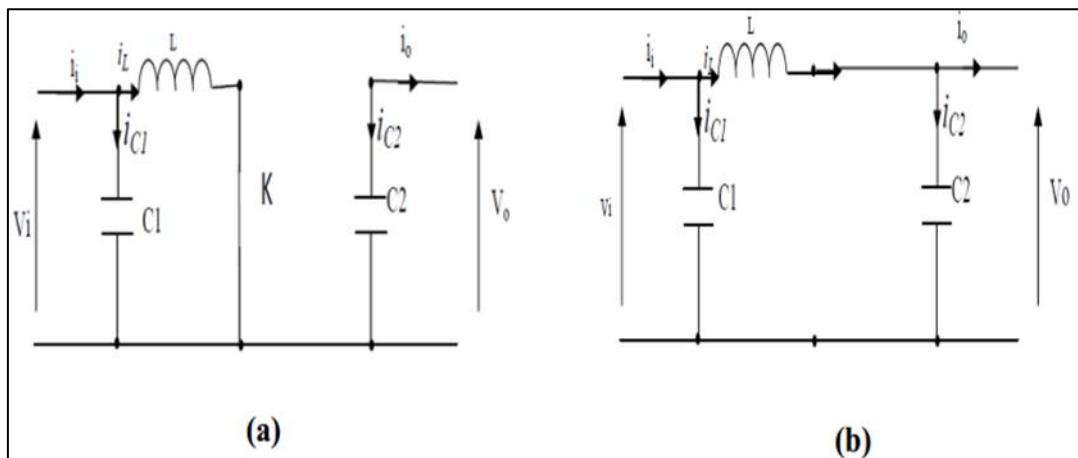


Figure 2.8 Schémas équivalents du hacheur survoltéur : K (a) : fermé, (b) : ouvert

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolté (Boost) donne les équations suivantes

1^{ers} cas :

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

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) \end{array} \right. \quad (2.26)$$

2^{ème} cas :

Elle correspond à la seconde séquence de fonctionnement ($1 \div DT_s$) soit ($DT \leq t \leq T$)

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{array} \right. \quad (2.27)$$

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

$$\langle \frac{dx}{dt} \rangle T_s = \frac{dx}{dt_{DTs}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)Ts}} (1-d)T_s \quad (2.28)$$

En appliquant la relation (2.28) sur les systèmes d'équations (2.26) et (2.27), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière. Ainsi, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolté.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l = i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_l - C_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_0 \end{array} \right. \quad (2.29)$$

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

b) Buck –Boost

Le circuit de montage du convertisseur Buck- Boost pour la charge et décharge de la batterie est représenté par la figure (2.9).

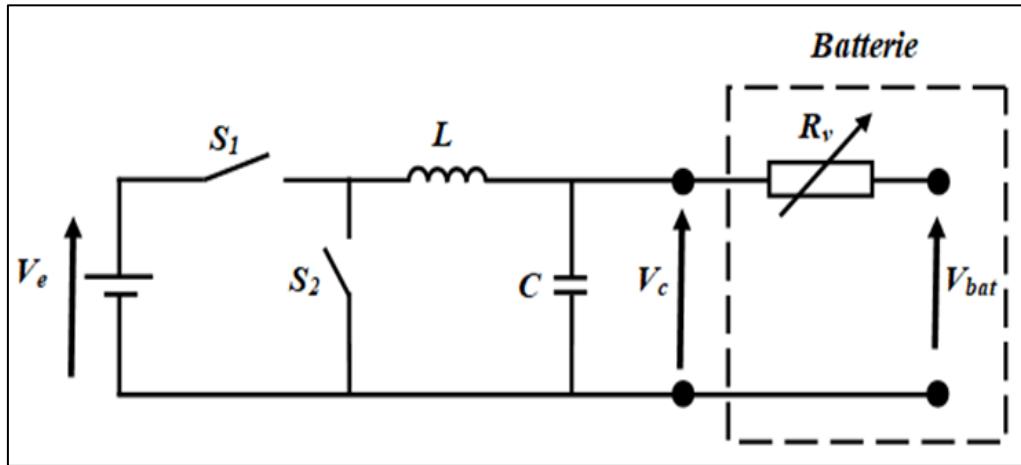


Figure 2.9 Schéma du montage du convertisseur Buck –Boost

À partir d'une source de tension contrôlée V_e , le convertisseur Buck-Boost est commandé en comparant le courant mesuré au courant de référence. Lorsque ce courant de référence est négatif, la batterie est déchargée ; lorsqu'il est positif, elle est rechargée.

2.2.6 Redresseur (convertisseur AC/DC)

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif-continu ou pont de Graetz, est un dispositif permettant d'alimenter une charge nécessitant une tension et un courant continus à partir d'une source de tension alternative [32].

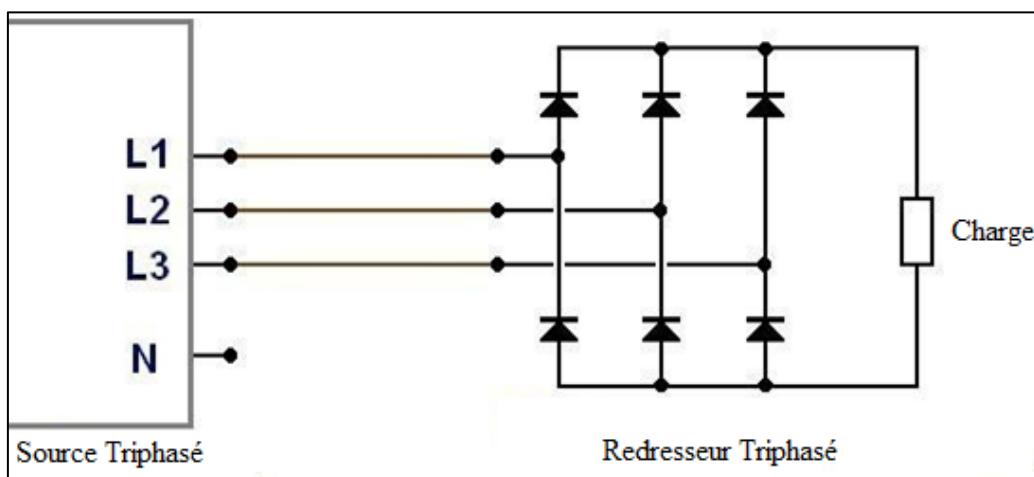


Figure 2.10 Schéma équivalent du convertisseur AC-DC

➤ Tension d'entrée triphasée :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a(t) = V_m \sin(\omega t) \\ V_b(t) = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_c(t) = V_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{array} \right. \quad (2.30)$$

➤ Tension de sortie moyenne (en charge résistive pure) :

$$V_{DC} = \pi/33 \cdot V_m \approx 1.654 \cdot V_m \quad (2.31)$$

2.2.7 Onduleur (convertisseur DC/AC)

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de puissance qui transforment l'énergie continue en énergie alternative, produisant une tension proche d'une sinusoïde afin de minimiser le taux d'harmoniques [33]. La figure 2.11 illustre le symbole représentatif de ce type de convertisseur.

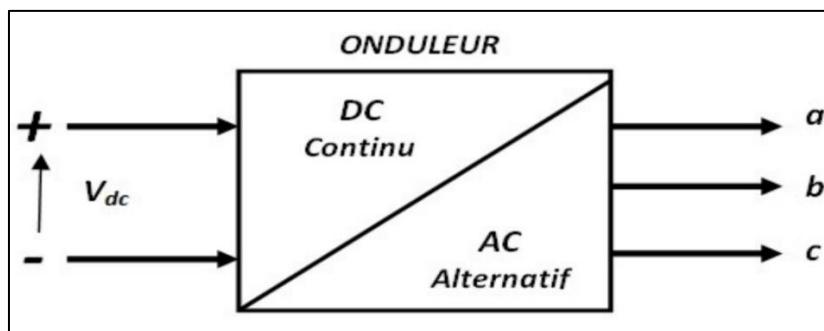


Figure 2.11 Symbole de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé

Dans les systèmes hybrides connectés aux réseaux de distribution, l'onduleur joue un rôle essentiel en convertissant le courant continu produit par la chaîne de conversion en courant alternatif. Ce courant alternatif est ensuite synchronisé à la fréquence du réseau grâce à un circuit de verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop).

Le schéma présenté à la figure 2.12 illustre un onduleur triphasé à structure de tension. Il est constitué de trois bras, chacun comportant deux semi-conducteurs réversibles en courant (onduleur à deux niveaux), commandés en ouverture et fermeture. Ces semi-conducteurs sont généralement réalisés à partir de transistors (GTO ou IGBT) associés à une diode montée en antiparallèle. Leur commande est complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Le stockage de l'énergie côté continu est assuré par un condensateur C_{DC} supportant une tension U_{DC} , ou par deux condensateurs C_{DC1} et C_{DC2} avec un point milieu. Un filtre passif,

habituellement du premier ordre constitué d'une inductance L_f et d'une résistance R_f , est inséré entre l'onduleur et le réseau afin d'assurer une bonne compatibilité de la tension injectée.

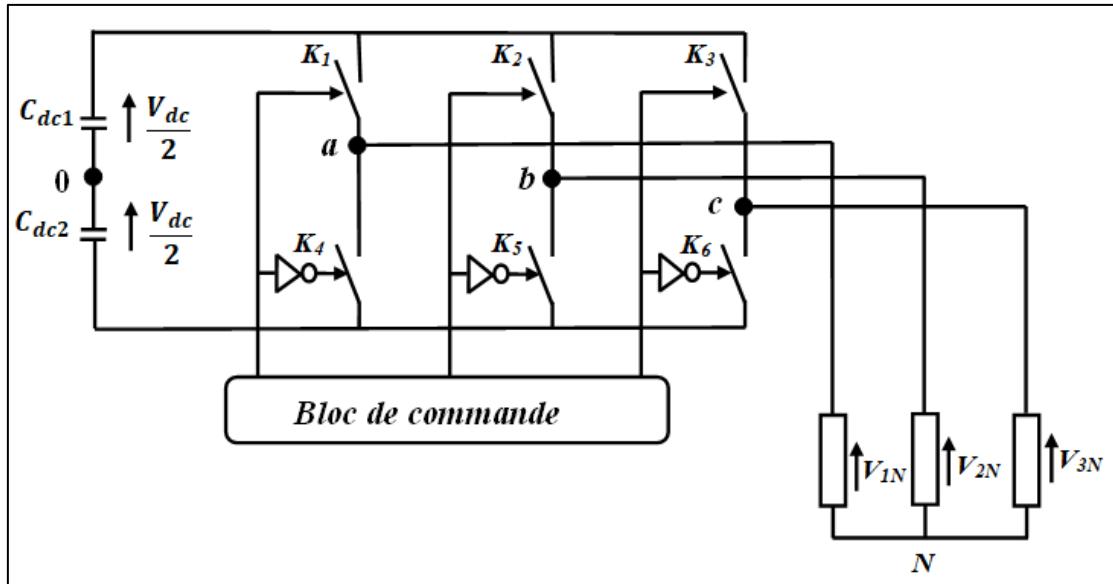


Figure 2.12 Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

On aura alors,

$$[V_{abc}] = V_{dc} [T] \quad (2.32)$$

Avec,

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

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \quad (2.33)$$

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

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.3 Contrôle du système

Étant donné que la demande énergétique de la charge peut parfois être inférieure à la production du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire et avantageux de mettre en place un système de gestion et de contrôle de l'énergie. Ainsi, l'excès d'énergie produite, non utilisé par la charge, est stocké (chargement des batteries). À l'inverse, lorsque la demande de la charge dépasse la capacité instantanée du système, l'énergie stockée est alors utilisée en complément (déchargement des batteries), garantissant ainsi que la charge reçoive l'énergie nécessaire quelles que soient les conditions. Finalement, cette énergie stockée peut être consommée par la charge aux moments opportuns [34].

