



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي-تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa

معهد المناجم

Institut des Mines et Géotechnologie

قسم المناجم والجيوتكنولوجيا

Département Mines et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Modélisation et simulation d'un système hybride

(Cas de la cimenterie de Elma-Labiod Tébessa)

Présentée tsoutenu par :

Brinis Aymen et Zermat Mohamed Merzoug

Devant le jury :

Daouadi Rabah	MCA	President	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa
Chaouki Melkia	MCB	Encadreur	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa
Fares Zaamouche	MCA	Examineur	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa

Promotion :2023/2024



Année universitaire : 2023/2024

Tébessa le : 08.06.2024

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1_ brinis aymen

2_ zermat mohamed merzoug

Niveau : 2^{ème} années master Option : électromécanique

Thème : Modalisation et simulation d'un système d'énergie hybride

Nom et prénom de l'encadreur : Melkia chaouki

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 01 : Présentation de lieu de stage "Cimentrie Elma-labiod-Tébessa"	
Chapitre 02 : Généralités sur les énergies renouvelables	
Chapitre 03 : les éléments d'un system Renouvelable	
Chapitre 04: Modélisation et simulation d'un système hybride	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) نور عابد مريم مريوم..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : الب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 45.19.2.886.. و الصادرة بتاريخ 2022/06/02.....

المسجل بمعهد المناجم..... قسم الكمبيوتر و ميكانيك.....

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

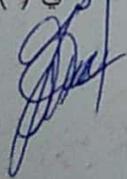
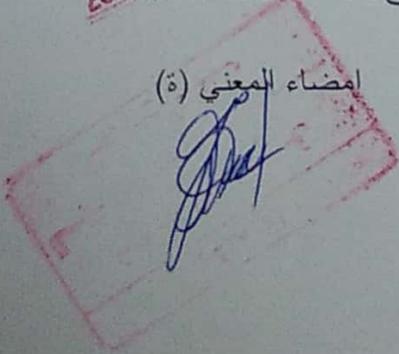
Modelisation et simulation d'un système
d'énergie hybride.....

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

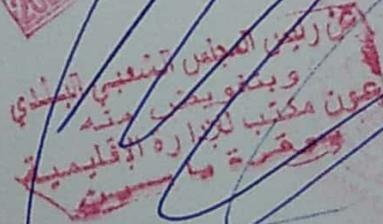
06 جوان 2024

التاريخ:.....

امضاء المعني (ة)

06 جوان 2024



مدير المعهد
و يتعهد بصدق منه
يعون مكتب لبحارة الإقليمية
بمقرسة و بالاسم

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة)..... برينيس أيمن..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 409205891 و الصادرة بتاريخ 2022/06/23

المسجل بمعهد المتاح قسم الإلكترونيات

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Modélisation et simulation d'un
systeme d'energie hybride

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

08 MAI 2024

التاريخ:.....

امضاء المعني (ة)

المطابقة ط.الامضاء
Brinis



برئيس المجلس الشعبي البلدي
والتفويض منه
امضاء: سماتي كمال
عون الإدارة الإقليمية





Remerciements



Ce mémoire est l'aboutissement d'un parcours accompli en dix-sept ans qu'on n'aurait pas pu la réaliser nous seules. On remercie Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de « **Dr. Melkia chaouki** », on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel et pour sa patience, et leur disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs de l'institut des mines pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos remerciements s'adressent à tout le personnel administratif et ouvrier du département d'électromécanique pour leur accueil chaleureux et l'ambiance de travail agréable et particulièrement un merci spécial pour le chef de département

Un grand merci pour nos familles, surtout nos parents qui nous épaulent, soutiennent et suivent tout au long de ce projet.

Enfin un merci à nos chers amis qui ont toujours été présents et fidèles. Nos ténus ont remercié chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce cheminement.



Dédicace



À ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce voyage intellectuel.

À mes parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont été une source constante de motivation et d'encouragement.

À [A.D], Pour ton amour, ton soutien et ta présence inébranlables. Ta patience et ta foi en moi ont rendu ce parcours possible. Ce mémoire t'est dédié, avec toute ma gratitude et mon amour

À mes amis, pour leur compréhension, leur patience et leurs encouragements durant les moments les plus intenses de ce travail.

À mes professeurs et mentors, pour leur guidance et leur partage généreux de connaissances, sans lesquels ce mémoire n'aurait pas été possible.

Avec toute ma gratitude et mon affection,

[Brinis Aymen]

[Zermat Mouhamed Merzoug]

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Chaîne de production de la cimenterie d'El-Ma-Labioud-Tébessa.....	07
Figure I.2	Organigramme représentatif de la structure de SCT Tébessa.....	08
Figure I.3	Représentation du diagramme de la consommation en matières premières.....	11
Figure I.4	Représentation graphique de la consommation en énergie calorifique.....	13
Figure I.5	Représentation graphique de la consommation en énergie électrique.....	15

Chapitre II

Figure II.1	Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables.....	20
Figure II.2	L'énergie éolienne.....	22
Figure II.3	Énergie chimique.....	23
Figure II.4	Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible	24
Figure II.5	Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.....	25
Figure II.6	Conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique.....	25
Figure II.7	Cycle de l'énergie de la biomasse.....	26
Figure II.8	Une source d'énergie géothermique	27
Figure II.9	Énergie solaire thermique.....	28
Figure II.10	Le fonctionnement du solaire thermodynamique.....	29
Figure II.11	Module photovoltaïque.....	30
Figure II.12	Schéma de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque.....	31
Figure II.13	Influence de T et R_s sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire.....	32
Figure II.14	Fonctionnement d'une énergie éolienne.....	36
Figure II.15	Schéma de la chaîne énergétique.....	37
Figure II.16	Influence des vents.....	38
Figure II.17	Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles).....	39

Chapitre III

Figure III.1	Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.....	42
Figure III.2	Conversion d'énergies photovoltaïques.....	43
Figure III.3	Panneaux solaires.....	43
Figure III.4	La cellule photovoltaïque.....	44
Figure III.5	Cellules (a) multi-jonction, (b) silicium monocristallin, (c) silicium poly cristallin et (d) silicium amorphe en couche mince.....	45
Figure III.6	Branchement de panneaux en série.....	47
Figure III.7	Régulateur de charge mppt.....	49
Figure III.8	Point de puissance maximum avec régulation MPPT et sans régulation MPPT	49
Figure III.9	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	50
Figure III.10	Algorithme du Constante Tension	51
Figure III.11	Algorithme du constant courant.....	52
Figure III.12	Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	53
Figure III.13	L'algorithme de P&O classique.....	54
Figure III.14	Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN).....	55
Figure III.15	Structure de base de la commande floue.....	56
Figure III.16	Exemple d'un réseau de neurones.....	56
Figure III.17	Batterie solaire.....	57
Figure III.18	Variation de la résistance interne.....	57
Figure III.19	Caractéristique de charge d'une batterie.....	58
Figure III.20	Caractéristique de décharge d'une batterie.....	59
Figure III.21	Onduleur triphasé.....	59
Figure III.22	Principe d'un onduleur autonome en demi-pont.....	60

Figure III.23	Commande les interrupteurs k1 et k2.....	60
Figure III.24	Structure d'un onduleur triphasé en pont.....	61
Figure III.25	Interrupteur de puissance avec IGBT et diode.....	61
Figure III.26	Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 120°.....	62
Figure III.27	Construction des chronogrammes des tensions composées.....	63
Figure III.28	Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 180°.....	64
Figure III.29	Chronogrammes des courants parcourant les interrupteurs.....	65
Figure III.30	Point de puissance maximal.....	65
Figure III.31	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	68
Figure III.32	Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	69
Figure III.33	Eoliennes à axe horizontal.....	69
Figure III.34	Eolienne à axe vertical.....	70
Figure III.35	Composante d'une éolienne de forte puissance.....	71
Figure III.36	Schéma de principe du rotor.....	71
Figure III.37	Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.....	72
Figure III.38	Les arbres d'un system éolienne.....	72
Figure III.39	Frein à disque.....	73
Figure III.40	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	73
Figure III.41	Multiplicateur et ses engrenages.....	75
Figure III.42	Génératrice (a) annulaire (b) en montage.....	76
Figure III.43	Fonctionnement d'une génératrice MSAP.....	76
Figure III.44	Contrôleur d'une éolienne.....	78
Figure III.45	Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.....	78
Figure III.46	Principe de base de l'onduleur.....	79
Figure III.47	Principe de base du redresseur.....	79
Figure III.48	Principe de base d'un hacheur.....	80
Figure III.49	Circuit d'hacheur série (abaisseur).....	80
Figure III.50	Circuit d'hacheur parallèle (élevateur).....	80
Figure III.51	Circuit d'hacheur buck-boost.....	81
Figure III.52	Principe de base du gradateur.....	82
Figure III.53	La structure d'un gradateur monophasé.....	82
Figure III.54	Différents types de tours.....	83

Chapitre IV

Figure IV.1	Modèle des systèmes hybride avec batterie lithium.....	85
Figure IV.2	Système photovoltaïque.....	86
Figure IV.3	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	86
Figure IV.4	Schémas bloc de courant de générateur photovoltaïque.....	88
Figure IV.5	Caractéristique $Ppv = f(Vpv)$ et $Ipv = f(Vpv)$ d'un panneau solaire.....	89
Figure IV.6	Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.....	90
Figure IV.7	Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque.....	91
Figure IV.8	Bloc diagramme panneau solaire avec convertisseur DC/DC.....	91
Figure IV.9	Courbe de la tension d'entrée et la tension de sortie et courant sortie.....	92
Figure IV.10	Architecture globale de la chaîne éolienne « passive ».....	92
Figure IV.11	Turbine éolienne.....	93
Figure IV.12	Principe de théorie de loi de BETZ.....	94
Figure IV.13	Courbe de puissance de la turbine (angle de tangage $\beta = 0 \text{ deg}$).....	94
Figure IV.14	Schéma d'un enroulement triphasé et du repère (d, q).....	95
Figure IV.15	Les différents couples qui agissent sur le rotor.....	97
Figure IV.16	Redresseurs triphasés.....	97

Figure IV.17	Block diagramme du system éolienne.....	99
Figure IV.18	Résultat simulation à l'entrée de la turbine.....	100
Figure IV.19	Résultat simulation à la sortie de la turbine.....	101
Figure IV.20	Modèle physique de la pile à combustible.....	102
Figure IV.21	Les courbes $I(v)$, $I(p)$ avec MPPT.....	103
Figure IV.22	Caractéristique de la pile à combustible.....	104
Figure IV.23	Bloc diagramme de la pile à combustible avec hacheur boost.....	105
Figure IV.24	Résultat simulation à l'entrée de la pile à combustible.....	105
Figure IV.25	Bloc de l'état de charge.....	107
Figure IV.26	Bloc de l'état de Décharge.....	108
Figure IV.27	Bloc diagramme de batterie avec hacheur boost.....	108
Figure IV.28	Les paramètres de la batterie Lithium de Matlab.....	109
Figure IV.29	Les graphes de l'états de charge et de décharge de la batterie.....	109
Figure IV.30	Schémas de bloc diagramme de l'onduleur triphasé.....	111
Figure IV.31	Blocks diagramme de system hybride avec onduleur triphasé et charge.....	112
Figure IV.32	Graphes du (courant, tension, puissance) d'un system hybride.....	113
Figure IV.33	Blocks diagramme de system hybride avec transformateur triphasé.....	114
Figure IV.34	La courbe de la puissance des systèmes hybride.....	114

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	Réserves de la matière première utilisée en fabrication du ciment.....	10
Tableau I.2	Consommation antérieure en matières premières.....	10
Tableau I.3	Consommation antérieure en eau.....	12
Tableau I.4	Consommation antérieure en énergie calorifique.....	13
Tableau I.5	Consommation antérieure en énergie électrique.....	14
Tableau I.6	Consommation énergétique du broyeur cru et ciment	16

Chapitre II

Tableau II.1	Potentiel solaire en Algérie.....	33
Tableau II.2	Les prévisions de consommation électrique selon la CREG.....	41

Chapitre III

Tableau III.1	Comparaison entre les cellules à base de silicium.....	48
Tableau III.2	Rendement réel des modules.....	48
Tableau III.3	Fonctionnement k1 et k2.....	60
Tableau III.4	Gain en tension des convertisseurs.....	81

Chapitre IV

Tableau IV.1	Caractéristiques d'entrée et sortie d'un panneau photovoltaïque avec convertisseur DC/DC.....	91
Tableau IV.2	Caractéristiques de puissance de la turbine.....	95
Tableau IV.3	Les caractéristiques entrées Avant Redresseur (AC/DC) et hacheur boost.....	99
Tableau IV.4	Les caractéristiques sorties après Redresseur (AC/DC) et hacheur boost.....	99
Tableau IV.5	Caractéristique entrée et sortie de la pile combustible.....	104
Tableau IV.6	Puissances des systèmes hybrides.....	110
Tableau IV.7	Tableaux de Karnough des systèmes hybrides.....	110



Sommaire

II.4	L'énergie éolienne.....	35
II.4.1	Définition.....	35
II.4.2	Comment produire l'énergie éolienne ?	35
II.4.3	Les différentes énergies éoliennes.....	36
II.4.3.1	L'énergie éolienne terrestre.....	36
II.4.3.2	L'énergie éolienne en mer.....	36
II.4.4	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	36
II.4.4.1	Les avantages de l'énergie éolienne.....	36
II.4.4.2	Les inconvénients de l'énergie éolienne.....	37
II.4.5	Conversions énergétiques éolien.....	37
II.4.5.1	Énergie cinétique du vent en énergie de rotation.....	37
II.4.5.2	Énergie mécanique de rotation en énergie électrique.....	37
II.4.6	Influence des vents.....	38
II.4.7	Les défis de l'éolien.....	38
II.4.8	Carte du gisement éolien en Algérie.....	39
II.4.9	Modèle de consommation énergétique en Alger.....	40
II.5	Conclusion.....	41

Chapitre III : Les éléments d'un system Renouvelable

III.1	Introduction.....	42
III.2	Système d'énergie photovoltaïque.....	42
III.2.1	La conversion d'énergies photovoltaïques.....	42
III.2.2	Les composants essentiels des systèmes photovoltaïques.....	43
III.2.2.1	Panneaux solaires.....	43
III.2.2.1.1	Comment fonctionnement les cellules photovoltaïques.....	43
III.2.2.1.2	Les différents types des cellules solaires.....	44
III.2.2.1.3	Module photovoltaïque.....	46
III.2.2.1.4	Les avantages et l'inconvénient des cellules.....	47
III.2.2.1.5	Rendement réel des modules.....	48
III.2.2.2	Régulateurs de charge MPPT.....	49
III.2.2.2.1	Principe de la commande MPPT.....	50
III.2.2.2.2	Les Algorithmes MPPT.....	50
III.2.2.3	Batterie.....	56
III.2.2.3.1	Caractéristique de charge et de décharge.....	57
III.2.2.4	Onduleur.....	59
III.2.2.4.1	Principe de fonctionnement des onduleurs.....	59
III.2.2.4.2	Principe de l'onduleur de tension triphasé.....	61
III.2.2.5	Les armoires de protection et de distribution DC & AC.....	66
III.2.2.6	Réseau.....	66
III.2.2.6.1	Avantages et inconvénients des systèmes connectes au réseau.....	67
III.3	Système d'énergie éolienne.....	68
III.3.1	La conversion d'énergies éolienne.....	68
III.3.2	Les différents types d'éoliennes.....	69
III.3.2.1	Les éoliennes à axe horizontal	69
III.3.2.1.1	Les avantages d'une machine à axe horizontal.....	70
III.3.2.1.2	Les inconvénients d'une machine à axe horizontal.....	70
III.3.2.2	Les éoliennes à axe vertical.....	70
III.3.2.2.1	Les avantages d'une machine à axe vertical.....	70
III.3.2.2.2	Les inconvénients principaux.....	70
III.3.3	Les composants essentiels des systèmes éoliens.....	71
III.3.3.1	Les pales d'éolienne.....	71
III.3.3.2	Arbre primaire.....	72
III.3.3.3	Arbre rapide ou arbre secondaire.....	72

	III 3.3.3.1	Refroidissements.....	72
	III 3.3.3.2	Les systèmes de freinage.....	73
	III 3.3.3.3	Stratégies de commande de la turbine.....	73
III.3.3.4		Multiplicateur.....	74
III.3.3.5		Génératrice MSAP.....	75
	III 3.3.5.1	Fonctionnement d'une génératrice MSAP.....	76
	III 3.3.5.2	Les avantages et l'inconvénient de la MSAP.....	77
III.3.3.6		Contrôleur électronique.....	78
III 3.3.7		Les Convertisseurs statiques.....	78
	III 3.3.7.1	Onduleur.....	78
	III 3.3.7.2	Redresseur.....	79
	III 3.3.7.3	Hacheur.....	79
	III 3.3.7.4	Gradateur.....	82
III 3.3.8		La tour.....	82
III.4		Conclusion.....	83

Chapitre VI : Modélisation et simulation d'un système hybride

IV.1		Introduction.....	84
IV.2		L'outil MATLAB R2018b / Simulink.....	84
IV.3		Modélisation et simulation des systèmes hybrides (photovoltaïques et éolienne et pile à combustible) Avec batterie lithium.....	85
IV.3.1		Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïque.....	86
	IV.3.1.1	Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque.....	86
		IV.3.1.1.1 Modélisation du panneau photovoltaïque.....	86
		IV.3.1.1.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT.....	89
		IV.3.1.1.3 Caractéristiques d'un panneau solaire.....	89
	IV.3.1.2	Simulations panneau photovoltaïque avec convertisseurs (DC/DC)	90
IV.3.2		Modélisation et simulation des systèmes éolienne.....	92
	IV.3.2.1	Modélisation du vent (source primaire)	93
	IV.3.2.2	Modélisation de la turbine à étudier.....	93
	IV.3.2.3	Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent.....	95
	IV.3.2.4	Convertisseurs (AC/DC)	97
	IV.3.2.5	Méthode de perturbation et d'observation.....	98
	IV.3.2.6	Simulations du system éolien.....	98
IV.3.3		Modélisation et simulation du pile à combustible.....	102
	IV.3.3.1	Modélisation de la pile à combustible.....	103
	IV.3.3.2	Simulations de la pile à combustible avec hacheur boost.....	104
IV.3.4		Modélisation et simulation du batterie lithium.....	105
	IV.3.4.1	Modélisation du batterie lithium.....	106
	IV.3.4.2	Simulations du batterie lithium.....	107
IV.3.5		Simulations system hybride avec onduleur triphasé et charge.....	111
	IV.3.5.1	Onduleur triphasé.....	111
	IV.3.5.2	Schéma et Résultats de simulation.....	113
IV.4		Conclusion.....	115
		Conclusion générale.....	116



**Introduction
Générale**

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici une vingtaine d'années, tout systèmes énergétiques durables sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement, comme les pays de Maghreb. Ces pays possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Le travail qui a été défini pour cette étude concerne une application stationnaire de petite taille, isolée du réseau, alimentée par un système hybride autonome. L'objectif assigné est d'étudier les performances d'un système hybride et d'évaluer les potentialités d'une installation de conversion d'énergies utilisant des sources renouvelables qui sont photovoltaïque, l'éolienne et une pile combustible comme générateur de secours et leurs hybridations avec des batteries de stockage et autres composant système. Par ailleurs, il fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie renouvelables et les composants qui y sont associés.

Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable dans un système de pompage au niveau de l'usine de fabrication de ciment SCT située à Elma-labiod à la wilaya de Tébessa.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre, une présentation sur l'entreprise et l'importance économique de ciment pour l'évaluation de l'économie nationale, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrivons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les différentes sources d'énergies renouvelables existantes

Le deuxième chapitre concerne une présentation et la configuration des différents types d'énergie renouvelable , leurs avantages et divers utilisations.

Le troisième chapitre nous présentons les principaux composants intégrés dans l'installation, les profils de charge et d'irradiation solaire et de vitesse du vent. Nous décrivons aussi les paramètres du système et les caractéristiques météorologiques.

Dans Le quatrième chapitre, les composants principaux du SEH seront modélisés sous le code de calcul MATLAB/Simulink. Nous adoptons des modèles existants. Nous nous focalisons principalement sur la modélisation des sources de production renouvelable ainsi que sur l'algorithme de gestion de l'énergie au sein d'un système hybride et autonome.et nous exposons l'ensemble des résultats obtenus numériquement que nous interprétons.

Enfin, les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives qui en résultent sont donnés ainsi qu'une conclusion générale.



Chapitre 01 :
Présentation de la société de
ciment de Tébessa
(SCT)

I.1 Introduction

La cimenterie d'El Ma-Labiod Tébessa, est basée sur un nouveau style dans le département de production, intégrant la donne environnementale pour se conformer aux impératifs d'un développement durable. Et maintenir la continuité et la stabilité. En termes des prévisions de la production et consommation future de l'entreprise.

Un système de production regroupe l'ensemble des éléments matériels et immatériels qui sont nécessaires à la production de biens ou de services par une entreprise. Un système de production d'une entreprise est un processus d'addition de valeur à des biens ou à des services qui répondent à des objectifs de quantité, de prix, de qualité et de délai.

Aujourd'hui, la fonction Production est l'une des fonctions importantes de l'entreprise, dont l'objectif est de produire des biens et des services, afin de dégager une rémunération du capital engagé, qui pourra être ou non réaffecté à de nouveaux investissements.

La réalisation d'une cimenterie d'EL Ma Labiod de Tébessa était une nécessité pour le pays pour son développement, vu le manque est l'insuffisance du ciment qui ne peut satisfaire aux besoins d'une population qui augmente chaque jour et la demande croissant dans le secteur industriel et plus particulièrement dans le domaine de construction et des travaux publics.

I.1.1 Généralités sur l'entreprise

La société de la cimenterie d'EL Ma-Labiod de Tébessa, SCT est une filiale du groupe (E.R.C.E), de Constantine et sa capacité de production annuelle est de l'ordre de 525 000 tonnes.

Alors que les objective de production étaient de 600 000 tonnes, le complexe a produit 651 500 tonnes. Ce dépassement des objective retenus en début d'exercice permet au SCT de réunir une des conditions de sa pérennité économique sur un marché national de plus en plus concurrentiel.

Selon la même source, les pouvoirs publics ont choisi la région d'El Ma Labiod à 26 km au sud de Tébessa et à 35 km de la frontière algérienne et tunisienne.

Pour l'installation de ce complexe à cause de ses richesses géologique offrants des strates argileuse et sablonneuse servant de matière première pour ce produit stratégique pour l'essor du secteur du bâtiment et des travaux publics. [1,2]

I.1.2 matières premières utilisées pour la fabrication du ciment

La totalité des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment proviennent de la carrière calcaire, de la carrière argile, de la carrière du sable, du gypse et du minerai de fer.

Les opérations technologiques nécessaires à la préparation de la roche, comportant : le forage, l'abattage à l'explosif, le chargement et le transport de la matière au concassage.

Les principales matières premières (calcaire, argile, sable) sont extraites dans des carrières proches de l'usine (calcaire : carrière de 230 ha (2 km), argile : carrière de 70 ha (10 km), sable : carrière de 21 ha (à 6 km), Ghajar : Ain Melilla (à 100 km), fer : mine de boukhadra (70 km).). Après le broyage initial, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées. Et puis fournissez d'autres matériaux tels que la bauxite, le minerai de fer, les scories de haut fourneau ou le sable de fonderie provenant d'autres sources. [1, 3]

I.1.3 Les différents procédés cimentiers

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment, [1] mais dans la cimenterie d'El Ma-Labiod Tébessa, le ciment n'est fabriqué que par la voie sèche.

I.1.3.1 Les voies sèches

Le procédé utilisant des « fours longs » n'est plus installé, mais il existe encore des lignes de production en service. Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés. D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi- sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide).

I.1.3.2 Les voies semi-humide et semi- sèche

Ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide.

Les matières premières étaient préparées sous forme de boudins via des « filtres presses » (procédé semi-humide, technique actuellement abandonnée) ou sous forme de granules via un « Granulateur », plateau tournant incliné où la matière première utilisées pour la fabrication du ciment.

I.1.3.3 Les différents procédés cimentiers

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment, [1] mais dans la cimenterie d'El Ma- Labiod Tébessa, le ciment n'est fabriqué que par la voie sèche.

Les voies sèches. Le procédé utilisant des « fours longs » n'est plus installé, mais il existe encore des lignes de production en service. Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés. D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie demi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi- humide ou humide), les voies semi-humide et demi-sèche ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage

d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide.

Les matières premières étaient préparées sous forme de boudins via des « Filtres-presses » (procédé semi-humide, technique actuellement abandonnée) ou sous forme de granules via un « Granulateur », plateau tournant incliné – où la matière.

Préparation de la crue : Pour la préparation du cru, on utilise trois constituants en générale qui sont le calcaire, l'argile brune, l'argile rouge pour la fabrication du CPA325 CPA400 CPJ45.

Après le concassage de ces trois constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm une prise d'échantillon pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition, les constituant sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couvert puis ce mélange est stocké dans un hall de Pré- homogénéisation le stockeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise.

Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru, cette correction se fait pour ajouter de calcaire et minerai de fer, après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs à barbes vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm

Le broyage du cru : Le broyage du cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène (la farine). La farine obtenue est stockée dans un silo après avoir subi une opération d'homogénéisation pour obtenir une composition chimique régulière.

Homogénéisation : Les deux silos servants de stockage et fonctionnement en continu, l'alimentation, le mélange et la vidange sont simultanées, la farine crue expédiée par l'air lift est dégagée dans la boîte de récupération.

La capacité de stockage de chaque silo est de 10, 000T, chaque silo est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four, il est donc possible de fonctionner avec un ou deux silos.

Zone de cuisson : La ligne de cuisson est constituée par :

- Préchauffer ou cyclones : Les gazes réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. C'est un échangeur à contre-courant destiner à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur de gaz sortant du four « environ égale à 100 °C ».

Par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gazes de combustions et le mélange carrière, faisant une tornade garantie que tous les grains de la crue subite la chaleur des gazes.

- Four rotatif : Le four constitue par une virole cylindrique de 90m de long

et de 5.6 m de diamètre protégé par de la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure.

- Refroidisseur : Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1450 °C jusqu'à 80-100 °C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement.

Stockage du clinker : Le clinker est stocké dans des silos à clinker qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage du clinker (étape suivante) une autonomie de fonctionnement en cas d'arrêt imprévu du four rotatif et d'autre part, protègent le clinker d'une dégradation physico-chimique que causerait le stockage prolongé à l'air libre.

Broyage du clinker : Le broyage du clinker s'effectue à l'aide d'un broyeur à deux compartiments à commande centrale travaillant en circuit fermé avec un séparateur dynamique à cyclone extérieur.

- L'air de ventilation du broyeur assurée des conditions d'opération favorables.

- L'évacuation du ciment sur les silos de stockages est assurée par une pompe pneumatique.

Le clinker peut être complété par toute une gamme de constituants ajoutés sous forme pulvérulente. [4] Cette opération est déterminante dans la phase finale de la fabrication du ciment.

Les propriétés de résistance d'un ciment ne sont pas déterminées seulement par sa teneur en divers minéraux de clinker mais surtout par sa finesse de broyage il faut que les particules du ciment soient inférieures à 100 microns et que la surface de ces particules avec le milieu extérieur est maximum pour faciliter l'hydratation au moment de la prise.

Stockage du ciment : Le stockage du ciment est fait dans des silos de capacité unitaire qui peut atteindre 10,000T de ciment.

Les expéditions : C'est une comprennent le stockage du ciment dans des silos de ciment pour alimenter Par la suite les ateliers d'ensachage pour l'expédition du ciment.

L'extraction est réalisée au moyen d'un système d'élévation du ciment se trouvant au fond du silo et un ensemble d'élévateurs assurant son acheminement vers les ensacheuses ou vers les portes de chargement en vrac.

La figure ci-dessous démontre la chaîne de production de la cimenterie D'El-Ma- Labiod Tébessa.



Figure I.1 : Chaîne de production de la cimenterie d'El-Ma-Labioud-Tébessa

I.1.4 La normalisation de l'entreprise

La société des ciments de Tébessa (SCT) vient d'être certifiée ISO 9001/95 par l'Agence Française (AFAQ).

La SCT est la deuxième cimenterie Algérienne. Du groupe ERCE à être certifiée après celle d'Ain-Touta (Scimat).

Ces deux cimenteries produisent à elles seules plus de 20% de la production nationale. [5]

La cimenterie d'El-Ma-Labioud a été créée en vue de la supervision des activités de production et de commercialisation et de l'exercice de toutes les activités concernant le ciment et les matériaux de construction au niveau national et à l'étranger, et dont les fonctions sont :

- La supervision administrative de l'usine.
- Programmation pour la vente de 20% de la production nationale.

I.2 Consommation de l'entreprise

Généralement, toutes les cimenteries dépendent de la même consommation, parce qu'il est considéré comme faisant partie de ses bénéfices. Par conséquent, chaque entreprise cherche à contrôler sa consommation. Surtout la consommation de l'énergie électrique qui est la partie la plus importante de l'entreprise, par rapport au coût de la production.

L'objet de ce chapitre porte sur la consommation globale de la cimenterie d'El-Ma-Labioud Tébessa, en termes de volume, de nature, d'évolution, et enfin en termes de relation avec les grandeurs économiques.

I.2.1 Les différentes consommations de l'entreprise

I.2.1.1 Consommation matières premières

a. Calcaire : Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, facilement solubles dans l'eau (voir karst), composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 .

b. Argile : L'argile désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates et/ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths. Elle peut être une matière localement abondante, très diverse, traitée et/ou raffinée avant emploi, à la fois meuble ou plastique (souvent après addition d'eau) ou à pouvoir desséchant, absorbant ou dégraissant voire à propriétés collantes ou encore réfractaires, pour servir par exemple autrefois selon des usages spécifiques, souvent anciens, au potier et au briquetier, au maçon et au peintre, au teinturier et au drapier, au verrier et à l'ouvrier céramiste. [1]

c. Sable : le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.063 (limon) et 02 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail.

I.2.1.2 Matières achetées :

- Minerai de fer.
- Gypse.
- Ajouts (laitier, tuf)

a. Le minerai de fer : est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrique ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels réduit la teneur théorique.

b. Gypse : Le gypse est une espèce minérale composé de sulfate di hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois un corps chimique composé minéral naturel et une roche évaporite majeure.

c. Ajouts (laitier, tuf) : Les adjuvants pour matériaux cimentaires sont des produits chimiques ajouté au matériau cimentaire tel que les coulis, les mortiers de ciment et les bétons de ciment pour modifier leurs caractéristiques. Les ajouts de cet adjuvant, réalisé lors du malaxage, sont le plus souvent inférieurs à 5% en masse de ciment.

Les réserves des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment sont présentées dans le tableau 1. Ci-dessous

Tableau I.1 : Réserves de la matière première utilisée en fabrication du ciment

Désignations	Distance	Superficie (ha)	Réserves (T)	Situation
Calcaire	500 m	230	84 300 000	En
Argile	10 km	70	31 150 000	/
Sable	120 km	/	7 850 000	Concession
Minerai de fer	60 km	/	/	Boukhadra
Gypse	70 km	/	/	Bir El-Ater

La consommation antérieure en matières premières est représentée dans le tableau I.2. Ci-dessous : [3]

Tableau I.2 : Consommation antérieure en matières premières

Années	Consommation matières premières en tonne					
	Calcaire	Argile	Sable	M.fer	Ajouts	gypse
2019	621 543	207 304	9174	15 575	113 822	40 128
2020	570 954	193 684	8184	13 117	106 115	35 988
2021	550 262	172 188	4476	12 883	99 498	38 254
2022	646 969	183 452	7404	15 913	59 721	26 689
2023	841 714	143 700	4548	11 581	62 805	26 285

-Représentation du diagramme de la consommation des matières premières :

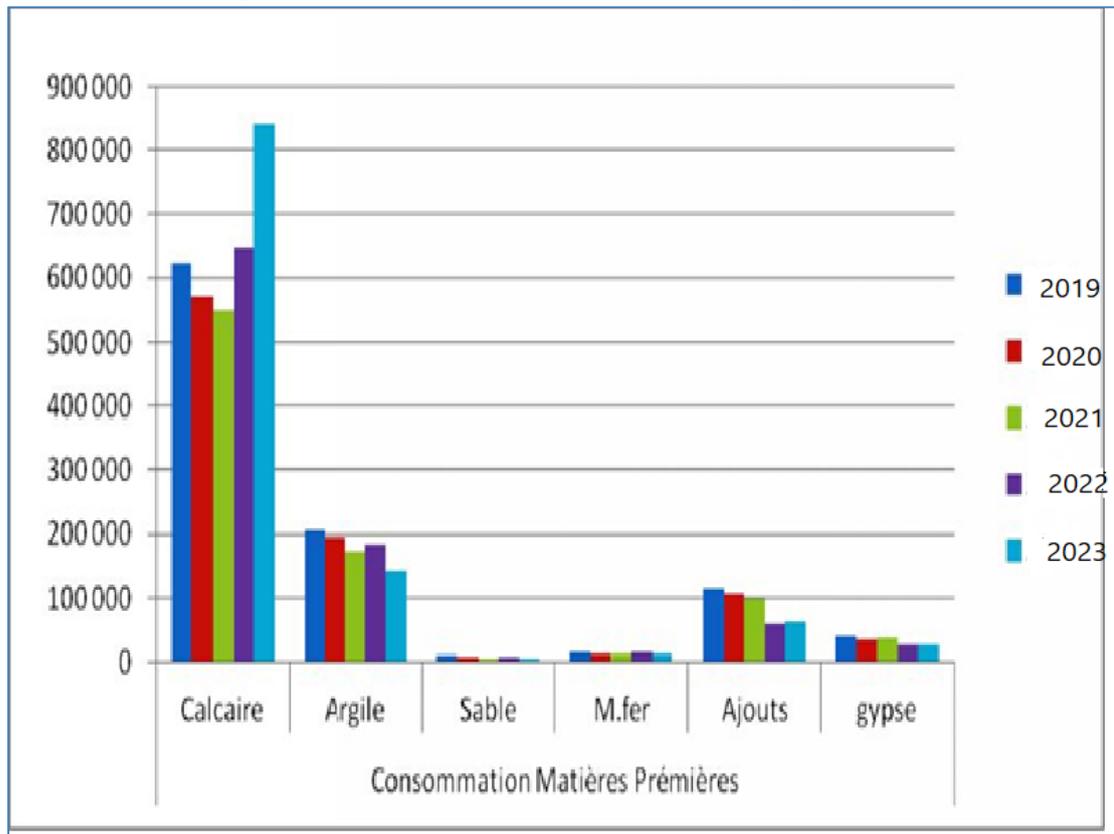


Figure I.3 : Représentation du diagramme de la consommation en matières premières.

On a constaté que l'année 2015, la consommation est plus élevée par rapport aux années postérieures à cause de la stagnation de la demande du ciment.

I.2.1.3 Consommation de l'eau

L'eau est essentiellement consommée dans : [3]

- Le processus de broyage clinker.
- Le conditionnement des gaz de four pour le dépoussiérage électrostatique.
- L'arrosage des pistes, des oliviers et des espaces verts.
- Les utilités sanitaires.

Pour les autres ateliers de ligne de production, l'eau utilisée est recyclée. Action réalisée pour réduire la consommation :

- Elimination des fuites dans le réseau d'alimentation.
- Installation des nouvelles pompes (atelier cuisson, ciment et cru)
- Installation des compteurs au niveau des puits pour suivre la consommation journalière.
- Utilisation d'ajout à forte teneur en humidité (laitier) et d'adjurant de montre dans le broyage clinker.

- La consommation antérieure en eau est représentée dans le tableau 3. Ci-dessous :

Tableau I.3 : Consommation antérieure en eau

Années	Consommation d'eau (m ³)				Total (m ³)
	1 ^{er} trimestre	2 ^{ème} trimestre	3 ^{ème} trimestre	4 ^{ème} trimestre	
2019	2 695	2 120	3 692	3 668	12 175
2020	3 313	4 733	2 466	881	11 393
2021	4 628	1 554	7 206	1 109	14 497
2022	738	852	1 4920	15 700	32 210
2023	12 500	11 210	15 600	14 070	53 380
Total	23 874	20 469	30 456	35 428	110 227

I.2.1.4 Consommation de l'énergie calorifique

L'énergie calorifique que sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1 450 à 1500°C.

Des besoins calorifiques annexes sont cependant nécessaires pour assurer le séchage des produits d'addition (argile, laitier, etc.) qu'il vaut mieux protéger des intempéries.

Les besoins calorifiques dépendent principalement des facteurs suivants : [7]

- Type de procédé utilisé ;
- Conception des équipements (la récupération thermique dépend d'équipements tels que : refroidisseur, nombre d'étages du préchauffeur, etc.) ;
- Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson.

La consommation antérieure en énergie calorifique est représentée dans le tableau 4 ci-dessous : [3]

Tableau I.4 : Consommation antérieure en énergie calorifique.

	Consommation calorifique MJ/t				
	2019	2020	2021	2022	2023
Janvier	3 266 789	5 132 678	4 646 466	5 334 119	4 476 628
Février	4 756 092	3 192 705	3 226 400	2 932 540	3 702 296
Mars	632 493	9 442	4 491 257	5 083 418	4 069 820
Avril	424 181	3 167 736	1 710 130	5 020 199	214 674
Mai	4 684 268	4 897 264	5 108 810	5 301 226	4 530 696
Juin	738 760	4 350 728	4 704 728	5 097 896	4 363 537
Juillet	702 277	4 450 342	4 468 273	4 157 000	3 219 532
Août	593 957	4 747 001	4 291 278	5 220 000	3 732 771
Septembre	4 982 748	4 413 120	3 642 657	5 098 000	1 244 273
Octobre	3 844 539	4 656 384	3 022 433	4 838 897	4 681 868
Novembre	5 023 158	3 256 894	4 971 407	5 002 664	3 207 359
Décembre	4 883 766	4 943 613	4 461 521	4 555 827	4 474 955
Total	34 533 028	47 217 907	41 027 703	57 641 786	41 918 409

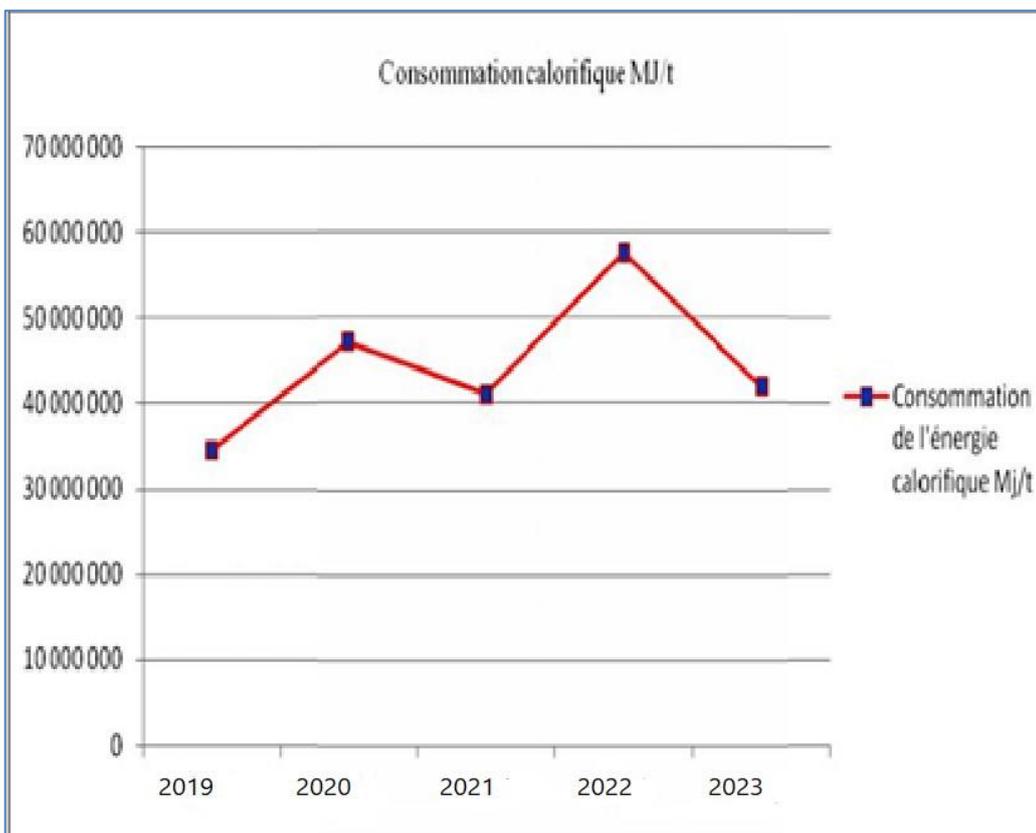


Figure I.4 : Représentation graphique de la consommation en énergie calorifique

I.2.1.5 Consommation de l'énergie électrique

Principalement, la consommation de l'énergie électrique des cimenteries répartie comme suit : [5]

- Préparation de la matière : 30% (Concassage – broyage cru).
- Production du clinker : 30% (Four – appareils annexes).
- Production du ciment : 40% (Broyage ciment).

