

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de Communication**

**Département d'Electronique et Télécommunications**



**Mémoire**

**MASTER PROFESSIONNELLE**

*Domaine : Sciences et Technologies*

*Filière : électronique*

*Spécialité : Instrumentation et systèmes*

*Présenté par : Serrar Ahmed & Bouhnik Ahmed Amine*

**Thème :**

***Optimisation d'énergie d'un système éolien  
avec stockage***

*Soutenue publiquement le ... /06 /2022 devant le jury :*

**ABDERRAZAK**

*M.C.A Université Kasdi Merbah Ouargla Président*

**BENCHABANE**

**SALIM KADRI**

*M.A.A Université Kasdi Merbah Ouargla Rapporteur*

**ADEL ABI MOULOUD**

*M.C.B Université Kasdi Merbah Ouargla Examineur*

***Année universitaire 2021/2022***

## Dédicace

Amine :

Au nom d'ALLAH, prières et paix soient sur le Messager de Dieu, paix sur lui. Louange a ALLAH qu'remerciez Dieu que nous ayons réussi et nous ayons donné la force de compléter ce mémorandum.

Je dédie ce succès et ce progrès, cette note et ce témoignage à mon Cher Père YUCEF et à ma Chère Mère KARIMA qui sont fatigués, éveillés et sacrifiés pour arriver ici.

Je remercie mes frères ISMAIL, YASMINE et IMAD et tous ceux qui m'ont soutenu et aidé de mes amis

Je remercie ma famille BOUHNİK et ABADLI pour votre soutien et votre soutien.

Je remercie mon collègue SERRAR AHMED que j'ai été très honoré d'avoir fait la note avec lui et je demande à Dieu son succès et son succès

Je remercie ma famille ZOUZOU pour votre soutien et votre soutien

Ahmed :

Au nom d'Allah et que la paix et la paix soient sur la création la plus honorable de notre maître Mohammed

Dieu merci nous avons réussi à achever ce travail

Je dédie ce travail à ma famille, qui m'a soutenu tout au Mon parcours étudiant et à mes amis Amine Bouhnik & mohammed benouaer et tous ceux qui m'ont soutenu, merci beaucoup.

Et je remercie ma famille, mes frères, mes sœurs et mes parents qui Ils ont été la raison de mon succès et arrivé ici et j'espère qu'avec cette remise de diplôme, j'ai été à la hauteur de leurs attentes.

## Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu, qui nous a donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour le faire porter ses fruits et pouvoir mener à bien ce travail de recherche.

En signe de gratitude, nous tenons à remercier l'encadreur Mr. KADRI SALIM, l'occasion de bénéficier de ses précieuses connaissances et conseils et d'assurer le suivi tout au long de la préparation de la note.

Un merci spécial au distingué comité, M. le Président BENCHABANE ABDERRAZAK, et le Professeur adjoint ADEL ABI MOULOUD, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Et nous remercions les enseignants d'Université Kasdi Merbah Ouargla qui nous ont aidés à compléter le mémorandum.

**Amine :**

Je remercie M. KADRI SALIM de son soutien et de ses conseils tout au long de l'achèvement du mémorandum, pour les informations précieuses et les efforts qu'il a déployés avec nous dans le mémorandum.

Je remercie tous mes amis qui étaient à mes côtés en ma vie universitaire.

**Ahmed :**

Et je remercie M. KADRI SALIM pour tous ses efforts et pour son dévouement à nous aider et à nous suivre tout au long de la préparation du cours de la préparation, alors merci pour nos stades et que Dieu vous récompense de bien pour nous.

Et remerciez mon collègue et ami AMINE pour tout et je lui souhaite beaucoup de succès

# Table de matières

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Table de matière	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
<b>1 Chapitre 01 : Etat de l'art sur les systèmes d'énergies renouvelable éolienne</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction :	3
1.2 Potentiel L'énergie éolienne en Algérie :	3
1.3 La chaine de production éolienne :	6
1.3.1 Choix technologie de l'éolienne :	6
1.3.2 Architecture d'une éolienne :	7
1.3.3 Les différents types d'éoliennes :	9
1.3.4 Système de régulation et de protection de l'éolienne :	11
1.3.5 Conversion électrique d'énergie éolienne :	12
1.4 Modélisation de la chaine éolienne :	13
1.4.1 Modèle du vent :	14
1.4.2 Modèle de la turbine :	14
1.5 Modélisation des convertisseurs :	16
1.5.1 Convertisseur DC-DC buck :	16
1.5.2 Convertisseur DC-DC boost :	17
1.6 Système de stockage :	18
1.6.1 Principe de fonctionnement :	19
1.6.2 Les différents types de la pile à combustible :	19
1.7 Modélisation du dispositif de stockage :	22
1.8 Modélisation du redresseur :	25
1.8.1 Etude d'un redresseur monophasé à diode :	25
1.8.2 Modèle d'un pont de diode	26
1.9 Conclusion :	26
<b>2 Chapitre 02 : Modélisation et Simulation</b>	<b>28</b>
2.1 Introduction :	28
2.2 Les données de l'étude :	28
2.2.1 Les données du vent :	28

2.3	Modèle de simulation : .....	29
2.3.1	Composants et simulation d'éléments du système d'énergie : .....	29
2.3.2	Simulation de Le système étudié sans source réserve : .....	39
2.3.3	Simulation de Le système étudié avec source réserve : .....	43
2.4	Conclusion : .....	46
	<b>Les Références :</b> .....	48
	<b>Résumé :</b> .....	51

# Liste des figures

## Figure Chapitre 1

Figure 1. 1 Carte des vents en Algérie. ....	6
Figure 1. 2 Conversion de l'énergie cinétique du vent. ....	7
Figure 1. 3 Composants d'une turbine éolienne. ....	8
Figure 1. 4 Exemples de turbines éoliennes à axe vertical. ....	10
Figure 1. 5 Modèles de mâts d'éoliennes à axe horizontal ; a) Mât autoporteur, b) Mât en treillis, c) Mât haubané. ....	11
Figure 1. 6 Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu. ....	13
Figure 1. 7 Chaîne de conversion éolienne. ....	13
Figure 1. 8 Colonne d'air animée d'une vitesse $V$ ....	15
Figure 1. 9 Vitesse de vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega r$ . ....	15
Figure 1. 10 Montage d'un convertisseur buck. ....	16
Figure 1. 11 Montage d'un convertisseur boost. ....	17
Figure 1. 12 Schéma de principe d'une pile à combustible ....	19
Figure 1. 13 Working principles of PEMFC ....	20
Figure 1. 14 Schéma d'une pile à combustible AFC. ....	20
Figure 1. 15 Schéma d'une pile à combustible à acide phosphorique ....	21
Figure 1. 16 Chemical reactions of direct methanol fuel cell (DMFC). ....	21
Figure 1. 17 Prototype de pile SOFC réalisé au centre de recherches de Jülich en Allemagne. ....	22
Figure 1. 18 Modèle R-C de la batterie. ....	23
Figure 1. 19 Schéma équivalent de $nb$ éléments en série. ....	23
Figure 1. 20 Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink ....	24
Figure 1. 21 Redresseur monophasé à diode. ....	25
Figure 1. 22 Schéma d'un pont de diodes. ....	26

## Figure Chapitre 2

Figure2. 1 Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Ouargla à 10 m du sol. ....	28
Figure2. 2 Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Ouargla....	29
Figure2. 3 Architecture système hybride ....	30
Figure2. 4 Schéma Simulink le système de production ....	31
Figure2. 5 Schéma Simulink de l'MPPT ....	32
Figure2. 6 Changements de la vitesse du vent et de la capacité du système de production en termes de temps ....	33
Figure2. 7 Schéma Simulink de la batterie ....	34
Figure2. 8 L'amplitude et le courant et la tension de la batterie.....	35
Figure2. 9 Schéma Simulink de la consommation (la charge).....	36

Figure2. 10 Fonction MATLAB de commande la consommation.....	37
Figure2. 11 Schéma Simulink de la source réserve .....	38
Figure2. 12 Changements de la puissance du la source de réserve dans le temps .....	39
Figure2. 13 Simulation du système d'alimentation des éoliennes avec stockage et consommation sur programme Simulink.....	40
Figure2. 14 Organigramme commande du système.....	41
Figure2. 15 Changements des puissances pour les sources d'alimentation et l'état de la batterie sans source réserve dans le temps .....	42
Figure2. 16 Simulation du système d'alimentation des éoliennes avec stockage et consommation et source réserve sur programme Simulink .....	44
Figure2. 17 Changements des puissances pour les sources d'alimentation et l'état de la batterie avec la source réserve dans le temps .....	45

## Liste des tableaux

Tableau 1 Valeurs du coefficient de correction : .....	14
Tableau 1. 1 Formules de dimensionnement des valeurs de L et C des convertisseurs DC-DC .	18
Tableau 2. 1: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Ouargla.....	28
Tableau 2. 2 : Données statistiques de la vitesse du vent.....	29



## Liste des abréviations

TWh :	Téra-watt-heure
EnR	Energie renouvelable
CC	Courant continu.
IGBT	transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor)
CA	Courant alternatif
MPPT	poursuite de point de puissance maximal (Maximum power point tracker)
CIEMAT	Centre for Energy, Environmental and Technological
SOFC	Pile à Combustible à Oxyde Solide (Solid Oxide Fuel Cells)
DMFC :	Pile à Combustible à Méthanol Direct (Direct-Methanol Fuel Cell)
PAFC :	Pile à Combustible à AcidePhosphorique(Phosphoric Acid Fuel Cells)
AFC :	Pile à Combustible Alcaline (Alkaline Fuel Cell)
PEMFC	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (proton exchange membrane fuel cells)
PAC	Une pile à combustible
HAWT	Turbines éoliennes à axe horizontal
VAWT	Turbines éoliennes à axe vertical
BTU	British thermal unit
ENR	Entreprise Nationale de Récupération
PV	Photovoltaïque
kWh	kilowatt/heure
EIA	Energie Information Administration
SEH	Système à Énergie Hybride
CSP	Centrale solaire thermodynamique (concentrâtes Soler power)
$\rho$	Densité volumique de l'air (Kg/m <sup>3</sup> )
$v$	Vitesse instantanée du vent (m/s)
$E_c$	Energie cinétique du vent (Joules).
$V$	Vitesse de vent (m/s).
$\Omega t$	Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

$R_t$	Rayon de la surface balayée(m)
$V_{DC}$	Tension de sortie du convertisseur
(V). $f$	Fréquence du hachage (Hz)
$I_R$	Le courant nominal de la charge (A)
$\Delta I_R$	Ondulation du courant (A), dans notre cas ( $\Delta I_R(\%) = 5\% I_R$ )
$\Delta V_{DC}$	Ondulation de tension aux bornes de la charge ( $\Delta V_{DC}(\%) = 5\% V_{DC}$ )
$D$	Rapport cyclique de convertisseur limité entre 0 et 1

# **Introduction**

## **Générale**

---

## **Introduction générale**

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité.

Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

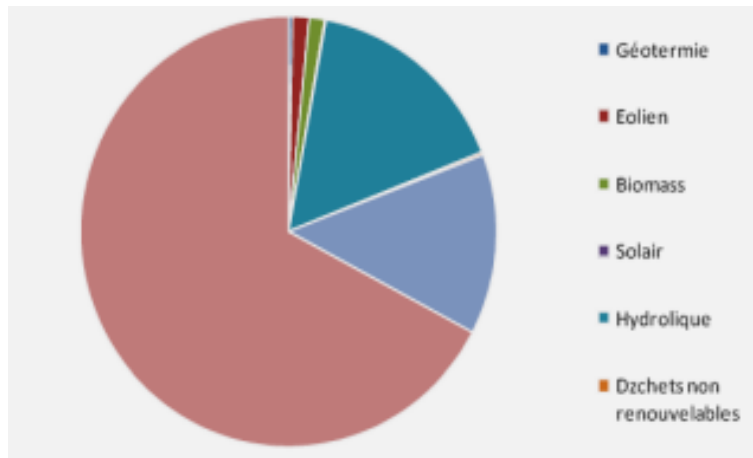
Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Dès lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles à y accéder.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

La production d'électricité renouvelable a atteint 3810.3 TWh en 2009, soit 19.1% de la production d'électricité mondiale. [01] [02]



**Figure 1 Structure de la production d'électricité 2009. [03]**

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire est une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelables dans un système à énergie hybride (SEH). Notre travail est divisé en deux chapitres :

Dans le premier chapitre nous donnons une description générale des systèmes à énergie hybride (SEH), ainsi que des notions sur les différentes sources constituant le système étudié. Il est composé d'une éolienne, d'une pile à combustible, d'une batterie, source réserve DC.

La modélisation du système à énergie hybride est étudiée en représentant chaque constituant par son modèle mathématique.

Le chapitre deux est consacré au dimensionnement et la simulation de notre système hybride. Ces différentes simulations sont effectuées sous le logiciel **Simulink** pour évaluer les performances de l'installation choisie, dans des conditions de fonctionnement autonome.

# Chapitre I

---

*Etat de l'art sur les systèmes  
d'énergies renouvelables éolienne*

## **1 Chapitre 01 : Etat de l'art sur les systèmes d'énergies renouvelable**

### **1.1 Introduction :**

Les systèmes d'énergies hybrides sont parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. Le terme système d'énergie hybride fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, l'énergie photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour produire l'électricité dans les régions. Les systèmes d'énergie hybride sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles. [03]

### **1.2 Potentiel L'énergie éolienne en Algérie :**

Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh) qui sont, après ceux de la géothermie, les plus bas du renouvelable. L'Energie Information Administration (EIA), organisme du Département US de l'Energie, prévoit qu'en 2022 les coûts moyens (en \$ de 2015) seront comme suit :

- kWh conventionnel : \$0,0726
- kWh géothermique \$0,0423
- kWh éolien : \$0,0736
- kWh photovoltaïque : \$0,1253
- kWh thermo-solaire CSP : \$0,239

Ceci dit, il ne faut pas perdre de vue que ces coûts ont été obtenus à l'étranger dans des pays qui maîtrisent parfaitement la technologie et où les vents atteignent de grandes vitesses avec des moyennes annuelles dépassant souvent les 9 mètres/seconde (m/s). Le coût de l'éolien sera donc autrement plus élevé en Algérie où les vents sont plutôt modérés avec un maximum annuel moyen ne dépassant pas environ 6 m/s sur l'essentiel du territoire national. Sans compter le manque d'expérience malgré la réalisation récente d'un pilote éolien de 10 MW dans la région d'Adrar. [04]

Pour bien comprendre l'importance de la vitesse des vents, il faut savoir que le rendement électrique des éoliennes varie en fonction du cube de la vitesse. Ainsi, lorsque la vitesse double, par exemple de 5 m/s à 10 m/s, la quantité d'électricité produite est multipliée par 8 et non pas par deux. Les coûts du kWh présentés plus haut correspondant à des vents d'environ 9 m/s, il

faudrait les multiplier par environ 3,8 pour avoir une idée approximative de ce qu'ils pourraient devenir si les vitesses baissaient au niveau des 6 m/s prévalent dans certaines zones du Sud. A cela pourraient s'ajouter des investissements et des coûts opératoires plus élevés ainsi qu'une durée de vie plus courte dans l'environnement agressif du Sahara. Il faut donc s'attendre, dans cette région, à des coûts du kWh éolien bien plus élevés que ceux du photovoltaïque. [04]

Le potentiel éolien du grand Sud algérien est non seulement modéré mais il se situe à l'intérieur d'un des plus importants, sinon le plus important, gisement solaire de la planète. L'énergie solaire et l'énergie éolienne générant le même produit, en l'occurrence de l'électricité, elles vont se retrouver en compétition et l'une d'entre-elles seulement pourra survivre : celle qui produira le kWh au moindre coût. Le Sud étant le domaine de prédilection du solaire et non pas de l'éolien, celui-ci ne pourra pas normalement s'y implanter. Le seul argument pouvant être avancé en faveur de l'éolien est que les vents peuvent souffler également la nuit mais il s'agit là d'un phénomène trop aléatoire pour être pris en considération. [04]

Bien sûr, d'aucuns émettrons des objections en arguant que dans de nombreux pays l'éolien et le solaire coexistent en parfaite harmonie comme en Allemagne par exemple. Effectivement, dans ce pays pionnier qui produit près de 33% de son électricité à partir des énergies renouvelables, l'éolien et le solaire coexistent parfaitement avec respectivement 13,9% et 8,7% du total en 2014. Et pour cause, les domaines de prédilection de ces deux sources d'énergie ne se superposent pas. Celui de l'éolien se situe dans la partie nord bien plus venté mais bien moins ensoleillé que le Sud. C'est donc au nord que se trouve concentrée la quasi –totalité des éoliennes. Par contre, celui du solaire (photovoltaïque) se situe dans le sud du pays beaucoup plus ensoleillé mais beaucoup moins venté. Il s'agit donc de deux activités qui se complètent au lieu d'entrer en compétition car elles couvrent des régions à vocations différentes. C'est ainsi que l'électricité éolienne produite au nord est acheminée vers le sud industriel et gros consommateur pour s'ajouter à la production solaire locale. En Algérie, la situation est tout autre car les deux domaines se superposent pratiquement partout, ce qui signifie que l'une des deux filières, l'éolien sans doute, y est de trop. [04]

Actuellement il existe, depuis juin 2014, un pilote éolien de 10 MW dans la région d'Adrar et un pilote photovoltaïque de 1.1 MW à Ghardaïa ainsi que plusieurs centrales PV plus récentes dans la région d'Adrar et ailleurs. L'évaluation de leurs performances ne manquera pas d'apporter une confirmation définitive à ce sujet.