2.3.1 Technique de perturbation et observation

Plusieurs façons peuvent être utilisées pour réaliser un point de puissance maximum de générateurs photovoltaïques (MPPT). Les premières utilisations de la MPPT ont été en 1968, il s'agit d'une sorte de contrôleur qui contrôlera le générateur pour fonctionner à sa vitesse maximale. Bien se concentrer sur ceux qui sont perturbés et observés (P&O). Le premier est très souvent exploité et cité en raison de sa simplicité. Il est basé sur un processus algorithmique avec l'intention de trouver de nouvelles connaissances, et c'est le point de puissance le plus élevé (MPPT). Son principe est basé sur la perturbation causée par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur, ou nous agissons directement sur le rapport cyclique des convertisseurs DC / DC, ce qui conduit à l'étude de l'effet sur la puissance de sortie. Ainsi, après une perturbation de tension, l'électricité augmente, mais le cours de perturbation est maintenu. Sinon, il est réversible pour reprendre la convergence vers le nouveau MPPT. Le principe de fonctionnement et le graphique d'organisation du schéma de contrôle P&O MPPT sont présentés dans les figures 2.13 et 2.14 respectivement.

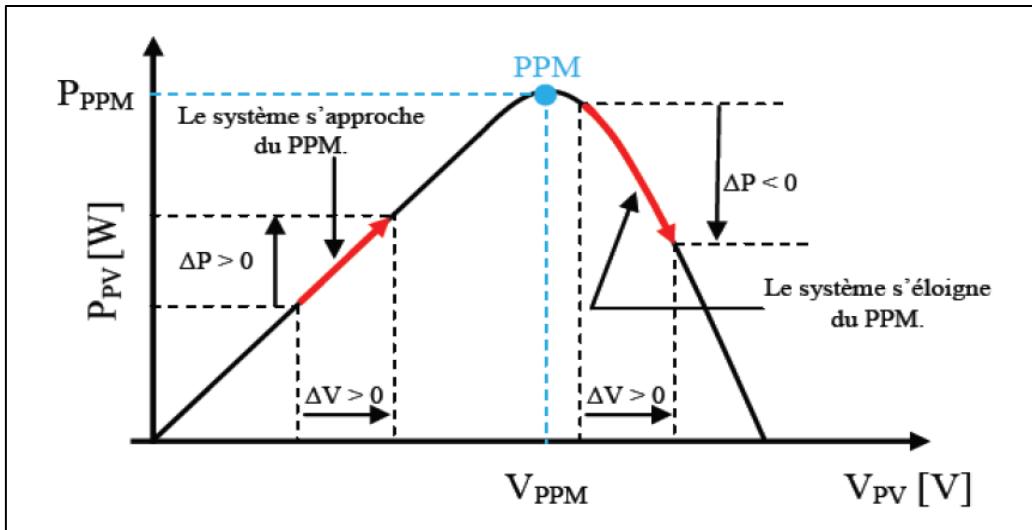


Figure 2.13 Principe de la technique P&O

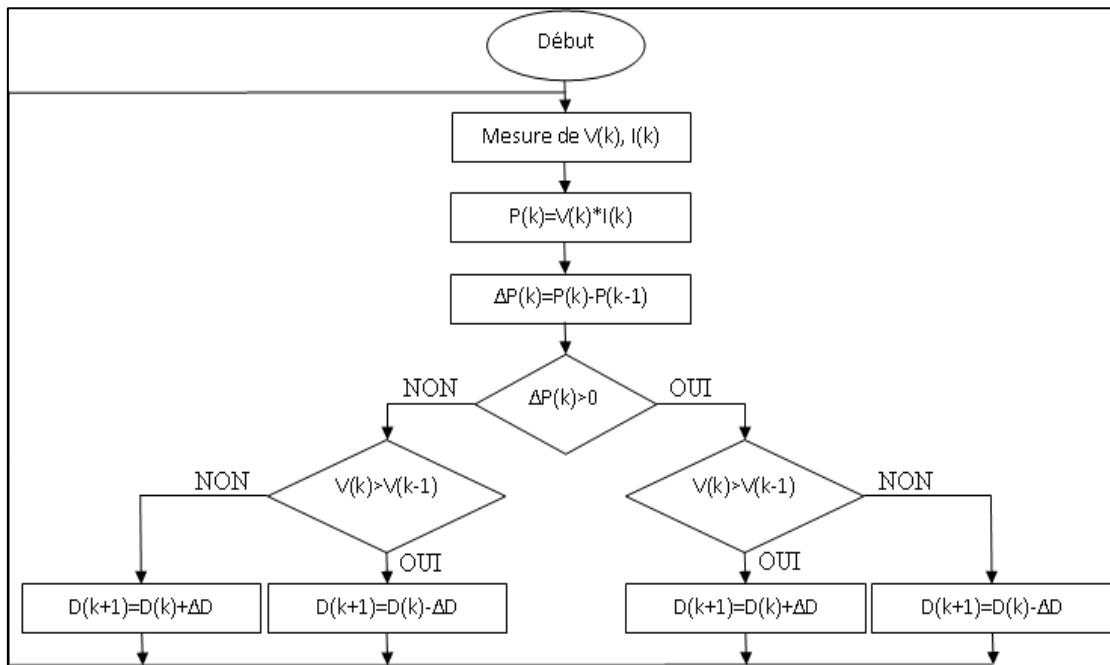


Figure 2.14 Algorithme de la méthode P&O

2.3.2 Contrôle de la Batterie

a) Commande classique

Dans un dispositif hybride multi-source, la gestion classique de la batterie s'appuie généralement sur des règles logiques fixes qui se basent sur l'état de charge de la batterie et la

puissance requise ou disponible. Cette méthode fait appel à des limites établies pour déclencher les modes de chargement ou de déchargement : par exemple, la batterie se recharge quand la production dépasse la demande et que l'état de charge est en dessous de 80%, et elle se décharge lorsqu'il y a une demande qui excède la production et que le SOC dépasse 20%. Cette méthode, bien que facile à mettre en œuvre, n'intègre pas les fluctuations dynamiques du système ni l'optimisation globale. Ce qui peut entraîner une utilisation sous-optimale de la batterie et une sollicitation excessive du réseau [34].

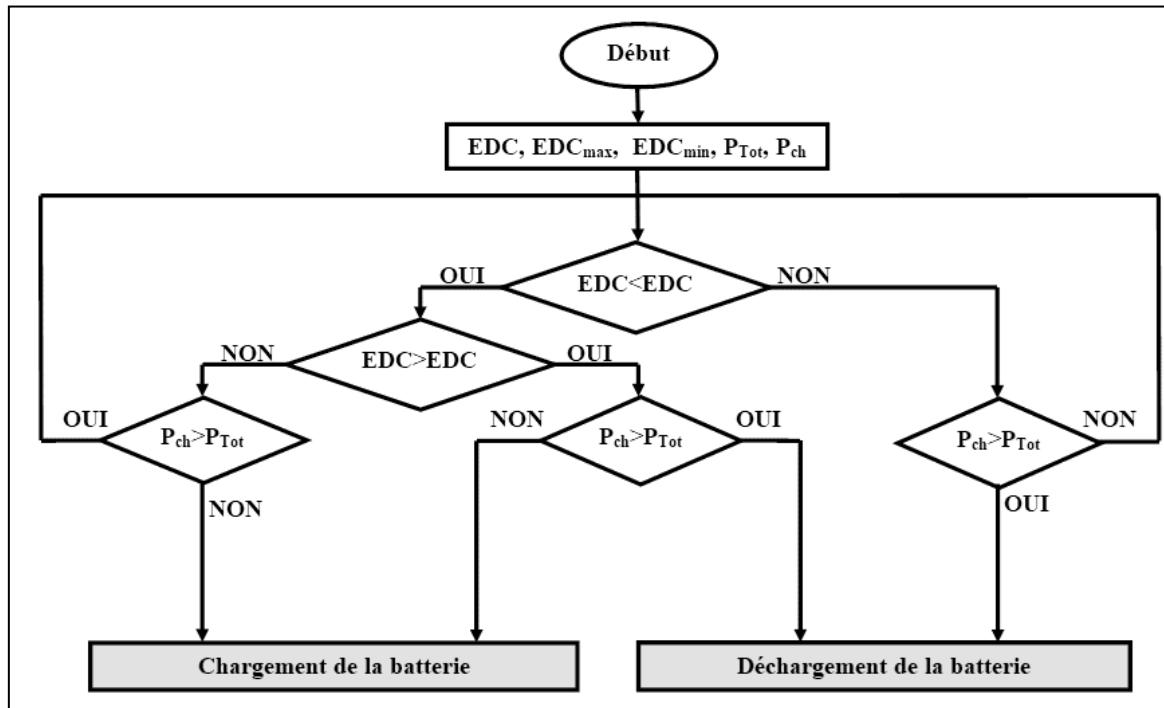


Figure 2.15 Organigramme du fonctionnement du système classique de gestion de commande de batterie

b) Commande d'optimisation par essaims de particules

L'algorithme d'optimisation par essaim particulaire, introduit par Kennedy et Eberhart en 1995, est un algorithme basé sur l'étude du comportement collectif des sociétés animales telles que les volées d'oiseaux, les bancs de poissons, etc. L'algorithme est fréquemment employé pour résoudre des problèmes d'optimisation, qu'ils soient mono ou multi-objectifs, en se fondant sur une population de solutions potentielles (Particules). Sous la direction d'un critère de performance, les particules de l'essaim explorent l'espace de recherche à la recherche de la solution optimale au problème formulé. La vitesse et le sens de mouvement de chaque particule dans l'essaim sont déterminés en utilisant les données locales concernant la solution

(position) et sa qualité, ainsi que les informations globales sur les performances optimales de ses voisins. La figure 2.16 explique le principe de fonctionnement [34].

Contrairement à la commande classique basée sur des règles fixes, la PSO permet d'optimiser en temps réel les décisions de charge et de décharge de la batterie en prenant en compte plusieurs paramètres tels que la puissance de charge, la puissance produite et l'état de charge. Chaque particule représente une solution possible et évolue en fonction de sa propre expérience et de celle du groupe, afin de minimiser une fonction objective, liée à l'équilibre entre production, consommation et état de la batterie. Cette approche permet une gestion plus souple, efficace et adaptative de l'énergie, réduisant les pertes et améliorant la fiabilité du système global [34].

