

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention des diplômes de Master en Électrotechnique
&
Électromécanique.

Spécialité : Automatisme industriel
&
Électromécanique.

Thème

**Stratégie de gestion d'énergie dans un système multi-
source**

Préparé par :

Mr, Benlatreche Fares, Spécialité : AI

Mr, Mouhoub Seif Eddine, Spécialité : ELM

Encadré par :

Mme BELAID Sofia

Mr Ismail Hacini

Année Universitaire : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Moulhoub

Prénom : Seifeddine

Matricule : 202033007482

Spécialité et/ou Option : Electronique

Département : génie électrique

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) :

Intitulé : Stratégie de gestion d'énergie dans un
système multi source

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07.../07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020()*
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Ben la tre che
Prénom : Fares
Matricule : 202053007110
Spécialité et/ou Option : Automatisme industriel
Département : génie électrique
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Stratégie de gestion d'énergie dans un système
multi-source

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07.07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

[Signature]

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-béjaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

*Nos remerciements vont tout premièrement à **Allah** tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données pour réaliser ce travail.*

Nous remercions très vivement Mme « Belaid.S » Professeur à l'université de Bejaia et Mr « Hacini.I » Doctorant pour avoir dirigé ce travail, Pour la confiance et l'intérêt qu'ils nous ont témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.

Tenons également, à exprimer nos remerciements à l'ensemble des membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements vont également à notre mère, notre père et nos chers frères pour tout ce qu'ils ont fait. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour nous offrir les conditions qui nous ont permis de devenir ce que nous sommes. Qu'ils trouvent dans ce travail toute notre reconnaissance.

Pour leur soutien et leurs encouragements, nous remercions également toute notre grande famille.

Un grand merci à nos chers amis pour leur soutien et leurs encouragements. Notre reconnaissance est inexprimable.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mon père qui a tout sacrifié pour m'offrir des conditions d'études
exemplaire.*

*À ma maman qui m'a soutenu et encouragé dans mes détresses et qui
a toujours cru en moi.*

*À mes frères pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements
constants et l'amour fraternel qui m'ont porté tout au long de ce
projet.*

À mes chers amis et tous qui m'ont soutenu.

À celles et ceux qui m'aiment.

B. FARES

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À mon père, pour ses sacrifices et son soutien tout au long de mon
parcours.*

*À ma mère, pour sa patience, son amour et ses encouragements dans
les moments difficiles.*

À mes frères, pour leur présence, leur aide et leur affection.

*À mes amis et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de
loin.*

À tous ceux qui me portent dans leur cœur.

M.SIFO

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Génération d'énergie renouvelable	3
I.3 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie.....	4
I.4 Différentes sources.....	4
I.4.1 Eoliennes.....	4
I.4.2 Géothermie.....	5
I.4.3 Énergie Biomasse.....	5
I.4.4 Hydroélectricité.....	6
I.4.5 Énergie solaire	6
I.5 Définition d'un système hybride.....	7
I.6 Choix du système hybride à étudier	7
I.7 Énergie photovoltaïque	7
I.7.1 Cellule photovoltaïque	8
I.7.2 Catégories de cellules PV.....	8
I.7.3 Panneaux photovoltaïques.....	9
I.7.3.1 Association un groupement des cellules	10
I.7.3.2 Protection des systèmes photovoltaïque.....	11
I.7.3.3 Commande MPPT	12
I.7.4 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque.....	12
I.8 Composants d'une éolienne.....	13
I.8.1 Différents types d'éoliennes.....	14
I.8.1.1 Eoliennes à axe horizontal.....	14
I.8.1.2 Eoliennes à axe vertical.....	15
I.8.2 Zones de fonctionnement de l'éolienne	16
I.8.3 Générateur	17
I.8.4 Avantages et inconvénients des éoliennes	18
I.9 Les convertisseurs statiques	18
I.9.1 Hacheurs	18
I.9.2 Onduleurs	19
I.10 Description des différents types de stockage	19
I.10.1 Batteries	19
I.10.1.1 Types de batteries	19
I.10.1.2 Caractéristiques d'une batterie.....	20

Sommaire

I.10.2 Supercondensateurs.....	20	
I.10.3 Piles à combustible	21	
I.11 Conclusion	21	
Chapitre II Modélisation des composants du système hybride		
II.1 Introduction.....	23	
II.2 Présentation du système proposé pour l'étude.....	23	
II.3 Modélisation du générateur photovoltaïque	23	
II.4 Modélisation de l'éolienne	25	
II.4.1 Modélisation de la vitesse de vent	25	
II.4.2 Modélisation du générateur	26	
II.5 Commande du système.....	30	
II.5.1 Algorithme de Perturbation et Observation P&O	30	
II.5.2 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents.....	31	
II.5.2.1 Calcul du régulateur PI.....	32	
II.6 Modélisation des convertisseurs	32	
II.6.1 Modélisation convertisseurs DC/AC	32	
II.6.2 Modélisation convertisseur DC/DC.....	33	
II.7 Modélisation de la batterie.....	35	
II.8 Modélisation du Bus continu	35	
II.9 Conclusion	36	
Chapitre III Simulation des composants du système		
III.1 Introduction	37	
III.2 Simulation de la chaine de production d'énergie photovoltaïque	37	
III.2.1 Caractéristique d'un module photovoltaïque dans des conditions STC	38	
III.2.1.1 Influence de l'ensoleillement sans MPPT	38	
III.2.1.2 Influence de la température sans MPPT	39	
III.2.2 Commande MPPT	40	
III.2.3 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT ...	40	
III.2.3.1 Influence de l'ensoleillement avec MPPT.....	41	
III.2.3.2 Influence de la température avec MPPT	41	
III.3 Simulation de la chaine de conversion éolienne	44	
III.4 Simulation de la batterie au plomb.....	47	
III.5 Conclusion.....	49	
Chapitre IV Gestion et simulation du système global.....		54
IV.1 Introduction	50	

Sommaire

IV.2 Choix des méthodes de dimensionnement	50
IV.2.1 Méthode du mois le plus défavorable	50
IV.2.2 Méthode de la moyenne mensuelle	50
IV.3 Etapes du dimensionnement suivi dans un projet d'installations	50
IV.3.1 Présentation et situation géographique du projet à réaliser.....	50
IV.3.1.1 Estimation de l'ensoleillement sur le site.....	51
IV.3.2 Analyse de l'énergie consommée et générée	51
IV.3.2.1 Maison.....	51
IV.3.2.2 Station	51
IV.3.2.3 Catégories de bornes de recharge.....	51
IV.3.2.4 Choix de la voiture électrique	52
IV.3.3 Besoin de la charge	53
IV.4 Dimensionnement du système hybride	55
IV.4.1 Dimensionnement de la batterie.....	56
IV.5 Gestion d'énergie du système hybride	57
IV.5.1 Différents scénarios de fonctionnement du système de gestion d'énergie du système globale	57
IV.5.2 Modes de fonctionnement	59
IV.5.3 Algorithme de fonctionnement de la gestion énergétique.....	60
IV.5.4 Organigramme de gestion énergétique.....	61
IV.6 Simulation du système globale	62
IV.6.1 Résultats de la simulation	62
IV.7 Conclusion	66
Conclusion Générale	52
Conclusion Générale	67
Références Bibliographiques.....	71
Références Bibliographique	70
Annexes	71

Liste des Figures

Figure I- 1 Illustration de quelques sources d'énergies renouvelables [3].....	3
Figure I- 2 Statistique d'énergie renouvelable en Algérie [6].....	4
Figure I- 3 Schéma de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité.	5
Figure I- 4 Schéma de principe d'un système géothermique de production d'énergie [10].	5
Figure I- 5 Schéma de fonctionnement d'un système de valorisation énergétique de la biomasse [12].	6
Figure I- 6 Conversions de l'énergie solaire [15].	7
Figure I- 7 Cellule photovoltaïque	8
Figure I- 8 Panneau photovoltaïque	9
Figure I- 9 Association en série de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension	10
Figure I- 10 Association en parallèle de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension	10
Figure I- 11 Association en parallèle de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension	11
Figure I- 12 Protection par diodes en parallèle et Protection par diodes en série	11
Figure I- 13 Comportement électrique du module PV avec MPPT sous un rayonnement solaire : a) uniforme et b) non uniforme (à l'ombre) [22]	12
Figure I- 14 Principaux composants d'une turbine éolienne	13
Figure I- 15 Eoliennes à axe horizontal : (a) bipale, (b) tripale, (c) multiple.....	14
Figure I- 16 L'éolienne « amont » et L'éolienne « aval ».....	14
Figure I- 17 Eoliennes à axe vertical.....	15
Figure I- 18 Schéma des Zones de fonctionnement de l'éolienne vitesse	16
Figure I- 19 éolienne avec un Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil connecté au redresseur	17
Figure I- 20 éolienne avec un Générateur synchrone à aimants permanent connecté au redresseur	17
Figure I- 21 éolienne avec un Générateur Asynchrone à Double Alimentation connecté au redresseur	17
Figure I- 22 Schéma de principe de la pile, dont la batterie reprend le fonctionnement	19
Figure I- 23 Schéma de principe des supercondensateurs.....	20
Figure I- 24 Schéma de principe des piles à combustible	21
 Figure II- 1 Système hybride globale étudiée	 23
Figure II- 2 Schéma équivalent à une diode.....	24
Figure II- 3 schéma représentatif de la MSAP à modéliser	27
Figure II- 4 Représentations de la MSAP dans le repéré (d, q) de Park	28
Figure II- 5 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	30
Figure II- 6 Boucle de régulation du courant Id, q	31
Figure II- 7 Onduleur de tension triphasé	32
Figure II- 8 Circuit électrique le hacheur boost	33
Figure II- 9 Schéma de base d'un convertisseur Boost.....	34
Figure II- 10 Schéma équivalent de le hacheur K ouvert.....	34
Figure II- 11 Schéma équivalent du hacheur K fermé	34
Figure II- 12 Modèle R-C de batterie	35
Figure II- 13 Schémas du Bus	35

Liste des Figures

Figure III- 1 Schéma bloc du modèle à une diode	37
Figure III- 2 Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module photovoltaïque	38
Figure III- 3 Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module photovoltaïque	38
Figure III- 4 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$	39
Figure III- 5 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$	39
Figure III- 6 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$	39
Figure III- 7 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$	40
Figure III- 8 Schéma de simulation du MPPT	40
Figure III- 9 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T_c=25\text{ °C}$) sur la caractéristique $I_{pv} (V_{pv})$	41
Figure III- 10 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T_c=25\text{ °C}$) sur la caractéristique $P_{pv} (V_{pv})$	41
Figure III- 11 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constant ($G=1000\text{ W/m}^2$) sur la caractéristique $I_{pv} (V_{pv})$	41
Figure III- 12 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constant ($G=1000\text{ W/m}^2$) sur la caractéristique $P_{pv} (V_{pv})$	42
Figure III- 13 Schéma bloc Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque	42
Figure III- 14 Courbe de courant P&O	43
Figure III- 15 Courbe de tension P&O	43
Figure III- 16 Courbe de puissance P&O	43
Figure III- 17 Variation de l'éclairement et de la température	43
Figure III- 18 Allure de la puissance photovoltaïque	44
Figure III- 19 Schéma Bloc du système éolien	45
Figure III- 20 Profil du vent admissible par la turbine	45
Figure III- 21 Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence	45
Figure III- 22 Puissance de l'éolienne	46
Figure III- 23 Courant I_d et courant de référence I_{dref} de l'éolienne	46
Figure III- 24 Courant I_q et courant de référence I_{qref} de l'éolienne	46
Figure III- 25 Allures des courants I_{abc}	47
Figure III- 26 Schéma de simulation d'une batterie	47
Figure III- 27 Allure de Courant de la batterie	48
Figure III- 28 Allure d'Etat de charge de la batterie	48
Figure III- 29 Allure de tension de la batterie	48
Figure IV- 3 Détail de recharge CHAdeMO : A) prise mobile, B) socle de recharge	52
Figure IV- 3 Voiture électrique : Smart EQ Fortwo	53
Figure IV- 4 Voiture hybride Peugeot 3008 hybride	Error! Bookmark not defined.
Figure IV- 6 Scénarios de fonctionnement du système hybride	Error! Bookmark not defined.
La Figure IV- 7 montre d'une manière claire le processus complet de gestion de la puissance.	61
Figure IV- 7 Organigramme de gestion de puissance	61
Figure IV- 8 Schéma bloc Matlab du système global	62
Figure IV- 9 Profil de puissance demandée par la station	62
Figure IV- 10 Profil de puissance demandée par la maison	63

Liste des Figures

Figure IV- 11 Profile de l'ensoleillement	63
Figure IV- 12 puissance photovoltaïque dans une journée	64
Figure IV- 13 Profile de Vitesse du vent.....	64
Figure IV- 14 puissance éolienne produite	64
Figure IV- 15 Etat de charge des batteries	65
Figure IV- 16 Evolution des puissances pendant une journée	65

Liste des Tableaux

Tableau I- 1 Les différents types de sources d'énergies renouvelables [7].	4
Tableau I- 2 Avantages et inconvénients des systèmes solaires photovoltaïques [23].	12
Tableau I- 3 Les constituants d'une éolienne [24].	13
Tableau I- 4 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale [24].....	15
Tableau I- 5 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical [24].....	15
Tableau IV- 1 Consommation moyenne journalière.....	53
Tableau IV- 2 Valeurs des énergies mensuelles produites par : le générateur PV (E _{pv}), le générateur éolien (E _{éol}).....	55
Tableau IV- 3 Scénarios de combinaisons PV/éolien.....	Error! Bookmark not defined.
Tableau IV- 4 Représentant les différents modes de fonctionnement.....	61

Nomenclature

- N_s : nombre des cellules en série.
- V_{co} : somme des tensions en série.
- I_{cc} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.
- N_p : nombre des cellules en parallèle
- V_{cop} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle
- I_{pv} : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A]
- I_{ccp} : somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle
- I_{ppm} : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum (I_{opt})
- V_{ppm} : Tension au point de puissance maximale, appelée aussi tension optimale (I_{opt})
- I_{CC} : Courant en court-circuit
- V_{oc} : Tension en circuit ouvert
- G_{stc} Et G : Représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- T_{stc} Et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- ΔT_c : Représente la variation de la température.
- ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
- α_{cc} : Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).
- β_{oc} : Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).
- Ω_t : vitesse de la turbine éolienne [rad/s].
- R_t : Rayon de la turbine éolienne [m].
- P_t : Puissance de la turbine éolienne.
- ρ : Densité d'air [Kg/m^3].
- S : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle [m^2].
- V_v : Vitesse du vent [m/s].

Nomenclature

- C_p : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ
- J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine
- f : Coefficient de frottement dynamique
- L_{ss} : Matrice des inductances statoriques
- L_{s0} : Matrice des inductances statoriques
- φ_f : Flux des aimants permanents.
- L_d Et L_q : Inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ
- $T_e = \frac{K_p}{K_i}$: constante de temps électrique
- G_o : Le gain statique
- S_a, S_b, S_c : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur
- C_{bat} : La capacité (Ah) nominale de la batterie
- Qd : La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}
- I_{eol} : Courant fourni par le système éolien [A]
- I_c : Courant qui traverse la capacité [A]
- I_{hyb} : Courant produit par le système hybride éolien [A]
- I_s : Courant de délestage [A]
- I_{bat} : Courant de la batterie [A]
- P_{di} : Puissance requise qui devra passer par les convertisseurs statiques pour chaque composant.
- $E_{véht}$: Énergie totale de la station de charge des véhicules électrique.
- t_i : Durée d'utilisation.
- $E_{pv,m}$: Energie produite par le PV au cours du mois.
- $I_{rr,m}$: Irradiation au cours du mois.
- η_{pv} : Rendement de PV (10%).
- $E_{éol,m}$: Energie produite par l'éolienne au cours du mois.
- $C_{batt,T}$: Capacité des batteries totale (Ah).
- N_{jmax} : Nombre de jours maximal.
- U_b : Tension de batterie (V).
- PDD : La profondeur maximale de décharge de la batterie.
- η_b : Le rendement de batterie 90%.



Introduction Générale

Introduction générale

Selon l'Agence internationale de l'énergie pour rester alignés sur le scénario « Net Zéro » à l'horizon 2050, les ajouts annuels de capacité renouvelable devront atteindre en moyenne 305 GW entre 2021 et 2026 (soit une accélération de près de 60 % par rapport aux cinq années précédentes) et bénéficier d'un soutien politique soutenu dans plus de 130 pays [1].

Les énergies renouvelables véritables piliers du décarbonisation sont aujourd'hui essentielles pour remplacer les combustibles fossiles et assurer une transition fluide vers la neutralité carbone [1].

L'utilisation du système photovoltaïque seul peut ne pas suffire à couvrir les besoins en énergie en raison des variations des conditions climatiques tout au long de l'année et de son inactivité la nuit. Pour garantir le fonctionnement du système tout au long de l'année et pour répondre aux besoins des consommateurs nous étudions l'utilisation d'un système hybride combinant l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, cette dernière étant considérée comme complémentaire à la première.

L'objectif primordial de ce travail est de modéliser et simuler un système hybride de production d'énergie renouvelable qui combine l'énergie solaire et éolienne. Il vise à assurer une gestion intelligente de l'énergie en tenant compte des variations climatiques, de la demande en consommation et des capacités de stockage. les stratégies de gestion perfectionnées et étudie l'intégration de convertisseurs de puissance et de batteries pour assurer un équilibre stable et performant entre la production, le stockage et la distribution d'énergie. Ce travail s'aligne parfaitement avec les défis contemporains de la transition énergétique et de l'élaboration de solutions durables.

Afin de réaliser cet objectif nous avons élaboré un modèle simple et sûr qui offre une précision adéquate pour évaluer les performances d'un système hybride photovoltaïque-éolien et de batteries de stockage. Ainsi, après avoir exploré les divers concepts et méthodes liés à ces éléments, la représentation et la simulation de chaque composant du système solaire et éolien sont exposées.

Pour cela, notre travail sera structuré comme suit :

- **Premier chapitre :** dans ce chapitre nous avons présenté les bases des énergies renouvelables où nous avons approfondi davantage dans l'énergie photovoltaïque et éolienne, ainsi que le système hybride en particulier le photovoltaïque (PV) et l'éolien, les convertisseurs et le stockage pour comprendre et concevoir des systèmes énergétiques durables et fiables.

Introduction Générale

- **Deuxième chapitre :** est consacré à la modélisation des composants du système hybride éolien-photovoltaïque, les convertisseurs et les batteries, afin de simuler se système plus tard.
- **Troisième chapitre :** Ce chapitre analyse la simulation des systèmes photovoltaïques et éoliens et l'impact des conditions météo sur la production d'énergie et le rôle de MPPT sur l'optimisation de production d'énergie, Afin de mieux comprendre et optimiser la production d'énergie.
- **Dernier chapitre :** Ce chapitre porte sur le dimensionnement et la gestion de l'énergie d'une source hybride (PV + éolien) et se termine par une simulation globale visant à équilibrer la production, le stockage et la consommation.

Finalement, ce travail est terminé par conclusion générale.

A decorative blue line frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in small loops.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes
d'énergies hybrides

I.1 Introduction

Ce chapitre examine les principes de base de la production d'énergie renouvelable en se focalisant sur les sources primordiales telles que l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne par le biais d'une analyse détaillée de leur fonctionnement et de leur potentiel pour offrir une production plus stable, optimisée et avancée. Pour finir nous introduisons les convertisseurs statiques qui sont essentiels pour la transformation et la régulation de l'énergie et même le système de stockage qui est indispensables pour assurer la constance et la fiabilité de l'approvisionnement énergétique. Ces 3 unités servent donc de fondement crucial pour la compréhension et l'élaboration de systèmes énergétiques actuels, durables et intelligents.

I.2 Génération d'énergie renouvelable

La population mondiale en 2011 est de 7 milliards d'habitants et devrait atteindre 9 milliards en 2050 selon les projections de l'ONU. Cette croissance démographique s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'énergie. Parallèlement, le développement rapide des pays industrialisés et émergents a fait bondir la demande énergétique au cours des dix dernières années, ce qui pousse les chercheurs et les responsables à la mise en place de mesures contraignantes [2].

Contrairement aux énergies fossiles telles que le pétrole ou l'uranium qui peuvent être extraites, stockées et transportées sur de vastes distances l'exploitation des sources renouvelables dépend directement de leur emplacement. Seule la biomasse échappe en partie à cette contrainte : elle peut être récoltée, stockée et acheminée offrant une flexibilité comparable à celle des combustibles classiques. Par ailleurs, l'intermittence des renouvelables dont la disponibilité varie selon les heures et les saisons constitue un frein majeur à leur déploiement. Pour compenser cette variabilité il est pertinent de diversifier les filières et de les coupler par exemple en associant l'énergie solaire à l'éolien.

La Figure (I-1) résume de façon claire les différentes sources d'énergie renouvelable.

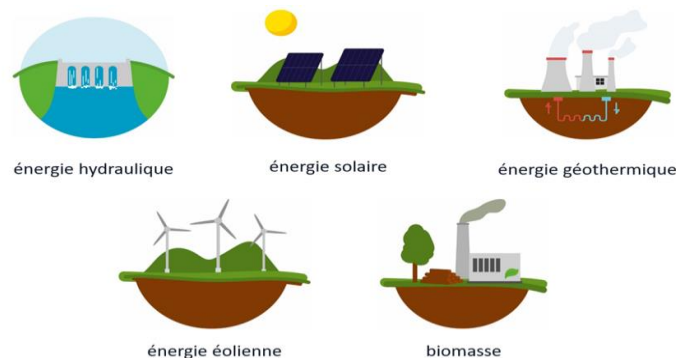


Figure I- 1 Illustration de quelques sources d'énergies renouvelables [3].

I.3 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie

Avec une capacité de production déjà supérieure à 600 MW, l'Algérie s'est engagée dans une stratégie ambitieuse visant à porter la part des énergies renouvelables à au moins 30 % de son mix énergétique d'ici 2035 elle s'impose ainsi comme le plus grand pays producteur d'énergie renouvelable en Afrique du Nord où elle mise sur ce secteur prometteur comme un pilier central de sa politique énergétique et environnementale [4] [5].

La figure ci-dessous montre la part des énergies renouvelables en Algérie.

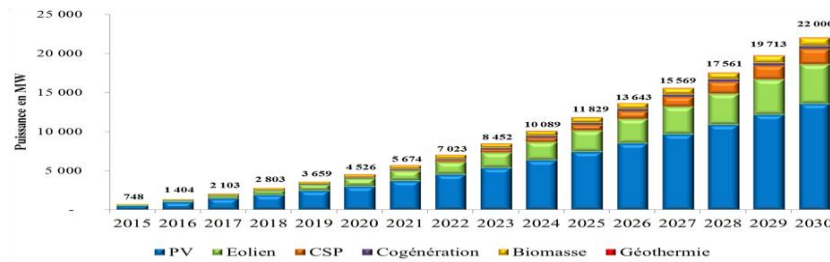


Figure I- 2 Statistique d'énergie renouvelable en Algérie [6]

I.4 Différentes sources

Il existe 5 familles d'énergie renouvelable résumée dans le tableau ci-dessous :

Tableau I- 1 Les différents types de sources d'énergies renouvelables [7].

Source d'énergie	Sous-énergie	Production principale
Energie solaire	❖ Photovoltaïque ❖ Thermique	• Électricité • Chaleur
Éolienne	❖ Terrestre ❖ Mer	• Électricité
Biomasse	❖ Déchets ❖ Bioénergie	• Chaleur et électricité • Chauffage
Géothermie		❖ Chaleur
Hydraulique		❖ Électricité

Afin de mieux appréhender leur fonctionnement ainsi que leurs domaines d'application nous allons examiner en détail les spécificités propres à chacune de ces sources d'énergie.

I.4.1 Eoliennes

L'éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité. Un ensemble d'éoliennes sur un même site forme un parc éolien. Exploiter seulement une infime partie de l'énergie

éolienne terrestre pourrait suffire à couvrir les besoins mondiaux. Cependant, cette source reste instable car dépendante du vent et soulève des enjeux d'occupation du sol ainsi que des nuisances sonores et visuelles [8]. La Figure (I- 3) présente de façon simple une éolienne.

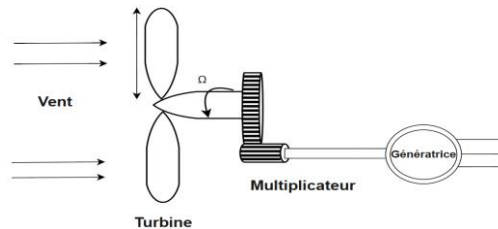


Figure I- 3 Schéma de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité.

