

# **REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

# **Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En** : Électrotechnique

## **Spécialité : Réseaux Electriques**

**Par :** ROUANE Houari et ZIANE Abdelkrim

## Sujet

# Modélisation et simulation d'une éolienne munie de système de stockage d'énergie électrique

Soutenue publiquement en **30/09/2024** devant le jury composé de :

<b>Mr. BOUANANE Abdelkrim</b>	MCA	Univ. Saida	Président
<b>Mr. LAOUER Mohammed</b>	Professeur	Univ. Saida	Rapporteur
<b>Mr. BENYAHIA Khaled</b>	MAB	Univ. Saida	Examinateur

Année universitaire 2023/2024

**الملخص:**

الطاقة الريح هي مصدر للطاقة يعتمد على الرياح. تتيح هذه الطاقة إنتاج الكهرباء في توربينات الرياح، والتي تسمى أيضًا مولدات الرياح، باستخدام قوة الرياح. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو نمذجة ومحاكاة توربينات الرياح المجهزة بأنظمة تخزين الطاقة الكهربائية. وستتناول في دراستنا تطور الطاقة المتقدمة في العالم ومبادئ تشغيلها، وبشكل خاص طاقة الرياح ومكوناتها الرئيسية وسلالس تحويلها بالإضافة إلى جوانبها الاقتصادية. سنحاول تقديم لمحة عامة عن مجال توربينات الرياح، متبرعة بالفصول التي تتناول نمذجة الأجزاء المختلفة التي تشكل نظام الرياح الذي يعمل بسرعات متغيرة. سندرس أيضًا للتوربينات، من خلال تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية "قانون BETZ" واستراتيجيات التشغيل المختلفة لتوربينات الرياح وأنظمة تنظيمها. سيتم تقديم سلسلة من عمليات المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink لتسليط الضوء على أداء توربيننا وفقًا لمخططه التخطيطي.

وأخيرًا سوف نقوم بدراسة نظام التخزين الكهروكيميائي باستخدام نماذج بطاريات CIEMAT في جوانبه النظرية والعملية.

**الكلمات المفتاحية :** طاقة الرياح، محاكاة توربينة الرياح، التوربينة، سرعة الرياح، تخزين الطاقة الكهربائية، البطاريات.

**Résumé :**

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Cette énergie permet de produire de l'électricité grâce à des éoliennes, également appelées aérogénérateurs, qui exploitent la force du vent. L'objectif principal de ce mémoire est la modélisation et la simulation d'une éolienne équipée de systèmes de stockage d'énergie électrique. Dans notre étude, nous aborderons le développement de l'énergie renouvelable dans le monde ainsi que les principes de fonctionnement des énergies éoliennes, leurs principaux composants, leurs chaînes de conversion et leurs aspects économiques. Nous fournirons un aperçu général du domaine des éoliennes, suivi de chapitres consacrés à la modélisation des différentes parties d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable. Nous mettrons également l'accent sur la turbine, en examinant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique selon la loi de Betz, ainsi que les différentes stratégies de fonctionnement d'une éolienne et leurs systèmes de régulation. Une série de simulations à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink sera présentée pour mettre en évidence les performances de notre turbine selon son schéma de bloc.

Enfin, nous étudierons le système de stockage électrochimique à l'aide de modèles de batteries CIEMAT, en abordant ses aspects théoriques et pratiques.

**Mots-clés :** énergie éolienne, simulation d'une éolienne, turbine, vitesse du vent, stockage d'énergie électrique, batteries.

**Abstract:**

Wind energy is a source of energy that depends on the wind. This energy makes it possible to produce electricity in wind turbines, also called wind generators by using the force of the wind. The main objective of this thesis is the modeling and simulation of a wind turbine equipped with electrical energy storage systems. In our study, we will discuss the development of renewable energy in the world and their operating principles, including wind energy, their main components and their conversion chains as well as their economic aspects. We will try to give a general overview of the field of wind turbines, followed by chapters that deal with the modeling of the different parts that constitute a wind system operating at variable speed. We will also devote our work to the turbine, by the conversion of kinetic energy of the wind into mechanical energy "BETZ law" and the different operating strategies of a wind turbine and their control systems. A series of simulations by MATLAB / Simulink software will be presented to highlight the performance of our turbine according to its block diagram.

Finally, we will study the electrochemical storage system using CIEMAT battery models in its theoretical and practical aspects.

**Keywords:** Wind energy, wind turbine simulation, turbine, wind speed, electrical energy storage, Batteries.

### Listes des Acronymes et Abréviations

<b>GWEC</b>	Global Wind Energy Council
<b>SCE</b>	Système de Conversion Eolien
<b>CSP</b>	Concentrating Solar Power
<b>EAV</b>	Eoliennes A Axe Vertical
<b>EAH</b>	Eoliennes A Axe Horizontal
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>SoC</b>	State Of Charge
<b>DoD</b>	Dépit of Dis charge
<b>CIEMAT</b>	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
<b>EDC</b>	Etat De Charge
<b>SS</b>	Système De Stockage
<b><i>S</i>éolienne</b>	Surface balayée par éolienne
<b><i>P</i>vent</b>	Puissance de vents
<b><i>p</i></b>	Masse volumique de l'air
<b><i>V<sub>v</sub></i></b>	Vitesse de vent
<b><i>λ<sub>opt</sub></i></b>	Vitesse spécifique optimale
<b><i>c<sub>opt</sub></i></b>	Coefficient de puissance optimal
<b><i>P</i>éolienne</b>	Puissance extraite par l'éolienne
<b><i>c<sub>p</sub></i></b>	Coefficient de puissance
<b><i>R</i></b>	Rayon des pâles de l'éolienne
<b><i>Ω</i></b>	Vitesse de rotation de la turbine
<b><i>λ</i></b>	Vitesse spécifique
<b><i>β</i></b>	Angle de calage (l'angle de l'orientation des pâles)
<b><i>C<sub>g</sub></i></b>	Couple de la génératrice
<b><i>C</i>éolienne</b>	Couple de l'éolienne (aérodynamique)
<b><i>G</i></b>	Rapport de multiplication
<b><i>J</i></b>	Inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice
<b><i>C<sub>em</sub></i></b>	Couple électromagnétique développé par la génératrice
<b><i>C<sub>f</sub></i></b>	Couple résistant dû aux frottements
<b><i>f</i></b>	Coefficient de frottement

---

<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>P<sub>nom</sub></b>	Puissance nominale
<b>C<sub>em-ref</sub></b>	Couple électromagnétique de référence
<b>K<sub>ass</sub></b>	Régulateur de vitesse
<b>Ω<sub>ref</sub></b>	Vitesse de référence
<b>Ω<sub>turbine</sub></b>	Vitesse de rotation de la turbine
<b>Ω<sub>turbine-ref</sub></b>	Vitesse de référence de la turbine
<b>C<sub>pmax</sub></b>	Coefficient de puissance maximale
<b>C<sub>mec</sub></b>	Couple mécanique
<b>C<sub>f</sub></b>	Couple résistant dû aux frottements
<b>C<sub>em-ref</sub></b>	Couple électromagnétique développé par la génératrice
<b>C<sub>aér_est</sub></b>	Couple aérodynamique es time
<b>V<sub>estimé</sub></b>	Valeur estimée de la vitesse du vent
<b>Ω<sub>turbine-estimé</sub></b>	Vitesse estimée de la turbine
<b>V<sub>A,V<sub>B,V<sub>C</sub></sub></sub></b>	Tension aux phases a, b et c
<b>I<sub>A,I<sub>B,I<sub>C</sub></sub></sub></b>	Courant aux phases a, b et c
<b>ψ<sub>A,ψ<sub>B,ψ<sub>C</sub></sub></sub></b>	Flux aux phases a, b et c
<b>R<sub>S</sub></b>	Résistance des phases statoriques
<b>ψ<sub>f</sub></b>	Flux des aimants permanents
<b>U<sub>d</sub></b>	Tension selon l'axe d
<b>U<sub>q</sub></b>	Tension Selon l'axe q
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant selon l'axe d
<b>I<sub>q</sub></b>	Courant selon l'axe q
<b>ψ<sub>d</sub></b>	Flux selon l'axe d
<b>ψ<sub>q</sub></b>	Flux selon l'axe q
<b>ω</b>	Vitesse de rotation électrique $\omega=P \cdot \Omega$
<b>L<sub>d</sub></b>	Inductances statoriques selon l'axe d
<b>L<sub>q</sub></b>	Inductances statoriques selon l'axe q
<b>C<sub>em</sub></b>	Couple électromagnétique
<b>w<sub>e</sub></b>	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique
<b>θ<sub>geo</sub></b>	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)

---

<b>P</b>	Nombre de paires de pôles
<b>C<sub>m</sub></b>	Couple moteur applique sur la génératrice
<b>J</b>	Moment d'inertie total de la machine
<b>f</b>	Coefficient de frottement visqueux
<b>R<sub>ch</sub></b>	Résistance de charge
<b>L<sub>ch</sub></b>	Inductance de charge
<b>S</b>	Operateur dérivé de Laplace
<b>I<sub>ds,I<sub>qs</sub></sub></b>	Composant direct du stator dans le repère Park
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsion

### Liste des figures

#### Chapitre I

- Figure I.1** : Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde en 2008.
- Figure I.2** : Chauffage d'une maison par l'énergie solaire.
- Figure I.3** : Schémas de principe d'une centrale solaire photovoltaïque.
- Figure I.4** : Irradiation globale journalière reçues sur un plan horizontal et normal aux mois de Juillet et Décembre.
- Figure I.5** : Mode d'exploitation des ressources géothermique.
- Figure I.6** : Géothermique haute énergie.
- Figure I.7** : Carte de température des sources thermales.
- Figure I.8** : Schéma de principe d'une usine biomasse.
- Figure I.9** : Schéma de principe d'une centrale hydraulique.
- Figure I.10** : Schéma de principe de l'énergie marémotrice.
- Figure I.11** : Les différents types d'éoliennes.

#### Chapitre II

- FigureII.1** : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005–2015.
- FigureII.2** : Baisse des couts de production des aérogénérateurs terrestres, avec une vitesse moyenne des vents de 6 m/s et un amortissement sur 30 ans (taux d'intérêt : 5 %/an) (données Agence de l'Energie Danoise).
- Figure II.3** : Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), données de 2018.
- Figure II.4** : Carte du potentiel éolien en Algérie.
- FigureII.5** : Conversion de l'énergie cinétique du vent.
- FigureII.6** : Principaux organes du système de conversion éolien.
- FigureII.7** : Différents types d'éoliennes.
- FigureII.8** : Eolienne à axe horizontal.
- FigureII.9** : Configuration à axe horizontal.
- FigureII.10** : Eolienne à axe vertical.
- FigureII.11** : Composants d'une éolienne.
- FigureII.12** : Eléments d'une nacelle.
- FigureII.13** : Principe de la conversion d'énergie.
- Figure II.14** : Principaux constituant d'une éolienne.
- FigureI.15** : Forces appliquées sur un élément de pale.
- Figure II.16** : Tube de courant autour d'une éolienne.
- FigureII.17** : Coefficient de puissance.
- Figure II.18** : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite (normalisée)  $\lambda$  pour Différents types de turbines.
- Figure II-19** : Courbe du Coefficient de Puissance en Fonction de La Vitesse Réduite Pour Différents Angles D'attaque.
- Figure II-20** : Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.
- Figure II-21** : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.
- Figure II-22** : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Hiver et automne, Eté et Printemps).

#### Chapitre III

- Figure III.1** : Simulation du profil de la vitesse du vent.
- Figure III.2** : Turbine tripale ( $R_V=1.25m$ ).
- Figure III.3** : Les courbes de  $C_p(\lambda)$  pour plusieurs valeurs de  $\beta$  (deg).

- Figure III.4** : Caractéristique puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation.  
**Figure III.5** : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.  
**Figure III.6** : MPPT avec asservissement de la vitesse.  
**Figure III.7** : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.  
**Figure III.8** : Simulation du profil de la vitesse du vent.  
**Figure III.9** : Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse.  
**Figure III.10** : Résultat de simulation de la turbine avec asservissement de la vitesse.  
**Figure III.11** : Schéma bloc de la Turbine.

#### **Chapitre IV**

- Figure IV.1** : Description de l'intérieur d'une batterie.  
**Figure IV.2** : Principe d'un accumulateur électrochimique.  
**Figure IV.3** : Fonctionnement d'une batterie.  
**Figure IV.4** : Différents montages possibles des batteries.  
**Figure IV.5** : Schéma équivalent de nb éléments en série.  
**Figure IV.6** : Schéma bloc du modèle batterie.  
**Figure IV.7** : Tension de batterie dans les conditions standards.  
**Figure IV.8** : Courant de batterie dans les conditions standard.  
**Figure IV.9** : Etat de charge (EDC) de la batterie dans les conditions standard.  
**Figure IV.10** : Influence de la température sur la caractéristique tension de batterie.  
**Figure IV.11** : Influence de la température sur la caractéristique de l'EDC de batterie.  
**Figure IV.12** : Influence de la résistance sur la caractéristique tension de batterie.  
**Figure IV.13** : Influence de la résistance sur la caractéristique l'EDC de batterie.  
**Figure IV.14** : Synoptique du système autonome proposé.  
**Figure IV.15** : Illustration d'un redresseur a MLI triphasé de tension.  
**Figure IV.16** : Bus continu situé entre deux convertisseurs statiques.  
**Figure IV.17** : Modèle de simulation d'un système éolien autonome.  
**Figure IV.18** : Différentes caractéristiques du système éolien simulé pour un changement progressif de la vitesse du vent de 16 m/s à 12 m/s.  
**Figure IV.19** : Courant de sortie.  
**Figure IV.20** : Tension de sortie.  
**Figure IV.21** : Puissance de sortie (Pdc) sur la batterie et la charge.  
**Figure IV.22** : Formes d'onde de tension d'un générateur éolien.

#### **Liste des tableaux**

- Tableau I.1** : Tableau comparatif de synthèse des différents types d'énergies renouvelables.  
**Tableau II.1** : Comparaison des éoliennes à Axe Horizontal, et à Axe Vertical.  
**Tableau II.2** : Comparaison Des Eoliennes à vitesse fixe, Et à vitesse variable.  
**Tableau IV.1** : Avantages et inconvénients d'une source d'énergie éolienne.

**REMERCIMENT**

**DIDECA**

**RESUME**

**LISTE DES ACRONYSMES ET ABBREVIATIONS**

**LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX**

**SOMMAIRE**

**INTRODUCTION GENERALE** (1)

**CHAPITRE I : Etat de l'art des énergies renouvelables**

I.2	Introduction	(2)
I.2	Energies renouvelables	(2)
I.2.1	Définition	(2)
I.2.2	Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde	(2)
I.2.3	Les énergies renouvelables en Algérie	(3)
I.3	Principales énergies renouvelables	(3)
I.3.1	L'énergie solaire	(3)
I.3.1.1	Définition	(3)
I.3.1.2	L'énergie solaire en Algérie	(5)
I.3.2	L'énergie géothermique	(6)
I.3.2.1	Définition	(6)
I.3.2.2	L'énergie géothermique en Algérie	(8)
I.3.3	Energie de la biomasse	(9)
I.3.3.1	Définition	(9)
I.3.3.2	L'énergie de la biomasse en Algérie	(10)

I.3.4	Energie hydraulique	(10)
I.3.4.1	Définition	(10)
I.3.4.2	L'énergie hydraulique en Algérie	(12)
I.3.5	Energie des vagues et marémotrice	(12)
I.3.6	Energie éolienne	(13)
I.3.6.1	Définition	(13)
I.4	Etude comparative sur les énergies renouvelables	(13)
I.5	Conclusion	(15)

## **CHAPITRE II: Energie éoliens**

II.1	Introduction	(16)
II.2	Historique des éoliennes	(17)
II.3	Statistique de production de l'éolienne	(18)
II.3.1	Production de l'éolienne dans le monde	(18)
II.3.2	Production de l'éolienne dans l'Algérie	(19)
II.4	Energie éolienne	(19)
II.4.1	Les différents types d'éoliennes	(20)
II.4.2	Les éoliennes se divisent en deux grandes familles	(21)
II.4.2.1	Éoliennes à axe horizontal	(21)
II.4.2.2	Eoliennes à axe vertical	(22)
II.5	Architecture d'une éolienne	(24)
II.5.1	Rotor	(25)
II.5.2	Nacelle	(25)
II.5.2.1	Multiplicateur de vitesse	(25)
II.5.2.2	Générateur	(25)

II.5.2.3	Dispositif d'orientation de la nacelle	(26)
II.5.3	Tour	(26)
II.6	Chaine de conversion de l'énergie éolienne	(26)
II.6.1	Principe de conversion de l'énergie éolienne	(27)
II.6.2	Principaux composants d'une éolienne	(27)
II.7	Caractéristiques technologiques des éoliennes	(28)
II.7.1	Le supportage	(28)
II.7.2	Les pales	(29)
II.7.2.1	Longueur	(29)
II.7.2.2	Largeur	(29)
II.7.2.3	Le profil	(29)
II.7.2.4	Les matériaux	(29)
II.7.3	Bilan des forces sur une pale	(30)
II.7.3.1	Puissance fournie par un aérogénérateur	(31)
II.8	Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne	(35)
II.9	Eoliennes à vitesse fixe et variable	(36)
II.9.1	Eolienne à vitesse fixe	(36)
II.9.2	Eolienne à vitesse variable	(37)
I.10	Définition du vent	(37)
II.11	Types de vent	(38)
II.11.1	Le vent géostrophique	(38)
II.11.2	Les vents locaux	(39)
II.11.3	Les vents de surfaces	(39)
II.12	Caractéristiques du vent	(39)

II.12.1	Variabilité temporelle	(39)
II.12.2	Variabilité spatiale	(39)
II.13	Gisement éolien en Algérie	(39)
II.14	La loi de distribution de Wei bull	(41)
II.15	La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur	(42)
II.16	Conclusion	(43)

### **CHAPITRE III : Modélisation de la turbine éolienne**

III.1	Introduction	(44)
III.2	Modélisation du vent	(44)
III.3	Modélisation de la turbine	(45)
III.4	Modèle du multiplicateur	(48)
III.5	Equation dynamique de l'arbre de transmission	(48)
III.6	Stratégies de commande de la turbine éolienne	(49)
III.7	Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	(51)
III.8	Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	(52)
III.9	Résultats de simulation	(54)
III.9	Conclusion	(57)

### **Chapitre IV : Système de stockage électrique**

IV.1	Introduction	(58)
IV.2	Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie	(59)
IV.3	Caractéristique des batteries	(59)
IV.3.1	Description d'une Batterie	(59)
IV.3.2	Stockage électrochimique	(60)
IV.3.3	Capacité de stockage	(61)

---

IV.3.4	Rendement	(62)
IV.3.4.1	Rendement faradique	(62)
IV.3.4.2	Rendement énergétique	(62)
IV.3.5	Tension à vide	(62)
IV.3.6	Durée de vie	(62)
IV.3.7	Autodécharge des batteries	(63)
IV.3.8	Dimensionnement d'une batterie	(63)
IV.4	Etat de Stockage	(65)
IV.4.1	Modèle CIEMAT	(65)
IV.4.1.1	La Capacité	(66)
IV.4.1.2	L'état de charge	(66)
IV.4.1.3	Tension de décharge	(67)
IV.4.1.4	Tension de charge	(67)
IV.4.1.5	Résistance de la batterie	(67)
IV.4.1.5.1	Résistance en décharge	(68)
IV.4.1.5.2	Résistance en charge	(68)
IV.4.1.6	Rendement de charge et de décharge	(68)
IV.4.2	Résultats de simulation	(68)
IV.4.2.1	Caractéristiques de la batterie	(69)
IV.4.2.2	Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie	(70)
IV.4.2.3	Influence de la résistance sur les caractéristiques de batterie	(71)
IV.5.1	Intégration du système de stockage dans un système éolien	(72)
IV.5.2	Faisabilité du système éolien-stockage	(73)

IV.6	Modélisation et simulation	(74)
IV.6.1	Modélisation et simulation d'un convertisseur AC-DC	(74)
IV.6.2	Modélisation du bus continue	(75)
IV.6.3	Résultats de la simulation	(76)
IV.7	Conclusion	(81)
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		(82)

---

# Introduction générale

---

### INTRODUCTION GENERALE

Devant l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causes par l'émission des gaz à effet de serre lors de leur exploitation, le développement d'autres ressources énergétiques alternatives est devenu essentiel. Les énergies renouvelables sont aujourd'hui incontournables dans la quête de sécurité énergétique et de réduction des émissions conformément aux accords internationaux sur le climat. Les énergies solaire, hydraulique, thermique, éolienne, la biomasse et géothermique sont parmi les principales sources d'énergies renouvelables exploitées. L'énergie éolienne suscite un intérêt particulier en raison du développement technologique des éoliennes, de la répartition mondiale du vent et de sa disponibilité constante.

Le travail présenté se concentre sur l'étude, la modélisation et la simulation d'une turbine éolienne, répartie en quatre chapitres.

Le premier abordera l'importance de l'énergie électrique et l'état de l'art des énergies renouvelable en citant leurs avantages et leurs inconvénients,

Le deuxième chapitre traitera les aspects théoriques de l'énergie éolienne ; en donnant l'architecture et les différentes structures des turbines éoliennes.

Le troisième chapitre sera dédié à la modélisation du premier élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne qui est la turbine, nous donnerons aussi une vue sur les stratégies de commande d'une turbine pour extraire le maximum d'énergie technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) ; en présentant de manière détaillée la modélisation de cette commande à partir des équations mathématiques. Ensuite, nous donnerons une implémentation en MATLAB/Simulink pour visualiser la simulation du système global.

Dans le quatrième chapitre, on décrira les différents systèmes de stockage d'énergie. On présentera le modèle mathématique de la batterie CIEMAT (Centre des Investigations Energétiques Medio ambientales y Technologiques). L'intégration du système de stockage à base de batterie sera modélisée et simulé dans l'environnement Matlab/Simulink où l'on présentera les différentes courbes des grandeurs électriques et mécaniques ainsi que les caractéristiques du système.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale dédiée à une synthèse de la recherche présentée et aux perspectives futures dans le domaine des énergies renouvelables.

---

---

Chapitre I:  
Etat de l'art des  
énergies renouvelables

---

---

## I.1 Introduction

L'homme utilise l'énergie sous diverses formes, telles que la chaleur, la lumière ou le mouvement. La découverte de l'électricité a constitué une véritable révolution, car toutes les formes d'énergie connues peuvent être converties en énergie électrique. Cette dernière peut ensuite être aisément transportée et transformée en mouvement (par exemple, avec un moteur) ou en chaleur (comme avec un radiateur) pour l'utilisateur final.

Face à l'épuisement des ressources fossiles, aux défis environnementaux et à l'augmentation des besoins énergétiques, le développement de nouvelles ressources énergétiques est devenu une priorité pour de nombreux pays. Les énergies renouvelables offrent une alternative écologique aux combustibles fossiles ; leur utilisation permettrait de fournir de l'électricité à des zones isolées sans nécessiter de nouvelles infrastructures. Dans ce premier chapitre, nous aborderons les notions fondamentales sur les sources d'énergies renouvelables : solaire, géothermique, biomasse, hydraulique, marémotrice, éolienne et des vagues, ainsi que leur exploitation en Algérie. Nous conclurons par un tableau comparatif de ces énergies, mettant en lumière leurs avantages et inconvénients.

## I.2 Energies renouvelables

### I.2.1 Définition

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. D'une manière générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire qu'une source d'énergie est renouvelable si sa consommation ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'hydraulique et la biomasse génèrent certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que les carburants fossiles. [6]

### I.2.2 Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

En 2008, la production d'électricité d'origine renouvelable a atteint un niveau record de 3763 TWh, représentant 18,7 % de la production électrique totale. Bien que cette part soit supérieure à celle de l'énergie nucléaire (13,5 %), elle reste largement inférieure à la contribution des combustibles fossiles, qui représentaient 67,6 % de la production.

L'hydroélectricité demeure la principale source d'électricité renouvelable, fournissant 86,3 % du total.

La biomasse occupe la deuxième place avec 5,9 %, suivie de l'éolien (5,7 %), de la géothermie (1,7 %) et du solaire (0,3 %), comme illustré par la Figure I.1. [7]

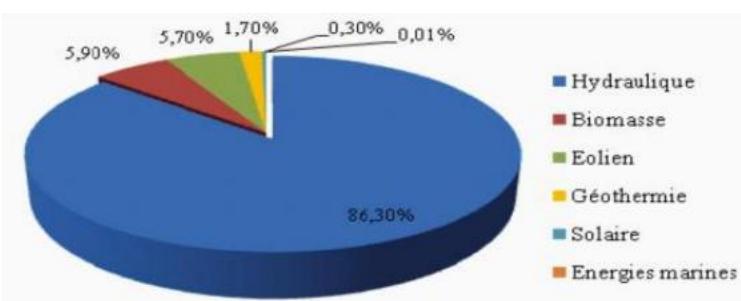


Figure I.1: Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde en 2008.

### I.2.3 Les énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie, étant un pays producteur de gaz et de pétrole, ne voit pas nécessairement l'augmentation du prix du baril de pétrole à l'échelle mondiale comme un encouragement à l'utilisation des énergies renouvelables. Toutefois, la signature des accords de Kyoto par l'Algérie et l'apparition des problèmes environnementaux ont conduit à la mise en place d'un programme gouvernemental pour investir dans la production électrique à partir des énergies renouvelables. Le gouvernement algérien a lancé un plan de développement des énergies renouvelables très ambitieux. D'ici vingt ans, l'Algérie espère produire autant d'électricité à partir des énergies renouvelables qu'elle en produit actuellement à partir de ses centrales alimentées au gaz naturel.

## I.3 Principales énergies renouvelables

### I.3.1 L'énergie solaire

#### I.3.1.1 Définition

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (environ 100 fois celui de la Terre) et sa masse est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{27}$  kg. L'énergie solaire permet de produire de l'électricité grâce aux panneaux photovoltaïques ou aux centrales solaires thermiques. La lumière du soleil, captée par des panneaux solaires, permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes, sans bruit et sans émissions de gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour des installations autonomes, soit injectée dans le réseau. En raison de sa souplesse, de sa facilité d'installation et de sa maintenance, l'énergie solaire constitue une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés [8]. Selon son utilisation, l'énergie solaire peut être classifiée en trois catégories : solaire passif, solaire actif et solaire photovoltaïque.

### \* Energie solaire passive

Des maisons et des bâtiments sont conçus avec de grandes fenêtres sur les murs qui font face au sud et de petites fenêtres sur ceux qui font face au nord, afin de réduire le besoin en électricité et de permettre à la lumière et à la chaleur du soleil d'être utilisées à leur pleine capacité [9].

### \*Energie solaire actif

Elle utilise des capteurs plans pour concentrer la chaleur de la lumière pour chauffer un liquide. L'essentiel est de piéger cette chaleur en créant un petit effet de serre. Les installations les plus simples de ce type chauffent l'eau pour les besoins en eau chaude des ménages. Cette technique permet aussi de chauffer une maison en faisant circuler l'eau chaude dans les murs sous le plafond comme la montre (Figure I.2).