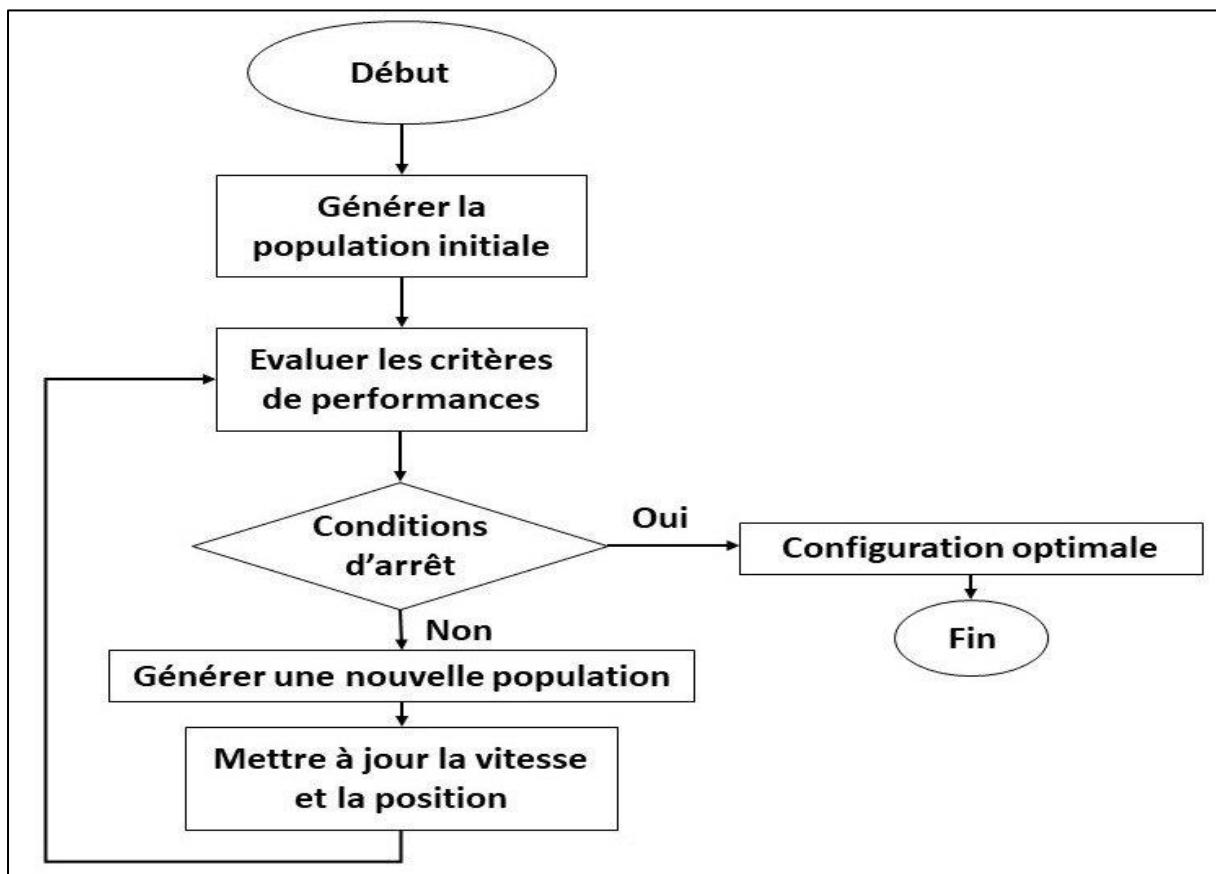


Figure 2.16 Organigramme du fonctionnement de l'algorithme de PSO

Cet algorithme est exécuté par les équations suivantes :

$$V_i(t+1) = w * (V_i(t) + c_1 * \text{rand}_1 * (P\text{Best}_i(t) - D_{\text{fitness}}_i(t)) + c_2 * \text{rand}_2 * (G\text{best}_i(t) - P_i(t))) \quad (3.33)$$

Avec,

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.34)$$

et,

$$D = PSO(V, I) \quad (3.35)$$

Avec,

P: rapport de vitesse;

V: vitesse;

P_{Best} : meilleure position de la particule qui correspond à Local_DBest;

G_{Best} : meilleure position du groupe de particules qui correspond à Global_DBest;

rand: random variable;

D: duty cycle;

c_1 : poids de l'information locale;

c_2 : poids de l'information global;

w: poids d'inertie.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des deux principales sources d'énergie renouvelable utilisées dans les systèmes hybrides : le générateur photovoltaïque et l'éolienne. La cellule photovoltaïque a été modélisée par un circuit équivalent à une diode, permettant de décrire précisément la relation courant-tension en fonction des paramètres environnementaux. La production d'énergie éolienne a été représentée à partir de l'équation de la puissance récupérable du vent, en tenant compte de la vitesse du vent, de la surface balayée et du rendement aérodynamique.

Par ailleurs, l'étude des convertisseurs statiques – hacheur, onduleur et redresseur – a permis de mettre en évidence leur rôle indispensable dans l'adaptation de l'énergie produite aux exigences du système : régulation de la tension, conversion de courant, et interfaçage avec les charges ou le réseau électrique. Ces convertisseurs permettent également la mise en œuvre des

algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser le rendement global du système.

Cette modélisation constitue une base essentielle pour la simulation, la commande et l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien dans un environnement de production énergétique intelligent.

Chapitre 3

SIMULATION ET GESTION DU FLUX ENERGETIQUE DU SYSTEME HYBRIDE

3.1 Introduction

Les systèmes hybrides multi-sources sont de plus en plus courants dans le domaine de la production d'énergie durable. Dans ce travail on combine plusieurs sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, ainsi qu'un système de stockage et un réseau électrique pour l'injection et l'utilisation d'énergie. En combinant plusieurs sources, le système hybride assure une production continue d'énergie, une meilleure gestion des surplus et des pénuries énergétiques.

Ce chapitre traite la gestion de l'énergie fournie par le panneau solaire, l'éolienne, le réseau de distribution, ainsi que de l'énergie consommée par la charge et celle du système de stockage.

La modélisation d'un système multi-sources hybride vise à optimiser la gestion énergétique en maximisant l'autoconsommation d'énergie renouvelable, en réduisant les coûts d'achat d'énergie et en garantissant la continuité de l'alimentation électrique. Le gestionnaire d'énergie détermine les flux énergétiques en donnant la priorité à l'autoconsommation directe, au stockage des surplus, à l'injection dans le réseau lorsque la batterie est pleine et à l'approvisionnement depuis le réseau en cas de pénurie. La simulation est réalisée en utilisant MATLAB/Simulink, en intégrant des techniques d'optimisation, une validation des résultats est effectuée par cette simulation pour garantir la fiabilité de la modélisation.

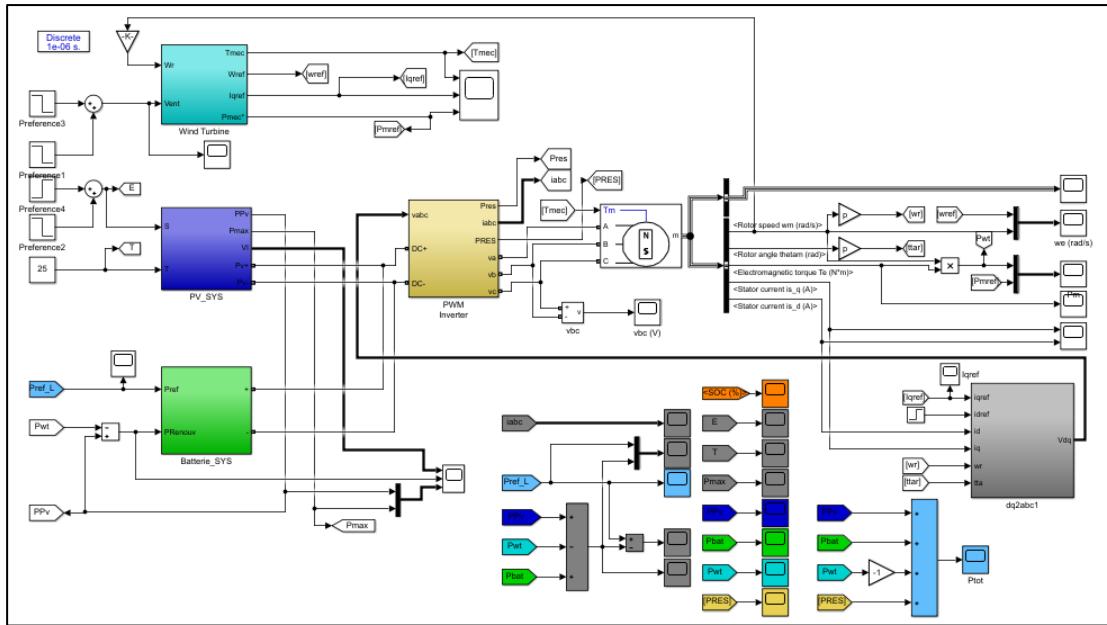


Figure 3.1 modélisation du system de conversion sous Simulink

La puissance produite par les panneaux photovoltaïques dépend de l'irradiance solaire, de la surface du panneau et de la température, et nécessite un convertisseur Boost (DC-DC) pour éléver la tension continue à un niveau utilisable. La turbine éolienne, dont la puissance est déterminée par la vitesse du vent, la densité de l'air et le coefficient de performance, génère une tension alternative convertie en tension continue via un redresseur (AC-DC) pour faciliter la gestion. La batterie, utilisée pour stocker l'énergie excédentaire, utilise un hacheur bidirectionnel (DC-DC) pour permettre la charge et la décharge avec contrôle de la tension et du courant. Pour alimenter les charges en courant alternatif, un onduleur (DC-AC) est nécessaire pour convertir la tension continue issue de la batterie ou des autres sources en tension alternative.

Cette section vise à élaborer un mécanisme de gestion de l'énergie pour les diverses sources du système hybride. Les résultats issus de la simulation, accompagnés de discussions, sont présentés afin de commencer l'analyse du fonctionnement d'un système hybride intégrant des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des batteries et le réseau électrique. L'objectif est de valider le fonctionnement de ce système en tenant compte des paramètres d'irradiation, de température et de vitesse du vent. Chaque composant du système proposé est modélisé à l'aide du logiciel Matlab / Simulink, permettant ainsi d'examiner le comportement de l'installation sous différentes conditions environnementales et de confirmer la validité de l'étude.

3.2 Résultats de simulation et interprétation

3.2.1 Caractéristiques du PV

La figure 3.2 présente les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque pour deux niveaux d'irradiance solaire différents : 1 kW/m² (courbe rouge) et 0,5 kW/m² (courbe bleue).

Plus l'irradiance solaire est élevée, plus le panneau génère de courant et de puissance. Le point de puissance maximale (MPP) est crucial pour le fonctionnement optimal du panneau PV et varie selon l'irradiance. Les systèmes de gestion, comme le MPPT (Maximum Power Point Tracking), sont nécessaires pour suivre ce point en temps réel et garantir une production énergétique optimale.