I.4.2 Géothermie

L'énergie géothermique exploite la chaleur du sous-sol pour le chauffage notamment via des réseaux de chaleur collectifs permettant des économies significatives en énergie. Malgré son potentiel, ce secteur reste peu développé à l'échelle mondiale. Une forme plus courante est la géothermie de surface utilisant des pompes à chaleur et des capteurs enterrés pour extraire la chaleur du sol et la diffuser dans les bâtiments principalement par un chauffage au sol. Ce système nécessite un fluide frigorigène et de l'électricité qui couvrant environ un tiers des besoins thermiques [9].

Figure (I-4) montre le principe de la géothermie : on injecte de l'eau froide dans un puits après elle se réchauffe à grande profondeur puis on récupère la vapeur produite pour faire tourner une turbine et générer de l'électricité.

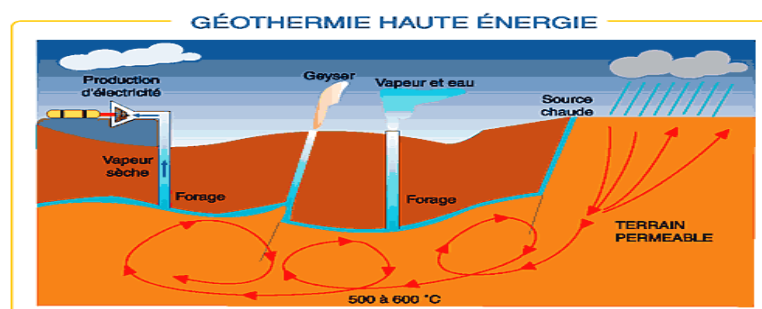


Figure I- 4 Schéma de principe d'un système géothermique de production d'énergie [10].

I.4.3 Énergie Biomasse

Cette énergie est issue soit de la combustion de matières organiques d'origine végétale, animale, fongique ou soit de leur méthanisation produisant du biogaz ou encore de transformations chimiques plus récentes et même également être générée à partir de déchets [11].

La Figure (I- 5) montre le cycle de la biomasse : de la combustion jusqu'à la production de chaleur et d'électricité.

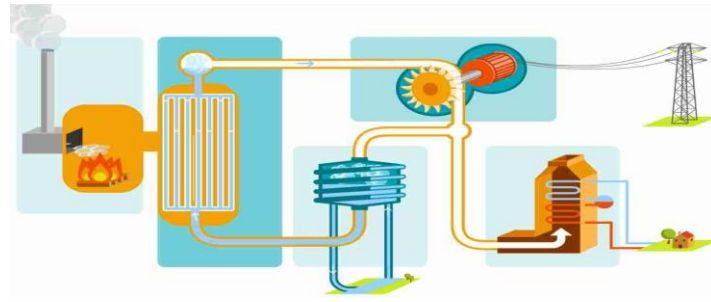


Figure I- 5 Schéma de fonctionnement d'un système de valorisation énergétique de la biomasse [12]

I.4.4 Hydroélectricité

L'exploitation de l'énergie des océans et des cours d'eau offre plusieurs solutions innovantes, encore en développement pour la plupart.

Premièrement : les usines marémotrices utilisent l'énergie des marées : le flux et le reflux de l'eau de mer font tourner des turbines lors de leur passage. Bien que cette technologie soit éprouvée mais nécessite des infrastructures lourdes implantées dans des estuaires ou des baies ce qui limite fortement son déploiement (seules trois usines marémotrices existent actuellement dans le monde).

Deuxièmement : les houlogénérateurs exploitent l'énergie des vagues générée par le vent soufflant à la surface des océans et la plus répandue consiste à placer à la surface de l'eau un flotteur de formes variées contenant un générateur activé par le mouvement de la houle.

Troisièmement : les barrages hydrauliques permettent de capter l'énergie potentielle des cours d'eau. Bien que largement utilisés mais ils impliquent des investissements importants et ont souvent un impact environnemental conséquent notamment sur les écosystèmes fluviaux.

En revanche : les hydroliennes apparaissent comme une solution prometteuse car elles fonctionnant sur le même principe qu'une éolienne (convertissent l'énergie cinétique des courants marins en électricité à l'aide d'une turbine) mais la différence est de la nature du fluide diffère (eau au lieu d'air) [13].

I.4.5 Énergie solaire

En une heure la surface terrestre reçoit plus d'énergie solaire que l'humanité n'en consomme en un an, faisant de cette source, la plus abondante sur Terre. Générée par les réactions nucléaires internes du Soleil [14]. Elle se propage sous forme de photons et

convertis en électricité par l'effet photovoltaïque ou en chaleur via des capteurs thermiques

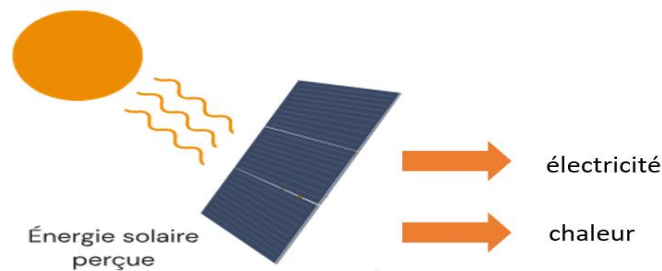


Figure I- 6 Conversions de l'énergie solaire [15].

I.5 Définition d'un système hybride

Un système hybride est une solution énergétique qui combine plusieurs sources d'énergie ou technologies de conversion afin d'assurer une alimentation électrique plus fiable, plus efficace et continue tout en réduisant l'impact environnemental grâce à la connexion de sources d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque et l'éolien à des sources conventionnelles ou à des systèmes de stockage permettant de compenser l'intermittence des ressources renouvelables [16].

En réalité, un système hybride est généralement composé de batteries et de sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque et éolienne) et le tout étant géré par un système intelligent de gestion et de stockage de l'énergie.

I.6 Choix du système hybride à étudier

Parmi les différentes configurations possibles : la combinaison de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne avec un système de stockage se distingue comme l'option la plus efficace. Cette architecture hybride présente de nombreux avantages notamment un bon rendement global, des coûts relativement abordables, une disponibilité abondante des ressources, ainsi qu'une complémentarité temporelle naturelle entre le solaire et l'éolien [17]. Dans le cadre de notre étude ces avantages justifient le choix de cette configuration.

I.7 Énergie photovoltaïque

L'effet photovoltaïque correspond à la conversion directe de la lumière en électricité sous forme de courant continu (CC) Il repose sur l'interaction entre les photons incidents (flux lumineux) et les électrons (libres ou de valence) auxquels ils transmettent une énergie $h\nu$. Lorsque cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap ($h\nu$) du semi-conducteur un électron peut quitter la bande de valence pour rejoindre la bande de conduction créant ainsi une

paire électron-trou au niveau de la jonction il est manifeste à différents points du matériau et le rendement du procédé est influencé par deux paramètres clés : l'ensoleillement qui exprime l'énergie solaire reçue par unité de surface sur une période donnée (j/m^2) et l'irradiation solaire qui représente la puissance instantanée du rayonnement solaire (W/m^2) [18].

I.7.1 Cellule photovoltaïque

Un panneau solaire résulte de l'assemblage de plusieurs modules photovoltaïques eux-mêmes composés de nombreuses cellules reliées en série et en parallèle pour atteindre des puissances plus élevées. Chaque cellule convertit la lumière en courant continu via l'effet photovoltaïque : elle est constituée d'une jonction PN formée par deux couches de silicium l'une dopée au bore (P) et l'autre au phosphore (N). Lorsqu'un photon est absorbé son énergie libère un électron de la bande de valence créant une paire électron-trou et générant une tension entre les deux couches peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. La technologie employée et les méthodes de fabrication et même les matériaux choisis déterminent le rendement final du panneau photovoltaïque [19].

La Figure (I-7) montre la structure d'une cellule photovoltaïque mettant en évidence ses couches semi-conductrices et le processus de conversion de l'énergie solaire en courant continu.

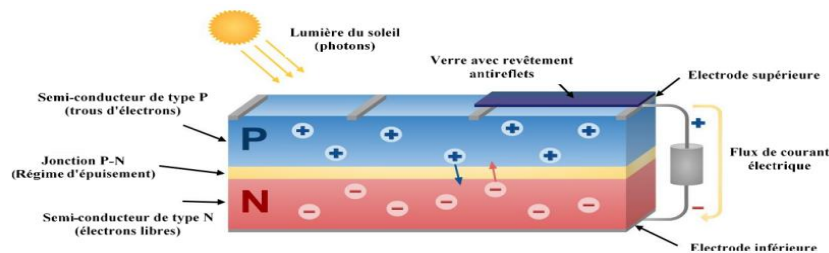


Figure I- 7 Cellule photovoltaïque [19]

I.7.2 Catégories de cellules PV

Matériau de prédilection de l'industrie photovoltaïque est le silicium (Si) il extrait du sable sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) puis purifié à plus de 99,99 %. On distingue quatre grandes catégories de cellules photovoltaïques à base de silicium [20] :

A. Silicium monocristallin

Produit à partir d'un unique cristal de silicium ultra pur il est étiré pour former un unique lingot puis découpé en fines tranches à coins arrondis et d'aspect noir

uniforme. Il offre les meilleurs rendements (15–20 %) mais supporte des coûts de production élevés.

B. Silicium poly cristallin

Obtenu en fondant du silicium pur puis en le laissant cristalliser sous forme de multiples grains, ce silicium bleu aux reflets fragmentés est moins cher à produire que le monocristallin avec des rendements de l'ordre de 10–14 %.

C. Ruban de silicium

Fabriquée par étirage direct d'un mince ruban de silicium à partir du bain de fusion, pour supprimer les étapes de découpe et réduire les coûts. Le ruban gris-bleu plus irrégulier en surface affiche toutefois un rendement modeste autour de 13 %.

D. Silicium amorphe (couche mince)

Dépôt d'une fine couche désordonnée de silicium sur divers supports (verre, plastique, métal). Cette technologie évite la cristallisation et la découpe mais permet de faire des panneaux légers et flexibles. Malgré un rendement plus faible ($\approx 10\%$) il bénéficie d'une excellente tolérance à la chaleur et peut voir son efficacité améliorée par des structures à jonctions multiples.

I.7.3 Panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont fabriqués à partir des modules PV qui connectés en série et/ou en parallèle, eux-mêmes sont constitués de plusieurs cellules solaires. La combinaison des modules PV détermine la puissance délivrée par le panneau PV.

La Figure (I-8) montre la hiérarchie d'un système photovoltaïque : plusieurs cellules forment un module, plusieurs modules composent un panneau et plusieurs panneaux forment un champ solaire.

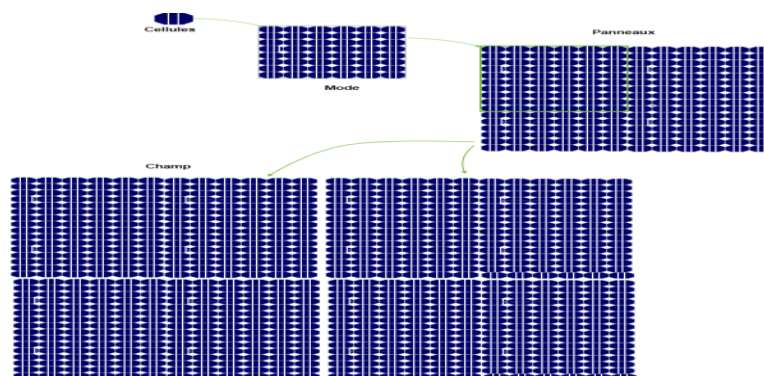


Figure I- 8 Panneau photovoltaïque

I.7.3.1 Association un groupement des cellules

A. Mise en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions comme montre la Figure ci-dessous.

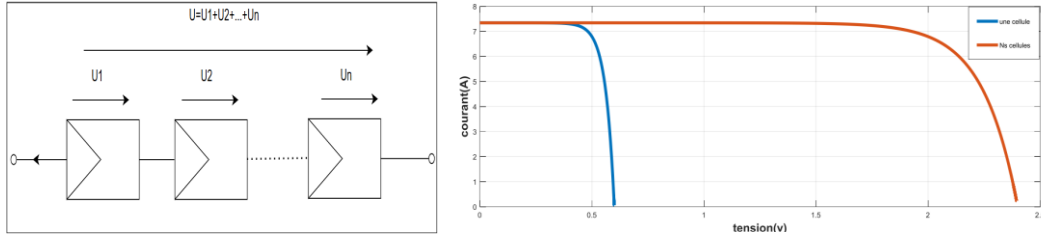


Figure I- 9 Association en série de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension

$$V_{cos} = N_s \times V_{co} \quad (I. 1)$$

$$I_{ccs} = I_{cc} \quad (I. 2)$$

Avec :

- N_s : nombre des cellules en série.
- V_{co} : somme des tensions en série.
- I_{cc} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

B. Mise en parallèle

Lorsque plusieurs cellules sont branchées en parallèle elles partagent la même tension tandis que leurs courants s'additionnent. La caractéristique globale se construit donc en sommant les intensités voir la Figure (I-10).

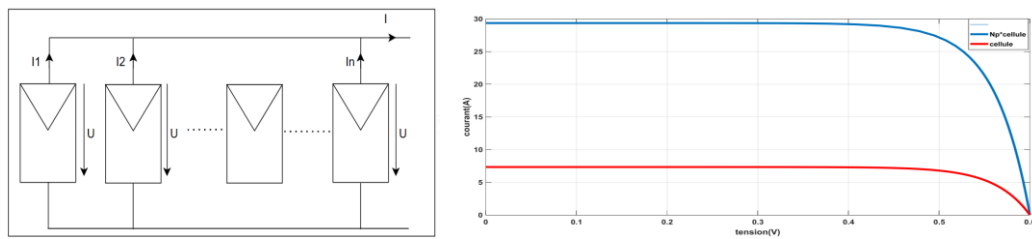


Figure I- 10 Association en parallèle de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension

$$I_{ccp} = N_p \times I_{cc} \quad (I. 3)$$

$$V_{co} = V_{cop} \quad (I. 4)$$

- N_p : nombre des cellules en parallèle
- V_{cop} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle
- I_{ccp} : somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle

C. Mise en série-parallel

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension voir la Figure (I-11).

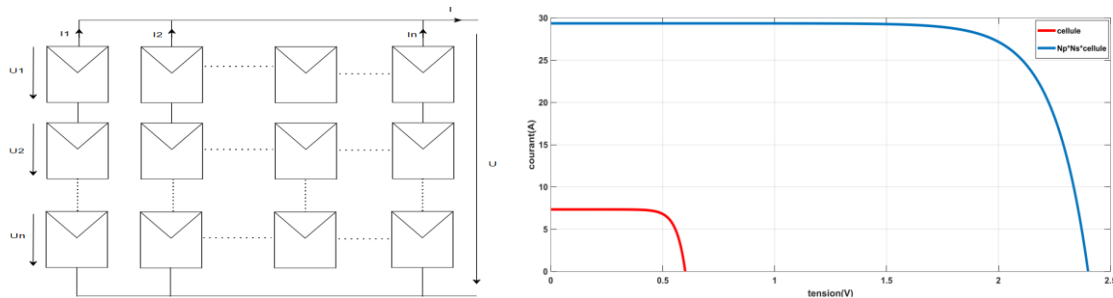


Figure I- 11 Association en parallèle de cellule photovoltaïque et sa caractéristique courant-tension

I.7.3.2 Protection des systèmes photovoltaïque

Pour protéger les cellules et les modules contre les chocs électriques on va protéger par des diodes [21].

➤ Diodes en série ou diode anti retour

Chaque série de modules intègre une diode placée en série pour les mettre à l'abri des surtensions et éviter que la batterie ne se décharge la nuit via les photopiles.

➤ Diodes en parallèles

Dans un couplage en série, tout module privé de production (suite à un masquage ou une défaillance) doit être protégé pour éviter qu'il ne se comporte en récepteur et ne soit endommagé de façon irréversible. Pour cela, on installe une diode de dérivation en parallèle sur chaque module qui dévie le courant issu des autres modules de la chaîne.

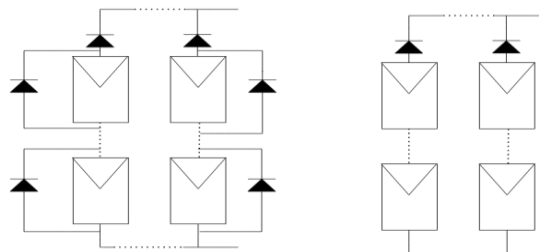


Figure I- 12 Protection par diodes en parallèle et Protection par diodes en série

➤ Protection contre la surtension et la foudre

Exposés aux effets directs et indirects de la foudre ainsi qu'aux surtensions générées par couplages capacitifs ou inductifs les modules photovoltaïques requièrent une protection

soigneusement coordonnée contre ces deux menaces. Un dispositif de protection destiné à un champ PV intègre généralement :

- ❖ Un système de protection extérieure contre la foudre (SPF)
- ❖ Une installation de mise à terre avec équilibrage des potentiels
- ❖ Un blindage magnétique adapté et un câblage optimisé
- ❖ Un dispositif de protection contre les surtensions (SPD) dimensionné et coordonné.

I.7. 3.3 Commande MPPT

Le MPPT ajuste automatiquement le rapport cyclique du MPPT pour maximiser en permanence la puissance délivrée par le panneau PV quelles que soient les conditions météorologiques et la charge. Sous un ensoleillement homogène, un unique maximum global (GMPP) apparaît sur la courbe P–V mais en cas d'ombrage partiel plusieurs maxima locaux (LMPP) peuvent surgir [19] comme montre la Figure (I-13).

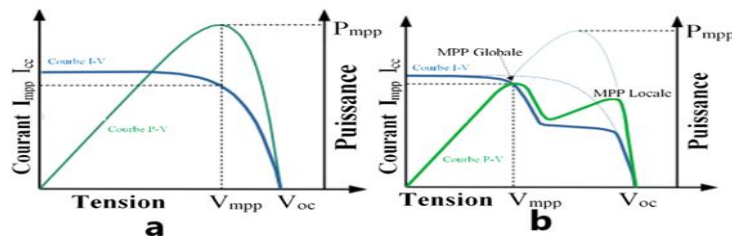


Figure I- 13 Comportement électrique du module PV avec MPPT sous un rayonnement solaire : a) uniforme et b) non uniforme (à l'ombre) [22]

I.7.4 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque

Le Tableau (I-2) expose les avantages et les inconvénients majeurs de l'énergie solaire photovoltaïque.

Tableau I- 2 Avantages et inconvénients des systèmes solaires photovoltaïques [23].

Avantages	Inconvénients
Système fiable et source d'énergie gratuite.	Grande surface nécessaire à l'installation.
Production d'énergie au plus près du consommateur	Nécessité d'un système de stockage
Faible coût d'exploitation et de maintenance et faible impact sur l'environnement.	La fabrication des cellules photovoltaïques relève de la haute technologie.
Énergie propre, sans pollution et sans bruit	Dépend des conditions météorologiques.
Hautement disponible.	Coût initial élevé
Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité	Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %

I.8 Composants d'une éolienne

La Figure (I- 14) montre que Lorsque le vent fait tourner les trois pales à pas variable (17) solidaires du moyeu du rotor à trois pales (16) le couple est transmis via l'arbre lent (15) à l'accouplement à basse fréquence de rotation (14) puis au multiplicateur de vitesse (13) ; l'arbre rapide qui en résulte passe par l'accouplement à haute fréquence de rotation (11) avant d'entraîner l'alternateur (10) qui est protégé par un frein à disque (12), tandis que la chaîne mécanique repose sur le pignon d'entraînement de la nacelle (3) engrenant la roue dentée liée à la tour (4) montée sur la tour (2) et la fondation (1). L'orientation de la nacelle (6) est pilotée par le moteur d'orientation (5) sous la supervision de l'unité centrale (7) qui ajuste l'azimut en fonction des signaux de la girouette (8) et de l'anémomètre (9) et la production électrique est finalement injectée vers le réseau (18) avec le soutien du système de régulation du pas des pales (19) et du groupe hydraulique (20).

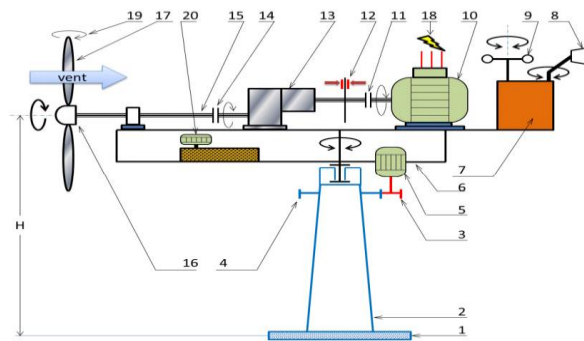


Figure I- 14 Principaux composants d'une turbine éolienne [24].

Le Tableau (I- 3) présente chaque composant avec sa désignation technique correspondante.

Tableau I- 3 Les constituants d'une éolienne [24].

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	L'alternateur	20	Groupe hydraulique

I.8.1 Différents types d'éoliennes

On distingue plusieurs configurations d'éoliennes à choisir en fonction de la puissance visée, de la plage de vitesses de vent et des dimensions requises. Deux grandes architectures se révèlent principales [24] :

I.8.1.1 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal alignent leur axe de rotation parallèlement au sol et face au vent. Elles se composent d'un rotor à pales, d'un moyeu, d'une nacelle abritant la génératrice et un multiplicateur de vitesse si est nécessaire. Le nombre de pales influence le compromis poids-stabilité : les tripales, largement plébiscitées pour les fortes puissances offrent un bon équilibre entre légèreté de la nacelle et fluidité de rotation tandis que les bipales ou multi-pales plus légères ou spécialisées présentent des avantages et inconvénients propres [25]. voir la Figure (I-15).

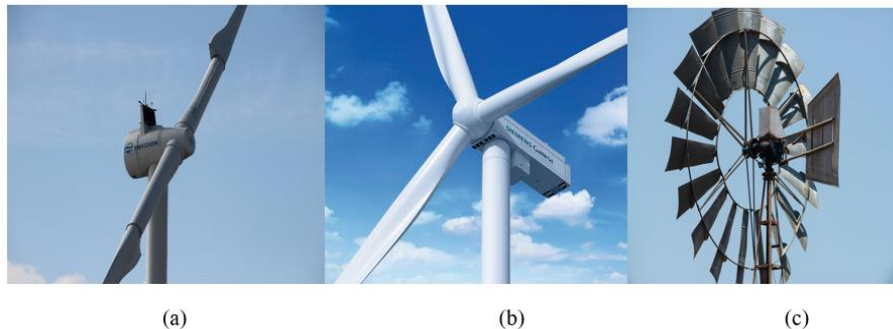


Figure I- 15 Eoliennes à axe horizontal : (a) bipale, (b) tripale, (c) multiple [25].

La figure ci-dessous montre la différence de configuration entre deux types d'éoliennes :

- ❖ Éoliennes en amont : le vent frappe d'abord les pales avant la nacelle ce qui offre une meilleure captation mais impose un système d'orientation actif.
- ❖ Éoliennes en aval : les pales sont situées derrière la nacelle ce qui simplifie l'alignement au vent mais génère plus de turbulences et de contraintes mécaniques.

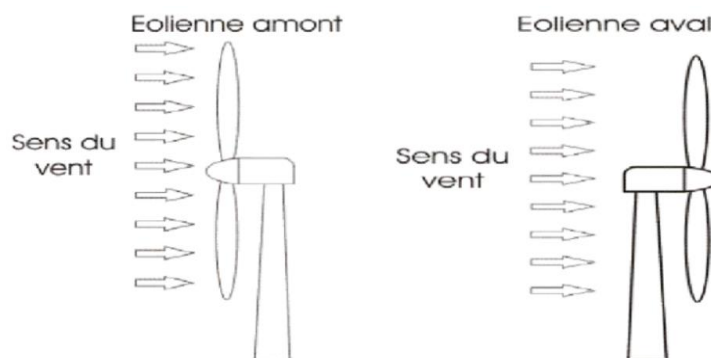


Figure I- 16 L'éolienne « amont » et L'éolienne « aval » [24].

Le Tableau (I-4) présente les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal.

Tableau I- 4 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale [24]

Avantage	Inconvénients
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Cout de construction très élevé
Cette structure capte le vent en hauteur donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage de sol.	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident
Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.	

I.8.1.2 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical disposent d'un axe de rotation perpendiculaire au sol ce qui leur permet de capter le vent quelle que soit sa direction sans mécanismes d'orientation. Le générateur et la boîte de vitesses installés près du sol sont ainsi plus accessibles pour la maintenance. Adaptées aux milieux urbains et aux vents turbulents ou changeants elles présentent toutefois un rendement généralement inférieur à celui des modèles à axe horizontal voir la Figure (I-17) [26].



Figure I- 17 Eoliennes à axe vertical [26].