Il n'est pas exclu, toutefois, que des poches très ventées et de moindre ensoleillement existent dans certains massifs montagneux ou dans des vallées étroites du Nord avec des rendements proches de ceux du PV. Dans ce cas, l'énergie éolienne pourrait s'y imposer comme complément



à l'énergie solaire ne serait-ce que pour réduire le problème d'intermittence. Impact de l'éolien sur les performances du programme national de développement des EnR.

Dans une précédente contribution intitulée " Le programme national de développement des énergies renouvelables : un éléphant qui accouche d'une souris ?" publiée dans le supplément économique du journal Liberté le 18 septembre 2016, nous étions parvenus, entre autres conclusions, aux suivantes.

- Le programme a pris trop de retard et avance trop lentement pour atteindre, en 2030, l'objectif de 22000 MW dont il ne pourra probablement pas dépasser les 50% à cette date.
- La part du renouvelable dans la future consommation électrique du pays en 2030 sera bien, en accord avec le programme révisé, d'environ 27% et permettra d'économiser environ 300 milliards de m<sup>3</sup> de gaz (mais sans tenir compte d'un éolien surestimé).
- Si la réalisation du programme atteint les 50% de l'objectif, sa contribution au futur mix énergétique global ne dépassera pas les 2%.

Dans cette contribution, la quantité d'électricité générée par l'éolien avait été estimée à 16,19 TWh/an par analogie avec les centrales éoliennes de Tarfaya au Maroc et d'El Ayoune au Sahara occidental mais sans tenir compte de la différence de vitesse des vents qui dépassent les 8 m/s dans ces deux localités comparés à un maximum généralement inférieur à 6 m/s en Algérie.

Il est donc nécessaire de corriger à la baisse les valeurs surestimées de la partie éolienne du programme. Sachant que le rendement électrique varie principalement en fonction du cube de la vitesse du vent, le passage de 8 m/s à 6 m/s réduit le rendement à 42% de la valeur précédemment calculée. Dans ces conditions, le rendement des 5010 MW du programme ne sera plus que de 6,83 TWh/an environ et non pas de 16,19 TWh/an. Cela se répercute sur le rendement électrique total des 220000 MW du programme qui diminue de 46,84 TWh/an à 34,47 TWh/an.

Cette quantité réduite d'électricité ne représentera plus alors que 20,3% de la consommation nationale d'électricité et non pas 27% comme calculé précédemment. Il en résulte que la quantité totale de gaz pouvant être économisée par le projet pendant une durée la vie de 25 ans se réduit de 300 à 210 milliards de m<sup>3</sup> environ, soit à peine 3% du futur mix énergétique algérien au lieu de 4%. S'il n'est réalisé qu'à 50%, ce pourcentage ne sera plus que d'environ 1,5% c'est-à-dire un appoint dérisoire. Il serait donc plus correct de parler de transition électrique plutôt que de transition énergétique. Sachant que le projet est prévu dépasser les 100 milliards de \$ et que les 210 milliards de m<sup>3</sup> de gaz économisés ne rapporteront pas plus de 40 à 50 milliards de \$ au prix actuel du million de BTU, de quelle rentabilité parle-t-on ? [04]

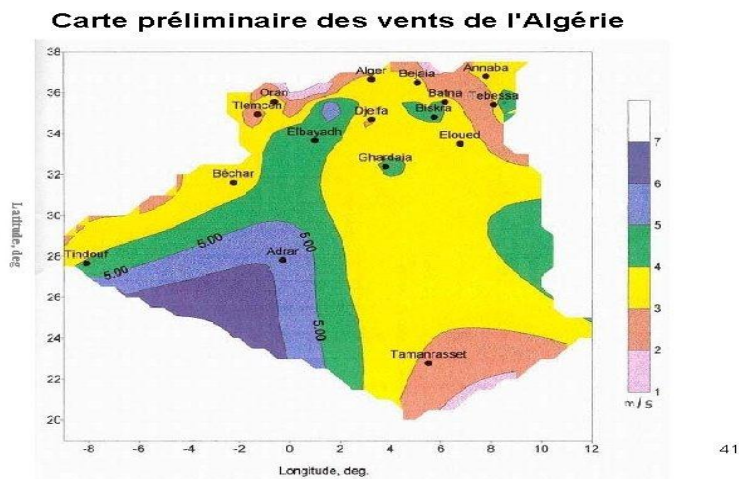


Figure 1. 1 Carte des vents en Algérie. [05]

### 1.3 La chaîne de production éolienne :

Le vent est une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. [06]

Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, en électronique de puissance et en commande de machines électriques tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile. [07]

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [06]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [08]

#### 1.3.1 Choix technologie de l'éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le maître des vents dans la Grèce antique [09].

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières [09] :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...)
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Un aérogénérateur, plus communément appelé "éolienne", est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure (1.2))

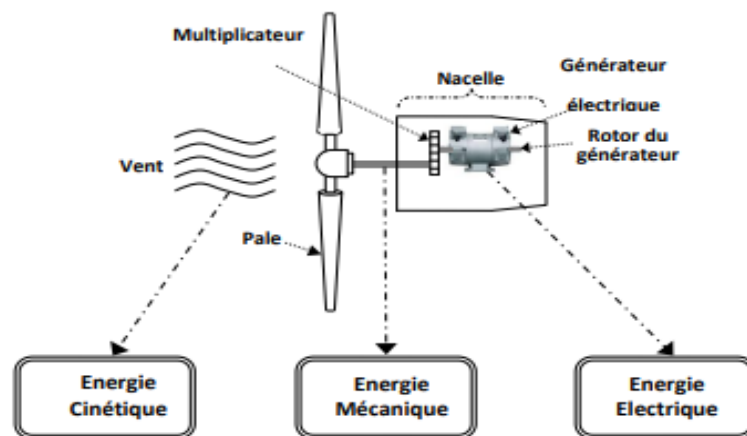


Figure 1. 2 Conversion de l'énergie cinétique du vent. [10]

### 1.3.2 Architecture d'une éolienne :

Une éolienne se compose essentiellement des éléments ci-après figure (1.3).

- **La tour (mât)**

Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

Il est de conception différente selon les dimensions de l'éolienne et selon l'impact souhaité sur le paysage. On rencontre les structures de mâts représentés dans la figure (1.3). [11]

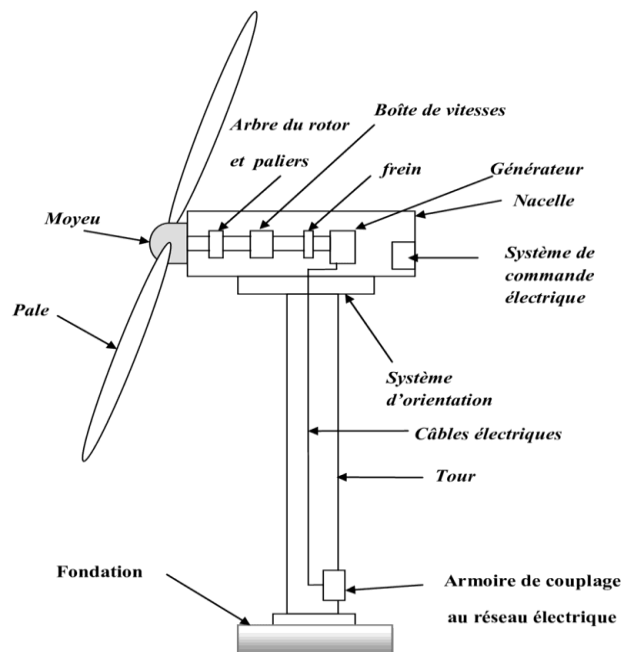


Figure 1. 3 Composants d'une turbine éolienne. [12]

- **Le rotor**

Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de plusieurs pales (en général trois) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute. Il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique...). [11]

- **La nacelle**

Montée au sommet de la tour : composée d'un carter ou bâti qui enveloppe, protège et relie entre elles l'ensemble des éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur.

- **Le moyeu**

Un moyeu qui supporte les pales. Lorsqu'elles sont à pas variable, il comporte un mécanisme permettant de faire varier l'angle d'attaque simultanément. On peut également devoir ajuster l'angle des pales fixes, aussi on prévoit toujours une façon de corriger l'installation des pales.

- **Le générateur électrique**

Un générateur électrique permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique qui peut être :

- directement couplé à l'aéromoteur : dans le cas le plus simple, l'hélice est montée directement sur l'axe du générateur électrique (génératrice synchrone) ;

- entraîné par un multiplicateur placé entre l'aéromoteur et le générateur électrique (génératrice asynchrone).

- **Un système d'orientation**

C'est un moteur électrique dans le cas des grandes éoliennes. Il permet à la machine de présenter le rotor au vent quelle que soit sa direction. L'énergie électrique produite est transmise de la partie orientable à la partie fixe de l'aérogénérateur, solidaire du pylône support, par l'intermédiaire d'un dispositif à collecteur associé au pivot ou d'un câble souple qu'il faut détorsader périodiquement.

- **Un arbre**

Dit arbre lent entre le rotor et la boîte de vitesse et arbre rapide entre le multiplicateur et la génératrice. C'est une pièce imposante car elle subit des efforts élevés. Pour les éoliennes sans boîte de vitesse (synchrones), il n'y a qu'un arbre unique.

- **Un gouvernail**

Pour les petites machines, dans le cas où l'hélice de la machine fonctionne "au vent" ou des moteurs associés à une girouette et destinés à maintenir la machine face au vent.

- **Un groupe hydraulique**

Qui permet l'orientation des pales et de la nacelle ainsi que le pilotage des freins aérodynamiques.

- **Un frein à disque**

Placé sur l'arbre rapide permet l'immobilisation du rotor lors de la maintenance et palier à une défaillance éventuelle du frein aérodynamique.

- **Armoire de couplage**

Qui transforme l'énergie produite par l'éolienne pour l'injecter dans le réseau de distribution ou charge.

- **Une girouette et un anémomètre**

Situés sur la nacelle fournissent les informations nécessaires pour orienter correctement l'éolienne de façon automatique. [13]

### ***1.3.3 Les différents types d'éoliennes :***

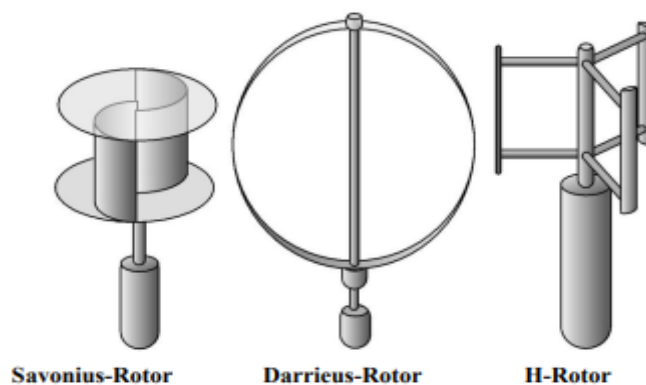
Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux grandes familles d'éoliennes existent : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

**a. Turbines éoliennes à axe vertical (VAWT) :**

Ce type d'éolienne se distingue par un axe de rotation vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol, ce qui rend la maintenance du système plus simple et donc économique [06], néanmoins cette solution impose que l'éolienne fonctionne avec un vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief.

De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

La figure (1.4) montre trois modèles d'éoliennes à axe vertical.



**Figure 1. 4 Exemples de turbines éoliennes à axe vertical. [10]**

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal.

**b. Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) :**

C'est de loin la structure la plus répandue de par sa faible emprise au sol et son efficacité énergétique.

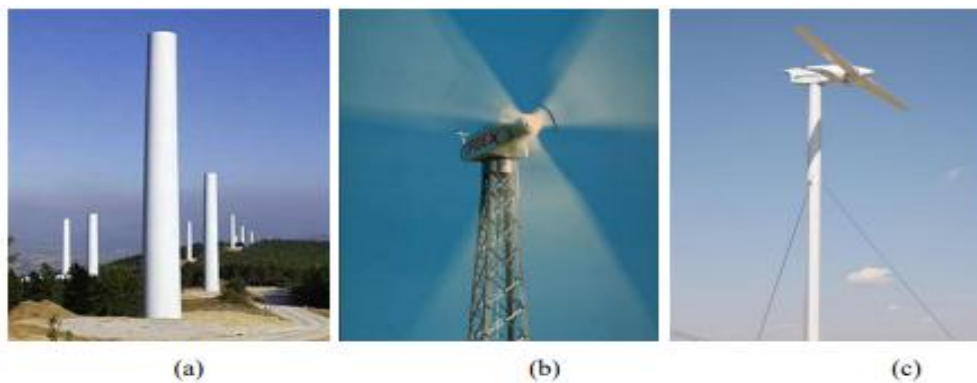
Ces éoliennes sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiques à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. 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. [14]

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

La figure (1.5) modèles de mâts d'éoliennes à axe horizontal.



**Figure 1. 5 Modèles de mâts d'éoliennes à axe horizontal ; a) Mât autoporteur, b) Mât en treillis, c) Mât haubané. [15]**

#### ***1.3.4 Système de régulation et de protection de l'éolienne :***

C'est un élément essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques.

La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même.

On appelle « vitesse de régulation » la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé. [16]

- **Système de freinage manuel :**

C'est le moyen le plus simple pour éviter la destruction d'une machine, lorsque le vent atteint une certaine vitesse, un opérateur immobilise l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée de plusieurs manières :

- à l'aide d'un frein ;
- en changeant l'orientation de l'hélice : l'hélice est placée parallèlement au vent ;
- en modifiant le calage des pales afin d'obtenir un couple moteur nul. [17]

**1.3.5 Conversion électrique d'énergie éolienne :**

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure.