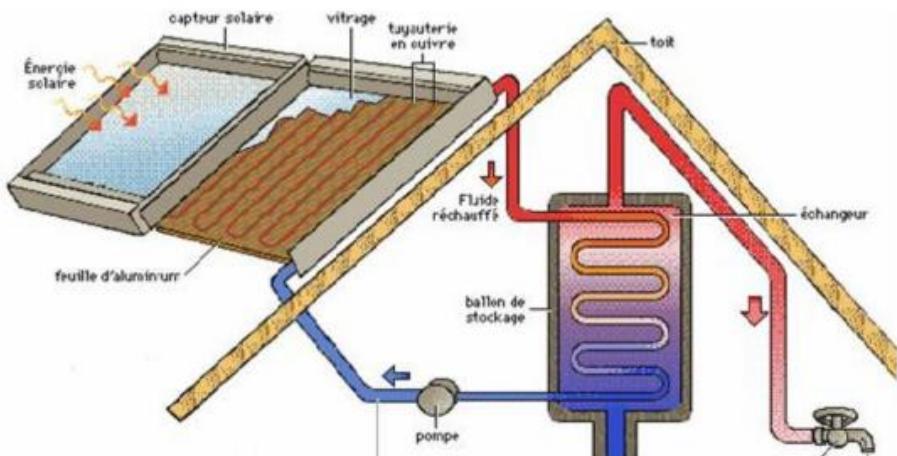


Figure I.2: Chauffage d'une maison par l'énergie solaire. [9]

### \*Energie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption des photons dans un matériau semi-conducteur, ce qui génère une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent un courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Lorsque l'énergie nécessaire dépasse la quantité fournie par une seule cellule, les cellules sont regroupées pour former un module photovoltaïque, parfois désigné de manière ambiguë sous le terme de panneau solaire. Ces modules ont d'abord été utilisés pour alimenter des satellites en orbite, puis des équipements électriques dans des sites isolés. Enfin, la baisse des coûts de production élargit le champ d'application de l'énergie photovoltaïque à la production d'électricité sur les réseaux électriques. La (Figure I.3) illustre un exemple de centrale solaire photovoltaïque. [9]

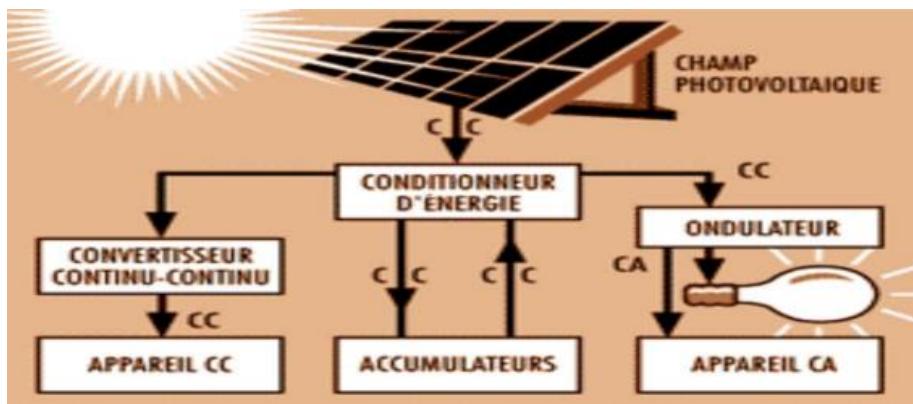


Figure I.3: Schéma de Principe d'une centrale solaire photovoltaïque. [9]

L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant ainsi de réduire les besoins en fourniture par le réseau pour les bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés, pour l'électrification rurale et le pompage de l'eau (50 %), les télécommunications et la signalisation (40 %), ainsi que pour des applications domestiques (10 %).

#### I.3.1.2 L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus vastes au monde. La durée d'ensoleillement dépasse les 2 000 heures par an sur presque tout le territoire, atteignant jusqu'à 3 900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue annuellement est de 1 700 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le nord et de 2 263 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le sud. La figure I.4 illustre l'irradiation globale quotidienne reçue sur un plan horizontal et normal durant les mois de juillet et décembre. [11]

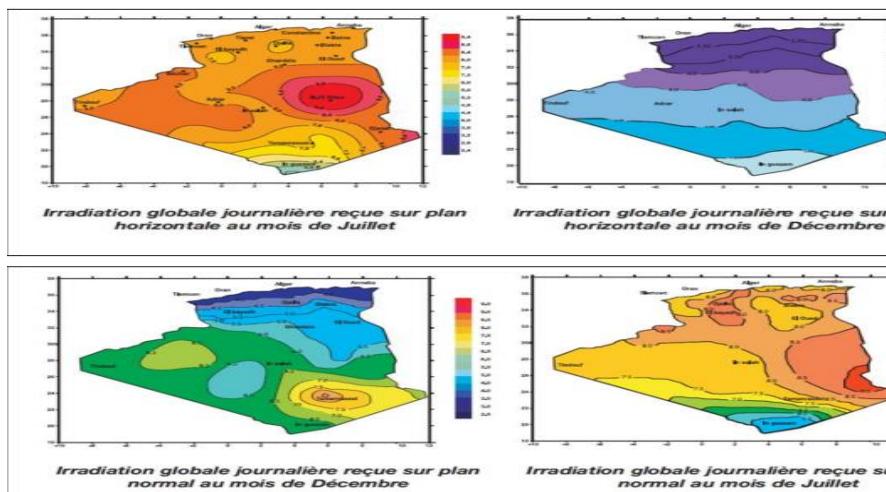


Figure I.4: Irradiation globale journalière reçues sur un plan horizontal et normal aux mois de Juillet et Décembre. [11]

Citons ci-dessous quelques projets réalisés au niveau national :

- Un projet hybride solaire-gaz d'une capacité de 150 MW. Il est constitué d'un champ solaire de 25 MW utilisant la technologie CSP (concentrating solar power) et d'un cycle combiné turbine à gaz et turbine à vapeur. Ce projet est implanté sur un terrain d'une superficie de 130 hectares à Hassi R'mel. Cette technologie hybride, grâce à l'utilisation des CSP, permet d'éviter l'installation d'un système de stockage de l'électricité.
- Electrification à l'Assekrem (refuge à la wilaya de Tamanrasset) par l'énergie photovoltaïque, avec une capacité installée de 2,250 kW. Ce système photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque (15 modules orientés vers le sud), de batteries, d'un système de régulation et de conversion, et enfin d'un groupe électrogène comme source d'appoint.
- Le groupement allemand Centrotherm a remporté, le lundi 7 février 2011 à Alger, le contrat de réalisation d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques à Rouiba (Alger). L'usine sera réalisée sur une superficie de 43 000 m<sup>2</sup>, dont 30 000 m<sup>2</sup> bâties, et produira, à l'horizon 2013, entre 116 et 120 MW.
- Réalisation du pompage solaire de quatre puits au parc Tassili. Ce projet a été réalisé en février 2008.
- Electrification d'un village composé de 20 huttes dans le parc national du Tassili par l'énergie solaire photovoltaïque, avec une puissance totale installée de 8 kWc. Ce projet a été réalisé en août 2007. [5]

### I.3.2 L'énergie géothermique

#### I.3.2.1 Définition

La géothermie est une énergie renouvelable provenant de l'extraction de l'énergie contenue dans le sol. Cette chaleur résulte essentiellement de la désintégration radioactive des atomes fissiles contenus dans les roches. Elle peut être utilisée pour le chauffage, mais aussi pour la production d'électricité. Il s'agit de l'une des seules énergies qui ne dépendent pas des conditions atmosphériques.

En revanche, elle dépend de la profondeur à laquelle elle est puisée. La géothermie profonde — à environ 2 500 mètres pour des températures de 150 à 250 °C — permet de produire de l'électricité. La géothermie moyenne — dans les gisements d'eau, notamment, de 30 à 150 °C — alimente les réseaux de chaleur urbains. La géothermie à très basse énergie — entre 10 et 100 mètres de profondeur et inférieure à 30 °C — est celle exploitée par les pompes à chaleur.

Notons toutefois que pour que l'énergie géothermique demeure durable, le rythme auquel cette chaleur est puisée ne doit pas dépasser la vitesse à laquelle elle voyage à l'intérieur de la Terre. L'énergie géothermique contenue dans le sol peut être utilisée soit pour le chauffage (usage direct), soit pour être transformée en électricité (usage indirect), comme l'indique la (Figure I.5).

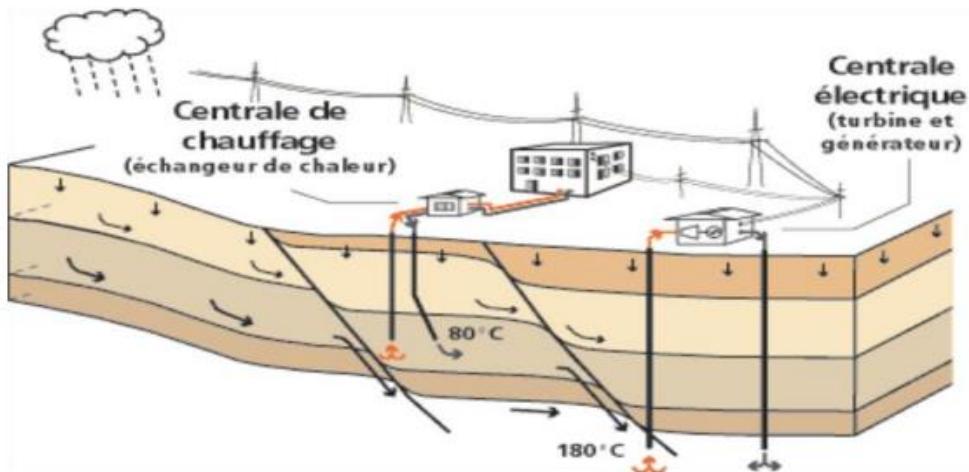


Figure I.5: Mode d'exploitation des ressources géothermique. [4]

On identifie quatre catégories de géothermie : haute, moyenne, basse et très basse énergie.

#### \*Géothermie à haute énergie (>150 °C)

La géothermie haute énergie, également connue sous le nom de géothermie profonde ou, moins couramment, géothermie haute enthalpie, désigne une source d'énergie présente dans des réservoirs situés généralement à plus de 1 500 mètres de profondeur, avec des températures dépassant 150 °C. Ces températures élevées permettent la production d'électricité et la cogénération, qui consiste à produire simultanément de l'électricité à l'aide de turbines à vapeur et de la chaleur par récupération des condensats de vapeur.

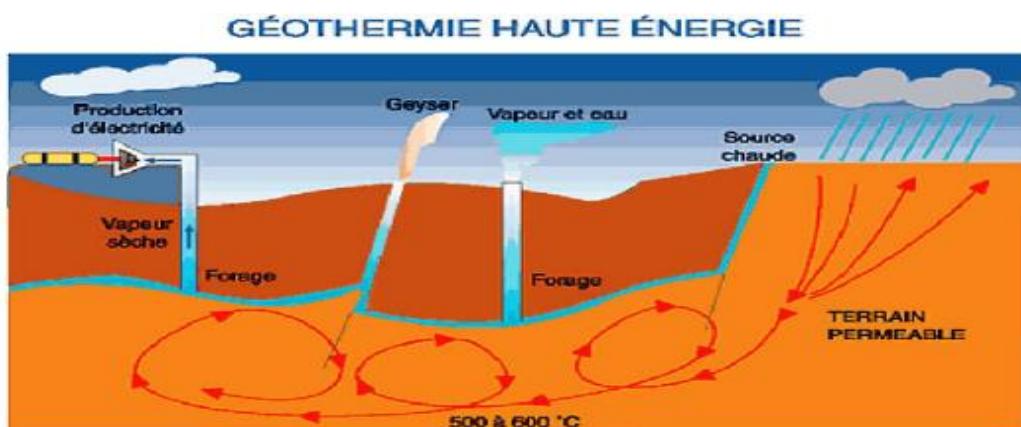


Figure I.6: Géothermique haute énergie.

### \*Géothermie à moyenne énergie (100-150°C)

La géothermie à moyenne énergie concerne l'exploitation de la chaleur des nappes profondes dans des zones géologiques avec un gradient de température spécifique. Après le forage, un fluide caloporeur, tel que le fréon ou l'ammoniac, est injecté dans le sol. Ce fluide est chauffé et remonté à la surface, où il est utilisé pour produire de l'électricité, chauffer des bâtiments et fournir de l'eau chaude sanitaire.

### \*Géothermie à basse énergie (30-100°C)

On évoque la géothermie basse énergie lorsque le forage atteint une température de l'eau entre 30 °C et 100 °C. Cette technologie est principalement utilisée pour le chauffage urbain collectif via des réseaux de chaleur, ainsi que pour certaines applications industrielles.

### \*Géothermie à très basse énergie (<30° C)

La géothermie très basse énergie exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30 °C. Cette technologie est appliquée à la climatisation passive, au chauffage et à la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique, qui « préleve la chaleur contenue dans le sol ». [9]

#### I.3.2.2 L'énergie géothermique en Algérie

En Algérie, les ressources géothermiques sont significatives. Les réservoirs géothermiques à basse température produisent, via des sources thermales et des forages artésiens, plus de 12 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude, avec des températures variant de 22 °C à 98 °C. Malheureusement, ces eaux chaudes sont principalement utilisées pour les soins thermaux, comme dans les hammams. La figure I.6 illustre la répartition des sources thermales en Algérie.



Figure I.7: Carte de température des sources thermals. [5]

### I.3.3 Energie de la biomasse

#### I.3.3.1 Définition

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme, depuis la découverte du feu à la préhistoire. Elle désigne l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale. Par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tels que le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques), ou par le biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou encore par de nouvelles transformations chimiques en biocarburants. Cependant, la biomasse peut être polluante ; par exemple, le biocarburant et le bois, lorsqu'ils sont brûlés, produisent des gaz à effet de serre.

[10]

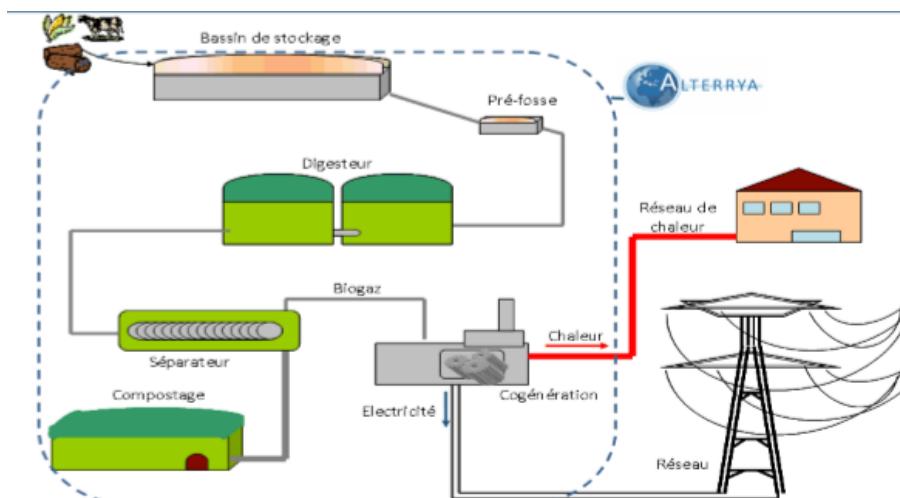


Figure I.8 : Schéma de principe d'une usine biomasse.

Il existe trois principales catégories d'énergie relatives à la biomasse :

#### \*Bois

Il s'agit de l'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Essentiellement développées autour des usages thermiques, les applications utilisant le bois comme combustible s'étendent des chaudières individuelles aux installations collectives en passant par des chaufferies industrielles de plus de 15 MW de puissance unitaire. [10]

#### \*Biogaz

Véritablement située à la charnière des problèmes environnementaux et énergétiques, l'exploitation du biogaz en Europe est devenue un secteur industriel à part entière. Les déchets de l'agro-industrie, de l'agriculture, des décharges d'ordures ménagères ou des boues

provenant des eaux usées peuvent être mis à fermenter pour produire de la chaleur et de l'électricité. Le potentiel européen exploitable est estimé à 18 millions de tep par an d'ici à 2020. [12]

#### **\*Biocarburant**

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanols et les biodiesels. Les éthanols, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes, comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation. Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja, etc.). Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole. Ils entraînent ainsi une légère diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsables de l'effet de serre. Cependant, ces biocarburants présentent un énorme inconvénient : ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières. [4]

#### **I.3.3.2 L'énergie de la biomasse en Algérie**

L'Algérie se subdivise en deux parties :

- Les régions sylvestres qui occupent 25 000 000 hectares environ, soit un peu plus de 10 % de la superficie totale du pays.
- Les régions sahariennes arides couvrant presque 90 % du territoire. Dans le nord de l'Algérie, qui représente 10 % de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis couvrent 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique ; actuellement, elles n'occupent que 5 % de la forêt algérienne. Actuellement, le développement de la bioénergie est encore à l'échelle expérimentale dans les laboratoires de recherche. [11]

#### **I.3.4 Energie hydraulique**

##### **I.3.4.1 Définition**

Le terme d'énergie hydraulique désigne l'énergie qui peut être obtenue par l'exploitation de l'eau. C'est une catégorie d'énergies moins soumise aux conditions météorologiques, mais qui reste réservée à une production d'envergure. Dans les énergies hydrauliques, on trouve:

- Les barrages qui libèrent de grandes quantités d'eau sur des turbines afin de produire de l'électricité.

- L'énergie marémotrice qui joue sur l'énergie potentielle des marées, une énergie liée aux différences de niveaux d'eau et aux courants que celles-ci induisent.
- L'énergie hydrienne qui exploite les courants marins.
- L'énergie houlomotrice qui compte sur l'énergie cinétique des vagues et de la houle.

L'énergie thermique qui peut être tirée de manière prudente pour éviter notamment toute perturbation des flux naturels des mers en raison de la L'énergie osmotique qui produit de l'électricité grâce à la différence de pression que génère la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce. Il faut que le débit du cours d'eau soit assez important et que sa hauteur de chute soit assez élevée. La (Figure I.9) montre le principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique. [13]

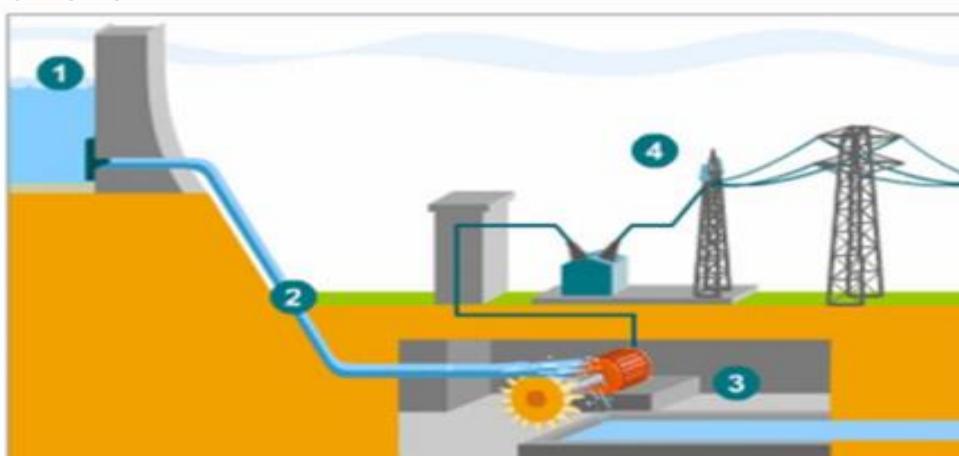


Figure I.9: Schéma de principe d'une centrale hydraulique. [4]

1-Barrage

2-Conduite forcée de l'eau

3-Production d'électricité

4-Adaptation de la tension

Suivant la hauteur de chutes on distingue :

#### **\*Les centrales de haute chute**

Les centrales de haute chute, qui disposent de hauteurs de chute supérieures à 300 m, utilisent des turbines Pelton. Elles sont situées dans les Alpes et d'autres régions très montagneuses, et leur capacité de réservoir est relativement faible.

#### **\*Les centrales de moyenne chute**

Les centrales de moyenne chute ont des hauteurs variantes entre 30 m et 300 m et utilisent des turbines Francis. Elles sont alimentées par l'eau stockée derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière en zone montagneuse, et disposent d'un réservoir de grande capacité.

### \*Les centrales de basse chute

Les centrales à basse chute, également appelées centrales au fil de l'eau, possèdent des hauteurs de chute inférieures à 30 m et utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Elles sont situées sur des fleuves ou des rivières à fort débit. [14]

#### I.3.4.2. L'énergie hydraulique en Algérie

La part de capacité hydraulique dans le parc de production électrique total est de 5 %, soit 286 MW. Cette faible puissance est due au nombre insuffisant de sites hydrauliques et à la non-exploitation de ceux-ci. [11]

#### I.3.5. Energie des vagues et marémotrice

L'énergie marémotrice produit de l'électricité d'une manière similaire à l'énergie hydraulique. Une structure comme un barrage est construite à travers un estuaire pour emprisonner une marée haute et pour ensuite la laisser passer à travers des turbines pour produire de l'électricité. L'écoulement de l'eau peut seulement produire de l'électricité sur la marée descendante ou sur la marée descendante et montante ; cette énergie dépend des variations journalières de la marée.

Les centrales énergétiques marémotrices ont besoin de turbines spéciales pour produire de l'électricité, qui doivent être tournantes dans les deux sens et qui utilisent les marées montantes et descendantes. La figure I.8 montre le principe de l'énergie marémotrice.

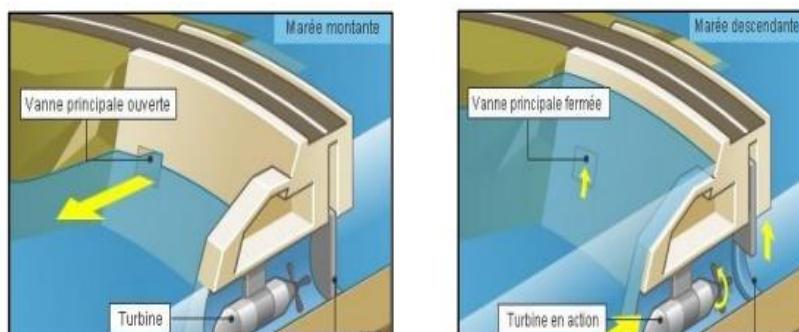


Figure I.10: Schéma de principe de l'énergie marémotrice. [4]

L'énergie des vagues est créée par le vent et l'eau, donc comme ces deux énergies sont renouvelables, leur association permet de disposer d'une nouvelle forme d'énergie propre. Bien que l'énergie des vagues soit considérée comme une énergie de haute qualité, elle est encore très peu développée. [9]

### I.3.6 Energie éolienne

#### I.3.6.1 Définition

Les aérogénérateurs convertissent la force du vent en électricité, précieuse pour alimenter les sites isolés, mais aussi les grands réseaux nationaux. Les éoliennes modernes connaissent un important succès, avec à la clé des progrès technologiques et économiques remarquables depuis ces 20 dernières années. Les plus grands industriels sont danois et allemands. En 1999, le marché mondial des grandes éoliennes reliées au réseau électrique a augmenté de 38 % (3 695 MW supplémentaires installés), la moyenne sur les quatre dernières années étant de 30 %. L'électricité éolienne est la moins coûteuse des utilisations actuelles des énergies renouvelables. Elle est "presque" compétitive, comparée à l'électricité issue des énergies traditionnelles. Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. La (figure I.11) montre les différents types d'éoliennes. [8]



Figure I.11: Les différents types d'éoliennes. [16]

### I.4 Etude comparative sur les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables associent des avantages sur le plan environnemental, social, économique ainsi que géopolitiques. On peut résumer les avantages de ces énergies renouvelables comme suit :

- Elles utilisent des flux d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, déchets).
- Elles sont inépuisables et gratuites.
- La production de gaz à effet de serre est très inférieure à celle des énergies fossiles (charbon, pétrole, ...).
- Elles constituent la seule possibilité d'électrification des sites isolés.
- Elles n'entraînent ni risques majeurs ni nuisances locales.
- Les impacts en cas d'accident grave sont plus facilement maîtrisables que ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière, à l'exception notable des barrages hydroélectriques.
- Les énergies renouvelables améliorent l'indépendance énergétique.

En plus de ces avantages, chaque type d'énergies renouvelables présente ses propres avantages par rapport aux autres. Nous allons les voir dans le tableau ci-dessous.

Type d'énergie	Avantages	Inconvénients
Energie solaire	<p>C'est une énergie propre et gratuite.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas, elle ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques.</li> <li>- Réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles.</li> <li>- Permet de couvrir quasiment l'intégralité des besoins en eau chaude et du chauffage en fonction de la surface en capteurs posée.</li> <li>- Les panneaux solaires sont simples et rapides à monter et à installer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les prix de fabrication et d'installation des panneaux photovoltaïque sont assez élevés.</li> <li>- La nuit, la source d'énergie n'existe plus, il faut donc prévoir des systèmes de stockage.</li> <li>- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés et en fonction des saisons</li> </ul>
Energie géothermique	<p>C'est une énergie locale et essentiellement renouvelable</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Son exploitation ne génère pas de flamme, d'odeurs, de fumée.</li> <li>- Pas de déchets et génère très peu d'émissions de gaz à effet de Serre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les coûts des installations sont généralement plutôt élevés.</li> <li>- Risque de glissement de terrain. - Epuisement de la source est possible sur certains stocks.</li> </ul>
Energie de la biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduire la quantité de déchets envoyés à la décharge.</li> <li>- Absorbe du gaz carbonique.</li> <li>- Un grand nombre d'emploi peut être créé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexité de transformation.</li> <li>- Beaucoup de déperdition de chaleur par combustion.</li> </ul>
Energie hydraulique, marémotrice et de vague	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elle est non polluante et joue un rôle majeur en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.</li> <li>- Elle ne produit pas de déchets toxiques.</li> <li>- Exploite l'eau mais ne la consomme pas.</li> <li>- Haut rendement de production par comparaison aux autres sources d'énergies. Inconvenient</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts d'investissement est assez grand pour certain central.</li> <li>- les projets à grande échelle peuvent menacer le débit des rivières.</li> </ul>
Energie éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie éolienne ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet.</li> <li>- L'énergie éolienne est d'une sécurité incontestée. Le peu d'accidents fatals enregistrés dans le monde de l'industrie éolienne sont liés aux travaux de construction et de maintenance.</li> <li>- Les éoliennes occupent peu de terrain.</li> <li>- L'énergie éolienne peut et doit respecter le paysage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.</li> <li>- Le problème lié aux petits réseaux, c'est l'inconstance de la puissance fournie qui nécessite l'intervention d'un système de régulation.</li> <li>- La perturbation de l'éologie locale des sites.</li> <li>- Les nuisances sonores.</li> </ul>

Tableau I.1: Tableau Comparatif de synthèse des différents types d'énergies renouvelables.

### I.5 Conclusion

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergie et elle est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue, dans la vie quotidienne des populations, ainsi que la proportion d'électricité par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse de croître. Il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergies fossiles ; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement. Dans ce chapitre, nous avons mentionné que les énergies renouvelables peuvent être issues de ressources hydrauliques, solaires, géothermiques, de biomasse et éoliennes, ainsi que les avantages et inconvénients de l'énergie renouvelable. Le chapitre suivant est dédié aux aspects théoriques de l'énergie éolienne et son architecture, y compris les différentes structures des turbines éoliennes.

---

---

## Chapitre II: L'énergie éolienne

---

---

## II.1 Introduction

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air, qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent (figure II.1). Après avoir, pendant longtemps, oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'Antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent, qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient, depuis une dizaine d'années, une croissance de 30 % par an.