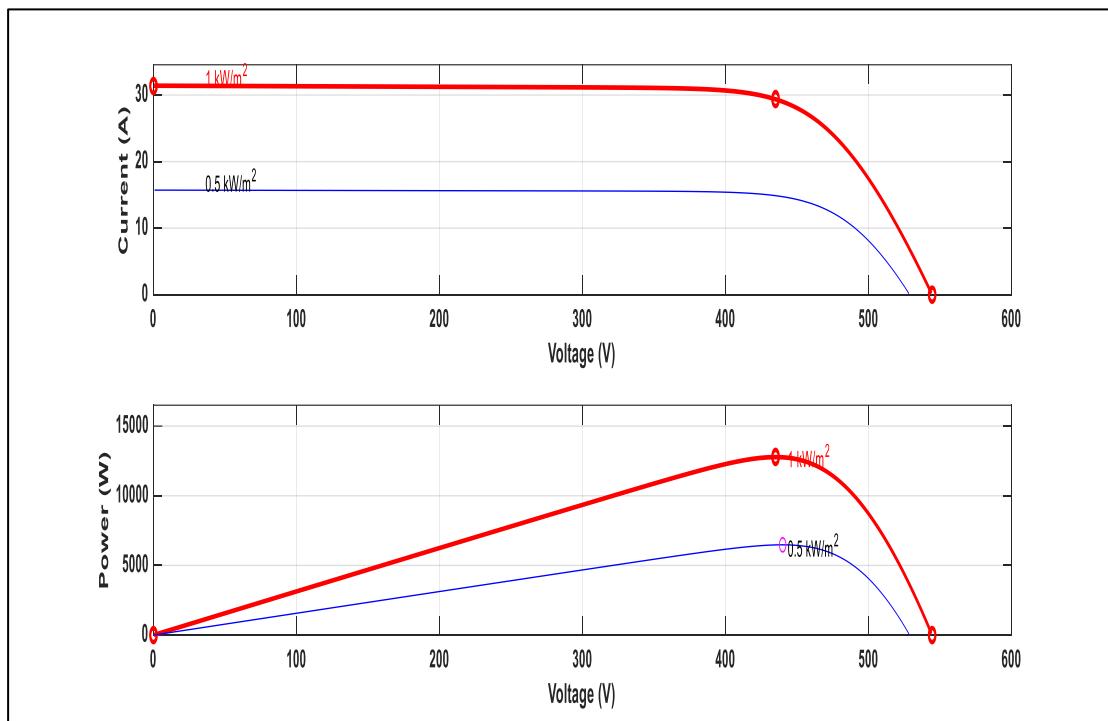
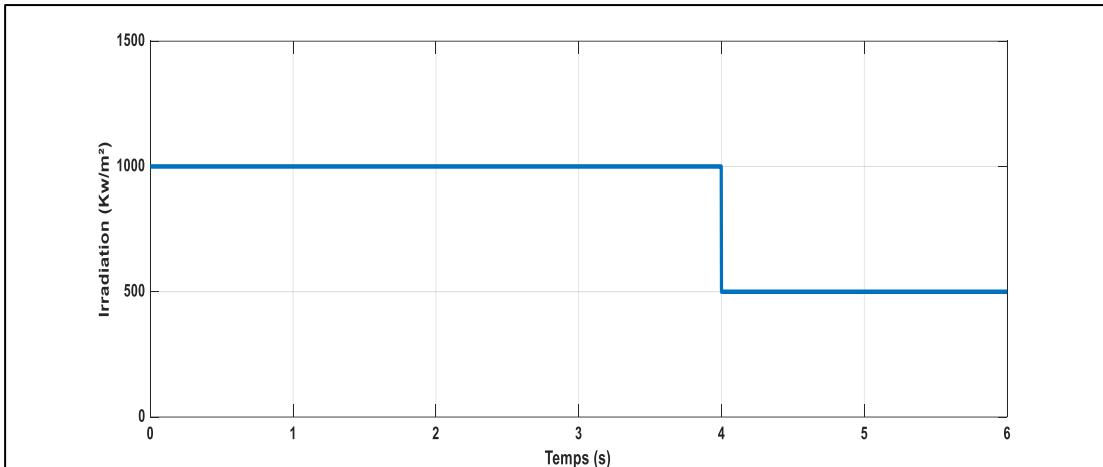
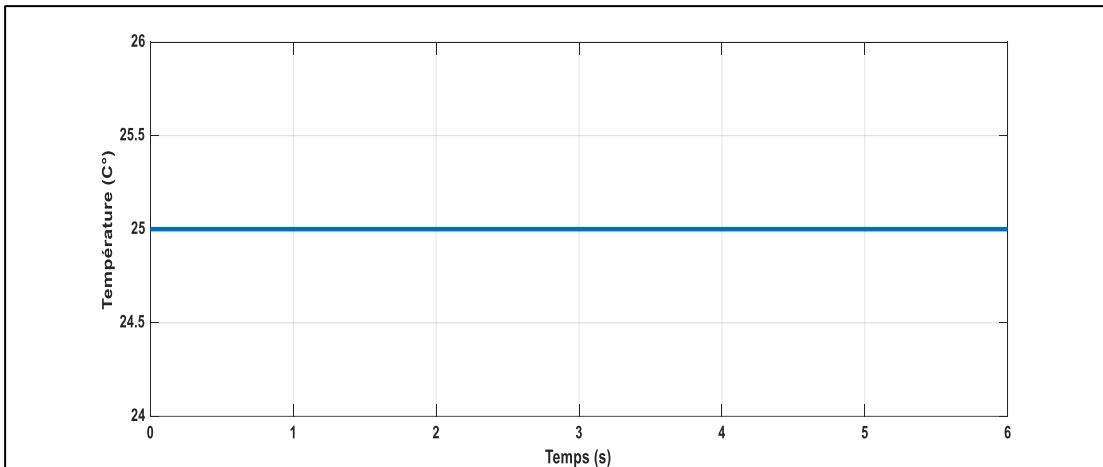


Figure 3.2 Caractéristiques du PV

**Figure 3.3 Irradiation****Figure 3.4 Température**

3.2.2 Caractéristiques de la turbine

La figure 3.5 représente les caractéristiques de puissance-vitesse d'une turbine éolienne pour différentes vitesses du vent. Pour chaque courbe, on observe un point de puissance maximale qui varie selon la vitesse du vent. Le graphique indique également que pour chaque vitesse de vent, il existe un point optimal où la turbine produit sa puissance maximale.

Les caractéristiques montrent que la turbine produit une puissance optimale à une certaine vitesse de rotation, dépendant directement de la vitesse du vent. Lors de faibles vitesses de vent, la puissance est limitée. Au-delà de la vitesse optimale, l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une diminution de la puissance en raison de la perte d'efficacité aérodynamique.

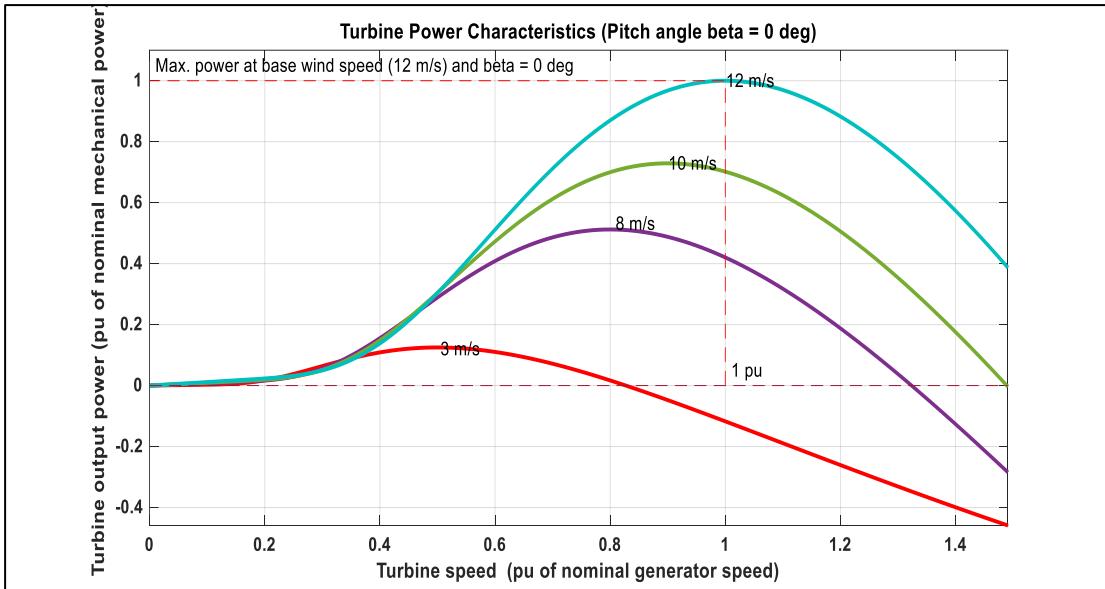
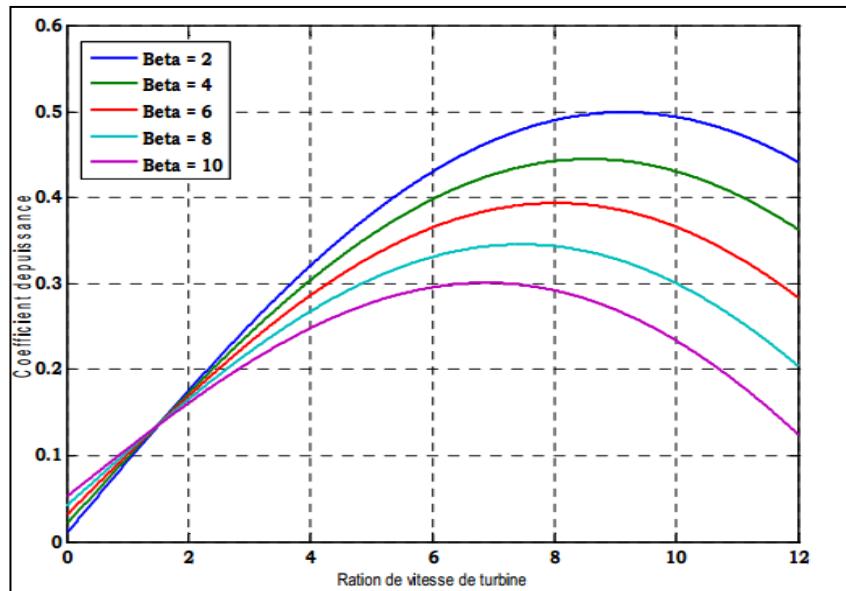
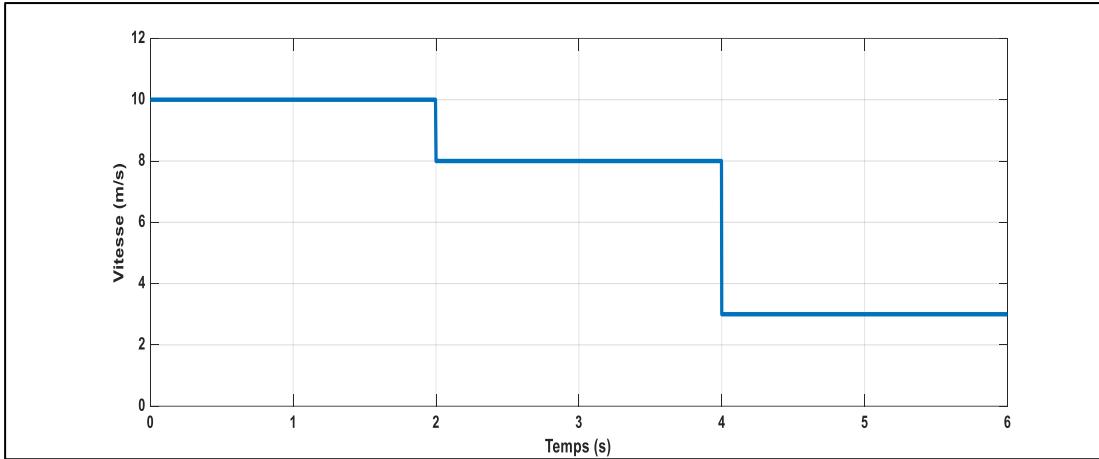