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Mais elles présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. [18]

**1.3.5.1 Machines synchrones à aimants permanents :**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles. [18]



La figure (1.6) montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique. [19]



Figure 1. 6 Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu. [19]

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation. [19]

#### 1.4 Modélisation de la chaîne éolienne :

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à axe horizontal couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur, est représenté en figure (1.7).

La modélisation de ces différents organes va être examinée dans ce qui suit.

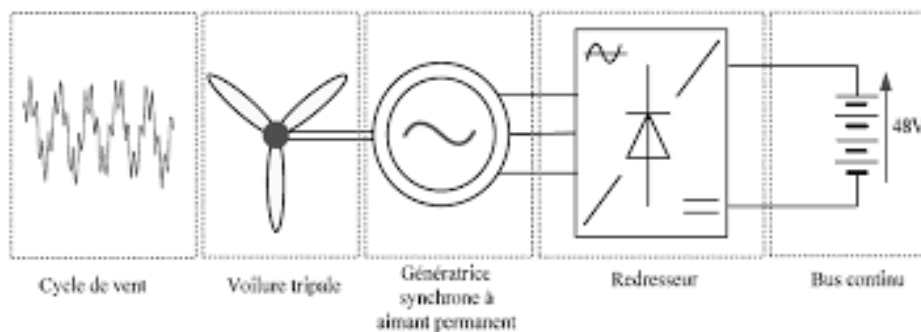


Figure 1. 7 Chaîne de conversion éolienne. [20]

**1.4.1 Modèle du vent :**

**1.4.1.1 Correction de la vitesse de vent avec l'altitude :**

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol. Nous avons donc converti les vitesses de vent à  $h_0$  en vitesses de vent à la hauteur de moyeu  $h$  par la relation de Justus : [21]

$$V_h = V_{h_0} \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \tag{1.1}$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de correction souvent considéré comme étant égal à 0,15. Sa valeur dépend de la nature du terrain. Les valeurs habituelles sont montrées dans le Tableau 1. [21].

**Tableau 1 Valeurs du coefficient de correction : [21]**

Nature de terrain	$\alpha$
Surface de l'eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Cultures agricoles	0.2
Végétation avec peu d'arbres	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain accidenté, montagneux	0.25

La vitesse ainsi corrigée est utilisée dans les calculs.

**1.4.1.2 Distribution de Weibull :**

Il existe plusieurs méthodes de représentation et d'analyse pour quantifier le potentiel éolien d'un site. Ces distributions sont généralement approximées par des lois, notamment la fonction de distribution de Weibull. [21]

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{1.2}$$

**1.4.2 Modèle de la turbine :**

**1.4.2.1 Puissance récupérable par une turbine :**

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , Voir figure (1.8) s'écrit : [22]

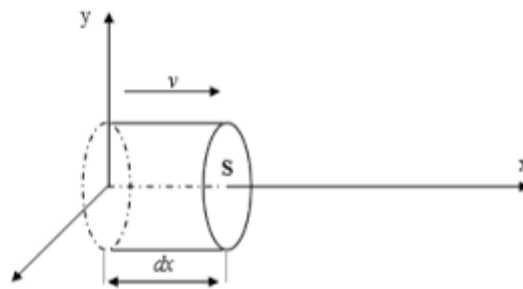


Figure 1. 8 Colonne d'air animée d'une vitesse V [23].

La puissance  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. On a  $dx = v dt$ , on déduit l'expression de  $P_v$  :

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.3)$$

$\rho$  : Densité volumique de l'air (Kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : Vitesse instantanée du vent (m/s)

$E_c$  : Energie cinétique du vent (Joules).

Vitesse normalisée

On définit la vitesse normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine.  $R_t$  sur la vitesse instantanée de vent Voir Figure (1.9) et donné par l'expression suivante [22] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (1.4)$$

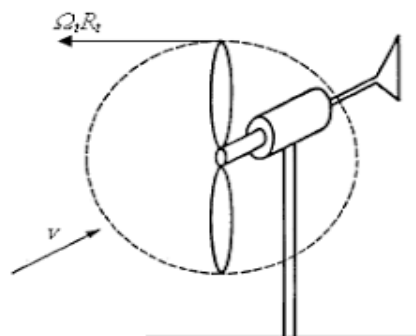


Figure 1. 9 Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage  $\Omega_t .R_t$ . [23]

$V$  : Vitesse de vent (m/s).

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

$R_t$  : Rayon de la surface balayée(m).

## 1.5 Modélisation des convertisseurs :

Les sources renouvelables tels que les panneaux PV, et les éoliennes génèrent une tension non régulée. Cependant, la majorité des charges fonctionnent avec une tension constante imposée. Ainsi, pour rendre possible la connexion entre les sources et la charge, des convertisseurs de puissance continu- continu (DC-DC) et alternatif-continu (AC-DC) sont utilisés. Le principe de fonctionnement des convertisseurs de puissances fréquemment associées avec les sources renouvelables est illustré ci-dessous.

### 1.5.1 Convertisseur DC-DC buck :

Ce type de convertisseurs est utilisé pour abaisser la tension de la source d'un niveau élevé à une valeur basse. Le schéma de la puissance d'un convertisseur buck est illustré sur la Figure (1.10).

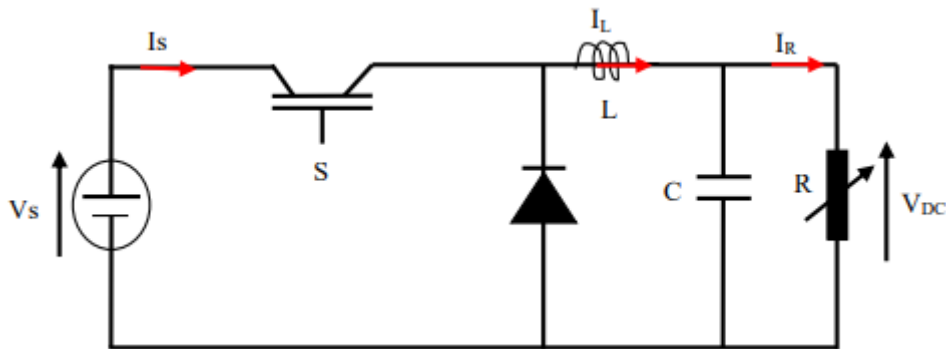


Figure 1. 10 Montage d'un convertisseur buck. [24]

Il consiste d'un interrupteur de puissance (S), une diode (D) et un filtre passe bas sous forme d'une inductance (L) connectée en parallèle avec un condensateur (C). Lorsque l'interrupteur S est fermé, la source alimente la charge et le condensateur au même temps. Mais, quand S est ouvert, le condensateur, dans ce cas, alimente la charge.

- Cas de S fermé (où S=1) Les équations de courant et tension peuvent être écrits comme suit :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ I_L - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.5)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_S - V_{DC}] \quad (1.6)$$

- Cas de S ouvert (où S=0)

Les équations deviennent comme suit :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ I_L - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.7)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [0 - V_{DC}] \quad (1.8)$$

Si nous incluons le facteur  $u$  (i.e, l'état d'interrupteur) dans le système, les équations générales qui régissent le convertisseur sont deviennent :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ I_L - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.9)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [u \times V_s - V_{DC}] \quad (1.10)$$

Où,  $u$  est un facteur indempnitaire qui définit l'état de l'interrupteur fermé ( $u=1$ ) ou ouvert ( $u=0$ ).

### 1.5.2 Convertisseur DC-DC boost :

Dans le cas où la tension de la source est inférieure à celle de la demande, le convertisseur boost est appliqué pour élever le niveau de tension de sortie à une valeur désirée.

La figure (1.11) représente le schéma du principe de d'un convertisseur boost. Il contient les mêmes éléments (i.e., switch, diode, L et C), mais la configuration est différente. [24]

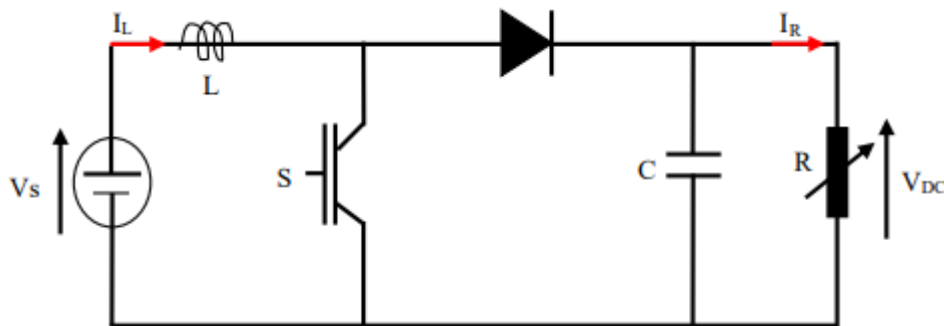


Figure 1. 11 Montage d'un convertisseur boost. [24]

- Cas de S fermé (où  $S=1$ )

Lors, S est fermé, le convertisseur boost peut être représenté par les équations suivantes :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ 0 - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.11)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_s - 0] \quad (1.12)$$

Cas de S ouvert (où  $S=0$ )

De la même manière, quand S est ouvert, les équations deviennent :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ I_L - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.13)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_s - V_{DC}] \quad (1.14)$$

Quand  $u$  est inclus, le comportement du convertisseur « Boost » est décrit par le système d'équations suivant :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ (1-u) \times I_L - \frac{V_{DC}}{R} \right] \quad (1.15)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_s - (1-u) \times V_{DC}] \quad (1.16)$$

De plus, il est important de noter que les valeurs de  $L$  et  $C$  des convertisseurs Boost/Buck doivent être proprement dimensionnés par le concepteur. Ainsi, le tableau résume les principales formules adoptées pour dimensionner la valeur de  $L$  et  $C$ .

**Tableau 1. 1 Formules de dimensionnement des valeurs de  $L$  et  $C$  des convertisseurs DC-DC [24]**

	Buck	Boost
<b>L</b>	$L \geq V_{DC} \times (1-d) / (f \times \Delta I_R)$	$L \geq V_s \times d / (f \times \Delta I_R)$
<b>C</b>	$C \geq V_{DC} \times (1-d) / (8 \times L \times f^2 \times \Delta V_{DC})$	$C \geq V_{DC} \times d / (R \times f \times \Delta V_{DC})$

Avec :

$V_{DC}$ : Tension de sortie du convertisseur

(V).  $f$  : Fréquence du hachage (Hz).

$I_R$  : Le courant nominal de la charge (A).

$\Delta I_R$ : Ondulation du courant (A), dans notre cas ( $\Delta I_R(\%) = 5\% I_R$ ).

$\Delta V_{DC}$ : Ondulation de tension aux bornes de la charge ( $\Delta V_{DC}(\%) = 5\% V_{DC}$ ).

$D$  : Rapport cyclique de convertisseur limité entre 0 et 1.

## 1.6 Système de stockage :

Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie, elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique. [25]

### 1.6.1 Principe de fonctionnement :

Elle est fonctionnée sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, on efface la source de tension on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes ; le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. PAC (la pile à combustible) est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions. [26]

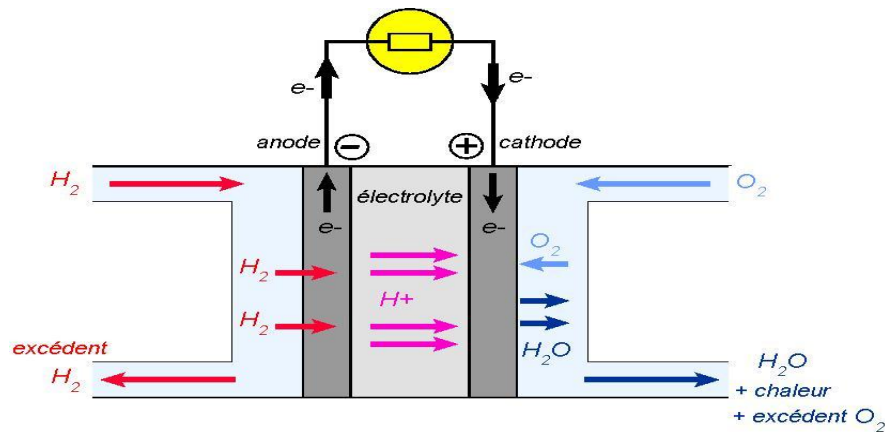


Figure 1. 12 Schéma de principe d'une pile à combustible [27]

### 1.6.2 Les différents types de la pile à combustible :

#### 1.6.2.1 La pile à membrane polymère (PEMFC) :

La PEMFC est un type de pile à combustible avec une température de fonctionnement dans la gamme de 50° à 100°C. Le fonctionnement à basse température délivre une densité de courant et de puissance élevée. Cela permet à la cellule d'avoir un design compact, poids léger et temps de réponse rapide par rapport aux autres piles à combustible. [28]

Comme son nom l'indique, ce type utilise un électrolyte en membrane échangeuse de protons solide. La membrane conductrice des protons est une composante importante de la pile à combustible. L'utilisation d'un électrolyte solide a ses avantages. L'imperméabilité des gaz d'anode et de cathode devient plus facile, ce qui rend la fabrication de ce genre très économique. Contrairement aux électrolytes liquides, les électrolytes solides sont moins susceptibles à la corrosion qui permet au système d'avoir une durée de vie plus longue.

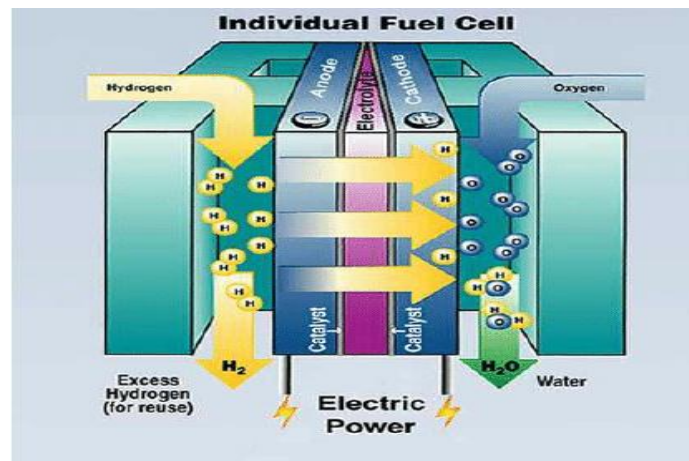


Figure 1. 13 Working principles of PEMFC [28]

### Pile alcaline (AFC) :

Les piles alcalines sont des piles à combustible à basse température, les premiers prototypes ont été utilisés dans les missions spatiales Apollo [29]. La AFC utilise l'hydroxyde de potassium en tant qu'électrolyte et platine-cobalt, Platine-Palladium comme alliages des électrodes. L'hydroxyde de potassium a pour rôle d'accélérer la réduction de l'oxygène. La pile alcaline doit fonctionner avec un gaz pur, et de faibles concentrations de dioxyde de carbone, ce qui représente une contrainte d'exploitation majeur. [30]

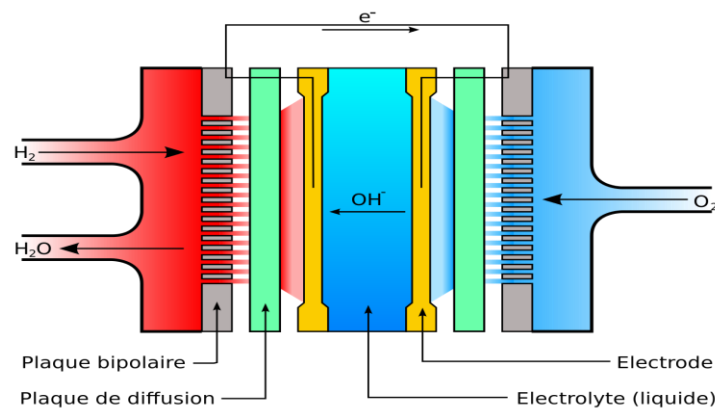


Figure 1. 14 Schéma d'une pile à combustible AFC. [31]

### 1.6.2.2 Pile à acide phosphorique (PAFC) :

La pile à combustible en acide phosphorique est une pile à basse température dans une gamme de 150 à 200 °C. Principalement utilisée dans les centrales électriques fixes. La PAFC est parmi les premiers FC commercialisé dans le monde avec une capacité installée de 75 MW [32]. Ces piles sont attendus à trouver une position dans le marché des applications d'environ 1 MW car ils sont très fiable et peuvent être utilisées pour la cogénération [33]. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW. L'électrolyte de ce type est l'acide phosphorique sous forme liquide. La forte concentration



en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone [30].