Le Tableau (I-5) présente les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical.

Tableau I- 5 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical [24]

Avantage	Inconvénients
La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec

que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.	un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
Sa conception est simple, robuste et nécessaire peu d'entretien.	Leurs implantations au sol exigent l'utilisation des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

I.8.2 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Un histogramme représentant la fréquence des vents provenant de cette direction en fonction de leur vitesse peut être tracé pour chaque secteur d'une rose des vents.

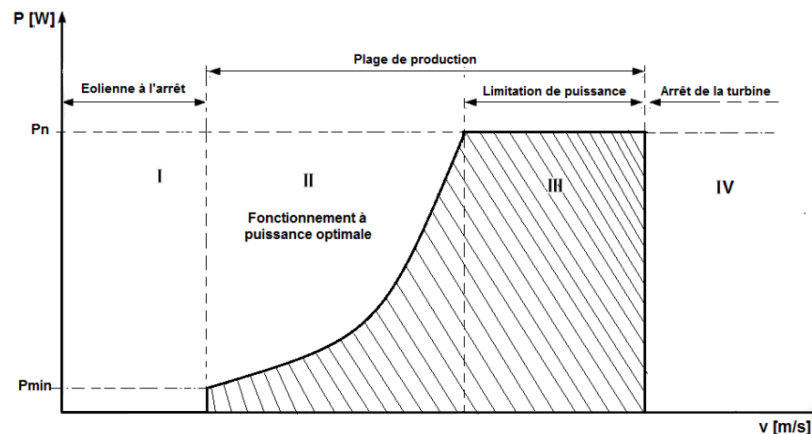


Figure I- 18 Schéma des Zones de fonctionnement de l'éolienne vitesse [27].

La relation entre la puissance délivrée par une turbine et la vitesse du vent est représentée par une courbe de puissance théorique spécifique à chaque éolienne. Son fonctionnement se divise en quatre zones distinctes comme montre précédente Figure (I-18).

- On remarque à partir de la Figure (I- 18) que e lorsque la vitesse du vent est trop faible la turbine peut tourner mais sans produire d'énergie.
- Dans la deuxième zone, à chaque fois la vitesse du vent augment la puissance fournie augment et vice versa (dans ce cas le rôle du MPPT apparait). Ensuite elle augmente brusquement jusqu'à une certaine valeur de la vitesse, dite nominale.
- Dans la troisième zone la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale afin stabiliser la puissance produite même si la vitesse du vent continue d'augmenter cela est dû à son inclinaison à un angle de β pour le protéger de la vitesse du vent.
- Lors la vitesse du vent est trop violente et dépasse la vitesse maximale admissible cela entraine l'arrêt systématique de la turbine pour éviter tout risque de dégradation ou de casse.

I.8.3 Générateur

Il existe trois types de générateur qui sont utilisées dans l'éolienne :

- ❖ **Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil** : Les machines asynchrones à cage d'écureuil allient simplicité de conception et coût réduit. Elles offrent une fiabilité élevée avec un taux de défaillance très faible et réclament un entretien minimal [v]. Ce générateur peut fonctionner à vitesse variable grâce à des convertisseurs de puissance adéquats et peut fonctionner sur une vaste gamme de vitesse du vent [28]

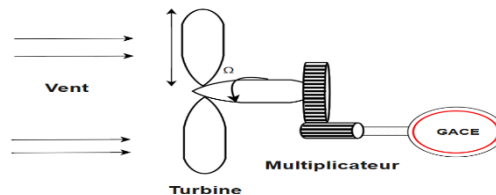


Figure I- 19 éolienne avec un Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

- ❖ **Générateur synchrone à aimants permanents** : La tendance actuelle est d'employer le générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) (sans multiplicateur). Son principal crucial est l'absence d'alimentation rotorique et la possibilité d'un grand nombre de pôles ce qui générant du 50 Hz même à basse vitesse de vent. Ses inconvénients majeurs demeurent son coût élevé et sa conception plus complexe [28].

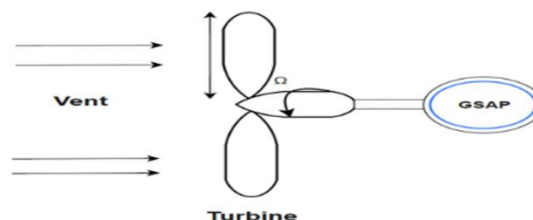


Figure I- 20 éolienne avec un Générateur synchrone à aimants permanent

- ❖ **Générateur Asynchrone à Double Alimentation** : combine un stator relié directement au réseau AC et un rotor commandé par un convertisseur de fréquence. Cette topologie montre dans la Figure (I.21) offre une grande plage de fonctionnement en vitesse de vent.

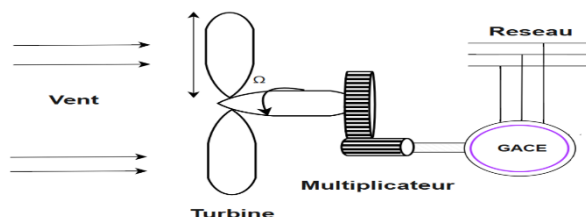


Figure I- 21 éolienne avec un Générateur Asynchrone à Double Alimentation

Dans notre étude, nous utiliserons le générateur synchrone à aimants permanents qui ne nécessite pas d'excitation rotorique et grâce à son grand nombre de pôles il fournit directement du 50 Hz même à faible vitesse de vent ce qui est considéré comme un point important dans notre étude.

I.8.4 Avantages et inconvénients des éoliennes

➤ Avantages

- ❖ Ressource inépuisable et propre.
- ❖ Impact environnemental négligeable.
- ❖ Corrélation saisonnière avantageuse (vents hivernaux, plus fréquents, coïncident avec les pics de consommation électrique).
- ❖ Empreinte foncière réduite : un parc couvre au maximum 2 % du terrain, laissant libre usage agricole, pastoral ou récréatif sur le reste, et générant des revenus locatifs pour les propriétaires.
- ❖ Attrait touristique [29].

➤ Inconvénients

- ❖ Intermittence intrinsèque.
- ❖ Délais de développement importants : l'implantation d'un parc requiert de longues études de site, de nombreuses démarches administratives et le respect de multiples réglementations restreignant fortement les emplacements possibles.
- ❖ Pollution sonore : une éolienne peut émettre plus de 50 dB (proche du seuil de gêne (60 dB)) et en cas d'exposition prolongée peut perturber le sommeil [29].

I.9 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des circuits intégrant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors, etc.) fonctionnant comme interrupteurs pour modifier les caractéristiques du signal (amplitude, fréquence, phase) et ainsi adapter la source électrique à la charge [30].

I.9.1 Hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs DC-DC qui permet de modifier la tension de sortie selon le rapport cyclique α du commutateur [30].

- ❖ Modèles unidirectionnels (Buck/Boost) : permet d'abaisser ou d'élever la tension à l'aide d'une inductance, d'un interrupteur, d'une diode et d'un condensateur.

- ❖ Modèle bidirectionnelles (2 ou 4 quadrants) : permettent d'inverser le sens du courant et/ou de la tension, le Buck-Boost combinant abaissement, élévation et inversion de polarité.

I.9.2 Onduleurs

L'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif. On le qualifie d'onduleur de tension s'il est alimenté par une source CC de tension (car il impose la forme d'onde de la tension) et d'onduleur de courant s'il provient d'une source CC de courant (puisqu'il détermine la forme d'onde du courant) [31].

I.10 Description des différents types de stockage

Il est essentiel d'avoir des unités de stockage de la taille requise sur un site éloigné pour conserver l'excédent de production et le réinjecter lors des périodes de faible demande afin d'assurer l'indépendance et la stabilité énergétique constante du système. Sans un réseau externe pour pallier la différence inévitable entre production et consommation à un moment précis, le stockage s'impose.

I.10.1 Batteries

Une batterie ou accumulateur électrochimique stocke l'énergie électrique sous forme chimique lors de la charge puis la restitue sous forme électrique durant la décharge et tout ça repose sur les transformations chimiques de l'électrolyte [32].

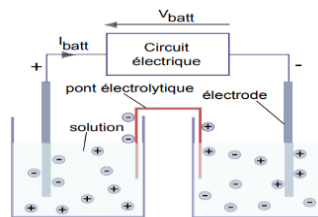


Figure I- 22 Schéma de principe de la pile, dont la batterie reprend le fonctionnement [32].

I.10.1.1 Types de batteries

Quatre grandes familles de batteries équipent les systèmes hybride en fonctionnement autonomes chacune offrant un compromis spécifique entre performances, coût et durabilité [32]

- ❖ **Lithium-ion** : leader en densité énergétique et faible autodécharge et délivrent les meilleures performances mais restent plus chère.
- ❖ **Plomb-gélifié** : l'électrolyte est épaissi par du gel ou de l'acide phosphorique pour renforcer la longévité en cycles profonds.

- ❖ **NiCd & NiMH (alcalines)** : très robustes et tolérantes aux basses températures mais plus coûteuses et posent un défi de recyclage en raison du cadmium.
- ❖ **Acide-plomb classique** : solution la plus économique mais sensible aux mauvais usages et souvent moins durable que le reste du système hybride.

I.10.1.2 Caractéristiques d'une batterie

❖ Capacité en Ampère heure

Parmi les principaux paramètres définissant les performances d'une batterie, on distingue [33] :

- **Capacité (Ah)** : Quantité de charge restituable qui est exprimée en ampères-heures (Ah) et varie selon le courant de charge/décharge et la température.
- **Taux de charge/décharge** : Plus le courant est faible, plus la capacité effective augmente légèrement. Un courant élevé réduit la capacité disponible par effet de perte interne.
- **Température de fonctionnement** : Spécifiée souvent à 27 °C la capacité diminue nettement sous basse température tandis qu'une température plus élevée l'améliore légèrement au prix d'une évaporation d'eau accrue et d'un vieillissement accéléré.
- **Profondeur de décharge (DoD)** : Pourcentage de la capacité totale prélevée à chaque cycle (une DoD élevée peut réduire la longévité de l'accumulateur).

I.10.2 Supercondensateurs

Apparut-il y a une vingtaine d'années comme alternative aux batteries, les super condensateurs ressemblent à des condensateurs à très haute capacité. Ils sont constitués de deux électrodes poreuses (généralement en charbon actif) séparées par un électrolyte, chaque électrode étant reliée à un collecteur d'électrons. Lors de la charge ou de la décharge les électrons transitent d'une électrode à l'autre via le circuit externe tandis que les ions de l'électrolyte viennent former une double couche aux surfaces opposées créant un déséquilibre de potentiel. La capacité maximale est atteinte lorsque l'électrolyte atteint son potentiel de dissociation ce qui nécessite une grande surface spécifique pour accueillir suffisamment d'ions [25].

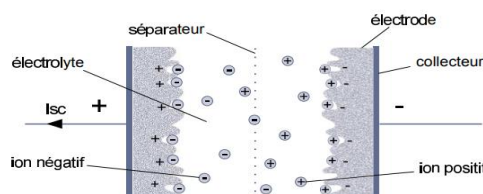


Figure I- 23 Schéma de principe des supercondensateur [25].

I.10.3 Piles à combustible

On considère la pile à combustible comme une technologie de stockage d'avenir prometteuse. Elle opère sur le même principe d'oxydoréduction qu'une batterie, en se servant d'un combustible, généralement le dihydrogène, comme agent réducteur. Il réagit avec le dioxygène pour générer de l'eau et de la puissance. On peut produire du dihydrogène en utilisant soit le méthane, soit par électrolyse de l'eau. Cette seconde technique est particulièrement écologique car elle ne libère que de l'oxygène. Les piles à combustible hydrogène exploitent des électrodes poreuses, souvent en graphite, saturées de platine qui agissent comme catalyseurs pour faciliter le processus d'oxydation du gaz [34].

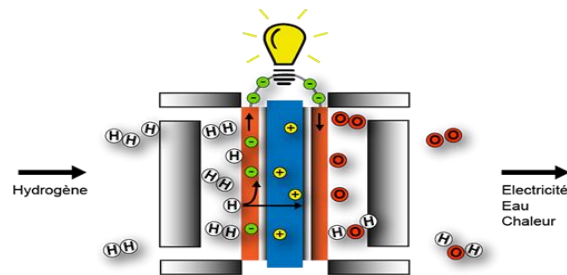


Figure I- 24 Schéma de principe des piles à combustible [34].

Dans le cadre de notre étude nous avons retenu la batterie au plomb-acide classique pour son faible coût, sa maintenance simplifiée et sa disponibilité mondiale, offrant un stockage fiable et économique dans un système hybride autonome.

I.11 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'acquérir une vue d'ensemble structurée et exhaustive sur la production d'énergie renouvelable et ses composants essentiels. Nous avons présenté quelques sources d'énergie verte, y compris le solaire photovoltaïque et l'éolien, en soulignant leurs avantages, leurs défis et leur principe de fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous avons observé l'importance des systèmes hybrides pour éviter l'interruption d'énergie. Nous avons également évoqué l'importance des convertisseurs statique pour la conversion de l'énergie sans oublier le rôle essentiel du stockage pour assurer l'équilibre entre production et consommation.

Enfin, nous avons appris de ce chapitre les concepts de base pour mieux aborder le reste de chapitre, notamment la modélisation et la simulation.

Le système hybride étudié comprend une éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents, un champ photovoltaïque piloté par un hacheur commandé en MPPT, un redresseur pour convertir le courant alternatif de l'éolienne en continu, un

hacheur Buck-Boost pour ajuster la tension DC, une batterie au plomb-acide pour le stockage, ainsi que des charges AC et DC pour la distribution de l'énergie. Dans le chapitre suivant, on va voir la Modélisation des composants du système.

A decorative border in a dark blue color, shaped like a scroll. It starts with a small loop at the top right, goes down, then left, then down again, ending in a larger loop at the bottom left.

Chapitre II

Modélisation des
composants du système
hybride

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons modéliser les différents composants du système hybride (PV + éolien) qui est constitué de deux sources d'énergie alimentant une charge AC et DC, des convertisseurs (Boost, Buck Boost, redresseur et onduleur) ainsi que le système de stockage. Nous débuterons par la modélisation des systèmes photovoltaïques grâce à divers modèles électriques en scrutant leurs attributs principaux et l'impact de facteurs météorologiques (irradiation et la température). La modélisation de la production éolienne vient compléter cette approche. Nous allons ensuite examiner les convertisseurs de puissance, redresseur, Boost et Buck-Boost qui garantissent la liaison au bus continu, la charge et le stockage. Finalement, la modélisation de la batterie est traitée afin de refléter précisément les processus de charge et de décharge. Ce chapitre offre une base pour la simulation et la gestion énergétique du système hybride à énergies renouvelables.

II.2 Présentation du système proposé pour l'étude

La figure ci-dessous résume le système proposé pour l'étude

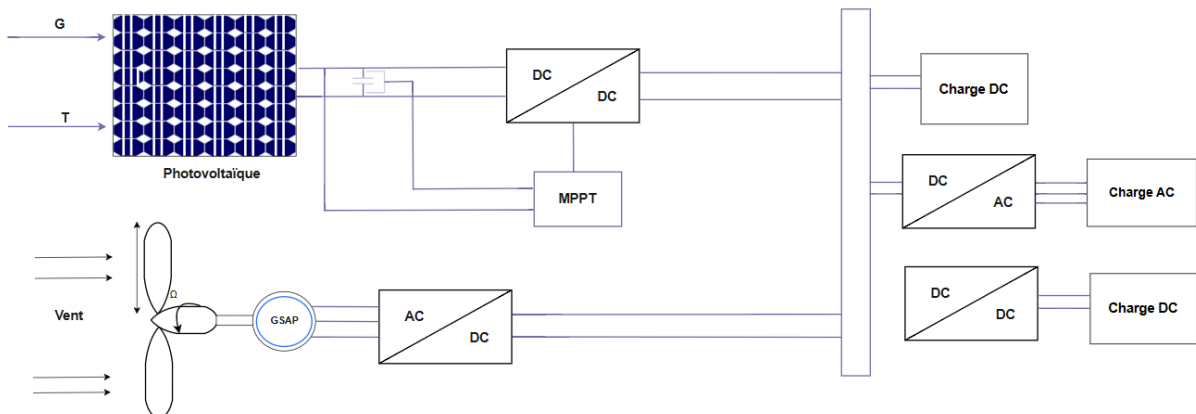


Figure II- 1 Système hybride globale étudiée

II.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

De nombreux travaux ont porté sur la modélisation des générateurs photovoltaïques qui varient selon la méthode et les paramètres utilisés pour calculer la tension et le courant. Afin d'analyser et d'optimiser leurs performances en conditions réelles [35].

Dans notre étude, nous avons choisi le modèle à une diode à cinq paramètres (I_{cc} , V_{co} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) pour suivre efficacement les effets des variations climatiques tout en maintenant un bon équilibre entre précision et simplicité d'utilisation. La figure suivante montre le schéma équivalent à une diode.

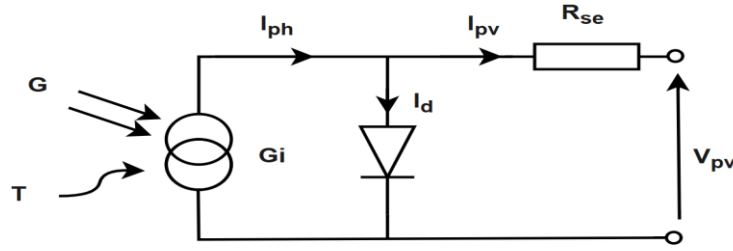


Figure II- 2 Schéma équivalent à une diode

Le générateur de courant représente l'irradiation solaire, la diode en parallèle reflète l'action de la jonction PN et une résistance série représente les pertes ohmiques dues aux défauts de production.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des nœuds :

$$I_{pv} = I_{cc} \{1 - K1[e^{K2V_{pv}^m} - 1]\} \quad (\text{II. 1})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K1 = 0.01175 \\ K3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1+K1) - I_{ppm}}{K1I_{cc}} \right] \\ K2 = \frac{K4}{V_{oc}^m} \\ K4 = \ln \left[\frac{1+K1}{K1} \right] \\ m = \frac{\ln \left[\frac{K3}{K4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{ppm}}{V_{oc}} \right]} \end{array} \right. \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

- I_{ppm} : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum (I_{opt})
- V_{ppm} : Tension au point de puissance maximale, appelée aussi tension optimale (V_{opt})
- I_{cc} : Courant en court-circuit
- V_{oc} : Tension en circuit ouvert

Il convient de souligner que cette équation (II.1) n'est valable que dans le cadre des conditions standards de test (STC) qui correspondent à un niveau d'ensoleillement de $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température de cellule de $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$. Quand l'ensoleillement et la température varient on aura les équations suivantes :

$$\Delta V_{pv} = \beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{II. 3})$$

$$\Delta I_{pv} = -\alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc,stc} \quad (\text{II. 4})$$

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

- G_{stc} Et G : Représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

- T_{stc} Et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- ΔT_c : Représente la variation de la température.
- ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
- α_{cc} : Représente un coefficient d'incrément de courant I_{sc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).
- β_{oc} : Représente un coefficient d'incrément de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv,stc} + \Delta V_{pv} \quad (II. 6)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv,stc} + \Delta I_{pv} \quad (II. 7)$$

II.4 Modélisation de l'éolienne

Cette section présente la modélisation des composants principaux de l'éolienne afin de mieux comprendre son fonctionnement et d'optimiser sa production d'énergie.

II.4.1 Modélisation de la vitesse de vent

La vitesse du vent est le variable principale dans un système éolien et détermine la conversion de l'énergie cinétique en électricité. Sa modélisation temporelle précise est essentielle pour la fiabilité des simulations

$$V_v = f(t) \quad (II. 8)$$

- **Le rapport de la vitesse en bout de pales**

On définit le rapport λ comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (II. 9)$$

Avec :

- Ω_t : vitesse de la turbine éolienne [rad/s].
- R_t : Rayon de la turbine éolienne [m].

- **Le coefficient de puissance**

La puissance fournie par le vent

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (II. 10)$$

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{T_t \cdot \Omega_t}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

- P_t : Puissance de la turbine éolienne.
- ρ : Densité d'air [Kg/m^3].
- S : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle [m^2].
- V_v : Vitesse du vent [m/s].
- C_p : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique λ .

Coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_{max} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \leq 0.59 \quad (\text{II. 12})$$

A travers les équations Betz nous concluons

$$P_m = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (\text{II. 13})$$

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{eot} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_w^3 \quad (\text{II. 14})$$

• Couple de la turbine

Le couple de la turbine est déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p * \rho * S * \frac{V_v}{G * \Omega_t} \quad (\text{II. 15})$$

• L'arbre de transmission

L'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide illustre la transmission mécanique.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_{em} - T_t \quad (\text{II. 16})$$

- J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine
- f : Coefficient de frottement dynamique

II.4.2 Modélisation du générateur

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) se démocratisent dans les systèmes éoliens modernes grâce à leur couple massique élevé qui obtenu sans multiplicateur de vitesse en augmentant simplement le nombre de paires de pôles. Les aimants permanents éliminent les pertes par effet Joule au rotor et améliorent le rendement, la dynamique et le facteur de puissance [36].

Le modèle mathématique de la MSAP repose sur des hypothèses classiques [36] :

- ❖ Pas de saturation du circuit magnétique.
- ❖ Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique.
- ❖ Hystérésis courants de Foucault et effet de peau négligés.
- ❖ Résistance des bobinages indépendante de la température.

La structure comporte un enroulement triphasé au stator et une excitation assurée par des aimants supposés rigides à perméabilité proche de celle de l'air. Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante.

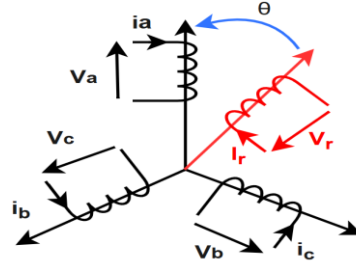


Figure II- 3 schéma représentatif de la MSAP à modéliser

• Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques triphasées dans un repère fixe lié au stator sont décrites par

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

La forme matricielle du système d'équations de l'enroulement statoriques est :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

Ou bien on peut réécrire sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi_s]_{abc} \quad (\text{II. 19})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances sataoriques.}$$

Avec :

- $[V_a \ V_b \ V_c]$: Vecteur tension de phases statoriques.
- $[i_a \ i_b \ i_c]$: Vecteur courant de phases statoriques.
- $[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.
- R_s : la résistance des phases statoriques.

• Equations magnétique

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II. 20})$$

Avec :

- L_{ss} : Matrice des inductances statoriques
- L_{s0} : Matrice des inductances statoriques
- φ_f : Flux des aimants permanents.

On peut réécrire l'équation (II.19) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II. 21})$$

Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park

Pour passer du système triphasé (abc) vers le système biphasé (d, q, o), on utilise pour notre cas la transformation de Park modifiée qui est égale au produit de la matrice de rotation de Park par la matrice de transformation de Concordia.

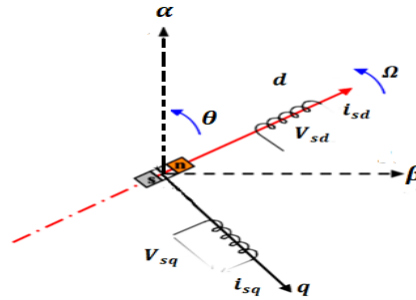


Figure II- 4 Représentations de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

La matrice de la transformation de Park pour le stator est donnée comme suit (le repère est relié au rotor) :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

La matrice de la transformation de Park inverse pour le stator est donné comme suit (le repère est relié au rotor) :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

Le changement de variable effectué, les équations des tensions sont :

$$[v_{dqo}] = [P(\theta)][v_{abc}] \quad (\text{II. 24})$$

$$[v_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[v_{dqo}] \quad (\text{II. 25})$$

• Equations électriques

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_f \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation

• Equations magnétique

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Où :

L_d Et L_q : Inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.28) on aboutit à

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - P\Omega_g L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + P\Omega_g L_d i_{sd} + P\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

• Expression du couple électromagnétique

Selon Park modifié, l'expression de la puissance absorbée s'écrit comme suit :

$$P_a = (v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (\text{II. 30})$$

En remplaçant v_{sd} et v_{sq} par leur expression (II.30), on obtient :

$$P_a = \left[R_s \cdot (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right) + (\varphi_{sd} i_{qs} - i_{ds} \varphi_{sq}) \omega_e \right] \quad (\text{II. 31})$$

Avec :

- $\omega_e = P \cdot \Omega_g$: Pulsation électrique.
- $R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$: Représente la puissance dissipée par effet Joule.
- $(i_{ds} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{sq}}{dt})$: Variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

➤ $(\varphi_{sd}i_{qs} - i_{ds}\varphi_{sq})$: La puissance électromagnétique.