En matière de fabrication de ciment, le broyage du ciment est, dans l'ordre d'importance, le premier consommateur d'énergie électrique, et en tant que tel, il revêt un intérêt considérable pour les recherches sur les économies d'énergie.

Environ 40% de l'énergie électrique nécessaire à la production d'un ciment de qualité standard sont utilisés pour le broyage de ce ciment. [4]

La consommation antérieure en énergie électrique est représentée dans le tableau 5 ci-dessous : [3]

Tableau I.5 : Consommation antérieure en énergie électrique.

	Consommation électrique KW/h				
	2019	2020	2021	2022	2023
Janvier	4 445 000	7 085 000	6 194 300	5 499 000	5 115 000
Février	6 174 200	4 282 000	5 827 400	3 537 000	4 540 000
Mars	6 296 900	497 300	1 947 500	5 842 000	5 430 000
Avril	4 677 400	4 141 000	432 600	5 025 000	2 319 000
Mai	6 194 000	6 481 600	6 191 000	5 018 000	5 571 000
Juin	6 459 100	5 878 700	6 737 000	4 964 000	4 545 000
Juillet	6 404 200	5 866 300	6 076 000	5 785 643	4 301 000
Août	5 139 500	6 275 900	6 073 000	5 783 000	4 160 000
Septembre	6 778 600	5 766 900	5 145 000	5 973 000	2 164 000
Octobre	5 255 500	6 169 000	4 408 000	5 785 643	5 621 000
Novembre	6 640 000	4 317 200	6 049 000	5 783 000	3 895 000
Décembre	6 604 900	6 618 000	6 009 000	5 973 000	4 592 000
Total	71 069 300	63 378 900	60 657 200	64 968 286	52 253 000

Représentation graphique de la consommation en énergie électrique de tableau précédent :

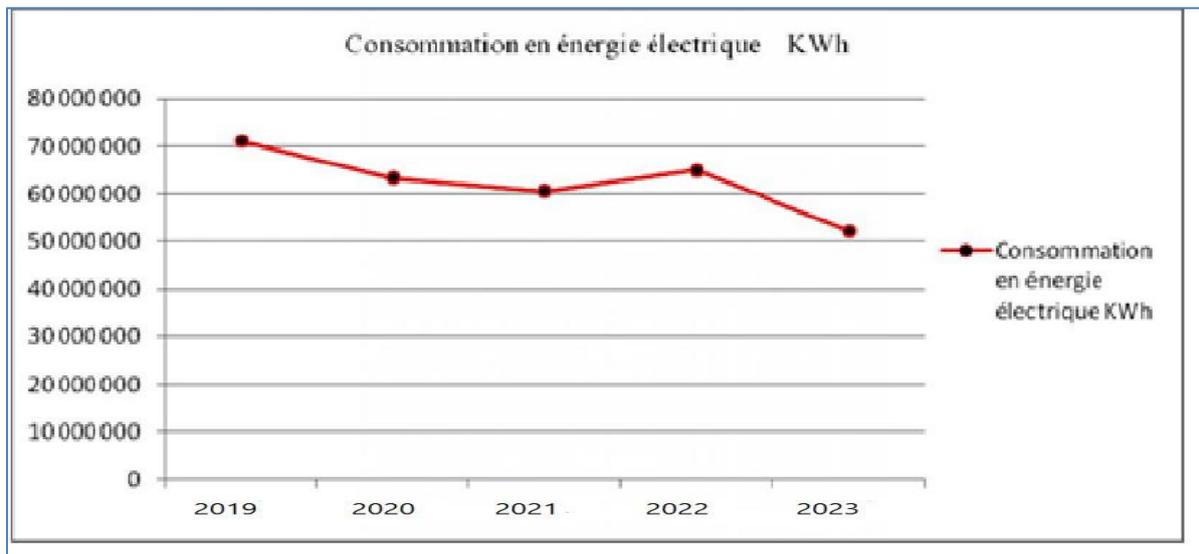


Figure I.5: Représentation graphique de la consommation en énergie électrique

I.2.1.5.1 Révélation des consommateurs régulateurs de l'énergie consommée dans la cimenterie

La consommation de l'énergie électrique varie entre 70.7 et 159.5 KWh/tonne de ciment. Elle est liée principalement au broyage des matières premières et du clinker.

Le tableau I.6 ne met que très partiellement en évidence l'intérêt énergétique de certains procédés de broyage par rapport à d'autres. Ceci vient de multiple raison telles que :

- Extrême diversité des produits à broyage : en particulier pour le ciment, la Finesse recherchée (la consommation électrique en dépend) est fonction de la qualité du ciment recherchée et de la qualité du clinker broyé.

- L'installation de façon très rentable des séparateurs à haute performance sur des ateliers de broyage en "circuit ouvert".

Il est à noter que les ventilateurs sont également de gros consommateurs d'énergie électrique. À titre d'exemple, la puissance du ventilateur principal installé sur un broyeur vertical est du même ordre de grandeur que celle du moteur du broyeur. [7-9]

Les ventilateurs constituent formidable levier d'économie d'énergie du fait de la nature quadratique de la charge. En régime normal, les gros ventilateurs consomment environ 9% du débit nominal, ce qui représente encore un potentiel d'économie de 20% de nos jours, les ventilateurs des nouvelles usines sont en général commandés en vitesse variable. [10]

Le remplacement du parc existant laisse augurer d'énormes gisements d'économie d'énergie, tout particulièrement en ce qui concerne les ventilateurs des refroidisseurs.

La consommation électrique dépend aussi de la qualité de l'ingénierie mise en œuvre

pour la conception de la ligne de production (usine en « ligne » avec un nombre limité de transporteurs, transport par convoyeur plutôt que pneumatique, etc.).

Le manque de fiabilité des équipements est un facteur important de surconsommation électrique, en fonction de la fréquence et de la durée des arrêts et redémarrages (les ventilateurs ne sont pas arrêtés lors d'arrêts momentanés, par exemple). [7]

La production d'électricité étant souvent réalisé par des centrales thermiques brûlant des combustibles minéraux (charbon), ou pétroliers (fuel-oil, gaz), toute économie dans la consommation d'électricité permet de réduire le facteur énergétique, mais aussi les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité.

Tableau I.6 : Consommation énergétique du broyeur cru et ciment

Procédé	Consommation Électrique moyenne (KWh/t)
Broyage « cru »	
Boulets, voie humide	20 (7/29.6)
Boulets, circuits ouverts	22 (21.9/26.7)
Boulets, circuits fermés (équipés de séparateurs)	24 (18.3/40.6)
Vertical	19 (18.6/32.2)
Broyage ciment	
Boulets, circuits ouverts	46 (26/93)
Boulets, circuits fermés (équipés de séparateurs)	51 (28/128)
Presse (en pré broyage) + boulets	42 (29.6/64.1)
Horomill	37 (28.5/39.6)
N.B : Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes (valeurs extrêmes données entre parenthèses) définies à partir de nombreuses usines installées à travers le monde.	

I.2.1.5.2 Sources d'économie d'énergie électrique dans la cimenterie

Les différents audits énergétiques réalisés dans la cimenterie ne se sont basés que sur la facturation de l'énergie électrique et définissent surtout le coût de l'énergie ramené à une tonne de ciment produit par cimenterie. Ce travail ne cible pas en réalité les sources réelles de surconsommation d'énergie électrique.

Chaque solution, envisagée après une étude généralement menée par le cimentier, avec le concours éventuel d'experts ou ingénieurs conseils, est à valider sur le plan technico-économique avec les ingénieurs et constructeurs spécialisés sur l'ensemble des aspects énergétique, production, qualité et impact sur l'environnement. [7]

Ces dernières sont à localiser au niveau du processus technologique et surtout au niveau

de l'exploitation des équipements gros consommateurs d'énergie électrique.

Les actions permettant une réduction de la consommation de l'énergie électrique dans le système de production concernant les deux principales composantes :

- Equipements fixes : par une maintenance préventive et un contrôle de la marche par des systèmes modernes et adaptés (GMAO, GFE ...).
- Flux matières : par la régularité qualitative, granulométrique et quantitative.

I.3 Conclusion :

D'après notre analyse de la cimenterie d'El Ma Labiod Tébessa tout cet enchaînement d'ateliers entraînant le processus de fabrication du ciment au sein de l'entreprise, ne serait entièrement effectif que si ce dernier est maîtrisé et géré dans un cadre garantissant la disponibilité et la performance des équipements tout en assurant la qualité de ciment fabriqué selon les normes et la demande des clients.

Après étude sur les différentes consommations de l'entreprise, on a constaté que la consommation en énergie électrique représente une part très importante dans le coût de la tonne de ciment. Tandis que la part de l'eau occupe la deuxième position après l'énergie électrique. Cependant l'énergie calorifique représente une part non négligeable dans le cout total de la tonne de ciment.

La cimenterie d'El Ma Labiod Tébessa dispose une grande gamme des équipements Industrielles et elle présente un plus pour l'économie national.



**Chapitre 02 :
Généralités sur
les énergies
renouvelables**

II.1 Introduction

La consommation globale d'énergie est très élevée et en croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, la consommation énergétique va continuer à augmenter, portée par l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant, sans égard aux chiffres pris en considération. A cet effet, les énergies renouvelables apparaissent aujourd'hui et à long terme comme une solution adaptée, qui couvre cette exigence énergétique en réduisant le plus grand désavantage émis des combustibles fossiles et fissiles.

Les énergies renouvelables sont devenues une forme d'énergie indispensable à travers leur flexibilité, leur simplicité ainsi que la multiplicité des domaines d'activité dans lesquels ils sont appelés à jouer un rôle majeur. Ces modes de production et les moyens de distribution associés feront l'objet de profonds changements dans les décennies à venir.

Le monde d'aujourd'hui a connu une transformation fondamentale du domaine des systèmes de production de l'électricité, qui est la dérégulation du marché de l'électricité. Les raisons de cette dérégulation sont variées et multiples selon les pays. Cependant une de ces conséquences est l'apparition de nouveaux moyens de production nommés les énergies renouvelables au sein des réseaux électriques existants. Cela est vrai pour l'énergie dérivée du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et de la biomasse en général.

Ils représentent une énergie inépuisable, disponible à volonté et variée. Grâce à ces énergies peu polluantes, nous pouvons envisager un système de production d'énergie prolifique qui présente de nombreux avantages. Elles sont plus propres et respectueuses de la nature que les énergies fossiles et de fission, sont écologiques, sont disponibles en masse partout dans le monde et sont gratuites dès que les installations de production les paient.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques et les systèmes éoliens.

II.2 Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation.

Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère. Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique.[10]

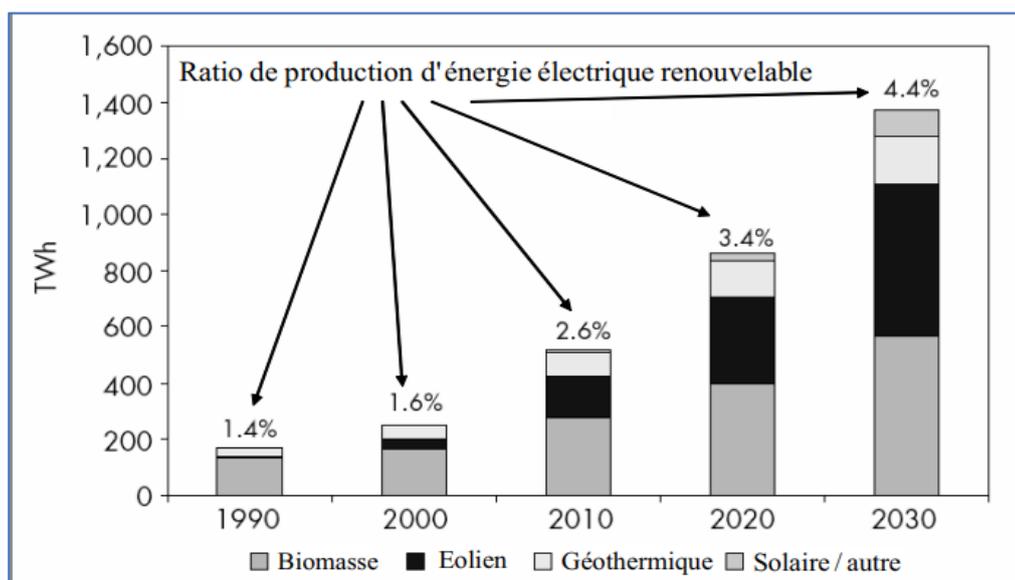


Figure II.1 Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables

II.2.1 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

II.2.1.1 Les avantages des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables (EnR) sont notamment une des solutions au réchauffement climatique, et un outil indispensable de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonées et décentralisées.

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, peuvent ainsi être produites localement. Cela signifie que les pays peuvent utiliser des sources d'énergie locales plutôt que de dépendre des importations de combustibles fossiles pour répondre à leurs besoins énergétiques. Cela peut réduire la vulnérabilité aux fluctuations des prix des combustibles fossiles sur les marchés mondiaux.

Les énergies renouvelables offrent aussi une alternative aux combustibles fossiles, qui sont la source d'énergie la plus utilisée dans le monde. En diversifiant la production d'énergie, les pays peuvent réduire leur dépendance à l'égard d'une seule source d'énergie, ce qui les rend plus résilients face à d'éventuelles perturbations de l'approvisionnement.

Les pays qui dépendent fortement des importations d'énergie peuvent se retrouver confrontés à des problèmes de sécurité énergétique, tels que des pénuries d'approvisionnement ou des prix élevés. Les énergies renouvelables offrent une alternative à l'importation d'énergie, ce qui peut contribuer à renforcer la sécurité énergétique des pays.

Le développement des énergies renouvelables peut aussi stimuler l'économie locale et créer des emplois locaux dans les secteurs de la fabrication, de l'installation et de la maintenance. Cela peut renforcer l'indépendance économique des communautés locales.

Mais tout dépend de la manière dont sont produites les infrastructures de production d'énergies

renouvelables. Dans les faits, une grande partie de ces infrastructures sont aujourd'hui concentrées dans un petit nombre de pays, notamment en Asie.[11]

II.2.1.2 Les inconvénients des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont par ailleurs parfois critiquées pour leur plus faible rendement énergétique par rapport aux énergies fossiles. Les coûts de production sont également souvent considérés comme plus élevés à court terme. Mais surtout, elles sont caractérisées par une disponibilité plus aléatoire : par exemple, le solaire et l'éolien ne produisent pas en permanence de l'électricité. On appelle ce phénomène l'intermittence.

L'intermittence des énergies renouvelables se réfère à la nature variable et imprévisible de la production d'énergie à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. Contrairement aux combustibles fossiles qui peuvent être brûlés en continu pour produire de l'électricité, les énergies renouvelables dépendent des conditions météorologiques pour produire de l'énergie. Par exemple, la production d'énergie solaire dépend de la quantité de lumière solaire qui atteint les panneaux solaires, qui varie en fonction de la couverture nuageuse, de la saison et de l'heure de la journée. De même, la production d'énergie éolienne dépend de la force et de la direction du vent, qui peuvent varier de manière imprévisible.

Cette intermittence pose un défi pour les réseaux électriques qui doivent répondre à la demande en temps réel, car l'électricité ne peut pas être stockée de manière efficace et économique à grande échelle. Lorsque la production d'énergie renouvelable est élevée, elle peut dépasser la demande, ce qui peut entraîner des contraintes sur le réseau électrique et même des surcharges. À l'inverse, lorsque la production est faible, elle peut ne pas répondre à la demande, ce qui peut également entraîner des problèmes sur le réseau électrique.[11]

II.2.2 Principales sources d'énergies renouvelables

Il existe plusieurs sources principales d'énergie renouvelable dans la nature, à savoir :

II.2.2.1 Éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. Une éolienne est composée de 4 parties :

- Le mât
- L'hélice
- La nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique

- C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite.[17]



Figure II.2 L'énergie éolienne

II.2.2.2 Énergie chimique

Un générateur électrochimique est constitué de deux électrodes séparées par un électrolyte. Les électrodes sont constituées de matériaux conducteurs (en général des métaux ou le carbone). L'électrolyte est un bloquant électronique dans lequel circulent des ions associés aux matériaux constituant les électrodes.

En fonction des valeurs respectives des potentiels d'oxydoréduction de ces éléments, une des électrodes (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation et capte les électrons fournis par la réaction de réduction dont est le siège l'autre électrode (cathode). L'anode est ainsi excédentaire en électrons, la cathode déficitaire.

En reliant par un lien conducteur extérieur à la cellule l'anode (borne négative) et la cathode (borne positive), les électrons présents à l'anode se déplacent vers la cathode, créant ainsi un courant électrique en sens inverse.[12]



Figure II.3 Énergie chimique

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie qui permet de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique. Un générateur électrochimique est un générateur de tension continue et rechargeable. Parmi toutes les piles à combustible, nous avons choisi d'étudier la pile à combustible à hydrogène. Une pile à hydrogène est composée de dihydrogène et de dioxygène. Le dioxygène est une molécule composée de deux atomes d'oxygène, notée O₂. Et le dihydrogène est une molécule comportant deux atomes d'hydrogène, de formule chimique H₂.

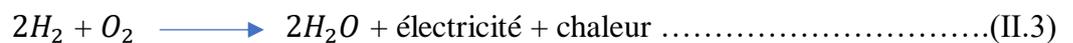
La pile à combustible est un générateur fonctionnant grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode associée à la réduction de l'oxygène sur l'autre électrode. La pile à combustible a besoin seulement de l'hydrogène et l'oxygène pour son fonctionnement. Dans le côté de l'anode l'hydrogène se décompose selon la demi-réaction (l'oxydation de l'hydrogène).



Il y a libération de deux électrons qui vont circuler dans l'électrode vers la charge extérieure. Les ions hydrogène H^+ ou proton vont migrer vers la cathode à travers l'électrolyte. Les électrons passent ensuite par le circuit extérieur et arrivent à la cathode. Dans le côté de la cathode l'oxygène se décompose selon la demi-réaction (la réduction de l'oxygène) :



En séparant ces deux demi-réactions pour un électrolyte non conducteur d'électrons. Les électrons libérés par la décomposition de l'hydrogène passent par le circuit extérieur, cependant les ions H^+ (les protons) peuvent traverser l'électrolyte.



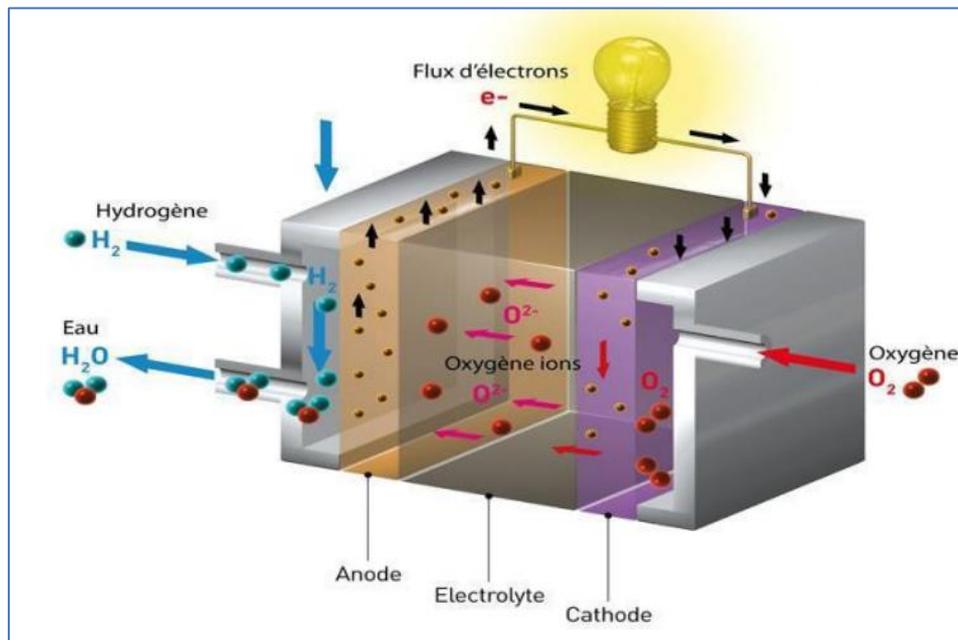


Figure II.4 Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible

II.2.2.3 L'hydraulique :

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques.[14]

C'est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marées, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou pour être converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. Les roues hydrauliques ont animé pendant longtemps les moulins à céréales, mais aussi des installations artisanales ou industrielles. [10]

L'invention de la turbine hydraulique, puis de la dynamo et enfin du générateur a ouvert une voie importante vers l'énergie hydroélectrique, considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes au monde.

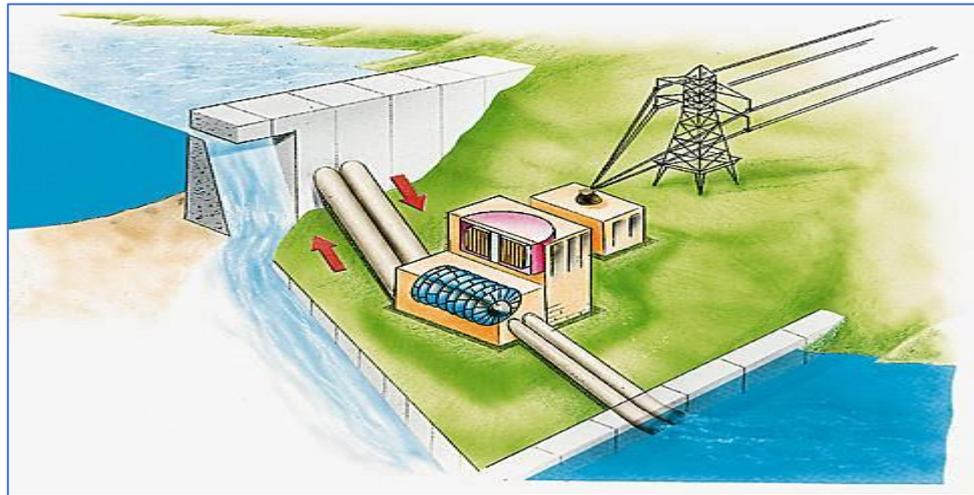


Figure II.5 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

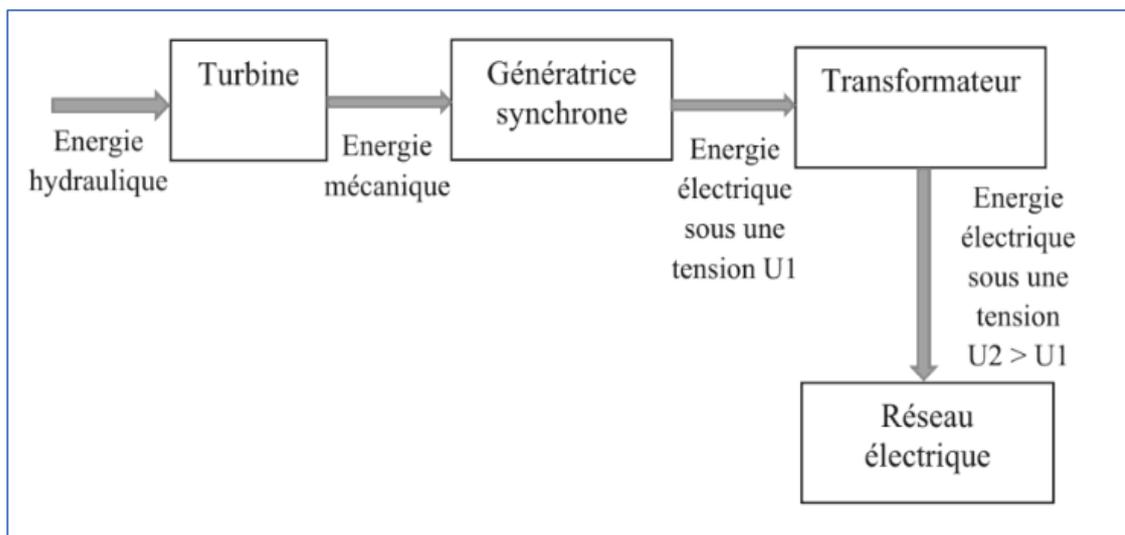


Figure II.6 Conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique

II.2.2.4 La biomasse :

La biomasse représente toutes les substances organiques, d'origine végétale et animale. Il peut provenir des forêts, des milieux marins et aquatiques, des haies, des parcs, des jardins et des industries qui génèrent des sous-produits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage biodégradables d'origine biologique.[13]

La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie.
- La biomasse elle-même peut être brûlée. Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans les centrales thermiques.[14]

L'avantage est que le dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère lors de la combustion de la biomasse ou du méthane est compensé en absorbant la repousse des plantes qui, entre autres, sont la principale source de biomasse.

Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est

exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable. Quand on l'exploite de manière naturelle elle est peu menacée mais lorsqu'il s'agit d'une biomasse cultivée (pour les biocarburants par exemple) ou en cas de surexploitation massive de la ressource (comme la déforestation), la production d'une telle énergie peut rapidement avoir de lourds impacts environnementaux .[15]

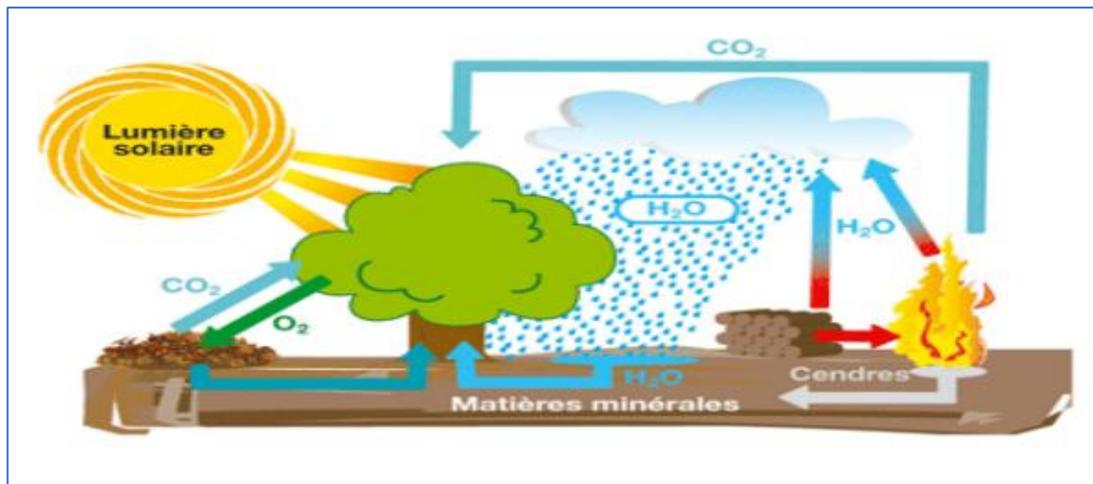


Figure II.7 Cycle de l'énergie de la biomasse

II.2.2.5 La géothermie :

La géothermie est l'étude et l'utilisation de la chaleur du sol, la chaleur des roches plus ou moins profondes ou bien celle de l'eau qui y circule, pour en récupérer de l'énergie. Cela peut servir au chauffage de bâtiments, directement ou bien avec une pompe à chaleur. Lorsque la température des roches ou de l'eau est au-dessus d'environ 150 °C, il est possible de produire de l'électricité à partir de cette ressource.

La géothermie est considérée comme une source d'énergie renouvelable, si on ne demande pas trop d'énergie en refroidissant trop la terre en profondeur.[16]

Selon la température des différentes couches du sol, on qualifie la géothermie de « haute énergie » (150 °C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et de « très basse énergie » (moins de 30 °C). Ainsi, plus on s'enfonce dans la terre, plus la température y est élevée.

- L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre.
- Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu'à la surface. L'eau chaude utilisée fait tourner les turbines afin de produire l'énergie électrique ou chauffer des locaux.[14]

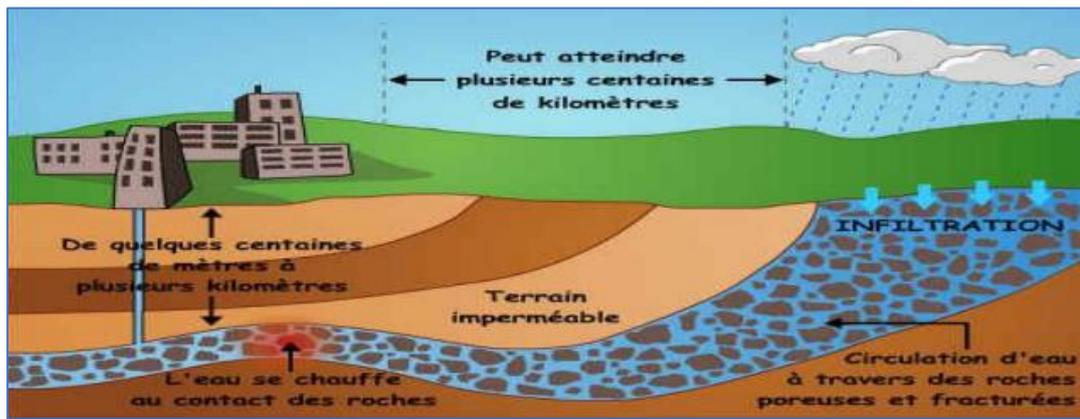


Figure II.8 Une source d'énergie géothermique

II.2.2.6 L'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz qui peut être utilisé comme un vecteur énergétique, notamment pour produire de l'énergie électrique grâce à des piles à combustible. En soi, l'hydrogène n'est pas une ressource renouvelable à proprement parler. Il s'agit d'un gaz que l'on ne trouve que rarement « tel quel » dans la nature, et qui se renouvelle peu.

On doit donc le plus souvent produire l'hydrogène à partir de ressources qui, elles, sont très abondantes ou se renouvellent, comme l'eau. Il faut alors utiliser de l'énergie pour transformer l'eau en hydrogène, et lorsque cette énergie est d'origine renouvelable (par exemple, de l'électricité issue de productions renouvelables) on qualifie parfois (un peu abusivement) cet hydrogène de « renouvelable » ou d'hydrogène vert.[11]

II.2.2.7 Le Solaire :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 139.10^4 Km. Le soleil est composé de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cour atteint 10^7 K.

Malgré la grande distance séparant le soleil de la Terre, environ 150 millions de kilomètres , la couche terrestre reçoit une énorme quantité d'énergie de 180 millions de gigawatts, c'est pourquoi l'énergie solaire est bien présentée comme une alternative aux sources d'énergie fossiles. Ils sont non polluants, économiques, accessibles, facilement convertibles, grâce à des équipements performants et fiables tels que des modules photovoltaïques il permet de produire de l'électricité.[13]

On utilise l'énergie solaire en captant les rayons du Soleil et en les transformant en électricité ou en utilisant leur chaleur. Il existe trois types d'énergie solaire :

II.2.2.7.1 Énergie solaire photovoltaïque :

Les panneaux solaires piègent les rayons du Soleil qui sont ensuite transformés par des absorbeurs métalliques en électricité. Les énergies solaires servent à fournir de l'électricité

dans les maisons.

II.2.2.7.2 Énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est obtenue par la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique, autrement dit en chaleur.

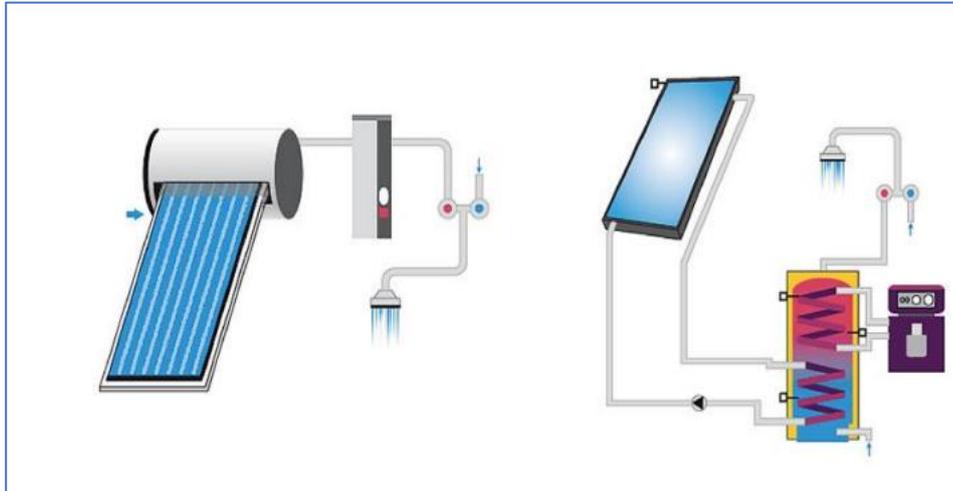


Figure II.9 Énergie solaire thermique

Dans ce cas, les panneaux servent à capter de la chaleur pour fournir notamment de l'eau chaude. Il est divisé en deux parties :

Le solaire thermique passif :

Le solaire thermique passif est la première des cinq utilisations de l'énergie solaire qui est présentée dans cet essai. Comme le nom l'indique, les techniques d'exploitation de cette forme d'énergie solaire ne font appel à aucun équipement mécanique ou électrique. Elles se produisent de façon passive. [18]

Le solaire thermique active :

Les technologies solaires actives visent à tirer profit de l'énergie thermique du rayonnement solaire pour la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur ainsi produite peut servir directement pour le chauffage des bâtiments ou pour générer de l'eau chaude domestique. Le potentiel de remplacement des énergies conventionnelles pour le chauffage et l'eau chaude s'élève donc à près de respectivement 75 % et 65 % dans les secteurs résidentiel et commercial. Ce pourcentage est plus difficile à établir pour le secteur industriel puisque les sources de consommation d'énergie varient énormément en fonction des activités des entreprises. [18]

II.2.2.7.3 Énergie solaire thermodynamique :

Les rayonnements du Soleil chauffent de l'eau qui est ainsi transformée en vapeur. Cette vapeur fait tourner une turbine : l'énergie de la turbine en mouvement est transformée en énergie électrique.[18]



Figure II.10 Le fonctionnement du solaire thermodynamique

II.3 Énergie solaire photovoltaïque :

II.3.1 Définition

Le terme " cellule photovoltaïque", mieux connu sous le nom de photoélectrique, est dérivé d'une combinaison de " PHOTO " Le mot grec pour la lumière et "Volta", le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la batterie chimique en 1800.

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Ce processus ne génère pas de chaleur comme l'eau chaude sanitaire solaire ou les systèmes de chauffage solaire de piscine. Il diffère également du procédé utilisé dans les centrales solaires thermiques, où l'énergie solaire concentrée est utilisée pour produire de la vapeur qui active des turbines reliées à un générateur électrique.

Les systèmes d'alimentation photovoltaïque n'ont pas de pièces mobiles. Ils sont fiables, nécessitent peu d'entretien et ne génèrent ni bruit ni polluants. Les systèmes photovoltaïques sont modulaires-les blocs de construction (modules) sont disponibles dans une large gamme de capacités de puissance, d'une fraction de watt (par exemple, cadrans solaires et calculatrices de poche) à plus de 300 watts. Certaines centrales photovoltaïques expérimentales ont plusieurs mégawatts de puissance, bien que la plupart des systèmes photovoltaïques installés soient beaucoup plus petits.[19]

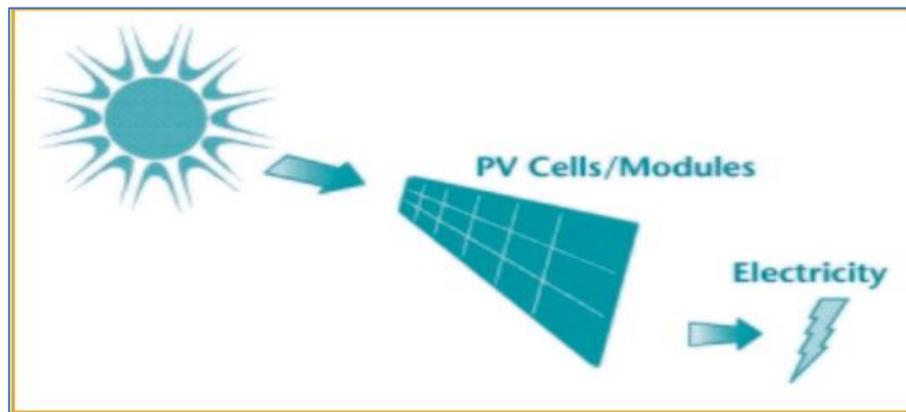


Figure II.11 Module photovoltaïque

II.3.2 Comment produire l'énergie photovoltaïque ?

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Le soleil émettant ce type de rayonnement, cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. C'est également une énergie « propre » puisque que la production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de GES. [20]

Les cellules photovoltaïques sont normalement fabriquées à l'aide de matériaux semi-conducteurs spéciaux qui permettent aux électrons, qui sont alimentés lorsque le matériau est exposé à la lumière du soleil, pour être libérés de leurs atomes.

Une fois libérés, ils peuvent se déplacer à travers le matériau et transporter un courant électrique. Le courant circule dans un sens (comme une batterie), et donc l'électricité générée est appelée courant continu (CC).

Dans le cadre de cet essai, l'électricité consommée dans la province est considérée comme une énergie renouvelable puisqu'elle est produite à près de 95 % de sources hydrauliques.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.[20]

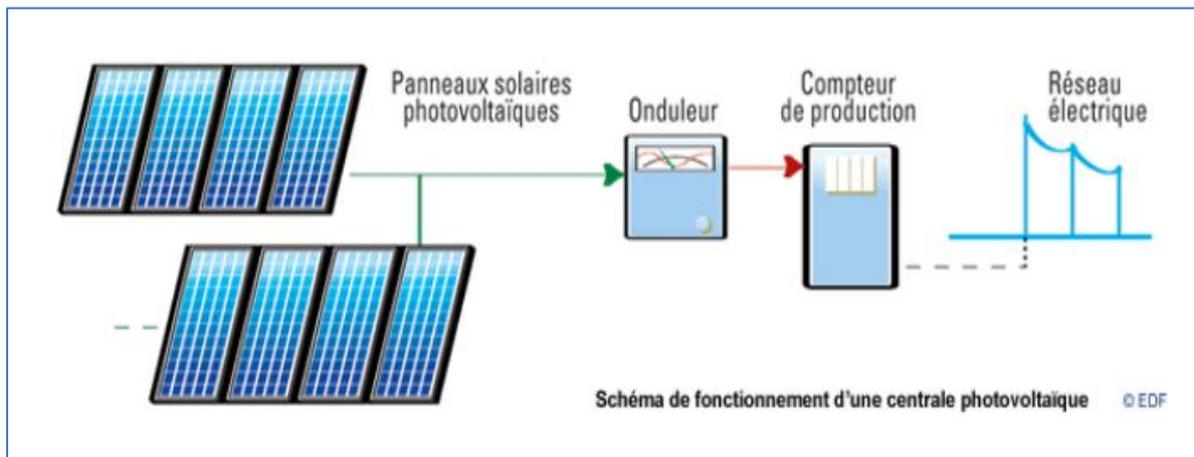


Figure II.12 Schéma de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque

Tout simplement :

- Les cellules photovoltaïques absorbent les rayons solaires et les convertissent en courant continu.
- L'onduleur transforme le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif.
- Le courant électrique alternatif alimente les appareils électriques de votre ménage.
- Le surplus d'électricité produite est stocké sous forme de courant continu dans les batteries.