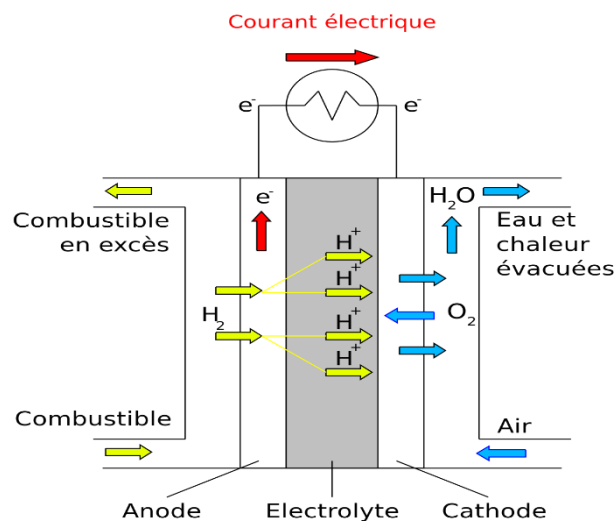


Figure 1. 15 Schéma d'une pile à combustible à acide phosphorique [34]

Ce type est dérivé de la pile à membrane électrolytique en polymère, et sont généralement utilisés pour de petites applications portables ayant une faible température d'exploitation. Le méthanol est directement introduit dans l'anode dans ces piles à combustible. Ceci élimine le besoin pour un reformeur pour convertir le combustible à hydrogène. Cela rend le DMFC une pile très prometteuse pour les sources d'énergie portables, les véhicules électriques et les applications de transport [35], son fonctionnement est similaire à celle de la PEMFC.

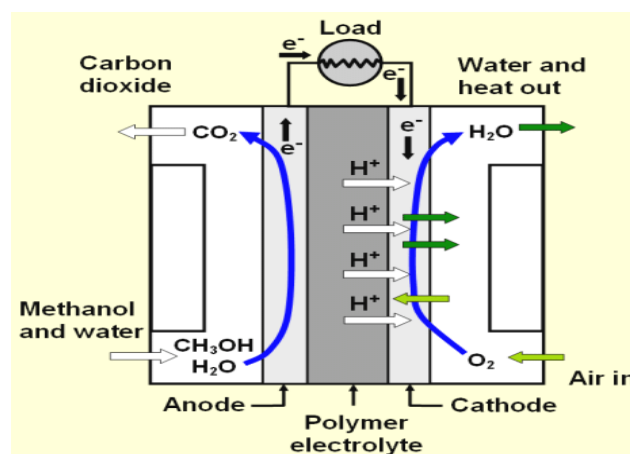


Figure 1. 16 Chemical reactions of direct methanol fuel cell (DMFC). [36]

### 1.6.2.3 Pile à oxyde solide (SOFC) :

La SOFC possède une caractéristique lui permettant de fonctionner dans les hautes températures, ce qui rend ce type de pile convenable pour l'application centralisée et pour la cogénération pour des gammes de 1kW jusqu'à 3-4 MW. Une SOFC est constituée de quatre

couches superposées avec une épaisseur très fine de quelques millimètres et une très haute température (600-1000°C). Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme de dissociation de l'oxygène à la cathode en O<sub>2</sub>, puis le cation migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température (800°C) et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer des électrons. La haute température des piles SOFC présente un double avantage, elle permet l'utilisation directe d'hydrocarbures de gaz naturel et elle assure d'autre part la fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération avec ou sans turbine à gaz [37].



**Figure 1. 17** Prototypé de pile SOFC réalisé au centre de recherches de Jülich en Allemagne. [38]

### **1.7 Modélisation du dispositif de stockage :**

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur deux modèles : le modèle dit « CIEMAT » relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, et le modèle R-C [39].

- Le modèle R-C :

Le modèle électrique simple de la batterie comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne.

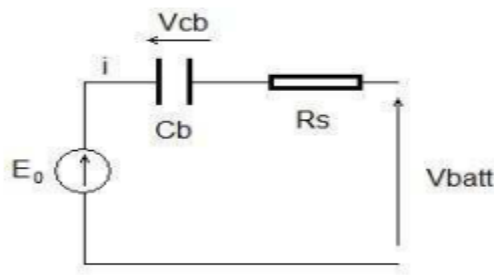


Figure 1. 18 Modèle R-C de la batterie. [40]

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot i - V_{cb} \quad (1.17)$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (1.18)$$

Avec  $C_b$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_b$ .

- Le modèle « CIEMAT » :

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure 1.19) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

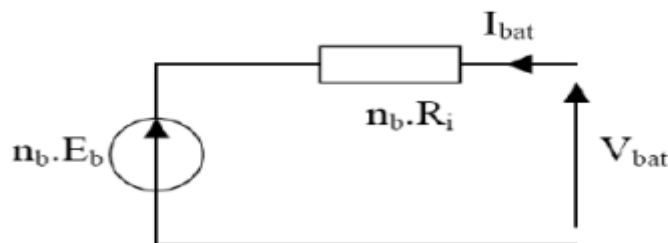


Figure 1. 19 Schéma équivalent de  $nb$  éléments en série. [40]

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène). [39]

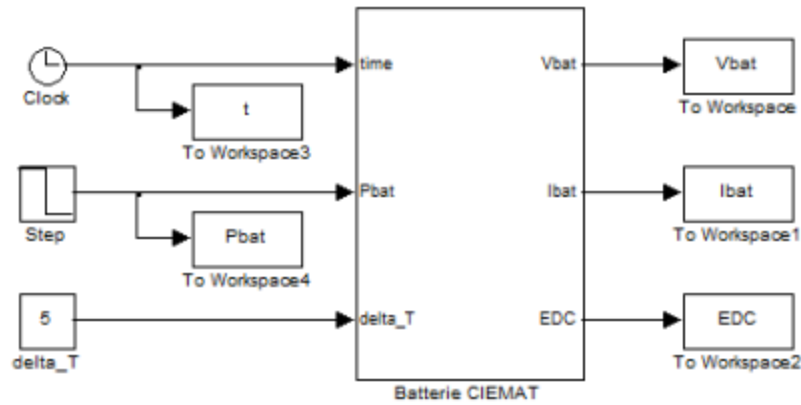


Figure 1. 20 Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink [41].

Les entrées du modèle de la figure(10), sont donc la puissance et l'écart de température par rapport à la température nominale fixée à 25°C. Le calcul de l'état de charge se fait en interne et permet de calculer la tension. La valeur du courant est obtenue à partir de la puissance et de la tension. L'horloge représentée sur la figure (1.20) a juste un rôle dans l'acquisition des données.

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (1.19)$$

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous. L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (1.20)$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale.

L'expression de l'état de charge :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{Q_b} \quad (1.21)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes :

- tension en décharge :

$$V_{bat\_dé} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{(EDC)^{1,5}} + 0,02 \right) \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (1.22)$$

- tension en charge :

$$V_{bat\_ch} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (1.23) [40]$$

## 1.8 Modélisation du redresseur :

### 1.8.1 Etude d'un redresseur monophasé à diode :

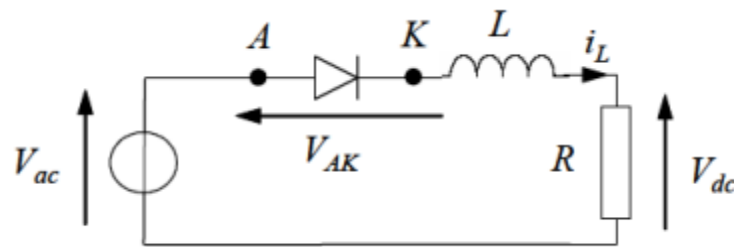


Figure 1. 21 Redresseur monophasé à diode. [42]

- Rappel sur les règles de conduction d'une diode
  - Une diode se met à conduire lorsque la tension anode-cathode devient positive ( $V_{AK} > 0$ ). Lorsqu'elle est conductrice, la tension à ses bornes est nul (cas d'une diode parfaite) ou plus généralement égale à une valeur de seuil  $U_{d0}$  (typiquement comprise entre 0.5 et 1 V). Cette valeur reste toutefois négligeable devant les autres chutes de tension dans le circuit. Le courant dans la diode est alors imposé par le reste du circuit.
  - Une diode se bloque lorsque le courant anode-cathode qui la traverse s'annule ( $i_{AK} = 0$ ). La tension anode-cathode est alors imposée par le reste du circuit.

- Modèle du redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \quad (1.24)$$

Où la tension  $V_L$  aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction  $c$  de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ( $c = 1$ ), on a :

$$V_L = V_{ac} - V_{dc}$$

Et lorsque celle-ci est bloquée ( $c = 0$ ) :

$$V_L = 0$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction  $c$  de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c(V_{ac} - V_{dc})$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance,

$$V_{dc} = R i_L$$

L'équation (1.24) devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c(V_{ac} - Ri_L) dt \quad (1.25)$$

Reste à établir l'état de conduction  $c$  de la diode. A partir des règles élémentaires évoquées précédemment en début de paragraphe, nous pouvons dire que la diode est conductrice ( $c = 1$ ) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \text{ Ou } i_L > 0$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons ( $V_{AK}=V_{AC}-V_{DC}$ ). Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode  $i_L = i_{AK}$  reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédente n'est pas remplie, la diode est bloquée ( $c = 0$ ) [43].

### 1.8.2 Modèle d'un pont de diode

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle. Dans ce cas, les courants de ligne  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu  $I_{dc}$ . Chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période. Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur  $I_{dc}$  lorsqu'une diode devient conductrice. [43]

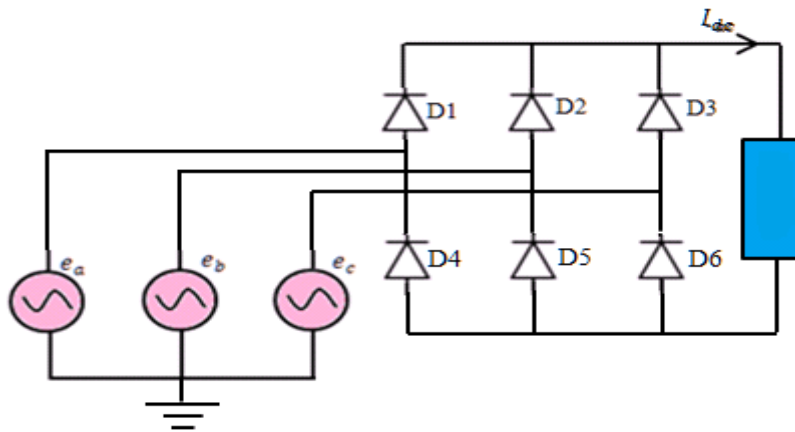


Figure 1. 22 Schéma d'un pont de diodes. [44]

### 1.9 Conclusion :

L'objectif de ce travail est d'étudier un système hybride destiné à alimenter une charge variable dans l'habitat. Il est constitué essentiellement, éolienne, batterie et source réserve DC. Un état de l'art de ces différents éléments a été fait dans ce chapitre afin de comprendre leur fonctionnement. L'étape qui suivra sera le dimensionnement du système à étudier, une étape importante, pour les éléments de l'installation. Puis viendra l'étape de modélisation en vue d'une simulation.

# *Chapitre II*

---

## *Modélisation et* *simulation*

## 2 Chapitre 02 : Modélisation et Simulation

### 2.1 Introduction :

Pour déterminer une stratégie de gestion adéquate et optimisée, il faut connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la simulation.

Le système proposé dans cette étude est un système hybride multi-source avec le système de stockage, il est constitué par : Un générateur éolienne, une batterie et une source réserve.

Dans ce qui suit, nous présentons les modèles électriques de chacun de ces différents éléments du système.

### 2.2 Les données de l'étude :

#### 2.2.1 Les données du vent :

Les données des vitesses du vent du site d'Ouargla sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de vitesses mensuelles moyennes ainsi que des paramètres de Weibull  $k$  et  $c$  mesurés à la hauteur de 10 m du sol.

Le tableau 2.1 représente les caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Ouargla.

Tableau 2. 1: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Ouargla

Latitude	Longitude	Altitude	Rugosité
31.91°	5.4°	141 m	0,01 m

Nous pouvons voir sur la figure 2.1, l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent du site d'Ouargla. On remarque que la vitesse varie en fonction des mois, elle est la plus élevée en Mai avec 4,9 m/s puis viennent les mois d'Avril, Juin et Juillet avec 4.4 m/s, la vitesse du vent entre 2 et 3m/s pendant les mois de Novembre, Décembre et Janvier.

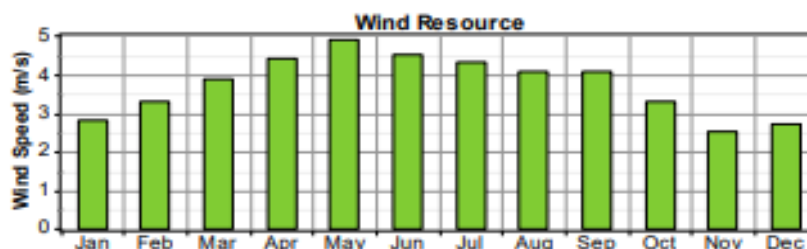
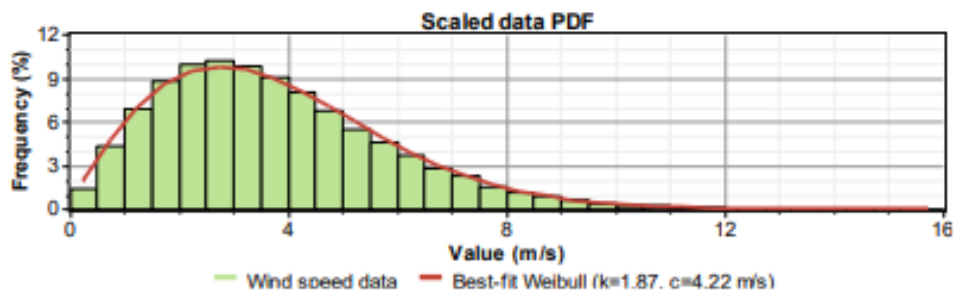


Figure2. 1 Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Ouargla à 10 m du sol.



Une analyse statistique des données horaires des vitesses et leur distribution, la classification des fréquences du vent effectué à l'échelle annuelle pour le site d'Ouargla est représentée sur la figure 2.2 :



**Figure 2. 2 Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Ouargla**

Les valeurs des paramètres de weibull  $k$  et  $c$  ainsi que la vitesse moyenne du vent pour la station D'Ouargla sont données au Tableau 2.2.

**Tableau 2. 2 : Données statistiques de la vitesse du vent**

K	C	$\langle v \rangle$
1.87	4.22 m/s	3.8 m/s

### 2.3 Modèle de simulation :

#### 2.3.1 Composants et simulation d'éléments du système d'énergie :

##### 2.3.1.1 Présentation du système hybride :

Le but de ce travail est de simuler le système d'alimentation éolienne et par batterie. L'électricité produite est utilisée pour fournir de l'électricité à une maison

L'énergie excédentaire est stockée dans la batterie, puis consommée lorsque l'énergie éolienne cesse de couvrir la consommation de charge.