Donc, on peut écrire :

$$C_{em} = P(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + P\varphi_f i_{sq} \quad (II. 32)$$

Dans les MSAP avec rotor à pôles lisses, les inductances statoriques sur les deux axes d et q sont égales ($L_d = L_q$) et l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P(\varphi_f i_{sq}) \quad (II. 33)$$

II.5 Commande du système

Dans notre système hybride, nous allons utiliser deux types de commandes : la commande MPPT pour obtenir la puissance maximale du panneau photovoltaïque et la commande vectorielle pour contrôler génératrice utilisée dans la partie éolienne.

II.5.1 Algorithme de Perturbation et Observation P&O

Cet algorithme ajuste le rapport cyclique par petites perturbations puis compare la puissance instantanée $P_{pv}(n)$ à la valeur $P_{pv}(n-1)$: si $P_{pv}(n)$ à augmente on continue la variation dans le même sens sinon on inverse le signe de la variation afin de converger vers le point de puissance maximale [37].

La figure (II.5) donne l'organigramme de l'algorithme de la P&O où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation.

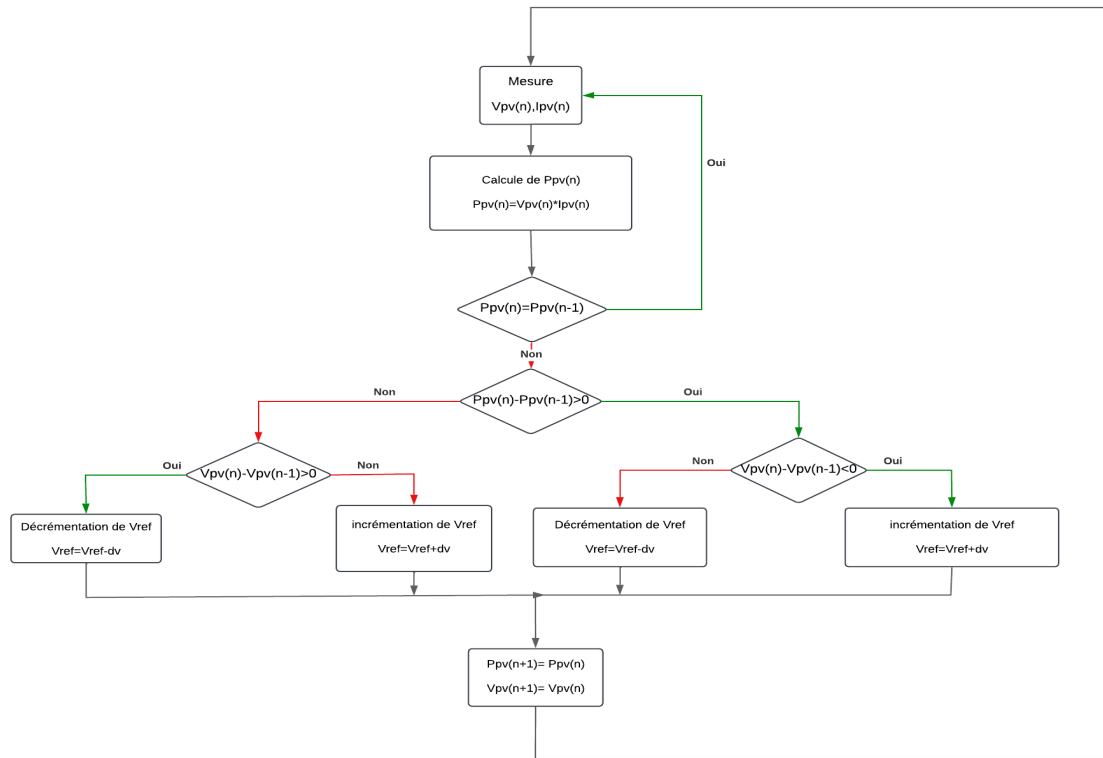


Figure II- 5 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation

II.5.2 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents

En neutralisant la composante directe I_d du courant statorique, la stratégie vectorielle la plus courante pour les machines synchrones simplifie l'équation du couple électromagnétique et qui se réduit alors à une relation linéaire :

$$C_{em} = K_t I_q \quad (II. 34)$$

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature I_q .

Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous imposons une référence $I_{dref} = 0$ pour minimiser les pertes joules et une référence du $I_{qref} = \frac{C_{emref}}{K_t}$.

Afin de justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r \varphi_q \quad (II. 35)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \quad (II. 36)$$

On posant

$E_d = \omega_r \varphi_d$: F.é.m. de la machine sur l'axe d

$E_q = -\omega_r \varphi_q$: F.é.m. de la machine sur l'axe q

La commande vectorielle avec découplage basée sur la compensation permet de découpler les courants I_d et I_q et d'appliquer une régulation appropriée à chacun d'eux de manière indépendante. Cette méthode conduit à un modèle de machine synchrone semblable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Les termes de couplage sont $E_{d,q} = \pm \omega_r \varphi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi, on peut représenter la machine par la fonction de transfert suivante.

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + T_e p} \quad (II. 37)$$

Avec :

➤ $T_e = \frac{L_s}{R_s}$: La constante de temps électrique

La boucle de régulation du courant $I_{d,q}$ est donnée par le schéma bloc suivant :

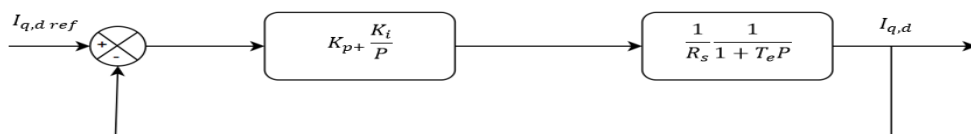


Figure II- 6 Boucle de régulation des courants $I_{d,q}$

II.5.2.1 Calcul du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$G_{bo}(p) = \frac{K_p P + K_i}{P} \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + T_e P} \quad (\text{II. 38})$$

$$G_o(p) = \frac{K_{p,d} P + K_{id}}{P} \frac{1}{R_s P + L_d} = \frac{K_{p,d} P + K_{id}}{P} \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + T_e P} \quad (\text{II. 39})$$

Enfin

$$G_0(p) = \frac{K_{p,d} P + K_{id}}{P} \frac{G_0}{1 + T_e P} \quad (\text{II. 40})$$

Avec :

- $T_e = \frac{K_p}{K_i}$: constante de temps électrique
- G_0 : Le gain statique

La fonction de transfert en boucle fermée est

$$G_{bf}(P) = \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo} P} = \frac{K_p P + K_i}{R_p^2 + (L_q + K_p) P + K_i} \quad (\text{II. 41})$$

$$G(P) = \frac{G_0}{1 + G_0(P)} \quad (\text{II. 42})$$

- $K_p = \frac{2\xi_n K_i}{\omega_n} - J$
- $K_i = \omega_n^2 J$

II.6 Modélisation des convertisseurs

Dans notre étude nous allons utiliser l'onduleur pour la commande vectoriel afin de contrôler générateur et nous allons utiliser aussi le hacheur pour la commande de puissance dans notre système hybride.

II.6.1 Modélisation convertisseurs DC/AC

La Figure II-7 montre un onduleur de tension triphasé connecté au MSAP.

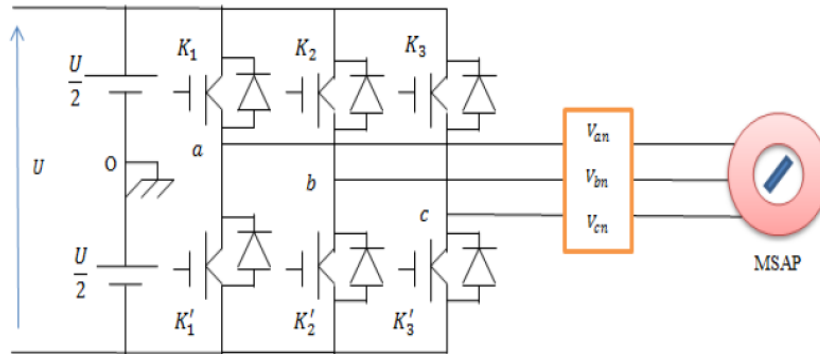


Figure II- 7 Onduleur de tension triphasé

Les tensions triphasé se représenté dans les équations (II.43), (II.44) et (II.45) :

$$V_{an} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II. 43})$$

$$V_{bn} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II. 44})$$

$$V_{cn} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_c - S_b - S_a) \quad (\text{II. 45})$$

Avec :

- S_a, S_b, S_c : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur

II.6.2 Modélisation convertisseur DC/DC

Nous allons utiliser deux types du hacheur dans le système hybride :

❖ Hacheur survolteur (BOOST)

Nous avons choisir d'utilisation un convertisseur BOOST dans notre système grâce à sa conception simple et à son augmentation de tension plus importante comparativement à d'autres types de convertisseurs avec un rapport cyclique identique. Ce choix découle de notre ambition d'optimiser la production d'énergie du panneau photovoltaïque en appliquant une stratégie de contrôle qui favorise un fonctionnement au point de puissance maximale [38].

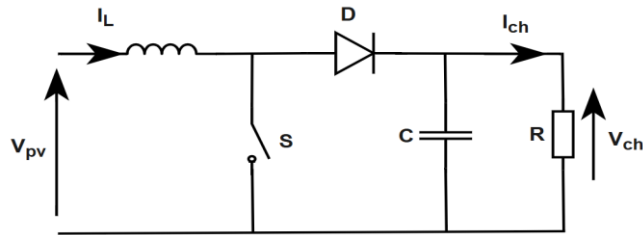


Figure II- 8 Circuit électrique le hacheur Boost

- **Etape (1) :** Lorsque S ouvert

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + V_{ch} \quad (\text{II. 46})$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II. 47})$$

- **Etape (2) :** Lorsque S est ferme

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II. 48})$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II. 49})$$

❖ Hacheur Buck-Boost

Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en Suivre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui

permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé

Il existe différents types de hacheurs, si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée le hacheur est dit abaisseur (Buck), dans le cas contraire il est dit survolteur (Boost)

Pour notre étude, nous allons utiliser un hacheur élévateur de tension (Boost) ou hacheur parallèle, celui-ci est une alimentation à découplage qui convertit une tension d'entrée continue en une autre tension plus forte. Son schéma de base est représenté dans la figure (II.9) [39].

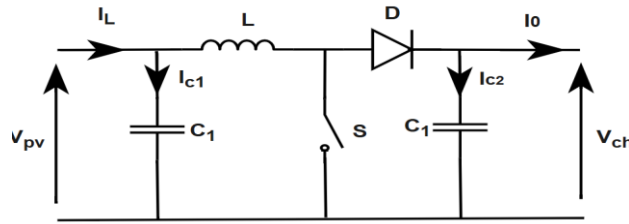


Figure II- 9 Schéma de base d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne

- **Etape (1) :** Lorsque S est ouvert

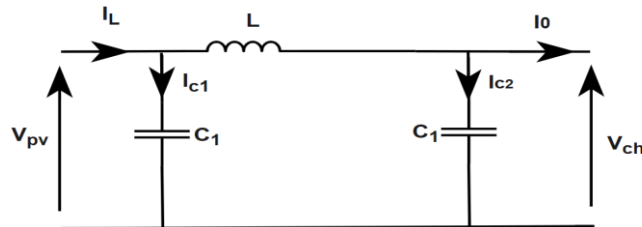


Figure II- 10 Schéma équivalent du hacheur S ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_{pv}}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (II. 50)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_{pv}}{dt} = -I_L(t) - I_0 \quad (II. 51)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv}(t) - V_0 \quad (II. 52)$$

- **Etape (2) :** Lorsque S est fermé

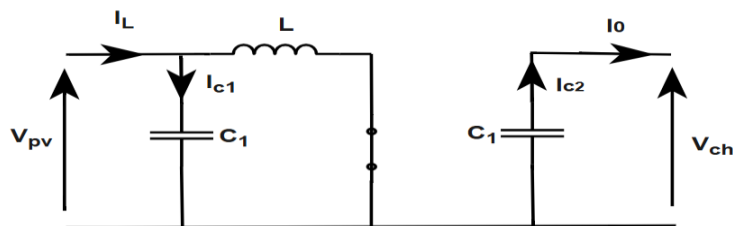


Figure II- 11 Schéma équivalent du hacheur S fermé

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (\text{II. 53})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_{pv}}{dt} = -I_0(t) \quad (\text{II. 54})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = -V_{pv}(t) \quad (\text{II. 55})$$

II.7 Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs types de batteries au plomb et leur modélisation est complexe en raison de nombreux paramètres à considérer et aucun modèle unique n'est parfaitement adapté à toutes les situations. Pour simplifier, on utilise souvent le modèle R-C dit le modèle simple [40].

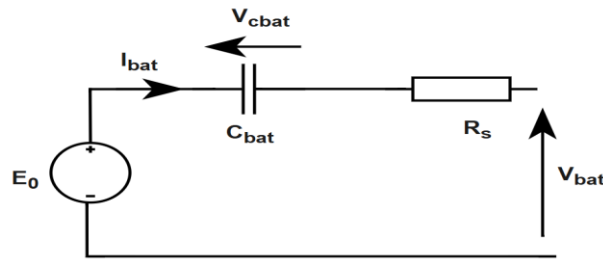


Figure II- 12 Modèle R-C de batterie

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II. 56})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Qd}{C_{bat}} \int I dt \quad (\text{II. 57})$$

Avec :

- C_{bat} : La capacité (Ah) nominale de la batterie
- Qd : La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

II.8 Modélisation du Bus continu

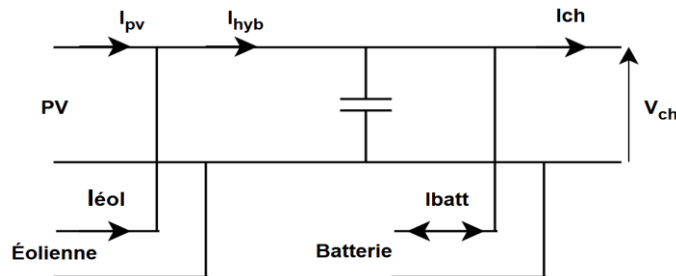


Figure II- 13 Schémas du Bus

$$I_{hyb} = I_{eol} + I_{pv} \quad (\text{II. 58})$$

$$I_{ch} = I_{hyb} \pm I_{bat} \quad (\text{II. 59})$$

Avec :

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II. 60})$$

Donc la tension du bus continu est égale

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} * i_c dt \quad (\text{II. 61})$$

- I_{pv} : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A]
- I_{eol} : Courant fourni par le système éolien [A]
- I_c : Courant qui traverse la capacité [A]
- I_{hyb} : Courant produit par le système hybride éolien [A]
- I_s : Courant de délestage [A]
- I_{bat} : Courant de la batterie [A]

II.9 Conclusion

Au moyen de chapitre, nous avons présente la modélisation des composants principaux d'un système hybride alimenté par des énergies renouvelables. De la cellule solaire à l'éolienne, y compris les convertisseurs de puissance et le système de stockage par batterie, chaque composant a été analysé dans une perspective à la fois analytique et systémique. Ce modèle permet non seulement d'appréhender le comportement dynamique de chaque élément, mais également de se préparer à la phase de simulation dans un contexte plus large d'intégration énergétique. Dans le chapitre suivant, on va voir Simulation des composants du système.

A decorative frame resembling a rolled-up scroll, with a blue outline. The frame has a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and small circular details suggesting a binding or scroll edge.

Chapitre III

Simulation des composants
du système

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une étude approfondie du comportement et de la simulation des chaînes photovoltaïque et éolienne. Nous débuterons par l'étude des caractéristiques des panneaux solaires : la façon dont leur courant et leur puissance répondent aux variations de l'ensoleillement et de la température, ensuite nous discuterons de la manière dont les algorithmes MPPT améliorent leur rendement. Par la suite, nous étudierons l'énergie éolienne en simulant turbine et la génératrice, avant de passer à l'examen de la solution de stockage d'énergie basée sur des batteries au plomb capables de conserver l'énergie produite et de la restituer ou besoin.

III.2 Simulation de la chaine de production d'énergie photovoltaïque

Dans cette partie, nous procédons à la validation du modèle du panneau photovoltaïque. Diverses puissances normalisées de modules PV sont disponibles dans la littérature comme sur le marché. Pour cette étude, notre choix s'est porté sur le panneau SIEMENS SM 110-24.

Étant donné que le système photovoltaïque agit comme une source de courant, ses caractéristiques électriques sont déterminées à l'aide d'une charge capacitive placée. Cette configuration permet de mettre en évidence deux points essentiels du fonctionnement :

- ❖ **Le point de court-circuit ($t \rightarrow 0$) :** le condensateur est vide et il agit comme un fil (court-circuit).
- ❖ **Le point de circuit ouvert ($t \rightarrow \infty$) :** le condensateur est complètement chargé ce qui simule une résistance infinie (circuit ouvert).

Dans le but de reproduire les caractéristiques de notre panneau photovoltaïque nous avons implémenté le modèle mathématique à une diode qui est mentionné précédemment sur l'environnement Matlab/Simulink.

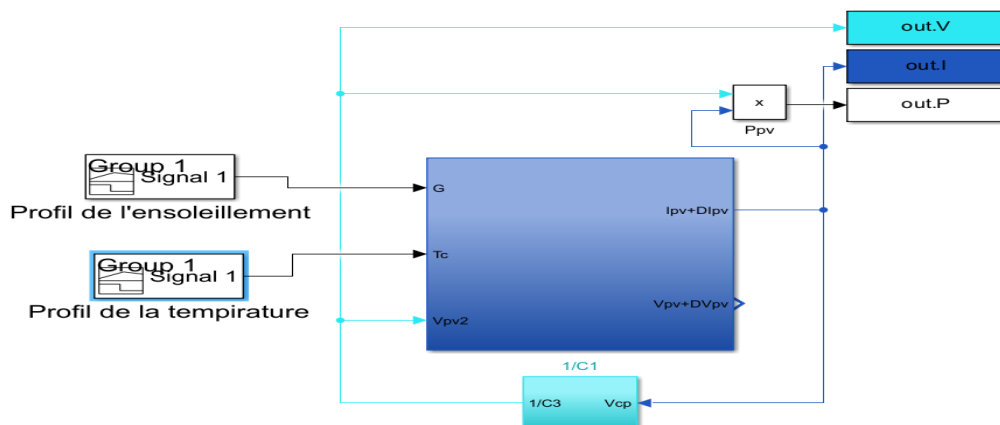


Figure III- 1 Schéma bloc du modèle à une diode

III.2.1 Caractéristique d'un module photovoltaïque dans des conditions STC

La figure (III.2) et la figure (III.3) représentent les caractéristiques courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ et puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$ du module SIEMENS SM 110-24 (110W) on se basant sur les conditions standards STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$).

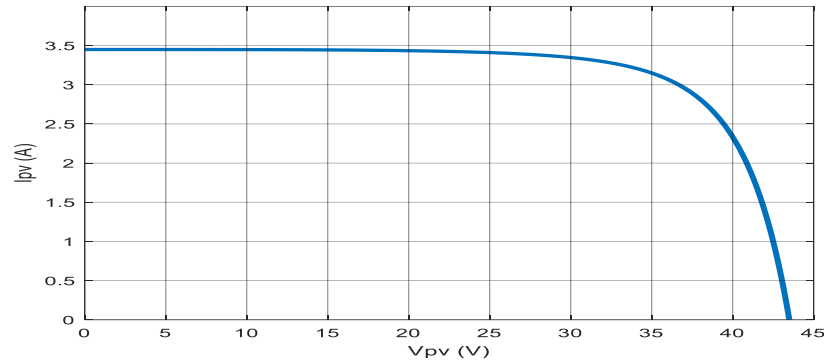


Figure III- 2 Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ du module photovoltaïque

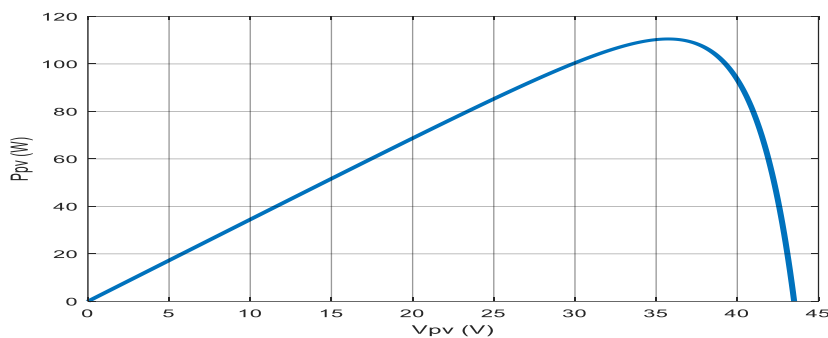


Figure III- 3 Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module photovoltaïque

Selon la courbe I–V d'un module photovoltaïque, on repère trois régimes de fonctionnement :

- ❖ **zone 1** : le courant reste quasiment constant quel que soit la tension et le module se comporte comme une source de courant.
- ❖ **zone 2** : la tension se maintient tandis que le courant chute, ce qui donne au panneau le comportement d'un générateur de tension.
- ❖ **zone 3** : le « coude » de la caractéristique où le produit $I \times V$ est maximale (le point de fonctionnement optimal).

III.2.1.1 Influence de l'ensoleillement sans MPPT

Pour voir l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module on fait varier la valeur de l'ensoleillement (1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 , 400 W/m^2) en gardant la température constante ($T_c = 25^\circ\text{C}$) et on trace les caractéristiques (P_{pv} - V_{pv} , I_{pv} - V_{pv}).

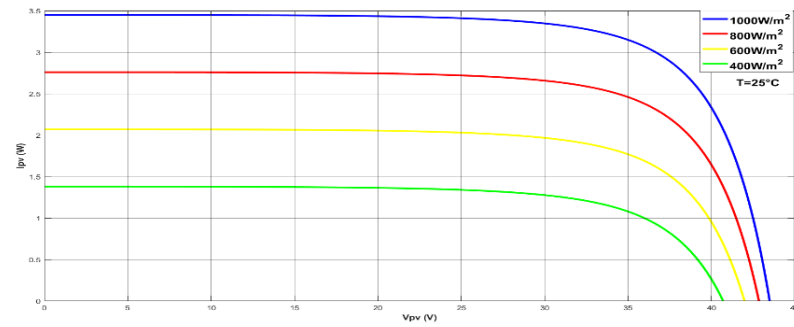


Figure III- 4 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

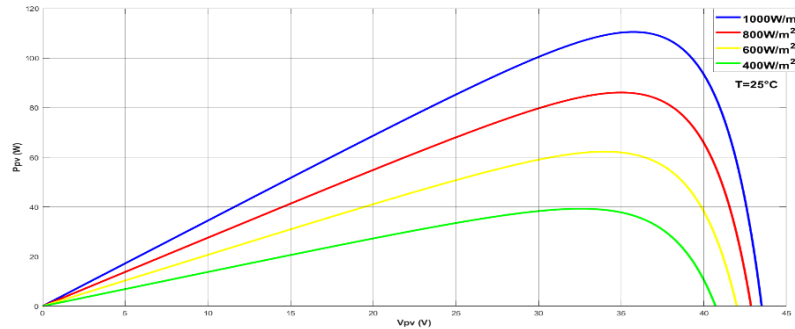


Figure III- 5 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$

On remarque que la puissance maximale décroît nettement lorsque l'ensoleillement diminue, principalement parce que le courant de court-circuit I_{cc} , directement proportionnel à l'irradiation G chute fortement. En revanche, la tension en circuit ouvert V_{oc} liée au potentiel interne de la jonction PN n'offre qu'une baisse modérée.