II.3.3 Influences de la température et de la résistance série :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique, en raison, principalement, de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et d'autre part, une diminution de la tension du circuit ouvert V_{oc} . L'augmentation de la température entraînerait (Figure II.12):

- Une diminution de la puissance maximale disponible et de la tension (0.06 % par °C).
- Une augmentation du courant (0.4 % par °C).
- Une diminution du rendement et de facteur de forme FF.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit (Figure II.12).[20]

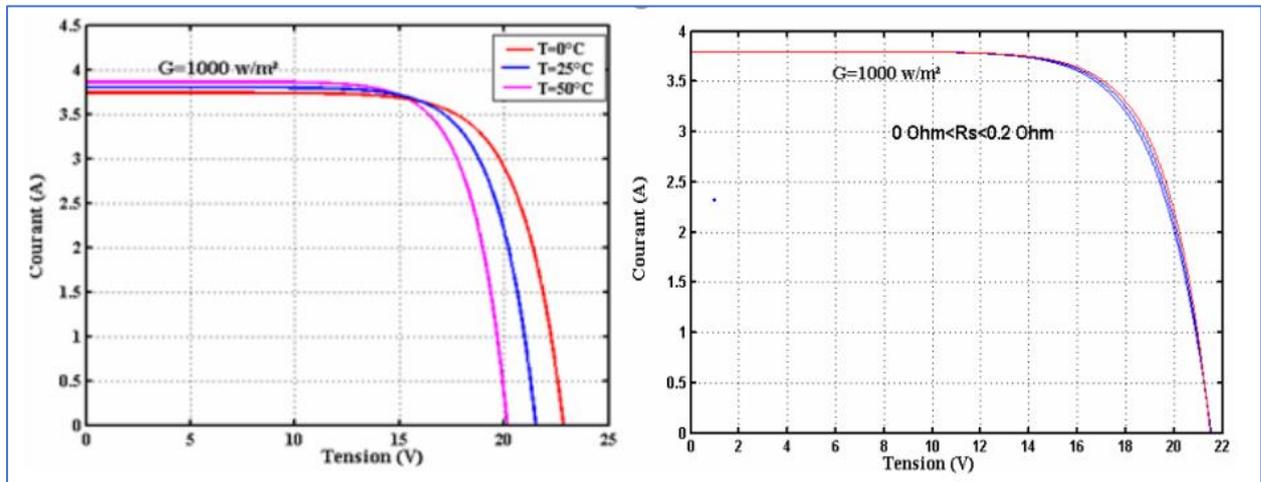


Figure II.13 Influence de T et R_s sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire.

II.3.4 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

II.3.4.1 Avantages :

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [19]

II.3.4.2 Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaire des conditions météorologiques. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 V.

Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur. [19]

II.3.5 Energie photovoltaïque en Algérie :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'un des axes de la politique énergétique, économique et financière en l'Algérie comme dans le monde.

L'introduction des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque aura pour conséquence :

- Une plus grande exploitation du potentiel disponible,
- Une meilleure contribution à la réduction de CO₂
- Une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national,
- Un développement de l'industrie nationale,
- La création de l'emploi.[17]

II.3.6 Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est un pays de vaste superficie, elle occupe une situation géographique qui favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire, en particulier dans les régions désertiques. Ces régions Sahariennes sont caractérisées par un taux d'ensoleillement très important.

En raison de sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) illustre l'irradiation globale journalière moyenne reçue au moins de juillet.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national soit près de 1700 kWh/m² /an au nord et 2263 kWh/m² /an au sud du pays.

Le total d'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays .Le tableau (7) résume le potentiel solaire en Algérie.[17]

Tableau II.1 Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Si nous reprenons le rapport de la Commission de l'ONU sur la situation actuelle et les perspectives, on constate qu'il a repris le programme réalisé par NEAL et présenté au GEF de la Banque mondiale.

Il était prévu de réaliser quatre centrales thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1200 MW, puis l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023 et 600 MW par an jusqu'en 2030 (UNECA 2011).

C'était un programme de 8 000 MW qui devait aboutir en 2020. Tout ceci a été bloqué. Un programme de 22 000 W avait été lancé en 2011. Il donnait la part belle aux CSP. En 2014, il fut révisé pour écarter les CSP et dédier 13 000 MW au PV.

Depuis il y a eu ces deux dernières années environ 400 MW de PV installés par des entreprises chinoises sans aucune information sur les performances de ces centrales (UNECA 2011). Ces créations seraient que seul l'Etat est en mesure de concrétiser cela.

Les exemples des pays similaires démontrent le contraire alors que la seule société qui avait finalisé avec succès un projet était la Société NEAL un partenariat Public-privé totalement algérien. Les exemples de réussite dans les pays voisins ou ailleurs avaient consisté à dupliquer la société NEAL algérienne. NEAL étant une société de développement de projets, elle déploie une ingénierie technique et financière, elle peut participer à l'actionnariat de la société de projet en charge de la construction, de l'opération et de la commercialisation.

II.3.7 Types des systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont deux types : autonomes et reliés au réseau

II.3.7.1 Systèmes autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. [21]

II.3.7.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donnée que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente

les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. [21]

II.4 L'énergie éolienne :

II.4.1 Définition :

L'énergie éolienne a animé les moulins depuis plus longtemps encore que l'énergie hydraulique ; c'est elle également qui gonfle les voiles des navires. Cette forme d'énergie est exploitée actuellement par des éoliennes, et est utilisée soit directement pour actionner des pompes, soit indirectement en produisant du courant électrique (aérogénérateurs).

L'énergie éolienne est devenue une source essentielle de production d'électricité pour un modèle énergétique plus propre et plus durable. Les progrès technologiques permettent à certains moulins à vent de produire de l'électricité à un prix aussi bas que celui des centrales à charbon ou atomique.

Pour produire de l'électricité avec une centrale éolienne, le vent doit souffler à une vitesse favorable. Avant de créer un parc éolien, il faut faire une analyse du vent et de la zone dans laquelle il sera construit. Il faut tenir compte de la vitesse et de la fréquence du vent.

Pour mesurer ce dernier, il faut des équipements spécifiques, installés à différentes hauteurs. En fonction du budget, la zone et ses caractéristiques sont mesurées. Les endroits où seront placés les mâts doivent être pris en compte.

II.4.2 Comment produire l'énergie éolienne ?

L'énergie éolienne est produite par la rotation des pales d'une éolienne, qui sont propulsées par le vent. La rotation mécanique des pales entraîne une génératrice qui produit de l'électricité. Le mouvement rotatif est transmis à une boîte de vitesses qui accélère la rotation de la génératrice, augmentant ainsi la quantité d'électricité produite. L'électricité produite est ensuite envoyée sur le réseau électrique pour être distribuée aux consommateurs.

Le fonctionnement de l'énergie éolienne dépend du vent, qui doit souffler à une vitesse suffisante pour entraîner la rotation des pales. Vous l'aurez compris, l'implantation des parcs éoliens doit se faire dans des lieux où la présence du vent est prédominante. Il est important d'orienter l'éolienne dans la direction du vent, grâce à une girouette positionnée sur la nacelle.

Chacune des éoliennes qui composent un parc est reliée aux autres par des câbles souterrains. Ces derniers servent à acheminer l'énergie électrique à un poste de transformation. L'électricité produite est ensuite transportée vers les centres de consommation. [22]

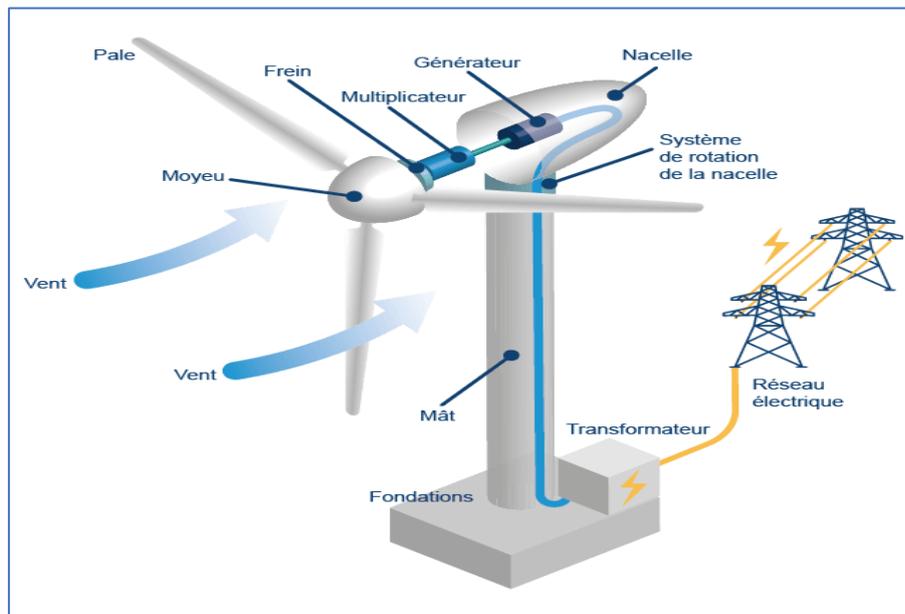


Figure II.14 Fonctionnement d'une énergie éolienne

II.4.3 Les différentes énergies éoliennes :

Il existe actuellement deux modèles d'énergie éolienne, selon l'endroit où les dispositifs sont installés :

II.4.3.1 L'énergie éolienne terrestre

L'énergie éolienne terrestre (onshore) produit de l'électricité en exploitant le vent à partir de parcs éoliens qui se trouvent à terre. On installe ainsi une série d'éoliennes capables de transformer l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique qui est injectée dans le réseau électrique pour la consommation. [22]

II.4.3.2 L'énergie éolienne en mer

L'énergie éolienne en mer (offshore) est la source obtenue en exploitant la puissance du vent au large. Le vent atteint en mer une vitesse plus élevée et plus constante en raison de l'absence d'obstacles. Afin d'exploiter au maximum cette ressource, des structures sont développées sur les fonds marins et équipées des dernières innovations techniques.

On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :

- ✚ Industrielles : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique.
- ✚ Domestiques : des petites éoliennes installées chez les particuliers. [22]

II.4.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

II.4.4.1 Les avantages de l'énergie éolienne

- ✚ L'énergie éolienne est renouvelable et « décarbonée » en phase d'exploitation.
- ✚ Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole.

- ✚ L'installation peut être démantelée relativement facilement.
- ✚ Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- ✚ Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille. [23]

II.4.4.2 Les inconvénients de l'énergie éolienne

- ✓ L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- ✓ C'est une source d'énergie intermittente.
- ✓ Les zones de développement sont limitées.
- ✓ Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- ✓ Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers). [23]

II.4.5 Conversions énergétiques éolien :

II.4.5.1 Énergie cinétique du vent en énergie de rotation

Le vent possède de l'énergie liée à sa vitesse. Lorsque le vent souffle dans les ailes de l'éolienne, il provoque leur mise en mouvement. L'énergie du vent est convertie en énergie de rotation.

Les éoliennes du bateau Energy Observer sont dotées d'un axe vertical. La rotation des ailes se fait autour de l'axe vertical appelé rotor. Les pales de l'éolienne sont réalisées de manière à être aérodynamiques et pouvoir facilement réceptionner le vent. Elles sont fabriquées avec des matériaux légers et résistants (fibres de verre et fibres de carbone).[24]

II.4.5.2 Énergie mécanique de rotation en énergie électrique.

L'énergie cinétique du vent est transmise à l'arbre principal de l'éolienne. Cependant, même avec un vent très fort, la vitesse de rotation des pales est trop faible pour produire de l'électricité, c'est pourquoi on utilise un multiplicateur. Il est constitué d'un ensemble d'engrenages et augmente la vitesse de rotation de l'arbre principal en la multipliant. Le multiplicateur est ensuite relié à l'arbre rapide qui transmet la vitesse de rotation à un alternateur. La mise en rotation d'aimants au voisinage des fils de cuivre d'une bobine produit de l'électricité.[24]

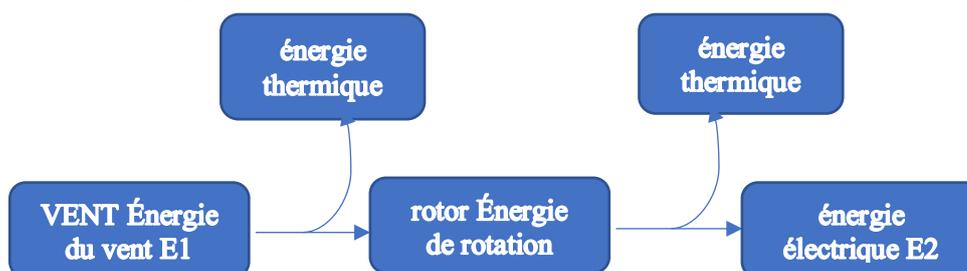


Figure II.15 Schéma de la chaîne énergétique

II.4.6 Influence des vents :

Une éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 \dots\dots\dots (II.1)$$

Où " ρ " est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m³ à 20°C, au niveau de la mer.

Dans les régions tempérées, la vitesse du vent est plus élevée en hiver qu'en été. Quand on veut utiliser l'énergie éolienne, il faut savoir quels sont les places appropriées.

Pour obtenir une bonne performance d'une turbine éolienne, il faut une vitesse de vent minimum dans la plage de 5.5 à 7.0 m/s. Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent. La puissance nominale (de projet) est la puissance donnée pour un vent déterminé, appelé vent nominal.

Au-delà de cette vitesse du vent, la puissance est main constante grâce au dispositif de régulation. [26]

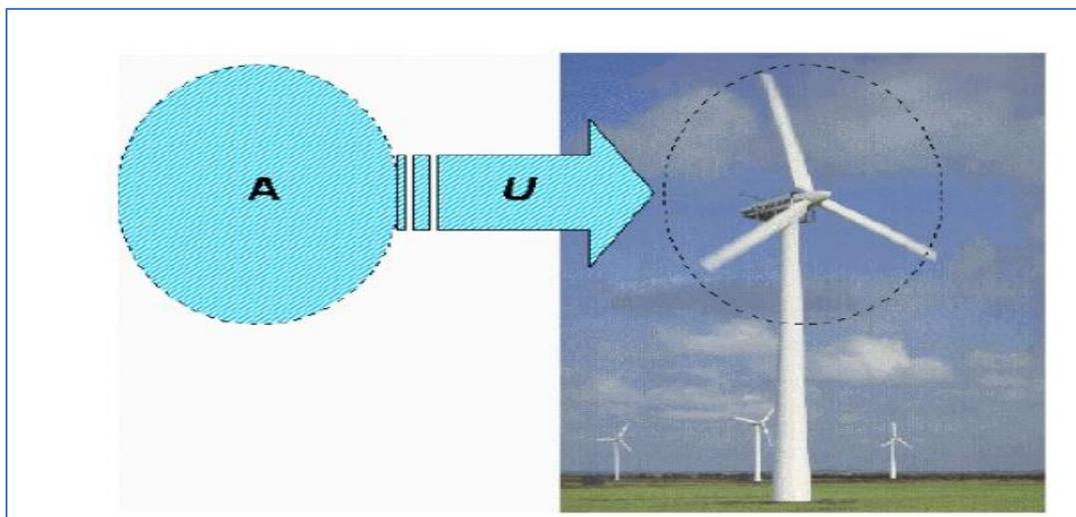


Figure II.16 Influence des vents

II.4.7 Les défis de l'éolien :

Malgré ses atouts, l'éolien présente certains défis, parmi lesquels l'intermittence, l'acceptation sociale, le renforcement des réseaux électriques, la tension sur les matières premières, la réduction des coûts et la minimisation des risques. [27]

- ❖ **L'intermittence** : L'énergie éolienne est intermittente : les pales ne fonctionnent que si le vent n'est ni trop faible ni trop fort. En cas de pénurie de vent, l'énergie électrique

doit être fournie d'autres sources de production, idéalement renouvelables comme des centrales hydroélectriques, à biomasse ou géothermiques. A contrario, si la production d'électricité est trop importante, des systèmes de stockage d'énergie peuvent être utilisés, tels que des batteries géantes, des systèmes de pompage, de stockage gravitaire ou des volants d'inertie. Il est aussi envisagé de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau (power-to-gaz).

- ❖ **Acceptation sociétale :** Une part de plus en plus importante de la population comprend l'intérêt de développer l'énergie éolienne. Néanmoins, des efforts doivent continuer à être déployés pour mieux évaluer les impacts des éoliennes, en particulier sur la faune (oiseaux, chauve-souris, etc.). En mer, les conflits d'usage avec les pêcheurs et les plaisanciers doivent être évalués pour chaque nouveau projet d'implantation
- ❖ **Renforcement des réseaux électriques :** Les réseaux électriques doivent être adaptés pour transporter des quantités toujours plus importantes d'électricité. Des investissements conséquents seront nécessaires.
- ❖ **Tension sur les matières premières :** Le déploiement à grande échelle des éoliennes va accroître fortement la demande en matières premières et notamment en métaux comme le cuivre ou certaines terres rares nécessaires à leur fabrication et leur raccordement. Cette pression sur les ressources fait l'objet d'études prospectives, notamment à IFPEN qui a notamment participé à un projet ANR pour mieux évaluer la dépendance aux métaux qui pourrait résulter de la transition énergétique. Le recyclage des métaux et des autres composants des éoliennes permettra en partie de satisfaire cette forte demande.

II.4.8 Carte du gisement éolien en Algérie

La carte des vents en Algérie est donnée dans la figure.

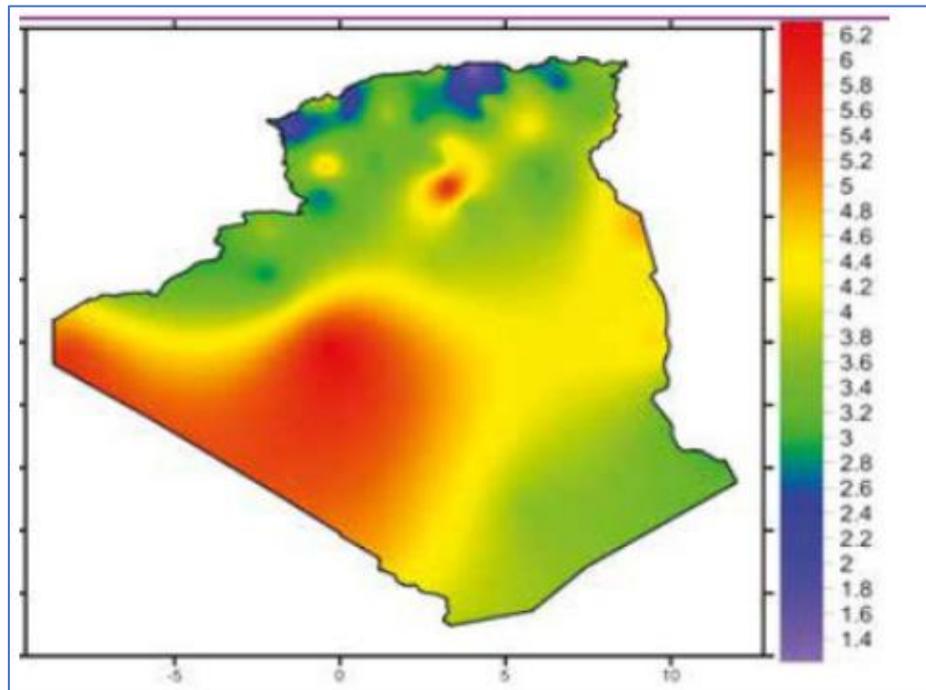


Figure II.17 Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles)

La vitesse du vent varie de 1.4 m/s à 6.2 m/s montrées en bleu et en rouge respectivement dans la carte.

La carte donnant les tendances de vitesses sur un territoire ne permet pas de dire en un lieu précis si le vent est suffisant d'où la nécessité de l'étude des vents en local sur 6 mois à 1 an. [28]

II.4.9 Modèle de consommation énergétique en Alger :

Nous constatons que les programmes arrêtés pour les ENR n'étaient pas à la hauteur des besoins. Vous pouvez constater que même en maintenant les objectifs de 13 000 MW pour le photovoltaïque, nous n'arriverons pas à satisfaire des besoins qui ne sont pas évalués en fonction du programme de développement économique hors hydrocarbures. Nous ne pouvons pas supporter la génération électrique avec des turbines à gaz, au détriment des marchés à l'export. Le gaz restera le vecteur de la transition énergétique jusqu'en 2050. Pour cela, nous devons limiter la production électrique de la Sonelgaz à 60 TWh qui est le niveau actuel avec une capacité de 20 GW.

Le solaire (thermique + photovoltaïque) comblera facilement le reste. Il représente 93 TWh dans le tableau ci-dessus. Nous savons que le développement industriel et agricole impliquera de nouveaux besoins énergétiques et principalement de la chaleur. Il sera possible d'y remédier par notre potentiel solaire. Le programme de développement sera examiné par la suite. [29]

Tableau II.2 Les prévisions de consommation électrique selon la CREG

	2015	2020	2024	2030
Consommation globale électrique	61%	88%	112%	150%
Photovoltaïque 13 000 MW (2030)	0,18%	16,6%	17,6%	23%
Eolien	0%	0,31%	0,6%	0,9%
Solaire thermique hybridé-gaz torchés 14 000 MW (2030)	0,1%	12%	50%	70%
Cycle combiné gaz 14 000 MW (2020)	61%	59%	60%	60%

II.5 Conclusion

L'utilisation des énergies renouvelables lutte contre l'effet de serre, en réduisant rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. En développement dans le monde entier, ces énergies permettent de gérer de façon intelligente les ressources locales et de créer des emplois.

L'Algérie à l'instar du reste du monde s'est lancée dans la production des énergies renouvelables en mettant en place un programme en deux phases. Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, la majorité des réalisations de la première phase concernait des centrales photovoltaïques.

Ce programme vise à valoriser les ressources nationales et à consolider le développement durable en Algérie, ainsi que le développement d'une industrie dans le domaine du renouvelable en tant que facteur de diversification de l'économie nationale.



Chapitre 03 :
Les éléments d'un system
Renouvelable

III.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous.

En revanche, les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont des ressources non renouvelables qui mettent des centaines de millions d'années à se constituer.

Les combustibles fossiles, lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie, provoquent des émissions de gaz à effet de serre nocifs, tels que le dioxyde de carbone.

La production d'énergie renouvelable génère bien moins d'émissions que la combustion de combustibles fossiles. Afin de faire face à la crise climatique, il est primordial de passer des combustibles fossiles, qui sont actuellement à l'origine de la majeure partie des émissions, aux sources d'énergie renouvelables.

Parmi les énergies renouvelables, les plus populaires sont l'énergie photovoltaïque et éolienne.

Et dans ce chapitre, nous aborderons comment utiliser ces deux énergies. Nous étudierons le principe de fonctionnement du système d'énergie photovoltaïque, du système éolien et des composants de chaque système pour produire de l'énergie électrique.

III.2 Système d'énergie photovoltaïque :

Comment exploiter l'énergie solaire ? Comment fonctionne une installation photovoltaïque ? Et quels sont ses principaux composants ?

Principe de l'énergie solaire photovoltaïque : transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.[30]



Figure III.1 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque

III 2.1 La conversion d'énergies photovoltaïques

Les panneaux solaires sont formés de plusieurs cellules photovoltaïques qui vont absorber les rayons de soleil et vont ainsi générer un courant continu. Ce dernier va être converti en courant alternatif à l'aide des onduleurs. Le courant alternatif est raccordé en amont de votre tableau électrique pour être injecté dans votre réseau interne. [31]

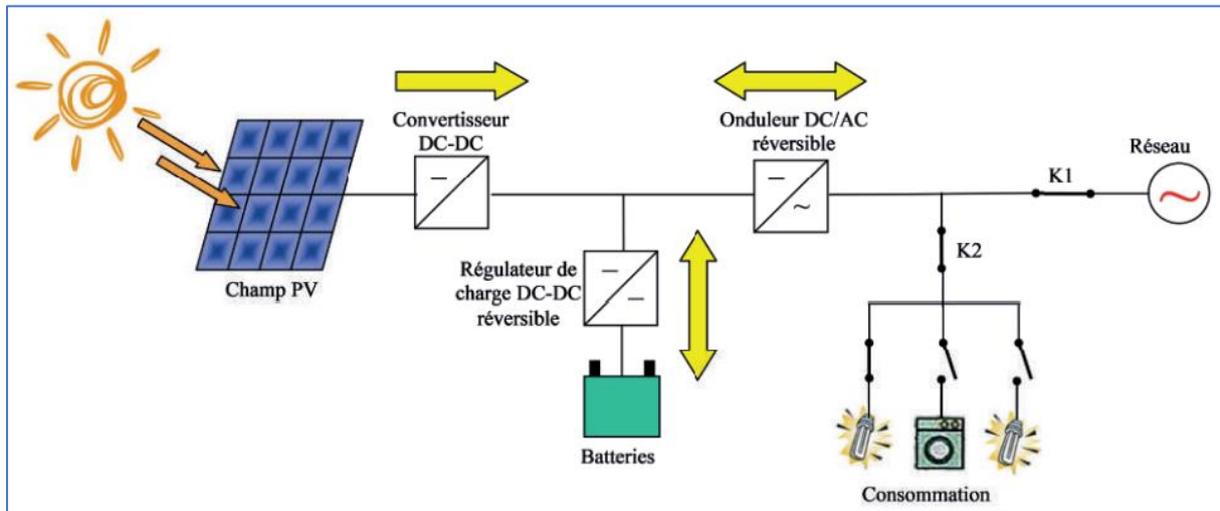


Figure III.2 Conversion d'énergies photovoltaïques

Pour étudier cette transformation physique, il faut identifier ses composantes :

III 2.2 Les composants essentiels des systèmes photovoltaïques :

L'assemblage des différents composants de votre système solaire vous permet d'utiliser de manière optimale l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, le courant alternatif du réseau lorsque la puissance n'est pas suffisante. Ce processus se fait automatiquement.

III 2.2.1 Panneaux solaires

Les panneaux solaires sont composés de multiples cellules de Silicium qui ont pour rôle d'absorber les photons solaires et les transformer en courant continu. L'électricité produite est ensuite transmise à l'onduleur.



Figure III.3 Panneaux solaires

III 2.2.1.1 Comment fonctionnent les cellules photovoltaïques ?

L'effet photoélectrique a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel. Célibataire Les panneaux solaires fonctionnent par effet photoélectrique, c'est-à-dire en créant une force électromotrice liée à l'absorption de l'énergie lumineuse dans un solide.

C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques.

Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semiconducteur) :

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). [30]

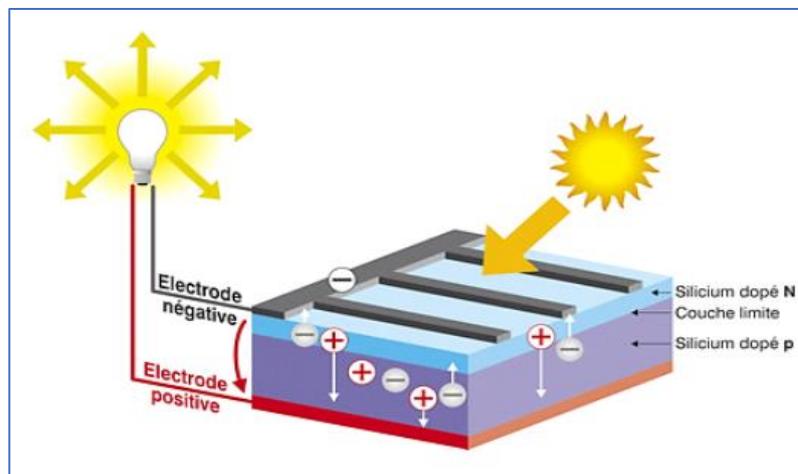


Figure III.4 La cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.

III 2.2.1.2 Les différents types des cellules solaires :

Les cellules solaires ont plusieurs types :

a. Les cellules multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable. Rendement record en laboratoire : environ 40%. [32]

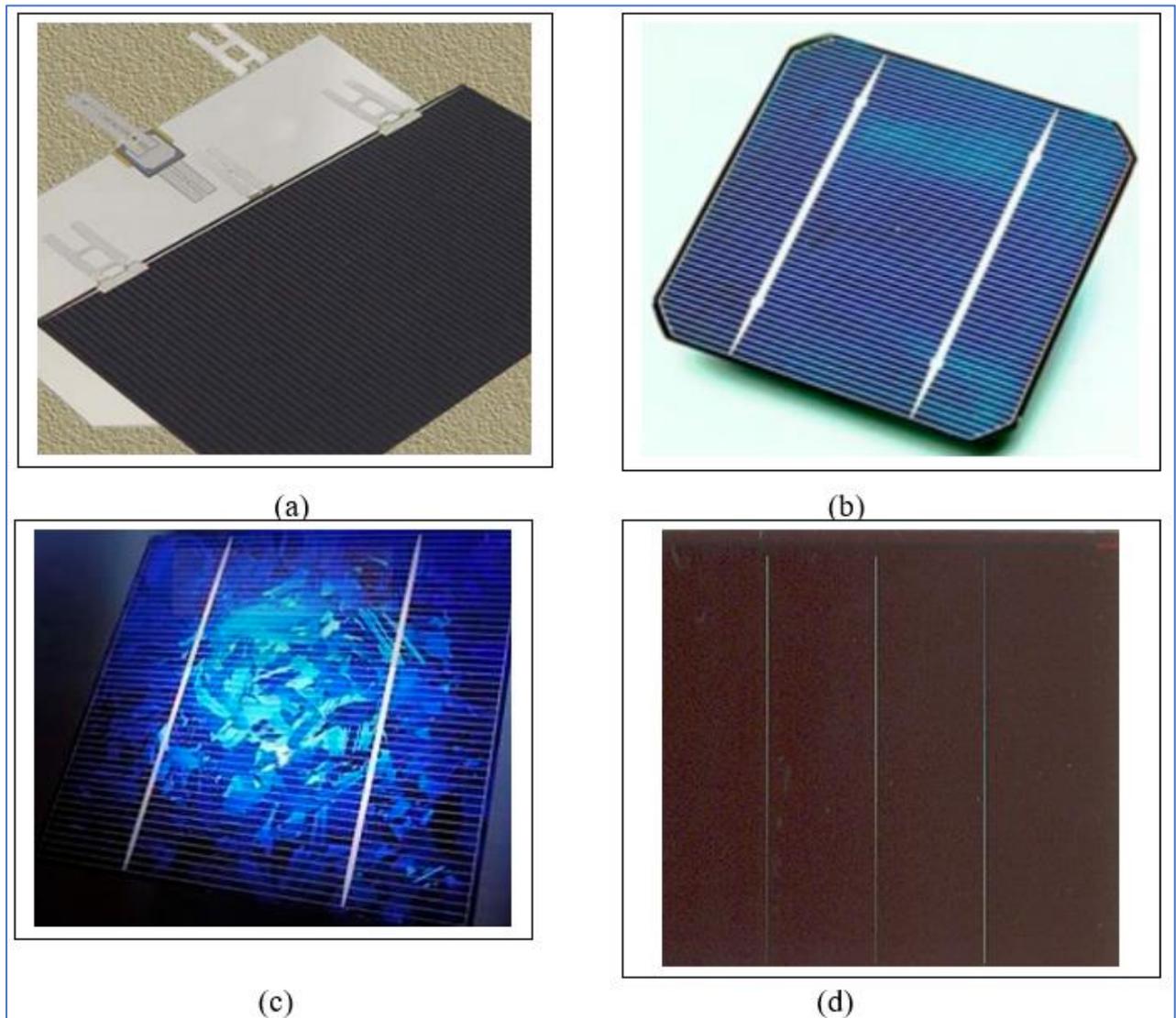


Figure III.5 Cellules (a) multi-jonction, (b) silicium monocristallin, (c) silicium polycristallin
Et (d) silicium amorphe en couche mince

b. Les Cellules en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Rendement module commercial : jusqu'à 20% Coût assez élevé. [32]

c. Les Cellules en silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Bon rendement : #15%

Durée de vie importante (+/- 30 ans)

Meilleur marché que le monocristallin.

Rendement faible sous un faible éclairement. [32]

d. Les Cellules sans silicium en couche mince

Les cellules CIS (cuivre, indium, sélénium) représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

- ✓ Rendement assez faible <10%.
- ✓ Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince.
- ✓ Permet de s'affranchir du silicium.
- ✓ Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité.
- ✓ La cellule peut être construite sur un substrat flexible. [32]

e. Les Cellules silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". Rendement faible mais fonctionne avec faible éclairnement. [32]

III 2.2.1.3 Module photovoltaïque

a. Association des cellules en série

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules Photovoltaïques.

Exemple : 6 cellules placées sur 3 rangées constituent un module solaire de 18 cellules en série.

La tension fournie par ce module est de $18 \times 0.5 = 9V$

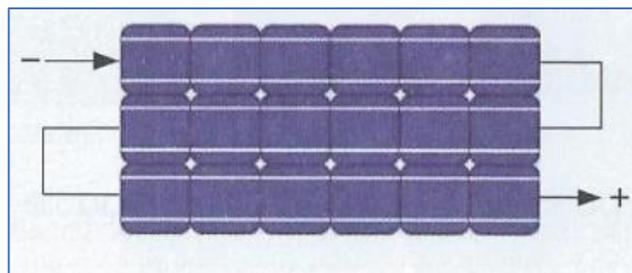


Figure III.6 Branchement de panneaux en série

Un panneau constitué de 24 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12 V, et cela quel que soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est l'intensité I du panneau, variant en fonction de l'ensoleillement, qui va déterminer l'énergie électrique. [30]

b. Diodes « by-pass »

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.

C'est l'effet d'auto-polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot".

Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « bypass » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass). [30]

En cas de masque :

- 1 diode : 100 % du module est en by-pass,
- 2 diodes : 50 % du module est en by-pass,
- 3 diodes : 33 % du module est en by-pass.

III 2.2.1.4 Les avantages et l'inconvénient des cellules :

L'utilisation des matériaux organiques pour des applications photovoltaïques a été étudiée de manière intensive durant les vingt dernières années. Faute d'innovations importantes, ces premières études ont buté sur de faibles rendements de conversion des matériaux. La recherche redémarre très fortement depuis six ou sept ans en Europe, aux États-Unis et au Japon avec un effort motivé par la découverte de matériaux innovants ainsi que par la mise en œuvre de nouveaux types de jonctions.[21]

Tableau III.1 Comparaison entre les cellules à base de silicium

	Amorphe	Monocristallin	Polycristallin
Duré de vie	10 ans	35 ans	35 ans
Avantages	-Fonctionnent avec un éclairage faible. -Les coûts de fabrication sont meilleur marché que ceux du silicium cristallin. -Résiste aux températures élevées. -Souple et rigide et réalisation simple.	- Elles offrent une très bonne productivité, (Presque trois fois plus que les cellules amorphes !).	-une bonne productivité, (intermédiaires entre ceux des cellules à silicium monocristallin et amorphe) - coût de fabrication faible par rapport aux cellules à silicium monocristallin.
Inconvénients	-Mauvais rendement en plein soleil.	- très haut coût de fabrication. - moins écologiques que des panneaux polycristallins. -Mauvais rendement aux températures élevées	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux). -Prix élevé

III 2.2.1.5 Rendement réel des modules

La température des cellules joue un rôle important dans les performances de l'installation photovoltaïque. Par conséquent, une bonne ventilation de la toiture photovoltaïque est nécessaire afin d'assurer une bonne qualité d'installation.[33]

$$\eta = P / (S \times E) \dots\dots\dots (III.1)$$

ηP : Puissance électrique au point de puissance maximale (W)

E : Eclairage solaire (W/m²)

S : Surface hors-tout du module solaire (m²)

Tableau III.2 Rendement réel des modules

Matériau	Rendement de module *	Surface de modules nécessaire pour 1 kWc
Si Monocristallin	14 à 18 -> 22 %	5 à 8 m ²
Si Polycristallin	13 à 19 %	6 à 8 m ²
Couche mince CdTe ou CIGS	12 à 15 %	7 à 10 m ²
Si amorphe	7%	14 m ²

III 2.2.2 Régulateurs de charge MPPT

C'est un contrôleur dit "intelligent" qui dispose d'une carte électronique qui lui permet de charger des batteries sous une tension différente de celle des modules solaires (on peut charger des batteries branchées en 12V avec des modules solaires branchés en 24V, 48V, ou autre).

Ce type de contrôleur permet de mieux charger les batteries surtout lorsque l'éclairement solaire est faible (nuage, brouillard). Cependant, son coût élevé par rapport aux PWM fait qu'il est plus utilisé dans les systèmes industriels ou ceux exigeant un certain niveau de qualité.

Notons qu'on connecte toujours la batterie au contrôleur de charge avant les modules solaires PV et on déconnecte toujours les modules du contrôleur de charge avant les batteries.[34]



Figure III.7 Régulateur de charge MPPT

Remarque : en général, seuls les régulateurs MPPT haut de gamme peuvent détecter les ombres partielles ou sont capables de suivre plusieurs points de puissance. Grâce à cette technologie intelligente, le rendement du panneau solaire augmente et la quantité d'énergie générée peut être jusqu'à 30 % supérieure à celle d'un régulateur de charge solaire PWM.

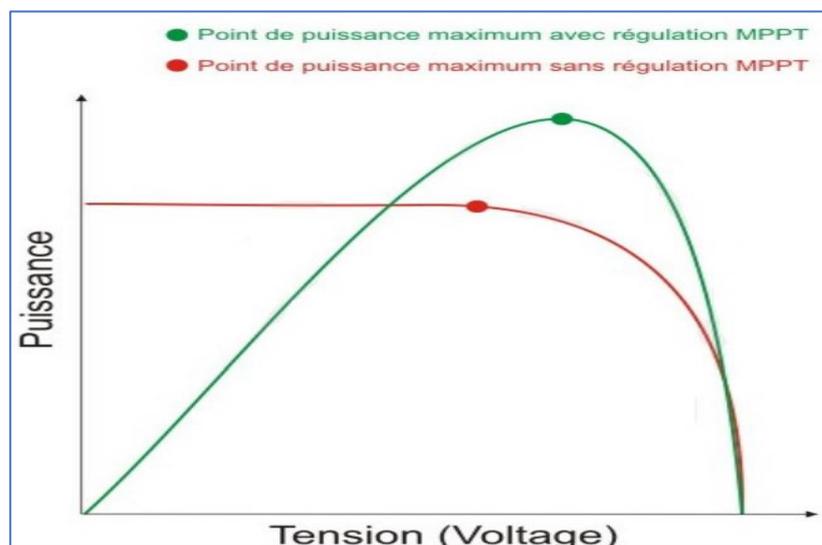


Figure III.8 Point de puissance maximum avec régulation MPPT et sans régulation MPPT

III 2.2.2.1 Principe de la commande MPPT

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles, c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance que peuvent générer tout en réduisant au maximum les pertes d'énergie qui peuvent survenir. La puissance maximale de ces panneaux correspond à un seul point de fonctionnement appelé point de puissance maximale (PPM). Ce point dépend principalement de l'insolation, de la température et des variations de la charge qui sont variables avec le temps. La mise en œuvre d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale est alors nécessaire. Le problème est donc d'effectuer une recherche du PPM tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est souvent choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge. [35]

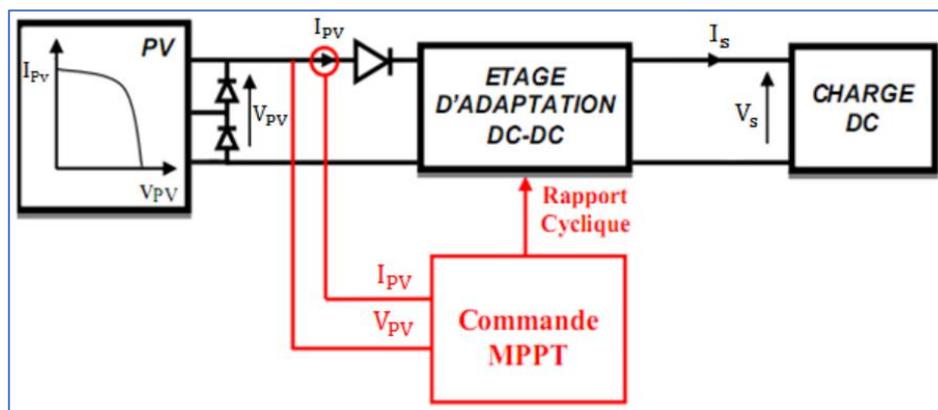


Figure III.9 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

III 2.2.2.2 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants

a. Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} (FCC)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) test basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV [36,37]

$$VMPP = K1 * V_{OC} \dots \dots \dots (III.2)$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression précédant avec V_{OC} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{MPP} est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence V_{ref} (V_{MPP}). Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = V_{ref}$ [34]

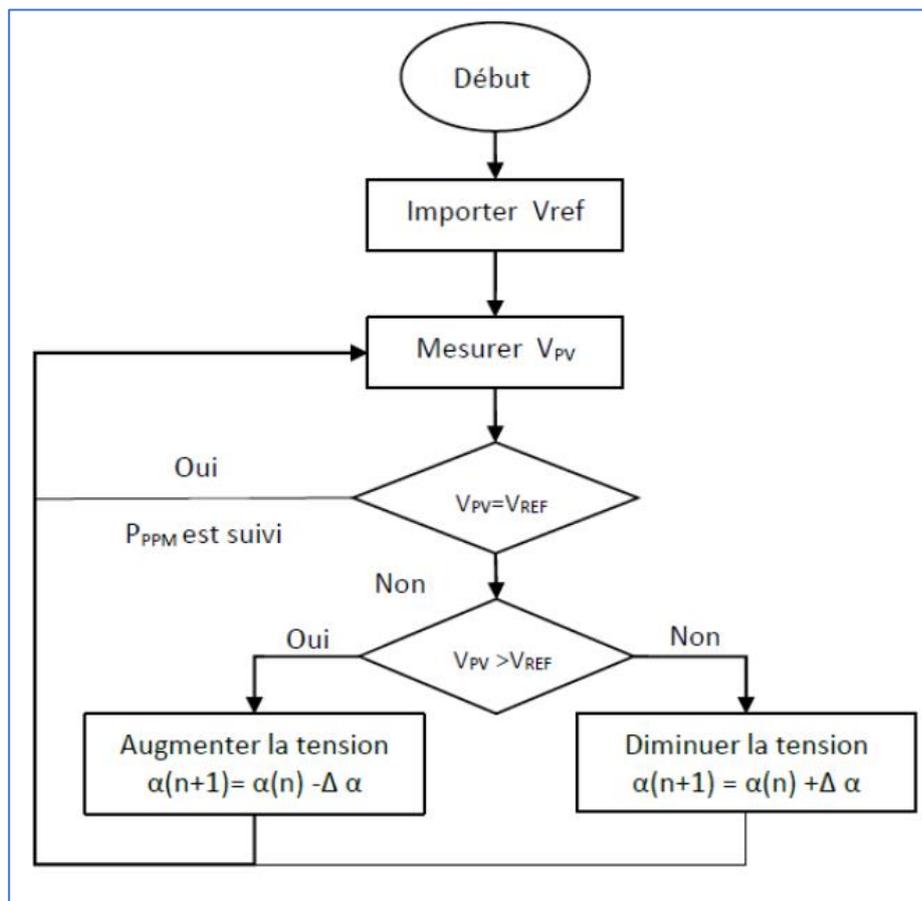


Figure III.10 Algorithme du Constante Tension

b. Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} (FCC)

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) et la relation linéaire

Approximative (II.8) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV [37] :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} \dots \dots \dots (III.3)$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [38].