Dans la figure 2.3, nous trouvons un résumé du système hybride étudié

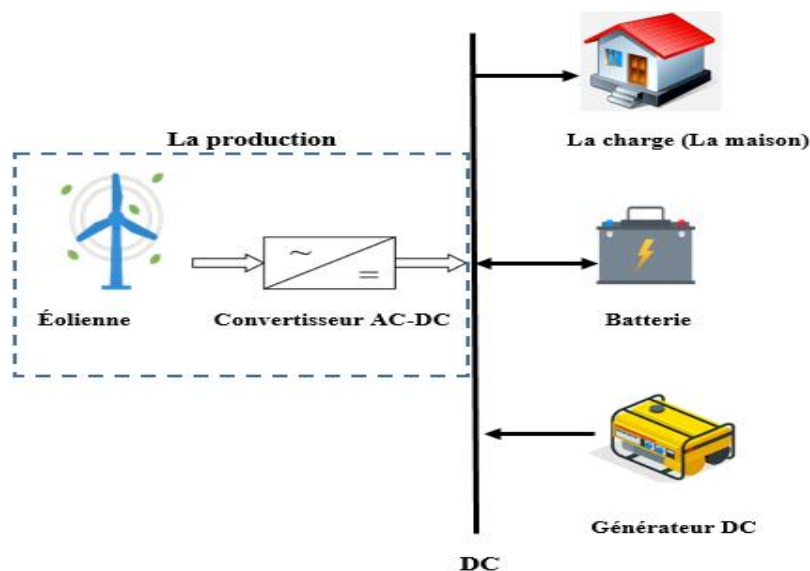


Figure2. 3 Architecture système hybride

### 2.3.1.2 La production :

Notre système de production d'électricité contient une éolienne de 20 kW connectée à un générateur (Permanent Magnet Synchrones Machine) qui produit du courant alternatif triphasé AC. Le courant est converti du courant AC en DC au moyen d'un convertisseur AC-DC composé de 6 diodes (Figure 2.4), et la valeur de la tension (DC) sortant du convertisseur AC-DC est contrôlée par un convertisseur DC-DC boost. Dans le cas où la tension de la source est inférieure à celle de la demande, le convertisseur boost est appliqué pour élever le niveau de tension de sortie à une valeur 48 v.

Le contrôleur MPPT optimise le fonctionnement du système électrique autonome en vérifiant plusieurs fois par jour la tension générée par l'éolienne.

Son but est de trouver le point de sortie maximal du courant que l'éolienne émet. Ensuite, assurez-vous de toujours utiliser cette pleine puissance. En bref, le contrôleur de charge MPPT tire la puissance maximale de la turbine. Cela rend l'installation intelligente.

. C'est donc un moyen d'augmenter les économies d'énergie.

Le convertisseur est contrôlé par IGBT diode commandé par l'MPPT.

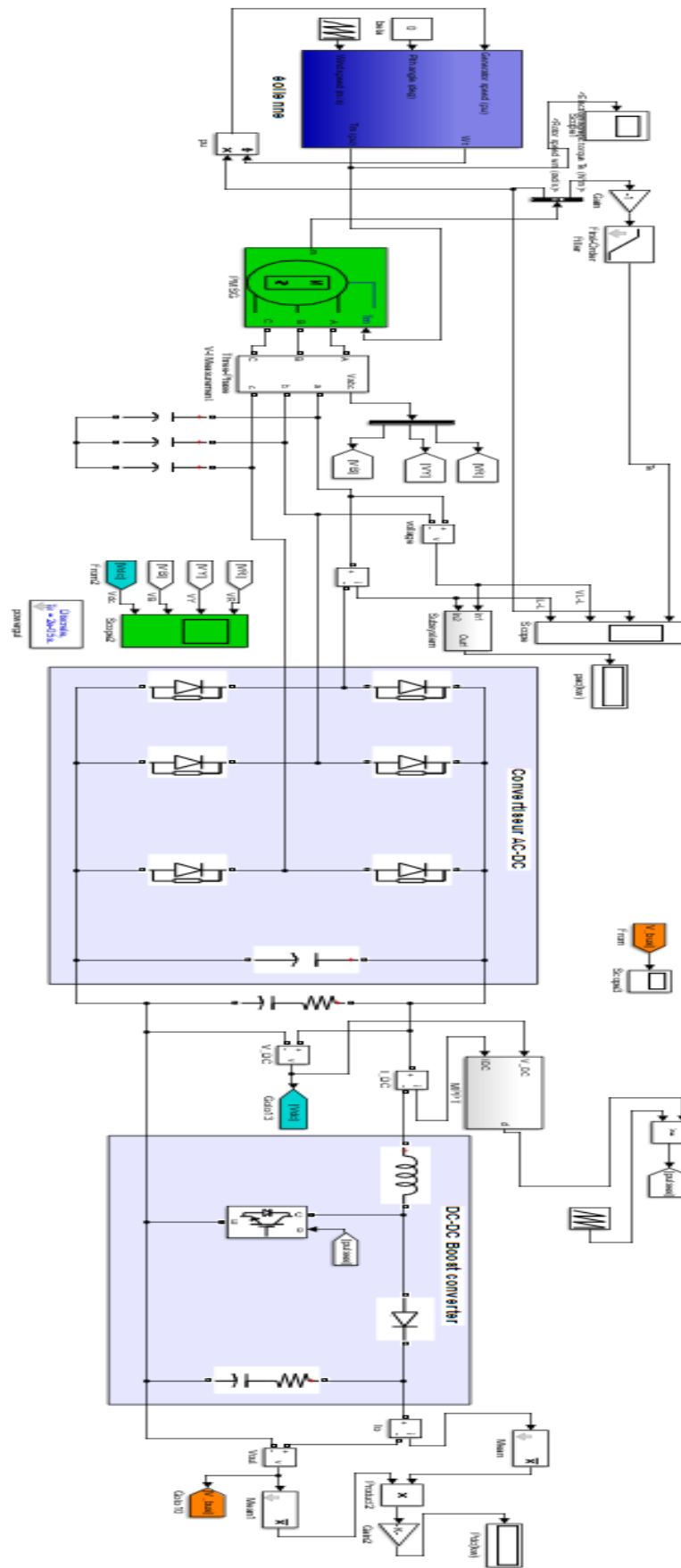


Figure2. 4 Schéma Simulink le système de production

## MPPT

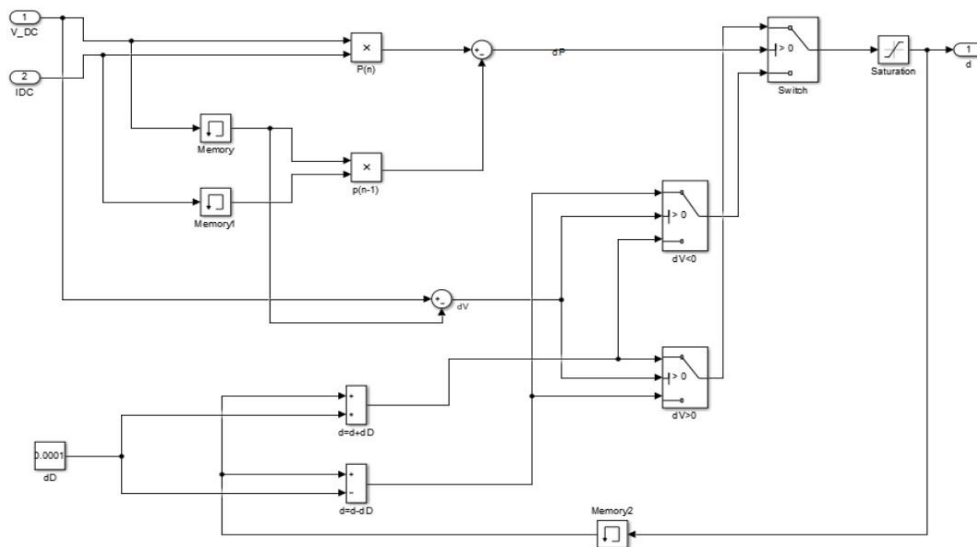


Figure2. 5 Schéma Simulink de l'MPPT

Le régulateur MPPT (poursuite de point de puissance maximal) optimise le fonctionnement d'un système électrique autonome. C'est donc un moyen d'accroître les économies d'énergie.

Voici une liste des avantages que procure ce régulateur de charge éolienne MPPT :

- Protection des batteries contre la surcharge et de la décharge profonde.
- Lutte contre le sur dimensionnement du câblage entre la turbine et l'équipement. Cela fait baisser les coûts.
- Augmentation de la production d'énergie fournie par le système (20 à 30 %).
- Allongement de la durée de vie des batteries.

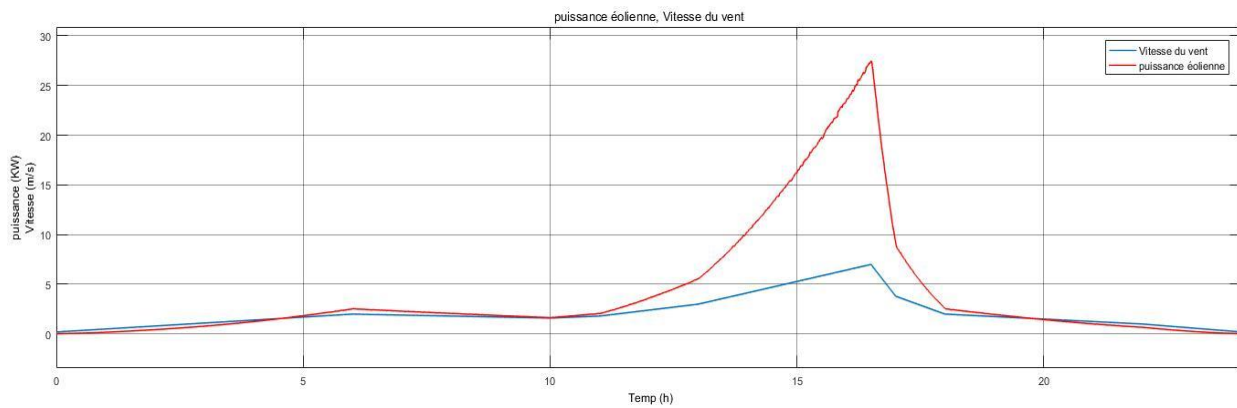
Les entrées de ce système de production est :

- Vitesse du vent m/s
- Angle d'aile
- vitesse du générateur pu

Et les sorties :

- Tension DC
- Courant DC

La figure 2.3 montre le système de production mentionné.



**Figure2. 6 Changements de la vitesse du vent et de la capacité du système de production en termes de temps**

La figure 2.6 représente les changements de capacité du système de production avec les changements de vitesse du vent pendant 24 heures, comme indiqué :

Aux vitesses de 0 m/s à m/s, nous avons enregistré une égalité entre la vitesse du vent et la capacité de production

Quant aux vitesses allant de 2 m/s à la valeur maximale du vent (7 m/s), nous avons enregistré une augmentation significative de la puissance, atteignant la valeur maximale (environ 27 kW).

### 2.3.1.3 Le stockage :

Dans le système de stockage, nous avons une batterie d'une capacité de 40 Ah et d'une tension de 48 V connecté au convertisseur (Charge/décharge) contrôlé par "BATTERY CONTROL"

Faible taux de décharge de la batterie 20% et taux de charge maximal 98%.

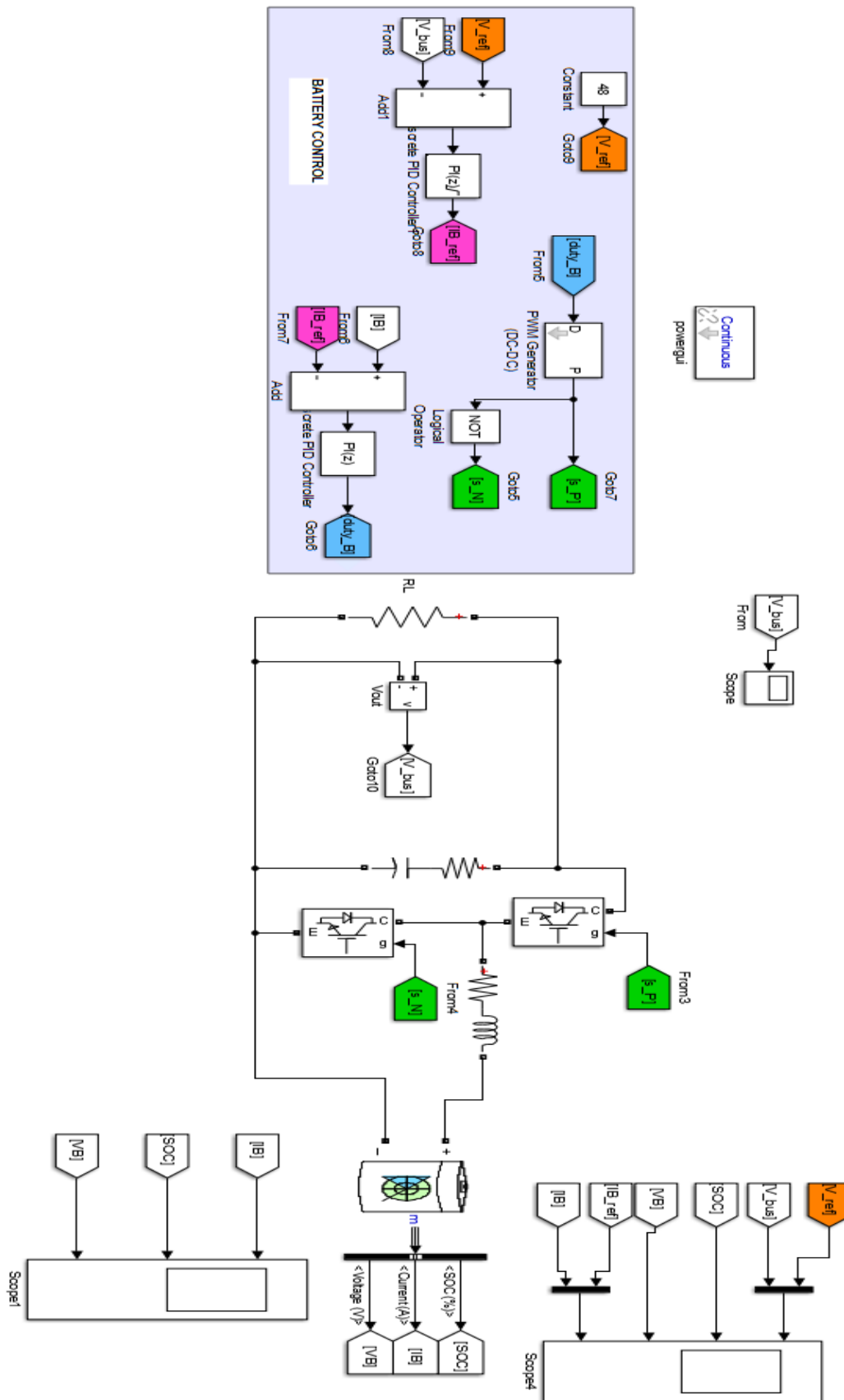
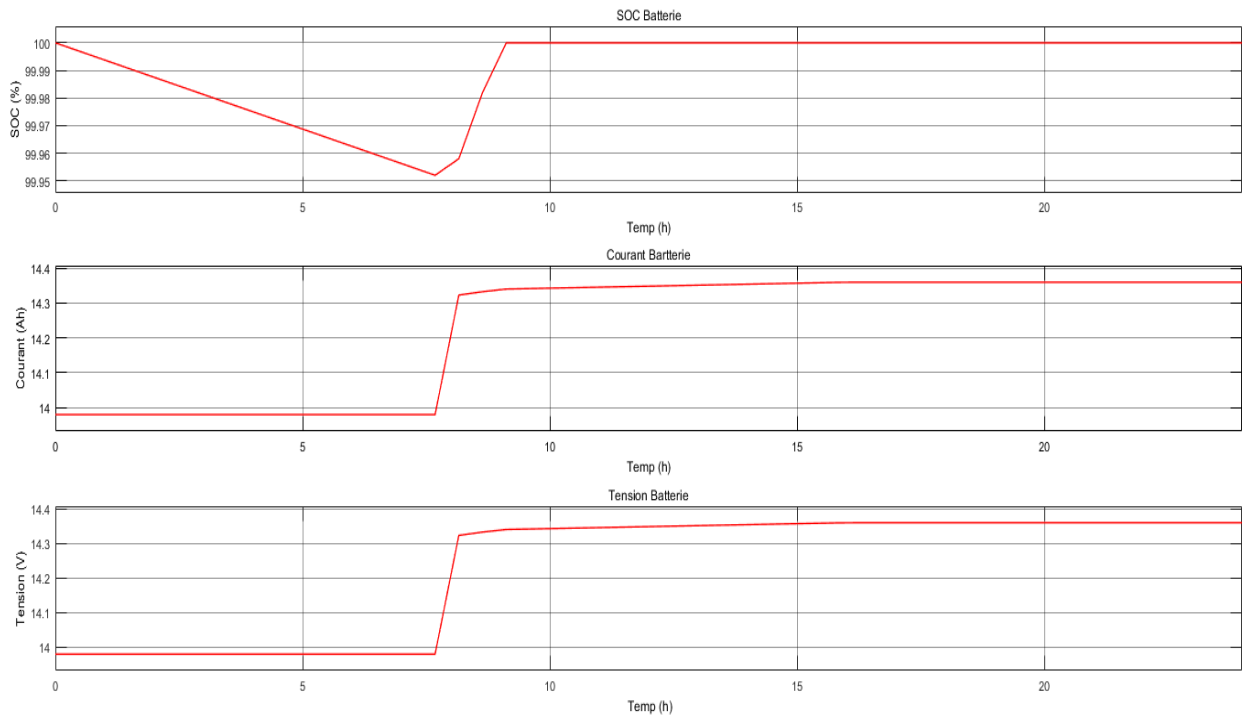