III.2.1.2 Influence de la température sans MPPT

Pour observer l'impact de la température, nous avons représenté les caractéristiques de la puissance et du courant en fonction de tension pour diverses températures (0°C , 25°C , 50°C , 75°C) et fixer l'ensoleillement à la valeur $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

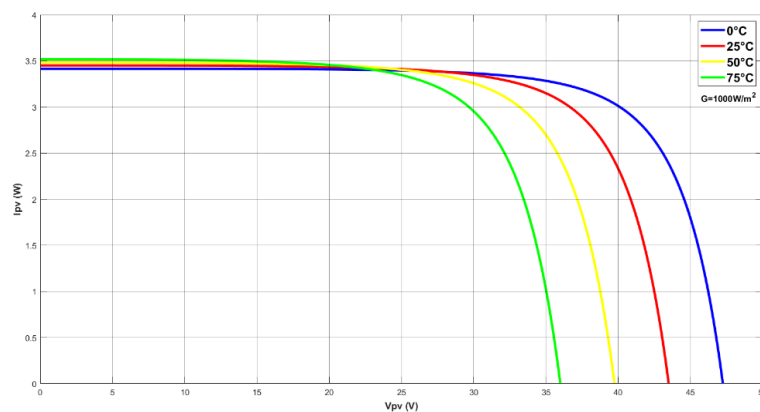


Figure III- 6 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

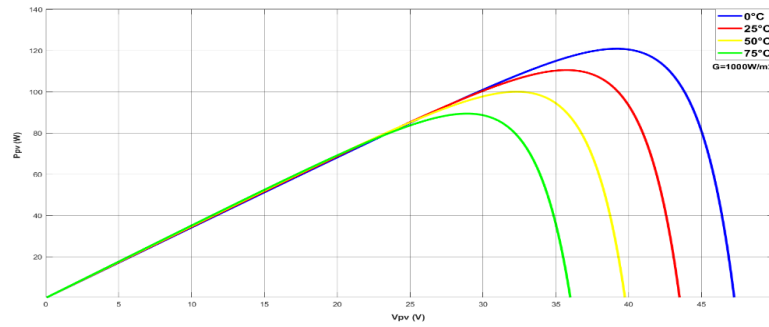


Figure III- 7 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$

D'après ces résultats, on observe que la puissance maximale décroît avec la température car V_{oc} chute significativement tandis que I_{cc} reste quasi constant. Donc en déduire que la température influence inversement sur les deux grandeurs.

III.2.2 Commande MPPT

La Figure (III-8) représente la simulation du MPPT pour un champ photovoltaïque met en œuvre la méthode P&O : on mesure la tension (V_{pv}) et le courant (I_{pv}) du PV puis le bloc MPPT compare chaque point de fonctionnement à l'instant précédent pour décider d'une légère variation de la tension de consigne (V_{pvref}). Cette consigne est envoyée à un régulateur PI de tension, suivi d'un second régulateur PI de courant (IL) afin de générer le signal PWM. Enfin, la fonction PWM produit le rapport cyclique ($1-\alpha$) qui pilote le convertisseur pour maintenir le système toujours proche du point de puissance maximale.

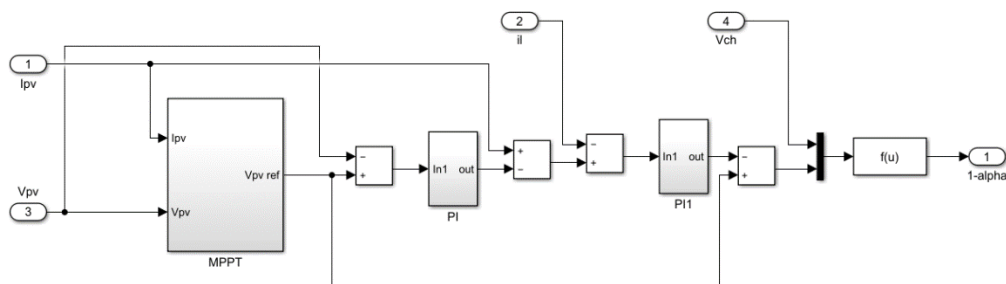


Figure III- 8 Schéma de simulation du MPPT

III.2.3 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT

Pour tester l'efficacité de cet algorithme dans un système de conversion photovoltaïque, nous allons réaliser plusieurs essais. Ces tests permettent d'observer comment le système réagit face aux changements climatiques (l'ensoleillement et la température).

III.2.3.1 Influence de l'ensoleillement avec MPPT

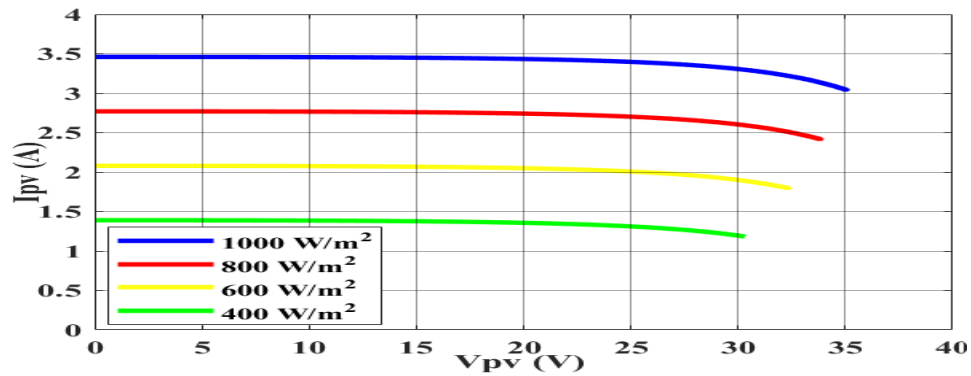


Figure III- 9 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur la caractéristique I_{pv} (V_{pv})

Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ pour différentes variations de l'ensoleillement avec la commande MPPT.

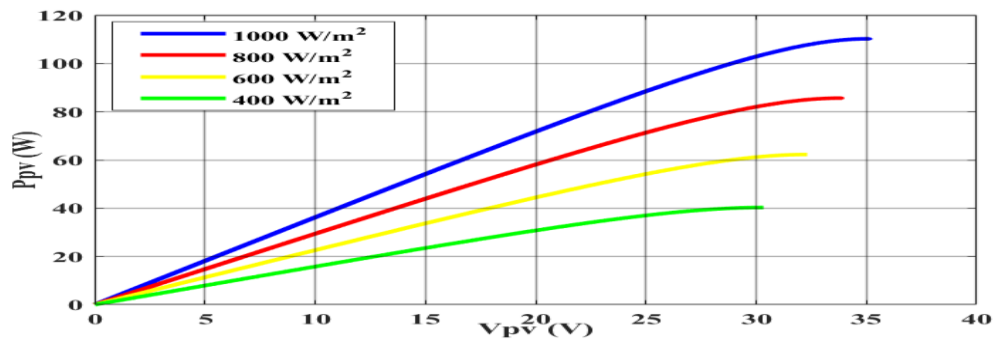


Figure III- 10 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ($T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv})

Caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes variations de l'ensoleillement avec la commande MPPT.

III.2.3.2 Influence de la température avec MPPT

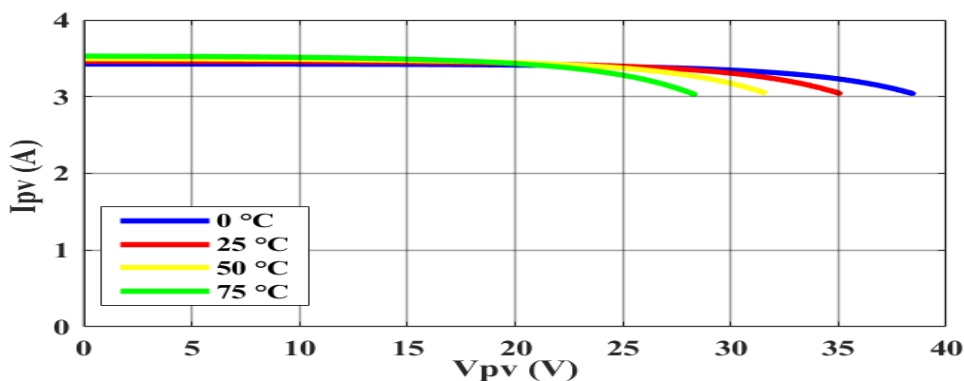


Figure III- 11 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constant ($G=1000\text{ W/m}^2$) sur la caractéristique I_{pv} (V_{pv})

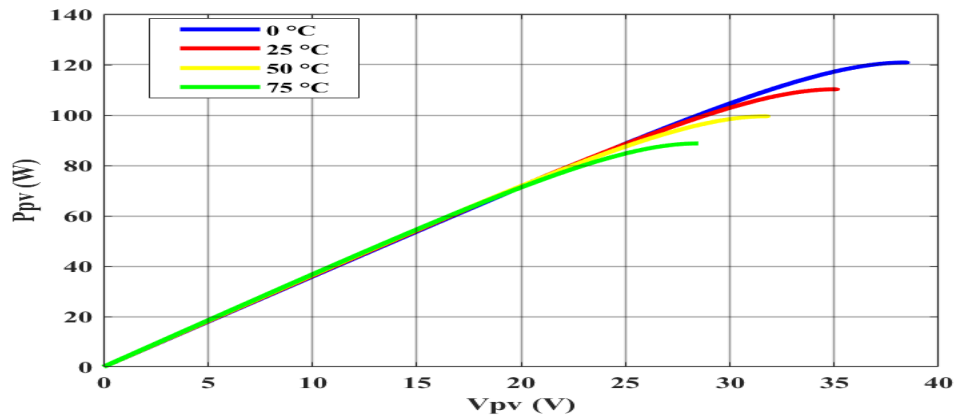


Figure III- 12 Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constant ($G=1000 \text{ W/m}^2$) sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv})

Les résultats montrent le rôle joué par la commande MPPT, qui consiste à obtenir la puissance maximale en cas de variation de l'ensoleillement ou de la température.

III.2.4 Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Figure (III.13) montre la simulation d'un système photovoltaïque avec le stockage : le bloc bleu central modélise le générateur PV qui reçoit en entrée le profil d'ensoleillement et le profil de température et délivre la tension et le courant. Ces grandeurs sont transmises vers le MPPT qui calcule le rapport cyclique optimal. Le signal de commande pilote ensuite un hacheur DC/DC (bloc rouge).

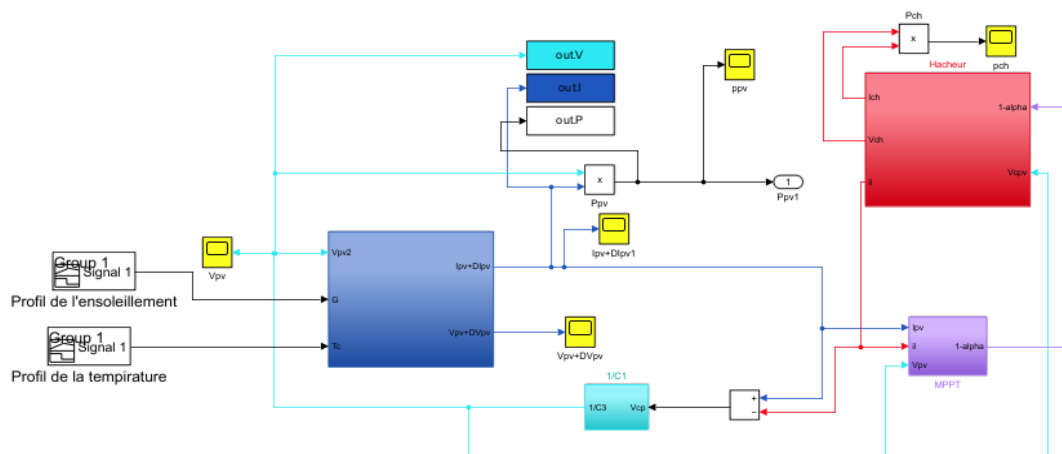


Figure III- 13 Schéma bloc Simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus pour un ensoleillement de $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température ambiante de $T = 25^\circ\text{C}$.

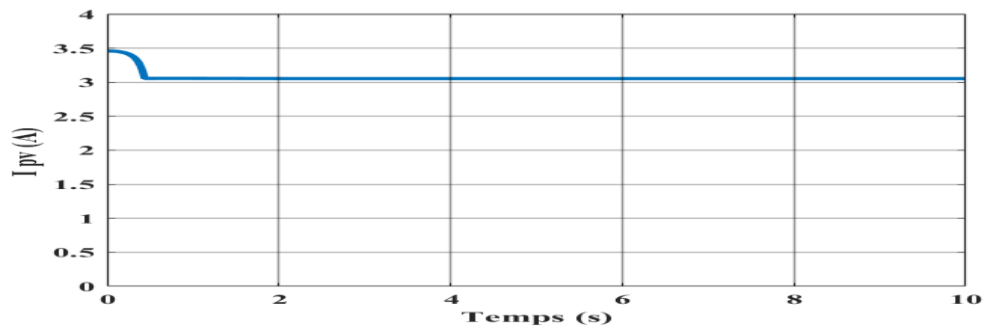


Figure III- 14 Courbe de courant P&O

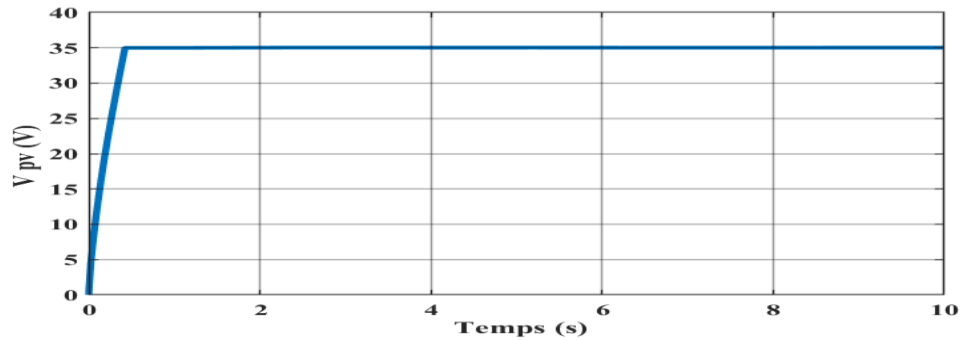


Figure III- 15 Courbe de tension P&O

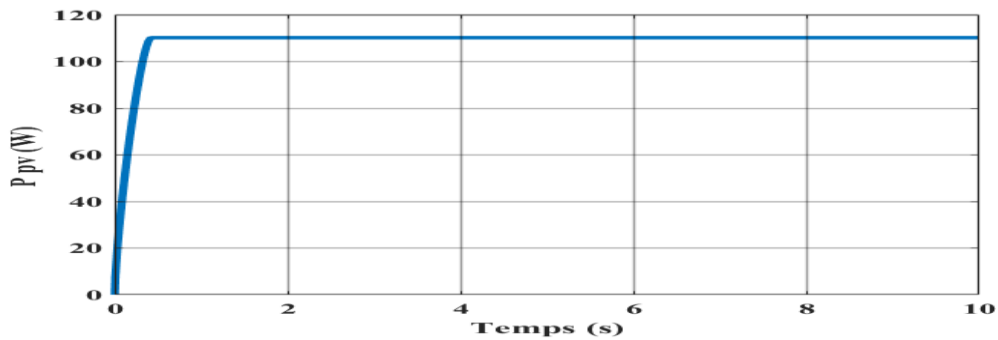


Figure III- 16 Courbe de puissance P&O

A partir des résultats de la simulation on observe que le courant, la tension ainsi que leur produit (puissance) restent constants au cours du temps grâce à MPPT qui fixe les deux grandeurs dans le point de puissance maximal.

Nous avons proposé un profil de l'ensoleillement ($1000 \rightarrow 600 \rightarrow 1000 \text{ W/m}^2$) et une température variant de $25 \rightarrow 10 \rightarrow 40 \rightarrow 25$ comme montre la Figure (III-17)

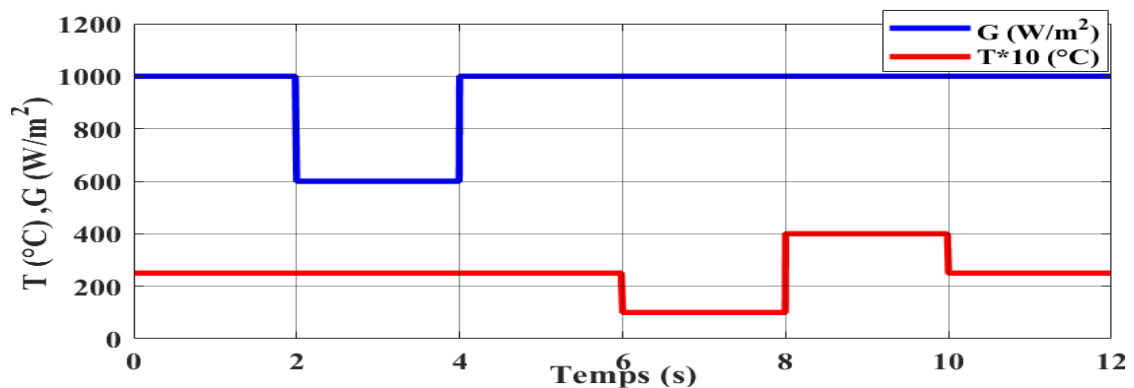


Figure III- 17 Variation de l'éclairement et de la température

Figure (III.18) représente l'allure de la puissance générée par le générateur photovoltaïque avec le MPPT.

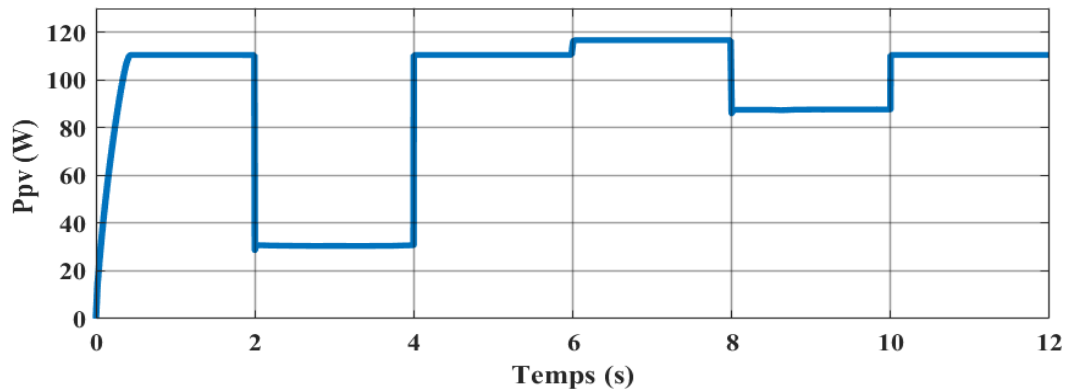


Figure III- 18 Allure de la puissance photovoltaïque

Les résultats de simulation montrent l'évolution de la puissance de PV en réponse au profil précédent Figure (III-17). Lorsque l'ensoleillement égale 1000 W/m^2 (0 à 2 s) la puissance atteint rapidement 110 W. Lors de la chute à 600 W/m^2 (2 à 4 s), il chute également à environ 30 W à cause de diminution l'ensoleillement, Le retour à 1000 W/m^2 se traduit par une remontée de la puissance jusqu'à 115 W à cause de la température basse (10°C) qui améliore le rendement du semi-conducteur. Enfin, lorsque $G=800 \text{ W/m}^2$ et $T=40^\circ\text{C}$ (8–10 s) la puissance se stabilise autour de 85 W ce qui montre l'influence de la température sur la puissance de PV. Le MPPT adapte à chaque instant la tension et le courant pour suivre le point de puissance maximale malgré ces perturbations.

III.3 Simulation de la chaîne de conversion éolienne

La figure (III-18) présente le schéma bloc du système éolien elle est composée de bloc turbine qui fournit le couple mécanique et la vitesse de rotation. Ces grandeurs sont comparées à leurs consignes dans deux régulateurs PI qui génèrent des références de courants en quadrature et en direct. Le module (découplage1) réalise la compensation des interactions entre axes d et q pour assurer un contrôle découplé du flux et du couple. Ensuite, les signaux de courant sont transformés du référentiel tournant vers le référentiel fixe par une transformation inverse de Park puis convertis en signaux triphasés prêts à piloter l'onduleur MLI qui alimente la machine synchrone à aimants permanents, dont les grandeurs (courants et tensions) sont mesurées, ramenées au référentiel fixe par la transformation directe de Park (transf_park) et renvoyées aux régulateurs pour boucler le contrôle. Cette architecture permet de gérer précisément couple et vitesse tout en optimisant la production électrique de l'éolienne.

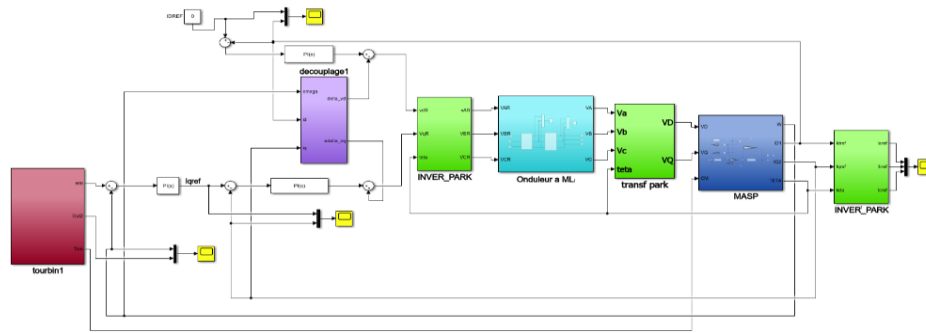


Figure III- 19 Schéma Bloc du système éolien

On applique une vitesse du vent de 8m/s pendant 2 s après passe à 6.5 m/s à l'instant 4 s comme représente la Figure (III-20).

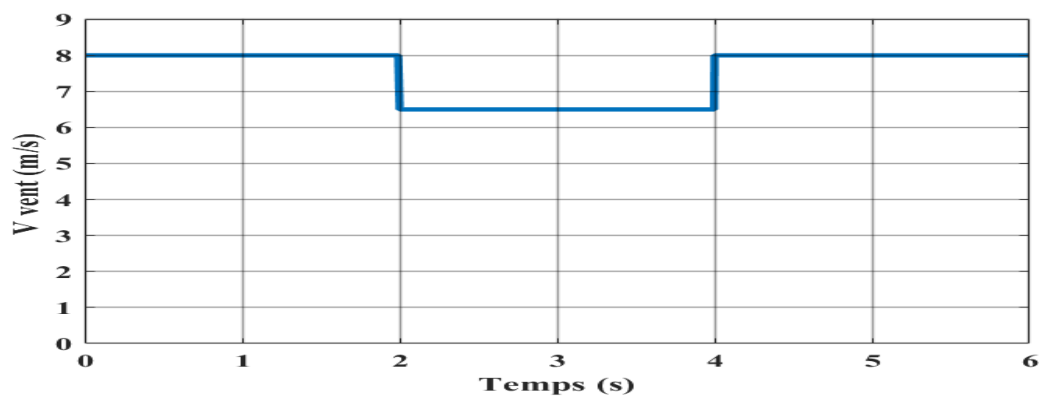


Figure III- 20 Profil du vent admissible par la turbine

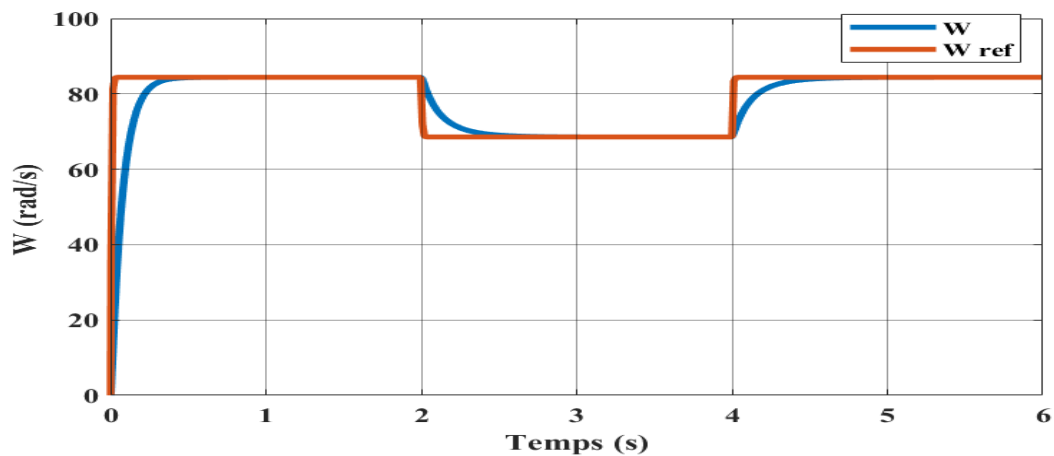


Figure III- 21 Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence

On remarque dans la figure (III-21) que la vitesse de la turbine monte rapidement vers la vitesse de référence, puis elle se stabilise à 69 rad/s. Lorsque la vitesse de référence chute à l'instant $t = 2$ s de 85 rad/s à la valeur 69 rad/s, on remarque que la vitesse mesurée suit la valeur de la vitesse de référence jusqu'à atteindre l'instant $t = 4$ s. À cet instant, la valeur de la vitesse de référence monte à la valeur initiale de 85 rad/s et il remarque aussi l'augmentation rapide de la vitesse mesurée et cela reflète le rôle du PI Controller de la vitesse.