La mesure du courant I_{SC} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est

généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incremented ou decremented en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (IMPP) correspondant, ce procede est repete jusqu'à ce que la difference se situe dans la plage de tolerance [36].

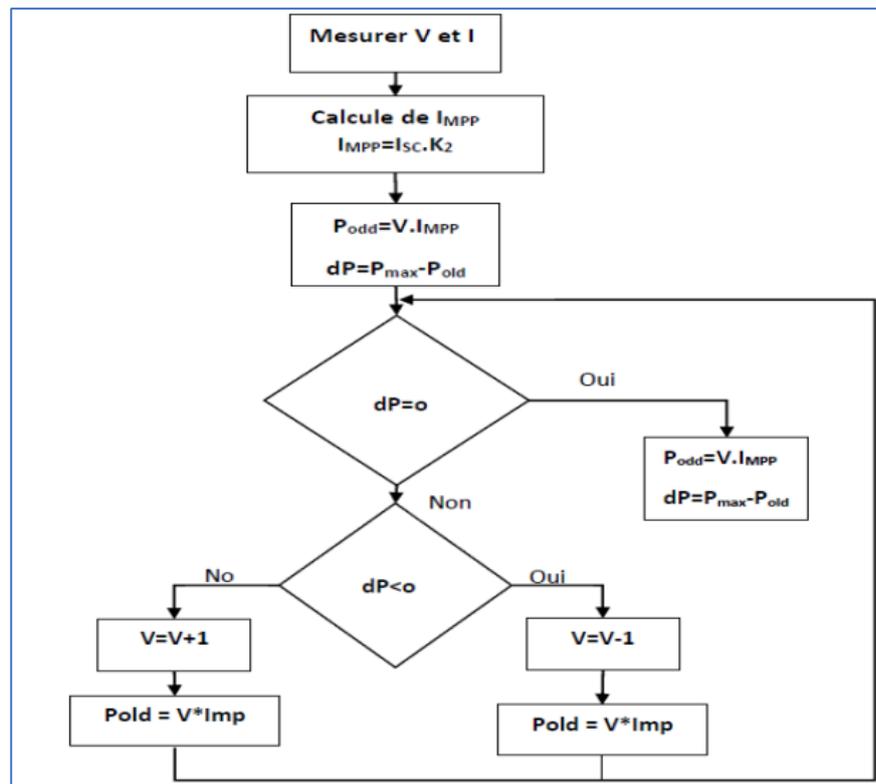


Figure III.11 Algorithme du constant courant

c. Algorithme perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P = V * I$). Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [36].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance. Montre qu'on peut déduire que

si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

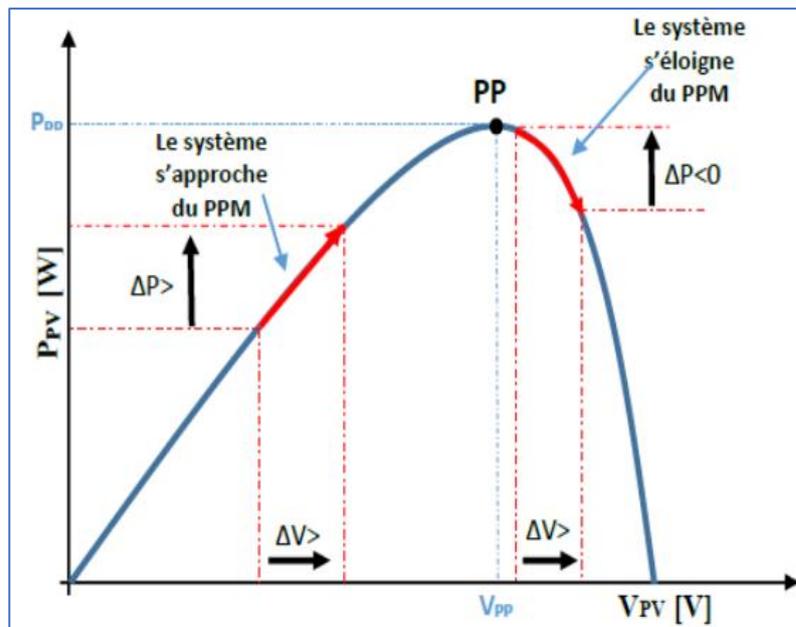


Figure III.12 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

La Figure III.13 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

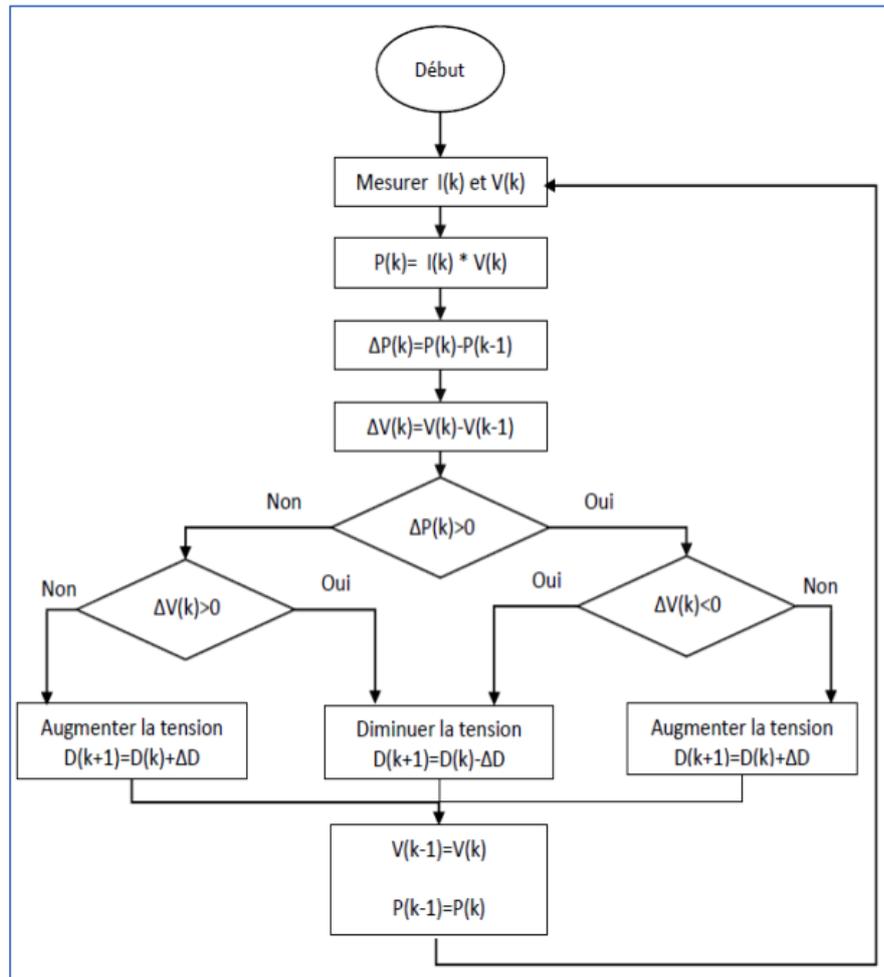


Figure III.13 L'algorithme de P&O classique

d. Algorithme incrémental de la conductance (INC)

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$), comme L'illustre l'algorithme de la (figureII.12). V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{opt} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{PV} .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM.[39]

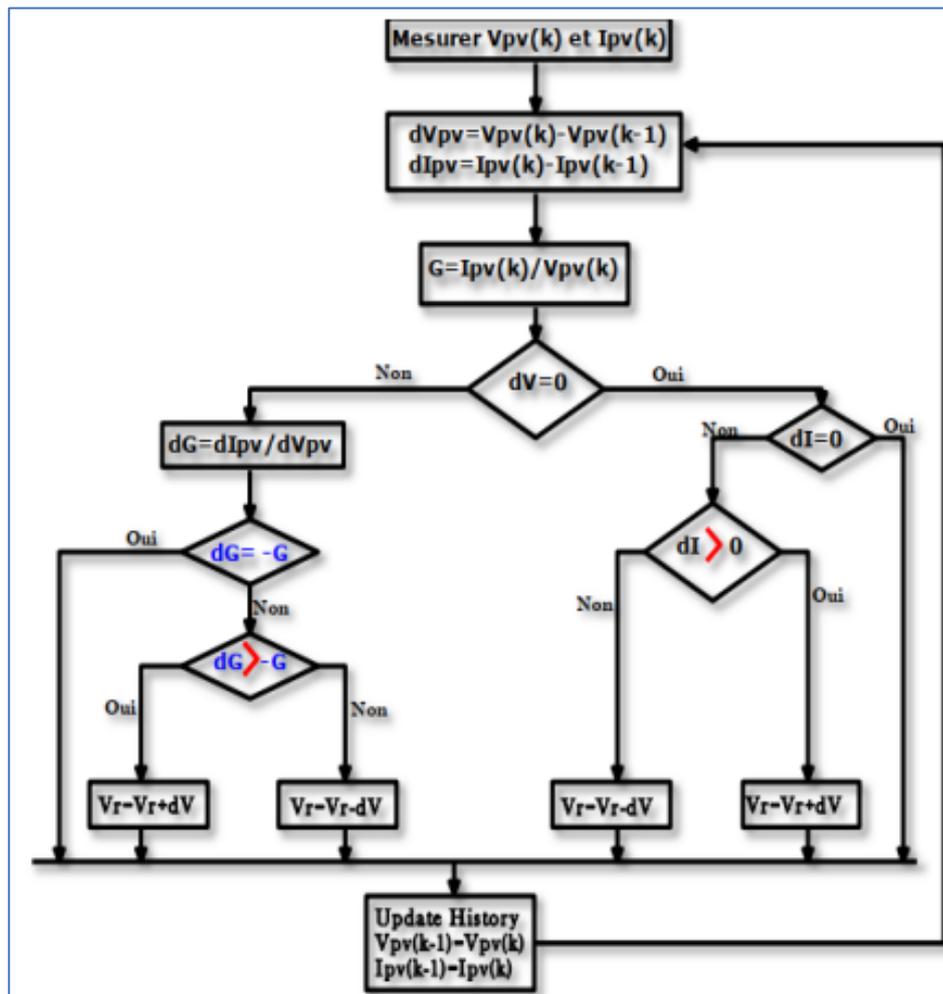


Figure III.14 Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN)

e. Algorithme à Base de la Logique Floue

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [39-40]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non-linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

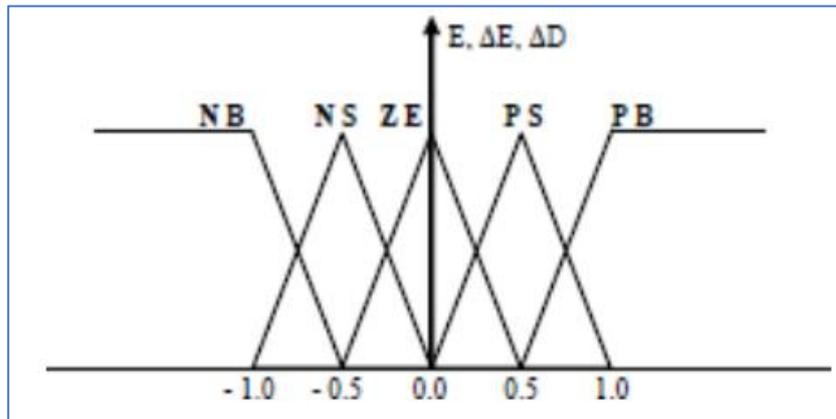


Figure III.15 Structure de base de la commande floue

f. Les techniques des réseaux de neurones artificiels

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.[41]

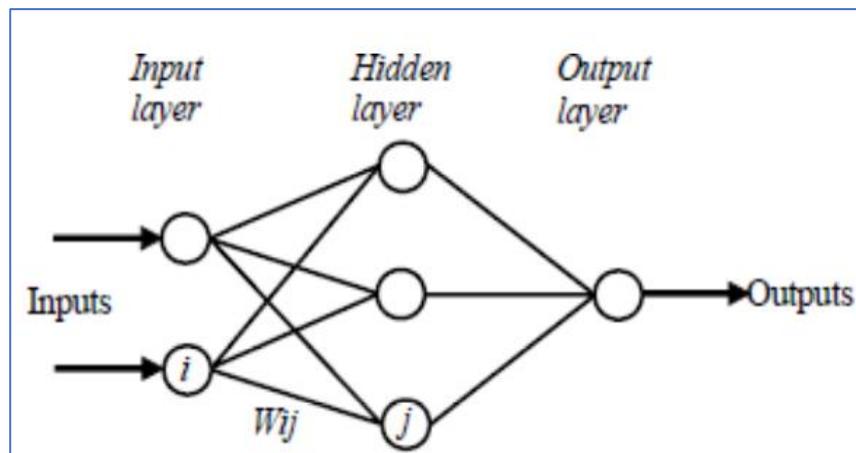


Figure III.16 Exemple d'un réseau de neurones

III 2.2.3 Batteries :

La batterie ou système de stockage de l'énergie, vous permet de stocker l'excédent de production électrique durant la journée pour la consommer à des moments où la production électrique de votre système est plus faible.

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie nécessite d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales :

Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple). Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV [42].



Figure III.17 Batterie solaire

III 2.2.3.1 Caractéristique de charge et de décharge.

Les accumulateurs sont caractérisés par deux variables fonction de l'état de charge Q :

(1) la tension $V_a(Q)$ et (2) la résistance interne $r_a(Q)$. La tension diminue avec l'état de décharge de la batterie ; cependant la résistance interne diminue avec l'état de charge de la batterie. La tension varie entre 1.7V et 2.4V par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. La variation de la résistance interne en fonction de l'état de charge/décharge de la batterie est donnée par la figure III.18. En négligeant la mise en évidence de l'effet d'hystérésis on peut dire que la résistance varie entre deux valeurs limites r_{ac} et r_{ad} [43].

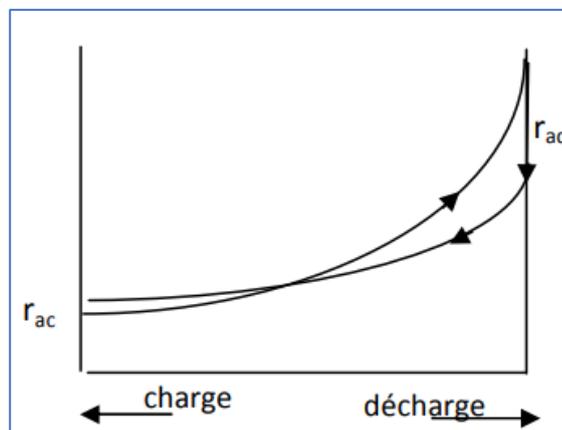
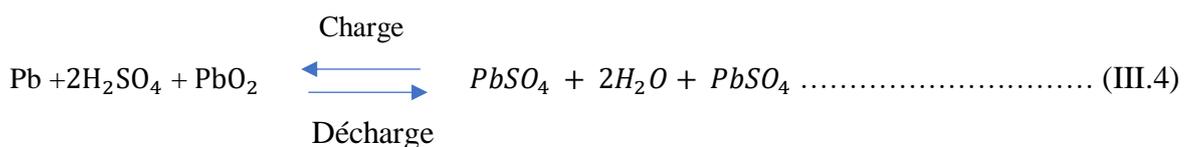


Figure III.18 Variation de la résistance interne



Électrode positive :



Électrode négative :**a. Caractéristique de charge**

Pendant la charge la batterie se comporte comme un récepteur. Le courant rentre par l'anode et sort par la cathode ce qui produit une fabrication d'acide et augmente ainsi la densité de l'électrolyte. En conséquence la densité d'ions augmente également, ce qui fait baisser la résistance série R_{Bi} et augmente la tension V_{Bi} . Vers la fin de la charge le courant tend à électrolyser l'eau produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène est appelé gazéification. En cas de surcharge, la batterie perdra de l'eau qui devra être remplacée.

La Figure III.19 montre la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps. Le processus est composé de trois phases : phase d'un court régime transitoire, phase de la stabilisation de la tension aux environs de 2,2V (fin de charge point M). La phase trois commence à partir du point M et la tension croît rapidement. Les plaques complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte et limitée par le système de régulation (présence d'un régulateur) [43].

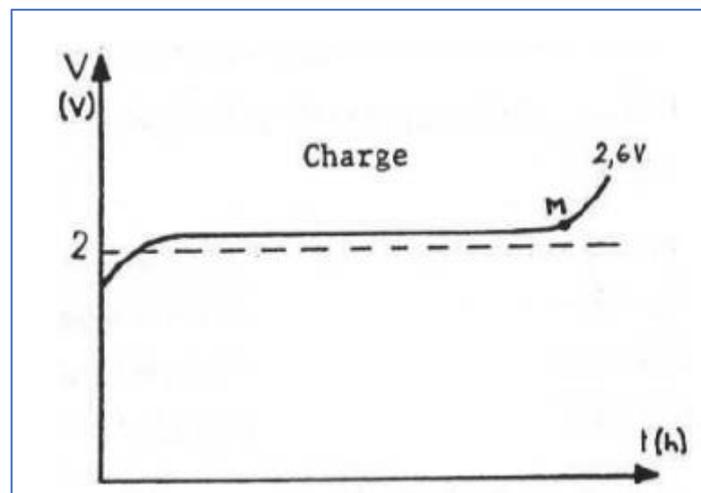


Figure III.19 Caractéristique de charge d'une batterie

b. Caractéristique de décharge

La décharge est la transformation du PbO_2 et du Pb , les matériaux actifs, en $PbSO_4$ accompagné par l'absorption d'acide de l'électrolyte. Pendant la décharge, la tension varie en fonction du temps comme l'indique la Figure III.20. Le processus est composé de trois phases : phase d'un court régime transitoire (la tension baisse), phase de la stabilisation de la tension aux environs de 2V (fin de décharge point N). La phase trois commence à partir du point N

et la tension démunie brusquement (jusqu'au 1,8V). La décharge ne doit pas dépasser une certaine limite afin d'éviter le phénomène de sulfatation de la batterie (formation de grands cristaux permanents) qui empêche le passage du courant. La sulfations des plaques entraine une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse tension selon l'équation suivante :

$$V_B = V_{Bi} - I.R_{Bi} \dots \dots \dots (III.7)$$

La Figure III.20 montre les courbes de décharges à différents courants. On remarque que plus que le courant de décharge est plus important plus que la durée de décharge est très courte.

Typiquement la fin de décharge nominale d'un élément de batterie est d 1.85V [43].

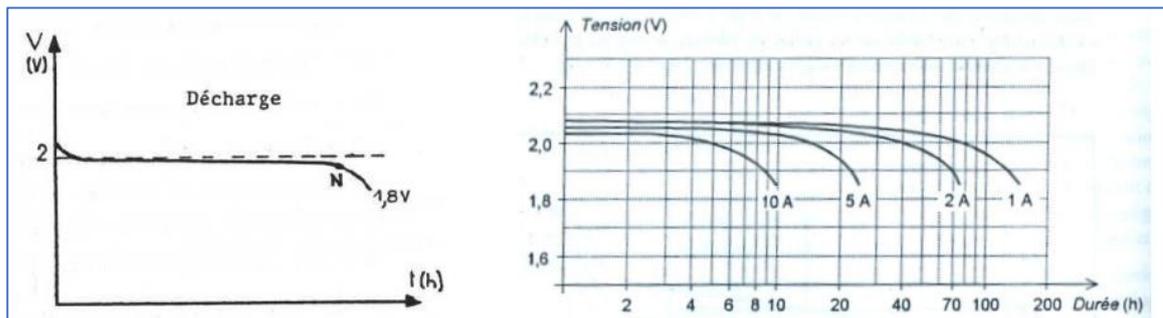


Figure III.20 Caractéristique de décharge d'une batterie

III 2.2.4 Onduleur

L'onduleur intègre trois fonctions principales : la conversion du courant continu en courant alternatif, le couplage et découplage du réseau électrique et le suivi de la puissance maximale (Pmax) du champ photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement et de la température.



Figure III.21 Onduleur triphasé

Il y a deux types d'électricité utilisés courant continue et courant alternatif. Le rôle de l'onduleur c'est converti le courant continue en courant alternatif. [44]

III 2.2.4.1 Principe de fonctionnement des onduleurs

On considère le montage onduleur autonome le plus simple : montage à deux interrupteurs dont la commande est symétrique.

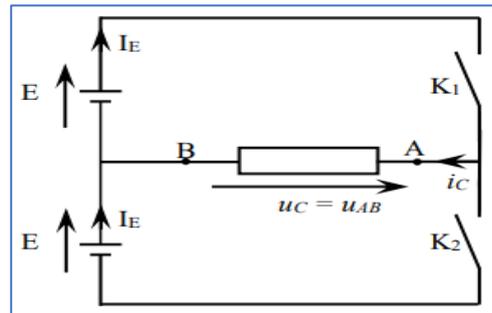


Figure III.22 Principe d'un onduleur autonome en demi-pont

E sont deux sources de tension continue idéales identiques. $K1$ et $K2$ sont deux interrupteurs électroniques commandable à l'ouverture et à la fermeture. On appelle u_C , tension aux bornes de la charge et i_C , intensité du courant dans la charge. La commande est symétrique, cela signifie que pendant la moitié de la période de fonctionnement $K1$ est fermé et $K2$ est ouvert et pendant l'autre moitié de la période de fonctionnement $K1$ est ouvert et $K2$ est fermé [44].

Tableau III.3 Fonctionnements $k1$ et $k2$

$K2$	$K1$	$K2$	Interrupteur ouvert
$K1$	$K2$	$K1$	Interrupteur fermé

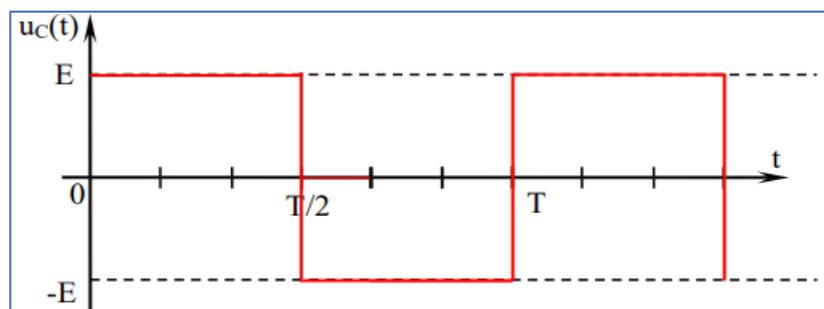


Figure III.23 Commande les interrupteurs $k1$ et $k2$

Sur la première demi-période ($0 < t < T/2$), l'interrupteur $K1$ est fermé et $K2$ est ouvert. Seule la branche du haut est utilisée. La tension E se recopie aux bornes de la charge.

Sur la deuxième demi-période ($T/2 < t < T$), l'interrupteur $K2$ est fermé et $K1$ est ouvert. Seule la branche du bas est utilisée. La tension $-E$ se recopie aux bornes de la charge.

L'onduleur triphasé, son principe de fonctionnement et nous exposons les deux types de commande 120° et 180° , d'autre part, nous rappelons la technique de modulation sinus triangle d'un onduleur de tension [44].

III 2.2.4.2 Principe de l'onduleur de tension triphasé

Chacune des trois tensions de sortie est formé d'une onde bivalente prenant les valeurs $-U$ et $+U$ mais décalées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre.

De plus si le récepteur est couplé en étoile sans neutre ou en triangle, les harmoniques multiples de trois éliminées. Ainsi, le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois. Pour obtenir une tension alternative à partir une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer une fois dans un sens, l'autre fois dans l'autre à la charge.

L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfait impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux, la période de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs. L'architecture de ce convertisseur se compose de plusieurs bras, connectés chacun à une phase du réseau et comportant deux interrupteurs de puissance [44].

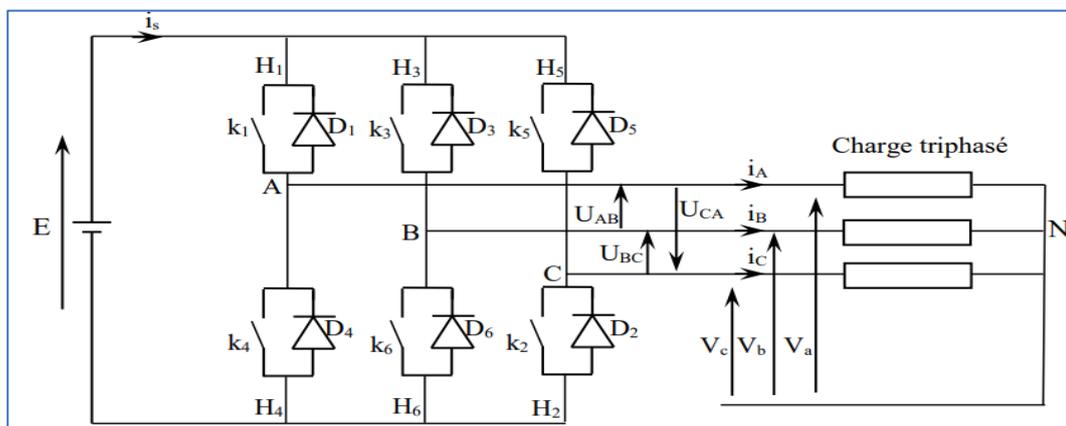


Figure III.24 Structure d'un onduleur triphasé en pont

Les éléments de base de l'onduleur, les interrupteurs de puissance se composent, selon la puissance commutée, de GTO (Gate Turn Off), de MOS de puissance ou D'IGBT (Insulated Gate Bipolaire Transistor), en parallèle avec une diode. La diode permet d'assurer la continuité du courant lors du changement de sens de celui-ci.

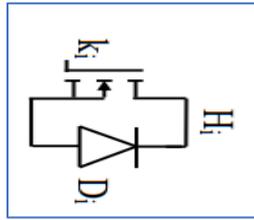


Figure III.25 Interrupteur de puissance avec IGBT et diode

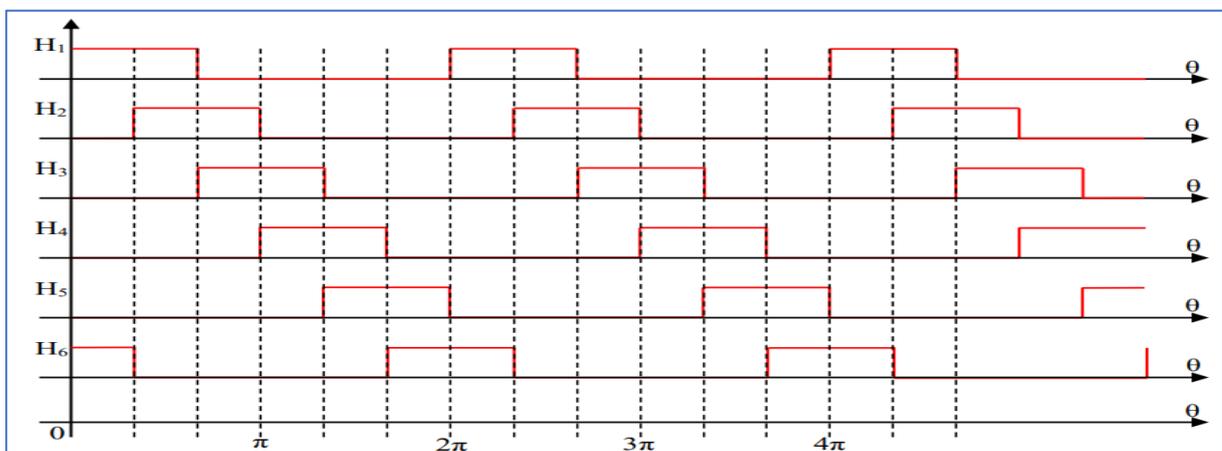
Nous considérons une charge triphasée équilibrée, et pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage en étoile (bien que le branchement d'une charge triangle soit envisageable). Pour cette structure, plusieurs types de commande sont possibles, les plus utilisées sont :

- La commande 120°
- La commande 180°
- Les commandes à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Commande à 120° : Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à un tiers de période, mais avec des séquences décalées de 120° d'un bras par rapport aux autres d'où :

- À tous instants deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués
- Deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.

On obtient donc six séquences de conduction par période tel que l'illustre la Figure III.26 ; de plus il est judicieux de considérer le montage comme étant l'association de trois onduleurs monophasés en demi-point en décomposant la source continue par deux sources équivalentes de tension $E/2$ avec un point milieu, noté O [44].

Figure III.26 Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 120°

Il est alors aisé de déduire les allures des tensions simples à partir de celles des tensions composées. Sur ces chronogrammes, on voit que les trois tensions simples ont une forme en créneaux alternativement positifs et négatifs, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées d'amplitude $E/2$, de période T égale à celle des tensions composées. L'angle de déphasage qu'elles présentent entre elles, deux à deux, est égal à 120° [44].

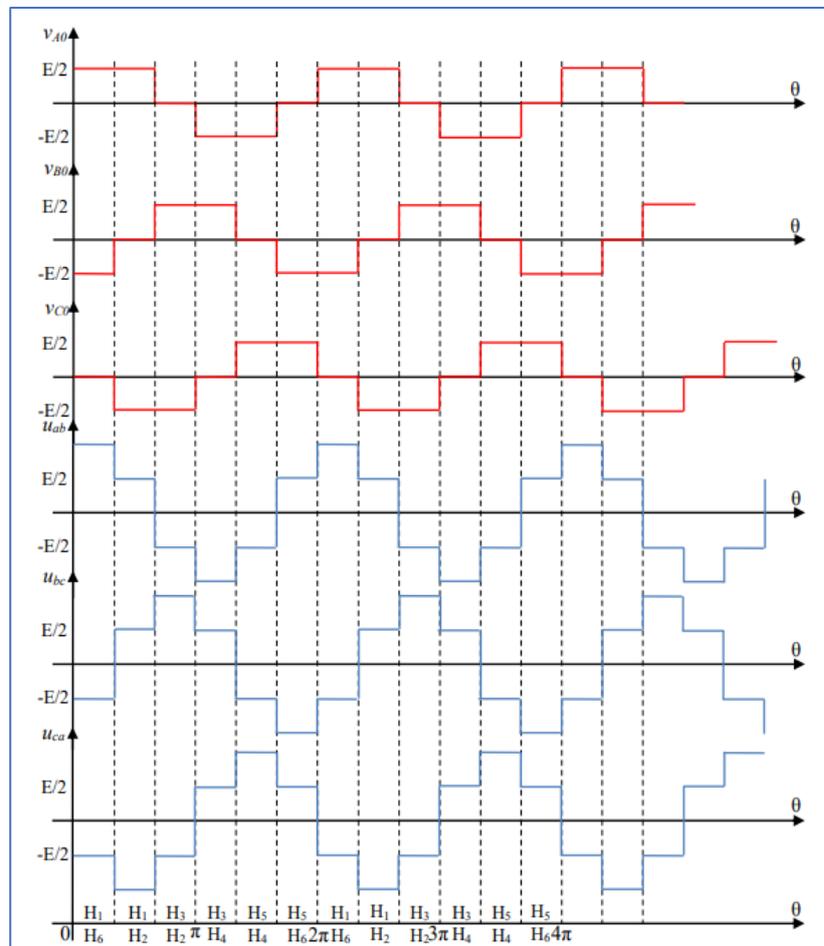


Figure III.27 Construction des chronogrammes des tensions composées

Les expressions des valeurs efficaces sont :

- Pour les tensions composées : $U_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}}$ (III.8)

- Pour les tensions simples : $V_{eff} = \frac{E}{\sqrt{6}}$ (III.9)

- Ce qui conduit au rapport : $U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff}$ (III.10)

Commande à 180° : Comme pour la commande précédente, un onduleur triphasé pilotée par une commande à 180° permet un réglage de la fréquence des tensions composées et simples, mais s'il est nécessaire, le réglage des valeurs efficaces ne peut être réalisé, selon l'origine de la tension continue il sera nécessaire d'insérer un convertisseur statique. Les deux solutions précédentes sont encore envisageables. La commande à 180° sera privilégiée par rapport

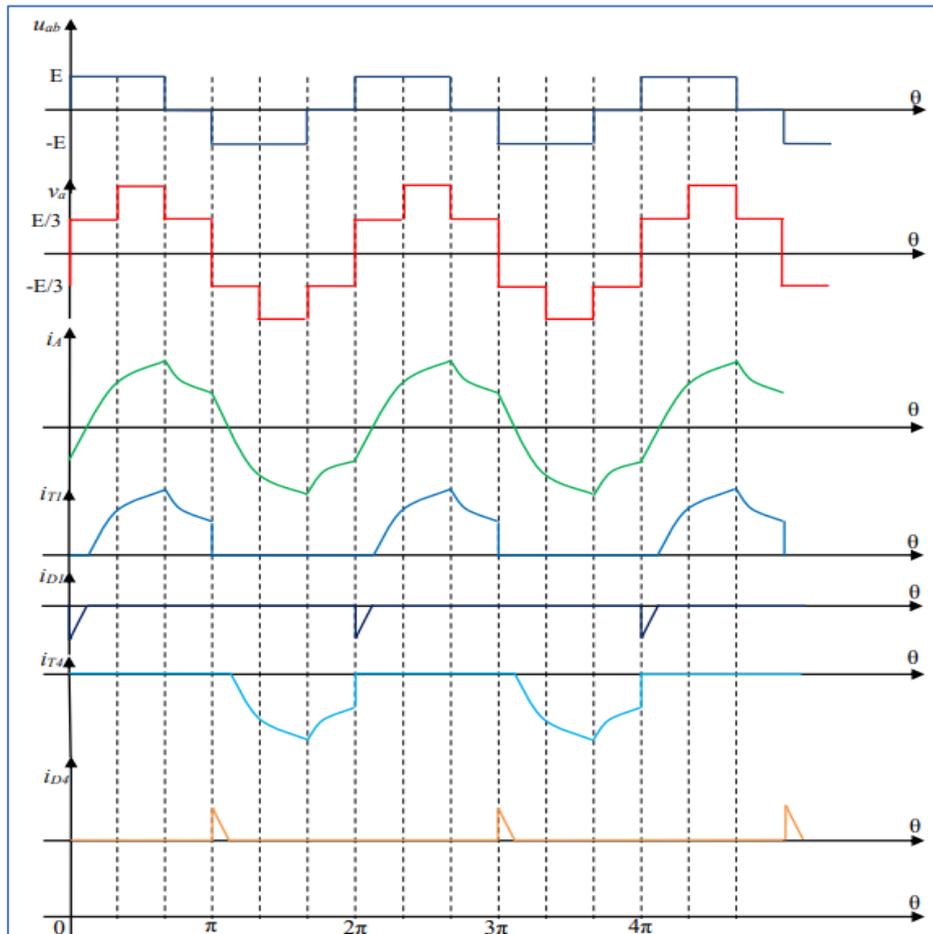


Figure III.29 Chronogrammes des courants parcourant les interrupteurs

La recherche du meilleur point de fonctionnement du système est la principale caractéristique de l'onduleur PV. En effet, le générateur PV a une courbe caractéristique non-linéaire.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement, il augmente si l'éclairement augmente [44].

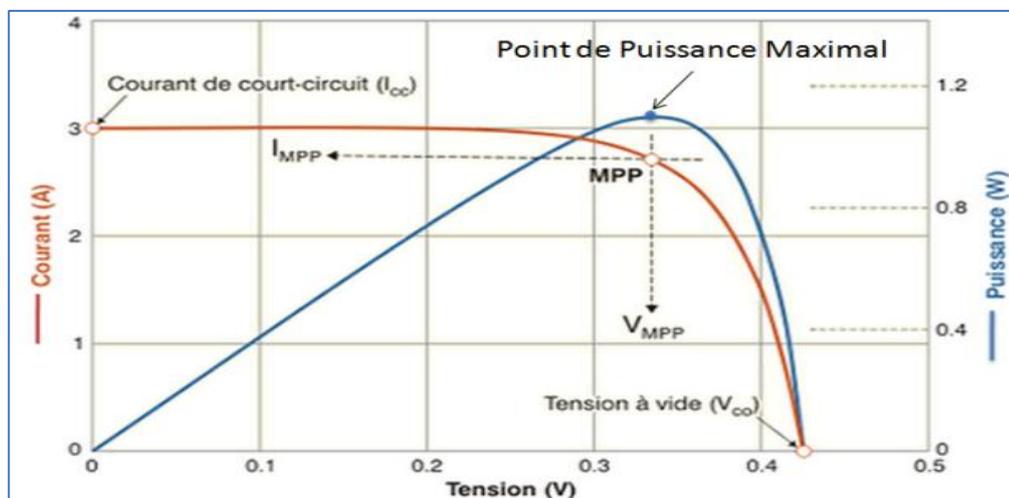


Figure III.30 point de puissance maximal

III 2.2.5 Les armoires de protection et de distribution DC & AC

Toute installation photovoltaïque doit être munie d'un système de protection contre d'éventuels risques électriques afin de protéger les personnes et le matériel. A cet effet, des armoires (coffrets) de protection contre les surintensités et les surtensions doivent être prévues dans la partie à courant continu (DC) et la partie à courant alternatif (AC). Le coffret DC et le coffret AC sont installés respectivement en amont et en aval de l'onduleur.[45]

Le coffret de protection DC est généralement constitué de :

- Fusibles solaires DC spécifiques aux installations PV (portant le marquage PV) ;
- Interrupteur(s)-sectionneur(s) DC ;
- Parafoudre(s) DC.

Le coffret de protection AC est généralement constitué de :

- Disjoncteur(s) différentiel(s) ;
- Interrupteur(s)-sectionneur(s) AC ;
- Parafoudre(s) AC.

Outre les coffrets DC/AC principal, installés au plus près de l'onduleur DC/AC, les installations PV peuvent également contenir de :

- Boite(s) de jonction et de raccordement des chaînes PV et/ou des groupes PV avec :
- Fusibles solaires DC spécifiques aux installations PV ;
- Interrupteur(s)-sectionneur(s) DC ;
- Parafoudre DC.
- Coffret de protection des batteries avec :
- Fusibles DC ;
- Sectionneur(s) ou interrupteur(s)-sectionneur(s).