Figure2. 7 Schéma Simulink de la batterie



**Figure2. 8 L'amplitude et le courant et la tension de la batterie**

La figure 2.8 représente les changements dans le rapport de charge de la batterie, l'intensité du courant et la tension dans le décalage temporel pendant la charge / décharge de la batterie, où nous avons observé :

Lors du déchargement (0 à 7 heures) :

Réduction du taux de charge de la batterie à 100 à 99,95% et stabilité de la valeur de la tension et du courant (14 Ah et 14 V)

Lors de la charge (7 à 24h) :

Nous avons observé une augmentation de chacune des trois valeurs à 100% dans le rapport de charge de la batterie, 14,35 Ah et 14,35 V pour le courant et la tension, respectivement.

2.3.1.4 La consommation :

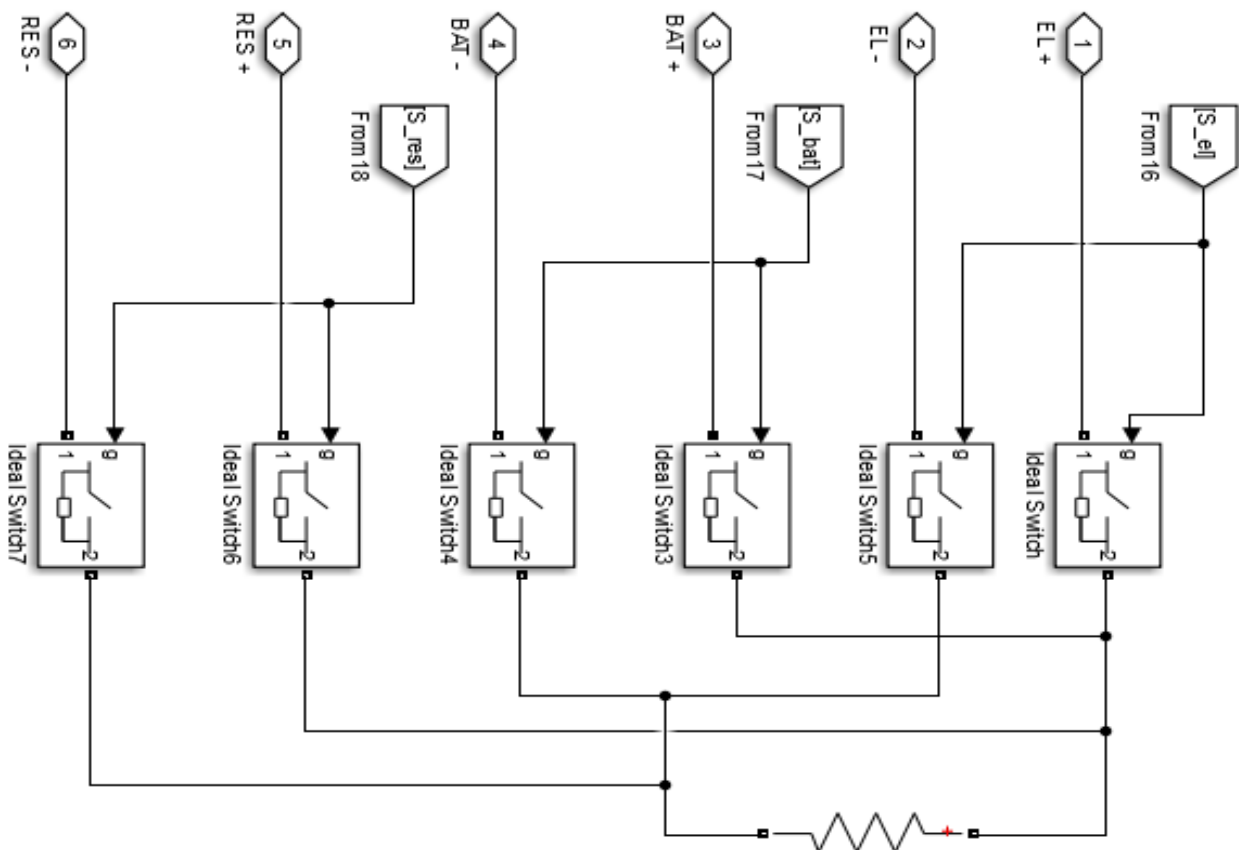
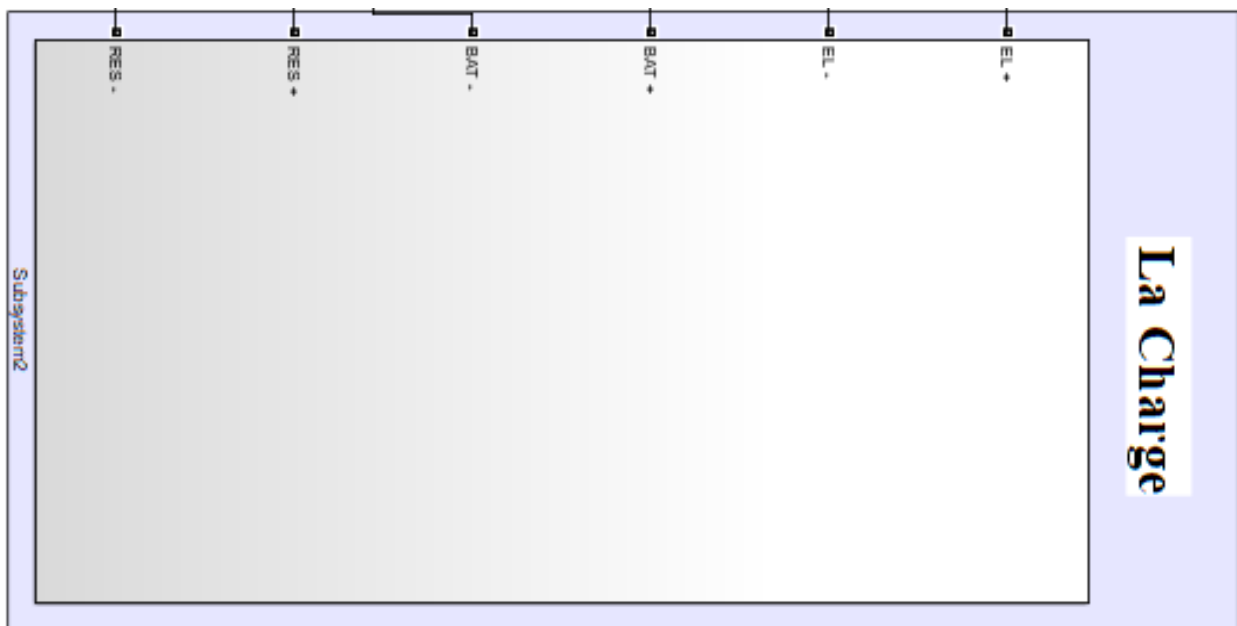


Figure2. 9 Schéma Simulink de la consommation (la charge)

La figure 2.9 représente la consommation dans notre système énergétique, qui porte une puissance changeante basée sur la consommation d'une seule maison fonctionnant en courant continu DC.



Le réseau connecté est un système de contrôle pour le fournisseur d'électricité basé sur les différences de tension.

La consommation est commandé par fonction (la figure 2.10)

```
1 function y = fcn(u)
2 %#codegen
3
4 v_max=48;
5
6 v_el=u(1);
7 v_bat=u(2);
8
9 if v_el>=v_max
10
11     S_el=1;
12     S_bat=0;
13     S_re=0;
14 elseif (v_el<v_max) && (v_bat>=v_max)
15
16     S_el=0;
17     S_bat=1;
18     S_re=0;
19 else %v_el<v_max && v_bat<v_max
20
21     S_el=0;
22     S_bat=0;
23     S_re=1;
24 end
25
26 y = [S_el;S_bat;S_re];
```

Figure2. 10 Fonction MATLAB de commande la consommation

2.3.1.5 Source réserve :

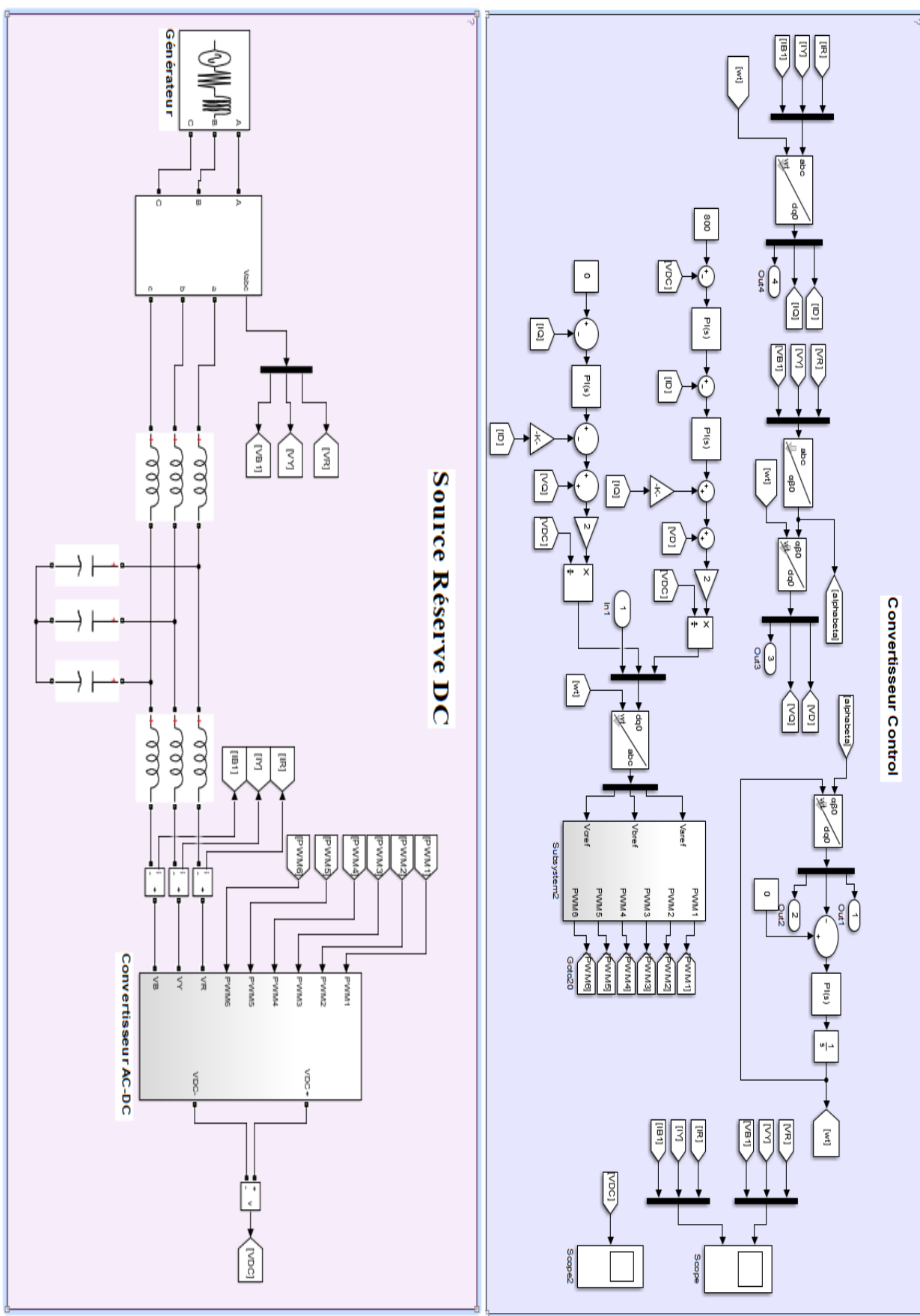
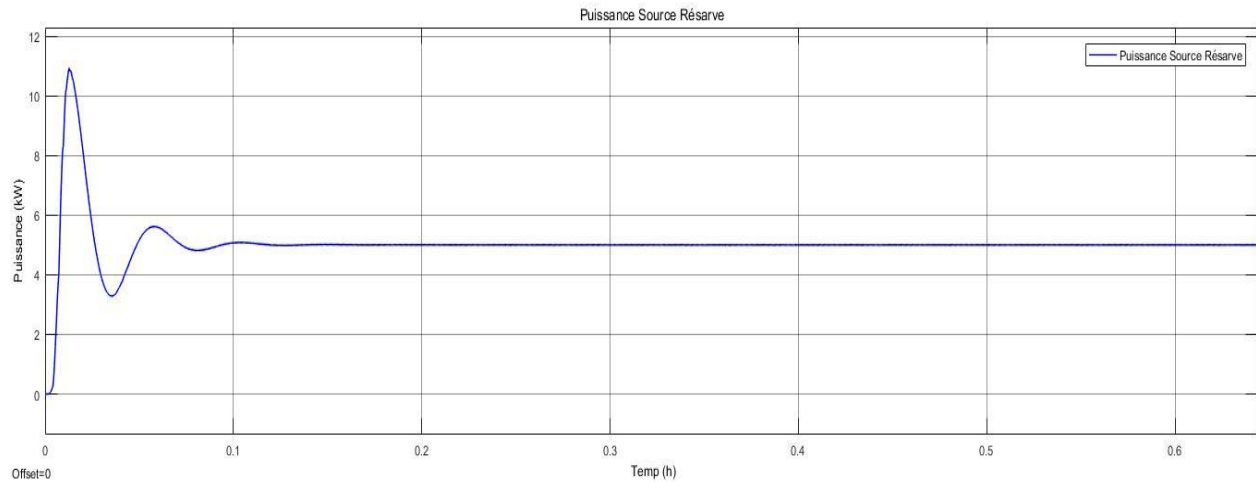


Figure2. 11 Schéma Simulink de la source réserve

La figure 2.11 représente la source de réserve d'énergie dans notre système. Cette source se compose d'un générateur AC triphasé connecté à convertisseur AC-DC MLI (MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion).