Figure 3.5 Caractéristiques de la turbine éolienne

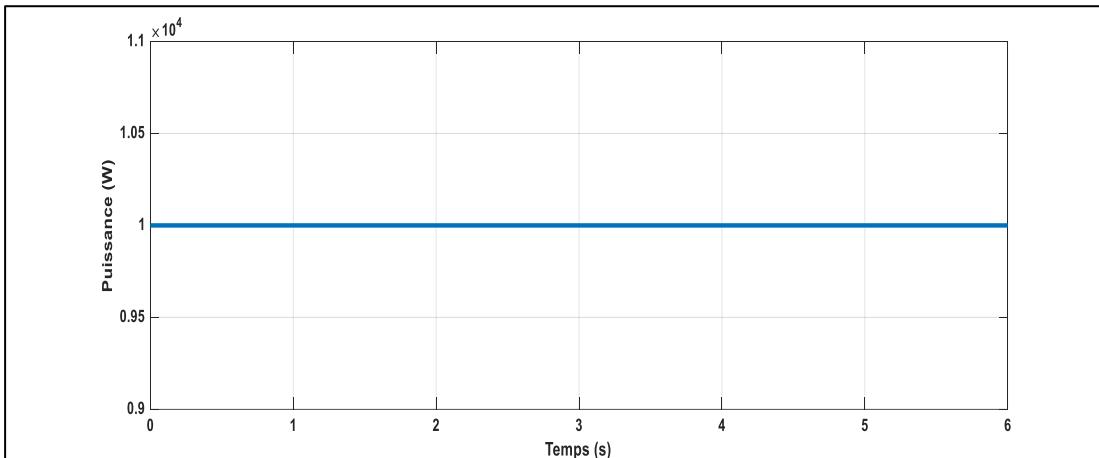
La figure 3.6 représente les caractéristiques de C_P en fonction de l'angle de calage ou d'orientation des pales (β) on note que $\beta=0$ est l'angle fonctionnel où le coefficient de puissance est maximal.

Figure 3.6 Caractéristique coefficient $C_P=f(\beta)$

**Figure 3.7 Vitesses du vent**

3.2.3 Gestion de l'énergie avec une technique classique

On a une charge alternative de 10 000 W (10 kW), nous devons adapter la gestion énergétique du système hybride en fonction de cette demande fixe pour différant cas précédemment définis.

**Figure 3.8 Puissance de la charge**

La figure 3.9 montre la courbe de puissance en fonction du temps d'un système photovoltaïque (PV), avec deux niveaux distincts, un palier élevé d'environ 11 kW pendant les 4 premières secondes, suivi d'une chute rapide à 5.5 kW, où la puissance reste stable par la suite. Cette variation indique que le panneau PV fonctionnait initialement à pleine capacité sous une irradiation optimale de 1000 W/m², assurant ainsi une production maximale. La chute soudaine à 4 secondes reflète une diminution

brutale de l'irradiance à 500 W/m. Une fois cette transition stabilisée, la puissance reste constante à 5.5 kW, montrant que le système s'est rééquilibré en fonction de la nouvelle condition d'ensoleillement. Cette adaptation rapide témoigne de l'efficacité de l'algorithme MPPT intégré au système, qui permet de suivre rapidement le nouveau point de puissance maximale malgré les fluctuations d'irradiance.

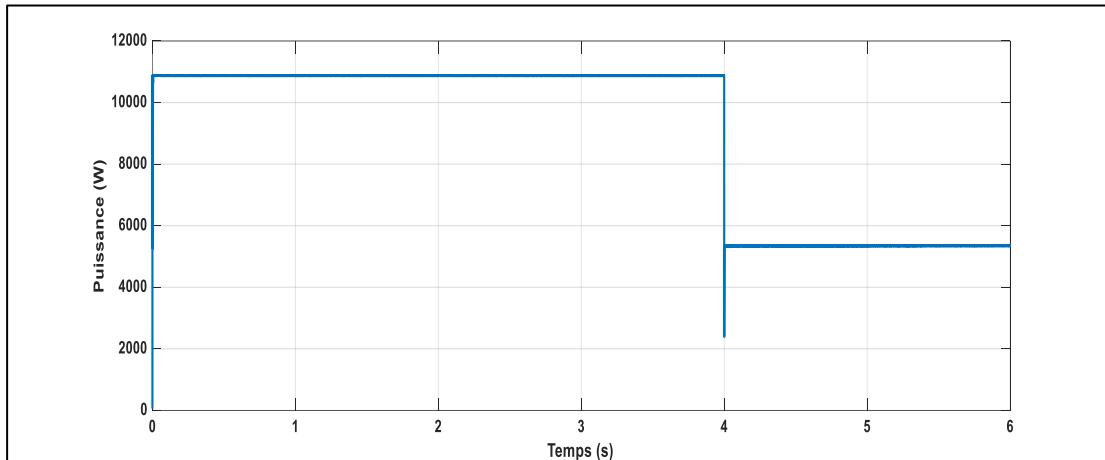
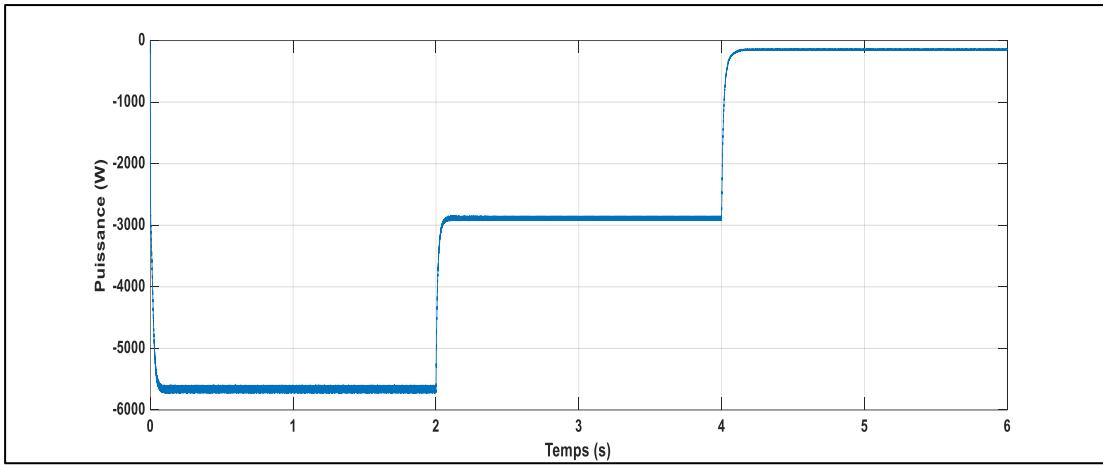
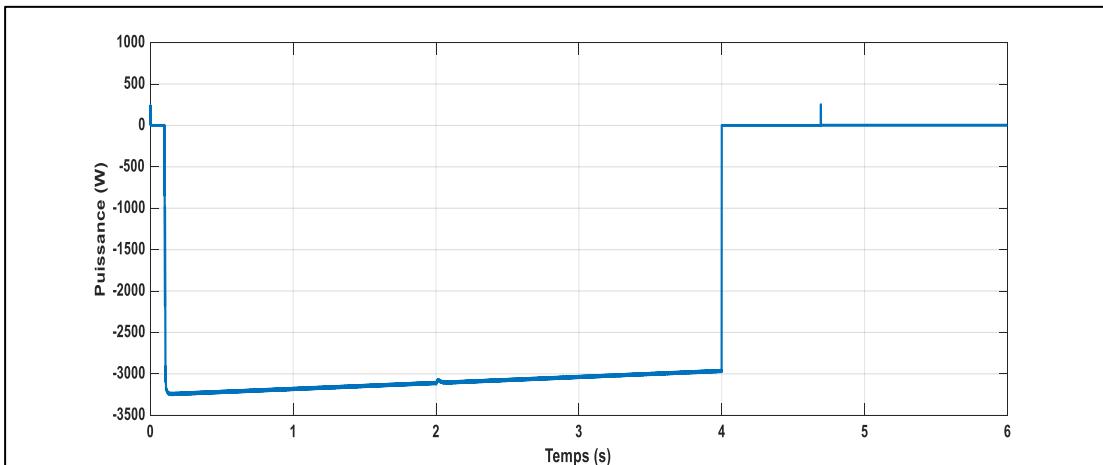


Figure 3.9 Puissances PV

La courbe de puissance de la turbine en fonction du temps présente trois niveaux distincts. Un palier négatif élevé d'environ 6 kW pendant les 2 premières secondes, suivi d'une chute à environ 3 kW entre la 2eme et la 4eme seconde, puis un palier très bas d'environ 200 W du 4eme au 6eme seconde. Cette évolution reflète les variations de la vitesse du vent influençant directement la production de la turbine. Dans la première phase, la vitesse est optimale à 10 m/s, permettant à la turbine de produire sa puissance maximale, tandis que la chute soudaine à 3 kW traduit une baisse de la vitesse du vent à 8 m/s. La seconde chute à 200 W indique une situation de vent très faible, autour de 3 m/s, où la turbine produit à peine de l'énergie. Cette dynamique montre l'impact direct des fluctuations éoliennes sur la puissance délivrée, nécessitant une gestion énergétique efficace pour compenser les variations, notamment par l'utilisation de la batterie ou du réseau en cas de production insuffisante.

**Figure 3.10 Puissances éolienne**

La courbe de puissance de la batterie en fonction du temps présente deux niveaux distincts un palier négatif d'environ 3 kW pendant les 4 premières secondes, suivi d'un palier positif d'environ 100 W entre la 4eme et la 6eme seconde. Le palier négatif indique que la batterie est en phase de charge, absorbant 3 kW d'énergie, ce qui peut se produire lorsque la production des sources renouvelables dépasse la demande de la charge, permettant ainsi le stockage de l'excédent. Après 4 secondes, la courbe passe à un palier positif de 100 W, ce qui indique que la batterie est en phase de décharge, fournissant de l'énergie au système, probablement pour compenser une baisse de la production renouvelable ou pour maintenir l'alimentation de la charge. Ce changement de régime reflète l'ajustement automatique du système hybride pour équilibrer la production et la consommation en fonction des variations des sources d'énergie.