L'architecture descriptive des installations PV, autonomes avec système de stockage et raccordées au réseau.

III 2.2.6 Réseau :

Bien que vous ayez une installation photovoltaïque, vous restez connecté au réseau électrique. Cette connexion vous permettra de consommer l'électricité de votre fournisseur lorsque vos panneaux ne produisent pas assez d'énergie pour couvrir votre consommation.

III 2.2.6.1 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau

a. Avantages

- n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins. [46]

b. Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui effectuent les travaux de réparation. Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau...

Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où le kWh photovoltaïque sera compétitif avec le kWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire). Il est évident que ce choix n'est aujourd'hui économiquement viable qu'avec un soutien de fonds publics significatifs, et c'est ce que ce passe dans la plupart des pays européens. Mais ce concept est tellement séduisant que de plus en plus de personnes sont intéressés et souhaitant participer à la démonstration qu'il est possible de produire soi-même d'électricité. [46]

III 3 Système d'énergie éolienne

L'énergie éolienne : transformer l'énergie du vent en énergie électrique via une génératrice.



Figure III.31 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

III 3.1 La conversion d'énergies éolienne :

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait au cours de différentes étapes, qui font appel à des technologies très diverses.[47]

- **La transformation de l'énergie par les pales**

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

- **L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur**

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

- **La production d'électricité par le générateur**

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

- **Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur**

L'électricité produite ne peut pas être utilisée directement : elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique.

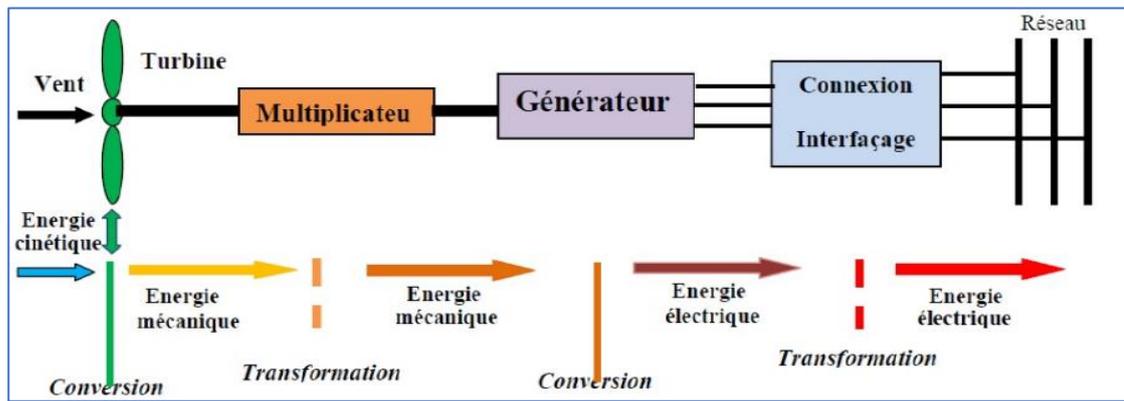


Figure III.32 principes de la conversion de l'énergie éolienne

III 3.2 Les différents types d'éoliennes

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière, Avec les fermes « offshore » on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique, Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont: [48]

III 3.2.1 Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien C_e , type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. [48]



Figure III.33 : éoliennes à axe horizontal.

III 3.2.1.1 Les avantages d'une machine à axe horizontal :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage. [48]

III 3.2.1.2 Les inconvénients d'une machine à axe horizontal :

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

III 3.2.2 Les éoliennes à axe vertical :

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus. L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages : - Elle est simple à fabriquer - Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.[48]

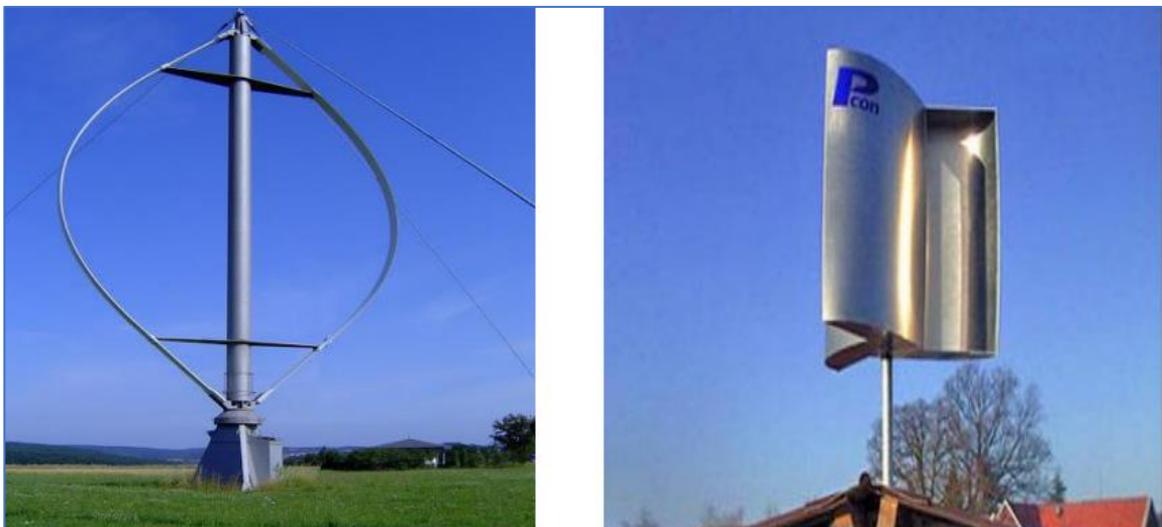


Figure III.34 éolienne à axe vertical.

III 3.2.2.1 Les avantages d'une machine à axe vertical :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour. [48]
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

III 3.2.2.2 Les inconvénients principaux :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne). [48]

III 3.3 Les composants essentiels des systèmes éoliens :

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. [49]

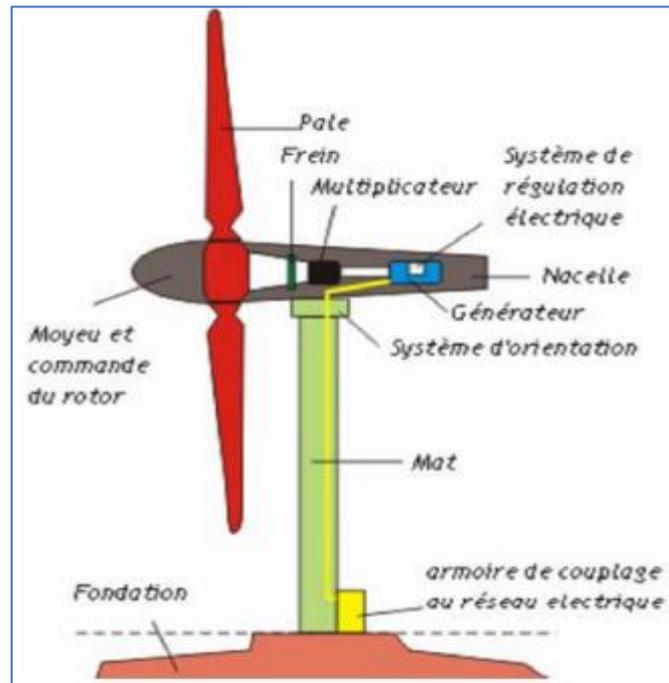


Figure III.35 Composante d'une éolienne de forte puissance

III 3.3.1 Les pales d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement. [49]

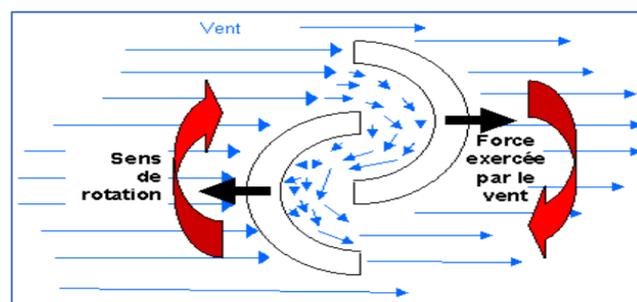


Figure III.36 Schéma de principe du rotor

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne.

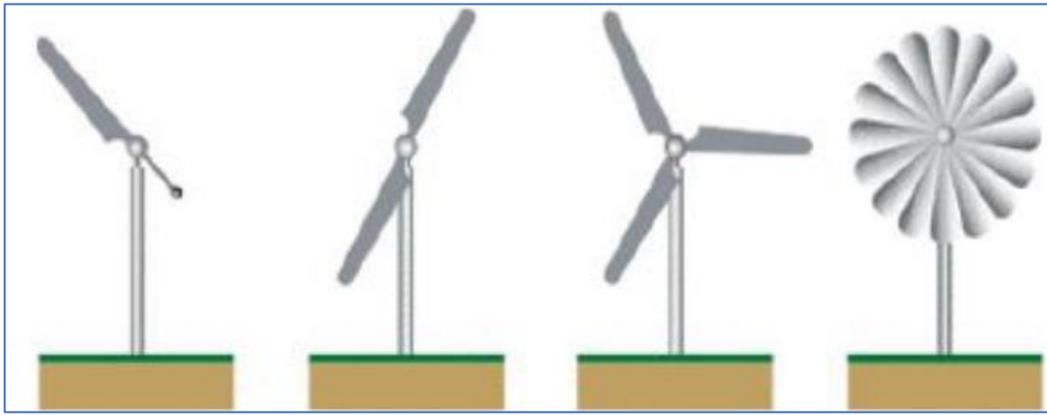


Figure III.37 Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

III 3.3.2 Arbre primaire

Il s'agit de l'arbre du rotor de la turbine éolienne. IL tourne avec une vitesse de rotation allant de 10 tours/minute (tr/min) à plus 25 tr/min. IL est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur. [50]

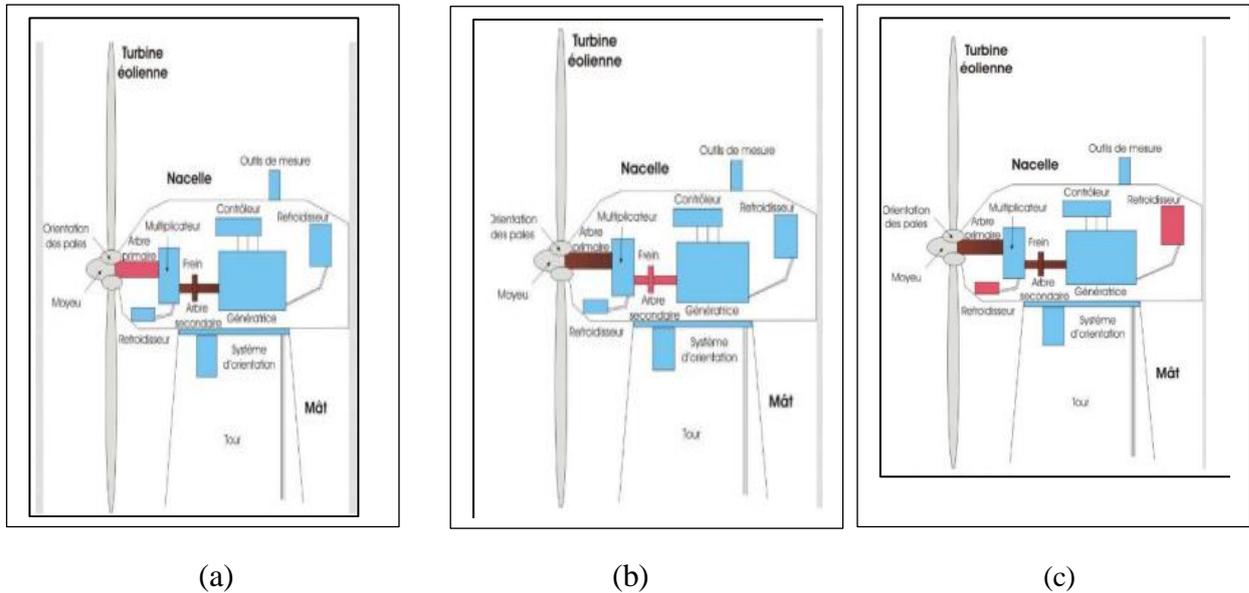


Figure III.38 Les arbres d'un system éolienne

III 3.3.3 Arbre rapide ou arbre secondaire

IL relie le multiplicateur à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque pour arrêter la rotation en cas de grand vent. Figure III.38. [50]

III 3.3.3.1 Refroidissements

Le refroidissement de la génératrice et le multiplicateur est indispensable. Les refroidisseurs employés sont Figure III.38. [50]

- Ventilateurs.
- Radiateurs à eau et à huile.

III 3.3.3.2 Les systèmes de freinage

Un détecteur de vitesse déclenche, à un certain seuil prédéterminé, un mécanisme automatique d'arrêt complet de l'éolienne. Il ne s'agit plus d'un système de ralentissement, mais bien d'un stoppage complet. Lorsque le vent baisse d'intensité, le frein est relâché et l'éolienne est de nouveau libérée. Ces arrêts peuvent aussi être déclenchés lorsque l'automate détecte un problème de réseau.

Les éoliennes à pas fixe et régulation Stalle comportent souvent, par sécurité, deux freins à disques. Un tel système permet de freiner l'éolienne en douceur sans trop de contraintes et fatigue de la tour et des éléments mécaniques.

Le système d'arrêt par frein à disque automatique est le même que pour le freinage d'une voiture.



Figure III.39 Frein à disque

III 3.3.3.3 Stratégies de commande de la turbine :

La courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

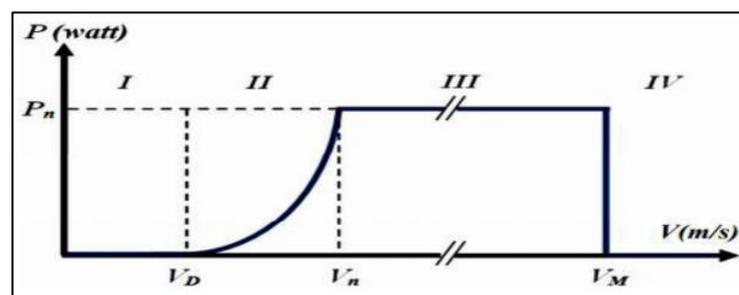


Figure III.40 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

VD : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs.

VD : varie entre 2.5 m/s et 4 m/s pour les éoliennes de forte puissance.

Vn : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, Vn varie entre 11.5 m/s et 15 m/s en fonction des technologies.

VM : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de

tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25 m/s.

Zone I : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante, La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n), Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.[48]

III 3.3.4 Multiplicateur

Le multiplicateur ou boîte de vitesse permet de faire passer la vitesse de rotation de 20-40 tr/min à 1500 tr/min à l'aide d'engrenages. La vitesse de 1500tr/min est nécessaire pour faire Fonctionner la génératrice (d'une manière optimale). [50]

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs : [49]

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.



Figure III.41 Multiplicateur et ses engrenages.

III 3.3.5 Génératrice MSAP

- Soit produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement « génératrice » dans deux quadrants du plan couple – vitesse. L'alternateur est une application particulière de la machine synchrone, fonctionnant en génératrice dans un seul quadrant du plan couple – vitesse.
- Soit absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement « moteur » Les générateurs triphasés (ou moteurs) utilisent un champ magnétique tournant. Le moteur est synchrone, lorsque l'aimant situé au centre tourne à une vitesse constante et se synchronise avec la rotation du champ magnétique. Les machines concurrentes ont opéré une partie importante du marché des transformateurs électromécaniques et couvrent une très large gamme d'énergie allant de quelques mégawatts à environ 1 gigawatt. Traditionnellement, les forces fortes restent le domaine réservé à la production d'électricité. En revanche, en fonctionnement moteur, les forces installées dépassent rarement quelques dizaines de mégawatts. MSAP a été utilisé dans le domaine de la production d'électricité en exploitant l'énergie éolienne sur des sites isolés connectés au réseau de distribution [5-6]. Où en fait, l'inducteur à aimant assure la présence des f.é.m. Et la possibilité de freiner par vent fort, simplifiant la conception des turbines. La sortie qui en résulte simplifie l'élimination des freins à air au bout des pales de l'éolienne. [51]

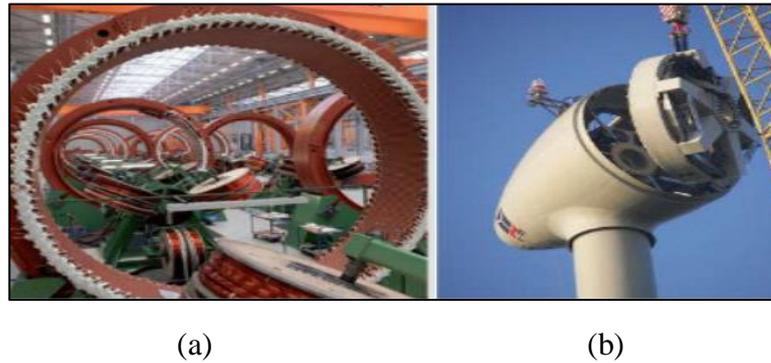


Figure III.42 Génératrice (a) annuaire (b) en montage.

III 3.3.5.1 Fonctionnement d'une génératrice MSAP

La machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse 90° . La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator.

Le fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus simple que celui du moteur à courant continu : le stator muni d'un enroulement polyphasé, triphasé dans la plupart des cas, est alimenté par un système de tensions et courants créant dans l'entrefer un champ d'induction tournante B_{ri} . [51]

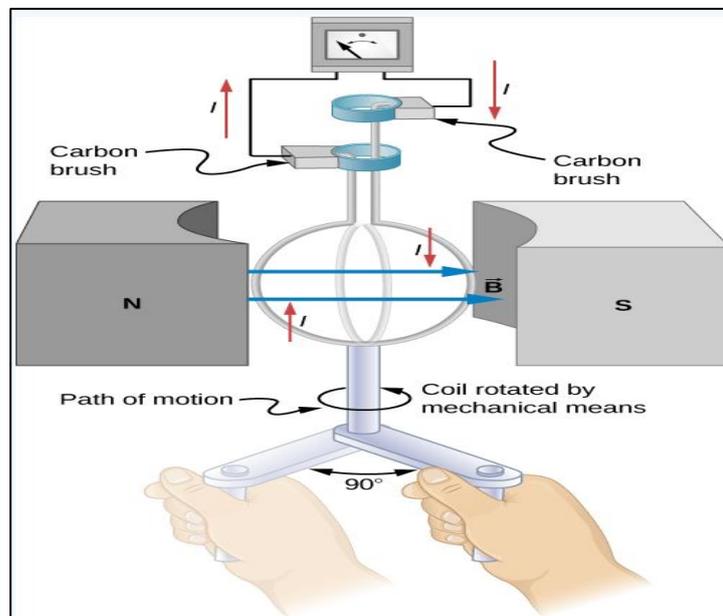


Figure III.43 Fonctionnement d'une génératrice MSAP

Lorsque cette bobine du générateur tourne d'un quart de tour, le flux magnétique Φ_m passe de son maximum à zéro, induisant une force électromotrice.

III 3.3.5.2 Les avantages et l'inconvénient de la MSAP

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

a. Les Avantages

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques. Quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous :

L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.

- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses [51]

b. Les Inconvénients

Coût élevé (à cause du prix des aimants).

- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule (fonctionnement moteur).
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants [51]

III 3.3.6 Contrôleur électronique

Le contrôleur électronique est le cerveau de l'éolienne. Il contrôle le fonctionnement général de l'éolienne qui comporte entre 100 à 500 paramètres. Parmi autre, il contrôle le démarrage, freinage, orientation des pales et de la nacelle, refroidissement du générateur. Il est en lien permanent avec le système de mesure (anémomètre, girouette).[50]



Figure III.44 Contrôleur d'une éolienne

III 3.3.7 Les Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous). [52]

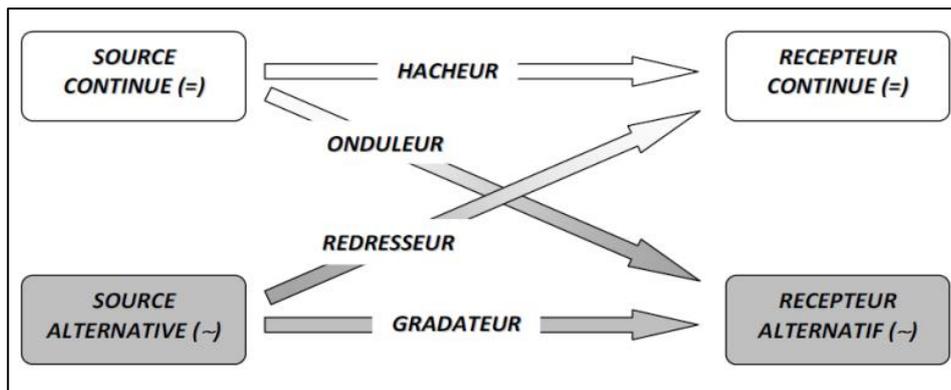


Figure III.45 Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

Il Ya plusieurs types des convertisseurs statiques :

III 3.3.7.1 L'onduleur

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue. [52]

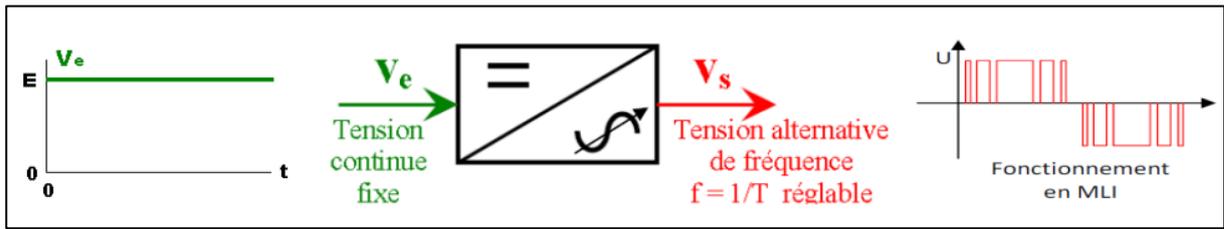


Figure III.46 Principe de base de l'onduleur.

III 3.3.7.2 Le Redresseur :

Les redresseurs sont des convertisseurs statiques permettant, à partir de tensions alternatives, d'obtenir des grandeurs électriques dont la valeur moyenne est différente de zéro. L'intérêt des dispositifs statiques modernes réside dans le fait qu'ils effectuent toutes les transformations par fermeture et ouverture d'interrupteurs électroniques (appelés soupapes dans le cas général) présentant des temps de réponse faibles, des pertes faibles et un encombrement réduit. [52]

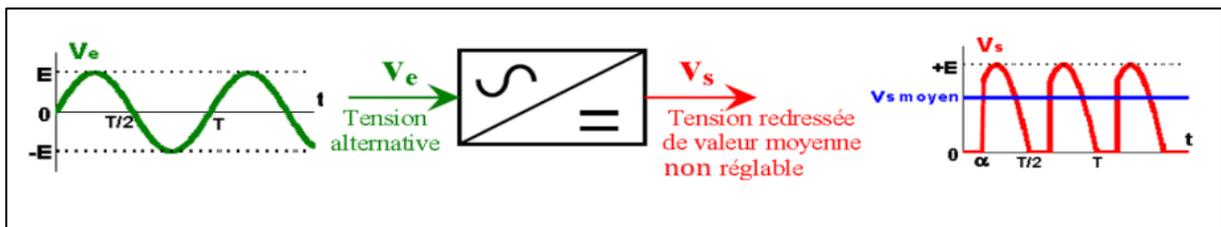


Figure III.47 Principe de base du redresseur.

- **Les redresseurs non commandés** : ils sont à base de diodes, sont seulement utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

- **Les redresseurs semi commandés** : ils comportent des thyristors et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi commandés sont appelés le convertisseur unidirectionnel car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue.

- **Redresseur commandé** : ne comporte que des thyristors, ils sont appelés les convertisseurs bidirectionnels car la puissance peut circuler dans les deux sens.

III 3.3.7.3 Hacheur

Hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre 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. [52]

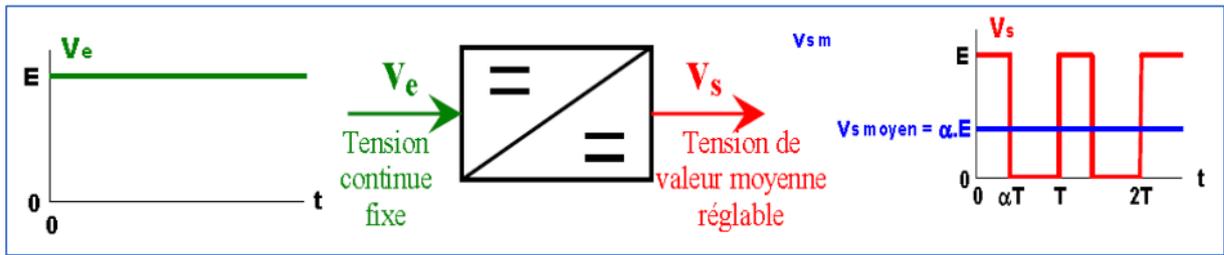


Figure III.48 Principe de base d'un hacheur.

a. Différents types des hacheurs :

On distingue plusieurs types des hacheurs :

- ✓ Hacheur abaisseur « Buck Converter »
- ✓ Hacheur élévateur « Boost Converter »
- ✓ Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost Converter »

Hacheur série (Buck) :

Hacheur série Cela s'appelle hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. [52]

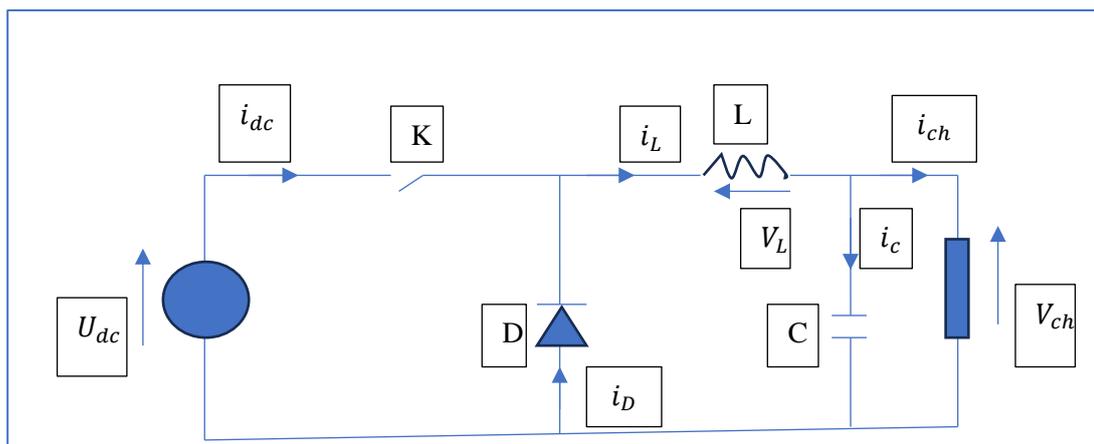


Figure III.49 Circuit d'hacheur série (abaisseur)

Hacheur parallèle (Boost) :

Hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peuvent se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. [52]

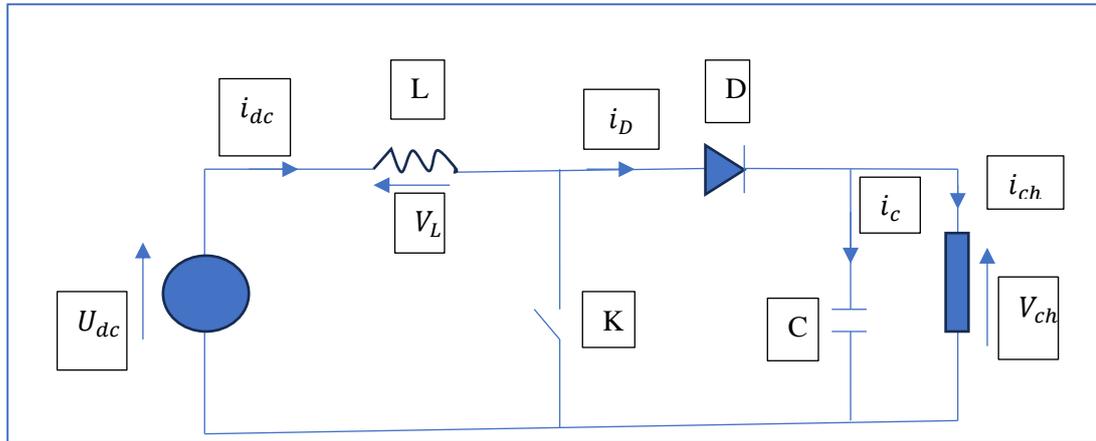


Figure III.50 Circuit d'hacheur parallèle (élevateur).

Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) :

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, de type Buck-boost. L'hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). [52]

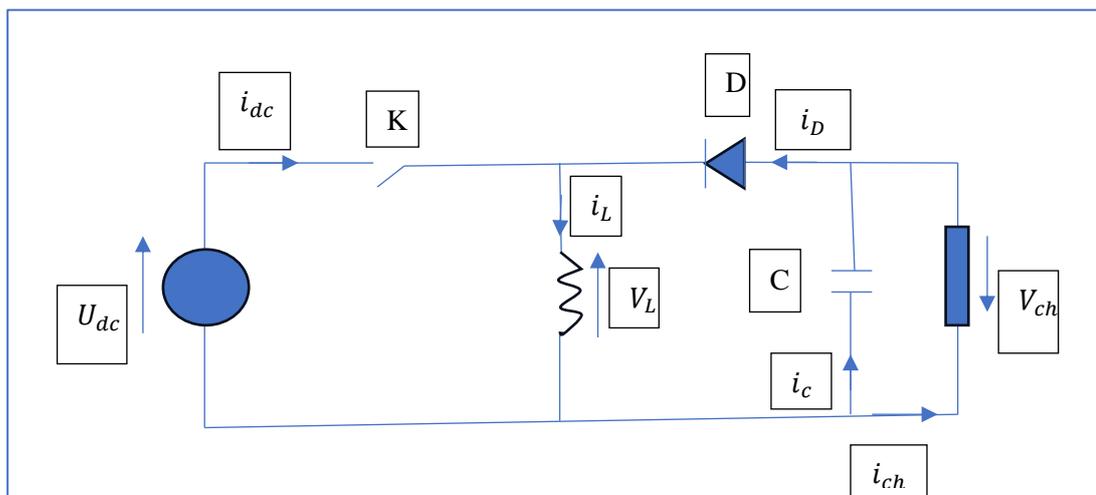


Figure III.51 Circuit d'hacheur Buck-Boost

b. Gain en tension des convertisseurs :

Le tableau ci-dessous représente les gains en tension des différents convertisseurs continu-continu. [52]

Tableau III.4 Gain en tension des convertisseurs

	Boost	Buck	Buck-Boot
Gain en tension	$\frac{1}{1 - \alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

III 3.3.7.4 Gradateur

Le gradateur est un montage qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source. [52]

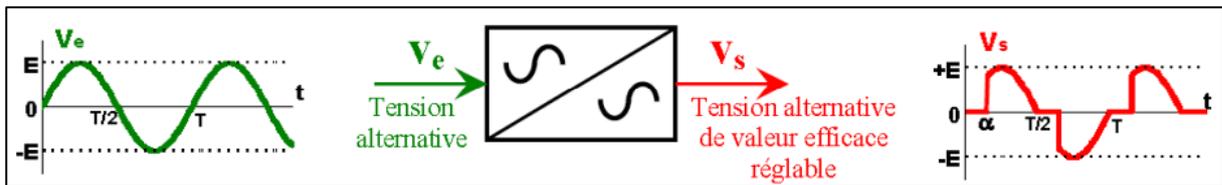


Figure III.52 Principe de base du gradateur.

La structure de base repose sur un interrupteur électronique capable de conduire dans les deux sens à l'état passant et de supporter une tension également dans les deux sens à l'état bloqué.

Cet interrupteur peut être alors réalisé :

- ✓ Soit avec un seul composant : le triac
- ✓ Soit en assemblant deux thyristors tête-bêche

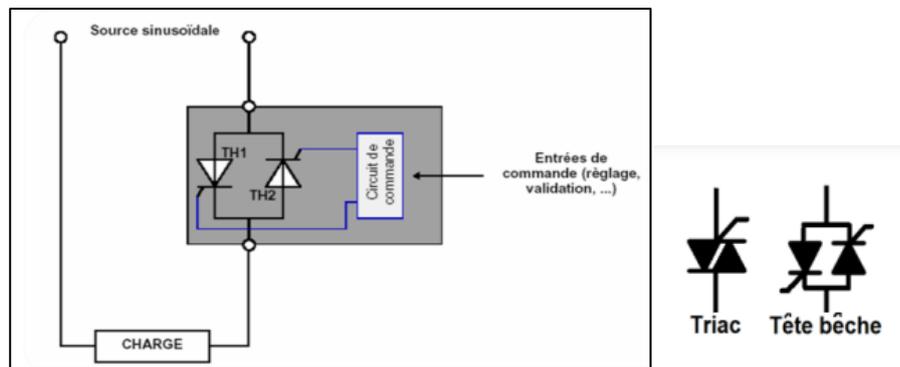


Figure III.53 La structure d'un gradateur monophasé

III 3.3.8 La tour

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

- Tour mât haubané : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- Tour en treillis : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap

certain

- Tour tubulaire : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané. [49]

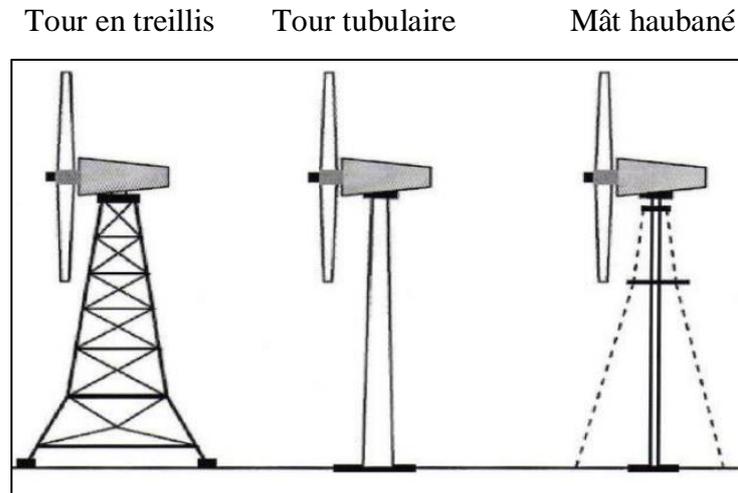


Figure III.54 Différents types de tours

III.4 Conclusion

Il est évident que la dynamique énergétique du 21ème siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable. Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire et les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent. Plusieurs technologies des systèmes solaires et éoliens sont envisageables, mais les plus intéressants ce sont ceux solaires photovoltaïque et éoliens à axe horizontal.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des principes de fonctionnement des systèmes d'énergie photovoltaïque et éolienne et étudié les composants les plus importants de chaque système.



Chapitre 04 :
Modélisation et simulation
D'un system hybride

IV.1 Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer les caractéristiques de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres dans les systèmes photovoltaïques et éoliens, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPPT.

Cette simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation des divers systèmes, on peut tracer toutes les étapes de la conversion de deux énergies et identifier en détail les pertes à travers les deux systèmes.

Ce chapitre, a pour but l'étude modélisation et simulation des systèmes photovoltaïques et éoliens avec une commande MPPT « perturbation et observation "P&O" ».

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2 L'outil MATLAB R2018b / Simulink

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :[53]

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Tool boxés).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Block sets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.[54]

- Simulation I/O : importez et exportez des données de signal depuis ou vers des fichiers MDF
- Source de contrôle APIs : interagissez avec le contrôle de source Git par programmation
- Données illimitées : simulez et générez du code C++ pour des signaux dimensionnés dynamiquement dans les modèles Simulink avec les algorithmes MATLAB.
- Bloc d'importation FMU : importez des unités de maquette fonctionnelle (FMU) définies dans les spécifications FMI 3.0 et générez du code.

IV.3 Modélisation et simulation des systèmes hybrides (photovoltaïques et éolienne et pile à combustible) avec batterie lithium

N'étant pas apte à satisfaire le besoin en énergie de façon indépendante et stable, la meilleure solution envisagée pour les éoliennes et les panneaux photovoltaïques est de les coupler soit ensemble soit à d'autres systèmes de production d'énergie. Ceci procurer plus de stabilité au système et d'augmenter le rendement global. L'autre solution est de coupler les deux systèmes ensemble (Figure IV.1) pour pouvoir profiter des ressources d'énergie en même temps (le vent et le soleil).[55]

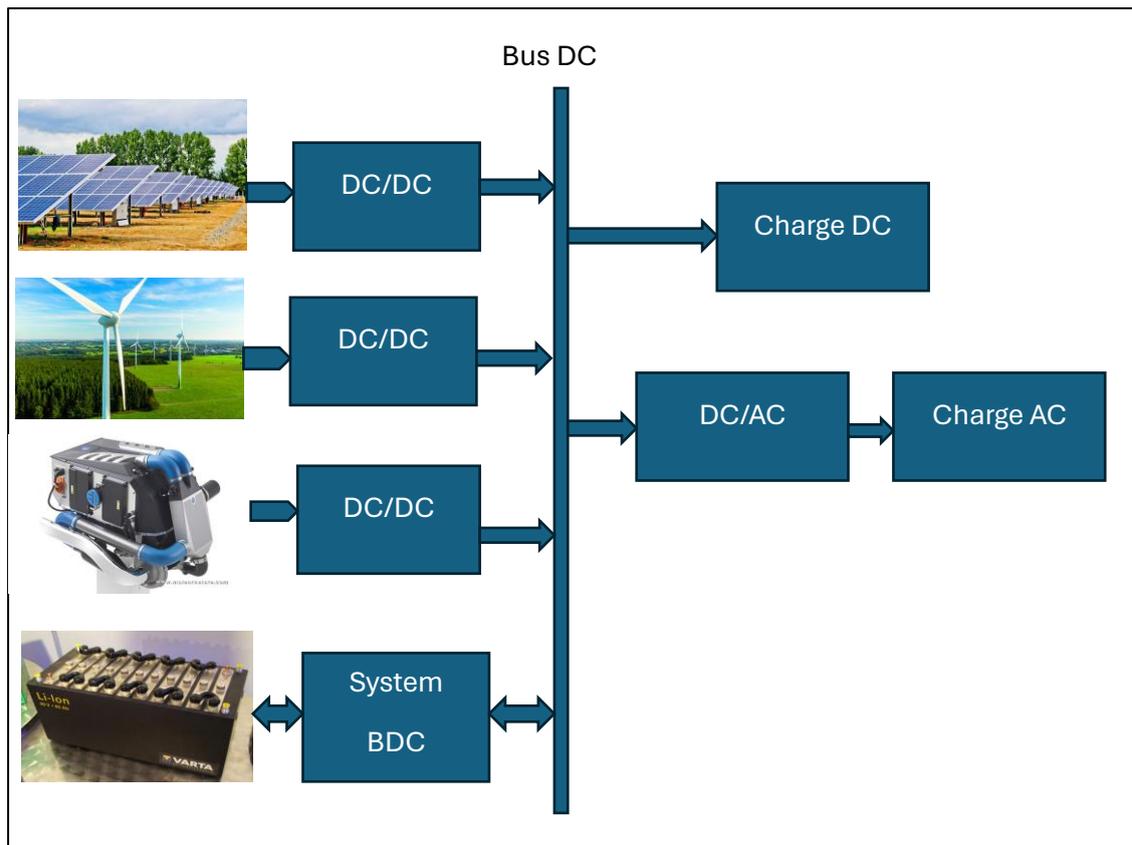


Figure IV.1 Modèle des systèmes hybride avec batterie lithium

Les systèmes hybrides (éolien-photovoltaïque-piles à combustible) comprennent généralement plusieurs composants, ces systèmes contiennent :

- Un système générateur ;
- Un système de régulation ;
- Un système de stockage ;
- Des équipements de puissance ;
- Diverses charges.

IV.3.1 Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïque :

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la Figure (IV.2).