Le convertisseur AC-DC MLI nous permet d'entrer la valeur de tension souhaitée.

Cette source produit une capacité stable et stable égale à 5kW.



**Figure2. 12 Changements de la puissance du la source de réserve dans le temps**

### 2.3.2 Simulation de Le système étudié sans source réserve :

Dans cette adresse, nous aborderons la réponse et les performances du système et l'état de la batterie en l'absence de la source réserve.

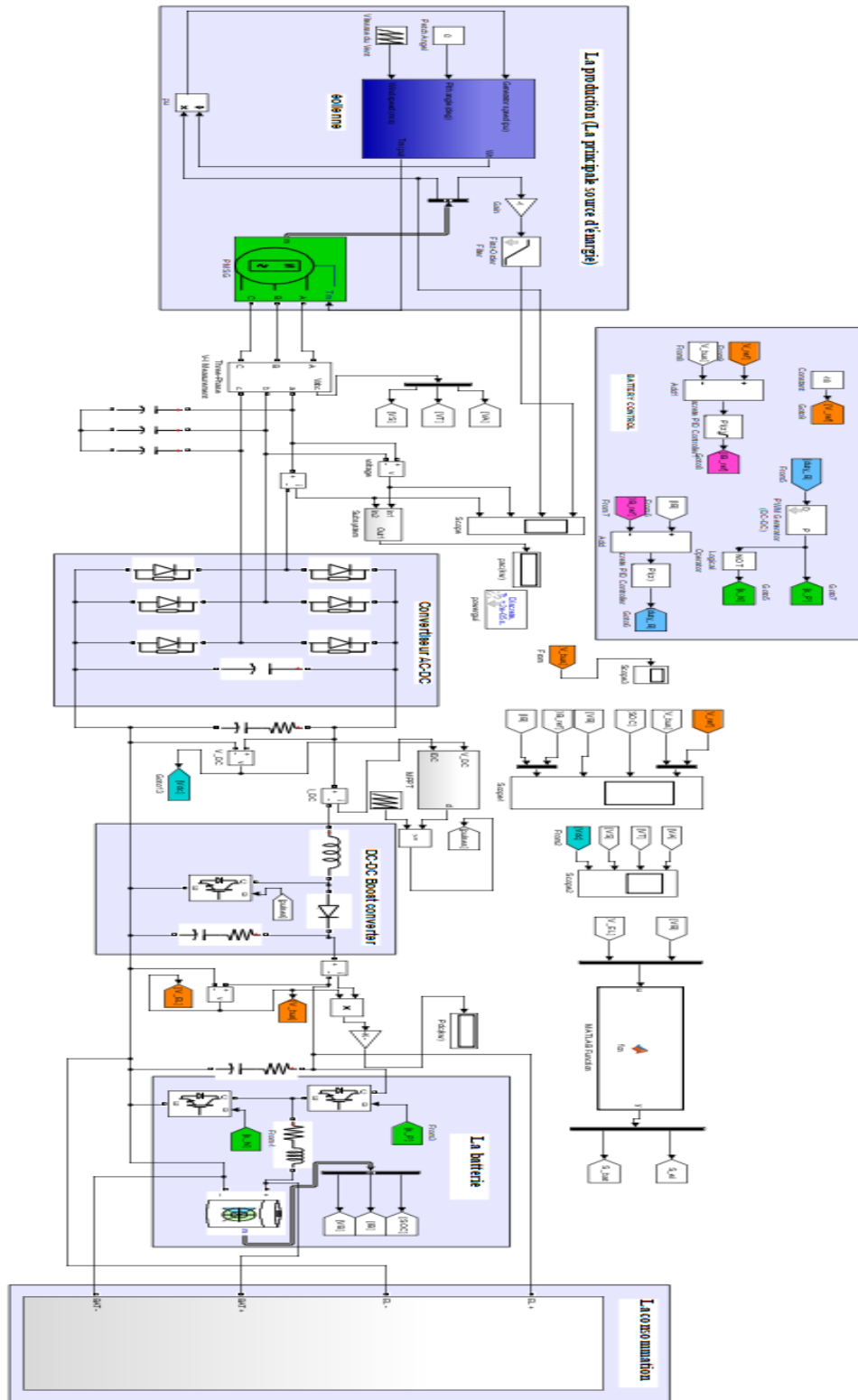


Figure2. 13 Simulation du système d'alimentation des éoliennes avec stockage et consommation sur programme Simulink

Nous avons simulé le système et enregistré les valeurs dès les puissances des éolienne, et la batterie et la consommation a une journée complète (24 heures) pour voir la réponse du système à la lumière des changements de capacité de consommation et la vitesse instable du vent et donc

de la puissance instable de l'éolienne, ainsi que de la mesure de la capacité de la batterie tout en enregistrant les cas de charge/décharge de la batterie.

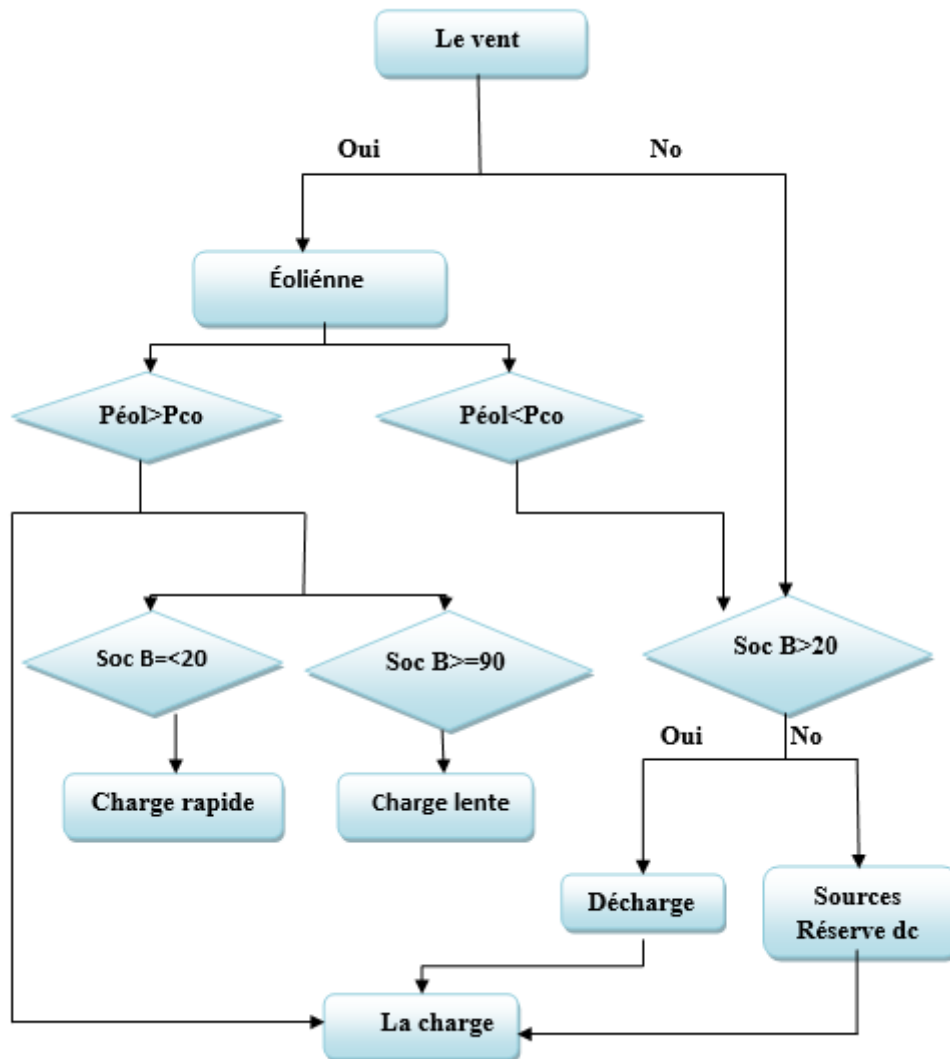


Figure2. 14 Organigramme commande du système

Péol : Puissance éolienne

Pcon : Puissance consommation

Soc B: Soc Batterie

Ré: Réserve

Dans ce schéma, nous expliquons comment l'électricité est distribuée en exploitant l'énergie éolienne.

En cas de vent/absence :

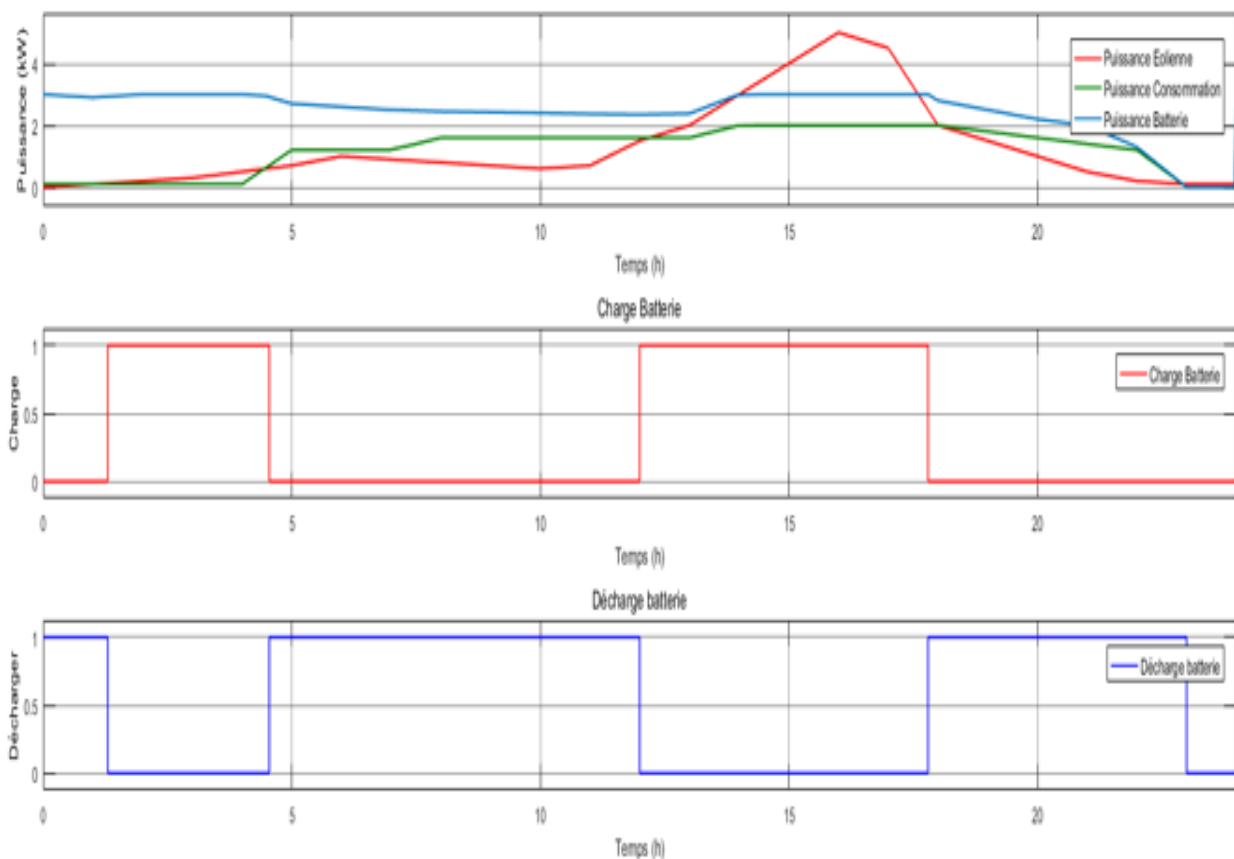
### 1/ En cas de vent

Si la turbine peut être supérieure à la charge, les équipes d'alimentation de la batterie seront stockées pour une utilisation ultérieure lorsque la charge de la batterie atteindra sa valeur maximale (90 < la batterie cessera de se charger).

### 2/ En l'absence de vent

Si la turbine peut être inférieure à la charge, le contrôleur de batterie vérifiera son état si elle est chargée (niveau de batterie < 90).

Les résultats sont ceux de la figure 2.15.



**Figure2. 15 Changements des puissances pour les sources d'alimentation et l'état de la batterie sans source réserve dans le temps**

Nous avons enregistré dans les zones (0 à 2h), (4,5 à 12h) et (18 à 23h) réponses au système lorsque la capacité de consommation a augmenté à la capacité de production de décharge de la batterie et a réduit la capacité en raison de l'incapacité des éoliennes à couvrir la capacité de consommation pendant cette zone de temps.

Et dans les zones (2 à 4,5h) et (12 à 18h) haute capacité de l'éolienne synchronie capacité de batterie élevée et stable et avec l'enregistrement de la charge de la batterie dans ces zones en raison de l'efficacité de l'éolienne et de sa capacité qui a augmenté à la valeur la plus élevée pendant cette période.

Nous avons également enregistré dans la dernière heure de (23 à 24h) le manque de capacité de l'éolienne et de la batterie accompagné d'un manque de décharge et de charge par la batterie en raison de la faible vitesse du vent pour les éoliennes et l'arrivée de la batterie pour sa faible capacité 20%.

### ***2.3.3 Simulation de Le système étudié avec source réserve :***

À cette adresse, nous discuterons de la réponse, des performances et de l'état de la batterie du système en présence de la source de secours.