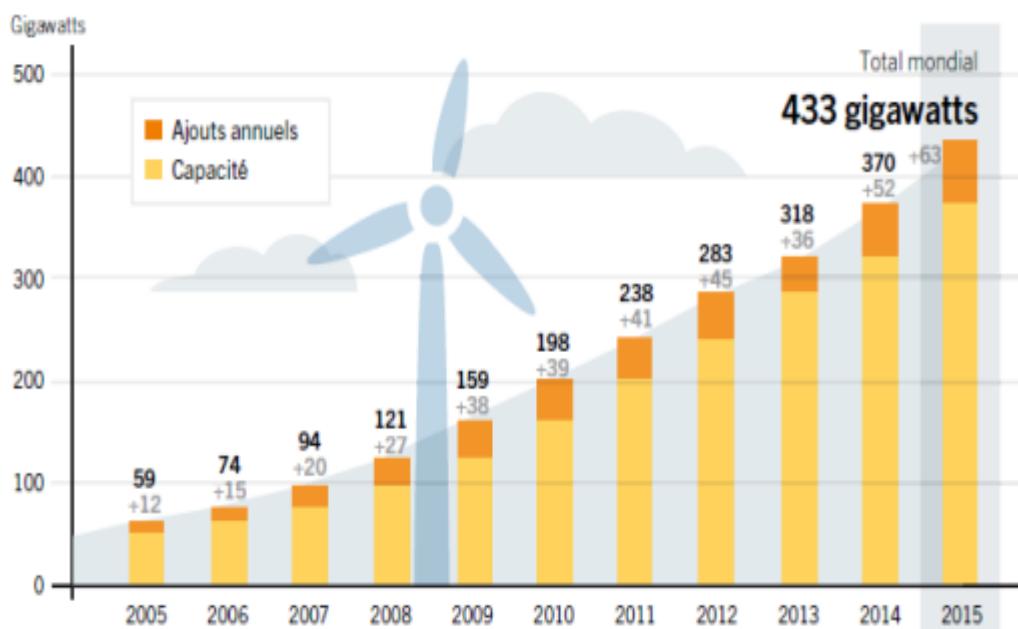


Figure II.1: Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005–2015.

Concernant le coût d'investissement, pour l'éolien terrestre, il est d'environ 900 €/MW aujourd'hui, soit 10 fois moins qu'il y a 30 ans, dont la machine représente près des trois-quarts des investissements. Alors que pour la production, le coût est bien entendu extrêmement sensible au régime des vents, il est compris dans une fourchette de 3 à 7 ct€/kWh. Une baisse des coûts de près de 35 % a été observée dans la décennie 90, essentiellement par effet de série, augmentation de la taille unitaire et du rendement (figure II.2).

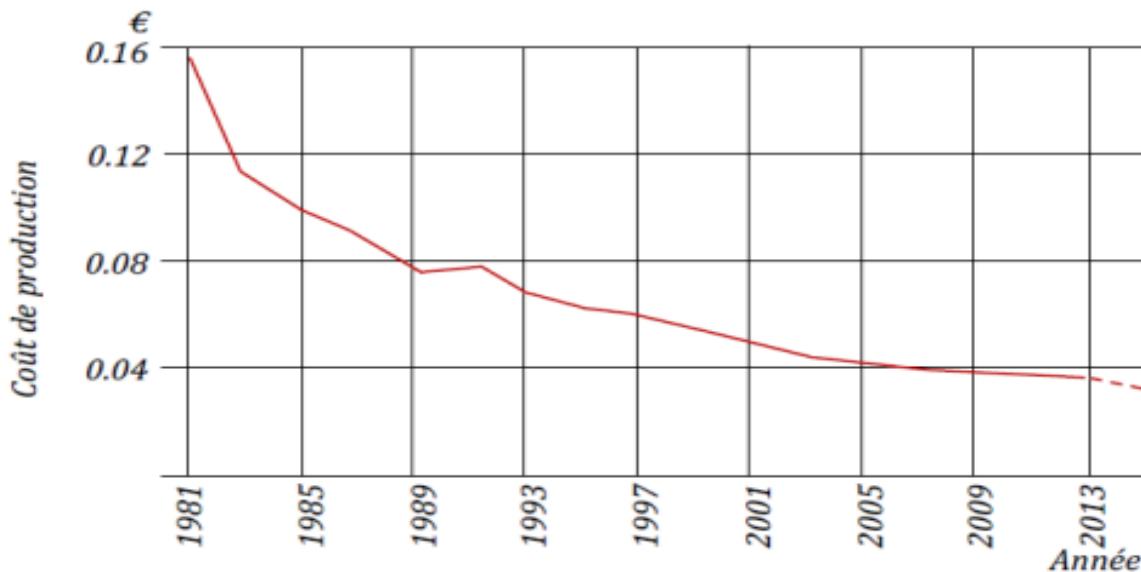


Figure II.2: Baisse des couts de production des aérogénérateurs terrestres, avec une vitesse moyenne des vents de 6 m/s et un amortissement sur 30 ans (taux d'intérêt : 5 %/an)  
 (Données Agence de l'Energie Danoise).

## II.2 Historique des éoliennes

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'*Antiquité*, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite *pour* les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C., *environ*.

La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, ce n'est qu'au VII<sup>e</sup> siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de "moulins", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. À l'arrivée de l'électricité, *cela* donne l'idée au *Britannique* Lord Kelvin, en 1802, de *souigner* pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet, il *essaya* d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait, il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. « Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dès 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les

aides gouvernementales, fluctuent avec le prix du baril de pétrole et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois, *au cours* des dernières années, se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec des machines de 300 kW à 1,5 MW. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

[2]

### **II.3 Statistique de production de l'éolienne**

#### **II.3.1 Production de l'éolienne dans le monde**

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité. La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passa de 12 à 35 US \$. Soudainement, les pays de l'OCDE voulaient devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité. L'énergie éolienne, depuis une dizaine d'années, maintient une croissance de 30 % par an. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020, soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005, qui était de 40 GW.

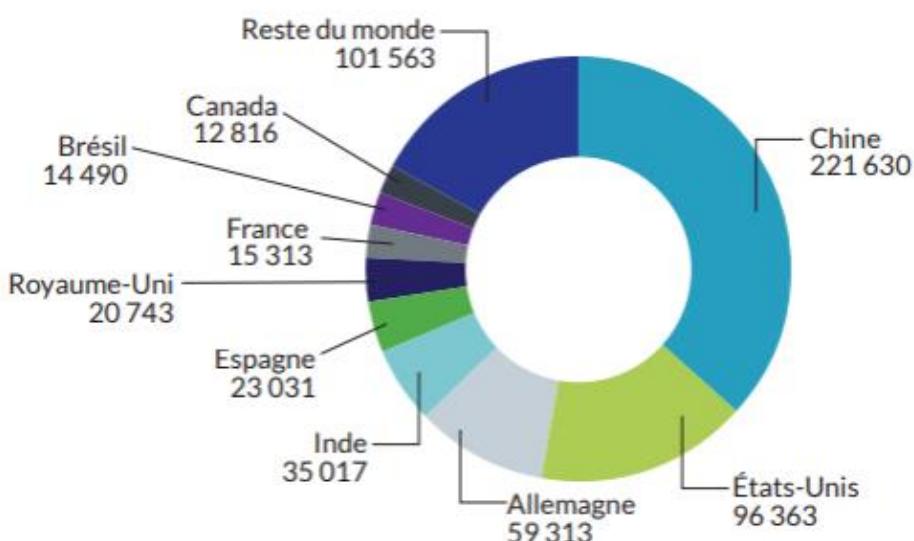


Figure II.3: Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), données de 2018[18]

#### **II.3.2 Production de l'éolienne dans l'Algérie**

L'Algérie cherche à investir dans les énergies renouvelables, notamment dans l'éolien, et a donc mené une grande étude sur l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne

du vent afin d'identifier les régions ventées de l'Algérie. Le résultat de cette étude est que le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi, au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s), avec des microclimats autour d'Oran, Béjaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter, ainsi que dans la région délimitée par Béjaïa au nord et Biskra. Au sud de l'Algérie, on y trouve des vitesses de vent plus importantes qu'au nord : elles sont particulièrement supérieures à 4 m/s au sud-ouest et à 6 m/s dans la région d'Adrar. [1]

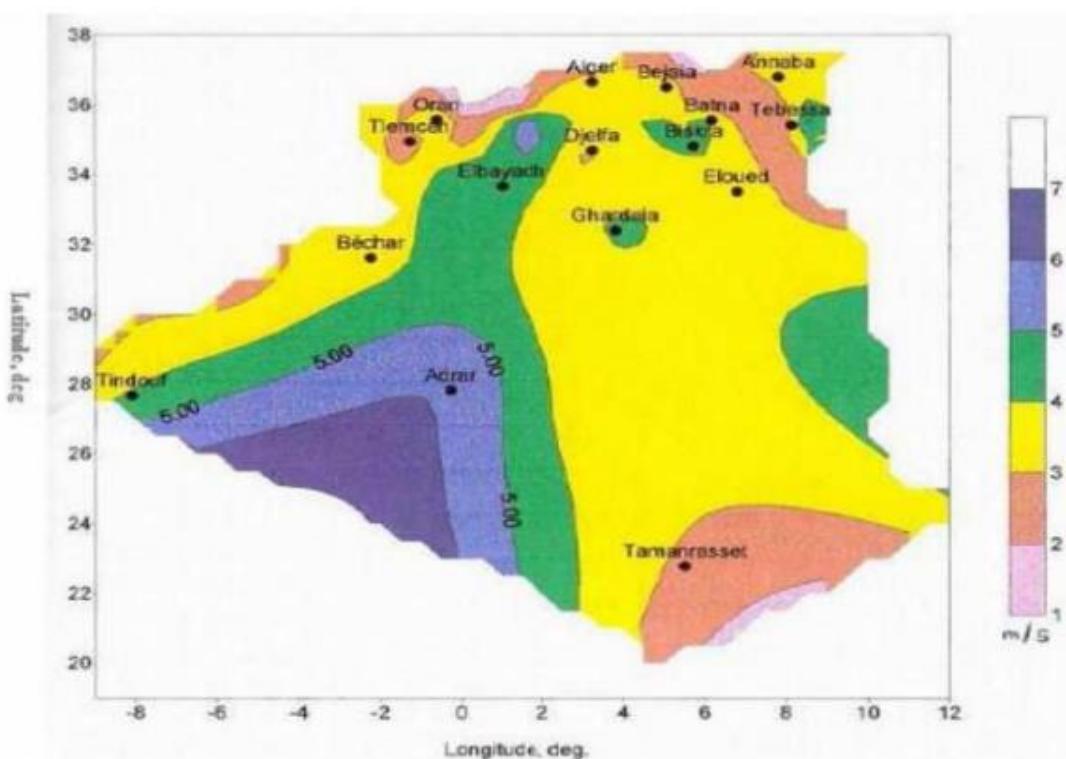


Figure II.4: Carte du potentiel éolien en Algérie [1]

#### II.4 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et propre, sans rejet atmosphérique. Elle est géographiquement diffuse, et sa source (le vent) est plus abondante en hiver. Cependant, le captage et la conversion de cette énergie sont complexes, les matériaux nécessaires sont coûteux, et la disponibilité de la source d'énergie est difficile à prévoir et reste aléatoire.

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. [1]

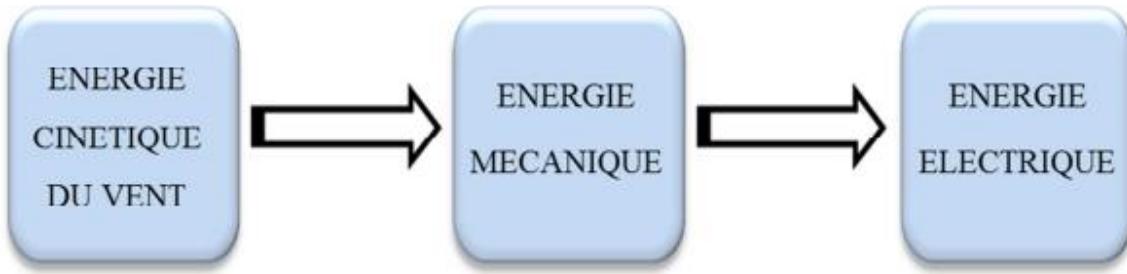


Figure II.5: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Le SCE (Système de Conversion Éolien) est constitué d'un générateur électrique entraîné par une turbine éolienne à travers un multiplicateur, ainsi que d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et, enfin, d'un réseau électrique, comme illustré dans la Figure II.6. [2]

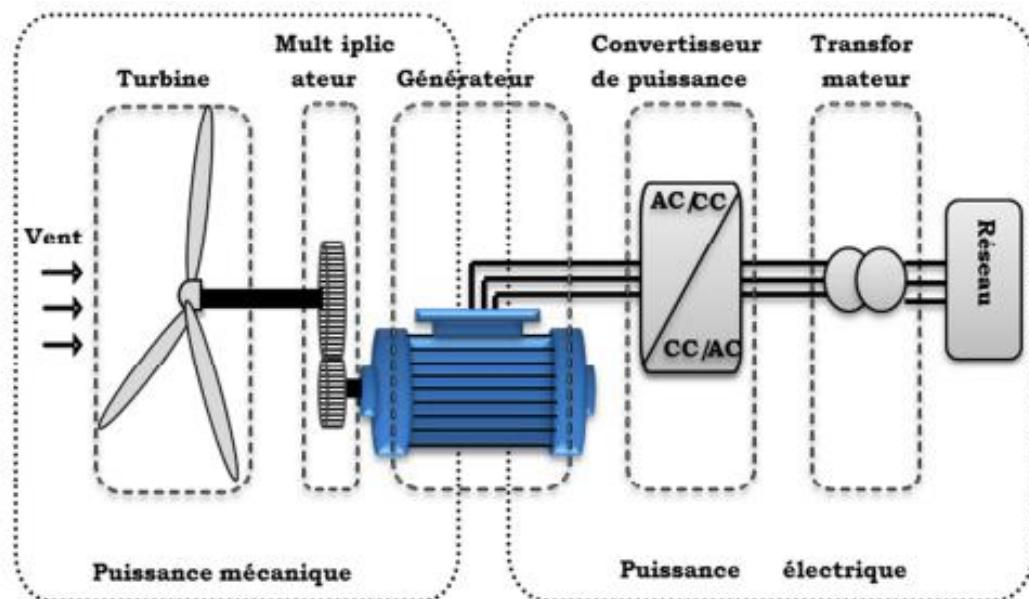


Figure II.6: Principaux organes du système de conversion éolien. [1]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver, et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps, et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [1]

#### II.4.1 Les différents types d'éoliennes

Il faut savoir qu'il existe différents types d'éoliennes (Figure II.7) : les éoliennes classiques, à axe horizontal, qui ont généralement trois pâles, mais peuvent aussi en avoir deux

(1), voire une seule (2). On peut aussi trouver des éoliennes à axe vertical, telles que les éoliennes de Darrieus (3), les éoliennes de Savonius (4), ou encore des éoliennes à hélices (5).

[1-2]

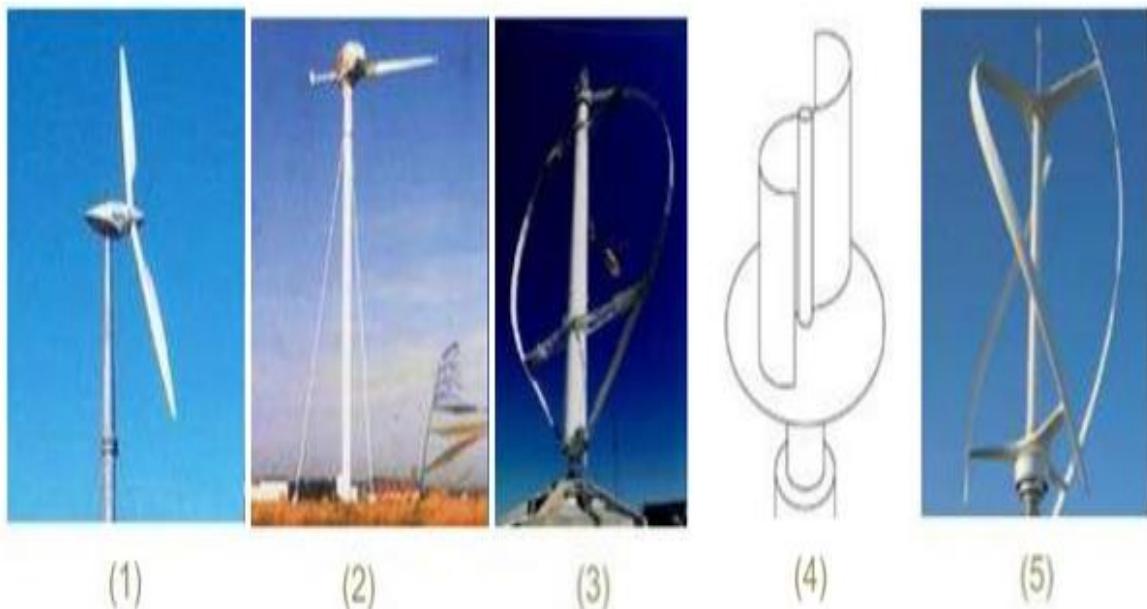


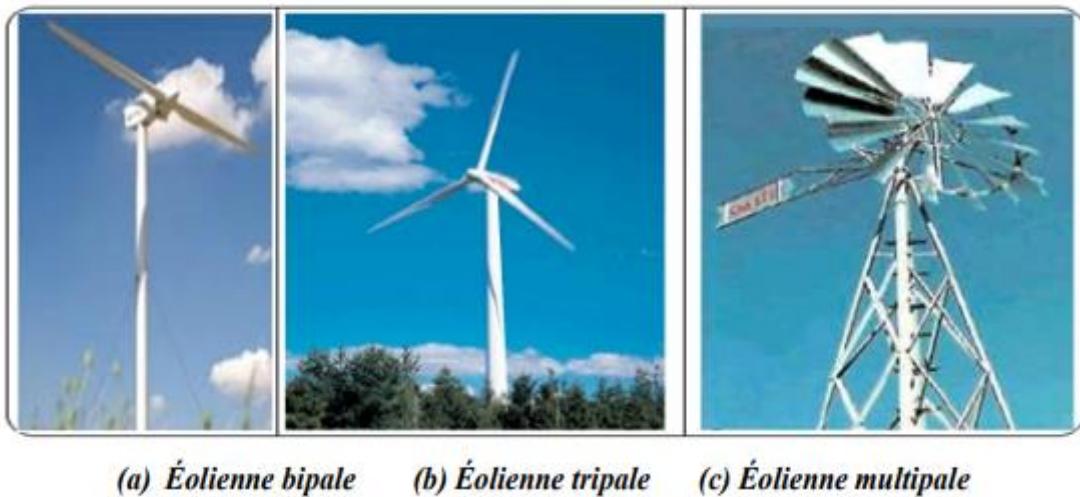
Figure II.7: Différents types d'éoliennes

#### **II.4.2 Les éoliennes se divisent en deux grandes familles**

Nous avons les éoliennes à axe vertical et à Axe horizontal.

##### **II.4.2.1 Éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pâles profilées de façon 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. Pour la production d'électricité, les éoliennes utilisent un nombre de pâles variant 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. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, sont moins exposées aux contraintes mécaniques, et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal (Figure II.8). [2]



(a) Éolienne bipale    (b) Éolienne tripale    (c) Éolienne multipale

Figure II.8: Eolienne à axe horizontal. [2]

On peut distinguer des éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent ». Voir figure (II.9).

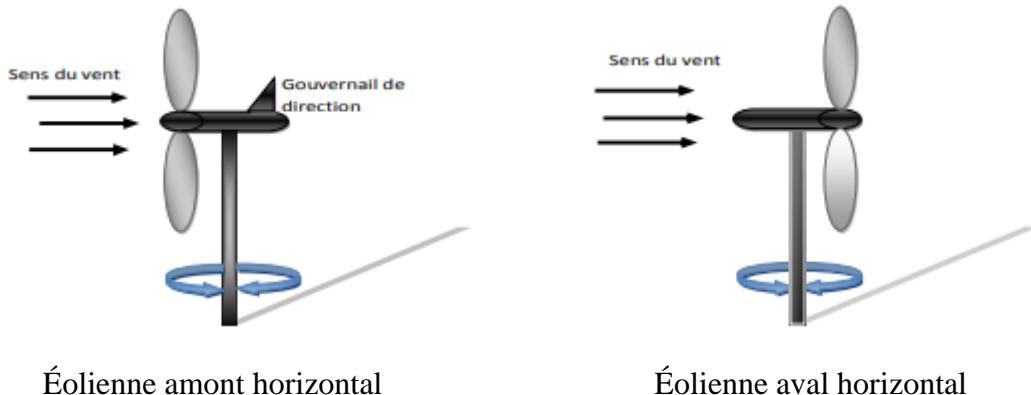


Figure II.9: Configuration à axe horizontal [2]

#### II.4.2.2 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc facilement accessibles. Il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne, et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts.

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes (Figure II.10) : la turbine Darrieus classique, la turbine Darrieus à pâles droites (type H) et la turbine Savonius.



(a) Turbine Darrieus    (b) Turbine Darrieus de type H    (c) Turbine Savonius

Figure II.10: Eolienne à axe vertical [1]

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées ; si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

### Comparaison

Le Tableau I.3 résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance, les éoliennes à axe horizontal (EAH) dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Par contre, les éoliennes à axe vertical (EAV) sont plus appropriées pour les applications domestiques en toit d'immeubles, vu que cela leur donne automatiquement accès au vent fort et qu'elles sont facilement abordables pour la maintenance.

Types des Turbines	Avantages	Inconvénients
<b>Eoliennes à Axe Horizontal (EAH)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fort rendement de conversion d'énergie</li> <li>■ Accès au vent plus fort</li> <li>■ Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle.</li> <li>■ Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au sol</li> <li>■ Systèmes d'orientation requis</li> </ul>
<b>Eoliennes à Axe Vertical (EAV)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface.</li> <li>■ Fonctionnement indépendant du sens du vent.</li> <li>■ Adéquat pour les toits de d'immeuble</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Rendement moins faible</li> <li>■ Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques</li> <li>■ Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.</li> </ul>

Tableau II.1: Comparaison des éoliennes à Axe Horizontal, et à Axe Vertical.

## II.5 Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, Voir Figure II.11:

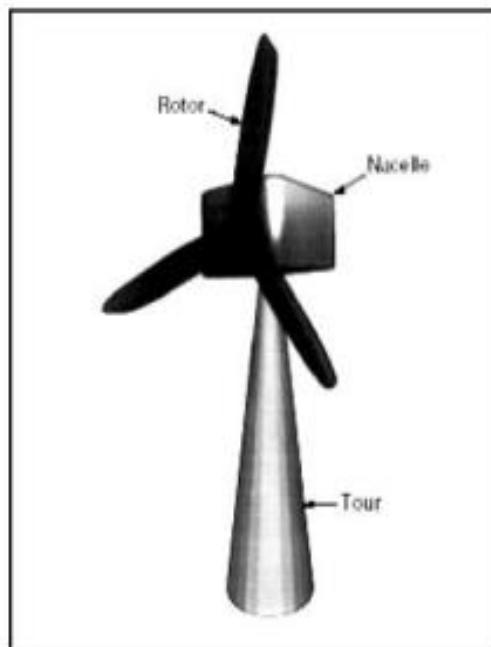


Figure II.11: Composants d'une éolienne.

## II.5.1 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pâles et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire, qui tourne à faible vitesse, comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pâles variables, freinage du rotor...). [1-2]

## II.5.2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées selon le type de machine.

La figure (II.12) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

### II.5.2.1 Multiplicateur de vitesse

Il sert à éléver la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire, qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballlement de la machine. [2]

### II.5.2.2 Génératrice

Différents types de génératrices peuvent être rencontrés. C'est un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pâles, le freinage de la machine, et l'orientation de l'ensemble rotor-nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et à réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir. Il existe divers dispositifs de refroidissement (générateur, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile. [3]

### II.5.2.3 Dispositif d'orientation de la nacelle

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée.

De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

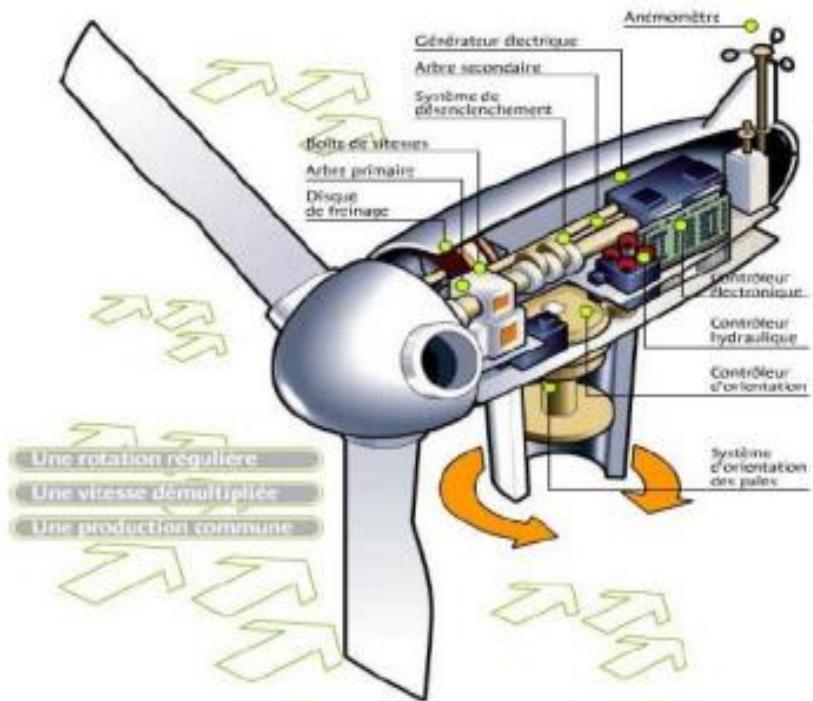


Figure II.12: Eléments d'une nacelle. [2]

### II.5.3 Tour

Son rôle consiste à supporter l'ensemble rotor-nacelle pour empêcher les pâles de toucher le sol, tout en plaçant le rotor à une hauteur suffisante afin de l'éloigner autant que possible du gradient de vent présent près du sol, ce qui améliore le captage de l'énergie. [2]

## II.6 Chaine de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base, à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées. On distingue deux grandes familles d'éoliennes :

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

### II.6.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor commence à tourner. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Pour assurer un bon fonctionnement du générateur, la vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse, atteignant environ 1500 tr/mn pour une machine à deux parties de pôles. Des convertisseurs électroniques ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne pour l'adapter à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de fonctionner à une vitesse variable en fonction des conditions de vent. La tension de l'électricité générée est ensuite élevée par un transformateur de puissance, qui se trouve dans la nacelle ou à l'intérieur du mât. Ce niveau de tension permet de transporter l'électricité produite par chaque éolienne d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

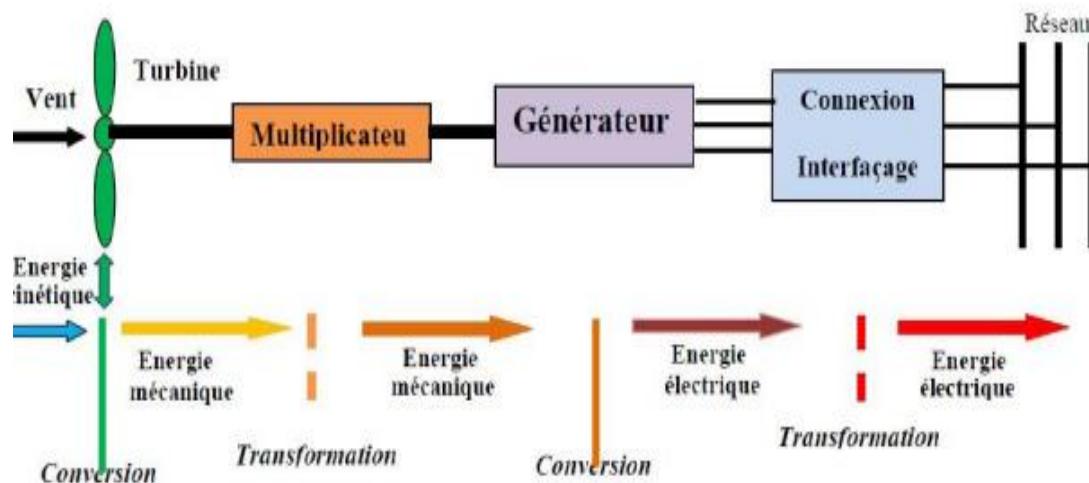


Figure II.13: Principe de la conversion d'énergie [2]

### II.6.2 Principaux composants d'une éolienne

#### - Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieur de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

### - Les pâles

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pâles varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [3]

### - La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques nécessaires au couplage du rotor éolien avec le générateur électrique, à savoir : les arbres, le multiplicateur, les roulements, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, ainsi que le générateur, qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone. On y trouve également les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pâles (frein aérodynamique) et de la nacelle, indispensables pour maintenir la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent. Les principaux composants des deux types d'éoliennes sont identiques, comme l'illustre la figure (II.14).