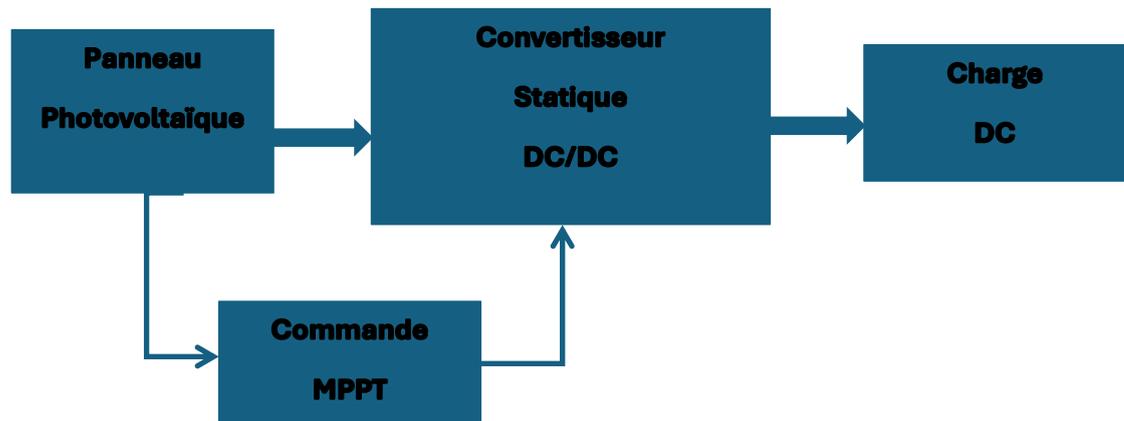


Figure IV.2 Système photovoltaïque

IV.3.1.1 Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque

Nous ferons de la modélisation et simulation d'un panneau Photovoltaïque de type poly cristallin (composé de 54 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($E=1000W/m$, $T=25^{\circ}C$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie produite de la cellule PV. On utilise l'outil MATLAB pour faire la Modélisation et la simulation d'un module PV.

IV.3.1.1.1 Modélisation du panneau photovoltaïque

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_S représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_P caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction. Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par *Schrockley* pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.[53]

On présente le schéma du circuit électrique par le circuit :

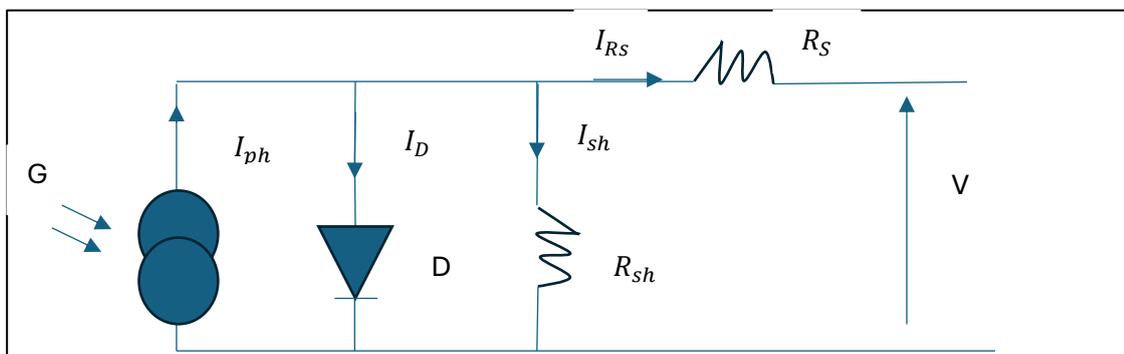


Figure IV.3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par (équation (IV.1)) :

En appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds on obtient :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \dots \dots \dots (IV.1)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} R_s))}{Nkt} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_s)}{R_h} \dots \dots \dots (IV.2)$$

Avec :

- V_{pv} : Tension (V)
- I_{pv} : Courant (A) de sortie du panneau
- I_{ph} : Photo courant en ampère
- I_{sat} : Courant de saturation
- R_s : Résistance série en ohm
- R_h : Résistance parallèle en ohm
- R_p : Résistance parallèle (shunte) équivalent
- q : Charge de l'électron $q = 1.602 * 10^{-19}$ coulomb
- K : Constante de Boltzmann $k = 1.381 * 10^{-23}$ J/K
- N : Facteur de qualité de la diode
- I_p : Courant de la résistance parallèle (shunte) équivalent
- I_d : Courant de la diode
- I_{cc} : Courant de court-circuit (A)
- v_{co} : Tension de circuit ouvert
- G : Irradiation solaire (W / m²)
- T_{ref} : 298k (25°C)

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ($R = \infty$), l'équation (IV.1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{rh} \left[\exp \left(\frac{(V_{pv} + (I_{pv} R_s))}{n * N S * K * T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (IV.3)$$

Courant de saturation :

$$I_{sat}(T) = I_{rs} \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T_n} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{q \cdot E_{g0}}{nk} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \dots \dots \dots (IV.4)$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au voisinage de V_{co} .

Elle peut être calculée par la formule de Courant de saturation inverse suivante :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\left(\exp\left(\frac{(q*V_{oc})}{(n*N_s*K*T)}\right)\right)} - 1 \dots\dots\dots(IV. 5)$$

Courant traversant la résistance de dérivation :

$$I_p = \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \dots\dots\dots(IV. 6)$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.[1]

Photo-courant

$$I_{cc}(T) = I_{cc} \cdot [1 + K_i(T - T_{ref})] \dots\dots\dots(IV. 7)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000}\right) \dots\dots\dots(IV.8)$$

Et de lui :

$$I_{ph} = I_{cc} + K_i(T - 298) \left(\frac{G}{1000}\right) \dots\dots\dots(IV.9)$$

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un Module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

Le Courant de panneau photovoltaïque :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{n * N_s * K * T}\right) - 1 \right] - I_p \dots\dots\dots(IV.10)$$

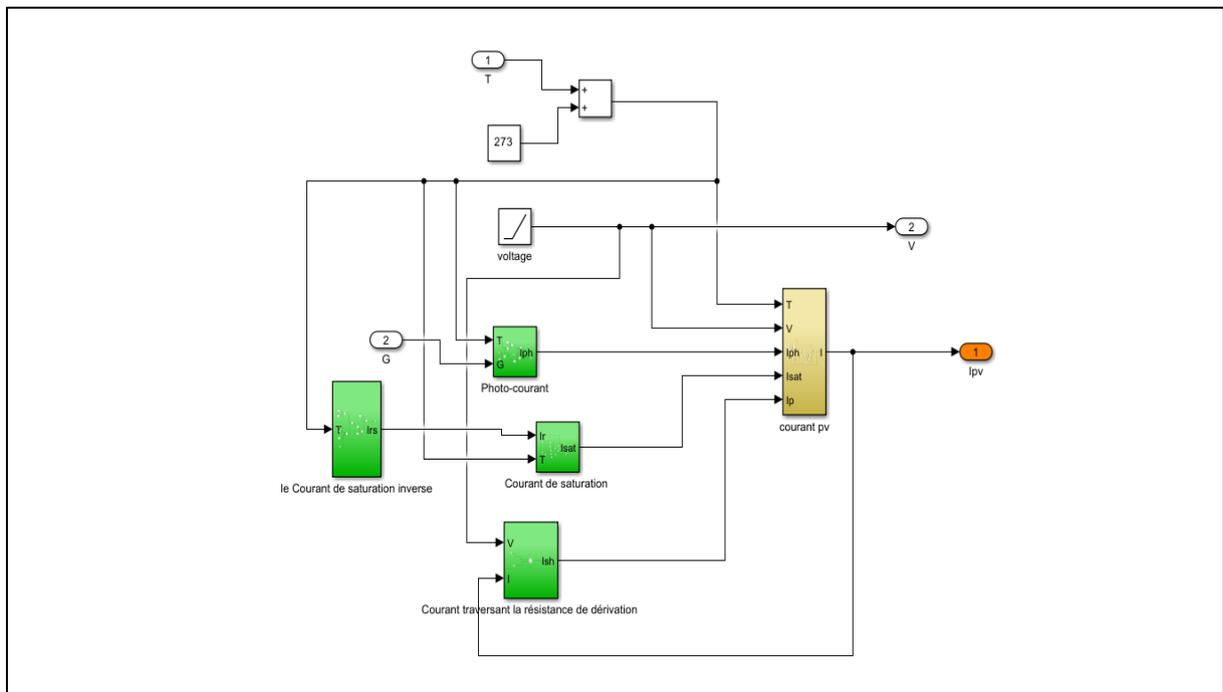


Figure IV.4 Schémas bloc de courant de générateur photovoltaïque

Où :

N_s : Nombre des cellules par module.

IV.3.1.1.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un Caractéristiques courant -tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards (T= 25°C, E=[1000,200,800W/m²]) sont représentés dans les figures suivant : 10 modules série et 40 modules parallèle donc puissance est p=85.260 KW.

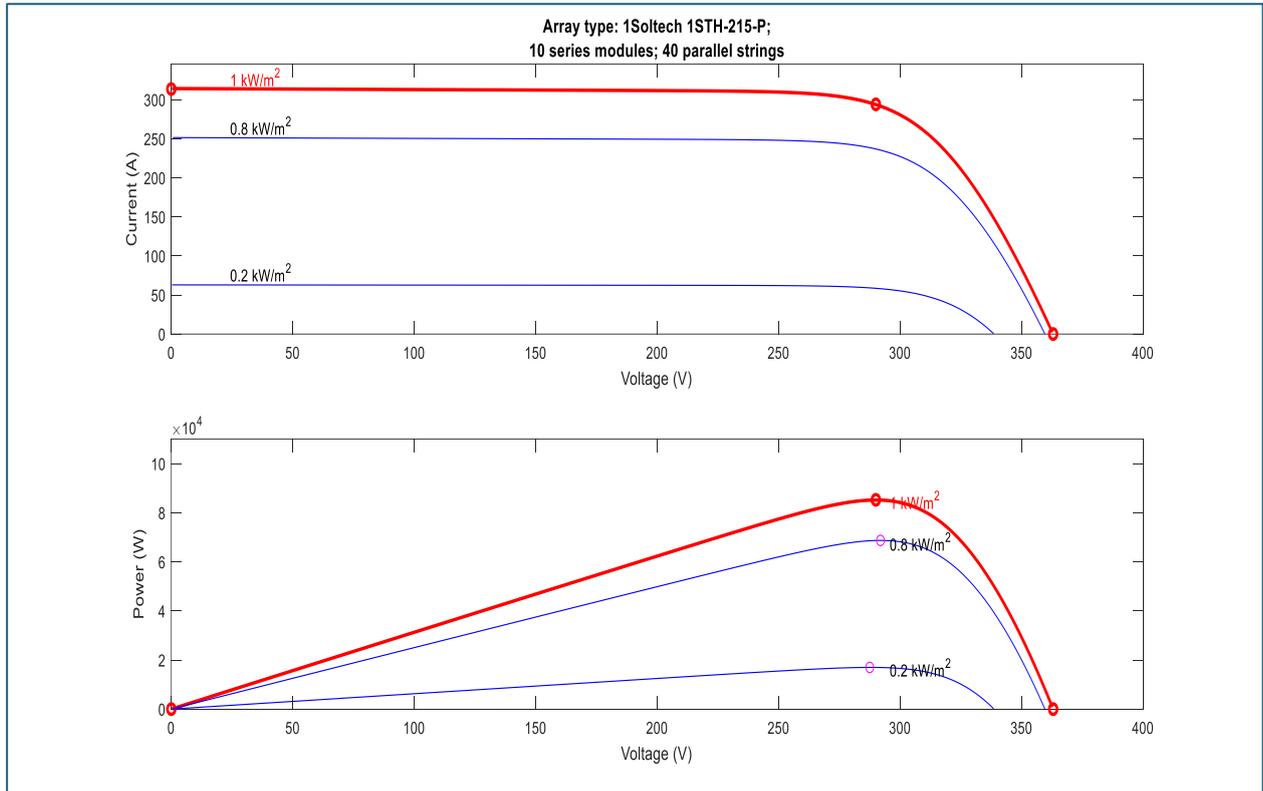


Figure IV.5 Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ et $I_{pv} = f(V_{pv})$ d'un panneau solaire

IV.3.1.1.3 Caractéristiques d'un panneau solaire

- La puissance électrique échangée par un dipôle, l'intensité qui le traverse et la tension à ses bornes sont liées par la relation :

$$P = U \times I \dots \dots \dots (IV.11)$$

P = puissance en watt (W).

U = tension en volt (V).

I = intensité en ampère (A)

Chaque module :

Tension maximal (V) : $U_m = 29$ V

Courant maximal (A) : $I_m = 7.35$ A

Donc :

Puissance maximal (W) : $P_m = 213.15$ w

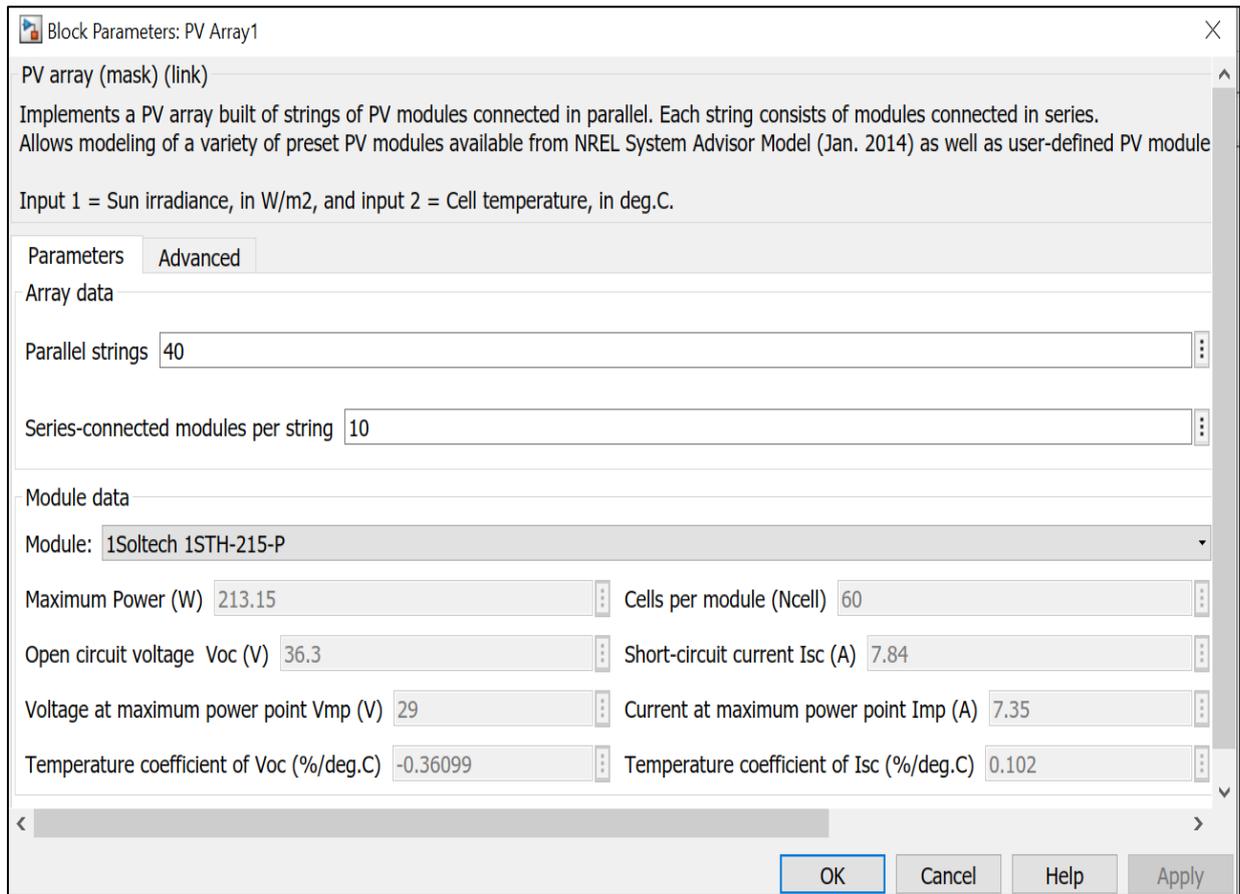


Figure IV.6 Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

Ici, le panneau photovoltaïque se compose 10 modules en série ; 40 modules Chaînes parallèles.

Donc :

Tension maximal V_{mp} (V) : $29 * 10 = 290V$

Courant maximal (A) : $7.35 * 40 = 294A$

Puissance maximal (W) : $290 * 294 = 85\,260W$ Ou $85.260\,KW$

IV.3.1.2 Simulations panneau photovoltaïque avec convertisseurs (DC/DC)

Le convertisseur DC/DC est le circuit qui transfère la puissance maximale du générateur photovoltaïque vers la charge. Ce dispositif adapte la tension d'entrée pour une charge donnée. Le convertisseur DC-DC dans cette étude est un hacheur survolteur. Le modèle d'hacheur a été simplifié en utilisant le théorème des valeurs moyennes (Figure IV.7).

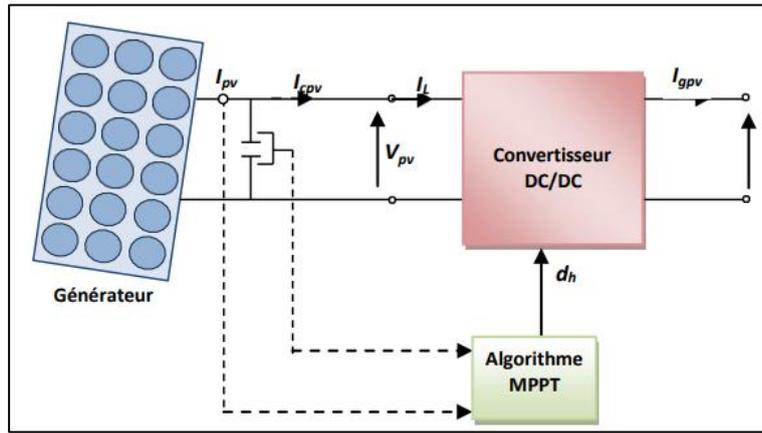


Figure IV.7 Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque

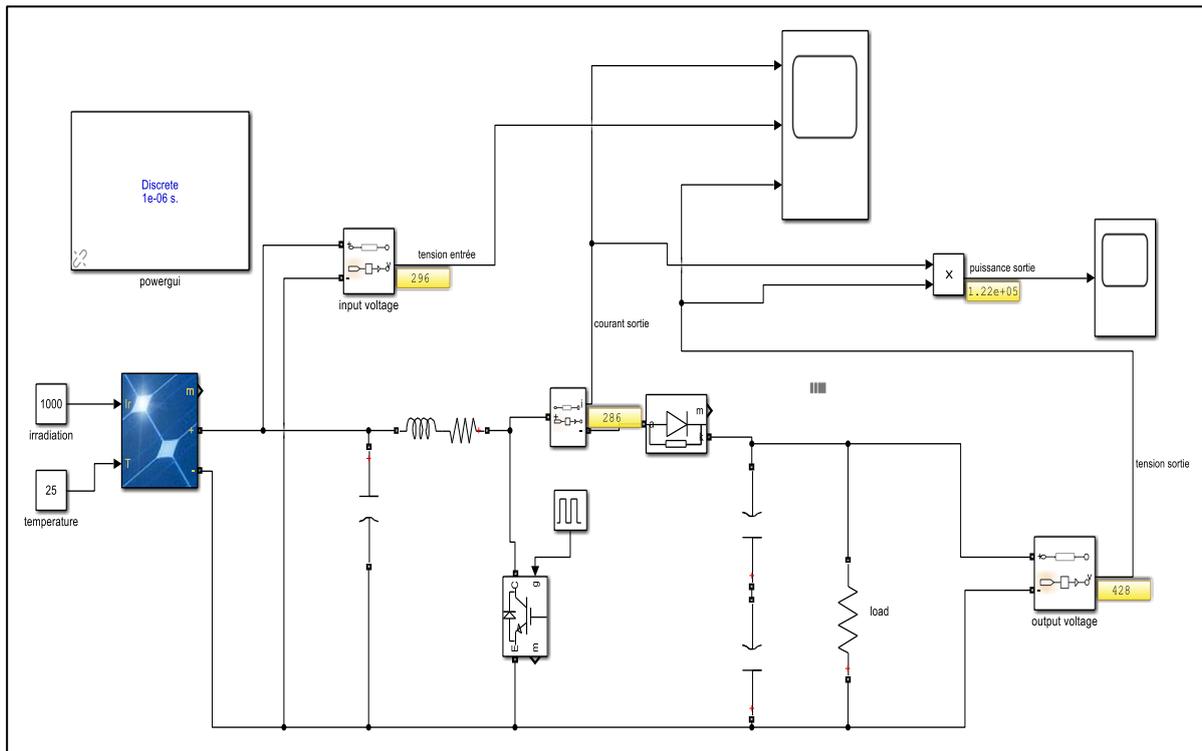


Figure IV.8 Bloc diagramme panneau solaire avec convertisseur DC/DC

Tableau IV.1 Caractéristiques d'entrée et sortie d'un panneau photovoltaïque avec convertisseur DC/DC

Entrée	Sortie
Tension maximale d'entrée V_{mp} (V) : 296V	Tension maximale de sortie V_{mp} (V) : 428
Courant maximal d'entrée(A) : 294A	Courant maximal de sortie(A) : 286A
Puissance maximale d'entrée (W) : 85 260 W ou 85.260 kw	Puissance maximale de sortie (W) : 122 408 W ou 122.408 kw

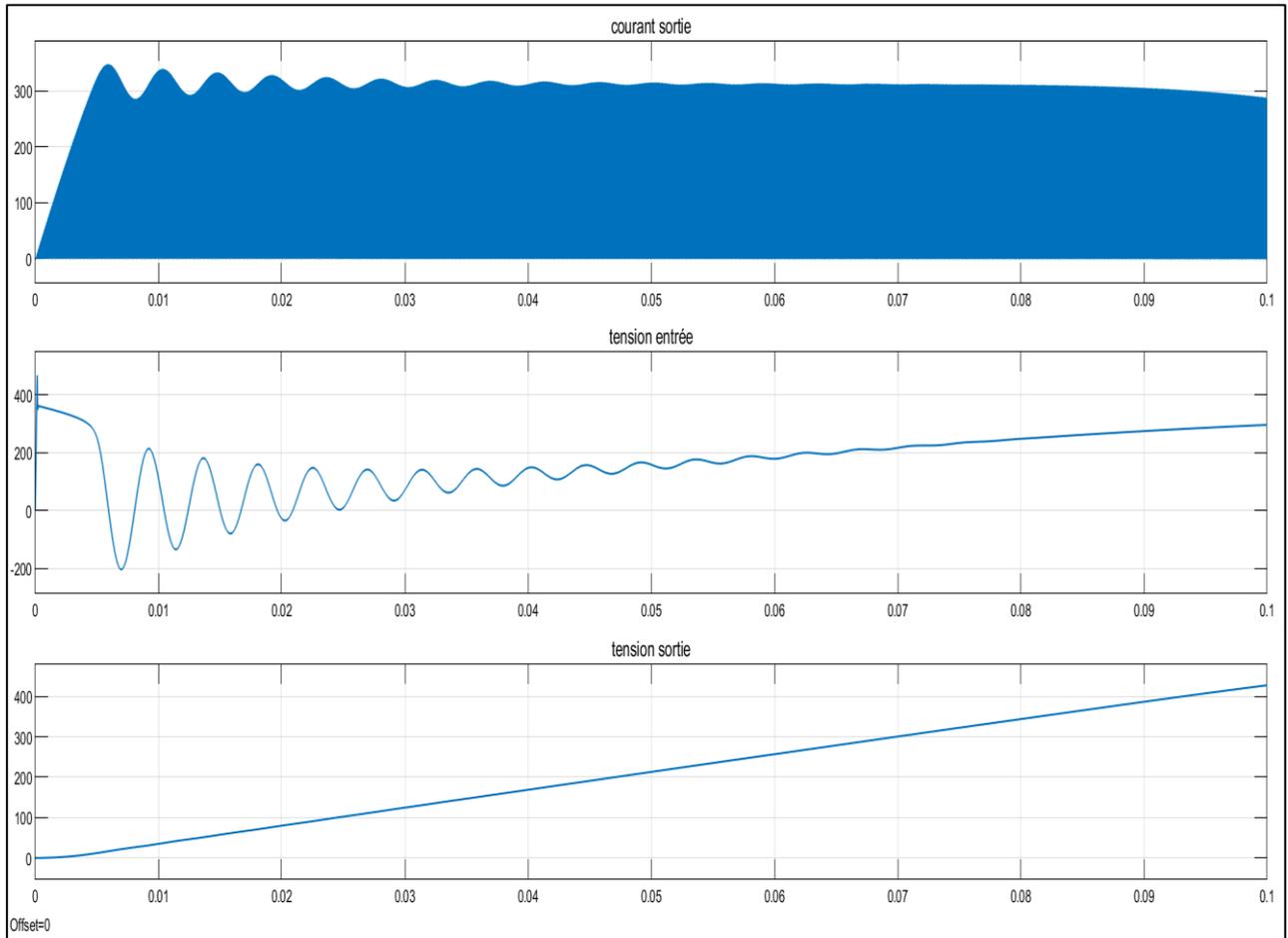


Figure IV.9 Courbe de la tension d'entrée et la tension de sortie et courant sortie

IV.3.2 Modélisation et simulation des systèmes éolienne

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système éolien et la demande de l'utilisateur.

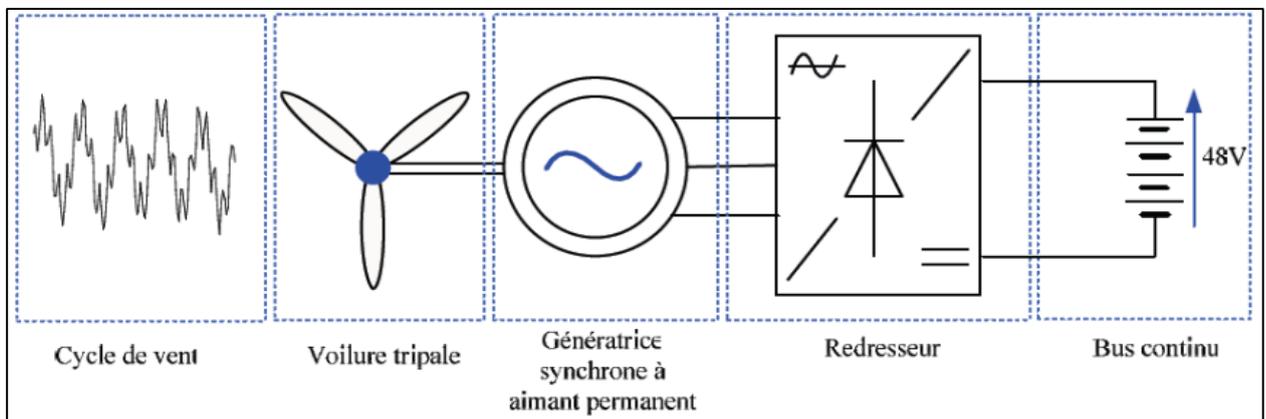


Figure IV.10 Architecture globale de la chaîne éolienne « passive »

IV.3.2.1 Modélisation du vent (source primaire)

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définie les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- Définie les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- Développer et affiner la modélisation du rotor.
- Évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle de vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (IV.12).

$$Vv(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n * \sin(b_n * w_v * t)) \dots \dots \dots (IV.12)$$

Avec A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_n : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

$b_n * w_v$: Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le range de dernier harmonique retenu dans le calcul.

IV.3.2.2 Modélisation de la turbine à étudier

La turbine que nous allons étudier est une éolienne de 7.5 kw. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse de gain $G=5.4$.

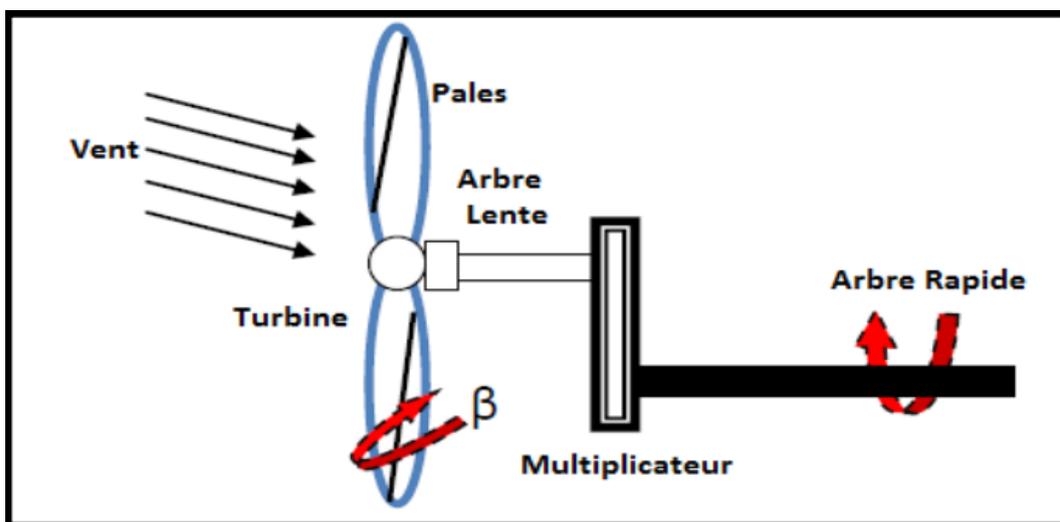


Figure IV.11 Turbine éolienne

A. Loi de BETZ

$$m = \frac{\rho * s(V_1 + V_2)}{2} \dots\dots\dots (IV.13)$$

De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p = \frac{p_{max}}{p_v} = 0.59 \dots\dots\dots (IV.14)$$

La formule de BETZ montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas du 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

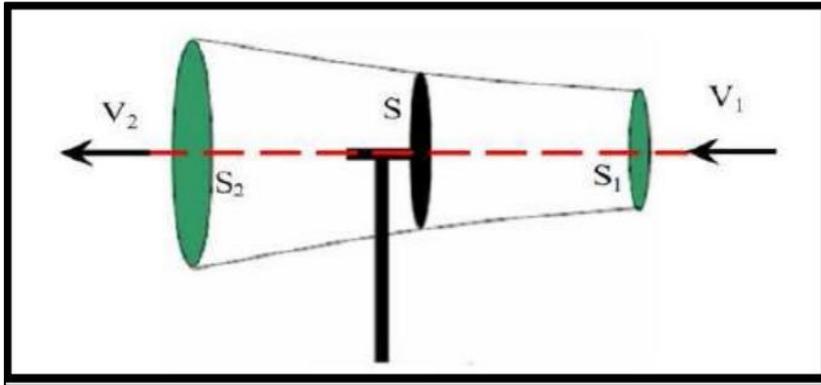


Figure IV.12 Principe de théorie de loi de BETZ

B. Résultat de simulation du la turbine

Puissance maximale à la vitesse du vent de base (12 m/s) et Bêta = 0 degré

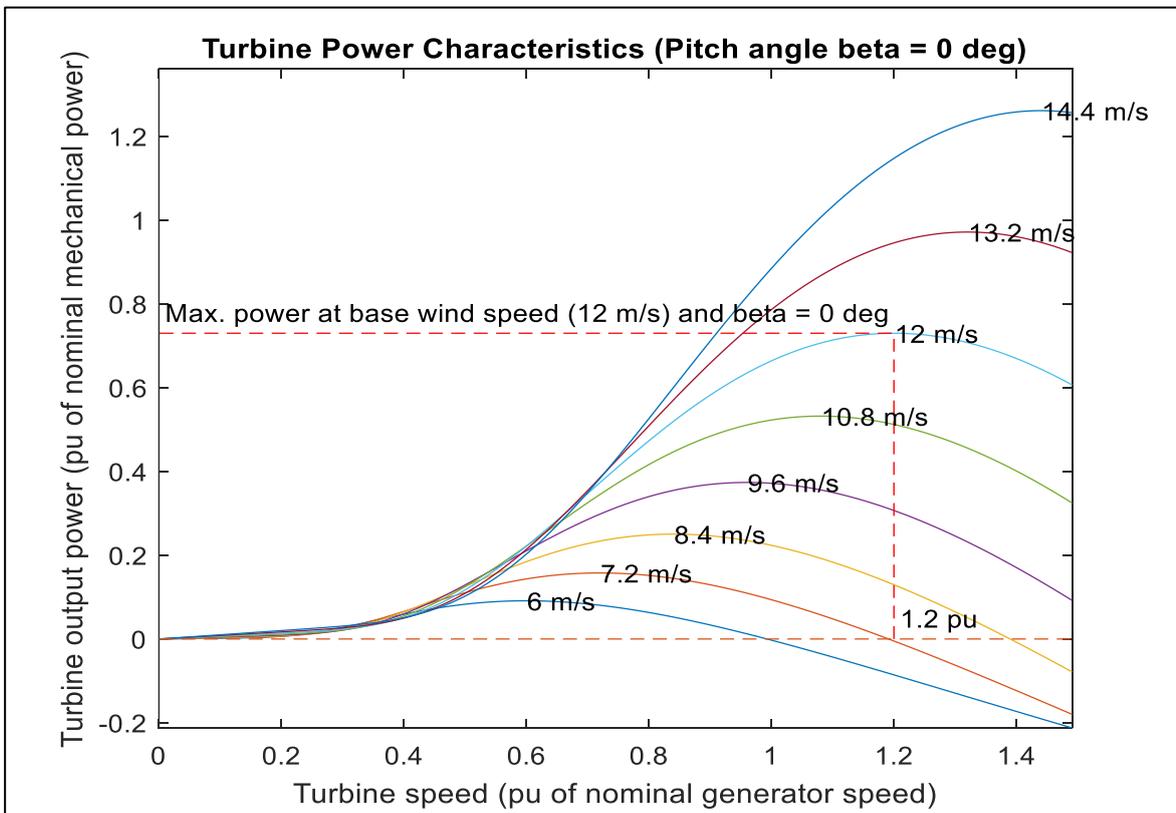


Figure IV.13 Courbe de puissance de la turbine (angle de tangage beta = 0 deg)

Tableau IV.2 Caractéristiques de puissance de la turbine

Angle de tangage beta	0 deg
Puissance maximale à la vitesse (12 M/S) du vent de base	0.75 w
Vitesse de la turbine (unité centrale de la vitesse nominale du générateur)	1.2 pu
Puissance de sortie de la turbine pu de puissance mécanique nominale	0.8 w
Angle de tangage	3
Vitesse du vent	550 m/s

Où :

Puissance maximale à la vitesse (12 m/s) du vent de base c'est 0.75 w donc on a exemple vitesse du vent entrée 550 m/s Il en résulte 34.375 w.

IV.3.2.3 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (IV.14) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation. En fonction de la manière dont les aimants sont placés, on peut distinguer deux types de rotors.

Dans le premier type, les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor. Dans le deuxième, cependant, les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent fortement de la position du rotor. De plus, le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la priorité dans l'entraînement des charges rapides.

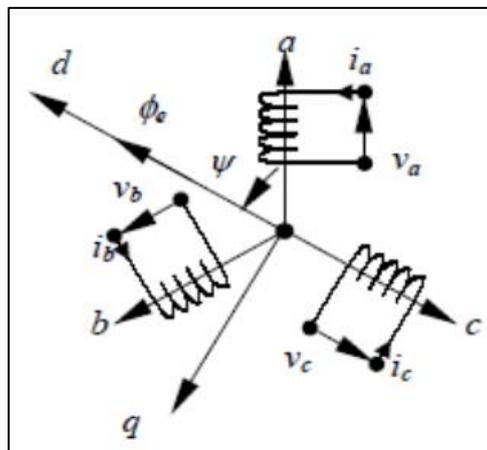


Figure IV.14 Schéma d'un enroulement triphasé et du repère (d, q)

Afin de modéliser le MSAP, on adopte les hypothèses simplificatrices usuelles données dans la majorité des références :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- La distribution sinusoïdale de le F.M.M créée par les enroulements du stator ;
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau ;
- L'effet d'encoche est négligeable ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

a) Equations de tensions et de flux :

Les équations régissant le fonctionnement des machines synchrones à aimants permanents s'obtiennent en écrivant que la tension appliquée à chaque phase est la somme de la chute ohmique et de la tension induite par la variation du flux qui la traverse, soit :

$$[V] = [R_s][i] + \frac{d}{dt} [\varphi] \dots \dots \dots (IV.15)$$

Où :

[V] : représentent respectivement les vecteurs des tensions.

[i]: Représentent respectivement les courants.

[φ] : représentent respectivement les flux.

[R_s] : la matrice des résistances dans les enroulements statoriques de la machine.

En vertu des hypothèses de non-saturation et de feuilletage du circuit magnétique, les flux sont liés aux courants par les relations linéaires suivantes, exprimées sous forme matricielle :

$$[\varphi] = [L_s][i] + [\varphi_f] \dots \dots \dots (IV.16)$$

Où [L_s] est la matrice des inductances propres statorique et [φ_f] représente les flux engendrés dans les phases statoriques par l'inducteur. Notons que les composantes des matrices des inductances propres et des flux engendrés par le rotor sont fonctions de la position du rotor.

b) Equations de couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut être exprimé comme suit :

$$C_{em} = p(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \dots \dots \dots (IV.17)$$

En utilisant l'équation (IV-17), le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = p(\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \dots \dots \dots (IV.18)$$

Enfin, l'équation mécanique générale peut être écrite selon :

$$J \frac{d}{dt} \Omega + f_c \Omega = C_{em} - C_r \dots \dots \dots (IV.19)$$

Cette équation tient compte de l'inertie des parties tournantes, des frottements secs ou visqueux et du couple de la charge.

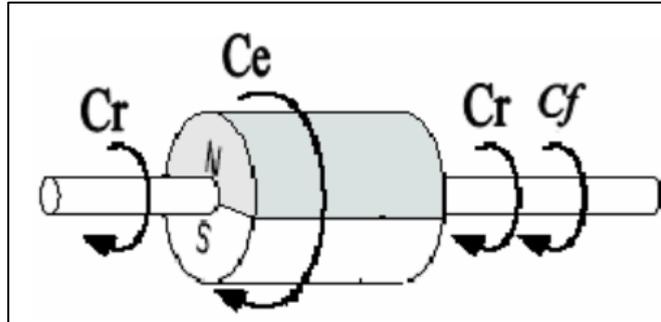


Figure IV.15 Les différents couples qui agissent sur le rotor

IV.3.2.4 Convertisseurs (AC/DC)

Contrairement aux alimentations à faible puissance qui utilisent le plus souvent des réseaux monophasés, les alimentations de puissance utilisent généralement des réseaux triphasés.

De plus, comme les transformateurs à point milieu sont des appareils coûteux et fragiles, ceux-ci ne sont utilisés que pour des alimentations monophasées de faible puissance. Ainsi peut-on conclure : en électronique de puissance, le montage le plus utilisé est le pont de *Graëtz* alimenté en triphasé. Bien que les autres montages soient peu utilisés, il est intéressant d'en faire une étude sommaire car ils permettent de mieux comprendre le pont de *Graëtz* en triphasé.

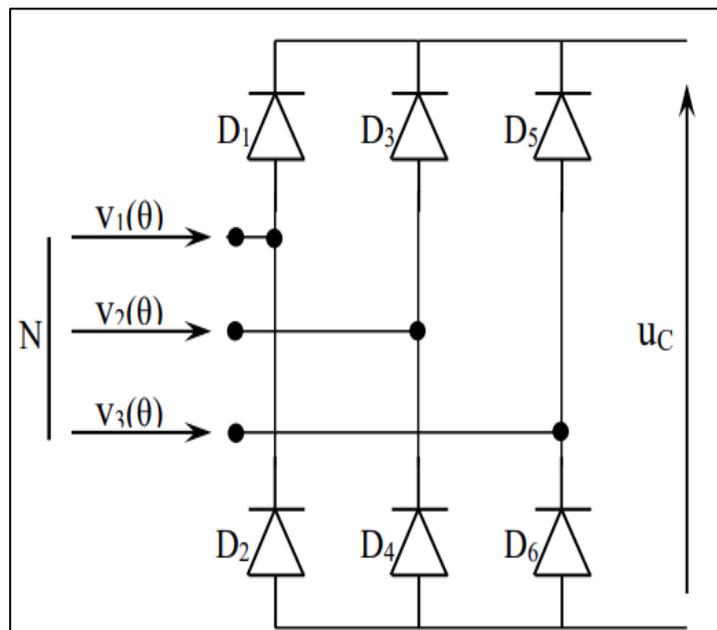


Figure IV.16 Redresseurs triphasés

IV.3.2.5 Méthode de perturbation et d'observation

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du PV, V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension et le courant du panneau PV, suite on a calculé la puissance fournie par ce panneau PV à l'instant k $P_{pv}(k)$, puis on la compare à la précédente instant $P_{pv}(k-1)$.