**Figure 3.11 Puissances batterie**

La courbe de l'état de charge de la batterie (SOC) en fonction du temps présente deux variations distinctes : une augmentation pendant les 4 premières secondes, suivie d'une diminution du 4eme au 6eme seconde. L'augmentation initiale du SOC indique que la batterie est en phase de charge, ce qui signifie que l'énergie produite par les sources renouvelables (PV / éolienne) est supérieure à la consommation de la charge, permettant ainsi de stocker l'excédent. À partir de la 4eme seconde, la diminution du SOC traduit une phase de décharge, où la batterie fournit de l'énergie pour compenser un déficit de production ou pour répondre à une demande accrue. Cette alternance entre charge et décharge montre la gestion dynamique de l'énergie dans le système hybride, visant à optimiser l'utilisation des ressources tout en maintenant un niveau de charge suffisant pour les périodes de faible production.

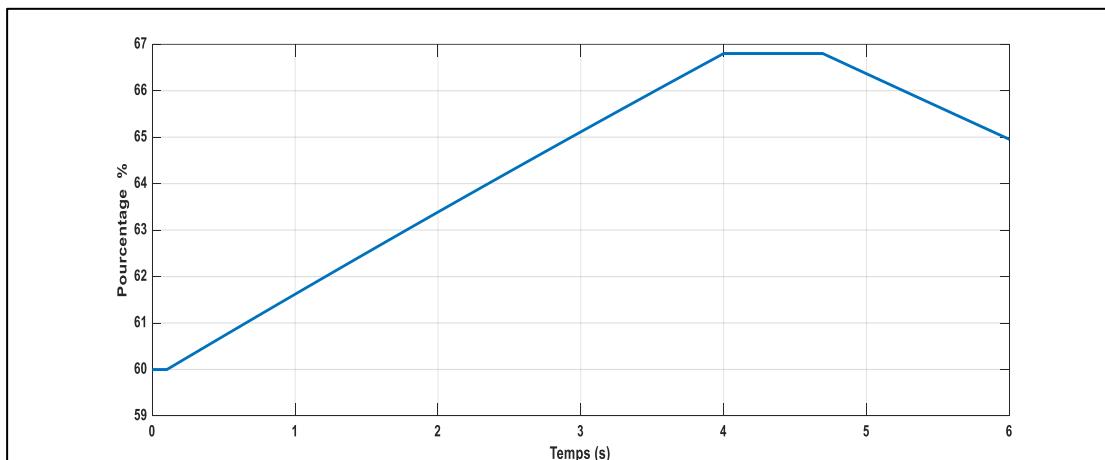


Figure 3.12 SOC de la batterie

La courbe de puissance du réseau en fonction du temps présente trois niveaux distincts : un palier négatif d'environ -2 kW pendant les 2 premières secondes, indiquant que le système injecte de l'énergie excédentaire dans le réseau, suivi d'un palier de 0 W entre la 2eme et la 4eme seconde, où il n'y a ni injection ni prélèvement, ce qui signifie que la production et la consommation sont équilibrées. Enfin, le palier positif de 4 kW du 4eme au 6eme seconde montre que le système préleve de l'énergie du réseau pour compenser un déficit de production, probablement dû à une baisse simultanée de la puissance des sources renouvelables (PV et éolienne) ou à une augmentation de la demande. Cette dynamique illustre la gestion intelligente de l'énergie dans un système hybride, en assurant la stabilité de l'alimentation électrique par une régulation continue entre injection et consommation réseau.

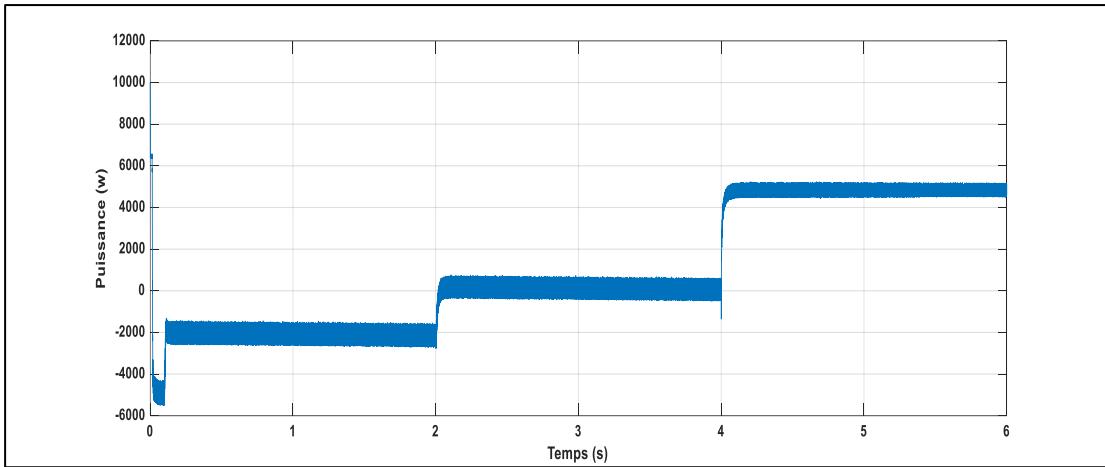


Figure 3.13 Puissances du réseau de distribution

La figure 3.14 représente l'évolution du courant du réseau en fonction du temps, avec des variations nettes qui reflètent les différentes phases de fonctionnement du système hybride. Durant la première phase, on observe un courant alternatif oscillant autour de zéro avec une amplitude modérée, ce qui indique que le système injecte une certaine quantité d'énergie dans le réseau, correspondant à un excédent de production par rapport à la charge. Ensuite, entre 2 et 4 secondes, le courant devient quasi nul, suggérant un équilibre parfait entre la production locale (PV, éolienne, batterie) et la charge, sans échange d'énergie avec le réseau. Enfin, à partir de la 4e seconde, le courant augmente en amplitude, indiquant cette fois un prélèvement d'énergie depuis le réseau, ce qui confirme une baisse de la production renouvelable, et qui oblige le système à s'appuyer sur le réseau pour satisfaire la charge.

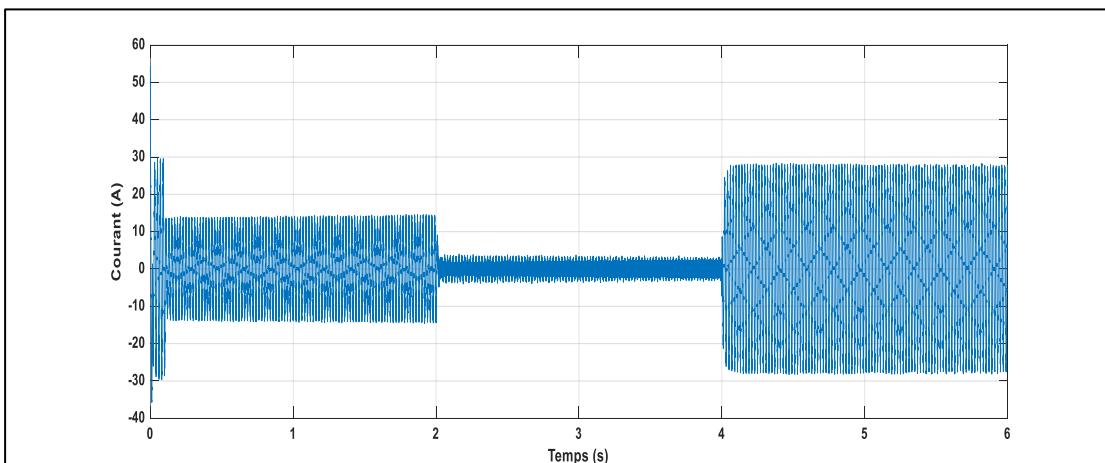


Figure 3.14 Courant du réseau de distribution

La figure 3.15 représentant l'ensemble des puissances dans le système hybride illustre clairement la répartition et l'évolution de la production, du stockage, de la consommation et de l'échange avec le réseau. Au début, la puissance produite par le PV et l'éolienne est suffisante pour alimenter la charge et charger la batterie, avec un éventuel excès injecté dans le réseau, et en cas de production insuffisante et de batterie moins disponible, le réseau fournit la puissance nécessaire.

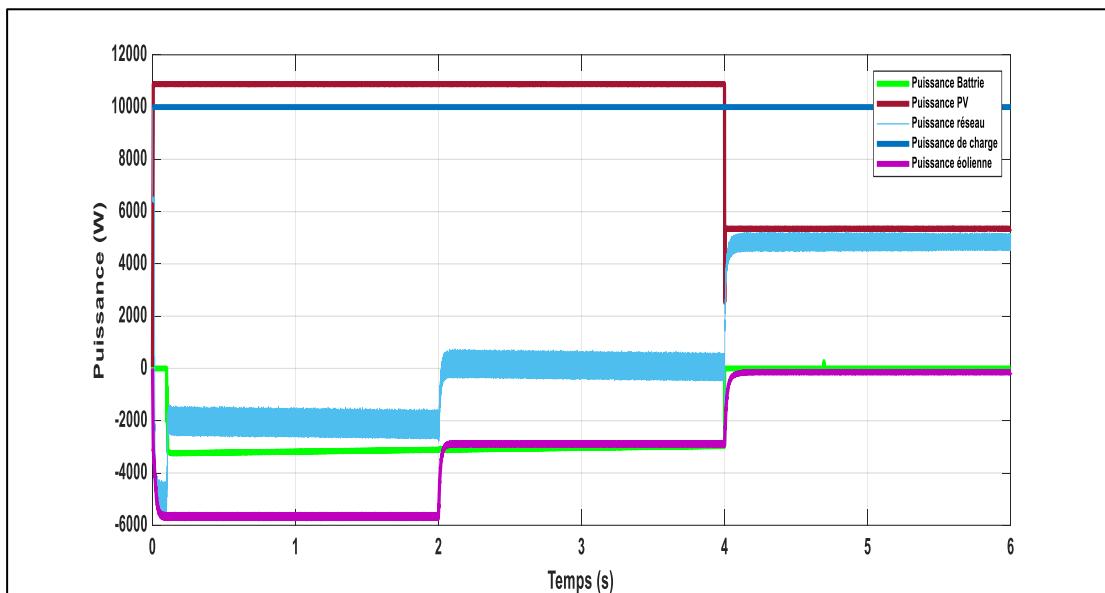
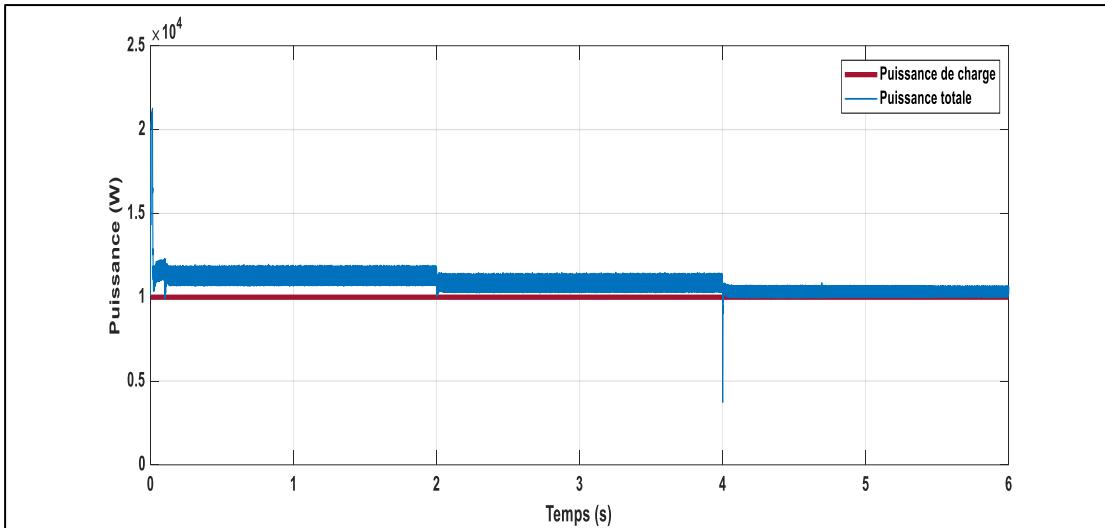