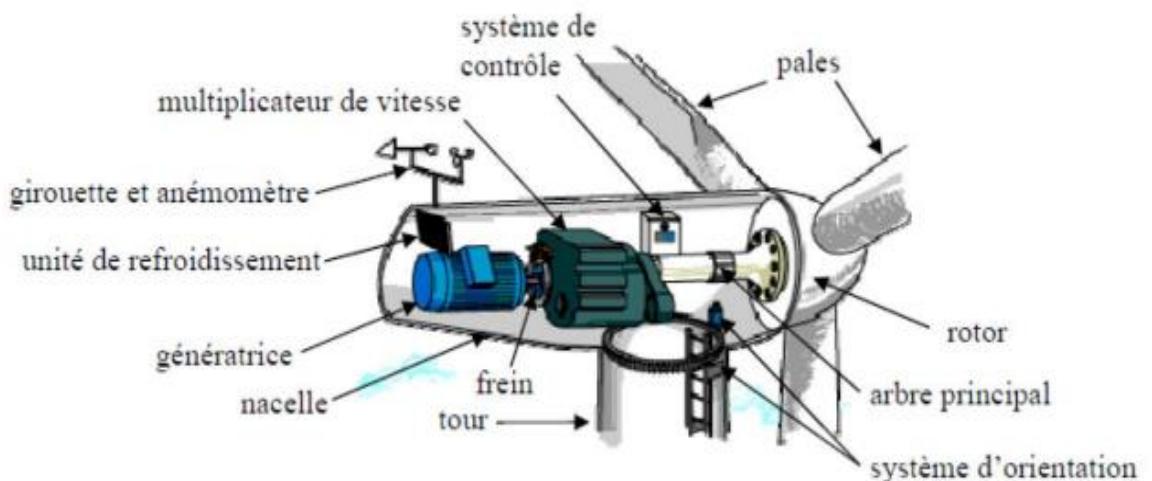


Figure II.14: Principaux constituant d'une éolienne [2]

## II.7 Caractéristiques technologiques des éoliennes

### II.7.1 Le Supportage

Les pylônes peuvent être fabriqués en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et autoportants, ou bien haubanés. Bien que l'haubanage permette de diminuer les dimensions du mât, il réduit en revanche l'emprise au sol. Pour optimiser l'occupation du sol, il est envisagé de soutenir plusieurs éoliennes avec une seule structure ; dans ce cas, les pylônes en treillis métalliques s'avèrent intéressants. Actuellement, les mâts en caisson, généralement en acier et solidement ancrés au sol, sont très courants pour les éoliennes de grande puissance. [3]

## II.7.2 Les pâles

Les pâles sont des éléments essentiels des éoliennes. Leur conception influence le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine, ainsi que le rendement du moteur éolien. Elles se caractérisent par plusieurs paramètres : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux et le nombre. Parmi ces paramètres, certains sont définis par des hypothèses de calcul relatives à la puissance et au couple, tandis que d'autres sont sélectionnés en fonction de critères tels que le coût et la résistance aux conditions climatiques. [3]

### II.7.2.1 Longueur

Le diamètre de l'hélice dépend de la puissance souhaitée. Ce diamètre détermine également la fréquence de rotation maximale, que l'hélice ne doit pas dépasser afin de limiter les contraintes à l'extrémité des pâles causées par la force centrifuge. Il est crucial de considérer le travail en fatigue des pâles ainsi que les risques de vibrations, notamment pour les pâles très longues. [1]

### II.7.2.2 Largeur

La largeur des pâles influence le couple de démarrage, qui sera meilleur si les pâles sont plus larges. Cependant, pour atteindre des vitesses de rotation élevées, il est préférable d'opter pour des pâles fines et légères. Ainsi, le choix se résume à un compromis entre ces deux aspects. [2]

### II.7.2.3 Le profil

Il est sélectionné en fonction du couple souhaité. Pour la majorité des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pâles ne présentent pas de vrillage. En revanche, pour la plupart des machines de grande puissance ( $\geq 100 \text{ kW}$ ), elles sont vrillées, prenant ainsi la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont établies en soufflerie et ont généralement été étudiées dans le cadre de l'aviation (ailes ou hélices). [3]

### II.7.2.4 Les matériaux

Les matériaux employés pour la fabrication des pâles sont diversifiés et ont bénéficié de nombreux progrès, notamment grâce aux innovations des pâles d'hélicoptère. Contrairement à une idée reçue, la difficulté ne réside pas tant dans le domaine de l'aérodynamique que dans la construction et la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le processus de fabrication des pâles qu'il y a le plus à améliorer pour garantir la sécurité en opération. Les matériaux utilisés doivent donc répondre à plusieurs critères : ils doivent être légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, tout en permettant une mise en œuvre ou un usinage facile.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- Le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pâles assez petites
- Le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pâles jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- Les alliages d'aluminium : pour des pâles allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- Les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pâle vrillée, corde évolutive, changement de profil.

### II.7.3 Bilan des forces sur une pâle

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pâle de largeur  $dr$  et de longueur de corde  $l$  une distance  $r$  de l'axe de rotation une force résultante  $dF$ . [2]

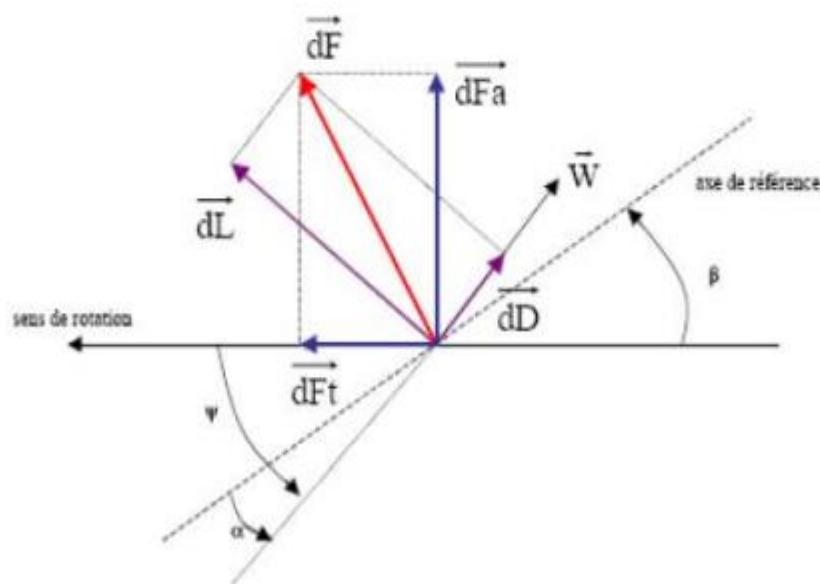


Figure II.15: Forces appliquées sur un élément de pâle [2]

On peut décomposer la force résultante  $dF$  de la manière suivante :

- La portance  $dL$ , normale à la direction du vent apparent.
- La force de  $dD$ , parallèle à la direction du vent.
- On peut aussi la décomposer d'une autre manière :
- La poussée axiale  $a dF$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle  $t dF$ , dans la direction de rotation

Les modules des forces dD, dL s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance CL et le coefficient de traînée CD.

La force de portance :

$$L = \frac{1}{2} \rho \omega^2 dA C_L \quad (\text{II.1})$$

La force de traînée :

$$D = \frac{1}{2} \rho \omega^2 dA C_D \quad (\text{II.2})$$

La poussée axiale :

$$F_a = \frac{1}{2} C_x \rho \omega^2 S \quad (\text{II.3})$$

La poussée de rotation :

$$F_r = \frac{1}{2} C_z \rho \omega^2 S \quad (\text{II.4})$$

Avec

dA = l(r).dr. surface du tronçon de pôle

l (r) : longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

CL : coefficient de portance (sans dimension)

CD : coefficient de traînée (sans dimension)

Cz : coefficient de portance suivant le plan de rotation

Cx : coefficient de poussée ω: module du vent apparent

Ces coefficients CL et CD dépendent du profil de la pôle et de l'angle d'incidence α  
Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport Cx/Cz en fonction de l'angle d'incidence α. Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne.

### **II.7.3.1 Puissance fournie par un aérogénérateur**

- **Potentiel éolien disponible**

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse V, est :

$$EC = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{II.5})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A (A = π R 2), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent.

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{II.6})$$

ρ : Densité d'aire

- **La puissance moyenne récupérable**

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance  $P_{\text{rec}}$  inférieure à la puissance disponible  $P_{\text{disp}}$ .

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (1.32) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ .

Soit  $(V_1+V_2)/2$  est la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pâles en un second est :

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.8})$$

Soit en remplaçeront  $m$  par son expression dans (II.7)

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.9})$$

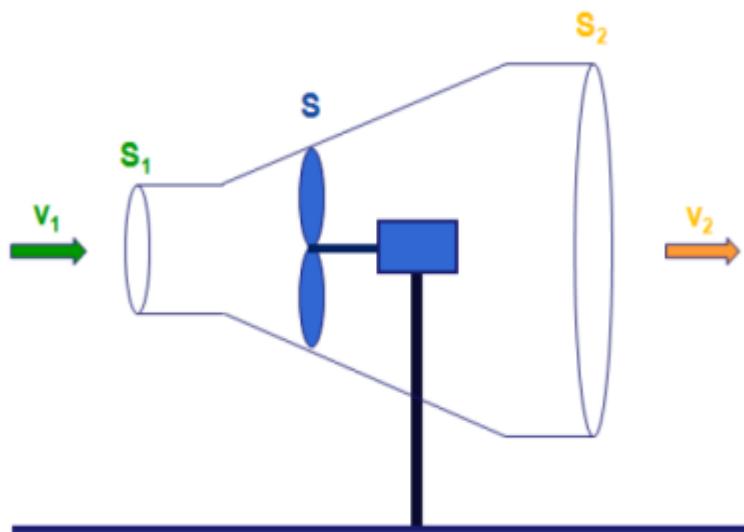


Figure II.16: Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{4} \quad (\text{II.10})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.11})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure II.16), on s'aperçoit que le ratio  $P_m / P_{mt}$  appelé aussi coefficient  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit 0.59. C'est cette limite théorique appelée limite de betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

$$P_{rec} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (\text{II.12})$$

En prenant en considération la limite de betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par

$$P_{rec} = 0.37 V^3 \quad (\text{II.13})$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (\text{II.14})$$

$\Omega$  : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne

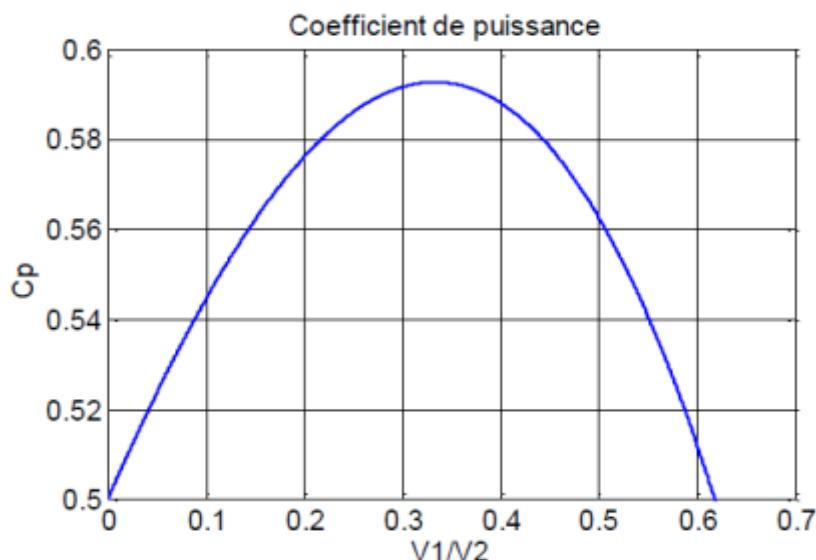


Figure II.17: Coefficient de puissance

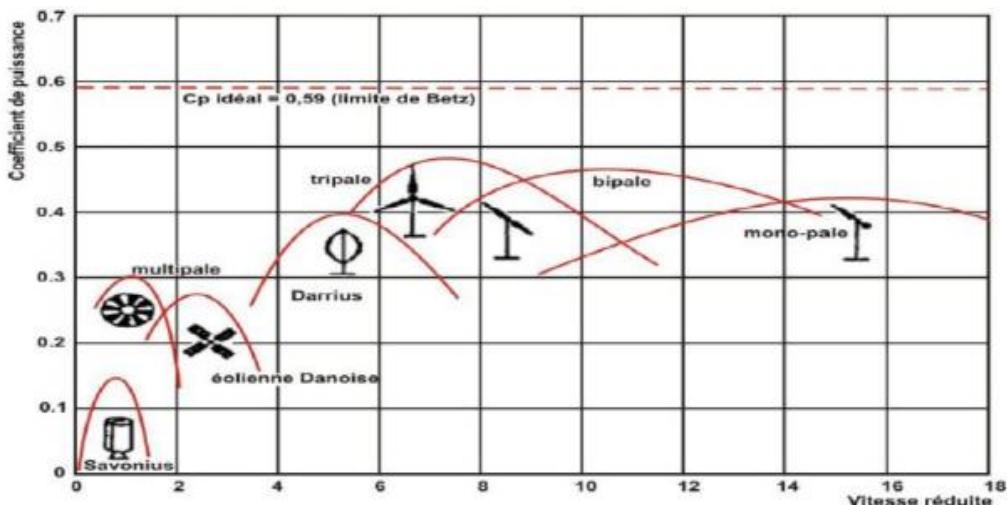


Figure II.18: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite (normalisée)  $\lambda$  pour différents types de turbines

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont pressentes sur la figure (II.18). En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de  $\lambda$  puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée.

Cette variation de  $C_p(\lambda)$ , dépendant de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pâles utilisées

Nous définissons le couple sur l'arbre T de la manière suivante :

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R^3 V^2 \quad (\text{II.15})$$

Le coefficient de couple  $C_T$  relié au coefficient de puissance par la relation suivante

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T(\lambda) \quad (\text{II.16})$$

Le coefficient  $C_T$  est, comme le coefficient  $C_p$ , fonction de la vitesse du vent et de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne  $\Omega$ .

La courbe caractéristique d'un aérogénérateur : Sur la courbe de  $C_p$  le coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  (Figure II.16), on remarque que pour chaque angle d'attaque  $\beta$  il y a une seule valeur  $\lambda_{opt}$  permettant de donner une valeur maximale  $C_{pmax}$  et ainsi une puissance mécanique maximale. Le contrôle de l'angle d'attaque des pâles est l'une des méthodes utilisées pour contrôler  $C_p$  de manière à minimiser et maximiser la puissance en réponse à des vitesses de vent variables.

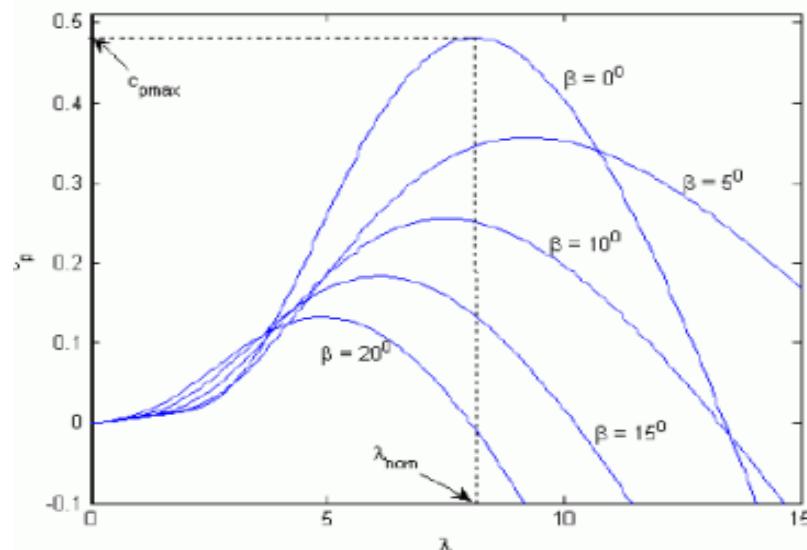


Figure II.19: Courbe du coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite pour différents angles d'attaque.

### II.8 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que sa vitesse de rotation reste constante. D'après l'équation (II.12), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent.

Où

$V_D$  : est la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolien commence à fournir de l'énergie

$V_n$  : la vitesse nominale,

$V_M$  : la vitesse d'arrêt de la machine pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour les raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses  $V_n$ ,  $V_D$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone I : où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone II : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V_D$  ;
- La zone III : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{turbine}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$  ;

- La zone IV : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

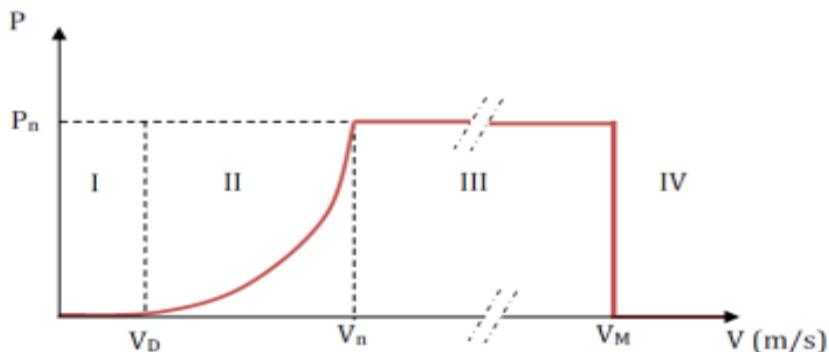


Figure II.20: Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pâles à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses.

Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pâles qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pâles).

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal ;

Pas variable par la pression du vent (modèle Airwind : les pâles en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;

Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

## II.9 Eoliennes à vitesse fixe et variable

### II.9.1 Eolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée,

et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

### **II.9.2 Eolienne à vitesse variable**

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique  $\lambda$ , qui représente la vitesse du bout de la pâle par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

Comme le montre le tableau ci-dessous, les principaux avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique.

<b>Mode de fonctionnement</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Vitesse Fixe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Simple, robuste, fiable.</li> <li>✚ Faible coût de construction et maintenance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Rendement de conversion d'énergie faible.</li> <li>✚ Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci.</li> <li>✚ Fluctuation importante de la puissance.</li> </ul>
<b>Vitesse Variable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Fort rendement de conversion d'énergie.</li> <li>✚ Puissance électrique de meilleure qualité.</li> <li>✚ Stress mécanique réduit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs.</li> <li>✚ Contrôle du système plus compliqué.</li> </ul>

Tableau II.2: Comparaison Des Eoliennes à vitesse fixe, Et à vitesse variable.

### **II.10 Définition du vent**

Le vent est le déplacement de l'air au sein de l'atmosphère. Il est naît sous l'effet des différences de températures et de pressions. Ainsi, lorsqu'il existe une différence de pression

entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée (où l'air est froid) vers l'endroit où elle est la moins élevée (où l'air est chaud). En d'autres termes, l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil. Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (matin et soir). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. Par ailleurs, il est à noter que l'air est sous l'action de quatre forces, qui sont :

➤ **Les forces de pression**

La pression atmosphérique en un point est le résultat de la masse de la colonne d'air au-dessus de ce point. Les différences de pression qu'on note sur le globe terrestre sont dues aux différences de température entre ces points en fonction de la latitude et des influences continentales et océaniques. Cette différence est la force qui déplace l'air.

➤ **Les forces de Coriolis**

Cette force est liée à la rotation de la terre sur son axe. Elle est perpendiculaire et proportionnelle à la vitesse du vent et est orientée vers l'est (la droite) dans l'hémisphère nord et vers l'ouest (la gauche) dans l'hémisphère sud. Elle n'est significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude (les vents géostrophiques que nous appelons aussi vents globaux) en raison de la négligence des autres forces à ce niveau.

➤ **Les forces de frottement**

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol.

➤ **La force gravitationnelle**

Elle est la conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.

**II.11 Types de vent**

Il existe plusieurs types de vent ; parmi eux, nous citons trois genres, qui sont :

**II.11.1 Le vent géostrophique**

Les vents causés par la différence de température due au réchauffement inhomogène de l'air de l'atmosphère sont connus par les vents géostrophiques ou bien les vents globaux ; ces vents concernent les hautes altitudes composées de deux forces, celle Coriolis et la force de pression. Vents locaux : Le changement de la vitesse et de la direction du vent pour des altitudes d'environ 100 m est très important pour les applications de la conversion d'énergie éolienne.

### **II.11.2 Les vents locaux**

Sont dus à conditions régionales particulières ; la différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer ; la force de pression et la force de frottement peuvent donner naissance à des vents locaux.

### **II.11.3 Les vents de surfaces**

Les vents sont moins forts en surface qu'en altitude tout ça est résulté par l'influence de la rugosité de terrain les obstacles naturels ou artificiels.

## **II.12 Caractéristiques du vent**

Le vent a une nature problématique, cela présente de grandes variabilités qu'on peut classer en deux grands groupes : la variabilité temporelle et la variabilité spatiale.

### **II.12.1 Variabilité temporelle**

La variabilité temporelle comprend trois sous-groupes à basses fréquences :

- Les variations annuelles, saisonnières, mensuelles
- À moyennes fréquences : les variations journalières, horaires.
- À hautes fréquences : les variations à la seconde où à plus haute.

### **II.12.2 Variabilité spatiale**

La variabilité spatiale concerne principalement la variation horizontale et verticale de la vitesse du vent. Comprenant ainsi deux catégories. D'un côté la variabilité spatiale régionale qui est en fonction de la latitude, de son ensoleillement et des reliefs (géographies et physiques). Et d'un autre côté, la variabilité spatiale locale qui prend en compte la topographie.

## **II.13 Gisement éolien en Algérie**

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée.

On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud.

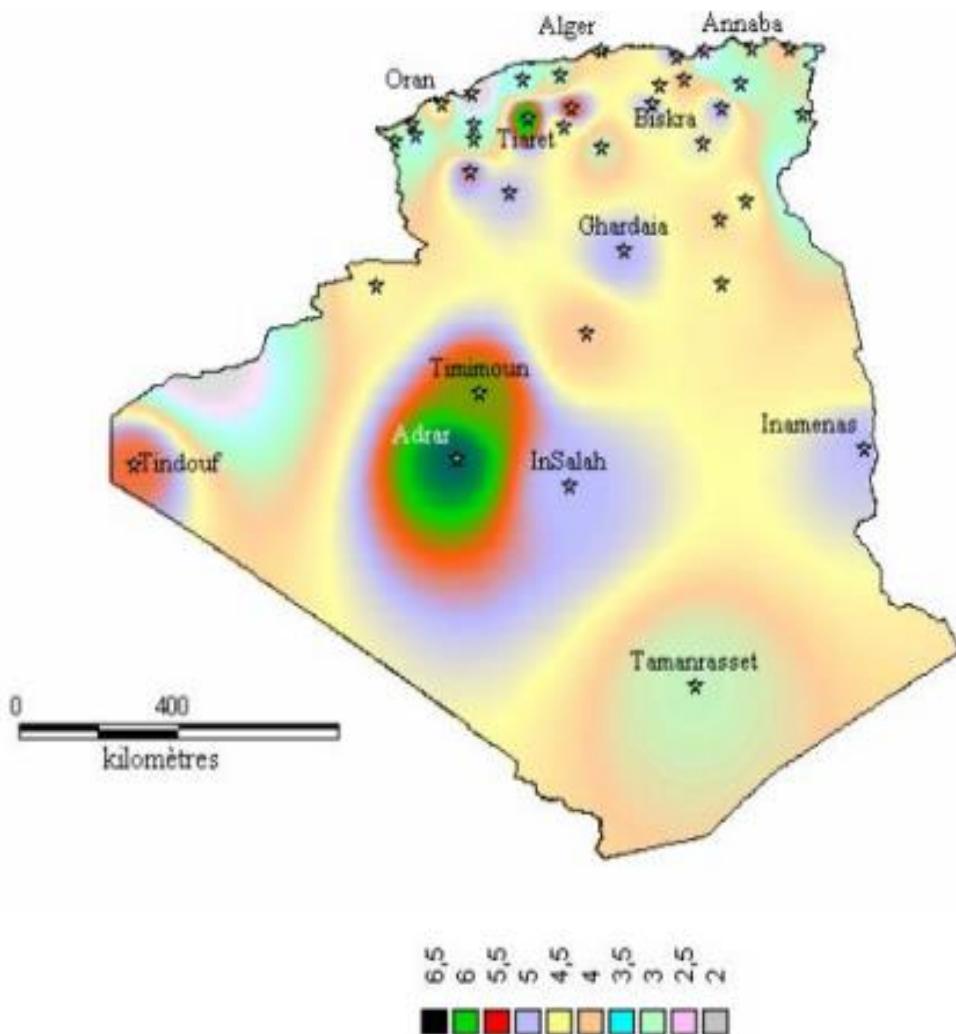


Figure II.21: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. [1-2]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures II.22 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année. [2]

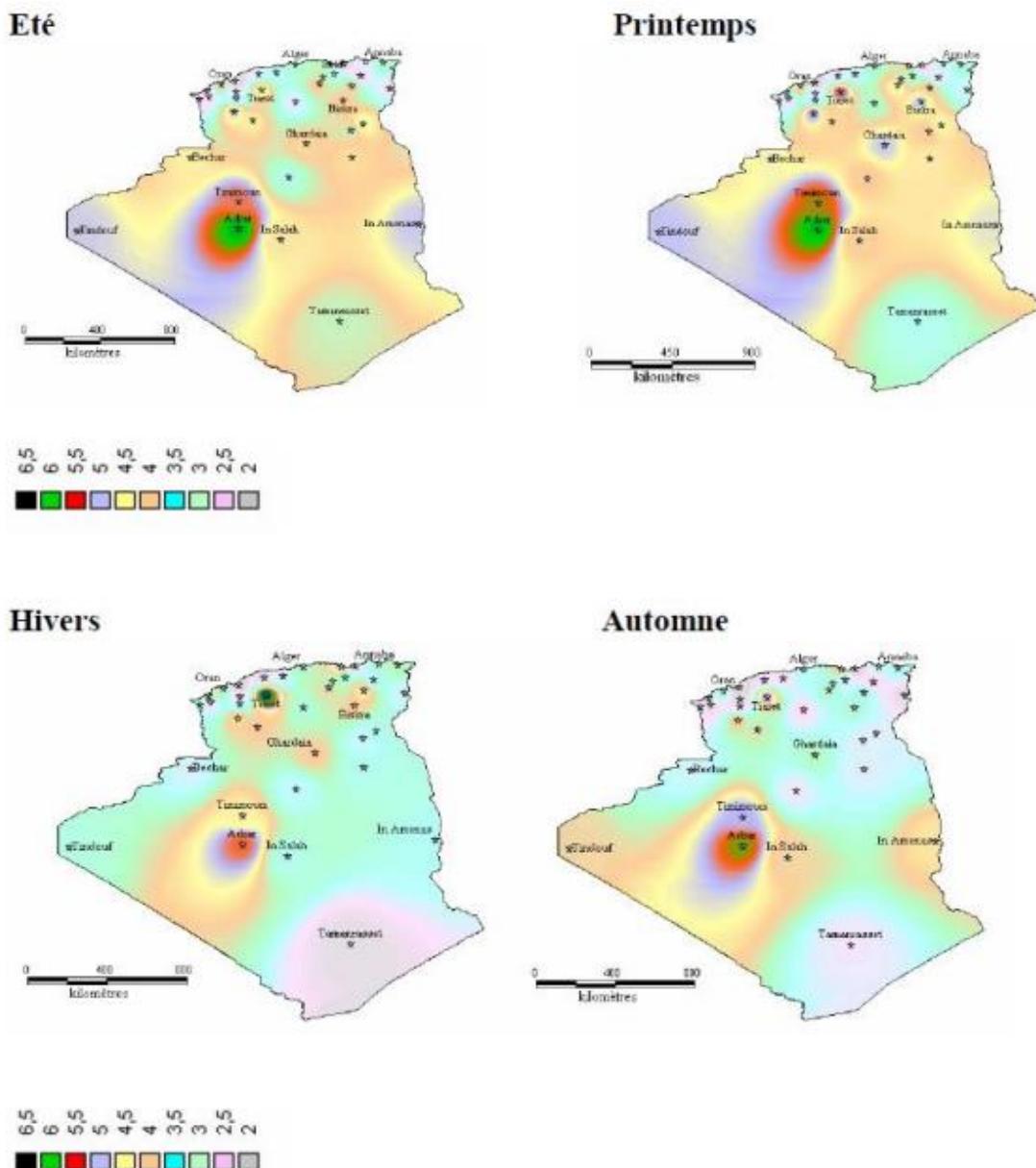


Figure II.22 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.  
(Hiver et automne, Eté et Printemps)

#### II.14 La loi de distribution de weibull

La connaissance de la loi de distribution de la vitesse du vent est importante pour de nombreuses applications de l'énergie éolienne.