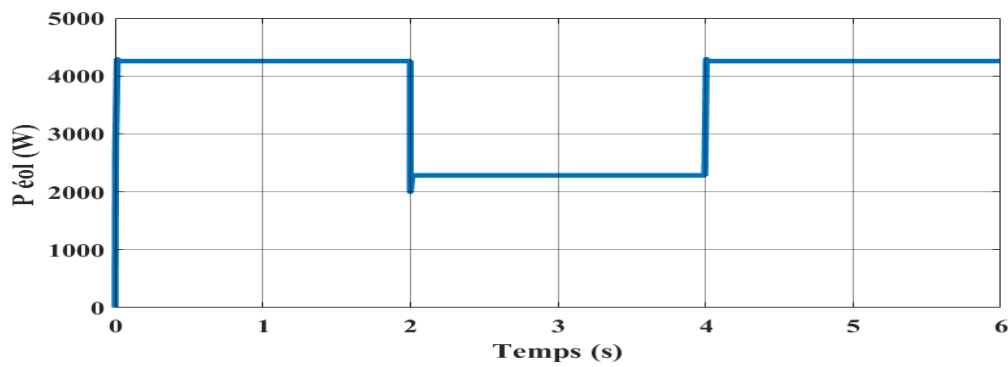
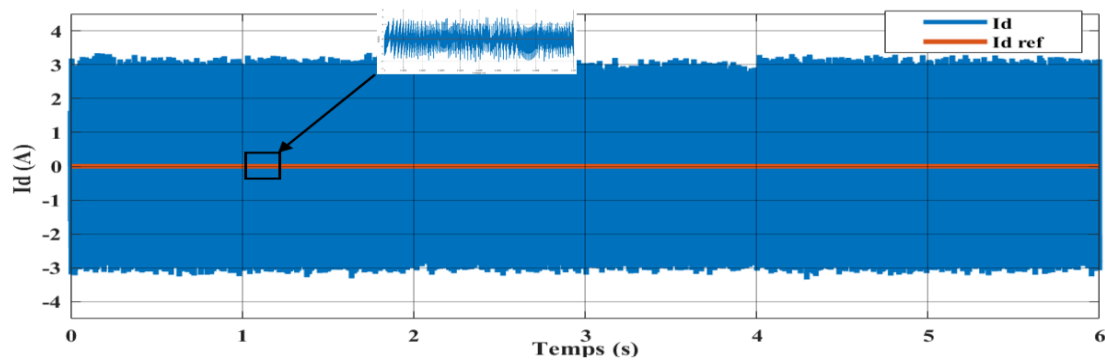
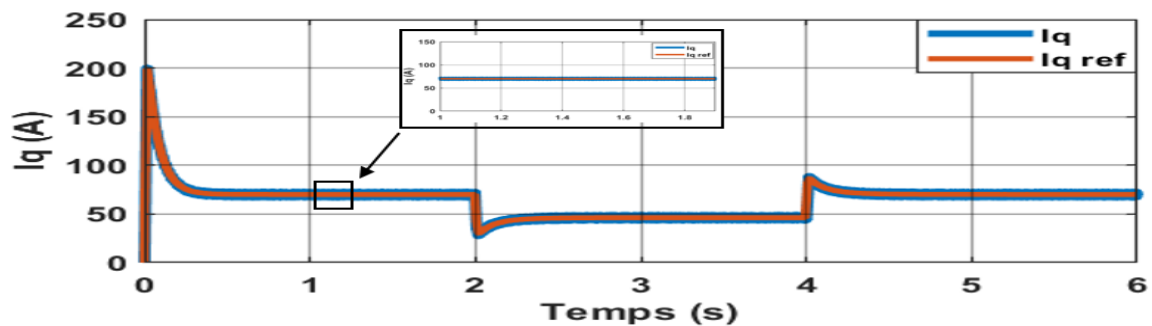


Figure III- 22 Puissance de l'éolienne

La Figure (III-22) montre que la puissance et la vitesse du vent sont proportionnelles. Un petit changement de la vitesse du vent résulte en une variation importante de la puissance, parce que dans l'équation de la puissance de l'éolienne, la vitesse du vent est multipliée par son cube.

Figure III- 23 Courant I_d et courant de référence I_{dref} de l'éolienneFigure III- 24 Courant I_q et courant de référence I_{qref} de l'éolienne

La Figure (III-23) montre le courant d'axe direct I_d que l'on a forcé à zéro pour ne pas injecter de champ magnétique inutile dans le rotor (cela maximise l'efficacité et minimise les pertes). Le zoom révèle que malgré cette consigne à 0 A de toute petites variations apparaissent (quelques ampères) à cause des commutations rapides de l'onduleur et des corrections permanentes du contrôleur. La Figure (III-24) présente le courant d'axe quadrature I_q qui est directement lié au couple généré : on voit qu'il suit très précisément sa référence, en montant

rapidement à la valeur souhaitée (quand la vitesse de consigne change) puis en restant stable. Ces résultats traduisent la capacité du régulateur vectoriel : il maintient I_d à zéro pour optimiser le flux magnétique tout en ajustant I_q pour fournir le couple nécessaire et suivre les variations de vent.

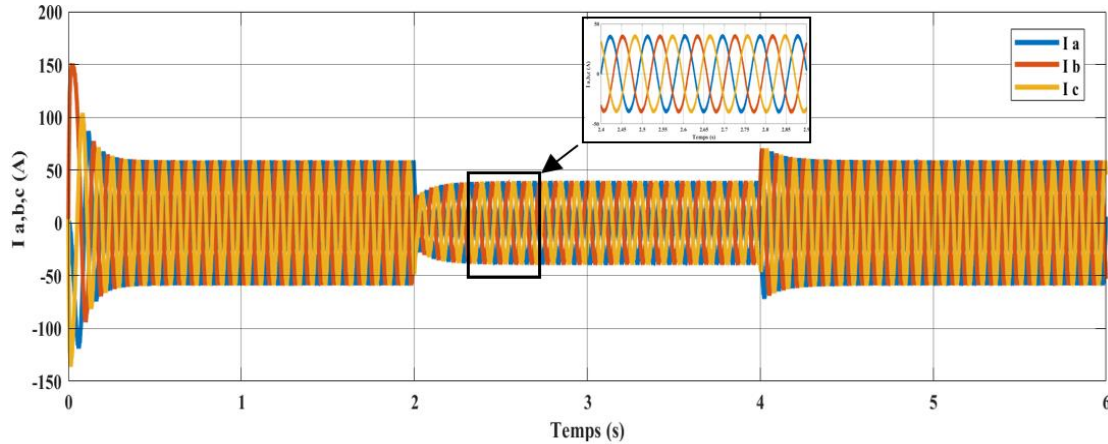


Figure III- 25 Allures des courants I_{abc}

La figure (III-25) montre comment les courants du générateur réagissent aux variations de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse reste constante à 8 m/s (avant $t = 2$ s), les courants présentent de légères oscillations puis se stabilisent sous forme d'ondes régulières de faible amplitude. Quand le vent diminue à 6,5 m/s (à $t = 2$ s), l'intensité du courant chute rapidement à un niveau plus bas, et le système de commande commence à lisser cette transition. Enfin, lorsque la vitesse du vent revient à 8 m/s (à $t = 4$ s), le courant augmente à nouveau avec un léger dépassement avant de se stabiliser.

III.4 Simulation de la batterie au plomb

Figure III.26 représente le schéma de simulation de la batterie au plomb afin d'analyser ses performances électriques dans différentes conditions de fonctionnement un courant de batterie de 10 A est appliqué cette référence passe à (-10 A) à l'insti 5s, les figures (III-28) et (III-29) montrent l'évolution de d'Etat de charge de la batterie ainsi que la tension de batterie.

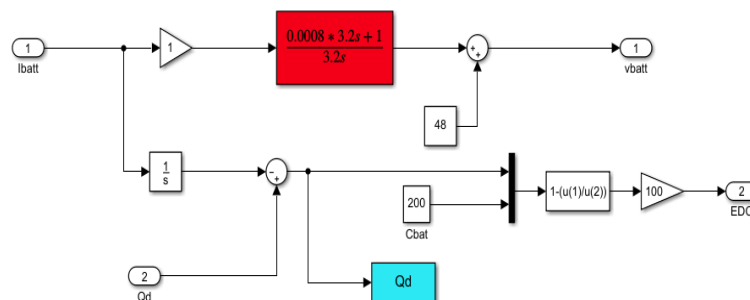


Figure III- 26 Schéma de simulation d'une batterie

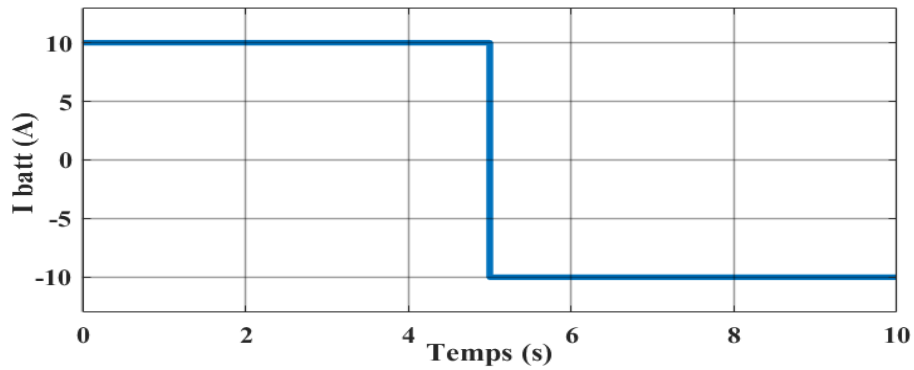


Figure III- 27 Allure de Courant de la batterie

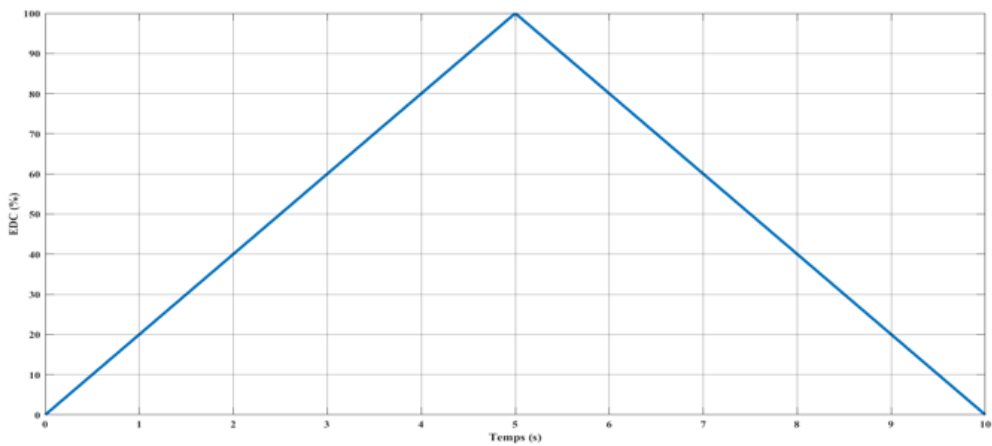


Figure III- 28 Allure d'Etat de charge de la batterie

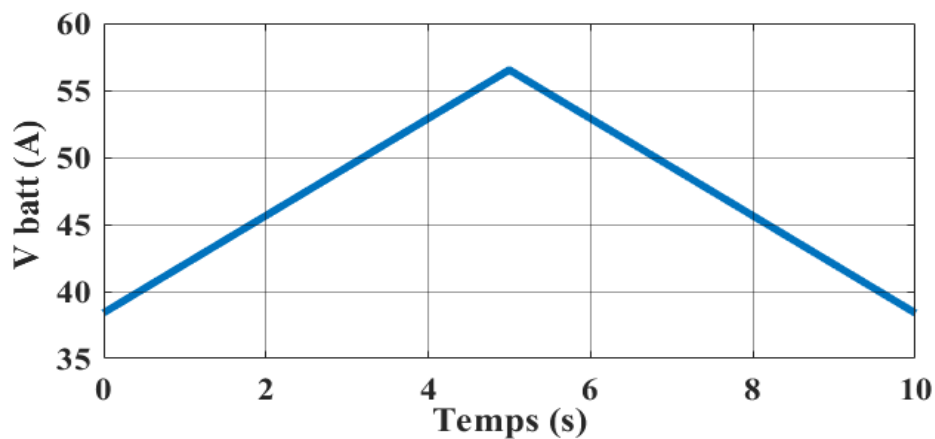


Figure III- 29 Allure de tension de la batterie

Un courant de charge constant d'environ 10 A est appliqué à la batterie entre 0 s et 5 s, suivi d'un courant de décharge de 10 A entre 5 s et 10 s, comme illustré dans la figure (III-27). Sous cet ordre de fonctionnement, l'état de charge (EDC) augmente de manière linéaire de 0 % à 100 % pendant la phase de charge, puis diminue symétriquement de 100 % à 0 % durant la phase de décharge figure (III-28). La tension de la batterie suit exactement le même profil : elle

passer de 38.4 V à 56.5 V lors de la charge, puis redescend progressivement jusqu'à 12 V pendant la décharge figure (III-29), en supposant l'utilisation de quatre batteries connectées en série. Ces résultats simples mettent en évidence l'effet direct du courant imposé : un courant positif permet de stocker l'énergie, augmentant ainsi à la fois l'EDC et la tension, tandis qu'un courant négatif libère l'énergie stockée, entraînant une baisse simultanée de l'EDC et de la tension

III.5 Conclusion

En résumé, les simulations présentées dans ce chapitre ont permis de quantifier et d'analyser le comportement des systèmes photovoltaïque et éolien ainsi que la capacité de stockage de la batterie au plomb. Nous avons analysé l'impact crucial de l'ensoleillement et de la température sur les panneaux solaires et comment la turbine et la génératrice interagissent pour convertir l'énergie du vent. Dans le chapitre suivant, on va voir Gestion et simulation globale du système.



Chapitre IV

Gestion et simulation du
système global

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous débuterons par le dimensionnement du système en analysant d'abord l'énergie consommée par l'habitat et la station de charge puis nous définissons la taille optimale d'un ensemble photovoltaïque-éolien ainsi que la capacité des batteries. Nous aborderons ensuite la stratégie de gestion énergétique et décrirons les différents modes de fonctionnement selon la demande et la disponibilité des ressources, Enfin, une simulation globale sera mise en place pour tester le fonctionnement du système global avec l'algorithme de gestion proposé dans des conditions de fonctionnement variables.

IV.2 Choix des méthodes de dimensionnement

Le choix du site d'implantation et les conditions météorologiques jouent un rôle crucial. Pour ce faire, diverses techniques de dimensionnement peuvent être utilisées.

IV.2.1 Méthode du mois le plus défavorable

Dans cette méthode, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois appelé le mois le plus défavorable. Ce mois correspond au mois pendant lequel l'énergie moyenne mensuelle qu'il produit est la plus faible de l'année. On calcule l'énergie que le système pourra fournir durant cette période critique afin de garantir son autonomie même dans les conditions les plus défavorables.

IV.2.2 Méthode de la moyenne mensuelle

Elle est basée la moyenne de production d'énergie journalière sur toute une année. Elle est généralement utilisée pour des systèmes reliés au réseau [41].

IV.3 Etapes du dimensionnement suivi dans un projet d'installations

- ❖ Présentation et situation géographique du projet à réaliser.
- ❖ Calcul de l'énergie consommée et à produire.
- ❖ Choix et dimensionnement de système hybride (PV, éolien et batterie) [41].

IV.3.1 Présentation et situation géographique du projet à réaliser

Dans ce travail, nous allons présenter un dimensionnement d'un système hybride autonome destiné à alimenter une maison et une station de chargement de véhicule électrique et hybride. L'installation étudiée est située dans la région de Bejaïa : latitude : $36,75^\circ$ N ; longitude : 5.067° E altitude : 153,40 m ; albédo : 0,2.

IV.3.1.1 Estimation de l'ensoleillement sur le site

Les données d'ensoleillement et la vitesse du vent se puisent sur le terrain via cartes régionales ou relevés de la station météo la plus proche pour garantir l'autonomie et lisser les variations saisonnières, il est recommandé de se référer la méthode du mois le plus défavorable [42].

L'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques sont déterminantes pour maximiser leur rendement. On définit :

- ❖ Orientation : direction vers l'équateur (plein sud en hémisphère nord, plein nord en hémisphère sud).
- ❖ Inclinaison : est l'angle entre le panneau et l'horizontale ce qui ajusté selon la latitude et la saison (méthode du mois le plus défavorable ou de la moyenne annuelle) en ajoutant 10° pour capter efficacement le rayonnement.

Dans le cas de l'étude menée à Bejaia, la position optimale des modules sera définie de la manière suivante [41] :

- ❖ Orientation des panneaux : plein sud.
- ❖ L'inclinaison : 45° .

IV.3.2 Analyse de l'énergie consommée et générée

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisir deux types de charge de consommation : une maison pour représenter une consommation quotidienne et une station de recharge pour véhicules électriques représentant une charge à forte puissance.

IV.3.2.1 Maison

Dans notre étude nous considérons une habitation occupée en permanence tout au long de l'année, dont les équipements domestiques fonctionnent sous une tension standard de 230 V à 50 Hz. Par ailleurs, il s'agit d'une maison autonome non raccordée au réseau de distribution d'énergie classique mais équipée de l'ensemble des appareils nécessaires pour garantir le confort de ses occupants.

IV.3.2.2 Station

Cette station conçue pour la recharge de véhicules électriques et hybrides, composée de deux éléments principaux :

- Source d'énergie (PV + éolienne) et système de stockage.

IV.3.2.3 Catégories de bornes de recharge

On distingue deux types de bornes de recharge, aux caractéristiques techniques et fonctionnelles distinctes que nous analyserons en détail ci-après [43].

- ❖ **Bornes de recharge normale** : fournissent du courant alternatif (AC). Lorsque la prise mobile est insérée dans la borne (Figure IV-1 A) elle est hors tension. Lorsqu'elle est branchée au socle de connecteur du véhicule électrique (Figure IV-1 B) la borne détecte la connexion et envoie le courant maximal disponible et attend une confirmation. Après validation, la prise est mise sous tension et la recharge commence ce qui gérée par le chargeur embarqué.

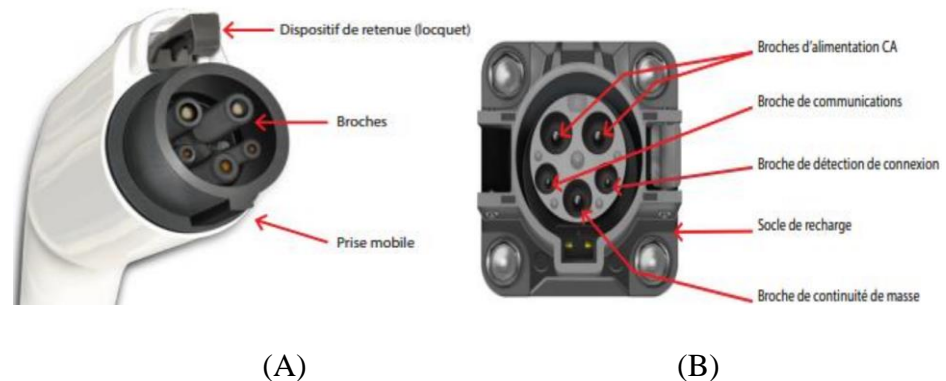


Figure IV- 1Détail de recharge pour véhicules électriques : A) prise de borne, B) socle J1772 [43]

- ❖ **Bornes de recharge rapide (AC ou DC)** : peuvent délivrer du courant alternatif (AC) ou du courant continu (DC). Ces bornes sont équipées de câbles intégrés que l'utilisateur branche directement sur le véhicule (Figure IV-3 A). Les chargeurs rapides en DC effectuent la conversion du courant en amont pour que celui-ci alimente directement la batterie du véhicule avec le socle de recharge (Figure IV-3 B) et en évitant le convertisseur embarqué.

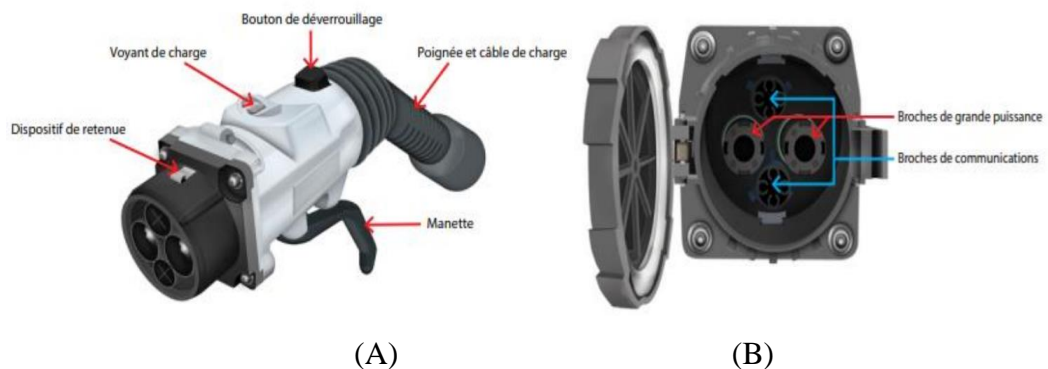


Figure IV- 2 Détail de recharge CHAdeMO : A) prise mobile, B) socle de recharge [43]

IV.3.2.4 Choix de la voiture électrique

Pour cette étude, nous avons retenu un véhicule complètement électrique et un véhicule hybride.

❖ **Smart EQ Fortwo**

Le Smart EQ Fortwo coupe est dotée d'un moteur électrique à aimant permanent de 60 kW (82 ch.) où il délivrant un couple maximal de 160 Nm. Sa batterie de 17,6 kWh de capacité nominale (16,7 kWh utilisable). La recharge s'effectue via une prise Type 2 (AC) à 4,6 kW, permettant de passer de 0 à 100 % en environ 4 h 30 min [44].



Figure IV- 3 Voiture électrique : Smart EQ Fortwo [44].

IV.3.3 Besoin de la charge

Nous avons sélectionné quelques appareils utilisés quotidiennement et qui sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV- 1 Consommation moyenne journalière

Type de la charge	Type	Puissance (W)	Nombre	Durée d'utilisation(h)	Consommation journalière (Wh/jour)
Lampe	AC	25	8	3	600
Mixeur	AC	400	1	1/2	200
Télévision	DC	200	1	3	600
Réfrigérateur	AC	100	1	24	2400
Chargeur mobile	DC	15	5	1	75
Micro portable	DC	30	2	3	180
Micro-onde	AC	600	1	1	600
Modem-wifi	DC	5	1	10	50
Machine à laver	AC	300	1	1	300
Lave-vaisselle	AC	1800	1	1	1800
Moteur de pompe	AC	1500	1	1	1500

La puissance journalière requise pour répondre aux besoins domestiques lorsque tous les équipements fonctionnent simultanément est $\sum P_{M_i} = 5.18 \text{ KW}$.

La consomme d'énergie journalière est : $\sum E_{M_i} = 8.305 \text{ KWh/jour}$

L'énergie consommée par chaque véhicule se fait selon l'équation suivante :

$$E_{veh} = P_{veh} t \quad (IV. 1)$$

$$E_{veh} = 20.7 \text{ KWh}$$

Où :

➤ t : Temps pour charger le véhicule.

L'énergie journalière requise pour la station est :

Le calcul de l'énergie totale consommée par la charge se fait selon l'équation (IV.2) :

$$E_{totale} = E_M + E_{veh} \quad (IV. 2)$$

Le calcul de l'énergie réellement consommée par la maison est exprimé par l'équation suivante :

$$E_M = \frac{\sum E_{M_i}}{\eta_{conv}} \quad (IV. 3)$$

$$E_M = 8.9 \text{ KWh}$$

Et pour l'énergie réellement consommée par la station est exprimé par l'équation suivante :

$$E_{veh} = \frac{E_{veh}}{\eta_{ond}} \quad (IV. 4)$$

$$E_{veh} = 21.8 \text{ kWh}$$

Donc :

$$E_{totale} = 30.7 \text{ KWh}$$

Avec :

- η_{con} : Rendement des convertisseurs.
- η_{hach} : Rendement du hacheur (90%).
- η_{ond} : Rendement de l'onduleur (95%).

La consommation d'énergie journalière totale de la charge est : 30.7 KWh ce qui équivalent une consommation mensuelle de : 921 KWh

IV.4 Dimensionnement du système hybride

Dans le but de faire le dimensionnement du système hybride, la méthode basée sur la moyenne mensuelle annuelle de l'énergie totale incidente a été choisie.