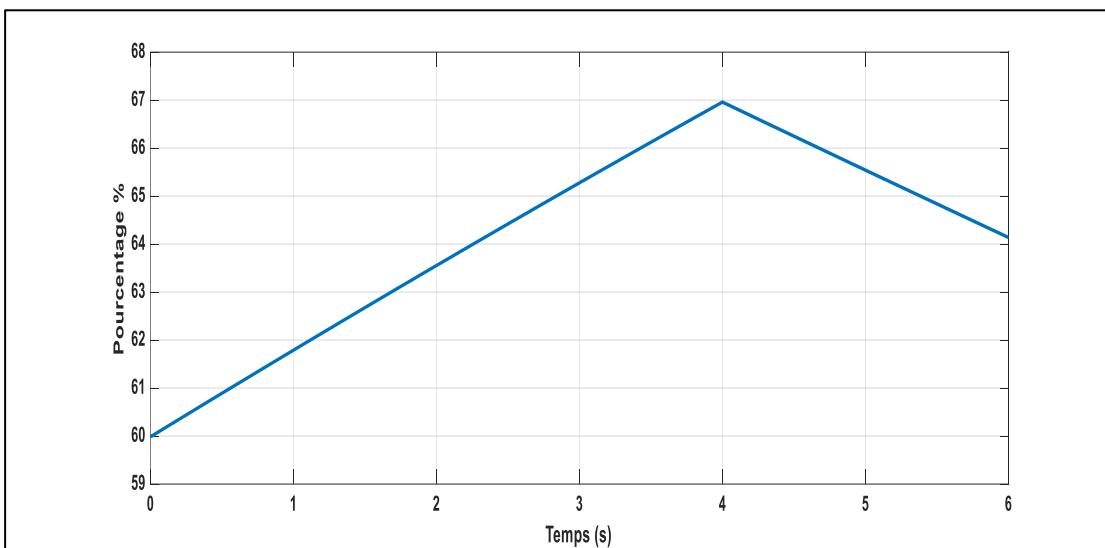
Figure 3.15 Comportement des puissances du système

La figure 3.16 montre la courbe de la puissance totale disponible, issue de la combinaison des sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne), de la batterie et du réseau, comparée à la courbe de la puissance consommée par la charge. On observe que, durant la simulation, la puissance totale suit la courbe de la charge, ce qui traduit un bon équilibrage énergétique. Lorsque la production renouvelable est élevée, elle couvre la charge et permet de stocker ou injecter l'excès. En revanche, en période de faible production, la batterie et le réseau interviennent pour combler le déficit. Cette cohérence entre les deux courbes met en évidence l'efficacité du système de gestion de l'énergie, assurant une alimentation continue et stable de la charge grâce à la coordination entre toutes les sources, comme modélisé dans l'environnement Simulink.

**Figure 3.16 Puissance de charge et puissance totale**

3.2.4 Gestion de l'énergie avec la technique d'optimisation par essaim des particules (PSO)

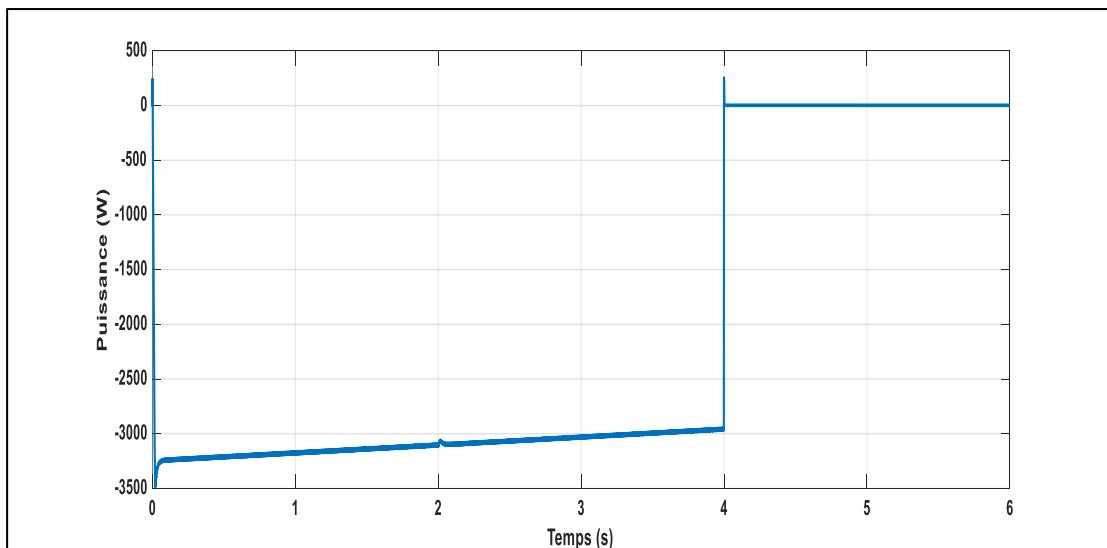
La figure 3.17 indique un temps de réponse rapide du système de gestion par PSO, ce qui montre une réactivité efficace à une situation de surplus d'énergie. Cette montée rapide traduit la capacité de l'algorithme à optimiser la puissance de charge et décharge presque instantanément.

**Figure 3.17 SOC de la batterie (PSO)**

Critère	Commande Classique (Figure 3.12)	Commande PSO (Figure 3.17)
Forme de la courbe	Moins linéaire ou irrégularité	Courbe régulière et linéaire
Comportement après la transition	SOC reste stable ou décroît légèrement	SOC décroît légèrement
Temps de réponse	Environ 0.2 secondes	Instantané
Stabilité	Retard à la stabilité après transition	Stabilité direct et lissage de la courbe
Interprétation	La méthode classique charge la batterie correctement mais avec un profil moins optimisé.	La méthode PSO permet une charge plus fluide, contrôlée et efficace.

Tableau 3.1 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau du SOC

La figure 3.18 de la puissance batterie montre qu'entre 0 s et 4 s, la batterie est en phase de charge, avec une puissance inverse de 3500 W vers 3000 W. À t = 4 s, une transition nette se produit la puissance passe brutalement à une valeur positive constante, indiquant le début de la décharge. Cette inversion rapide du flux de puissance reflète une réponse dynamique efficace de l'algorithme basé sur l'optimisation par essaim de particules.

**Figure 3.18 Puissance de la batterie avec PSO**

Critère	Commande Classique (Figure 3.11)	Commande PSO (Figure 3.18)
Forme de la courbe	Comportement dynamique avec petites oscillations	Courbe plus lisse et régulière
Amplitude maximale	Environ -3300 W	Environ -3300 W
Temps de réponse	≈ 0.2 secondes	≈ 0.01 secondes
Stabilité après transition	Moins stable (retard de déchargement à 4 s)	Plus stable (déchargement direct et aucune oscillation)
Qualité de régulation	Réponse bruitée, moins efficace	Réponse optimisée, plus fluide
Interprétation	La commande classique montre une transition instable avec perturbations résiduelles et une lente réponse.	La méthode PSO améliore la stabilité et réduit les fluctuations après la transition et répondre instantanément.

Tableau 3.2 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau de la puissance de la batterie

La figure 3.19 montre trois paliers successifs clairement définis entre 0 s et 2 s, la puissance au palier négative autour de 2000 W, ce qui signifie que le système injecte de l'énergie dans le réseau, grâce à un excédent de production renouvelable. À t = 2 s, la puissance devient nulle, ce qui correspond à une baisse de la production renouvelable — le système ne peut plus injecter, mais ne consomme pas encore non plus, traduisant un équilibre temporaire. Ensuite, à t = 4 s, la puissance devient fortement positive, atteignant environ 5000 W, ce qui indique que le système importe massivement de l'énergie du réseau. Ces transitions démontrent un temps de réponse rapide, en particulier aux instants critiques (2 s et 4 s), où le contrôleur PSO réagit efficacement aux variations de production.

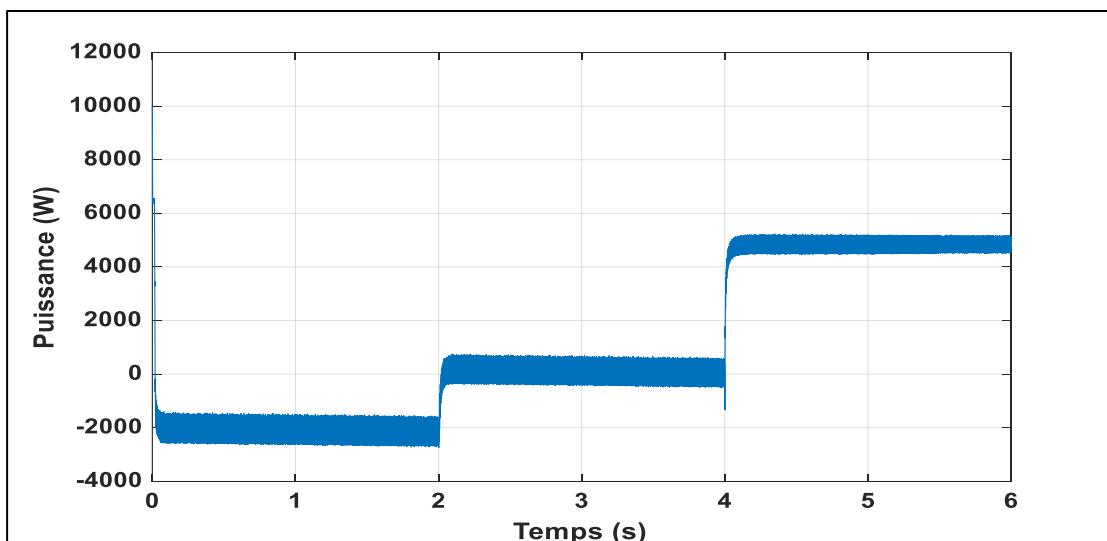


Figure 3.19 Puissance réseau avec PSO

Critère	Commande Classique (Figure 3.13)	Commande PSO (Figure 3.19)
Forme de la courbe	Transitions abruptes, paliers nets	Transitions plus progressives, courbe plus fluide
Temps de réponse aux variations	Réponse rapide mais brutale	Réponse plus rapide, contrôlée et plus douce
Stabilité globale	Bonne mais avec discontinuités visibles	Bonne mais avec discontinuités visibles
Interprétation	La commande classique permet une bonne coordination mais avec un léger retard.	La méthode PSO permet une meilleure coordination réseau/batterie, évitant des pics brusques.