Divers modèles de distribution statistique, notamment le modèle log-normal, la distribution gaussienne bivariante a été appliqués pour caractériser la distribution de probabilité de la vitesse moyenne du vent. Toutefois, le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de Weibull qui s'avère approprié à la représentation des propriétés statistiques du vent (Keller, 1992)

La distribution de weibull est cas particulier de la loi de distribution gamma généralisée, elle peut être réduite en deux autres distributions théoriques : la distribution exponentielle ( $k=1$ ) et la distribution rayleigh ( $k=2$ )

La forme mathématique de la distribution de weibull est :

$$f(V) = \left( \frac{k}{C} \right) \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left[ -\left( \frac{V}{C} \right)^k \right] \quad (\text{II.17})$$

C : paramètre d'échelle

k : paramètre de forme

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité  $f(V)$  représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$\begin{aligned} F(V \leq V_x) &= \int_0^V f(V) dV = 1 - \exp \left( -\left( \frac{V_x}{C} \right)^k \right) \\ F(V \geq V_x) &= \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp \left( -\left( \frac{V_x}{C} \right)^k \right) \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

### **II.15 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur**

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionnée. Elle est donnée par :

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) f(V) dV \quad (\text{II.19})$$

P (V) : Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

f (V) : Fonction de distribution de la vitesse du vent

## **II.16 Conclusion**

L'énergie éolienne connaît une croissance significative et dispose d'un potentiel important. Elle offre à la fois des avantages et des inconvénients. C'est une source d'énergie propre, mais son principal inconvénient réside dans la difficulté à anticiper sa disponibilité. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la modélisation de la turbine éolienne.

---

---

# Chapitre III:

# Modélisation de la

# turbine éolienne

---

---

### III.1 Introduction

Une éolienne a pour fonction de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses divers composants sont conçus pour optimiser cette conversion. Dans ce chapitre, un modèle analytique de la turbine éolienne sera présenté.

### III.2 Modélisation du vent

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en première partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser, car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie.

Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité d'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer.

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$V(t) = V_0 + VT(t)$$

- ✓ Une composante turbulente du vent ( $t$ ) est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- ✓ Une composante lente  $V_0$ ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = 7,5 + 0,7 [3\sin 0,09 t + 0,7 \sin 0,42 t + 18 \sin 0,01t + \sin 0,038 t]$$

La Figure III.1 Représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 7,5m/s.

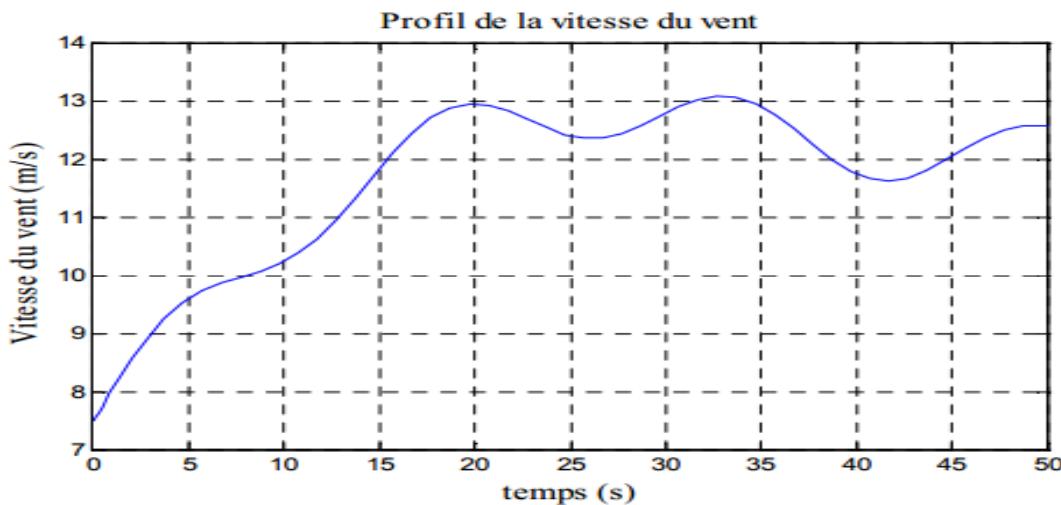


Figure III.1: Simulation du profil de la vitesse du vent.

### III.3 Modélisation de la turbine

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne se résumer comme suit :

1. La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
2. Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pâles de la turbine.
3. La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pâles et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrées précédentes

#### •LOI DE BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

D'après la théorie de Betz, la puissance du Vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \rho V_v^3 \quad (\text{III.1})$$

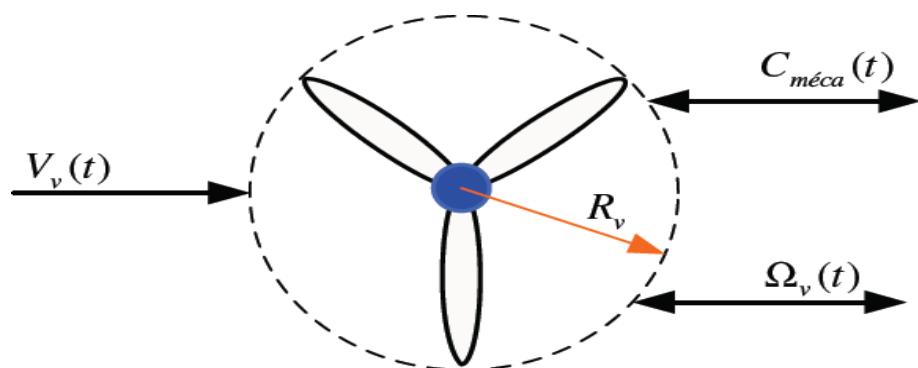


Figure III.2: Turbine tripale ( $R_v=1.25\text{m}$ )

Avec :

**$S_{éolienne}$**  : La surface balayée par l'éolienne.

**$\rho$**  : La masse volumique de l'air ( $1.08Kg/m^3$ ).

**$V_v$**  : La vitesse du vent.

La surface balayée par l'éolienne  **$S_{éolienne}$**  est donnée par la relation :

$$S_{éolienne} = \pi R^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

**$R$**  est le rayon des pâles de la turbine tripale voir figure III.2.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance fournie par le vent

**$P_{éolienne}$**  peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  **$C_p$**  :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent} \quad (\text{III.3})$$

Le coefficient  $C_p$  diffère pour chaque éolienne il dépend de l'angle d'inclinaison des pâles  $\beta_i$  et du rapport de vitesse  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_v(t)} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

**$R$** : Rayon des pâles de l'éolienne.

**$\Omega$** : vitesse de l'éolienne.

**$V_v$** : Vitesse de vent

Le coefficient de puissance  **$C_p$**  est souvent issu de mesures pratiques, qui dépendent de la vitesse spécifique  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.1567 \left[ \frac{16}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068 \cdot \lambda \quad (\text{III.5})$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$\lambda$  : la vitesse spécifique

$\beta$  : l'angle de calage (L'angle de l'orientation des pâles).

La différence entre les courbes des différentes turbines éoliennes est petite et peut être négligée dans les simulations dynamiques.

La figure III.3 montre les différentes courbes obtenues pour plusieurs angles de calage. Nous constatons que la vitesse spécifique a relativement une large gamme pour un angle de calage de  $5^\circ$ . Ceci représente un avantage pour les turbines éoliennes destinées pour fonctionner avec une large gamme de vitesses de vent. Avec l'augmentation de l'angle de calage, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance diminuent considérablement.

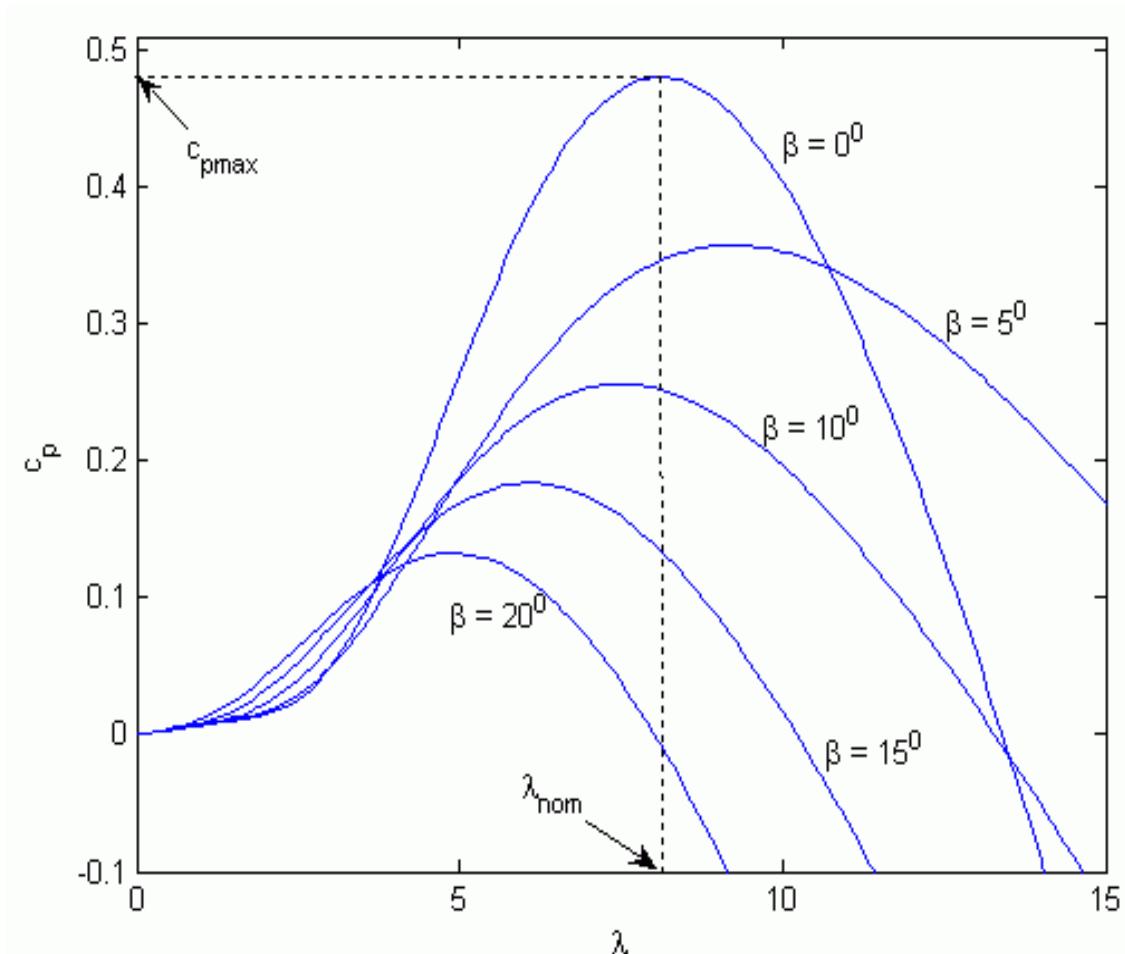


Figure III.3: Les courbes de  $C_p(\lambda)$  pour plusieurs valeurs de  $\beta$  (deg)

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue  $\lambda_{opt} = 6.9$  et vaut  $C_{opt} = 0.442$

D'après les équations (III.1) et (III.3), nous aurons :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) V^3 v \quad (\text{III.6})$$

Le couple éolien est déterminé par :

$$C_{éol} = \frac{P_{éol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot S C_p \frac{V^3}{\Omega} \quad (\text{III.7})$$

### III.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{éolienne}}{G} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

**$C_g$ :** Couple de la génératrice

**$C_{éolienne}$ :** Couple de l'éolienne

**G:** le coefficient de multiplication

$$\Omega_{mécanique} = G\Omega_{turbine}$$

(III.9)

Avec :

**$\Omega_{mécanique}$ :** Vitesse mécanique

**$\Omega_{turbine}$ :** Vitesse de rotation de la turbine

**G:** le coefficient de multiplication

### III.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission :

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mécanique}$ ) appliqué au rotor de la génératrice.

Nous avons :

$$J \frac{d\Omega_{mécanique}}{dt} = C_{mécanique} \quad (\text{III.10})$$

J: L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des arbres et du multiplicateur.

Le couple mécanique, appliqué au rotor de la génératrice, est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor.

Nous avons :

$$C_{mécanique} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{III.11})$$

Avec :

**$C_g$ :** Le couple issu du multiplicateur.

**$C_{em}$ :** Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

**$C_f$ :** Le couple résistant dû aux frottements.

Nous avons :

$$C_f = f \Omega_{\text{mécanique}} \quad (\text{III.12})$$

Avec:

$f$ : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ .

### III.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Les stratégies de commande des systèmes éoliennes de moyennes et grands puissances à vitesses variables et à régulation de puissance « Pitch » utilisées notamment pour les aérogénérateurs Vestas et Gamesa de dernière génération sont basées sur les deux courbes illustrées sur la figure III.4, qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine. [4]

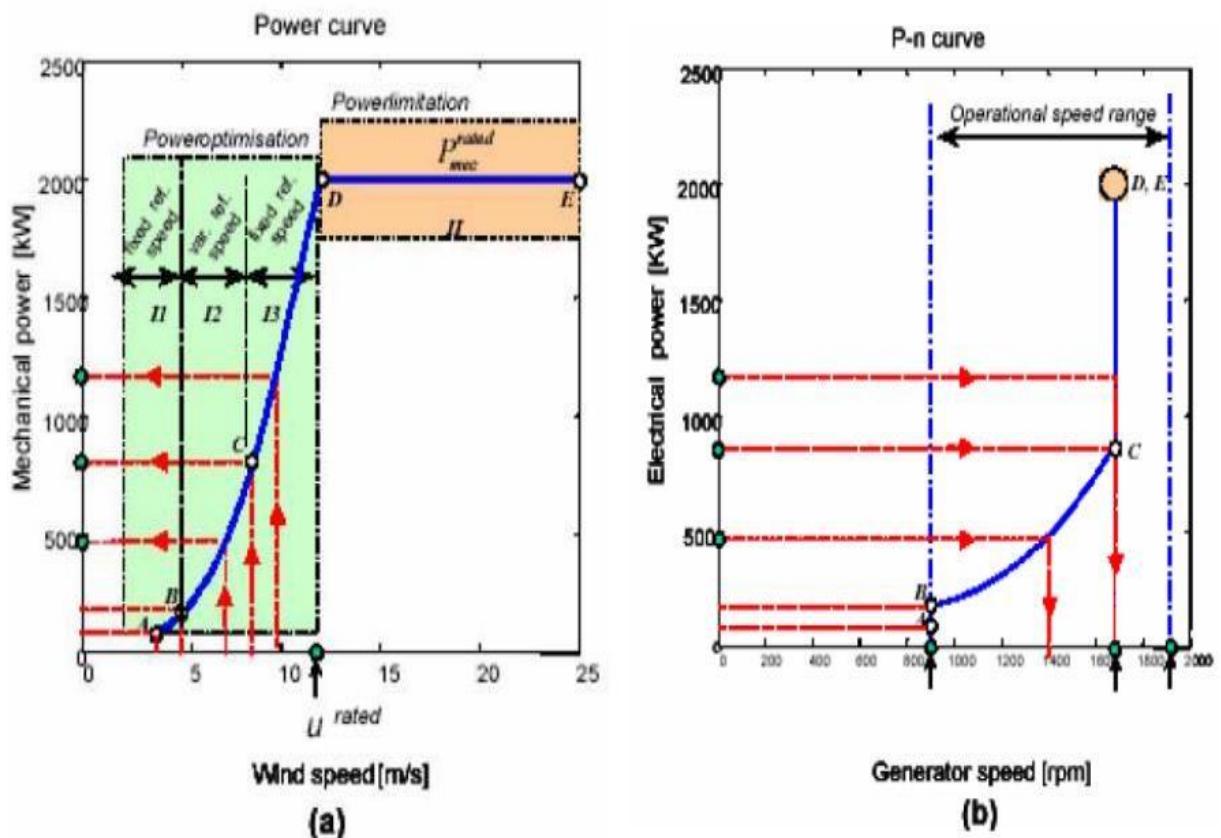


Figure III.4 : Caractéristique puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation. [1]

(a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.

(b) Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

La caractéristique puissance - Vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (Figure III.5).

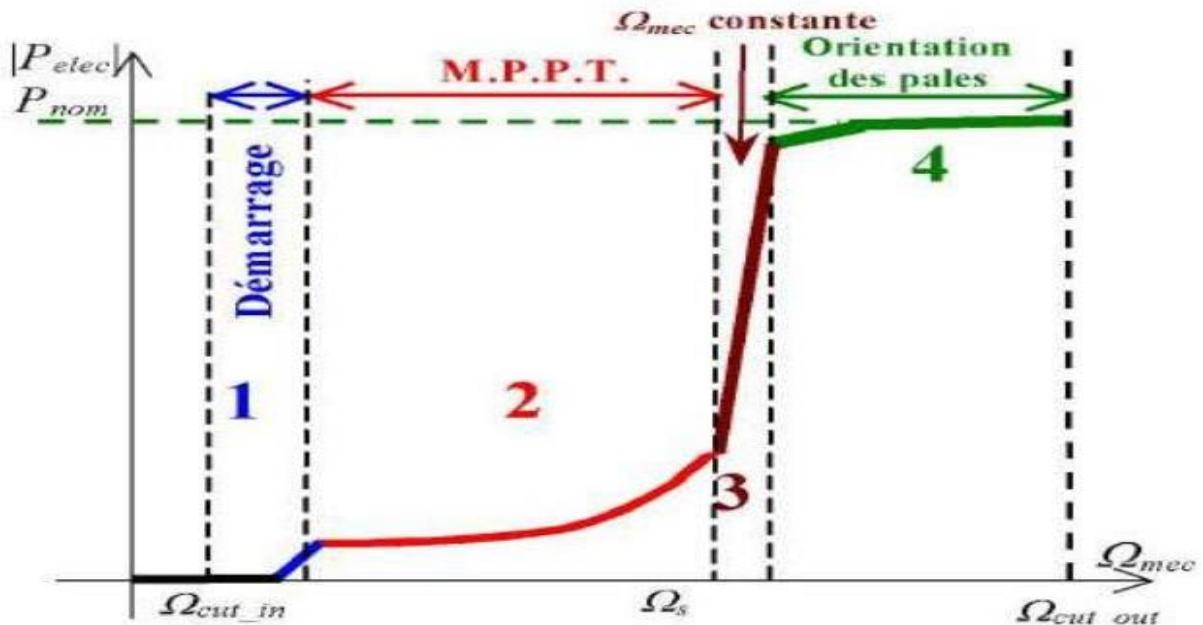


Figure III.5 : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance. [3]

- ⊕ **Zone 1 :** C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut-in}$ . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle éolienne a démarré).
- ⊕ **Zone 2 :** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pâle est maintenu constant à sa valeur minimale ( $\beta=2^\circ$ ) afin d'obtenir un  $C_p$  maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.
- ⊕ **Zone 3 :** Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à **90%** de la puissance nominale  $P_{nom}$ .
- ⊕ **Zone 4 :** Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$  une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pâles : Le Pitch contrôle. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pâles se fixe à  $90^\circ$ . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

### III.7 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (\text{III.13})$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = K_{as} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{III.14})$$

**K<sub>ass</sub>**: Régulateur de vitesse.

**Ω<sub>ref</sub>**: Vitesse de référence.

Selon l'équation (III.4), la vitesse de rotation de la turbine est égale à:

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda v}{R} \quad (\text{III.15})$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$  peut se déduire de l'équation (III.15) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (\text{III.16})$$

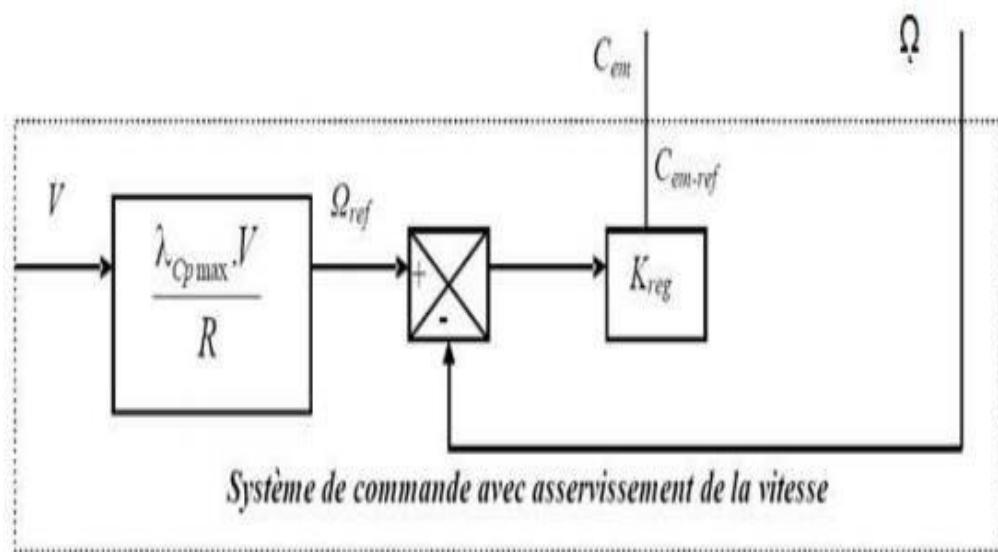


Figure III.6: MPPT avec asservissement de la vitesse.

### III.8 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au contrôle des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine, varient très peu en régime permanent.

Ceci, nous conduit à déduire que :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f \approx 0$ .

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statistique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} \quad (\text{III.17})$$

Equation (III.17) donne:-

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (\text{III.18})$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :  $C_{em\_ref} = \frac{C_{aér\_est}}{G}$  (III.19)

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aér\_est} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimé}} V_{estimé}^3 \quad (\text{III.20})$$

**$\Omega_{turbine\_estimé}$**  : est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{III.21})$$

**$V_{estimé}$** : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donnée par l'expression (III.22) :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine\_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III.22})$$

En utilisant les formules du (III.22) au (III.18), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{III.23})$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur  $\lambda_{opt}$  Optimale correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale de la manière suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{III.24})$$

En mettant :

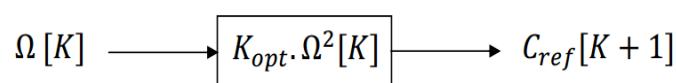
$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{1}{G^3} \quad (\text{III.25})$$

L'expression (III.24) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em\_ref} = k_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (\text{III.26})$$

L'algorithme **MPPT** contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée sur la figure III.6

Figure III.7: Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.



### III.9 Résultats de simulation

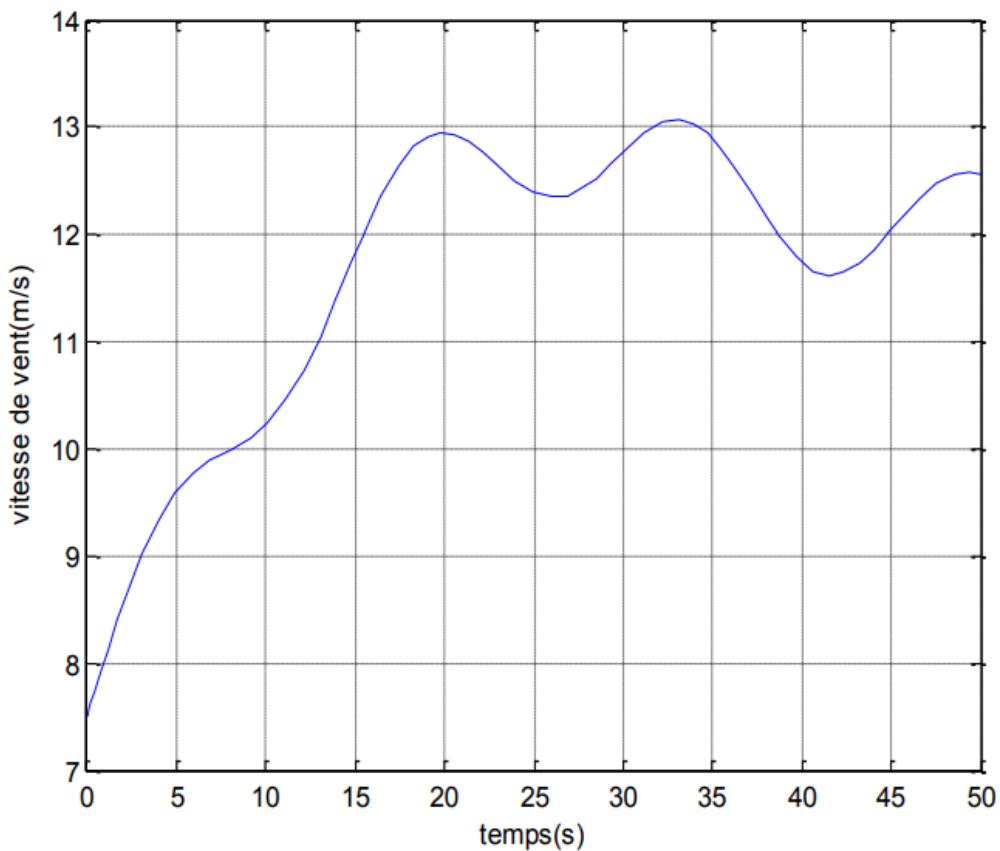


Figure III.8: Simulation du profil de la vitesse du vent.