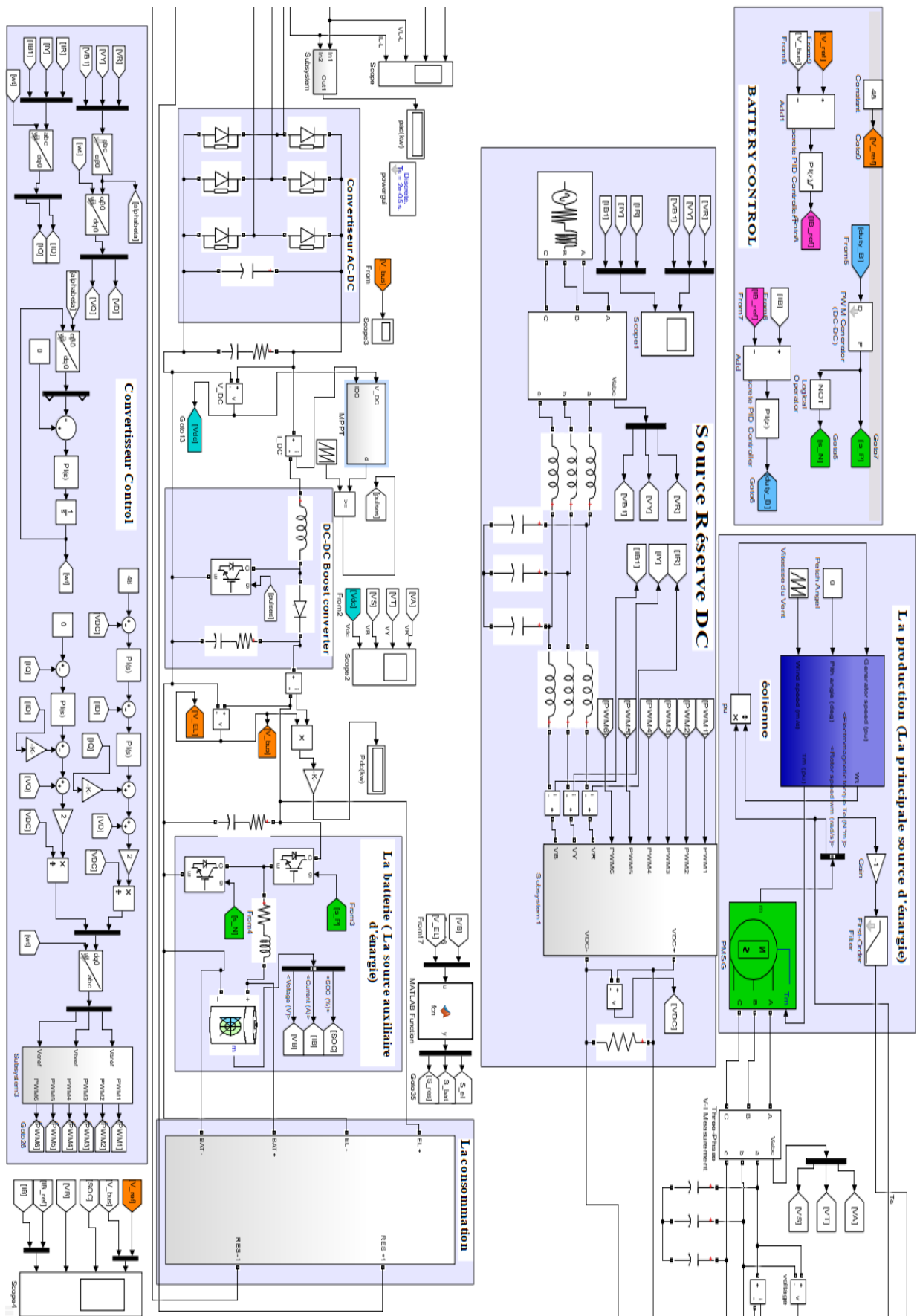
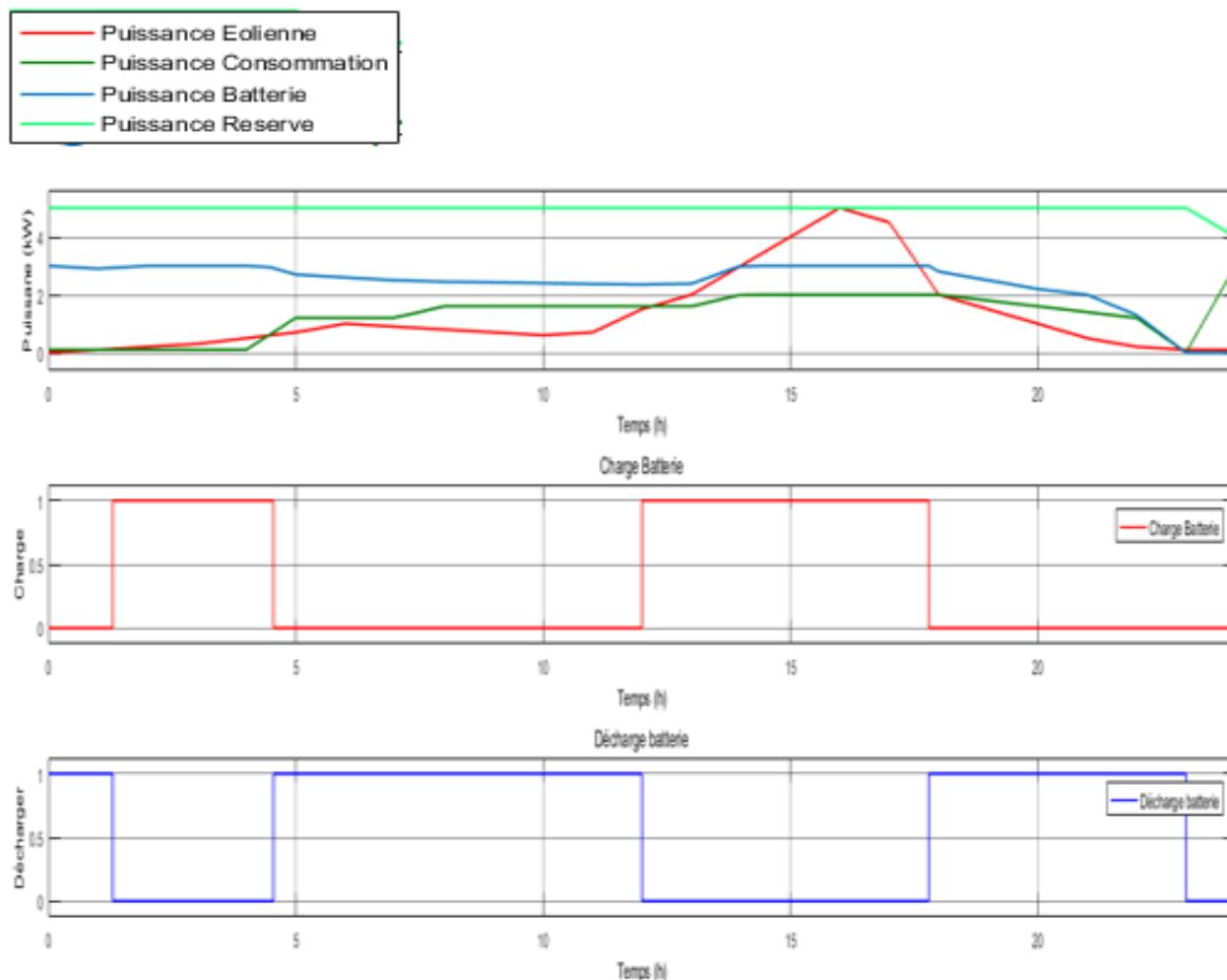


Figure2. 16 Simulation du système d'alimentation des éoliennes avec stockage et consommation et source réserve sur programme Simulink



Nous avons simulé le système et enregistré les valeurs des puissances des éoliennes et la batterie et la consommation et la source réserve a une journée complète (24 heures) pour voir la réponse du système à la lumière des changements de capacité de consommation et la vitesse instable du vent et donc de la puissance instable de l'éolienne ainsi que de la mesure de la capacité de la batterie tout en enregistrant les cas de charge/ décharge de la batterie.

Les résultats sont ceux de la figure 2.17.



**Figure2. 17 Changements des puissances pour les sources d'alimentation et l'état de la batterie avec la source réserve dans le temps**

Dans les zones de temps de (0 à 23h), nous avons enregistré les mêmes changements de système sans la source de réserve avec une stabilité de la valeur de la puissance de la source de réserve, mais sur le terrain de (23 à 24h), nous avons enregistré une légère baisse de la puissance de la source de réserve et une augmentation de la puissance de consommation, tandis que le manque de valeurs de puissance des éoliennes et des turbines à batterie et le manque de décharge et de charge de la batterie sont restés.

La valeur élevée de la puissance de consommation est due à l'intervention de la source de réserve pour répondre au besoin de consommation pour l'inefficacité de l'éolienne et de la batterie.

## **2.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le programme Simulink pour simuler notre système étudié en cas de présence et d'absence d'une source de réserve pour assurer une électricité continue et ininterrompue pour les habitants de l'État de Wargla et nous avons atteint nécessité de la présence de la source de réserve pour couvrir l'absence de vitesses de vent nécessaires pour produire de l'énergie dans l'éolienne et la capacité limitée de la batterie et donner l'efficacité et l'efficacité nécessaire au système d'alimentation.

# *Conclusion générale*

---

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont devenues une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par ces énergies ne cesse d'augmenter. Cependant, parmi les inconvénients de ces énergies demeure la puissance variable et non garantie.

La source d'énergie éolienne ne fournit pas d'énergie stable, en raison des conditions climatiques instables donc nous avons utilisé la batterie pour stocker et utiliser l'électricité excédentaire des éoliennes en cas de besoin.

La batterie contribue à comme solution temporaire pour fournir l'électricité à la charge, assurant une consommation permanente continue

Les résultats de cette étude ont montré que les effets de l'éolien avec batterie sont inefficaces et qu'une source d'alimentation de secours est nécessaire pour couvrir le manque d'énergie éolienne et l'absence d'alimentation par batterie, Ce qui fournit l'efficacité et la capacité requises pour le système

La production d'électricité de système hybride, combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les régions isolées et éloignées des réseaux, en plus de la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride afin d'assurer la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique.

# *Références*

## *Bibliographiques*

---

### Les Références :

- [01] LABBE Julien ; « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolé » thèse de doctorat, école des mines de paris, 2006.
- [02] GERGAUD Olivier, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat, l'école normal de CACHAN, 2002.
- [03] ADEME, « la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », 2010.
- [04] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, disponible sur <https://portail.cder.dz/spip.php?article1573>
- [05] <https://slidetodoc.com/la-situation-nergtique-de-lalgrie-et-ses-ressources/>
- [06] S. Mathew, « Wind Energy : Fundamentals, Resource Analysis and Economics », Springer, Germany, 2006.
- [07] Z. Chen and F. Blaabjerg, « Wind Energy - The World's Fastest Growing Energy Source », IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, 15-18, 2006.
- [08] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de Nantes, France, 2003
- [09] [www.info-eolien.com](http://www.info-eolien.com)
- [10] Production et transport d'énergie. Partie II : Notions de base sur les énergies renouvelables
- [11] <https://www.google.com/amp/s/www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-constituants-dune-eolienne%3famp>
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne\\_fig4\\_330225602](https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne_fig4_330225602)
- [13] <https://eolienne.f4jr.org/aerogenerateur>
- [14] O. De Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine », Ann. Rev. Fluid. Mech, 15, pp. 77-96, 1983. Photo : [https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne\\_fig4\\_330225602](https://www.researchgate.net/figure/Composants-modernes-deolienne_fig4_330225602)
- [15] <https://www.tradeindia.com/products/wind-turbine-tower-4394175.html>

- [16] [https://www.academia.edu/48996442/Projet de Fin d%C3%A9tude](https://www.academia.edu/48996442/Projet_de_Fin_d%C3%A9tude)
- [17] petit éolien LE GUIDE - ERM Energies
- [18] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.
- [19] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre, 2007.
- [20] Lachemat Mohamed & Bouziane Daoud ; « Simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents » Mémoire de Projet de Fin d'Études, Université SAAD DAHLAB de BLIDA
- [21] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables," Thèse, Université Technique de Sofia, Octobre, 2011
- [22] B. Fellah, "Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah," Thèse Magister, Université de Tlemcen, déc 2012.
- [23] KHALFAOUI & Younsse HALA Mostafa : « Contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents autonome » Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [24] Danoune Mohammed Bilal : « Étude d'un système d'énergies renouvelables à base d'hydrogène vert » Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, Université Kasdi Merbah - Ouargla
- [25] CORINNE Alonso, « Contribution A L'optimisation, La Gestion Et Le Traitement De L'énergie » ; université paul sabatier, toulouse III, 2003.
- [26] Cellules électrochimiques produisant du gaz: suivi de l'électrolyse par émission acoustique et effets de la mouillabilité des électrodes sur le flux des charges électriques
- [27] <https://www.maxicours.com/se/cours/piles-a-combustible/>
- [28] <http://outilssolaires.com/glossaire/geometrie-solaire/equateur+a166.html>
- [29] [https://www.researchgate.net/figure/Working-principles-of-PEMFC\\_fig1\\_255989519](https://www.researchgate.net/figure/Working-principles-of-PEMFC_fig1_255989519)
- [30] BILBAO LEARRETA Alain; « REALISATION DE COMMANDES MPPT NUMERIQUES », université de ravira et virgil.
- [31] CID PASTOR Angel; « Conception Et Réalisation De Module Photovoltaïques Electroniques », l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006.
- [32] <https://www.fhf.no/nyheter/nyhetsarkiv/elektrifisering-av-kystfiskeflaaten/>
- [33] <http://www.photovoltaique-energie.fr/1-effet-photovoltaïque.html>
- [34] A. OULD MOHAMED YAHYA, OULD MAHMOUD ET I. YOUM ; « Etude Et Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque », revue des énergies renouvelable vol. 11 N°3 ; 2008.
- [35] <https://www.lemondedelenergie.com/hydrogene-futur-decarbone/2021/09/01/>

[36] NOBUYOSHI Mutoh ; MASAHIRO Ohno ; TAKAYOSHI Inoue « A Method For Mppt Control While Searching For Parameters Corresponding To Weather Conditions For Pv Generation Systems » ; IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, NO.4, 2008

[37] [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-reactions-of-direct-methanol-fuel-cell-DMFC\\_fig1\\_232318194](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-reactions-of-direct-methanol-fuel-cell-DMFC_fig1_232318194)

[38] CHEKIRED Fathya, « Etude Et Implementation D'une Commande Mppt Neuro-Floue Sur Fpga », école national polytechnique, 2008

[39] <https://docplayer.fr/14245971-Les-piles-haute-temperature-sofc.html>

[40] A. T. Singo, “ Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome,” Thèse doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, Fév, 2010.

[41] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur,” Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, France, Déc, 2002.

[42] A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.

[43] [https://www.researchgate.net/figure/Redresseur-triphase-commande-double-alternance\\_fig3\\_303594249](https://www.researchgate.net/figure/Redresseur-triphase-commande-double-alternance_fig3_303594249)

[44] A. Abdelli, “ Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive,” Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre, 2007.

## Résumé :

Au fil des ans, les besoins en électricité ont augmenté, car ils utilisaient des énergies non renouvelables, ce qui a entraîné une pollution de l'environnement avec des dommages aux humains, ce qui a nécessité une énergie renouvelable propre pour l'environnement avec une utilisation efficace.

Les systèmes d'énergie renouvelable hybride se sont avérés être une option prometteuse. Les travaux actuels proposent la mise en place d'un système hybride efficace composé d'éoliennes pour alimenter des charges indépendantes du réseau.

Le premier objectif de cette étude est de connaître les mécanismes et les composants de l'énergie éolienne représentés par les turbines, les dispositifs de stockage tels que les batteries et une source de secours, à savoir la source électrique réserve.

Objectif 2 : Simulation pour améliorer l'énergie éolienne à l'aide de Simulink avec mode de stockage (batterie).

Mots-clés : Énergie éolienne, système hybride, système multi-source

## ملخص :

على مر السنين، ازدادت الحاجة إلى الكهرباء بسبب استخدامهم للطاقة غير المتجددة، مما أدى إلى تلوث البيئة مع الإضرار بالإنسان، الأمر الذي تطلب طاقة متجددة نظيفة للبيئة ذات استخدام فعال.

أثبتت أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة أنها خيار واعد. يقترح العمل الحالي إنشاء نظام هجين فعال يتكون من توربينات الرياح لتزويد الأحمال المستقلة عن الشبكة.

الهدف الأول من هذه الدراسة هو معرفة آليات ومكونات طاقة الرياح المتمثلة في التوربينات وأجهزة التخزين مثل البطاريات ومصدر احتياطي وهو احتياطي شبكة الطاقة.

الهدف 2: محاكاة لتحسين طاقة الرياح باستخدام Simulink مع وضع التخزين (البطارية).

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، النظام الهجين، النظام متعدد المصادر.

## Abstract :

Over the years, the need for electricity has increased because they used non-renewable energy, which led to environmental pollution with harm to humans, which required clean renewable energy for the environment with a effective use.

Hybrid renewable energy systems have proven to be a promising option. Current work proposes the establishment of an efficient hybrid system composed of wind turbines to supply grid-independent loads. The first objective of this study is to know the mechanisms and components of wind energy represented by turbines, storage devices such as batteries and a backup source, namely the power grid reserve. Objective 2: Simulation to improve wind power using matlab with storage mode (battery).

Keywords : Wind energy, hybrid system, multi-source system