IV.3.2.6 Simulations du system éolien

Le système éolien composé de turbines, d'un générateur triphasé, d'un convertisseur (AC/DC), d'un convertisseur (DC/DC), et d'un MPPT (P&O) fonctionne de la manière suivante :

- **Turbines éoliennes** : Elles capturent l'énergie du vent à l'aide de leurs pales rotatives, la convertissant en énergie mécanique qui fait tourner l'arbre de la turbine relié au générateur.
- **Générateur triphasé** : Il transforme l'énergie mécanique provenant de la turbine en énergie électrique sous forme de courant alternatif triphasé (AC).
- **Convertisseur (AC/DC)** : Il convertit le courant alternatif produit par le générateur en courant continu (DC) pour assurer une meilleure stabilité et un contrôle amélioré de l'énergie produite.
- **Convertisseur (DC/DC)** : Il ajuste le niveau de tension continue générée par le convertisseur (AC/DC) au niveau requis pour la charge ou pour diverses utilisations. Le convertisseur peut être abaisseur ou élévateur de tension selon les besoins. Ici, nous avons besoin d'hacheur boost pour augmenter la tension.
- **Système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant l'algorithme (P&O)** : Il optimise l'extraction d'énergie des turbines en ajustant la tension et le courant pour garantir que la turbine fonctionne à son point de puissance maximale, en augmentant ou en diminuant périodiquement la tension et en surveillant les variations de la puissance produite pour obtenir une performance optimale. Ce système intégré permet de générer, convertir et réguler efficacement l'énergie électrique produite par le vent, permettant son utilisation directe ou son stockage pour une utilisation ultérieure.

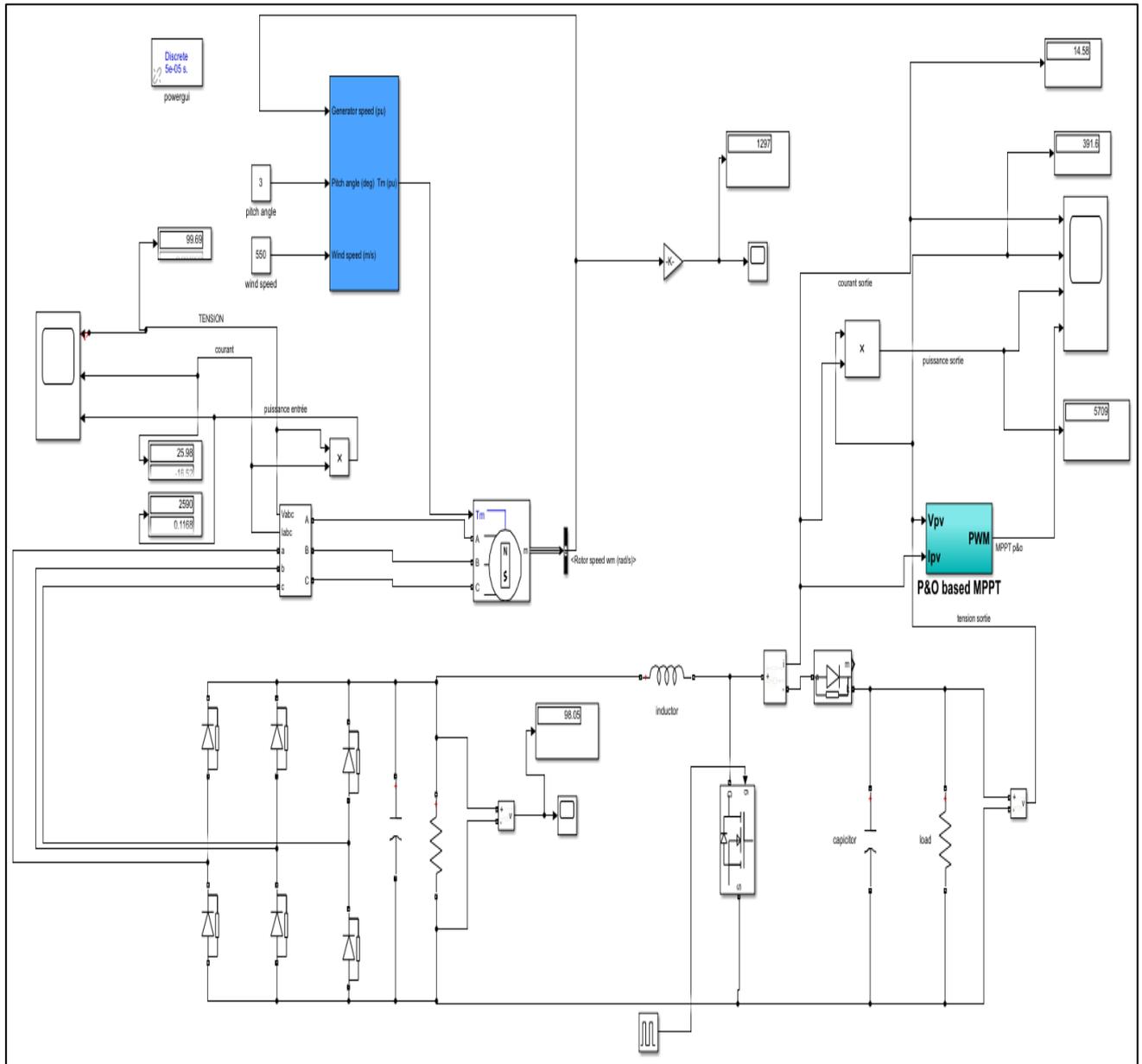


Figure IV.17 Block diagramme du system éolienne

Tableau IV.3 Les caractéristiques entrées Avant Redresseur (AC/DC) et hacheur boost

Entrée	
Courant	25.98 A
Tension	99.98 V
Puissance	2590 W

Tableau IV.4 Les caractéristiques sorties après Redresseur (AC/DC) et hacheur boost

Sortie	
Courant	14.58 A
Tension	391.6 V
Puissance	5709 W

A. Résultat simulation à l'entrée de la turbine

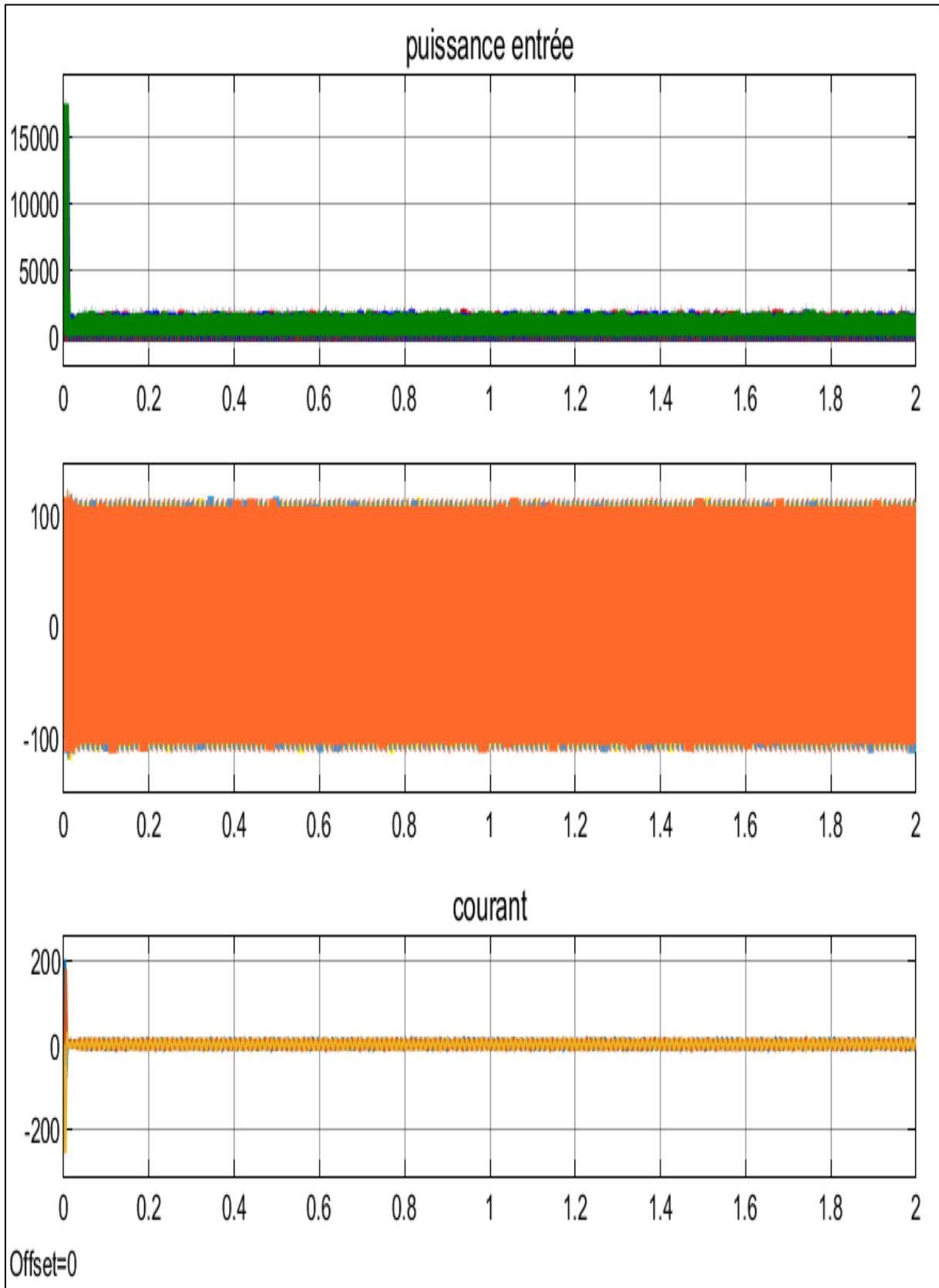


Figure IV.18 Résultat simulation à l'entrée de la turbine

B. Résultat simulation à la sortie de la turbine

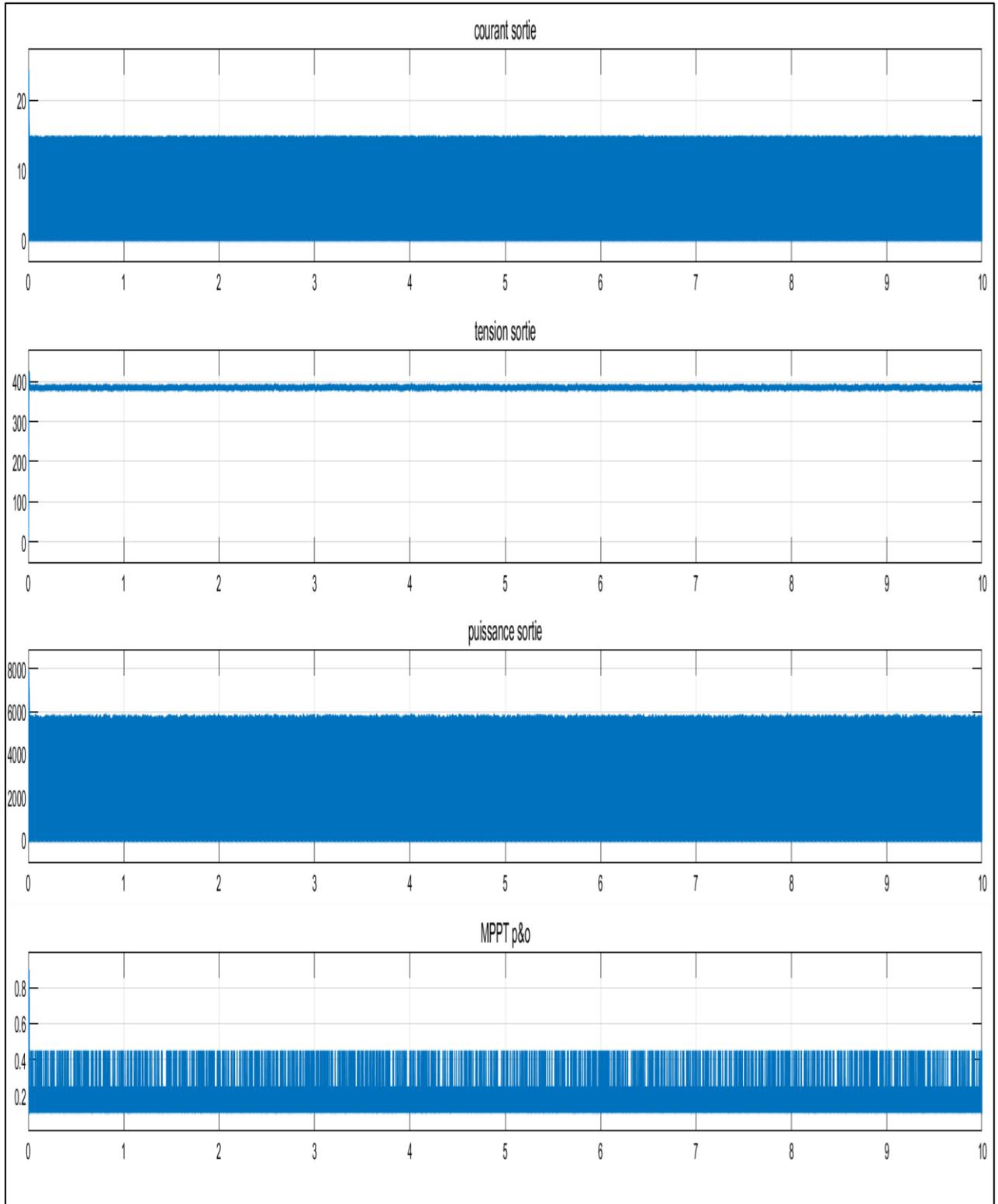


Figure IV.19 Résultat simulation à la sortie de la turbine

IV.3.3 Modélisation et simulation du pile à combustible

La figure suivante montre un modèle physique d'une pile à combustible PEMFC. en général, de l'hydrogène et de l'oxygène sont introduits dans la pile à combustible et le transfert de protons à lieu à l'intérieur de la cellule, donne comme produits de l'eau, de l'électricité et de la chaleur Comme le montre la figure IV.20.

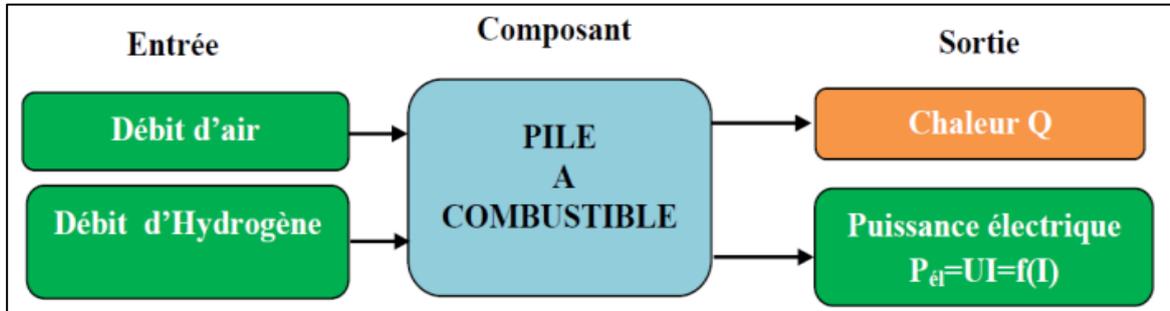


Figure IV.20 Modèle physique de la pile à combustible

IV.3.3.1 Modélisation de la pile à combustible

A. Débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée

Les débits d'entrée de l'hydrogène (\dot{m}_{H_2}), de l'oxygène (\dot{m}_{O_2}) et (\dot{m}_{H_2O}) sont donnés par l'équation suivante.

$$\dot{m}_{j,in} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F \cdot U} \dots \dots \dots (IV.20)$$

I : Courant électrique (A).

J : Représente l'élément(H_2O , O_2 , H_2)

U : taux d'utilisation

F : constante de faraday

N_0 : nombre de cellules en série

B. La constante de modélisation Kr

C'est une constante utilisée durant les calculs pour simplifier l'écriture des équations.

$$Kr = \frac{N_0}{4 \cdot F} \dots \dots \dots (IV.21)$$

C. Pression d'hydrogène p_{H_2}

La Pression d'hydrogène et d'oxygène consommée dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée selon les équations suivantes.

$$Pp_{H_2} = 0.5 \left(\frac{p_{H_2}}{e^{\frac{1.653 \cdot XI}{T^{1.334}}}} \right) - p_{H_2o} \dots \dots \dots (IV.21)$$

D. Pression d'oxygène p_{O_2}

La Pression d'oxygène consommé dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée par les équations suivantes.

$$P_{p_{O_2}} = \left(\frac{p_{air}}{4.192 * XI} \right) - p_{H_2O} \dots \dots \dots (IV.22)$$

$$e^{T_K^{1.334}}$$

E. Pression de l'eau p_{H_2O}

Le calcul de la pression de l'eau se fait de la même manière que l'oxygène et l'hydrogène, la pression de l'eau est donnée par l'équation suivante.

$$\log H_2O = -2.1794 + 0.02953 * Tc - 9.1837 * 10^{-5} * Tc^2 + 1.4454 * 10^{-2} * Tc^3 \dots \dots \dots (IV.23)$$

F. Tension totale de la cellule PAC

La pile à combustible est composée de plusieurs cellules placées en série formant un assemblage.

$$V_{stack} = N_0 * V_{cellule} \dots \dots \dots (IV.24)$$

N_0 : nombre de cellules en série dans l'assemblage

$V_{cellule}$: Tension d'une cellule.

G. Puissance d'une pile à combustible

La puissance de la pile à combustible est le produit de la tension et le courant de cette dernière, elle est donnée par l'équation suivante ;

$$P_{puissance} = V_{stack} * I \dots \dots \dots (IV.25)$$

V_{stack} est La tension de l'assemblage, I est le courant de la pile (A).

IV.3.3.2 Simulations de la pile à combustible avec hacheur boost

A. Résultat simulation pile à combustible

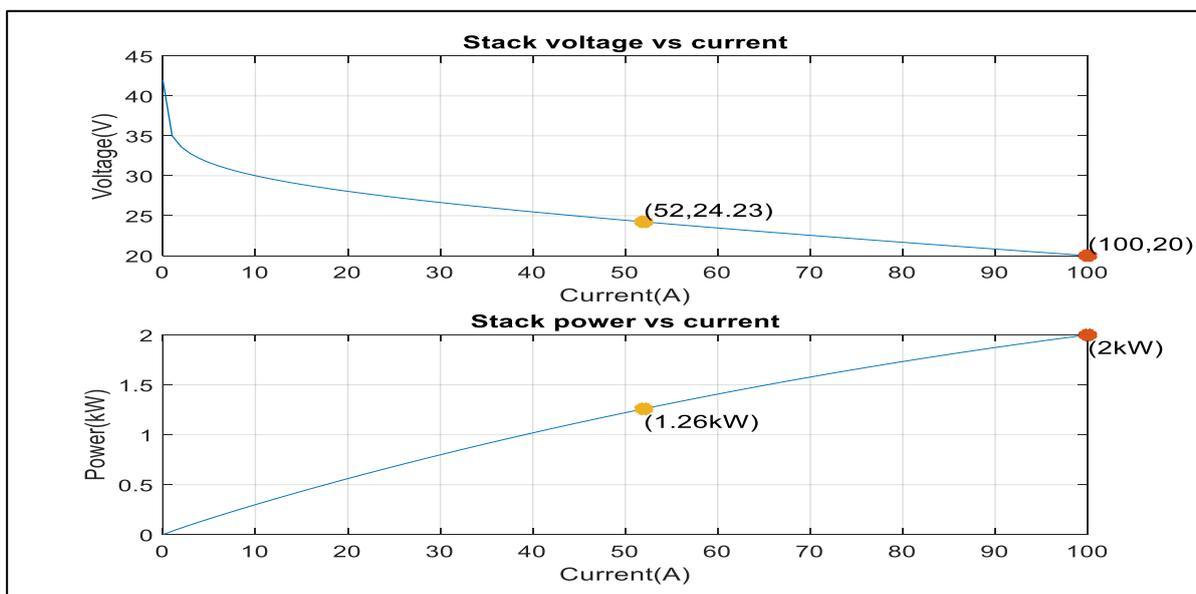


Figure IV.21 les courbes I(v), I(p) avec MPPT

B. Caractéristique de la pile à combustible

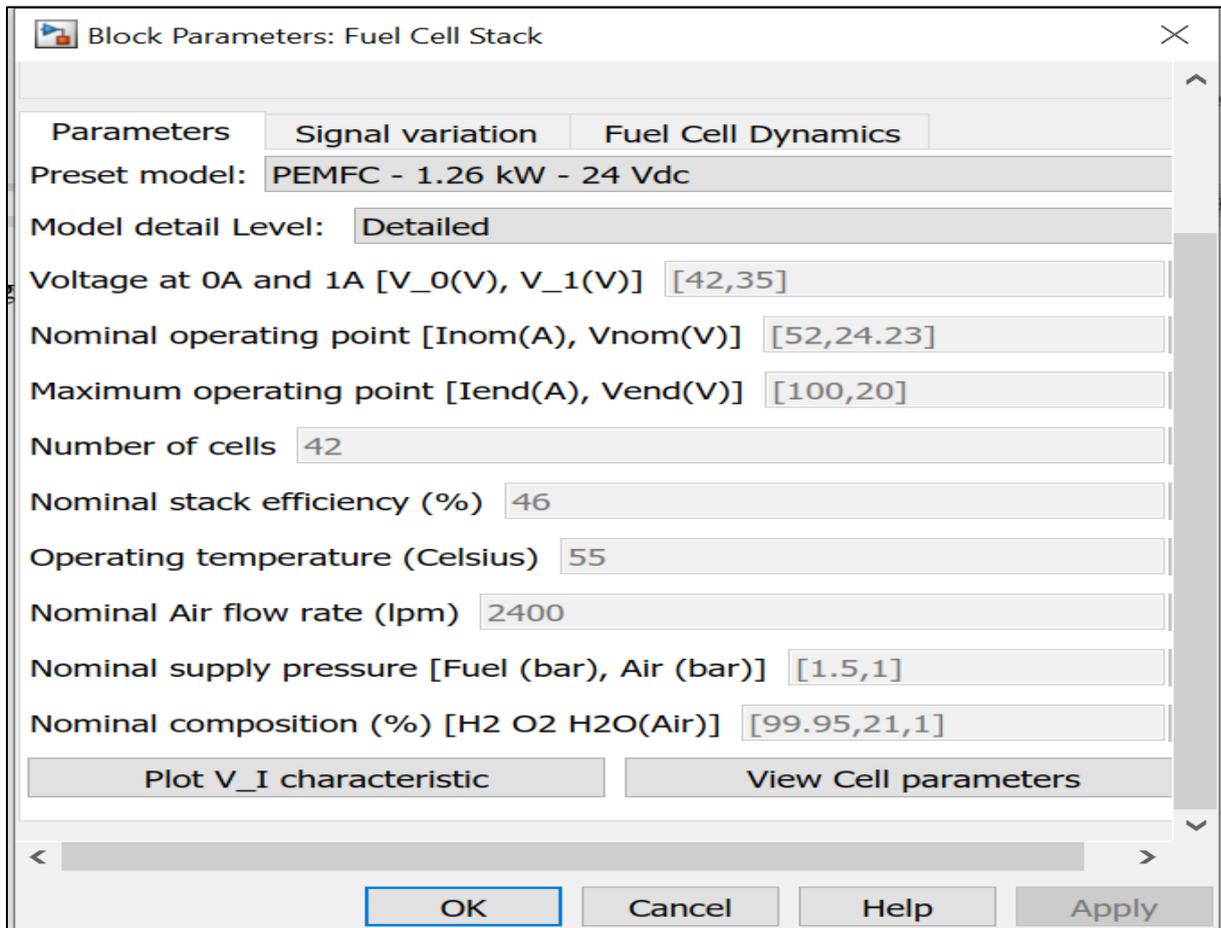


Figure IV.22 Caractéristique de la pile à combustible

C. Block diagramme de la pile à combustible avec hacheur boost

Tableau IV.5 Caractéristique entrée et sortie de la pile combustible

Entrée	Sortie
Tension :42 V	Tension :91.55 V
Courant :52 A	Courant : 77,76 A
Puissance : 2.18 KW	Puissance : 7.119 KW

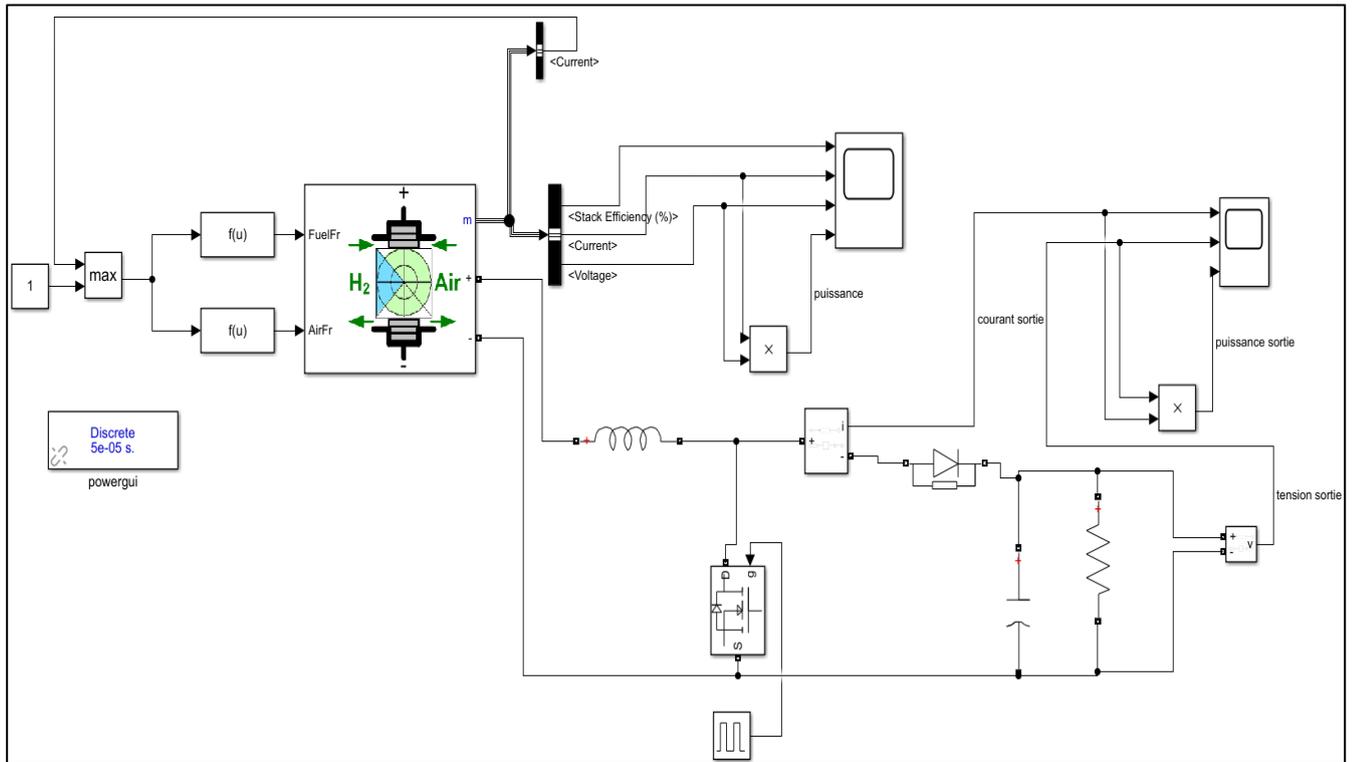


Figure IV.23 Bloc diagramme de la pile à combustible avec hacheur boost

D. Résultat simulation à l'entrée et la sortie de la pile à combustible avec hacheur boost

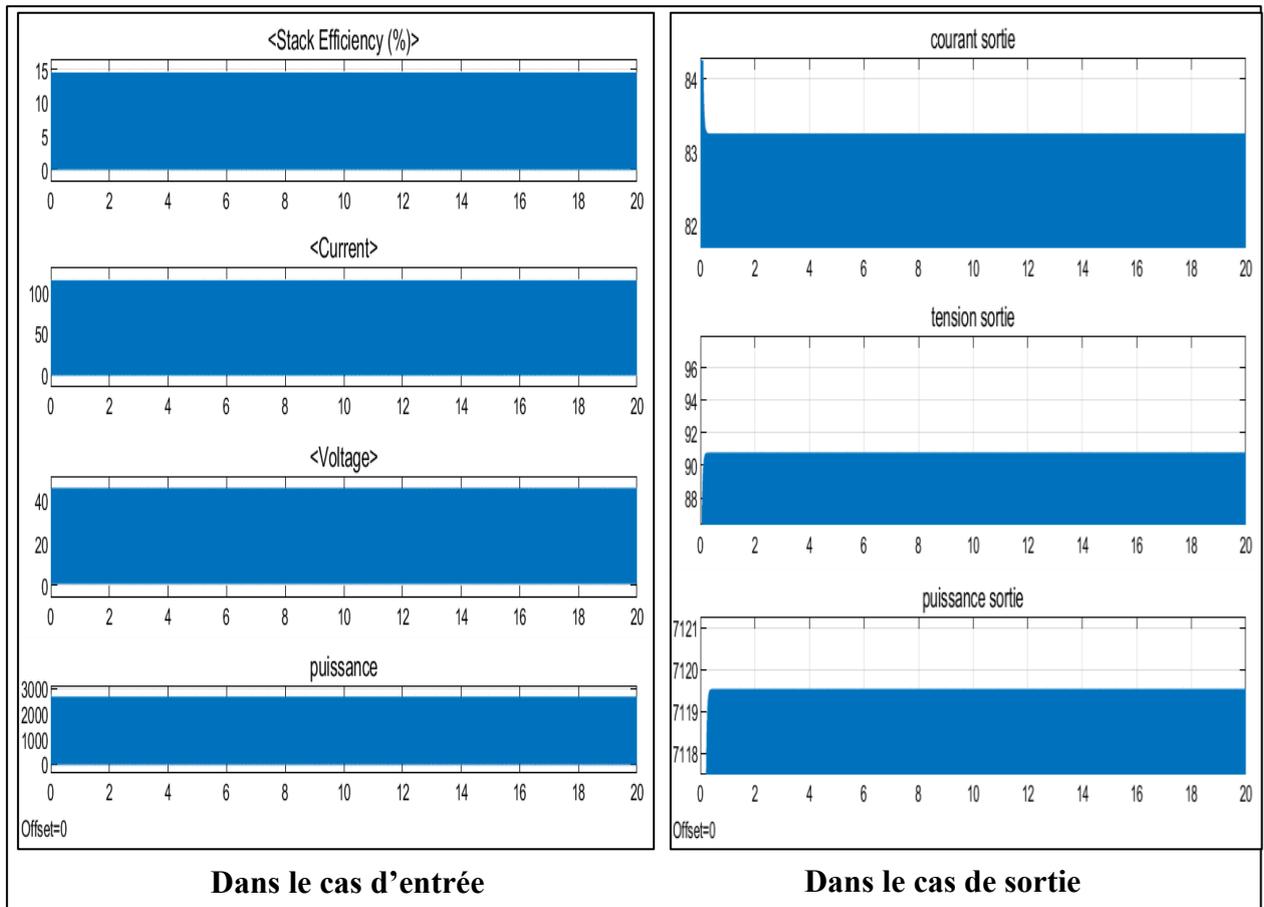


Figure IV.24 Résultat simulation à l'entrée de la pile à combustible

IV.3.4 Modélisation et simulation du batterie lithium

IV.3.4.1 Modélisation du batterie lithium

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie. Si l'état de charge initiale soc_0 est connu, la valeur de l'intégrale du courant est un indicateur de l'état de charge $soc(t)$. L'état de charge peut être défini par l'équation suivante :

$$soc(t) = soc_0 - \frac{\int_{t_0}^t I_b dt}{Q} \dots\dots\dots (IV.26)$$

Avec :

$soc(t)$: état de charge de la batterie à l'instant t.

soc_0 : état de charge à l'état initial.

I_b : Courant de la charge nominale de la batterie.

$\int_{t_0}^t I_b dt$: représente la charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).

Modèle de Shepherd :

Les équations pour le modèle de batterie utilisé sont :

- Etat de charge :

$$v = E_0 + K \frac{Q}{Q-it} it + K \frac{Q}{it-0.1Q} i + Ri + c \dots\dots\dots (IV.27)$$

- Etat de décharge :

$$v = E_0 + K \frac{Q}{Q-it} it + K \frac{Q}{Q-it} i + Ri + c \dots\dots\dots (IV.28)$$

$$\text{Avec } C = Ae^{(-b.it)}$$

Et :

V : le voltage actuel de la batterie (V)

E_0 : le voltage constant de la batterie (V)

K : résistance de polarisation (Ω)

Q : capacité de la batterie (Ah)

it : la charge actuelle de la batterie (Ah)

A : Amplitude de la zone exponentielle (V)

B : Zone exponentielle constante de temps inverse (Ah-1)

R : la résistance interne de la batterie (Ω)

i : le courant actuel de la batterie (A)

C : exponentiel voltage (V)

IV.3.4.2 Simulations du batterie lithium

Le diagramme Simulink pour calculer le courant de charge ou de décharge. La charge est faite avec un courant constant, tandis que le courant de décharge suit le profil de charge.

La commutation entre chargement et déchargement s'effectue à l'aide de l'état du signal de charge. Lorsque la batterie atteint un certain niveau de décharge, la batterie commence à se charger Jusqu'à un certain niveau. Ensuite, le prochain cycle de chargement commence. Les valeurs de l'état du signal de charge, lors de la commutation, sont définies par le type de batterie et le fabricant.

➤ **Bloc de l'Etat de charge :**

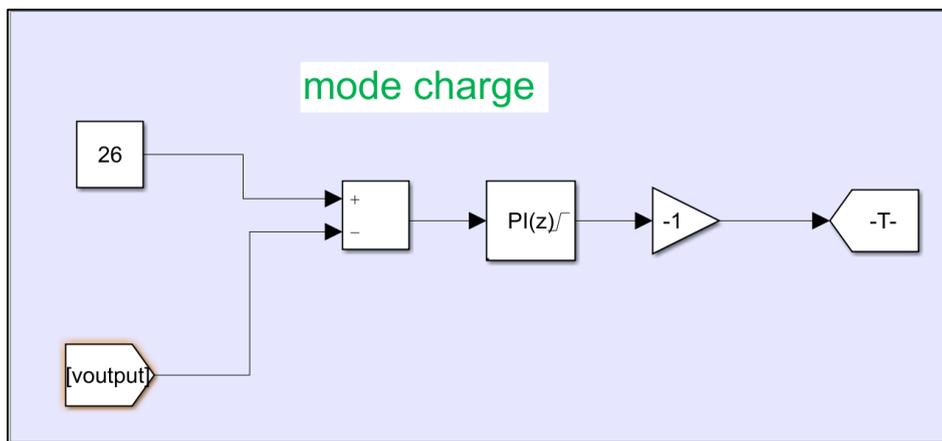


Figure IV.25 Bloc de l'état de charge

La charge de la batterie est calculée avec la formule suivante :

$$it = \int i dt \dots\dots\dots(IV.29)$$

➤ **Bloc de l'Etat de charge :**

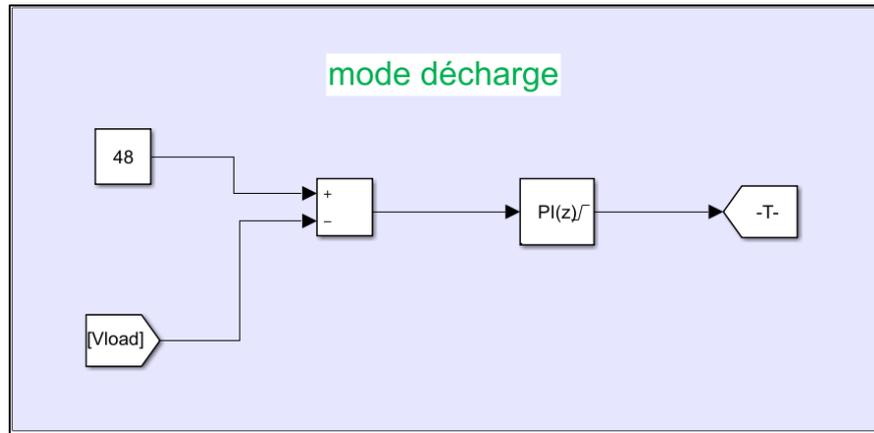


Figure IV.26 Bloc de l'état de Décharge

Le résultat de l'équation est en Ampère-secondes, donc nous devons diviser cette valeur par 3600 pour obtenir des Ampères-Heures standard. L'état actuel de la charge est calculé par rapport à la charge nominale et varie entre 1 (entièrement chargé) et 0 (complètement déchargé).

A. Bloc diagramme de batterie lithium

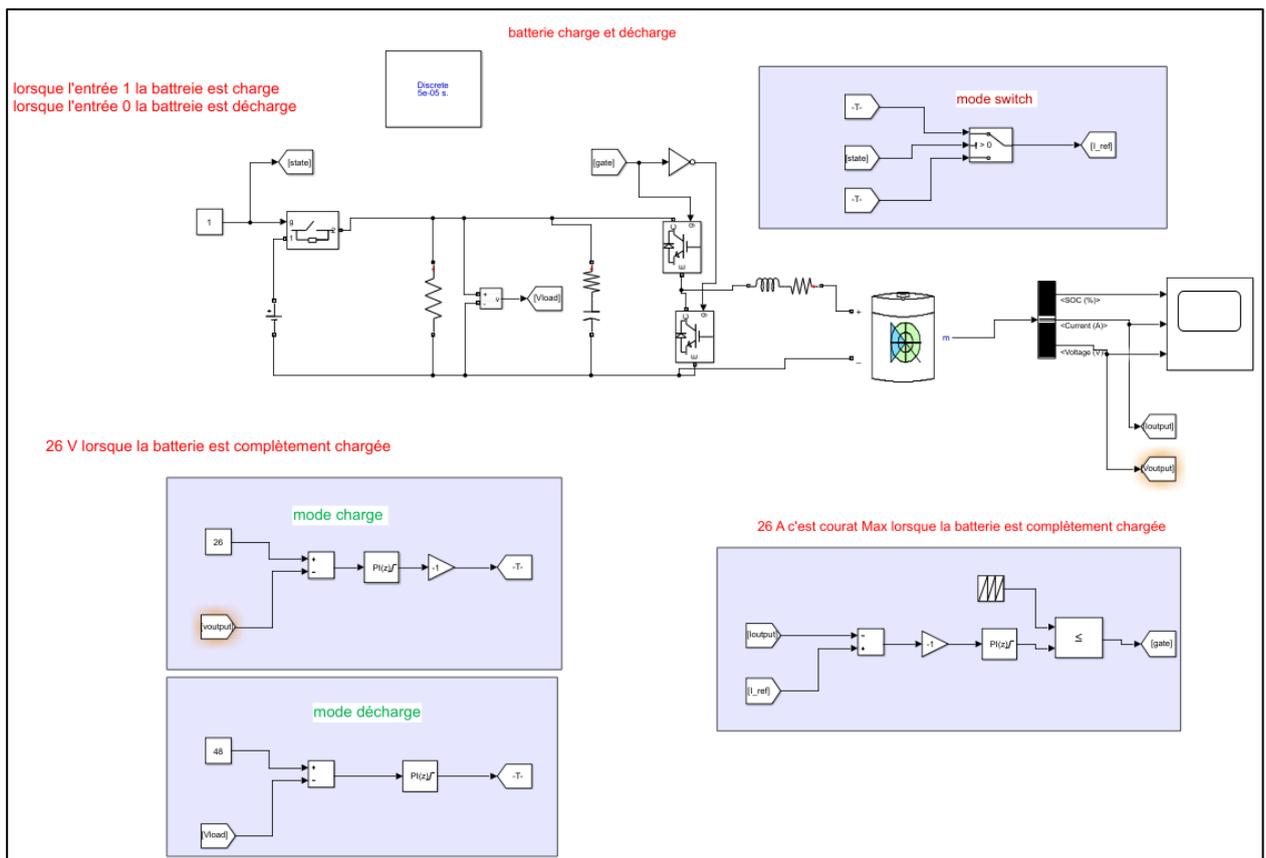


Figure IV.27 Bloc diagramme de batterie avec hacheur boost

Dans la Figure IV.27 La batterie que nous contrôlons ici 1(charge) et 0(décharge) Pour étudier l'états de la charge et la décharge.