**Sans asservissement de vitesse :**

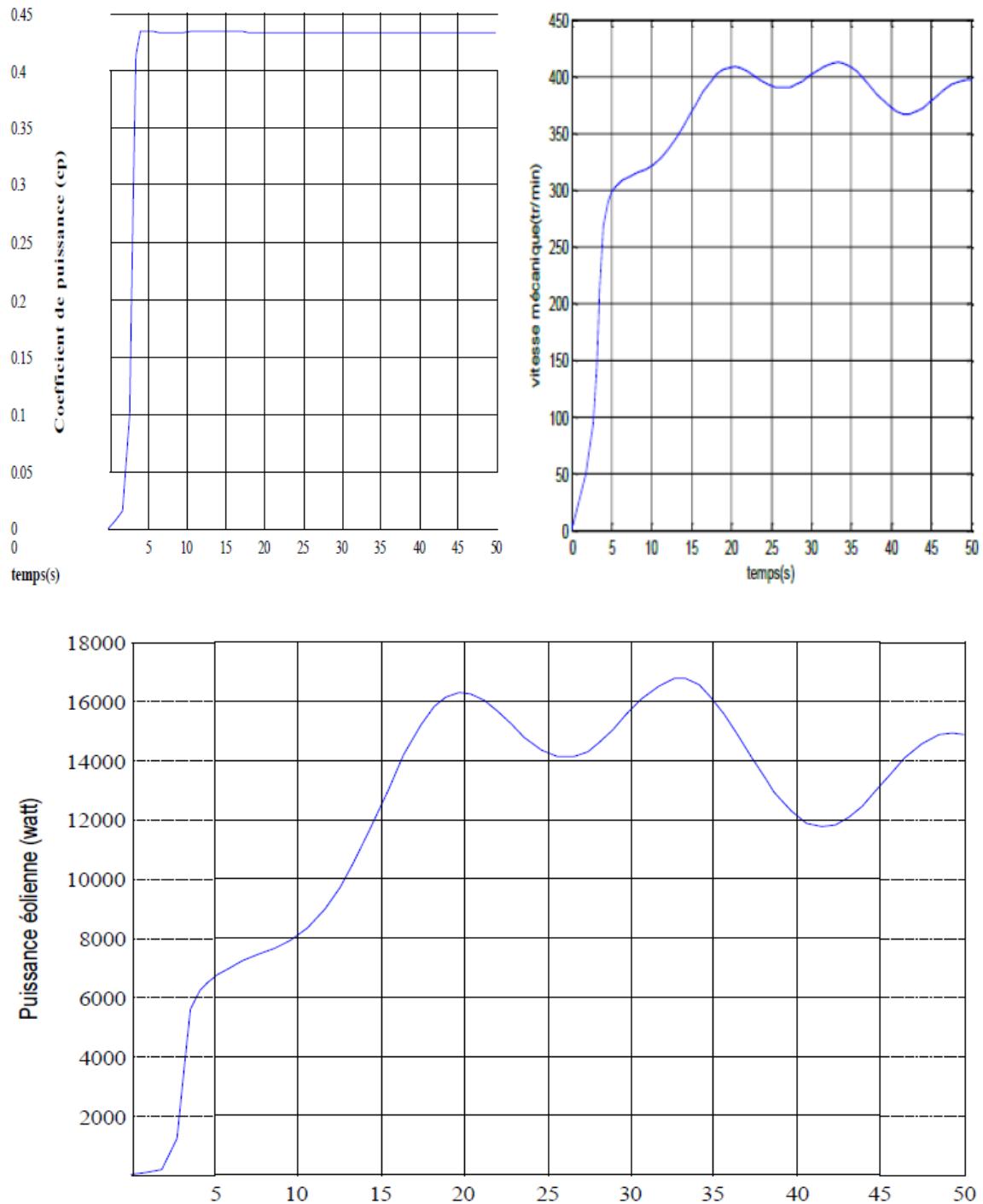


Figure III.9: Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse

Les résultats de simulation correspondant à cette stratégie de commande montrent que les variations de la puissance mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

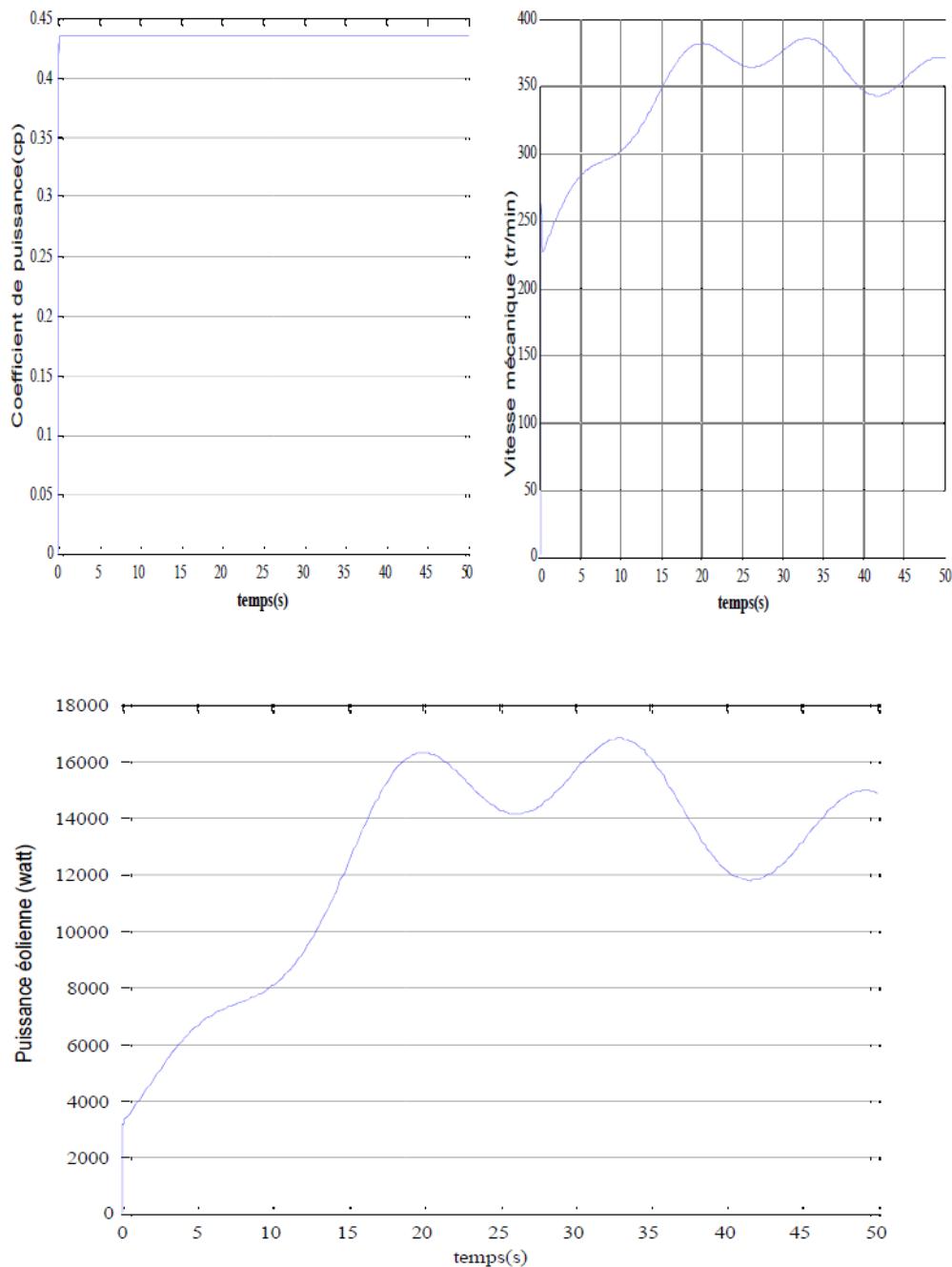
**Avec asservissement de vitesse :**


Figure III.10: Résultat de simulation de la turbine avec asservissement de la vitesse.

Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermé de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Alors la réponse de la turbine ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue est donc plus importante.

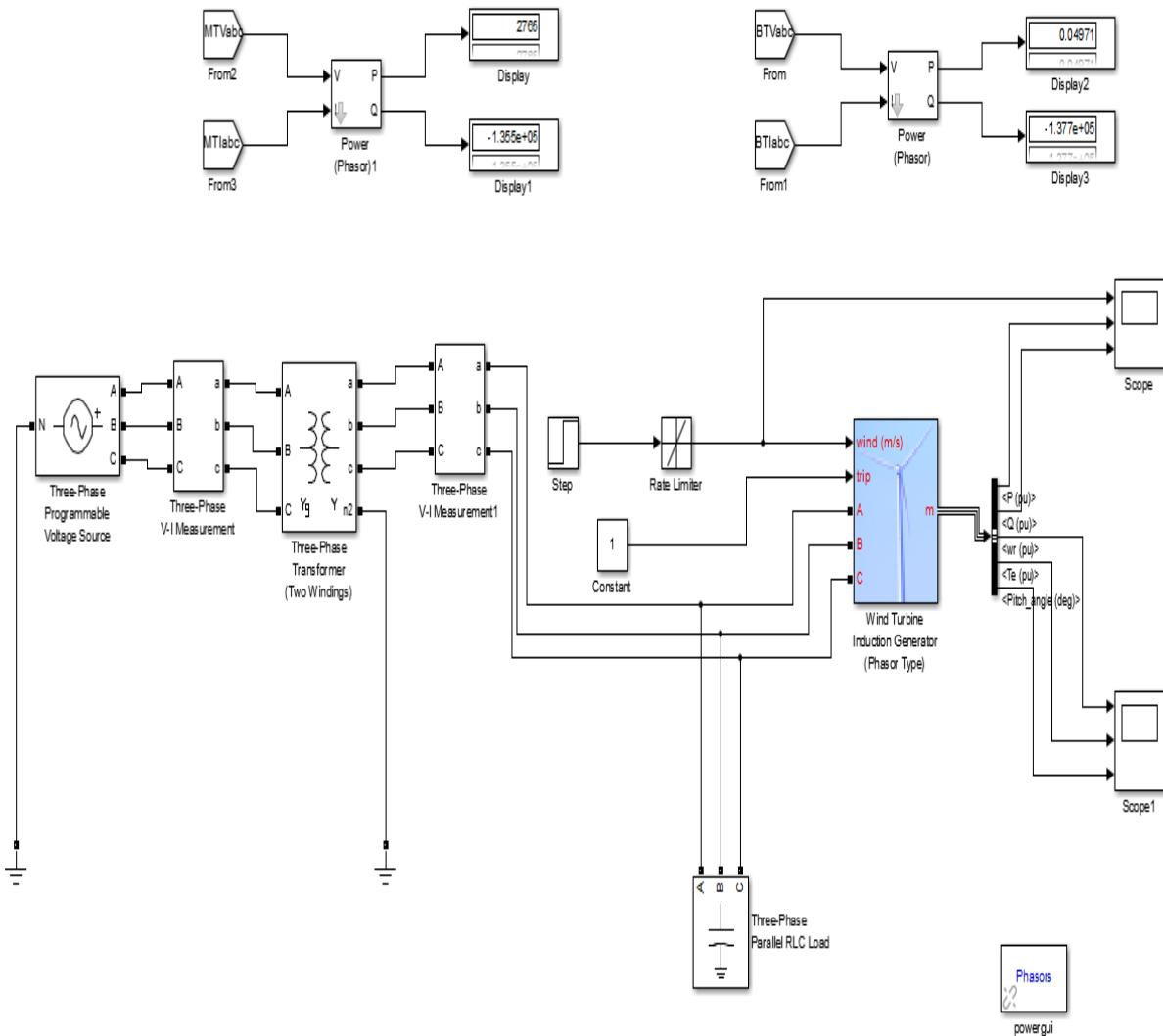


Figure III.11: Schéma bloc de la Turbine.

### III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la modélisation du premier élément de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, à savoir la turbine. L'énergie mécanique produite par la turbine sera transmise à l'arbre de la génératrice pour générer de l'énergie électrique.

Nous avons également abordé les stratégies de commande d'une turbine visant à extraire un maximum d'énergie (technique MPPT). Dans le chapitre suivant, nous étudierons le système de stockage d'énergie électrique.

---

---

# Chapitre IV:

# Système de stockage

# d'énergie

---

---

#### IV.1 Introduction

L'énergie éolienne, produite à partir de la force du vent, est devenue une composante essentielle du mix énergétique dans de nombreuses régions du monde. Cependant, la nature intermittente et imprévisible du vent pose un défi majeur pour l'intégration efficace de cette source d'énergie dans les réseaux électriques.

Le stockage de l'énergie est aujourd'hui reconnu comme un élément clé de la chaîne d'approvisionnement énergétique moderne. Cela est principalement dû au fait qu'il peut renforcer la stabilité du réseau, augmenter la pénétration des ressources énergétiques renouvelables, améliorer l'efficacité des systèmes énergétiques, conserver les ressources énergétiques fossiles et réduire l'impact de la production d'énergie sur l'environnement.

Pour surmonter cette limitation et maximiser l'utilisation de l'énergie éolienne, le stockage de l'électricité produite par les éoliennes joue un rôle crucial.

Le stockage de l'énergie électrique produite par les éoliennes permet de lisser la production d'électricité afin de répondre à la demande en énergie de manière constante, indépendamment des fluctuations de la vitesse du vent. Cette intégration transparente de l'énergie éolienne dans le réseau électrique est rendue possible grâce à diverses technologies de stockage.

Les éoliennes produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées à des vents suffisamment forts, mais cette production peut être excédentaire par rapport à la demande d'électricité à un moment donné. Le stockage de cette électricité excédentaire permet de la conserver pour une utilisation ultérieure, lorsque la production éolienne est insuffisante pour répondre à la demande.

Plusieurs méthodes de stockage sont utilisées pour stocker l'électricité produite par les éoliennes : batteries, stockage thermique, stockage hydraulique, stockage par air comprimé, stockage chimique, stockage mécanique.

Chaque méthode de stockage présente des avantages et des inconvénients en termes de coût, d'efficacité, de capacité de stockage et de durabilité, et leur utilisation peut varier en fonction des conditions locales, des besoins énergétiques et des ressources disponibles. En général, une combinaison de différentes technologies de stockage est souvent nécessaire pour répondre aux besoins de stockage d'énergie renouvelable à grande échelle.

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière. Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le

stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité

Dans notre cas on va étudier le stockage par batteries.

## **IV.2 Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie**

Le stockage d'énergie présente de nombreux avantages. C'est important dans la gestion de l'énergie. Il contribue à réduire le gaspillage d'énergie et à augmenter l'efficacité d'utilisation de l'énergie des systèmes de traitement. Le stockage de formes d'énergie secondaire telles que la chaleur et l'électricité contribue à réduire la quantité d'énergie primaire consommée (combustibles fossiles) pour les générer. Cela, non seulement réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre ainsi que le réchauffement planétaire associé, mais contribue également à la préservation des combustibles fossiles considérés comme étant épuisables. Il peut également jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables, propres et intermittentes. Des ressources énergétiques telles que l'énergie éolienne, les courants de marée marins menant au réseau et facilitent le transfert de charge. Le stockage d'énergie aide à la planification, à l'exploitation et à la régulation de la fréquence du réseau électrique. Il contribue à maintenir la stabilité des systèmes énergétiques, à améliorer la qualité de l'énergie dans les systèmes de micro réseaux et à faire correspondre la demande à l'offre. [15-16]

## **IV.3 Caractéristique des batteries**

### **IV.3.1 Description d'une Batterie**

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement. Destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif. [16]

Une cellule est constituée de trois éléments de base :

- Une électrode positive (cathode),
- Une électrode négative (anode),
- Un électrolyte

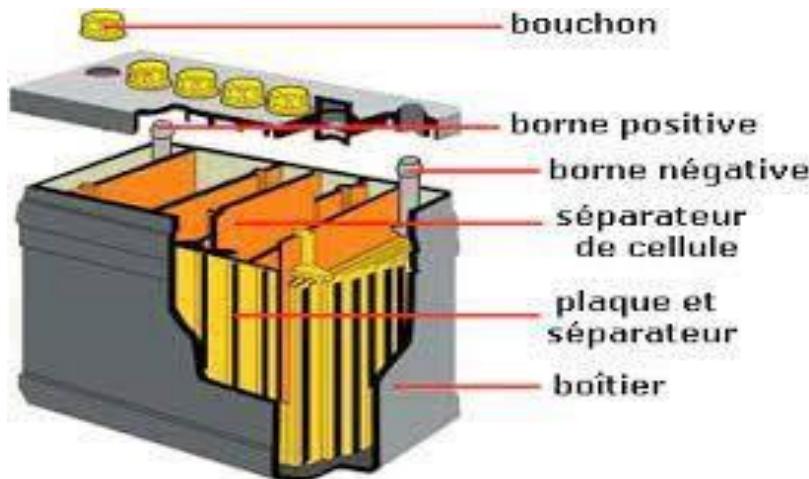


Figure IV.1: Description de l'intérieur d'une batterie. [16]

### IV.3.2 Stockage électrochimique

Un stockage électrochimique fait souvent référence à une batterie qui est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'éléments électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte (Figure IV-1). C'est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile.

Aux interfaces électrodes-électrolyte de l'accumulateur interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes :

- au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue une réaction d'oxydation de potentiel redox E1.
- à la cathode (électrode positive en décharge), les électrons libérés à l'anode transitent par le circuit extérieur pour atteindre la cathode où s'opère une réaction de réduction de potentiel redox E2.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydo-réduction.

Le transport engendre une force électromotrice  $E = E_2 - E_1$ . Durant la charge, le phénomène s'inverse. La (figure IV-2) montre le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique. [15]

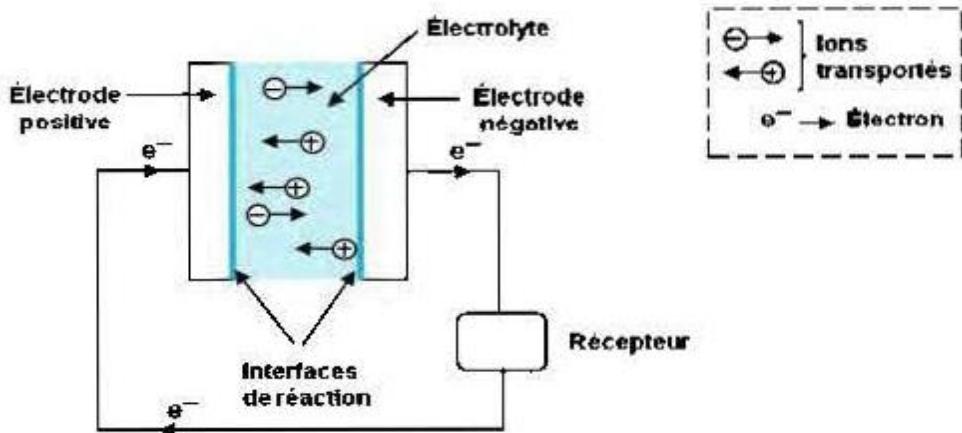


Figure IV-2 : Principe d'un accumulateur électrochimique [16]

### IV.3.3 Capacité de stockage

La capacité de stockage exprimée en ampères-heures est la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de la batterie, initialement chargée, avec un courant constant. La nomenclature utilisée pour designer la capacité de stockage obtenue pour une décharge de  $n$  heures est  $Cn$ . De manière générale, lorsque l'on parle d'une capacité  $C5$ , cela revient à évoquer la quantité de charge obtenue lors d'une décharge de 5 heures. De même, lorsque l'on parle d'une capacité  $C0.5$ , cela revient à designer la quantité charge mesurée pendant une décharge de demi heures. [16]

Le courant de décharge, appelés aussi régime de décharge, utilise la même nomenclature que la capacité  $Cn$  est :

$$In = \frac{Cn}{n} \quad (\text{IV.1})$$

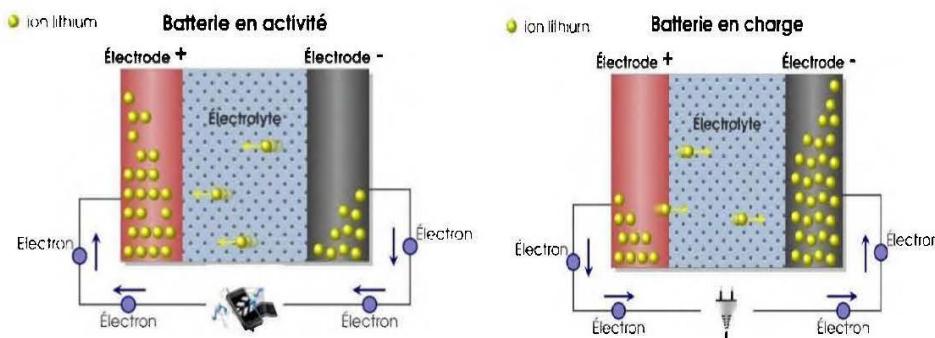


Figure IV.3: Fonctionnement d'une batterie [16]

#### **IV.3.4 Rendement**

##### **IV.3.4.1 Rendement faradique**

Le rendement en ampère-heure (ou faradique) est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge Cd et la quantité d'électricité fournie lors de la charge Cc. Pour la batterie au plomb il est supérieur à 90%. [16]

$$nf = Cd/Cc \quad (\text{IV.2})$$

##### **IV.3.4.2 Rendement énergétique**

Est analogique à celle du rendement faradique à la différence que les grandeurs mises en jeu sont des énergies et non des quantités de charge. [16]

$$n_e = E_d/E_c \quad (\text{IV.3})$$

#### **IV.3.5 Tension à vide**

La tension à vide (open circuit voltage) désigne la tension d'équilibre de la batterie au repos. Elle est définie comme la différence des potentiels d'équilibre entre les deux électrodes. [16]

#### **IV.3.6 Durée de vie**

Les batteries vont voir leurs performances décroître durant toute leur vie. Celle-ci est considérée en fin de vie lorsque leurs performances ne répondent plus à celles nécessaires pour l'application visée.

Les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25°C. Elle varie de 2 à 7 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10°C de la température d'utilisation. [15]

L'état de charge (ou SoC pour « State of Charge » en anglais) est le rapport de la charge disponible en Ah sur la capacité de la batterie. Par exemple, quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (SoC) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le SoC vaut 0%. La définition du SoC n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du SoC.

$$SoC = \frac{\text{Charge disponible en Ah}}{\text{Capacité de la batterie}} \quad (\text{IV.4})$$

La profondeur de décharge (ou DoD pour « Depth of Discharge » en anglais) est aussi un indicateur de niveau de charge de la batterie. Son expression est donnée par :

$$DoD = 1 - SoC \quad (\text{IV.5})$$

#### IV.3.7 Autodécharge des batteries

L'autodécharge se produit toujours, même si la batterie n'est connectée à rien. Le taux d'auto-décharge dépend de la température ambiante et du type de batterie. À des températures supérieures à 55°C, l'autodécharge est encore plus rapide. Ces températures peuvent être atteintes si la batterie est stockée dans un garage ou une remise lorsqu'il fait chaud. Une des idées reçues concernant le stockage des batteries est que, si on laisse une batterie sur un sol en béton, elle se déchargera rapidement. Cela était vrai il y a plus de trente-cinq ans, lorsque les boîtiers de batterie étaient en caoutchouc dur. En raison de l'humidité du béton, ce type de batterie se déchargeait directement dans le sol en béton. Toutefois, les boîtiers des batteries modernes sont en plastique de polypropylène et peuvent être stockés sur du béton sans crainte d'autodécharge excessive. [15]

#### IV.3.8 Dimensionnement d'une batterie

Dimensionner un système de stockage c'est trouver la taille optimale permettant, compte tenu de la production et éventuellement des prévisions, de maximiser (ou minimiser) des critères de performance prédéfinis. Une batterie utilisée avec une éolienne est une batterie à décharge lente. Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes. Pour une installation éolienne, la capacité d'une batterie est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui signifie le débit total d'énergie de la batterie dans une situation donnée (5heures, 10heures, etc.). Les données nécessaires à la détermination de la capacité de la batterie en plus de l'énergie totale journalière sont : son rendement, sa tension nominale, sa profondeur de décharge et son autonomie.

Si on néglige les pertes, la capacité de stockage d'un accumulateur en (Ah) est donc donnée par les formules (IV.5.1), (IV.5.2), (IV.5.3) :

$$C(Ah) = \frac{C_{jr} \times T}{U_{acc} \times \eta \times DOD} \quad (\text{IV.5.1})$$

$$N_{bs} = \frac{U_u}{U_{bat}} = \text{nombre de batteries en série} \quad (\text{IV.5.2})$$

$$N_{bp} = \frac{C_{tot}}{C_u} = \text{nombre de batteries en parallèle} \quad (\text{IV.5.3})$$

Avec  $C$  Capacité de stockage ( $Ah$ )

$C_{jr}$  : Consommation journalière requise (Wh)

$T$  : Autonomie (h)

$U_{acc}$  : Tension de l'accumulateur

$\eta$  : Rendement de l'accumulateur

$DOD$  : Profondeur de décharge de la batterie

$N_{bs}$  : nombre de batteries en série

$U_u$  : tension d'utilisation

$U_{bat}$  : tension de la batterie

$N_{bp}$  : nombre de batteries en parallèle

$C_{tot}$  : capacité totale de l'accumulateur

$C_u$  : capacité utile

Afin de ne pas endommager la batterie, un contrôleur de batterie appelé aussi régulateur de tension est souvent associé au système de stockage par batterie. Le régulateur permet de protéger la batterie en limitant un certain seuil minimum pour éviter les décharges profondes et un seuil maximum pour éviter les surcharges au niveau des batteries. Néanmoins la connaissance de quelques règles ou informations est nécessaire avant l'utilisation des batteries :

- Il est recommandé par exemple de bien vérifier que le cyclage est clairement indiqué par le fabricant, car ce dernier indique la durée de vie de la batterie.
- La détermination de la tension de stockage : car plus le besoin d'énergie est élevé, plus on doit utiliser une tension élevée afin de diminuer les pertes.
- Le montage des batteries se fait en série ou en parallèle pour augmenter la tension ou la capacité respectivement (figure IV-4).
- Plus la rapidité de la décharge n'est importante, plus la capacité réelle de la batterie sera faible.
- Par exemple une batterie de 50Ah en C100 aura réellement une capacité de 50 Ah si la décharge prend 100 heures.

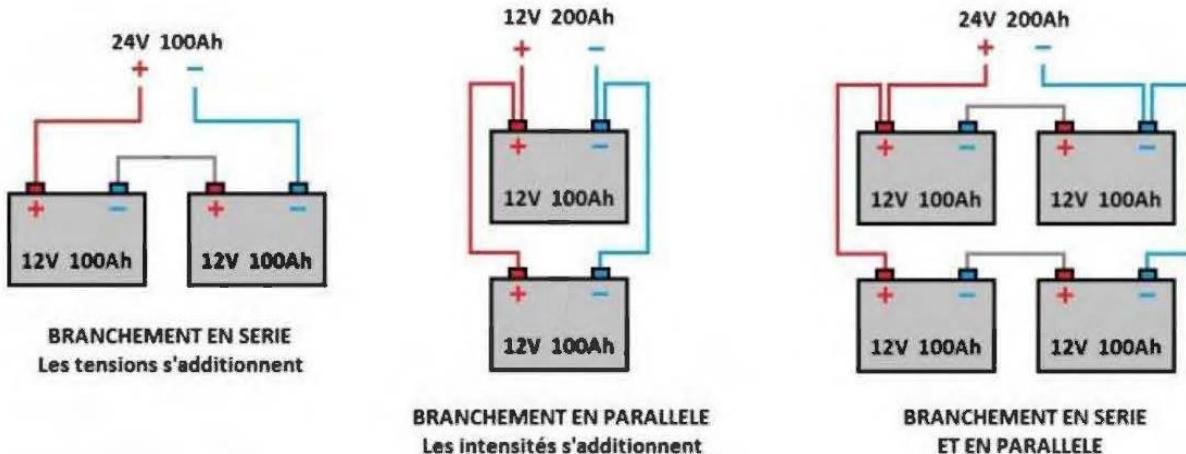


Figure IV.4: Différents montages possibles des batteries [16]

#### IV.4 Etat de Stockage

Afin d'établir un modèle fiable et capable de prédire le fonctionnement, dans des applications de l'énergie on a utilisé dans ce travaille mathématique de la batterie CIEMAT (Centro de Investigations Energétiques Medioambientales y Technologiques).

##### IV.4.1 Modèle CIEMAT

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur de la batterie.

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (IV.5) 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 (température et état de charge).

Le modèle mathématique donné par l'équation (IV.6), décrivant au mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge est donné ci-après :

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{bat} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

U<sub>bat</sub> : Tension de la batterie.

n<sub>b</sub> : Nombre de cellule constituant la batterie.

E<sub>b</sub> : La force électromotrice, elle est fonction de l'état de charge de la batterie noté (EDC).

I<sub>bat</sub> : Courant de la batterie.

R<sub>i</sub> : La résistance interne d'une cellule de la batterie, elle est variable en fonction de l'état de charge.