Le tableau ci-dessous montre l'énergie mensuelle produite par la source hybride

Tableau IV- 2 Valeurs des énergies mensuelles produites par : le générateur PV (E_{pv}), le générateur éolien ($E_{éol}$)

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_{pv} [KWh/m ²]	21.6	21.87	25.11	24.97	26.32	25.65	27	27.27	26.05	24.3	21.2	20.25
$E_{éol}$ [KWh/m ²]	106.82	152.51	52.36	47.05	32.57	6.81	20.51	20.51	47.05	48.62	91.9	238.88

Partir de Tableau (IV-2) la valeur moyennes annuelles de chaque contribution mensuelle (\bar{E}_{pv} et $\bar{E}_{éol}$) est exprimée avec les équations (IV.5) et (IV.6) respectivement.

$$\bar{E}_{pv} = \frac{\sum_{m=1}^{12} E_{pv,m}}{12} \quad (\text{IV. 5})$$

$$\bar{E}_{pv} = 24.29 \text{ KWh/m}^2$$

$$\bar{E}_{éol} = \frac{\sum_{m=1}^{12} E_{éol,m}}{12} \quad (\text{IV. 6})$$

$$\bar{E}_{éol} = 72.13 \text{ KWh/m}^2$$

Les surface des deux générateurs photovoltaïque et éoliens est exprimée avec les équations (IV.7) et (IV.8) respectivement.

$$S_{pv,h} = f \frac{\bar{E}_{ch}}{\bar{E}_{pv}} \quad (\text{IV. 7})$$

$$S_{éol,h} = (1 - f) \frac{\bar{E}_{ch}}{\bar{E}_{pv}} \quad (\text{IV. 8})$$

Avec :

➤ f : Fraction de la charge alimentée par la source photovoltaïque.

On a :

$$S_{pv,\text{unitaire}} = L \cdot l = 1,316 \times 0,660 = 0,869 \text{ m}^2$$

$$S_{éol,\text{unitaire}} = \pi R^2 = 7.06 \text{ m}^2$$

Le nombre des panneaux photovoltaïque et éoliens est exprimé avec les équations (IV.9) et (IV.10) respectivement.

$$N_{pv} = ENT \left[\frac{S_{pv,h}}{S_{pv,u}} \right] \quad (\text{IV. 9})$$

$$N_{éol} = ENT \left[\frac{S_{éol,h}}{S_{éol,u}} \right] \quad (\text{IV. 10})$$

La combinaison optimale de PV/éolienne est choisie de manière à rapproche le plus aux besoins de la charge selon l'équation suivante :

$$\bar{E}_{ch} = S_{pv,h} N_{pv} \bar{E}_{pv} + S_{éol,h} N_{éol} \bar{E}_{éol} \quad (\text{IV. 11})$$

Le tableau ci-dessous montre les différents cas possible de combinaison de PV/éolien

f	Spv,h	Séol,h	Npv	Néol	Spvh,n	séol,h,n	Ech
1	37,7540552	0	44	1	38,236	7,06858347	1438,60937
0,9	33,9786497	1,27137945	40	1	34,76	7,06858347	1354,17733
0,8	30,2032441	2,54275891	35	1	30,415	7,06858347	1248,63728
0,7	26,4278386	3,81413836	31	1	26,939	7,06858347	1164,20524
0,6	22,6524331	5,08551782	27	1	23,463	7,06858347	1079,7732
0,5	18,8770276	6,35689727	22	1	19,118	7,06858347	974,233146
0,4	15,1016221	7,62827672	18	2	15,642	14,1371669	1399,65803
0,3	11,3262166	8,89965618	14	2	12,166	14,1371669	1315,22599
0,2	7,55081103	10,1710356	9	2	7,821	14,1371669	1209,68594
0,1	3,77540552	11,4424151	5	2	4,345	14,1371669	1125,2539
0	0	12,7137945	1	2	0,869	14,1371669	1040,82186

À partir du tableau, on déduit que la meilleure combinaison est donnée pour (f=0.5) correspondant à 22 panneaux PV et 1 éolienne.

❖ Nombre de modules en série

La formule suivante permet de calculer le nombre de modules en série :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n} \quad (\text{IV. 12})$$

$$N_s = \frac{465}{35} \approx 13 \text{ Panneaux}$$

❖ Nombre de modules en parallèle

Le nombre de modules en parallèle peut être calculé par la formule suivant :

$$N_p = \frac{N_m}{N} \quad (\text{IV. 13})$$

$$N_p = \frac{22}{13} \approx 2 \text{ Panneaux}$$

Donc on va utiliser 26 panneaux

IV.4.1 Dimensionnement de la batterie

Afin d'augmenter la durée de vie, assurer l'autonomie du système et diminuer le coût global du système nous faisons le dimensionnement du stockage des batteries.

$$C_{batt,T} = \frac{E_{totale,m}}{\eta_b \cdot PDD \cdot U_b \cdot N_{jmax}} \quad (\text{IV. 14})$$

$$C_{batt,T} = \frac{921 * 1000}{0.9 * 0.8 * 48 * 31} = 859.655 \text{ Ah}$$

- $C_{batt,T}$: Capacité des batteries totale(Ah).
- N_{jmax} : Nombre de jours maximal.
- U_b : Tension de batterie(V).
- **PDD** : La profondeur maximale de décharge de la batterie.
- η_b : Le rendement de batterie 90%.

❖ Nombre des batteries en parallèle

$$N_{batt,parallèle} = ENT\left(\frac{C_{batt,T}}{C_{batt,unitaire}}\right) \quad (IV. 15)$$

$$N_{batt,parallèle} = ENT\left(\frac{859.655}{200}\right) = 5 \text{ batteries}$$

❖ Nombre des batteries en série

Pour voir une tension de 48V avec une batterie de 12V il faut mettre 4 batteries en série ($N_{batt,série} = 4 \text{ batteries}$).

Donc le nombre des batteries est 20 batteries de 12V et 200Ah.

IV.5 Gestion d'énergie du système hybride

Le bus de continuité fait le lien central entre les sources PV-éolien, les batteries et la charge, permettant à chaque convertisseur de piloter le courant de façon autonome. Une gestion fine de l'énergie est essentielle : l'excédent de production alimente des batteries plomb-acide qui redistribuent cette réserve lors des creux. Leur durée de vie dépend toutefois d'une protection stricte contre la surcharge, la décharge profonde et les fluctuations thermiques ou électriques. La figure ci-dessous (Figure IV-5) donne un aperçu du sur les différents composants de ce système.

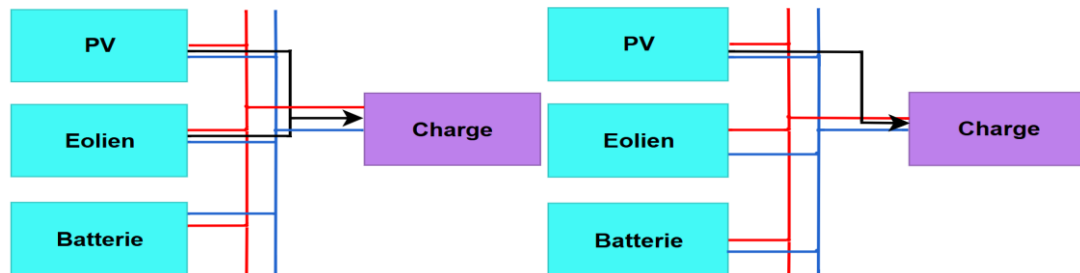
IV.5.1 Différents scénarios de fonctionnement du système de gestion d'énergie du système globale

La Figure IV-6 synthétise l'ensemble des modes de fonctionnement du système hybride. Chaque bloc présente une chaîne de conversion complète :

- ❖ **Bloc PV** : regroupe le champ photovoltaïque, l'algorithme MPPT et le hacheur DC-DC.
- ❖ **Bloc Éolien** : intègre la turbine, la génératrice, le MPPT spécifique et le redresseur.

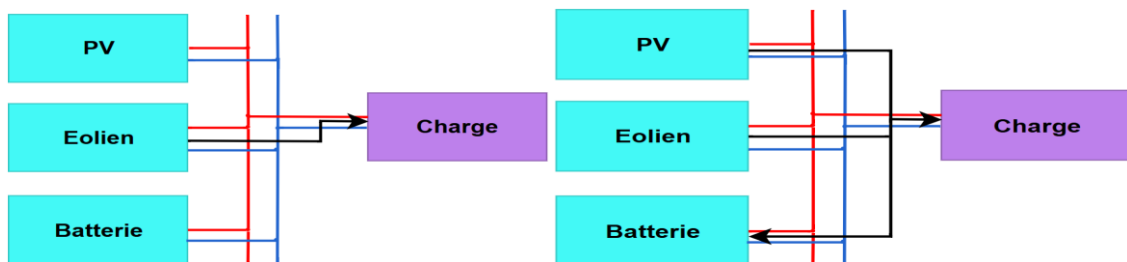
- ❖ **Bloc Batterie** : correspond à la batterie plomb-acide et à son hacheur de charge/décharge.
- ❖ **Bloc Charge** : représente la demande électrique, incluant la maison et la station de recharge pour véhicules électriques et hybrides.

Ainsi, la figure met en évidence les interactions entre production solaire, production éolienne, stockage et consommation et présente tous les scénarios possibles de pilotage du système.



Cas 01

Cas 02



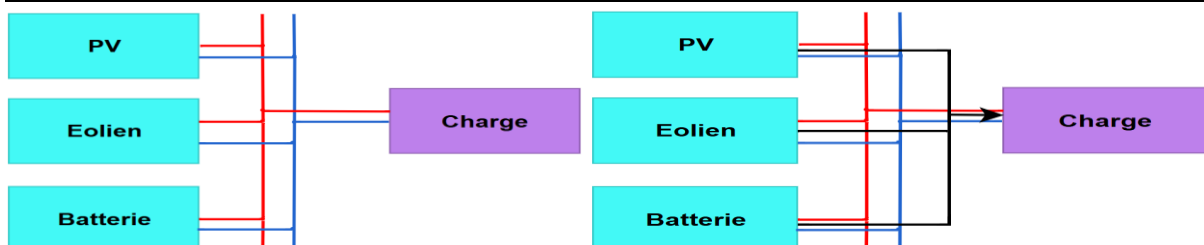
Cas 03

Cas 04



Cas 05

Cas 06



Cas 07

Cas 08

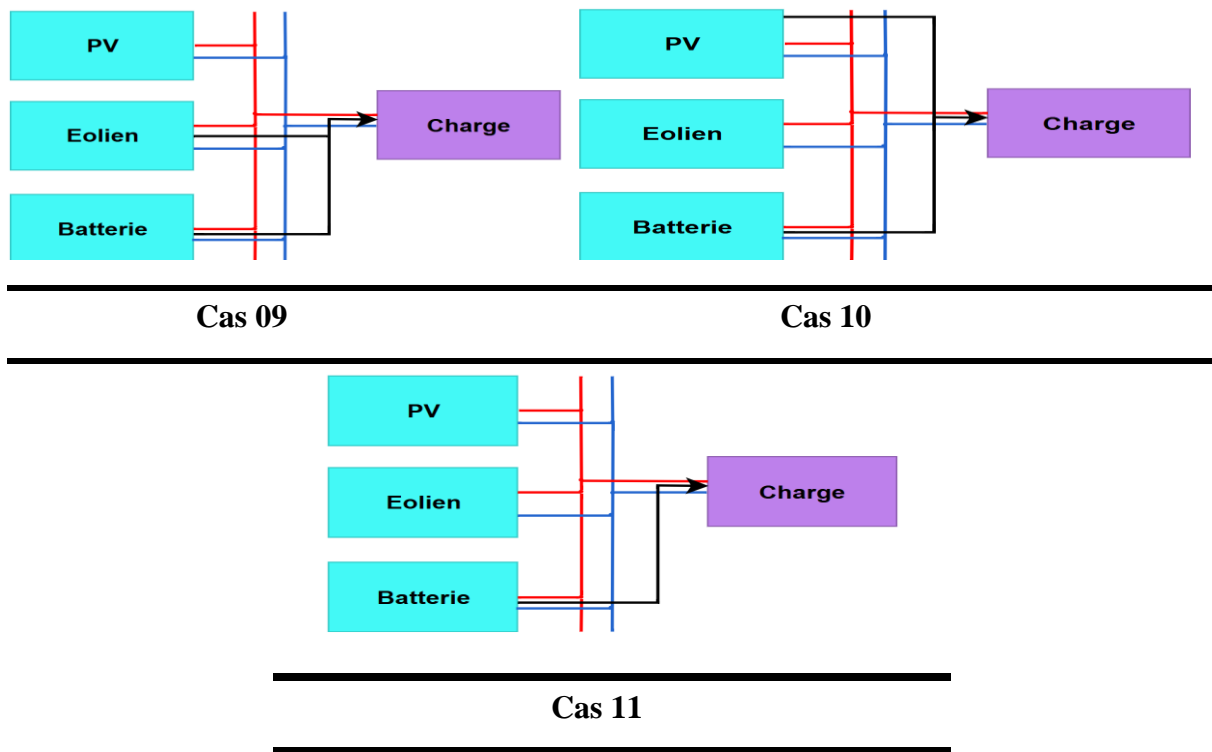


Figure IV- 4 Scénarios de fonctionnement du système hybride

IV.5.2 Modes de fonctionnement

Dans cette partie nous détaillons les différents modes de fonctionnement envisagés pour la gestion efficace de l'énergie au sein du système hybride.

A. Mode 1

Lorsque la puissance générée par le système hybride dépasse celle requise par la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$) et que l'état de charge des batteries principales excède leur seuil maximal ($EDC > EDC_{max}$) la charge est directement alimentée et l'excédent d'énergie est redirigé vers un dispositif de stockage secondaire. Dans ce cas, les batteries principales sont isolées du circuit de charge.

B. Mode 2

Dans ce cas, la puissance fournie par le système hybride excède la demande de la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$) tandis que l'état de charge des batteries est inférieur à leur capacité maximale ($EDC < EDC_{max}$). Le système assure simultanément l'alimentation de la charge et la recharge des batteries.

C. Mode 3

Lorsque la puissance générée par le système hybride est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$) et que l'état de charge des batteries supérieur au seuil

minimal autorisé ($EDC > EDC_{min}$) le déficit énergétique est automatiquement compensé par les batteries.

D. Mode 4

Dans le cas où la puissance fournie par le système hybride est inférieure à la demande de la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$) et que l'état de charge des batteries est inférieur au seuil minimal autorisé ($EDC < EDC_{min}$) le système procède au délestage partiel de la charge. Cette mesure de sécurité vise à préserver l'intégrité des batteries et à maintenir l'équilibre énergétique du système.

E. Mode 5

Lorsque la puissance fournie par le système hybride correspond exactement à la demande de la charge ($P_{hyb} = P_{ch}$) les batteries sont isolées du circuit afin de préserver leur état de charge, L'ensemble de l'énergie produite est alors directement dédié à l'alimentation de la charge.

IV.5.3 Algorithme de fonctionnement de la gestion énergétique

Le gestionnaire d'énergie ajuste en continu la répartition entre la production hybride, la demande et les batteries dont l'état de charge (EDC) oscille entre 30 % et un maximum prédéfini. En cas de surplus et de batteries pleines, l'excédent est dirigé vers un stockage secondaire ou des auxiliaires tandis que si les batteries sont partiellement chargées on alimente simultanément la charge et la recharge. Si aucune demande n'est émise l'énergie disponible recharge les batteries jusqu'à leur capacité max ou alimente les auxiliaires. À l'inverse, lors d'un déficit les batteries compensent le manque tant que leur EDC reste au-dessus de 30 %. En deçà un délestage automatique déconnecte les charges non prioritaires pour protéger l'accumulateur. Lorsque production et consommation se confondent, les batteries sont laissées en repos, préservant ainsi leur durée de vie. Cette stratégie hiérarchisée assure une continuité de services optimaux, une utilisation efficiente des ressources et la longévité du système.

On a :

$$P_{hyb} = P_{pv} + P_{wind} \quad (IV. 16)$$

$$I_{hyb} = I_{pv} + I_{wind} \quad (IV. 17)$$

$$P_{dis} = P_{hyb} + P_{ch} \quad (IV. 18)$$

Avec :

- P_{hyb} : Puissance totale (éolienne et photovoltaïque).
- P_{pv} : Puissance électrique produite par la source photovoltaïque.

- P_{wind} : Puissance électrique produite par la source éolienne.
- I_{hyb} : Courant total fourni par la source hybride (éolienne et photovoltaïque).
- I_{pv} : Courant généré par la source photovoltaïque.
- I_{wind} : Courant généré par la source éolienne.
- P_{dis} : Différence entre puissance photovoltaïque et éolienne (la puissance disponible).

Le tableau IV.6 ci-dessous résume les différents modes existants.

Tableau IV- 3 Représentant les différents modes de fonctionnement

Mode	Puissances	Courants
Mode 1	$P_{hyb} > P_{ch}, EDC \geq EDC_{max}$	$I_{hyb} > 0, I_{ch} > 0, I_{bat} = 0$
Mode 2	$P_{hyb} > P_{ch}, EDC < EDC_{max}$	$I_{hyb} > 0, I_{ch} > 0, I_{bat} = \frac{P_{dis}}{V_c} > 0$
Mode 3	$P_{hyb} < P_{ch}, EDC > EDC_{min}$	$I_{hyb} > 0, I_{ch} > 0, I_{bat} = \frac{P_{dis}}{V_c} < 0$
Mode 4	$P_{hyb} < P_{ch}, EDC < EDC_{min}$	$I_{hyb} > 0, I_{ch} > 0, I_{bat} = 0$
Mode 5	$P_{hyb} = P_{ch}$	$I_{hyb} > 0, I_{ch} > 0, I_{bat} = 0$

IV.5.4 Organigramme de gestion énergétique

La Figure IV- 5 montre d'une manière claire le processus complet de gestion de la puissance.

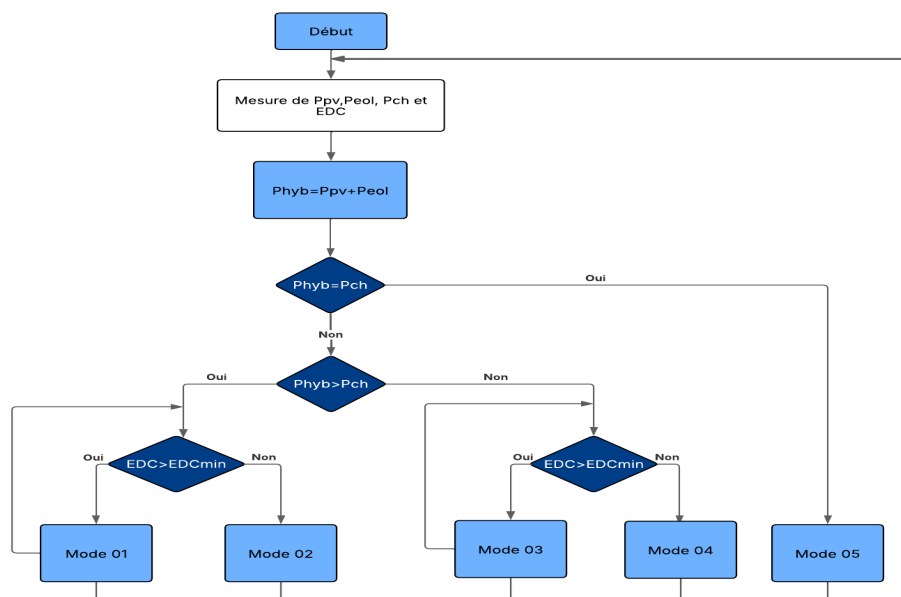


Figure IV- 6 Organigramme de gestion de puissance

IV.6 Simulation du système globale

La figure ci-dessous montre la simulation du système hybride complet. Elle comprend deux chaînes de conversion :

- ❖ Photovoltaïque qui alimentée par un profil d'irradiation variable et une température constante à 25 °C (figure 1).
- ❖ Éolienne qui pilotée par un profil de vitesse de vent variable (figure 2).

Les puissances qui viennent de deux sources sont sommées et envoyées vers un gestionnaire d'énergie qui pilote un hacheur bidirectionnel pour charger ou décharger une batterie en fonction de la production disponible et de la demande. Celle-ci émane de deux consommateurs représentés par des profils de puissance : la maison et la station de recharge de véhicules électriques et hybride. Les signaux de puissance de chaque équipement (pompe, four, etc.) sont additionnés pour obtenir la puissance de charge totale. Pour voir les résultats de la simulation nous avons ajouté des scopes.

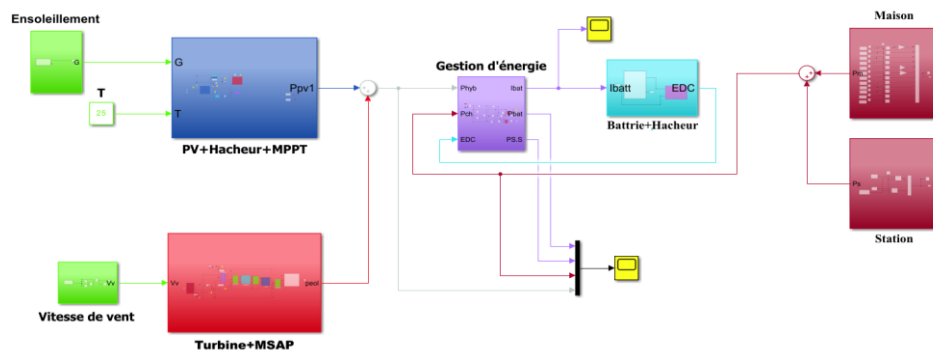


Figure IV- 7 Schéma bloc Matlab du système global

IV.6.1 Résultats de la simulation

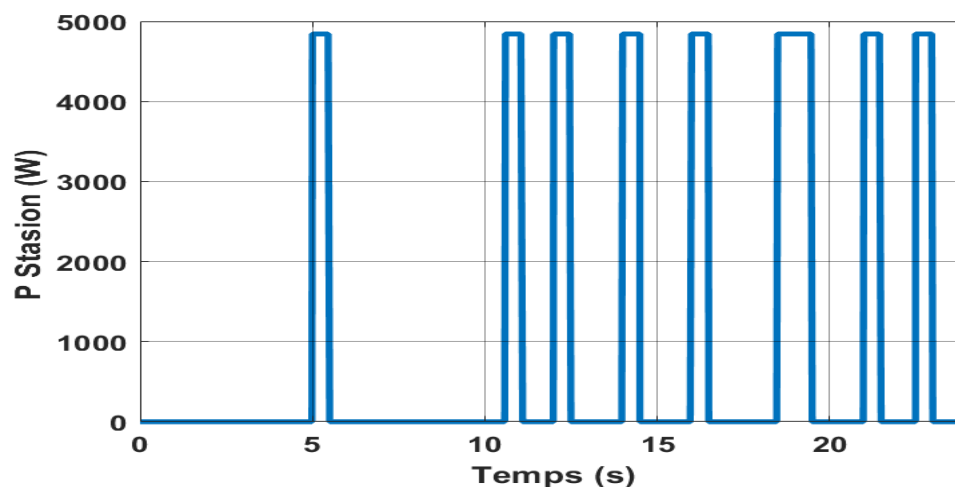


Figure IV- 8 Profil de puissance demandée par la station

Figure (IV-9) montre la puissance consommée par la station de recharge pour véhicules électriques au cours de la journée. On observe que la station commence à consommer de l'énergie dans plusieurs fois dans avec une puissance de 4842Wh. La puissance fixe montre que les véhicules se chargent par sessions contrôlées selon leur état de charge ou la disponibilité des bornes.

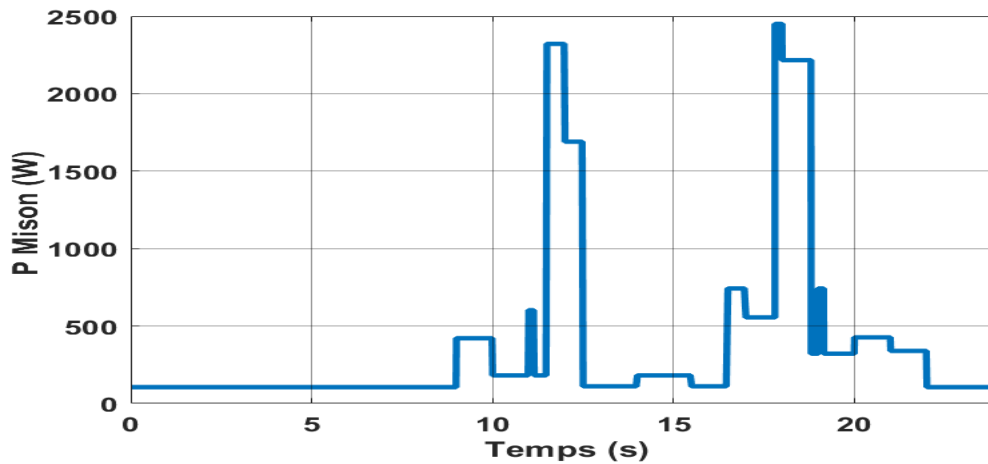


Figure IV- 9 Profil de puissance demandée par la maison

La figure (IV-10) montre la consommation d'électricité de la maison au cours de la journée il varie constamment avec plusieurs pics importants notamment vers 11 h, 12 h et le soir. Cela reflète l'activité normale d'une maison avec une forte demande le matin (appareils électroménagers) le midi (préparation du repas) et le soir (éclairage, télévision, etc.) Il est aussi possible que certains appareils à forte consommation soient utilisés à ce moment-là. Cette variation est typique et montre l'importance de bien gérer la production pour répondre à la demande.