Tableau 3.3 Comparaison des méthodes d'optimisation au niveau de la puissance du réseau de distribution

3.3 Conclusion

En conclusion, la gestion énergétique d'un système hybride composé de panneaux photovoltaïques (PV), d'une turbine éolienne, d'une batterie et du réseau repose sur une stratégie d'optimisation continue visant à équilibrer la production d'énergie renouvelable, la consommation de la charge et l'utilisation des ressources de stockage ou du réseau électrique. Les courbes de puissance des différentes sources montrent clairement l'impact des variations climatiques sur les performances du système. Permettant non seulement de couvrir la consommation directe mais aussi de charger la batterie et d'injecter l'excédent dans le réseau. À l'inverse, en cas de conditions défavorables, la production globale est largement inférieure à la demande, nécessitant un recours accru à l'énergie stockée et, éventuellement, au réseau pour maintenir l'alimentation continue. La batterie, avec son évolution de SOC (State of Charge), témoigne de son rôle essentiel dans l'absorption des surplus et la compensation des déficits énergétiques. De même, la courbe de puissance du réseau illustre l'alternance entre injection et prélèvement selon la disponibilité des sources renouvelables et l'état de charge de la batterie. La simulation de ce système complexe dans Simulink permet de modéliser précisément ces interactions, d'évaluer la performance des stratégies de gestion, et d'optimiser les flux énergétiques en fonction des variations de la production et de la demande. Grâce aux outils de simulation dynamique de Simulink, il est possible d'analyser en temps réel les réponses du système aux changements de conditions météorologiques, d'optimiser l'algorithme MPPT et d'améliorer l'efficacité énergétique

globale, garantissant ainsi une alimentation stable tout en maximisant l'utilisation des ressources renouvelables et en minimisant la dépendance au réseau électrique.

L'utilisation de la méthode PSO (Optimisation par essaim de particules) dans la gestion d'un système multi-sources hybride permet une prise de décision plus intelligente et dynamique, notamment dans le contrôle de charge et de décharge de la batterie. Comparée à une commande classique, la PSO améliore la stabilité des échanges d'énergie, réduit les variations brusques de puissance et optimise l'utilisation des ressources disponibles (PV, éolien, réseau). Elle permet ainsi d'obtenir un comportement plus fluide, réactif et efficace du système global, en tenant compte en temps réel de l'état de charge (SOC) et des conditions de production.

Conclusion générale

La pression grandissante sur les ressources énergétiques fossiles, conjuguée à l'urgence climatique mondiale, exige une refonte majeure des systèmes de production et de consommation d'énergie. Dans cette optique, les systèmes hybrides multi-sources, qui allient astucieusement des énergies renouvelables (telles que le solaire ou l'éolien), des sources conventionnelles (réseau électrique) et des unités de stockage (batteries), constituent une option prometteuse, flexible et durable. Ils sont particulièrement appropriés pour les zones reculées, les installations autonomes ou les régions sujettes à des interruptions fréquentes du réseau électrique. L'un des enjeux cruciaux dans ces systèmes est indéniablement la gestion optimale de l'énergie. En effet, la coexistence de plusieurs sources aux caractéristiques diverses (intermittence, coût, rendement, disponibilité) complique la coordination. Une stratégie de gestion énergétique efficace doit permettre d'assurer la couverture des besoins en énergie tout en maximisant l'utilisation des ressources renouvelables, en prolongeant la durée de vie des batteries et en réduisant les coûts opérationnels.

Ce projet a permis d'aborder ce défi de manière structurée à travers trois axes complémentaires. Le premier chapitre a posé les bases théoriques en définissant les différentes sources d'énergie renouvelable, en expliquant les architectures des systèmes hybrides, et en identifiant les principaux composants (sources, convertisseurs, stockage, charges). Le deuxième chapitre a présenté un panorama des stratégies de gestion de l'énergie, qu'elles soient à base de règles simples, d'algorithmes d'optimisation mathématique ou de techniques d'intelligence artificielle, en mettant en évidence leurs avantages, limites et conditions d'applicabilité. Enfin, le troisième chapitre a permis de mettre en œuvre une stratégie choisie dans un environnement de simulation (MATLAB/Simulink), afin d'en évaluer le comportement dynamique, les performances énergétiques et l'efficacité globale dans un scénario réaliste.

Les résultats de simulation ont montré qu'une gestion bien pensée permet non seulement de garantir la stabilité de l'alimentation électrique, mais aussi d'optimiser l'exploitation des ressources disponibles. La stratégie mise en œuvre a permis une réduction significative de la consommation du réseau de distribution, une meilleure utilisation des panneaux photovoltaïques et du système éolien, et un fonctionnement plus équilibré de la batterie. Cela se traduit par un système plus économique, plus fiable, et moins polluant.

Conclusion générale

Néanmoins, ce travail ouvre également la voie à plusieurs perspectives d'amélioration. Parmi elles, l'intégration de prévisions météorologiques (pour anticiper la production solaire/éolienne), l'optimisation en temps réel via l'intelligence artificielle (réseaux neuronaux, apprentissage par renforcement), ou encore l'extension du modèle à un micro-réseau interconnecté avec plusieurs consommateurs et producteurs distribués.

En conclusion, ce projet montre que la gestion intelligente de l'énergie dans un système hybride multi-sources est une solution technique réaliste, efficace et porteuse d'avenir dans le cadre de la transition énergétique. Il contribue à promouvoir une utilisation rationnelle, propre et durable de l'énergie, en phase avec les objectifs de développement durable à l'échelle locale et mondiale.

Les référence

- [1] :Niandou, A. A. (2022). *Urbanisation et précarité de l'énergie électrique dans les grandes villes d'Afrique de l'Ouest : Exemple de Niamey, Niger* [Mémoire de Master, Université virtuelle du Niger].
- [2] : Benyoucef, K. (2017). *La transition énergétique en Algérie : Enjeux, limites et perspectives* [Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou].
- [3] : Nadjem, A. (2019). *Contribution des énergies renouvelables au développement durable en Algérie* [Mémoire de Master, Université de Biskra].
- [4] : Benali, A. (2020). *Étude et simulation d'un système hybride éolien/solaire avec stockage pour l'électrification d'un site isolé* [Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
- [5] : Meziane, S. (2020). *Conception et gestion d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diesel avec stockage pour un site isolé* [Mémoire de Master, Université de Béjaïa].
- [6] : Bouzid, B., & Krishen, L. (2015). *Étude des systèmes hybrides de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables*. Revue des Énergies Renouvelables, 18(3), 399-412.
- [7] : ADEME. (2020). *Les énergies renouvelables*. Agence de la transition écologique
- [8] : Youmarter. (n.d.). *Énergies renouvelables : définition et exemples d'application*
- [9] : These M. Lakhdara Amira
- [10] :SirEnergies. (n.d.). *Énergie éolienne : principes et fonctionnement*
- [11] :Université Abderrahmane Mira – Béjaïa. (n.d.). *Étude et gestion d'un système d'énergie hybride* [Mémoire de magister].
- [12] : Zerari, M. A. (n.d.). *Étude d'un système d'énergie hybride* [Mémoire de Master, Université de Biskra].
- [13] : SirEnergies. (n.d.). *Énergie éolienne : principes et fonctionnement*.
- [14] : Selectra. (n.d.). *L'énergie solaire : fonctionnement et production*
- [15]: Projet Écolo. (n.d.). *L'énergie solaire : définition, avantages et inconvénients*.
- [16]: Selectra. (n.d.). *Comment produire de l'énergie solaire ?*
- [17]: Opéra Énergie. (n.d.). *L'énergie solaire : fonctionnement, avantages et inconvénients*.
- [18]: Université de Tiaret. (n.d.). *Chapitre 1 – Énergies renouvelables et systèmes hybrides* [Cours ou mémoire].
- [19]: ADEME (Agence de la transition écologique). (2021). *Solaire thermique : avantages et limites*

- [20]: Énergie Solaire France. (n.d.). *Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire thermodynamique*.
- [21]: Soleriel. (n.d.). *Inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques*.
- [22]: Université de M'sila. (n.d.). *Chapitre I – Introduction aux systèmes énergétiques hybrides* [Document d'e-learning].
- [23]: Université de Tiaret. (2019). *Mémoire de Master : Optimisation des systèmes hybrides* [Mémoire de Master].
- [24]: Hal, T. (2022). *Conception et gestion des systèmes d'énergie hybride* [Thèse].
- [25]: Azoui, B. (2020). *Notes de cours en Master Energies Renouvelables/Multi sources, UB2MB*.
- [26] : H. Bouhali, M. Becherif, A. Kheloui, A. Miraoui, “Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque,” *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°3, pp. 387–392, 2007.
- [27] : BENKASSIS, Amira. *Étude et modélisation d'un panneau photovoltaïque*. Mémoire de Master Académique en Instrumentation, Département d'Électronique et Télécommunications, Université 8 Mai 1945 – Guelma, juin 2024
- [28] : Heier, S. (2017). *Énergie éolienne – Intégration au réseau des systèmes éoliens terrestres et offshore* (3e éd.). Dunod.
- [29] : Hau, E. (2017). *Éoliennes – Fondements, technologie, application, économie* (3e éd.). Éditions Tec & Doc
- [30] : Hadj Arab, A. (2009). *Systèmes hybrides de production d'électricité à base d'énergies renouvelables : Étude et dimensionnement*. Éditions Universitaires Européennes.
- [31] : Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of Batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill. Une référence très complète sur tous les types de batteries, leurs caractéristiques (résistance interne, SOC, DOD, etc.).
- [32] : B. Multon, *Électronique de puissance – Convertisseurs redresseurs*. Université Rennes 1
- [33] : Multon, B. (Université Rennes 1). *Convertisseurs onduleurs – Électronique de puissance*
- [34] : doctorat en sciences spécialité Electronique de Nadjwa CHETTIBI Contribution à la Commande Intelligent d'un Système Photovoltaïque Hybride
- [35] : Amira Lakhdara , Tahar Bahi, Moussaoui Abdelkrim , 2020, Sliding mode control of doubly-fed induction generator in wind energy conversion system , 8 th international conference on smart grid, icsmartgrid, june 17-19, 2020, Paris/France.