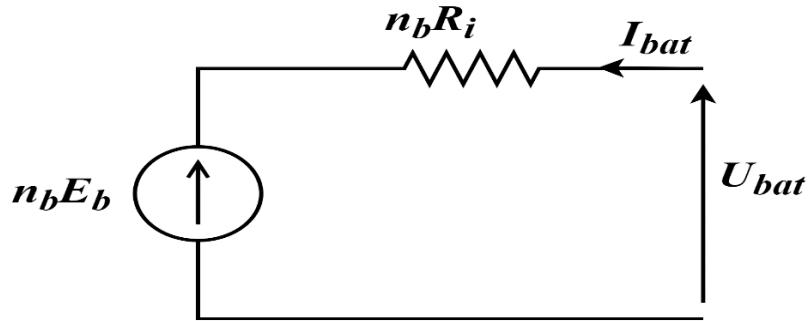


Figure IV.5 : Schéma équivalent de nb éléments en série.

#### IV.4.1.1 La Capacité

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, selon les modèles proposés dans la littérature, il faudrait tenir compte de la température. Le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge  $I_{moy}$ , est donné par l'équation suivante. [15]

$$C_{bat} = C_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left[ \left( \frac{I_{Moy}}{I_{10}} \right)^{0.9} \right]} (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \quad (\text{IV.7})$$

Le modèle de la capacité est établi à partir de l'expression du courant  $I_{10}$  correspondant au régime de fonctionnement  $C_{10}$  dans lequel  $\Delta T$  est l'échauffement (supposé identique pour tous les éléments de la batterie) par rapport à une température ambiante qui est égale à  $25^{\circ}\text{C}$ .

Avec:

$C_{10}$ : Capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

$I_{10}$  : Courant de décharge en 10 heures.

$\Delta T$ : Echauffement de la batterie

#### IV.4.1.2 L'état de charge

La capacité  $C_{bat}$  sert de référence pour son évaluation, il est formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie «  $Q_d$  »

$$EDC = 1 - \left( \frac{Q_d}{C_{bat}} \right) \quad (IV.8)$$

L'évolution temporelle de  $Q_d$  dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

$$Q_d = I_{bat} \cdot t \quad (IV.9)$$

Avec  $t$  la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{bat}$ . On définit aussi l'état de décharge de la batterie (profondeur de décharge), il est complémentaire à l'état de charge.

$$EDD = 1 - EDC$$

#### IV.4.1.3 Tension de décharge

L'expression de la tension de décharge de la batterie est établie à partir de l'équation (IV.10). Elle est clairement liée aux éléments internes de la batterie qui sont la force électromotrice, la résistance interne et de l'influence des paramètres.

(IV.10)

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} 0.02 \right) (-0.007\Delta T)$$

#### IV.4.1.4 Tension de charge

L'équation de la tension en charge avant l'apparition du phénomène de gassing est similaire à celle obtenue en décharge. En effet, elle présente la même structure faisant apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne.

Lorsque la tension aux bornes de la batterie atteint  $V_g$  dite tension de gassing, alors l'évolution de la tension présente une brusque augmentation, caractéristique du dégagement d'hydrogène et d'oxygène, c'est le phénomène de gassing, mais on ne prend pas en considération la tension du gassing.

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] \cdot n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (IV.11)$$

#### IV.4.1.5 Résistance de la batterie

La résistance interne de la batterie n'est pas une valeur constante, elle varie selon l'état de charge, la température et l'état de vieillissement. De façon générale, la résistance interne d'une batterie augmente quand l'état de charge croît. De même, pour un état de charge donné, la résistance interne d'une batterie augmente quand la batterie vieillit.

#### IV.4.1.5.1 Résistance en décharge :

L'équation de la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (\text{IV.12})$$

#### IV.4.1.5.2 Résistance en charge

Pendant la charge la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_c = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (\text{IV.13})$$

#### IV.4.1.6 Rendement de charge et de décharge

Le rendement coulombien en décharge est supposé être 100% ( $n_{cb-d}=1$ ). Le rendement coulombien en charge il dépend fortement de taux de charge. Il a une valeur voisine de 100% pour de faibles courants de charge et un faible état de charge, puis il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge

$$n_{cb} = 1 - \exp(20.73/(I_{bat}/I_{10})) (ECD - 1) \quad (\text{IV.14})$$

#### IV.4.2 Résultats de simulation

Les simulations sont effectuées pour étudier l'influence des paramètres et leur variation sur le comportement du système de stockage qui est la batterie voir Figure IV.6.

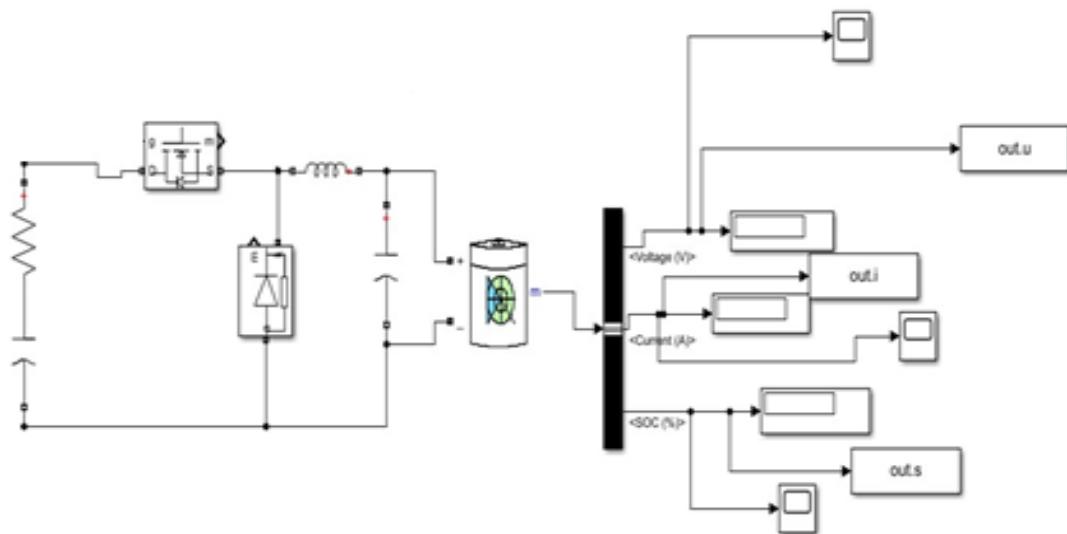


Figure IV.6 : Schéma bloc du modèle batterie

#### IV.4.2.1 Caractéristiques de la batterie

Les figures (IV.7), (IV.8) et (IV.9) représentent respectivement la tension de sortie de la batterie ( $V_{bat}$ ), le courant de la batterie ( $I_{bat}$ ) et l'état de charge (EDC) dans les conditions standard( $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

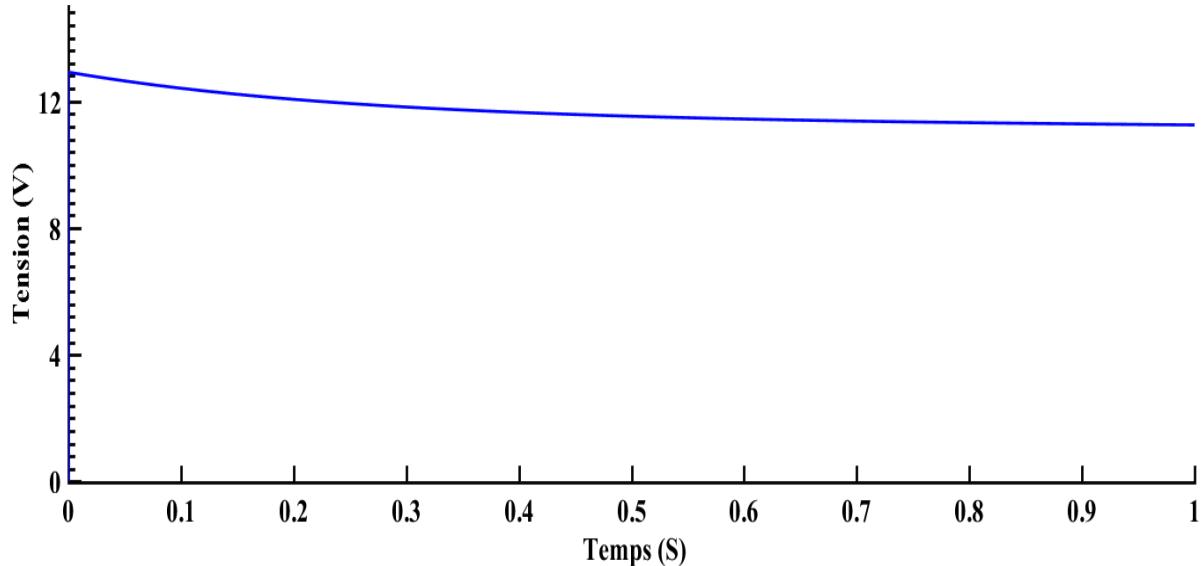


Figure IV.7: Tension de batterie dans les conditions standards

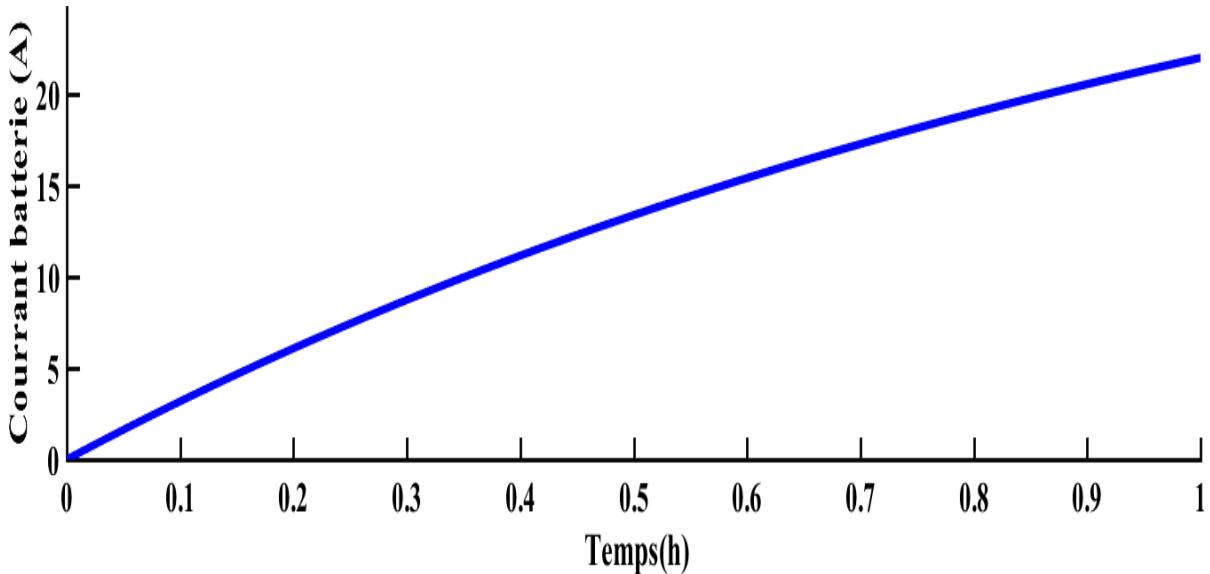


Figure IV.8: Courant de batterie dans les conditions standard

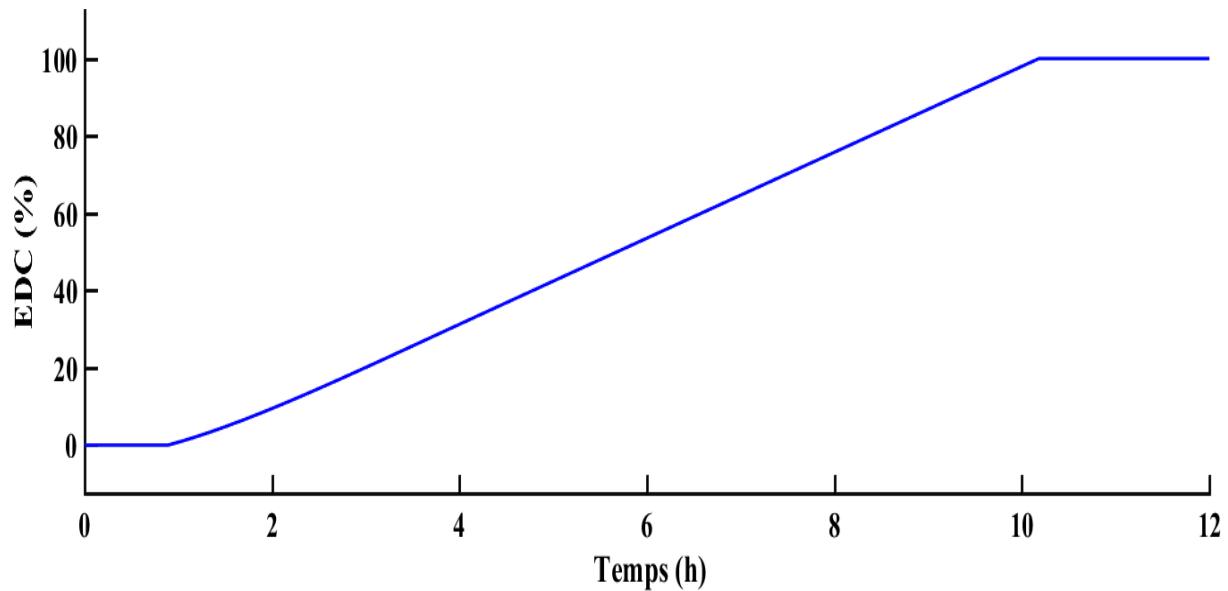


Figure IV.9: Etat de charge (EDC) de la batterie dans les conditions standard

#### IV.4.2.2 Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie

Les figures (IV.10) et (IV.11) représentent les variations de la tension et l'état de charge de la batterie pour différentes valeurs de la température ( $T=25, 45, 50^{\circ}\text{C}$ )

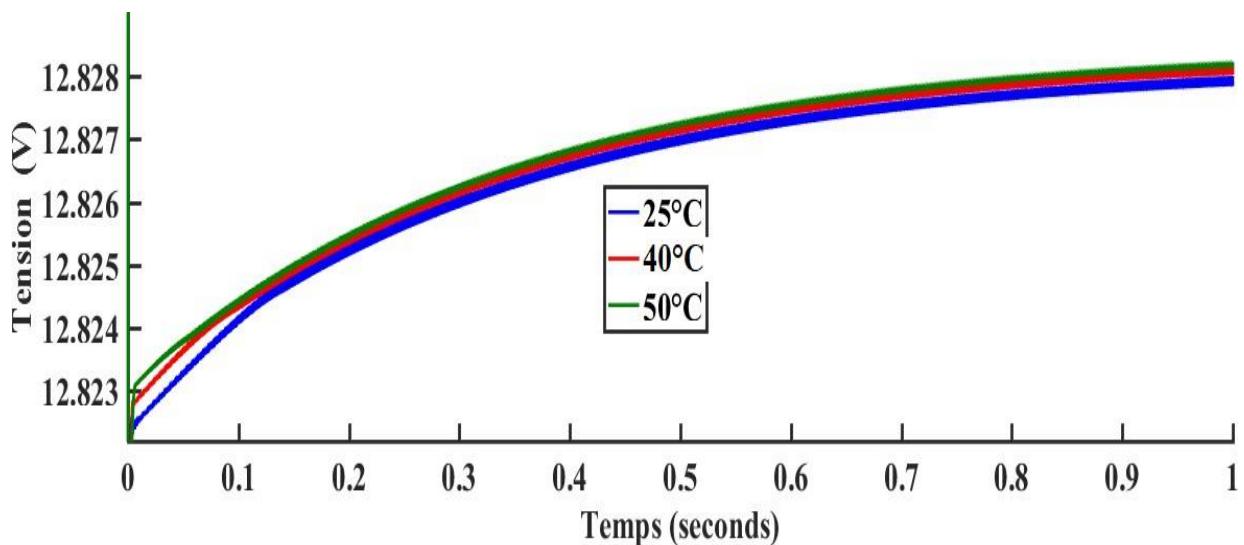


Figure IV.10 : Influence de la température sur la caractéristique tension de batterie

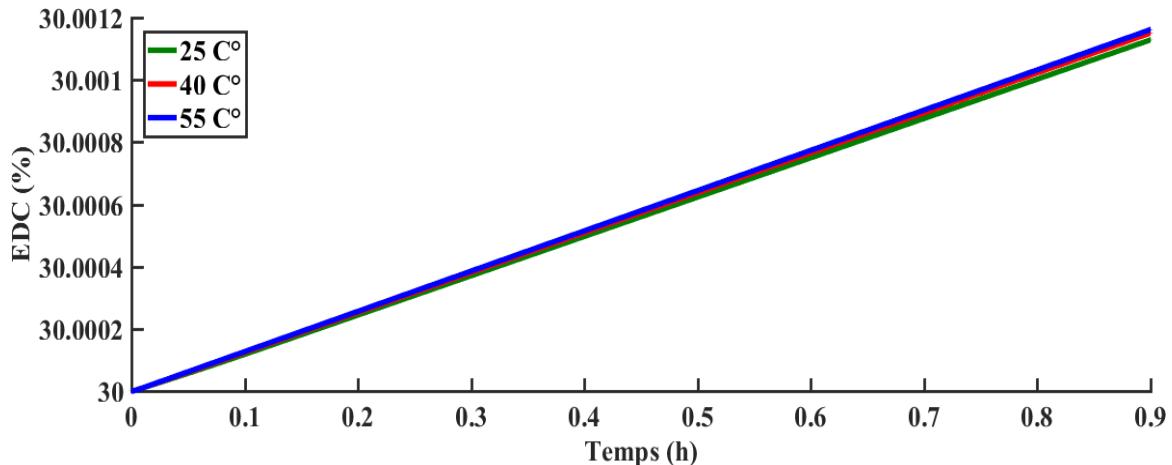


Figure IV.11: Influence de la température sur la caractéristique de l'EDC de batterie

D'après ces figures on constate que la tension et l'état de charge de batterie ne sont pas beaucoup affecté par le changement de la température.

#### IV.4.2.3 Influence de la résistance sur les caractéristiques de batterie

Les figures (IV.12) et (IV.13) montrent les variations de la tension et l'état de charge de la batterie pour différentes valeurs de résistance interne de la batterie ( $R=1,15, 50 \Omega$ ) dans les conditions standard ( $G=1000/m^2$  et  $T_a=25^\circ C$ ).

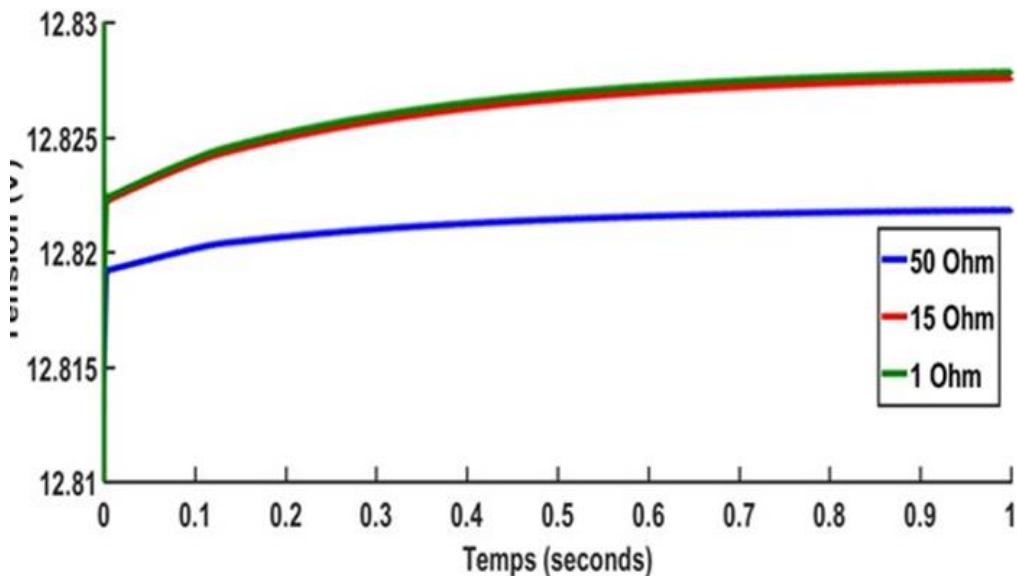


Figure IV.12: Influence de la résistance sur la caractéristique tension de batterie

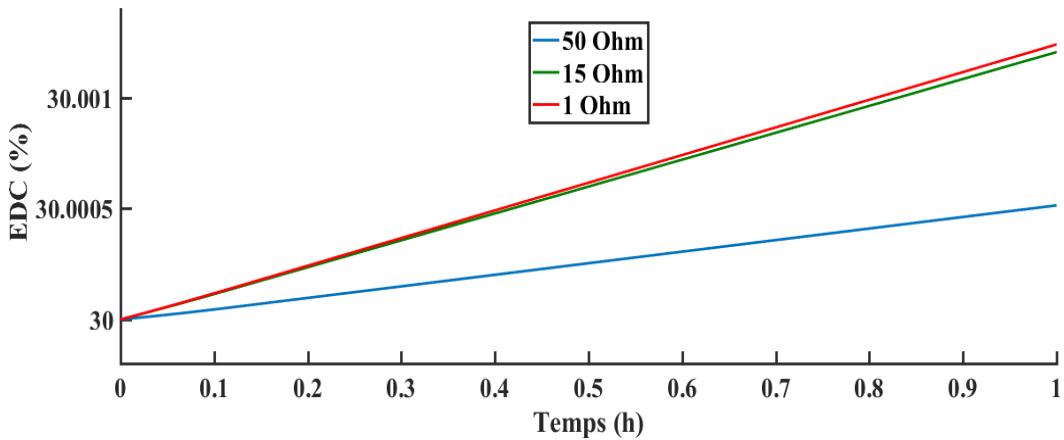


Figure IV.13: Influence de la résistance sur la caractéristique l'EDC de batterie

D'après ces résultats, on remarque que la tension de batterie augmente lorsque la résistance interne diminue. On remarque aussi que le temps de charge diminue lorsque la résistance interne diminue.

#### IV.5.1 Intégration du système de stockage dans un système éolien

La mise en place des systèmes éoliens de production d'énergie électriques renouvelable associés aux systèmes de stockage peut faire face à certaines problématiques. Par exemple, si l'on veut satisfaire une certaine demande énergétique en tout temps, le système de stockage doit garantir une certaine autonomie afin de répondre aux besoins de la charge pendant les périodes moins ventilées. Pour continuer à assurer l'équilibre de l'offre et de la demande en électricité à tout moment, il est donc indispensable de considérer plusieurs aspects liés à la production et au comportement du système de stockage.

Le stockage de l'électricité vise tout d'abord à répondre à quatre problématiques Principales :

- La récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à une demande à un instant donné ;
- La fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre ;
- La fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnelle ;
- La fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

Néanmoins, le choix d'une technologie de stockage (électrochimique, par exemple) dépend d'un certain nombre de critères à considérer :

- 1.** La puissance disponible ;
- 2.** Le nombre de cycles et profondeur de décharge ;
- 3.** La sécurité du système ;
- 4.** La densité de stockage ;
- 5.** La maturité de la technologie
- 6.** Le coût (investissement, fonctionnement et maintenance), etc.

Il est donc nécessaire de bien comprendre les phénomènes liés à l'utilisation, au fonctionnement et à la gestion d'un système de stockage pour optimiser l'état de santé et la durée de vie des accumulateurs. Ceci passe tout d'abord par une estimation des besoins de la charge et un dimensionnement des différents sous-ensembles du système éolien et système de stockage (SS).

#### **IV.5.2 Faisabilité du système éolien-stockage**

L'électrification des zones rurales est devenue un instrument efficace pour le développement durable de ces régions, tant dans les pays en développement que dans les pays développés. Au cours de ces dernières années, un intérêt croissant a été observé dans le déploiement à moyenne et à grande échelle de systèmes d'énergie renouvelable, dans un but d'électrification des zones rurales de plusieurs pays du monde.

La déréglementation des systèmes de production d'énergie a occasionné des installations autonomes ou le couplage des énergies nouvelles aux réseaux interconnectés.

Technologies	Avantages	Inconvénients
Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne génère aucun gaz à effet de serre et ne produit pratiquement aucun déchet ;</li> <li>- Les frais de fonctionnement sont limités et les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme ;</li> <li>- La ressource principale (le vent) est à 100% renouvelable et son exploitation ne comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières ;</li> <li>-Impossibilité d'emmagasinage de la source (le vent) ;</li> <li>-La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie ;</li> <li>-Des dispositifs externes de stabilisation sont en général nécessaires...</li> </ul>

Tableau IV.1: Avantages et inconvénients d'une source d'énergie éolienne

#### IV.6.1 Modélisation et simulation

La démonstration de la faisabilité du système d'énergie autonome éolien avec batterie de secours a été élaborée pour tester le fonctionnement des différentes charges en courant continu. La batterie est connectée à un bus continu (DC) via un simple convertisseur DC-DC bidirectionnel pour maintenir la charge de la batterie et la tension de liaison DC voir Figure IV-14. Le système proposé se compose d'une éolienne (20 kW) et d'un banc de batteries (12 V, 24 Ah). La batterie servira de source de secours. Le système a été simulé avec différentes charges résidentielles. Le concept est démontré à l'aide de simulations effectuées dans le logiciel Matlab/Simulink.

Le synoptique ci-dessous est celui du système de stockage proposé :

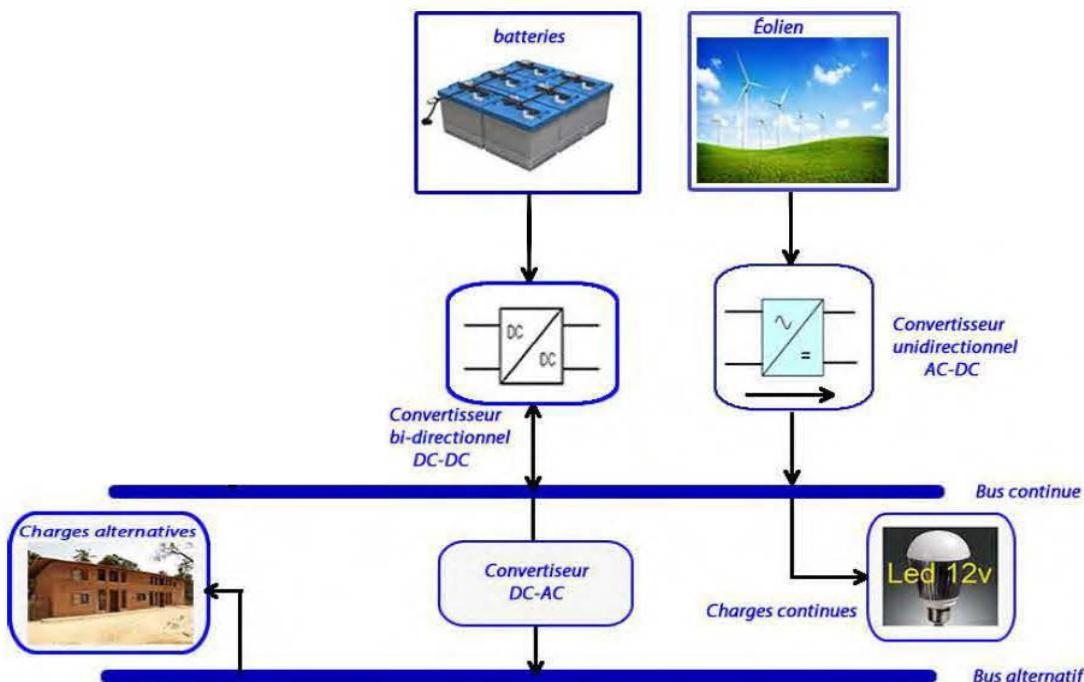


Figure IV.14: Synoptique du système autonome proposé

#### IV.6.1 Modélisation et simulation d'un convertisseur AC-DC

Le convertisseur AC/DC aussi appelé « redresseur » est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. Il existe différents types de redresseurs : commandés (à thyristor), non commandés (à diode) et mixte.