La calcul de l'énergie consommée par la maison peut être calculé par la formule suivant :

$$E_M = \sum P_{t_i} \Delta t$$

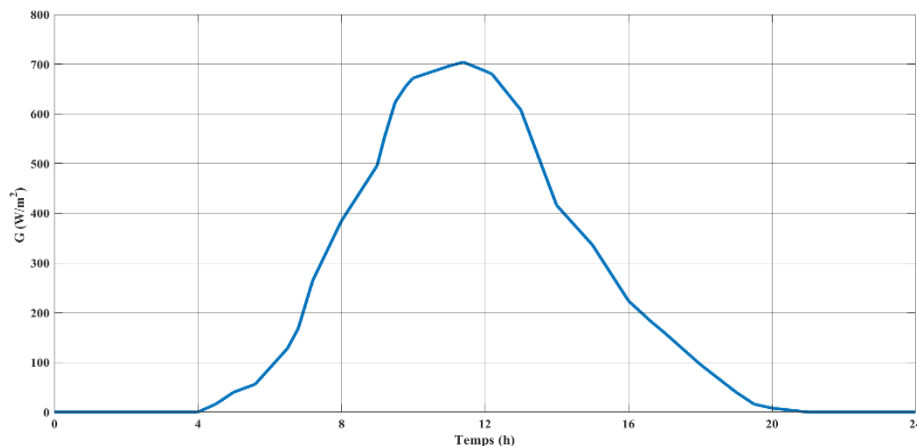


Figure IV- 10 Profile de l'ensoleillement pour un journée d'été

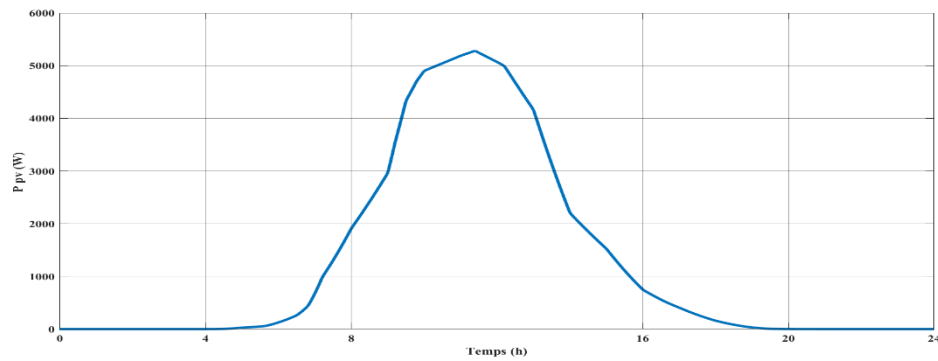


Figure IV- 11 puissance photovoltaïque dans une journée d'été

La Figure IV-11 montre le profil l'ensoleillement considère, il est l'environ 700 W/m^2 vers 11 h et la Figure IV-12 la puissance du panneau atteint près de 1.9 KW au même moment. On voit clairement que la puissance suit l'irradiante : plus le soleil brille plus le module produit. À 25°C , il n'y a pas de perte de rendement due à la chaleur ce qui permet une production optimale entre 9 h et 15 h.

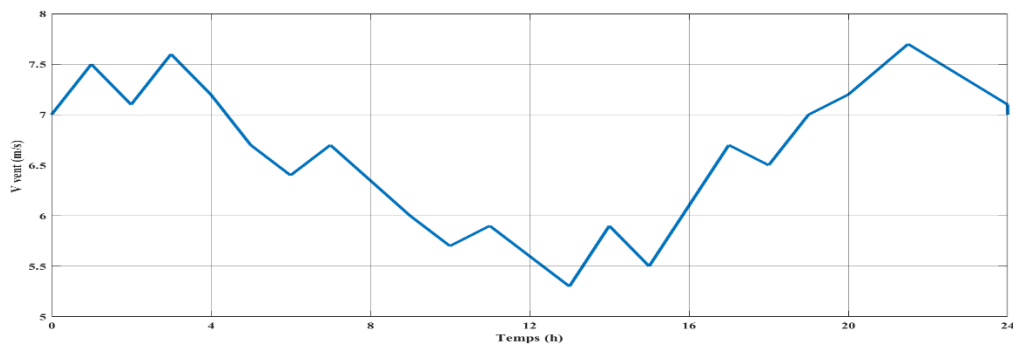


Figure IV- 12 Profil de Vitesse du vent

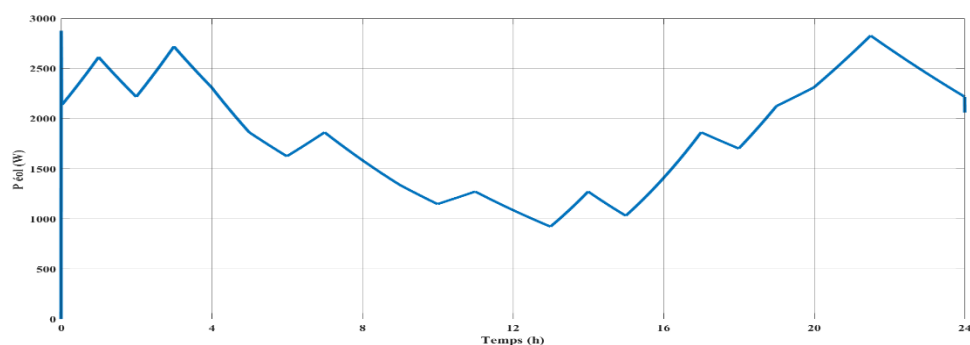


Figure IV- 13 puissance éolienne produite

La courbe de vitesse du vent Figure (IV-13) montre des variations entre 4.9 m/s et 7.6 m/s tout au long de la journée, sans tendance parfaitement régulière, reflétant les fluctuations naturelles du vent. La puissance électrique produite Figure (IV-14) oscille quant à elle entre environ 980

W et 2900 W en suivant ces mêmes variations : dès que la vitesse augmente, la puissance monte fortement, et quand elle baisse, la puissance chute. Cette sensibilité vient du fait que l'énergie disponible dans le vent croît environ avec le cube de la vitesse : un petit gain de vitesse se traduit par un gain de puissance beaucoup plus grand. Ainsi, malgré un vent modéré, le système exploite bien ces variations pour générer jusqu'à 4 kW quand les rafales sont les plus fortes.

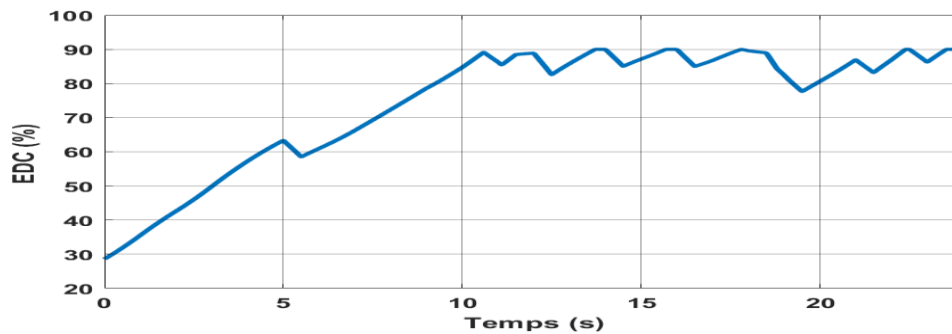


Figure IV- 14 Etat de charge des batteries

L'état de charge de la batterie (EDC) au début de la journée commence de 30% puis augmente lentement le matin pour atteindre 89% % car la production d'énergie excède les besoins et remplit la batterie. Elle charge et décharge entre 11 et 18 à cause de la variation de la consommation et la production d'énergie surtout entre 18 et 19 à cause de forte consommation. À partir de 19h la production recommence à être supérieure à la consommation ce qui relance la charge jusqu'à 89.7 % vers 21h puis elle charge et décharge le reste de la nuit. Ces fluctuations simples reflètent l'alternance quotidienne entre surplus et déficit de production par rapport à la consommation.

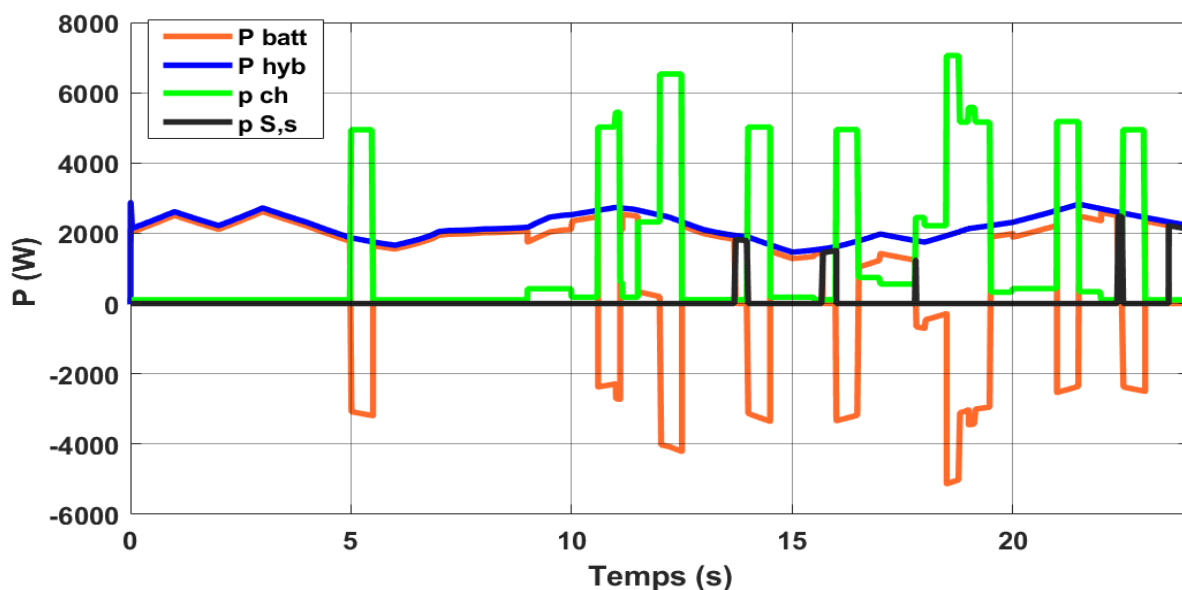


Figure IV- 15 Evolution des puissances pendant une journée

- **Puissance hybride** : Elle varie entre environ 1660 W et 2830 W selon l'ensoleillement et la vitesse du vent. On remarque qu'il reste relativement stable, ce qui reflète les avantages de la combinaison de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne car elles sont complémentaires..
- **Puissance de la charge** : On remarque des pics de consommation entre 9 h et 16 h quand les appareils sont le plus sollicités (machine à laver, station de véhicule, etc.). Ces pointes sont parfois plus élevées que la production hybride ce qui crée un besoin en énergie supplémentaire.
- **Puissance de la batterie** : Quand la différence entre P_{hyb} P_{ch} est positif la batterie se recharge (le matin) quand la production dépasse la consommation. Quand il négatif la batterie décharge pour compenser un déficit de production face à la demande.
- **Puissance de stockage supplémentaire** : Ce système prend le relais uniquement quand la batterie principale est pleine et qu'il reste encore un excès de production. On observe ainsi quelques pics noirs lorsque le surplus ne peut plus être stocké dans la batterie.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système hybride composé de sources photovoltaïque et éolienne, utilisé pour alimenter une charge. Nous avons expliqué comment gérer ce type de système en assurant un bon équilibre entre la production et la demande d'énergie. Ensuite, nous avons réalisé une simulation globale qui montre le fonctionnement du système dans différentes conditions. Les résultats obtenus prouvent que le système hybride fonctionne de manière efficace, même en cas de variation du soleil ou du vent.

A decorative frame shaped like a horizontal scroll. It has a central rectangular area with rounded corners, a vertical strip on the left side, and small circular loops at the top-left and top-right corners.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de fin d'études a porté sur, la modélisation et la simulation d'un système hybride de production d'énergie en combinant des sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne) pour proposer une solution technique capable de produire de l'énergie de manière autonome et optimisée et même assurant une gestion efficace de l'intermittence des ressources naturelles.

Dans un premier temps nous avons étudié les principes fondamentaux des énergies renouvelables et les avantages de leur combinaison dans une architecture hybride après nous avons modélisé mathématiquement les différents composants du système (générateurs PV, éoliens, convertisseurs et le système de stockage) pour représenter le comportement de chaque sous-système avec précision.

Par la suite des simulations numériques ont été réalisées dans l'environnement Matlab/Simulink qu'ont permis d'analyser l'influence des paramètres climatiques sur la production d'énergie et de valider les stratégies de commande utilisées, l'analyse des résultats a montré que le système hybride étudié permet de garantir une continuité d'alimentation, une meilleure stabilité et un rendement énergétique amélioré.

En conclusion ce projet confirme l'intérêt et la pertinence des systèmes hybrides dans le contexte d'utilisation l'énergie renouvelable et il constitue une base solide pour des travaux futurs notamment en ce qui concerne l'optimisation de la gestion de l'énergie.



Références Bibliographiques

Références Bibliographique

- [1] International Energy Agency « IEA ». Renewables 2021 – Analysis and forecasts to 2026. International Energy Agency, 2021.
- [2] <https://www.cned.fr/> consultation le septembre 2021.
- [3] <https://www.ecoco2.com/blog/les-energies-renouvelables-premiere-source-delectricite-en-europe/> consultation le 20/06/2025.
- [4] Ferrah B. Étude d'un système hybride « photovoltaïque–éolien ». Mémoire de master en Électrotechnique, Université de Annaba, 2015.
- [5] <https://www.elkhabar.com/fr/actualite/l-algerie-au-coeur-de-la-transition-energetique-mondiale-254198-02/05/2025> consultation le 20/06/2025.
- [6] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie> consultation le 20/06/2025.
- [7] Khabzaoui N, Kabir A. & Ouguerouz K. Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque. Mémoire de master en Électrotechnique, Université de Bejaia.
- [8] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite> 02/05/2025
- [9] Le bilan 2002 des énergies renouvelables, Revue Système Solaire, n° 148, pp. –, 2002.
- [10] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/batiment-quest-ce-geothermie-577/> consultation le 20/06/2025.
- [11] Khelfat L & Maataoui L, Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire de master en Électrotechnique, Université Annaba, 2017.
- [12] <https://view.genially.com/650c43329041b000122e1e98/interactive-image-fonctionnement-dune-centrale-biomasse> consultation le 20/06/2025.
- [13] Labbé J, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENMP), 2006.

Références Bibliographiques

- [14] Croci L, Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs, Thèse de doctorat, Université de Poitiers « ÉNSIP », 2013.
- [15] <https://www.tucoenergie.fr/guides/rendement-panneau-solaire> consultation le 20/06/2025.
- [16] Chauhan A. & Saini R. P., « A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications : Configurations, storage options, sizing methodologies and control », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 38, pp. 99–120, 2014.
- [17] Lund H., « The role of energy storage and conversion technologies in the future energy system », Energy, vol. 50, pp. 1–5, 2012.
- [19] Zarour L, Étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque–éolien hors réseau, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [20] Patel M. R., Wind and Solar Power Systems : Design, Analysis, and Operation, Taylor & Francis Group, 2006.
- [21] Bencherif M., Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens : intégration dans un système hybride basse tension, Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [22] Croci L., Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers & École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Université de Poitiers, 2006.
- [23] Garcia-Gutiérrez L. A., Développement d'un contrôle actif tolérant aux défaillances appliqué aux systèmes PV, Thèse de doctorat (cotutelle : Université Toulouse III Paul Sabatier & Universidad de Los Andes),
- [24] Tran D. H., “Conception optimale intégrée d'une chaîne éolienne “passive” : Analyse de robustesse, validation expérimentale”, Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2010.
- [25] Croci L., Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs, Thèse de doctorat, École Nationale

Références Bibliographiques

Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers & École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Université de Poitiers, 2006.

[26] 2025, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vertical-axis-wind-turbine> consulté le 4 mai

[27] <https://eoliennessite.wordpress.com/avantages-et-inconvenients-des-eoliennes/> consulté en novembre 2025

[28] Tripathi S. M., Tiwari A. N. & Singh D., “Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems : A technology review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 51, pp. 1288–1305, 2015.

[29] <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/> consulté le 11 mai 2025

[30] Djilat Z. & Bouras S., Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque : application à la région de M'sila, Master Académique en Physique Energétique et Energies Renouvelables, Université Mohamed Boudiaf – M'Sila, 2019.

[31] Buchet E., Étude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de systèmes de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, Aix-Marseille, juillet 1988.

[32] E. Buchet, « Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988

[33] Achaibou N., Malek A. & Bacha N., « Modèle de vieillissement des batteries plomb-acide dans l'installation PV », Génie Électrique (spécial CHEMSS), 2000.

[34] Labbé J., L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENMP), 2006.

Références Bibliographiques

- [35] Ouadfel Y. & Lamara L., Étude et optimisation d'un système photovoltaïque, Mémoire d'ingénieur d'État en électronique, Université de Bejaia, 2011.
- [36] IFP Énergies Nouvelles, « Énergie éolienne : transformer le vent en électricité », consulté le 2 mai 2025, <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>.
- [37] Abbes H., Hafedh A., Loukil K., Toumi A. & Abid M., « Étude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Conférence Internationale des Énergies Renouvelables (CIER'13), Sousse (Tunisie), pp. 1–6, 2013.
- [38] Bensmail S., Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques, Mémoire de Magistère, Université de Bejaia, 2011/2012.
- [39] Belkaid A., Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2015.
- [40] Singo A. T., Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de doctorat, Université Henri, 2010.
- [41] Rekioua J, Application aux Systèmes de conversion d'énergie électrique photovoltaïque, université de Bejaia
- [42] S. Petibon, « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat de l'université de toulouse, 2009.
- [43] <https://www.leszelectriciens.fr/2-bornes-z%C3%A9lectriques/> consulte le 22 juin 2025
- [44] <https://www.evspecs.org/tech-specs/smart/eq-fortwo-coupe/60-kw?utm> consulté le 22 juin 2025,
- [45] CHALANE M. & CHERFI Y « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanent »universitaire Bejaia 2022.



Annexes

Le tableau suivant représente les paramètres du système photovoltaïque :

Tableau III- 1 Paramètre du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24 [35]

Symbole	Paramètres	Valeurs
P_{mpp}	Puissance maximale du panneau	110 W
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximal	3.15 A
V_{mpp}	Tension au point de puissance maximal	35 V
I_{cc}	Courant court-circuit	3.45 A
V_{oc}	Tension en circuit ouvert	43.5 V
α_{cc}	Coefficient d'incrémentement du courant	1.4 mA/°C
β_{cc}	Coefficient d'incrémentement de la tension	-152 mV/°C

Le tableau suivant représente les paramètres du système éolien :

Tableau III- 2 Les paramètres du schéma bloc du système éolien[45]

Les paramètres de la turbine						
R	Rho	G	f		J	C_{pmax}
1.5m	1.225[Kg/m ²]	1	0.001[N.m.s/rad]		0.008[Kg.m ²]	0.5270
Les paramètres de la MSAP						
L_d	L_q	J	P	φ_{sf}	R_s	f
8.524e − 4[H]	9.515e − 4[H]	0.1[Kg.m ²]	4	0.12[Wb]	0.1738[Ω]	0.0085[N.m.s/rad]
Les paramètres des régulateurs						
I_d			I_q		ω	
$K_i = 2453.88$			$K_i = 2453.88$		$K_i = 297.22$	
$K_p = 2.04$			$K_p = 2.04$		$K_p = 11.57$	

Résumé

Ce projet de fin d'études vise la conception et la simulation d'un système hybride de production d'énergie électrique (panneaux photovoltaïques et une éolienne) qui adapté aux sites isolés pour assurer l'alimentation continue et autonome d'une maison et d'une station de recharge des véhicules électriques qui repose sur une énergie de $974,23 \text{ KWh/m}^2$ (surface de générateur photovoltaïque de $19,118 \text{ KWh/m}^2$ obtenue grâce à 22 panneaux de marque Siemens SM 110-24 et sur une éolienne capable de fournir jusqu'à 5 kW. Pour garantir la disponibilité de l'énergie même en l'absence de soleil ou de vent et l'axe d'énergie est stockée dans un banc de 20 batteries plomb. Ce choix permet une meilleure durée de vie et une performance plus stable par rapport aux technologies classiques. La demande énergétique maximale qui regroupe les besoins de la maison et de la station de recharge atteint une valeur maximale de 8.305 KWh/jour . Cette demande variable doit être satisfaite malgré les fluctuations naturelles de l'ensoleillement et du vent. Pour optimiser la production solaire nous avons met un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin de suivre en permanence le point de puissance maximale des panneaux toute ça été modélisé et simulé dans l'environnement MATLAB/Simulink pour évaluer ses performances. Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement durable en cherchant à combiner énergies propres, stockage performant et gestion intelligente de l'énergie.

Mots Clés : Système hybride photovoltaïque-éolien, Panneaux photovoltaïques, Éolienne, Stockage énergie, Sites isolés, Maison individuelle, Station recharge véhicules électriques, Suivi du point de puissance maximale, MPPT, Optimisation production solaire, Gestion intelligente de l'énergie, Conception système hybride, Développement durable.

Abstract

This final year project aims at the design and simulation of a hybrid electric energy production system (photovoltaic panels and a wind turbine) which is adapted to isolated sites to ensure continuous and autonomous power supply for a house and an electric vehicle charging station. It relies on an energy of 974.23 kWh/m^2 (photovoltaic generator surface of 19.118 kWh/m^2 obtained using 22 Siemens SM 110-24 panels) and on a wind turbine capable of providing up to 5 kW. To guarantee energy availability even in the absence of sun or wind, the energy axis is stored in a bank of 20 lead-acid batteries. This choice allows for a longer lifespan and more stable performance compared to conventional technologies. The maximum energy demand, which includes the needs of the house and the charging station, reaches a peak value of 8.305 kWh/day . This variable demand must be met despite natural fluctuations in sunlight and wind. To optimize solar production, we have implemented an MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithm to continuously track the maximum power point of the panels. All of this has been modelled and simulated in the MATLAB/Simulink environment to evaluate its performance. This work is part of a sustainable development approach by seeking to combine clean energy, efficient storage, and intelligent energy management.

Keywords: Photovoltaic-wind hybrid system, Photovoltaic panels, Wind turbine, Energy storage, Isolated sites, Individual house, Electric vehicle charging station, Maximum power point monitoring, MPPT, Solar production optimization, Intelligent energy management, Hybrid system design, Sustainable development.

الملخص

هذا مشروع نهائية الدراسة يهدف إلى تصميم ومحاكاة نظام هجين لإنتاج الطاقة الكهربائية (ألواح شمسية وتوربين رياح) يتناسب مع المواقع المعزولة لضمان تغذية مستمرة ومستقلة لمنزل ومحطة شحن للسيارات الكهربائية، ويعتمد على طاقة قدرها 974.23 ك.و.س/م²) مساحة المولد الكهروضوئي تبلغ 19.118 ك.و.س/م² تم الحصول عليها بفضل 22 لوحًا من نوع (Siemens SM 110-24) وعلى توربين رياح قادر على توفير طاقة تصل إلى 5 ك.و. لضمان توفر الطاقة حتى في غياب الشمس أو الرياح، يتم تخزين الطاقة في مجموعة من 20 بطارية رصاص. هذا الاختيار يسمح بعمر افتراضي أفضل وأداء أكثر استقرارًا مقارنة بالتقنيات التقليدية. يصل الطلب الطاقوي الأقصى الذي يشمل احتياجات المنزل ومحطة الشحن إلى قيمة قصوى قدرها 8.305 ك.و.س/اليوم. يجب تلبية هذا الطلب المتغير رغم التقلبات الطبيعية في الإشعاع الشمسي والرياح. ولتحسين الإنتاج الشمسي قمنا بوضع خوارزمية MPPT (تتبع نقطة القدرة القصوى) من أجل تتبع دائم لنقطة القدرة القصوى للألواح، تم نمذجة ومحاكاة كل ذلك في بيئة MATLAB/Simulink لتقييم الأداء. يندرج هذا العمل ضمن نهج التنمية المستدامة من خلال السعي للجمع بين الطاقات النظيفة والتخزين الفعال والإدارة الذكية للطاقة.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين كهروضوئي-رياحي، الألواح الكهروضوئية، توربين رياح، تخزين الطاقة، المواقع المعزولة، منزل فردي، محطة شحن السيارات الكهربائية، تتبع نقطة القدرة القصوى، MPPT، تحسين الإنتاج الشمسي، الإدارة الذكية للطاقة، تصميم نظام هجين، التنمية المستدامة.