Les paramètres de la batterie Lithium sous Matlab

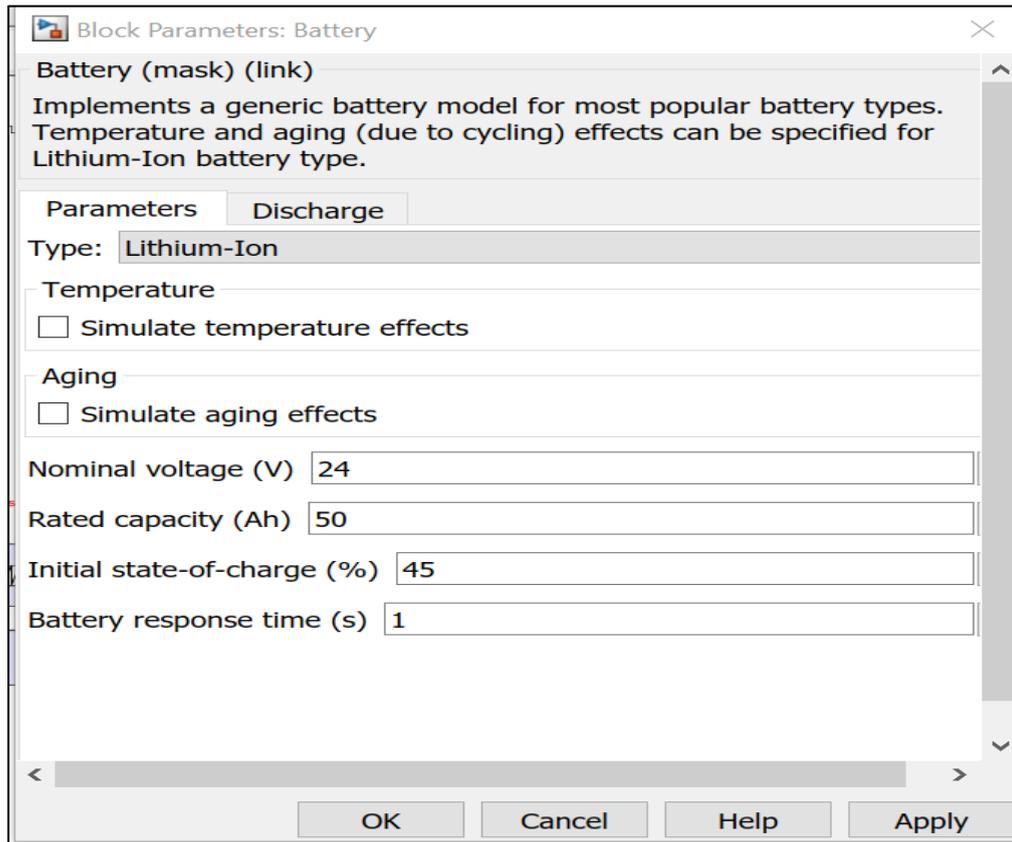


Figure IV.28 Les paramètres de la batterie Lithium de Matlab

B. Les résultats de la simulation :

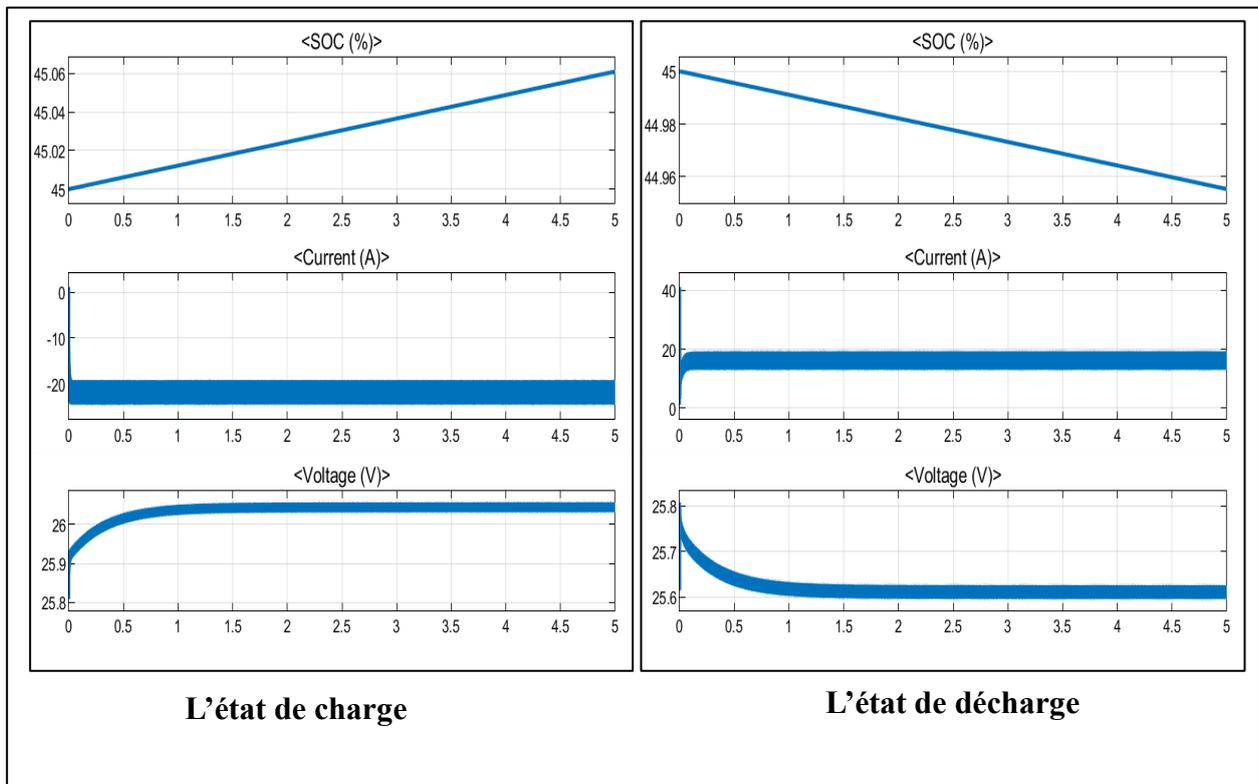


Figure IV.29 Les graphes de l'états de charge et de décharge de la batterie

Dans le Figure IV.29 Représenter les graphes deus l'états des charge et décharge du batterie.

- L'état de charge Notez le faible courant et la haute tension.
- L'état de décharge Nous observons une chute de tension et une montée de courant.

Nous comparerons les trois systèmes et lorsque la batterie est automatiquement à l'état de charge et lorsqu'elle est à l'état de décharge. Pour étudier le fonctionnement de la batterie, nous supposons que les transformations atmosphériques sont constantes.

Tableau IV.6 Puissances des systèmes hybrides

System des énergie	Puissance
Panneau solaire	122408 W
Turbine éolienne	5709 W
Pile à combustible	7119 W
Totale	135236 W

La Tableau IV.6 Il consiste en Puissances des systèmes hybrides Avec

- L'hypothèse (chaleur, lumière, vitesse du vent) constante et absente la commande MPPT P&O
- L'hypothèse la puissance de la charge 12000 w.

Tableau IV.7 Tableaux de Karnaugh des systèmes hybrides

Pile à combustible	Turbine éolienne	Panneau solaire	La Charge	État de la charge du batterie	
				Charge	Décharge
0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	0

Le tableau IV. 7 Comparaisons des trois systèmes et de la durée de fonctionnement de la batterie au cas où la puissance d'assemblage ne serait pas suffisante pour fonctionner la charge.

IV.3.5 Simulations system hybride avec onduleur triphasé et charge

La simulation des systèmes hybrides, combinant des éléments tels que des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes, des piles à combustible et des batteries pour stocker et réguler l'énergie, représente un défi complexe mais crucial dans la transition vers des sources d'énergie durables. Cette simulation vise à optimiser la gestion des tensions, des courants et de la puissance pour assurer un fonctionnement harmonieux et efficace de l'ensemble du système. En ajustant les paramètres de chaque composant en fonction des conditions environnementales et des besoins en énergie, les simulateurs peuvent modéliser divers scénarios et stratégies de contrôle pour maximiser la production d'énergie, minimiser les pertes et garantir une alimentation stable. En intégrant des algorithmes avancés de gestion de l'énergie, les simulations permettent d'évaluer les performances à long terme, de prévoir les fluctuations de la demande et de concevoir des systèmes hybrides adaptés à une variété d'applications, qu'il s'agisse de systèmes autonomes en milieu isolé ou de micro-réseaux alimentant des communautés urbaines.

IV.3.5.1 Onduleur triphasé

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif alimenté en continue, il modifie de façon périodique la connexion entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi-pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs. Chaque demi-point comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , $S'1$ et S_2 , $S'2$, S_3 et $S'3$ doivent être complémentaires deux à deux.

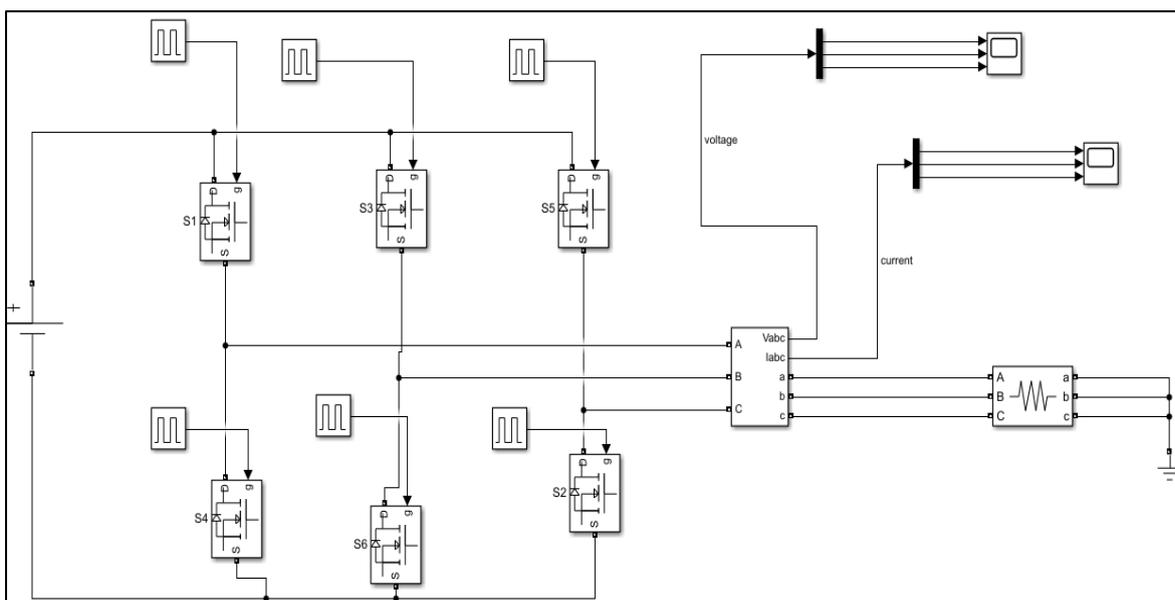


Figure IV.30 Schémas de bloc diagramme de l'onduleur triphasé

Dans l'état actuel de l'alimentation des systèmes hybrides, l'onduleur triphasé joue un rôle crucial en assurant la conversion et la distribution efficaces de l'énergie électrique. Lorsque différents éléments tels que les panneaux solaires, les éoliennes, les piles à combustible et les batteries contribuent à la production d'électricité, leurs tensions et fréquences peuvent varier. L'onduleur triphasé intervient alors pour harmoniser ces flux hétérogènes en les convertissant en un courant alternatif stable et synchronisé, compatible avec le réseau électrique.

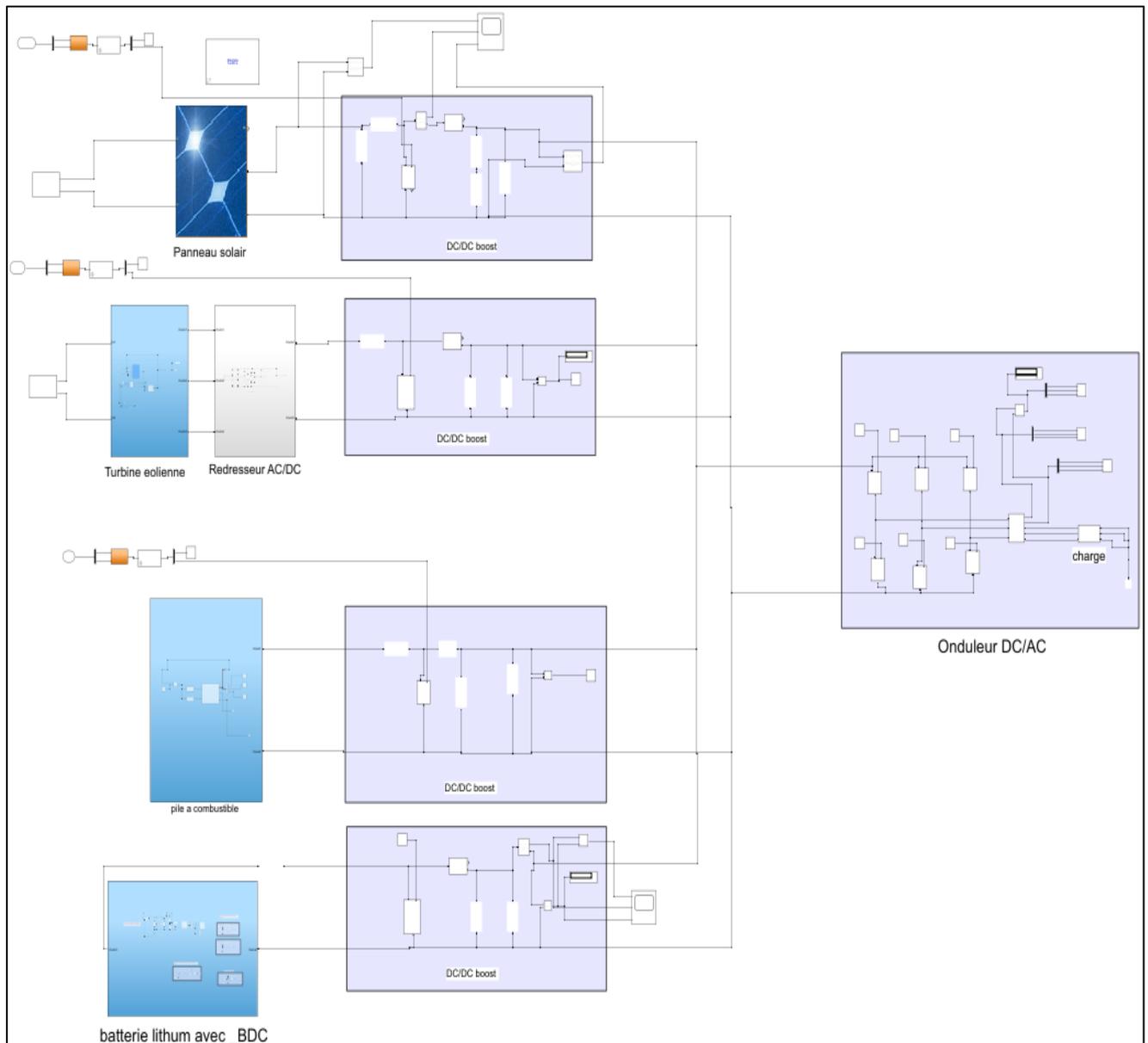


Figure IV.31 Blocks diagramme de system hybride avec onduleur triphasé et charge

Le figure IV.31 représente un système hybride qui change à chaque étape avec commande MPPT P&O Pour rechercher le meilleur point de puissance maximum et DC/DC boost pour Augmenter la tension et du courant et onduleur DC/AC pour transformer courant continue en courant alternatif qui couvre la charge que nous avons.

IV.3.5.2 Schéma et Résultats de simulation

La Figure IV.32 Représenter Résultats de simulation d'un system hybride jumelage triphasé (courant alternatif) alimenté en onduleur triphasé DC/AC avec le changement climatique, la lumière, la température et la vitesse du vent.

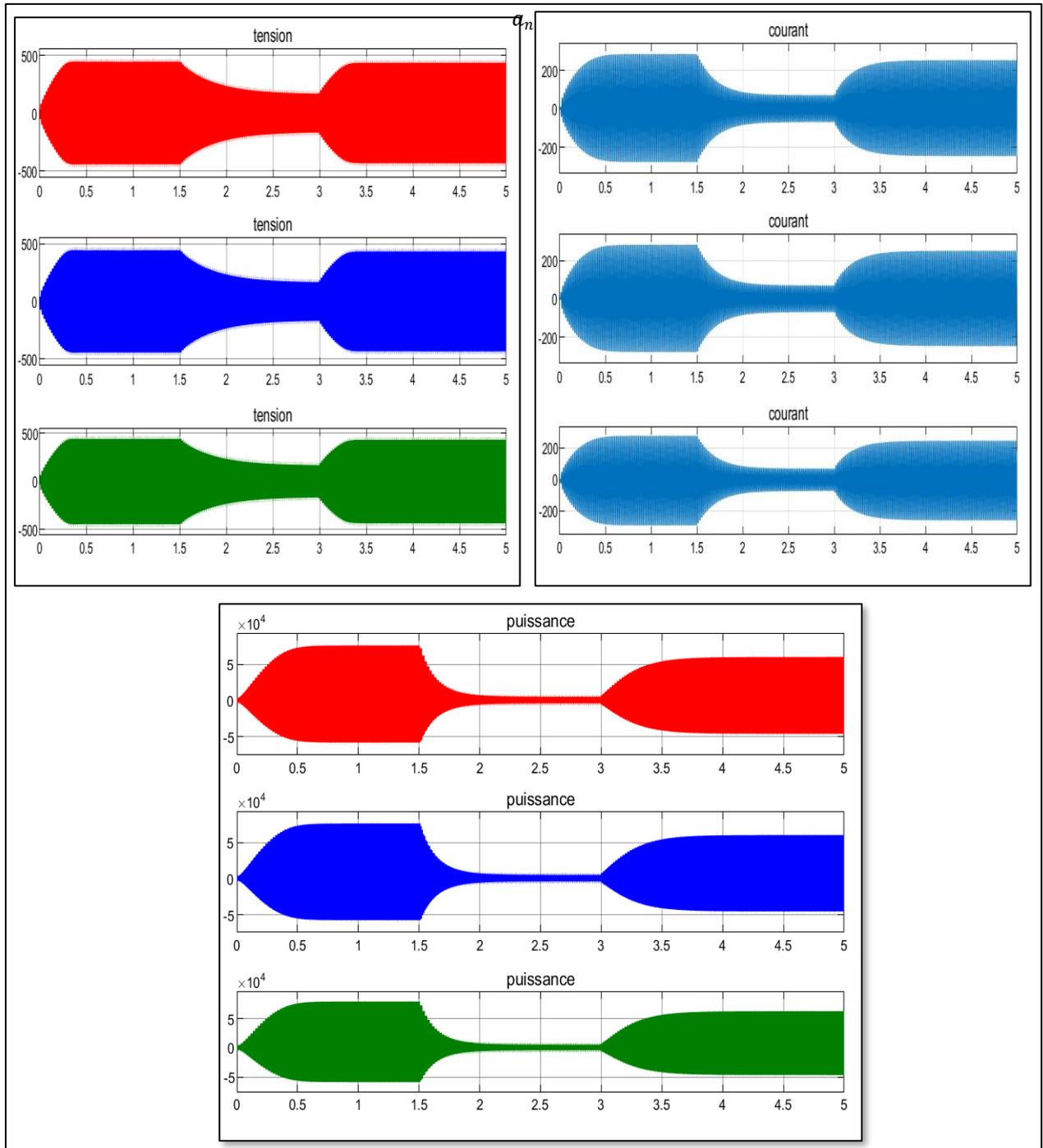


Figure IV.32 Graphes du (courant, tension, puissance) d'un system hybride

Dans la figure IV.33 On observe un changement de tension, de courant et de puissance par un changement des facteurs climatiques (lumière, chaleur, intensité du vent) sur plusieurs périodes.

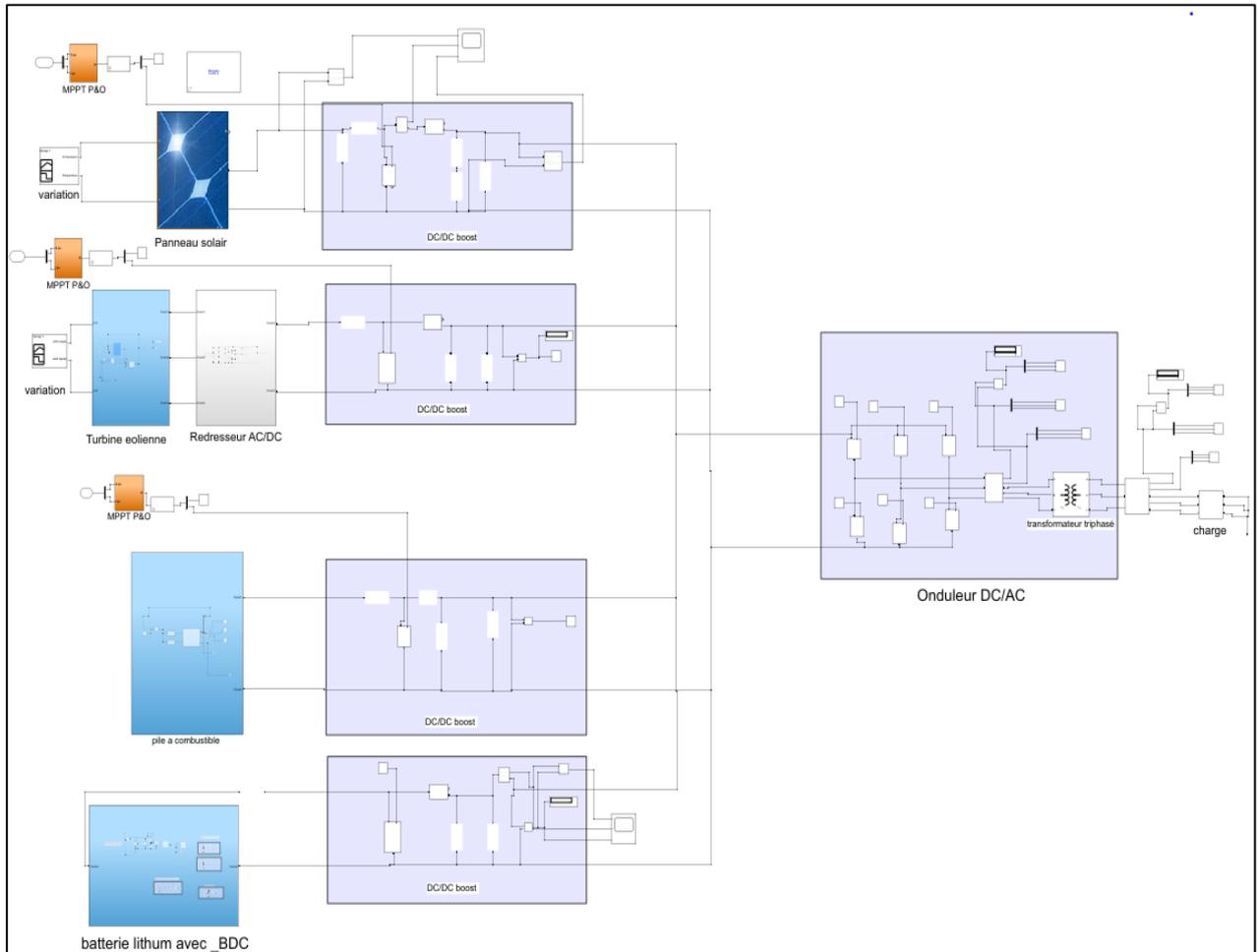


Figure IV.33 Blocks diagramme de system hybride avec transformateur triphasé

Lorsque nous avons ajouté le système hybride avec transformateur Augmente l'intensité du courant et de la tension afin de l'exploiter dans plusieurs domaines, par exemple l'éclairage, le fonctionnement des transformateurs, les moteurs haute tension, etc. nous remarquons une augmentation significative de la puissance Comme indiqué Figure IV.34.

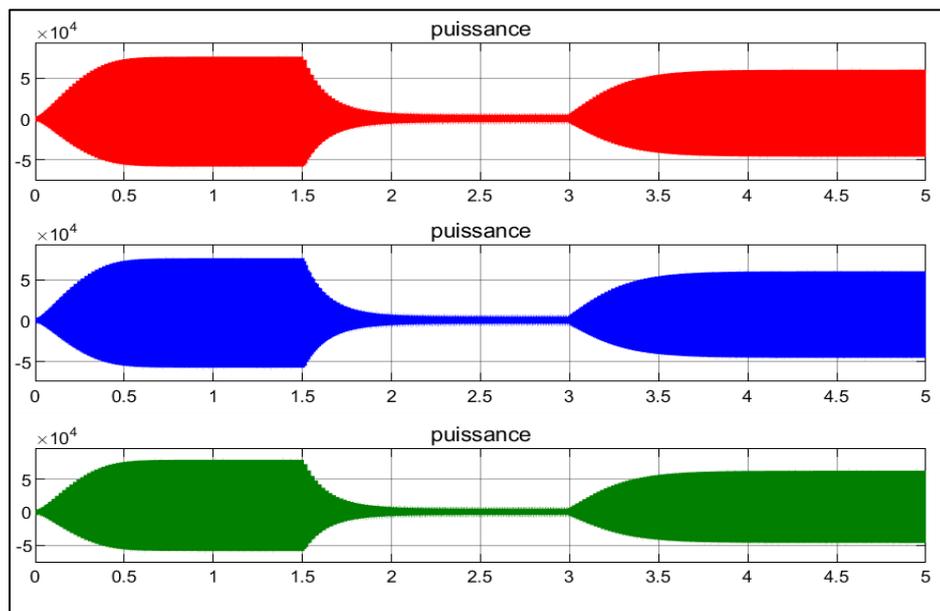


Figure IV.34 La courbe de la puissance des systèmes hybride

Ici, l'état de la batterie change à mesure que les conditions météorologiques changent pour chaque système et nous avons découvert de nombreuses possibilités pour que la batterie de stockage fonctionne avec les différents travaux de chaque système, nous vous promettons انشاء الله d'étudier ces possibilités plus tard avec un audit.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la simulation des systèmes hybrides d'énergies renouvelables, comprenant des éléments tels que les panneaux solaires, Les turbines éoliennes, les piles à combustible et les batteries, intégrées avec des onduleurs triphasés et des algorithmes de commande *MPPT P&O*, représentent des outils essentiels pour concevoir, optimiser et déployer des solutions énergétiques durables et efficaces.

Grâce à ces techniques avancées, il est possible d'évaluer avec précision les performances de différents scénarios, d'optimiser la gestion de l'énergie et de garantir une alimentation stable et fiable pour une variété d'applications. En combinant des modèles de simulation sophistiqués avec des contrôleurs intelligents, il devient possible de maximiser la production d'énergie, d'adapter dynamiquement le système aux conditions environnementales changeantes et de répondre de manière proactive aux fluctuations de la demande. Ainsi, la modélisation et la simulation des systèmes hybrides d'énergies renouvelables avec onduleurs triphasés et commandes *MPPT P&O* ouvrent la voie à une transition énergétique réussie vers un avenir plus durable et résilient.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Après avoir minutieusement examiné et proposé l'installation d'un système hybride, nous avons pu dégager des conclusions substantielles quant à sa pertinence, ses avantages et ses perspectives d'avenir. Notre exploration approfondie a révélé que l'intégration d'un système hybride offre une solution robuste et polyvalente pour répondre aux besoins énergétiques contemporains tout en offrant des possibilités de contrôle et de gestion avancées. Cette conclusion est le fruit d'une analyse rigoureuse et d'une évaluation attentive des différents aspects de cette proposition novatrice.

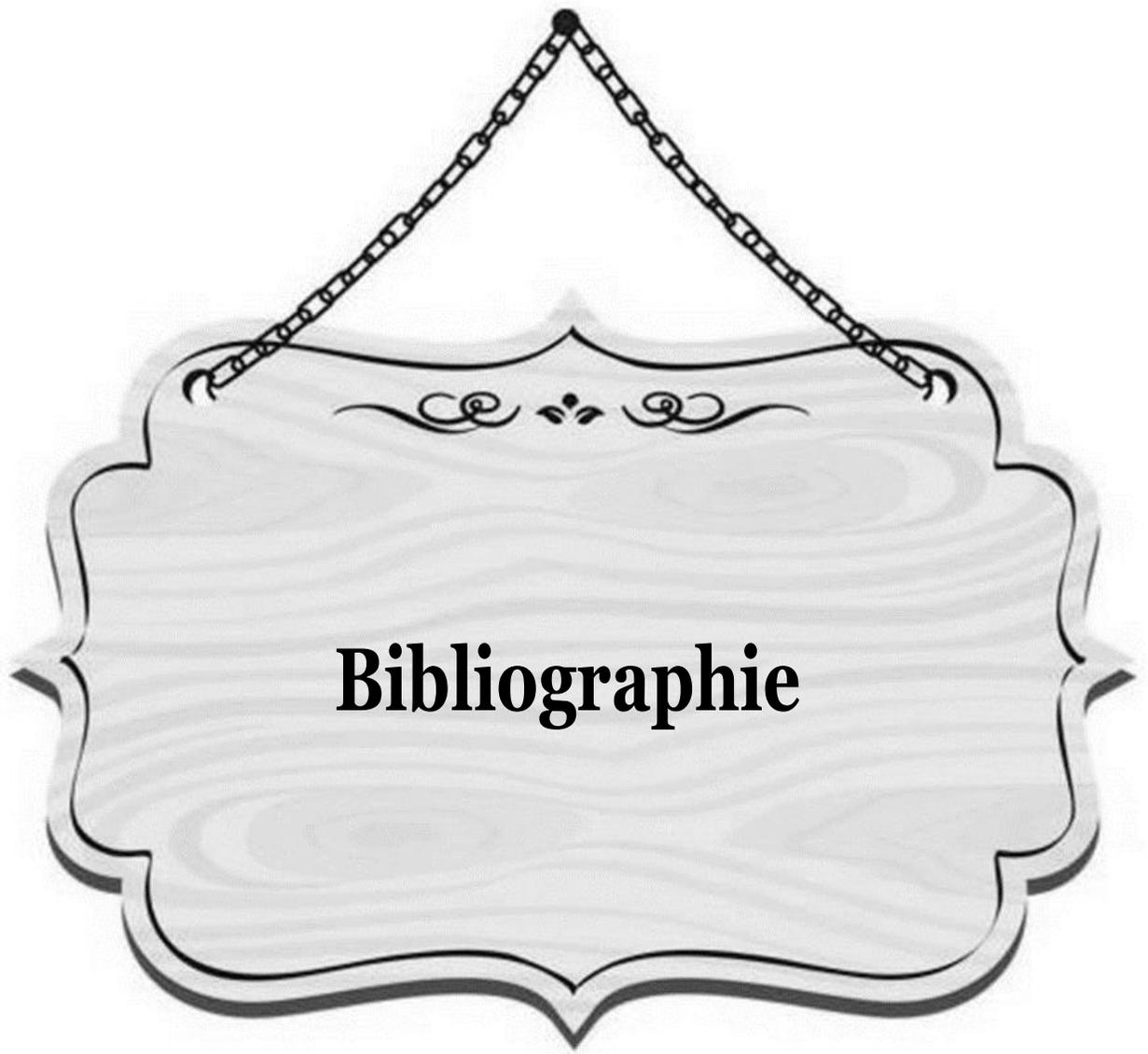
Premièrement, notre étude a mis en évidence les performances satisfaisantes du système hybride en termes de fourniture de puissance. En combinant habilement diverses sources d'énergie telles que l'énergie solaire, éolienne et conventionnelle, nous avons pu concevoir un système capable de répondre à une gamme variée de demandes énergétiques. Les tests et simulations ont démontré que ce système hybride peut fournir une puissance adéquate et stable, garantissant ainsi une alimentation fiable pour diverses applications.

Deuxièmement, l'utilisation d'algorithmes et de systèmes de contrôle modernes représente un aspect crucial de notre proposition. En exploitant les avancées technologiques dans le domaine du contrôle et de l'automatisation, nous avons pu mettre en œuvre des mécanismes sophistiqués pour superviser et gérer le système hybride de manière efficace. Ces algorithmes permettent non seulement d'optimiser les performances du système, mais aussi de prévoir et de répondre aux éventuelles défaillances ou perturbations, assurant ainsi un fonctionnement sans heurts et une maintenance proactive.

Troisièmement, notre analyse a également révélé les nombreux avantages environnementaux et économiques associés à l'utilisation d'un système hybride. En réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en favorisant l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, ce système contribue à atténuer les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir la durabilité environnementale. De plus, en réduisant les coûts d'exploitation et de maintenance à long terme, il offre des avantages économiques tangibles, tout en créant des opportunités pour le développement de technologies et de marchés émergents.

En conclusion, notre proposition d'installation d'un système hybride représente une approche innovante et prometteuse pour relever les défis énergétiques contemporains. En combinant efficacement différentes sources d'énergie et en utilisant des algorithmes de contrôle avancés, ce système offre une solution complète et adaptable pour assurer une alimentation fiable et durable. À l'avenir, il est crucial de poursuivre les recherches et les investissements dans ce domaine, afin

de maximiser les avantages potentiels des systèmes hybrides et de contribuer à une transition énergétique réussie vers un avenir plus durable et résilient.



Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] Rapport de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, 2018.
- [2] Documentation de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, 2013
- [3] Rapport de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, 2019
- [4] Raoul.P, l'industrie cimentière française, et la réduction des émissions de CO₂
- [5] Info CETIM, <http://www.cetim-dz.com/bul/bulletin%2004.pdf>.
- [6] Rapport de la cimenterie d'El-Ma-labiod Tébessa, 2017
- [7] Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie. Le diagnostique énergétique d'une cimenterie, fiche technique prisme n° 1
- [8] Analyse comparative de la consommation d'énergie dans l'industrie canadienne du ciment. ISBN 978-1-100-50372-1 No de cat. M144-213-2009
- [9] Principes généraux de ventilation - Brochure – INRS, Institut national de recherche et de sécurité. ED 695, guide pratique de ventilation
- [10] Mirecki A. Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance.
- [11] Énergies renouvelables : définition, exemples, avantages et limites [Internet]. Youmatter. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>.
- [12] Snapshot [Internet]. [cited 2024 Mar 19]. Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-chimique>.
- [13] Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures
- [14] Kanchev - Gestion des flux énergétiques dans un système hybr.pdf [Internet]. [cited 2024 Feb 25]. Available from: <https://theses.hal.science/tel-01159506/document>
- [15] Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau .et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)
- [16] Géothermie - Vikidia, l'encyclopédie des 8-13 ans [Internet]. [cited 2024 Feb 25]. Available from: <https://fr.vikidia.org/wiki/G%C3%A9othermie>
- [17] Krim-Med-Lamine-Debbah-Housseem-Eddine.pdf [Internet].
- [18] <https://core.ac.uk/download/pdf/51340005.pdf>
- [19] Photovoltaic Systems - A buyers Guide.pdf [Internet]. [cited 2024 Feb 26]. Available from: <http://www.energyalternatives.ca/PDF/Photovoltaic%20Systems%20-%20A%20buyers%20Guide.pdf>.
- [20] ZAR5745.pdf [Internet].
- [21] Mémoire_final_compressed.pdf
- [22] L'énergie éolienne - Principes et fonctionnement [Internet]. SirEnergies - Cabinet de conseil et de sourcing en énergie. 2023 [cited 2024 Feb 28]. Available from: <https://www.sirenergies.com/article/energie-eolienne-principes-et-fonctionnement/>.
- [23] Énergie éolienne : fonctionnement, avantages, chiffres clés et enjeux [Internet]. 2011 [cited 2024 Feb 28]. Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>.
- [24] Fiche_eolien_elementaire.pdf
- [25] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/#:~:text=Si%20le%20vent%20pr%C3%A9sente%20une,au%20niveau%20de%20la%20mer>.
- [26] <https://docplayer.fr/40811116-L-energie-eolienne-principe-de-fonctionnement-developpement-viable.html>
- [27] IFPEN | Énergie éolienne : transformer le vent en électricité
- [28] https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/titaouine_mohamed/files/chapitre_2_energie_eolienne_finalise_28_jan_2021.pdf
- [29] <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/algerien/17412.pdf>
- [30] energie_solaire_photovoltaique.pdf. Accessed March 10, 2024. https://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [31] conversion_photovoltaique.pdf © www.martin-bucher.de, Stuttgart/Germany

- [32] ALMEE-photovoltaïque.pdf Adnan Jouni, ALMEE meet MED training on EE and RES in buildings 24-28 February 2020 – Tunis, Tunisia
- [33] Ghezal - ASPECTS TECHNIQUES DES PROJETS SOLAIRES PV RACCORD.pdf. Accessed March 11, 2024. https://energypedia.info/images/d/dd/Module_2_Formation_BE_VF.pdf
- [34] Snapshot. Accessed March 12, 2024. <https://www.dolphin-charger.fr/actualites/regulateurs-mppt-regulateurs-charge-solaire>
- [35] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
- [36] Anantapuram, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university , 2012
- [37] Ahmad Zbeeb, “a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications” for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada,2009.
- [38] Hajar Bagheri “advances in electric power engineering” publisher: lulu (usa), 2015
- [39] Commande MPPT et contrôle d’un systemephotovoltaïque 3KW par la logique floue.pdf
- [40] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « etude d’une chaine de conversion photovoltaïque »,diplôme d'ingenieur d'etat en genie electrotechnique, universite de m’sila,2010
- [41] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva “energy comparison of seven mppt techniques for pv systems”, 59 scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [42] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11975/4/chapitre%20%28Enregistr%C3%A9%20automatiquement%29.pdf>
- [43] https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre4_systeme_stockage.pdf
- [44] Electronique de puissance L2 S2.pdf. Accessed March 12, 2024. <https://isetn.rnu.tn/archives/fr/images/documents/cours/Electronique%20de%20puissance%20L2%20S2.pdf>
- [45] CEREFÉ-guide-PV-Edition2022_.pdf
- [46] <http://thesis.univ-biskra.dz/1151/4/2emechapitre.pdf>
- [47] Khelfat-Lotfi.pdf
- [48] 161635101271.pdf 151535108946
- [49] POLYCOPIE-BENAMARA.pdf
- [50] energie_eolienne_finalise_28_jan_2021.pdf
- [51] <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/15975/816.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [52] ing ZEMOURI AZEDDINE.pdf
- [53] Modélisation et simulation d’un système photovolta.pdf. Retrieved April 8, 2024 from <https://dspace.univ-ouargla.dz>
- [54] R2023b - Updates to the MATLAB and Simulink product families. Retrieved April 8, 2024 from https://www.mathworks.com/products/new_products/release2023b.html
- [55] A9R4810.tmp.pdf

Abstract:

A hybrid energy system integrates various energy production technologies. The term "hybrid" refers to the fusion of electricity and energy storage. Typically, sources such as photovoltaics, wind energy and different types of generators, such as diesel generators, are combined to generate electricity. Our research also examined hybrid energy systems that combine renewable elements such as photovoltaics and wind power, complemented by other sources of production and storage, such as diesel generators or fuel cells, as well as energy storage systems. The use of lithium batteries is preferred for an optimal hybrid system.

Résumé :

Un système énergétique hybride intègre diverses technologies de production d'énergie. Le terme "hybride" fait référence à la fusion de l'électricité et du stockage énergétique. Typiquement, on combine des sources telles que le photovoltaïque, l'énergie éolienne et différents types de générateurs, comme les générateurs diesel, pour générer de l'électricité. Notre recherche a également examiné des systèmes énergétiques hybrides qui combinent des éléments renouvelables tels que le photovoltaïque et l'éolien, complétés par d'autres sources de production et de stockage, comme les générateurs diesel ou les piles à combustible, ainsi que des systèmes de stockage d'énergie. L'utilisation de batteries au lithium est privilégiée pour un système hybride optimal.

ملخص :

نظام الطاقة الهجين هو مزيج من تقنيات إنتاج الطاقة المختلفة. حيث ان مصطلح "الهجين" يصف نظامًا يجمع بين تخزين الكهرباء والطاقة وعادة ما يتم الجمع بين الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح وأنواع مختلفة من المولدات مثل مولدات الديزل لإنتاج الكهرباء في نظام هجين. وشملت دراستنا أيضًا أنظمة الطاقة الهجينة التي تحتوي على عناصر مختلفة للطاقة المتجددة، غالبًا ما تكون الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح، والتي يُستكمل إنتاجها بنوع آخر من التوليد أو التخزين، مثل مولد الديزل أو خلية الوقود بالإضافة إلى نظام تخزين الطاقة. باستخدام بطاريات الليثيوم للحصول على نظام هجين مثالي.