Quel que soit leur type, ces redresseurs se comportent comme des charges non linéaires vues du réseau alternatif. Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive. Ils perturbent les réseaux d'alimentation en y injectant des courants harmoniques Les

redresseurs à modulation de largeur d'impulsion sont des onduleurs exploitant leurs réversibilité en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grace à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurent aussi un facteur de puissance proche de l'unité. Selon le type d'onduleur utilisé, on distingue deux structures de redresseur à MLI : le redressement à MLI de courant et celui à MLI de tension. Nous considérons dans notre cas celui de tension.

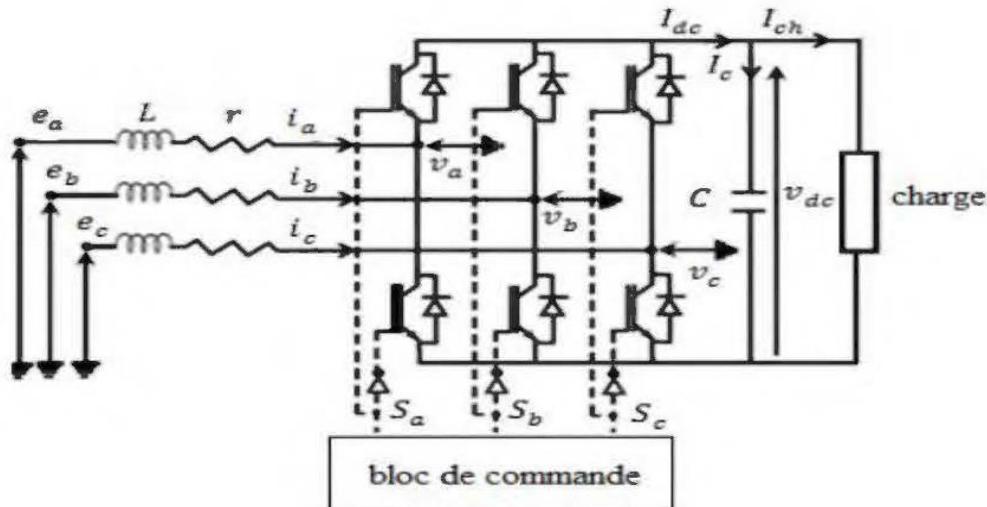


Figure IV.5: Illustration d'un redresseur à MLI triphasé de tension

Les redresseurs à MLI étaient principalement conçus pour remplacer les redresseurs à diodes constituant l'étage d'entrée des variateurs de vitesse. Ils peuvent également être utilisés dans le domaine de la production d'énergie éolienne ou encore le contrôle de la tension du bus continu.

#### IV.6.2 Modélisation du bus continu

Le bus continu est généralement situé entre deux convertisseurs statiques d'électronique de puissance si on veut aussi alimenter des charges alternatives. On peut le représenter simplement par le synoptique suivant (IV-16).

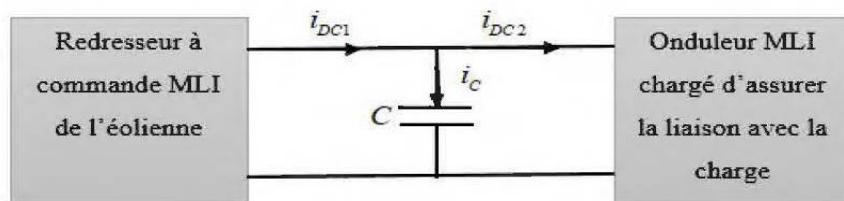


Figure IV-16 : Bus continu situé entre deux convertisseurs statiques

### IV.6.3 Résultats de la simulation

Les figures 18, 19, 20, 21 et 22 montrent différentes caractéristiques du système éolien simulé. La variation de la puissance de sortie ( $P_{dc}$ ), de l'état de charge (%SOC), de la tension aux bornes de la batterie et du courant de la batterie pour un changement progressif de la vitesse du vent de 16 à 12 m/s est indiquée en fonction du temps en secondes.

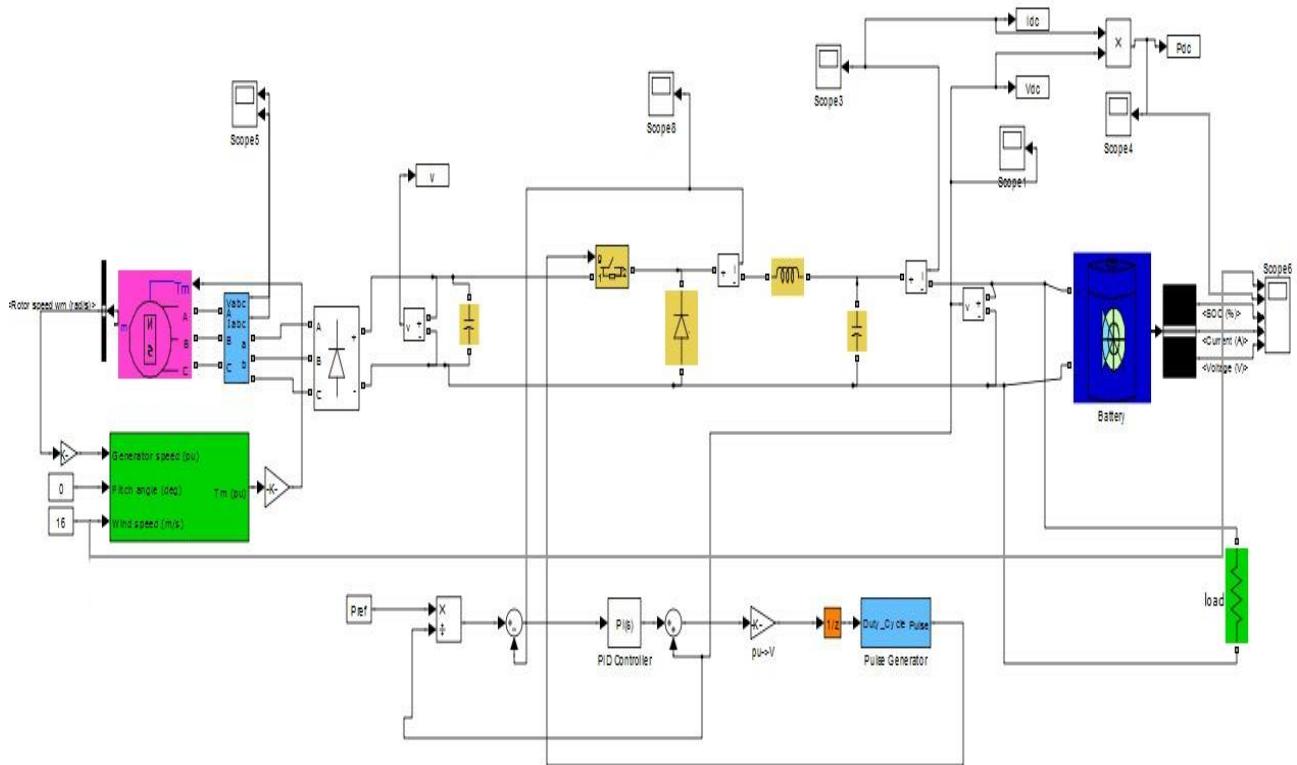


Figure IV.17: Modèle de simulation d'un système éolien autonome

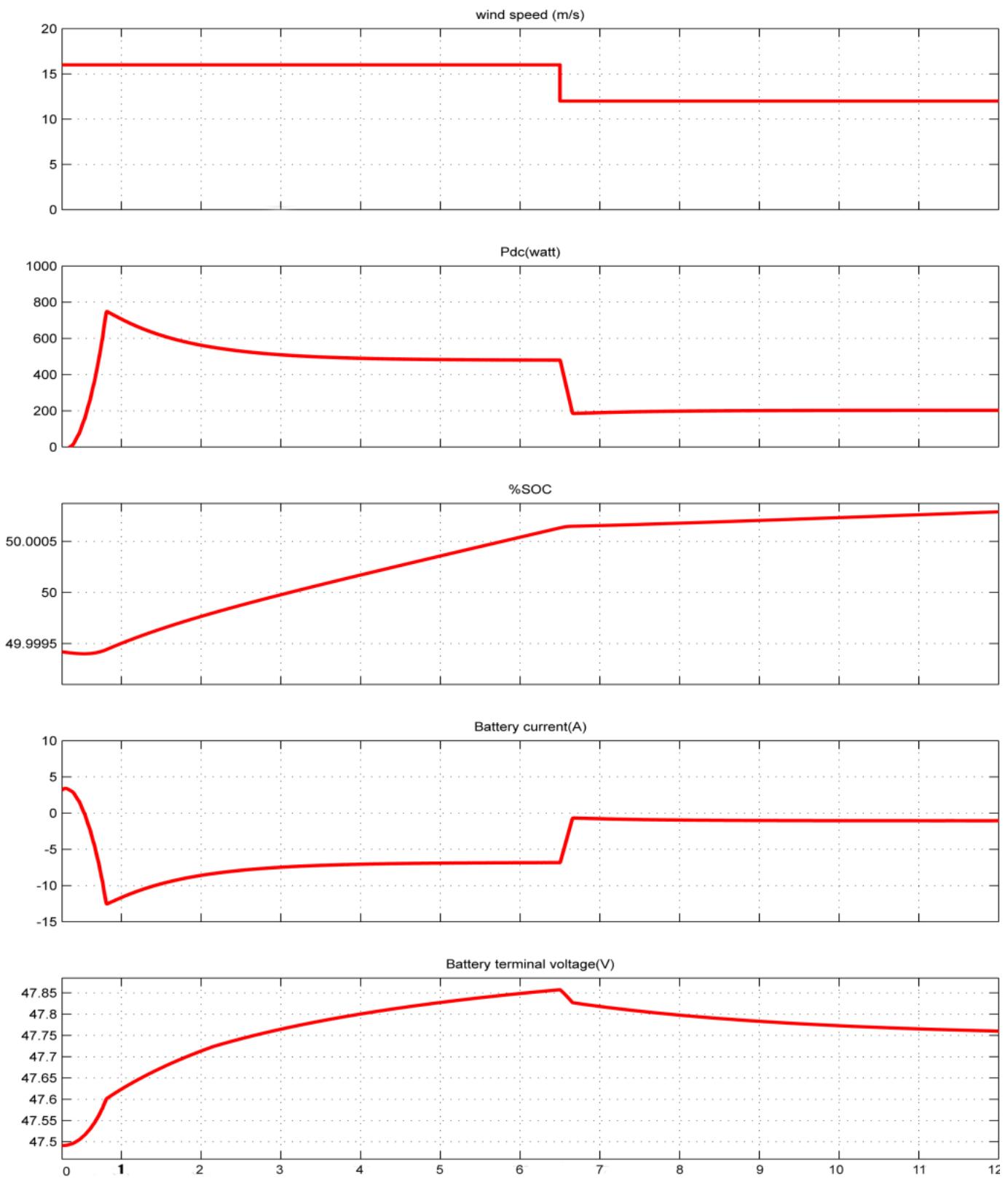


Figure IV.18: Différentes caractéristiques du système éolien simulé pour un changement progressif de la vitesse du vent de 16 m/s à 12 m/s

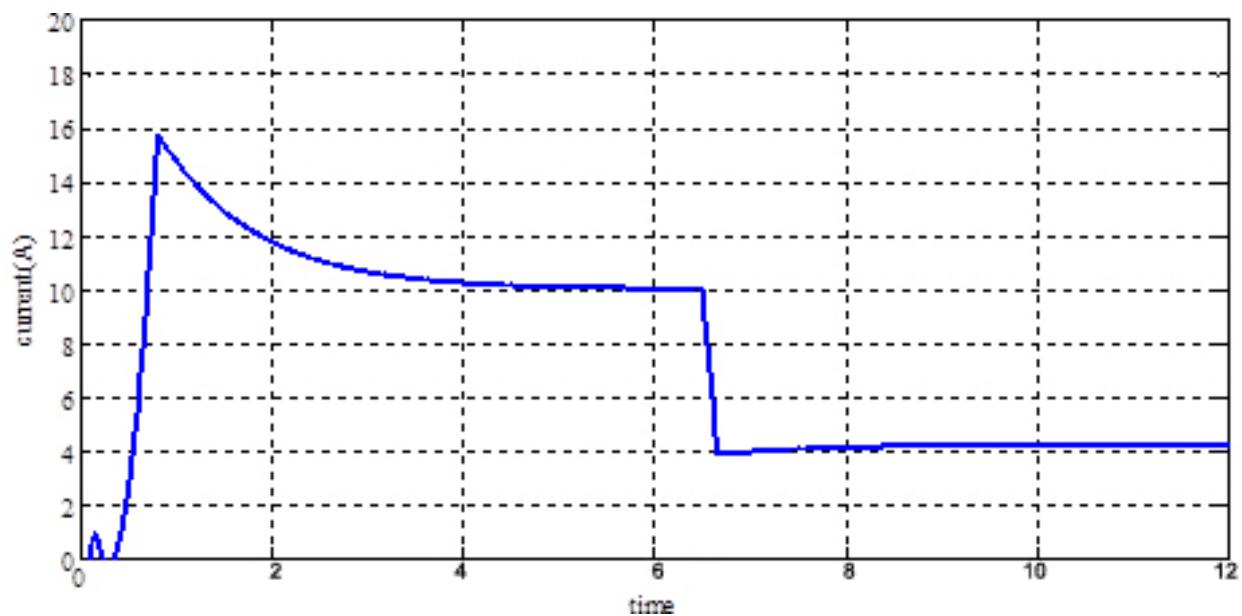


Figure IV.19: Courant de sortie

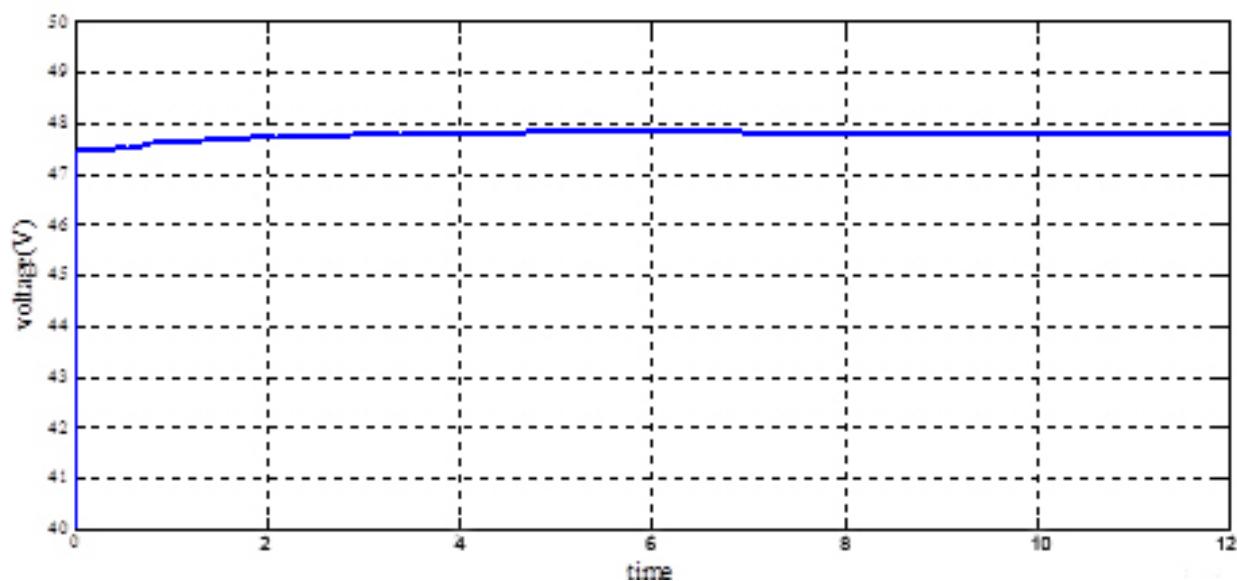


Figure IV.20: Tension de sortie

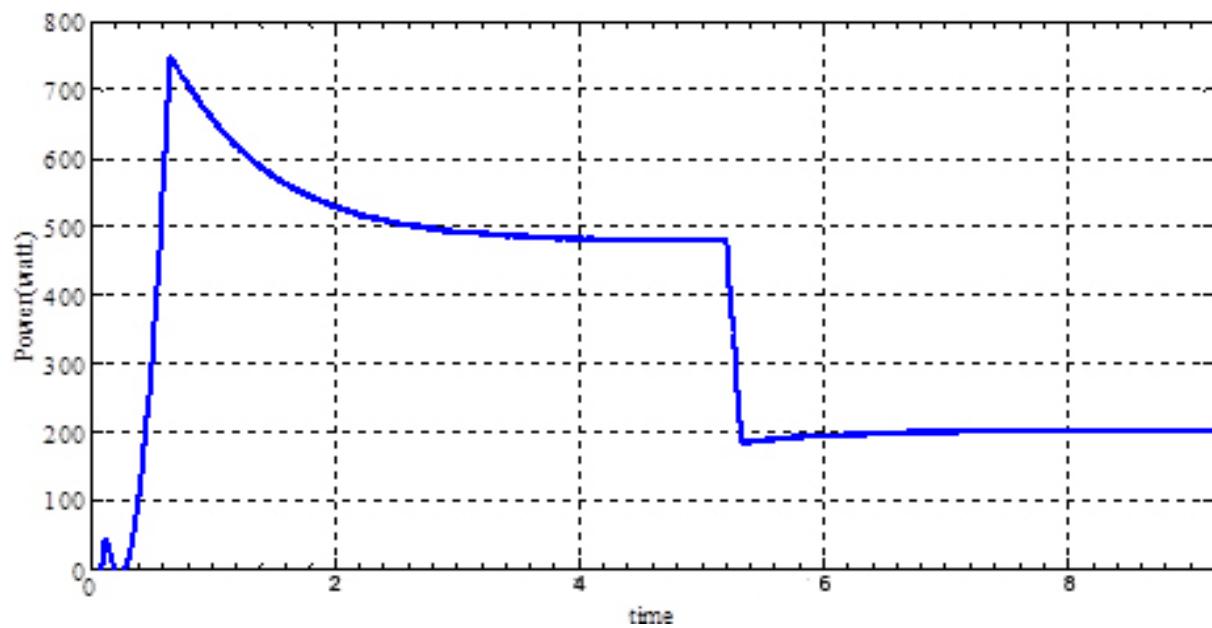


Figure IV.21: Puissance de sortie ( $P_{dc}$ ) sur la batterie et la charge

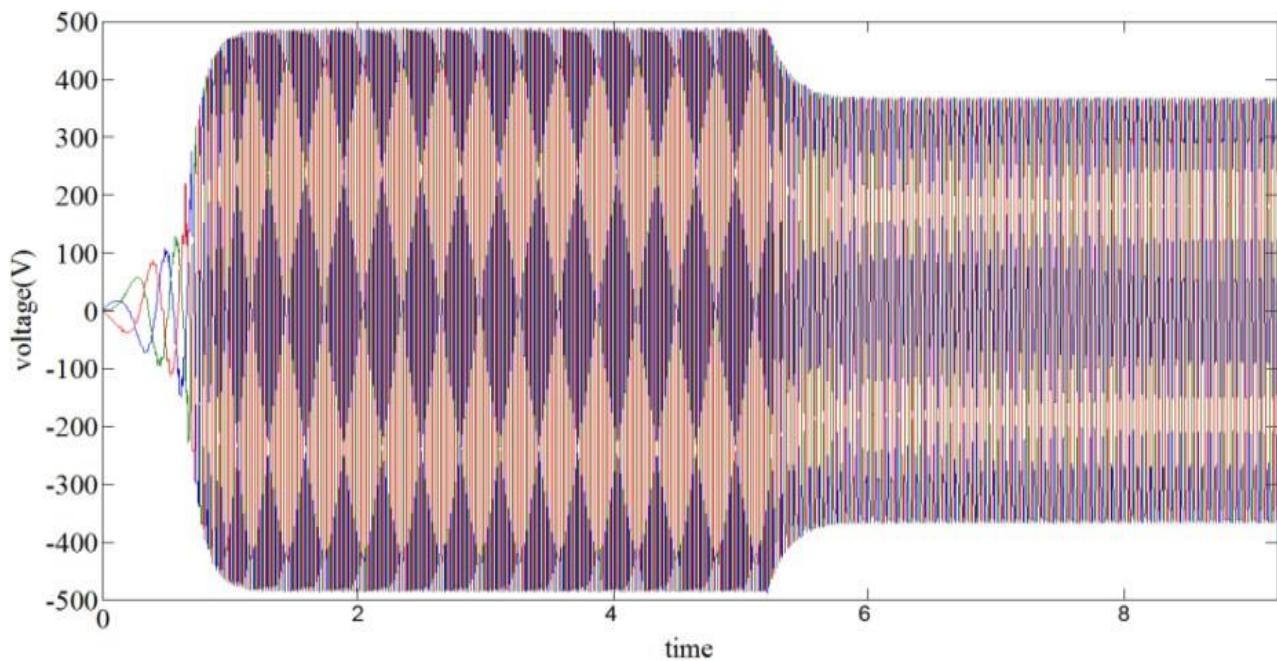


Figure IV.22: Formes d'onde de tension du générateur éolien

Dans la figure IV.18, à l'instant  $t_1=3\text{sec}$  le système atteint sa puissance de sortie maximale et entre  $t_1$  et  $t_2$  ( $=6.5\text{sec}$ ) la puissance de sortie est de 479.8 watts égale à la puissance maximale du système éolien à une vitesse du vent de 16m/s.

Lorsque la vitesse du vent change, la valeur correspondante de la puissance de sortie change. À  $t_2$  ( $=6.5\text{sec}$ ) la vitesse du vent passe de 16 à 12m/s et la valeur correspondante de la puissance de sortie passe de 479.8 à 202.5watts.

Ces valeurs sont la valeur maximale de puissance correspondant à une vitesse du vent de 16 et 12m/s respectivement. Initialement jusqu'à ce que la puissance de sortie atteigne sa valeur maximale, la batterie alimentait la charge. Mais après cela, le système éolien commence à charger la batterie et alimente la charge.

De plus, lorsque la valeur de la vitesse du vent diminue à 12 m/s, le taux de charge diminue, comme le montre clairement le changement de valeur du courant de la batterie de 5 ampères à moins de 1 ampère.

Les figures IV-18 à IV-20 montrent les formes d'onde du courant de sortie, de la tension de sortie, de la puissance de sortie du système éolien et de la tension de sortie de l'éolienne respectivement pour un changement progressif de la vitesse du vent de 16 à 12 m/s.

La figure 18 montre différentes caractéristiques du système éolien simulé pour un changement progressif de la vitesse du vent de 16 m/s à 14 m/s puis à 10 m/s.

Un modèle SIMULINK du système de production d'énergie éolienne est proposé et les modèles essentiels des composants du système ont été abordés. Le modèle d'éolienne est connecté à un PMSG pour modéliser un système de production d'énergie éolienne autonome. La tension de sortie redressée du PMSG est connectée à une batterie et à une charge via un convertisseur abaisseur CC-CC et le modèle proposé est simulé. On observe qu'avec le changement de la vitesse du vent, la puissance de sortie du système éolien autonome change conformément aux résultats standards.

#### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle SIMULINK du système de production d'énergie éolienne muni d'une charge de batterie est proposé et les modèles essentiels des composants du système ont été abordés. Le modèle d'éolienne est connecté à un PMSG pour modéliser un système de production d'énergie éolienne autonome. La tension de sortie redressée du PMSG est connectée à une batterie et à une charge via un convertisseur abaisseur CC-CC et le modèle proposé est simulé. On observe qu'avec le changement de la vitesse du vent, la puissance de sortie du système éolien autonome change conformément aux résultats standards.

Dans un souci économique et scientifique, la possibilité d'intégrer un système de stockage dans un parc d'énergies renouvelables éolien est possible afin de récupérer de l'énergie, mais aussi de contribuer à réduire les dépendances aux énergies fossiles.

L'intégration du système de stockage dans un micro réseau autonome est motivée par un souci socio-économique centré sur l'approvisionnement des zones isolées où le besoin énergétique est plus que nécessaire. Du point de vue scientifique, les motivations sont axées sur une production d'énergie stable, disponible, propre et sûre grâce à l'utilisation du système de stockage.

Avec des modifications supplémentaires du modèle Simulink du système de production d'énergie éolienne ; ce modèle peut être utilisé pour la modélisation et l'étude d'un système éolien connecté au réseau ou de systèmes hybrides.

---

## Conclusion générale

---

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce mémoire est la modélisation et le contrôle d'une éolienne dédiée pour la production d'énergie électrique munie de système de stockage. Pour cela, nous avons réalisé une simulation d'une turbine éolienne pour la conversion d'énergie électrique, afin de visualiser toutes les grandeurs électriques mises en jeu dans le système électrique étudié.

Dans le domaine de l'énergie éolienne, un état de l'art des systèmes éoliens était présenté dans le premier chapitre. Où, nous avons donné les différents types d'éoliennes disponibles et de leurs différentes structures soit à axe vertical et à axe horizontal.

Nous avons également abordé les principes de base de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique en comparant les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse constante. La simulation de la turbine est ensuite réalisée avec différents MPPT en utilisant la stratégie de contrôle MPPT, il est possible de maintenir le facteur de puissance à une valeur optimale malgré les changements de vitesse du vent.

Enfin, nous avons présenté dans le dernier chapitre, la description les différents systèmes de stockage d'énergie. Toute en abordant l'étude des caractéristiques par la simulation de la batterie de modèle CIEMAT pour expliquer son fonctionnement.

L'intégration du système de stockage s'est révélée importante puisqu'elle offre à la fois l'alimentation des charges en courant alternatif comme en courant continu.

Les résultats de simulation sont très prometteurs pour leur application pratique et en temps réel.

Enfin nous suggérons comme perspectives d'améliorer et de développer le présent projet pour envisager son utilité dans les réseaux électriques intelligents (Smart Grid).

---

---

# Références bibliographiques

---

---

## Références bibliographies

- [1] **T. Douadi** « Etude, modélisation et simulation d'un aérogénérateur Asynchrone », thèse de Master de l'université D'ADRAR, 2014.
- [2] **S.Attalaoui et A.Merzougui** « Analyse et modélisation à base de neurones artificiels dédiées à la prédiction de la vitesse du vent » thèse de Master 2 de l'université Mohamed Boudiaf – Msila , 2018/2019.
- [3] **A.Benghorzi et H.Benhadda** « Etude et simulation d'une éolienne avec une machine asynchrone double alimentation », Thèse de Master de centre universitaire Belhadj Bouchaib ,Ain-Te mouchent, 2019 /2020.
- [4] **F. Mazouz et A. Smadi** « Contribution à l'Etude des Systèmes Éoliens Application aux Génératrices à Courant Continu, Synchrones à Pôles Saillants et à Aimants Permanents », Mémoire d'Ingénieur, Université de Batna, Juillet 2007.
- [5] [www.edf.com/html/panorama/production/industriels/renouvelable/fonctionnement](http://www.edf.com/html/panorama/production/industriels/renouvelable/fonctionnement)
- [6] <http://www.fnh. /français/doc/en ligne/énergie/ m.>
- [7] Théodore Wildi, « Électrotechnique », Edition 1999.
- [8] [http://www.edf.com/html/panorama/production/renouvelable/solaire/intro.html.](http://www.edf.com/html/panorama/production/renouvelable/solaire/intro.html)
- [9] **C. Benoudjit**, « Étude pour la Conception d'un Banc d'essais pour Energie Renouvelable », Mémoire de Magistère, Université de Batna, Juin 2004.
- [10] **A. Madoui, K.Haddane** « Étude et Réalisation d'une Eolienne de Faible Puissance pour Site Isolé Banc d'essai Pédagogique », Mémoire d'Ingénieur,Université de Batna, 2005.
- [11] **C.Khelil** « Guide des énergies renouvelables ", Édition 2007.
- [12] [http://www.thecanadianencyclopedia.com.](http://www.thecanadianencyclopedia.com)

- [13] [http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a\\_2\\_02.html](http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_02.html).
- [14] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Biogaz>.
- [15] **H. Camblong** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse doctorat en automatique de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux ; décembre 2003.