

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat  
Département : Electrotechnique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Electrotechnique industrielle.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Étude de la production énergétique d'un système éolien.

Présenté par : – AMRANI Meriem Lina.  
– BOULEBTATECHE Salim.

Encadrant : *KELAIAIA Mounia Samira* prof BADJI MOKHTAR - Annaba

Jury de Soutenance :

BENISIALI Nadia	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
KELAIAIA M. Samira	Prof	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
Zerzouri Nora	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

# *Remerciements*

*Qu'il nous soit permis ici d'exprimer toute notre gratitude envers celles et ceux qui nous ont aidé à mener à bien le présent mémoire de MASTER.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier particulièrement Mme.KELAIAIA M.Samira pour avoir accepté de diriger ce travail et nous avoir prodigué conseils et encouragements chaque fois que cela s'est avéré nécessaire.*

*Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance, d'une part, envers nos familles qui nous ont accueilli et soutenu durant cette année ; d'autre part, envers nos enseignants car leur soutien moral et leur appui logistique ont grandement contribué au bon déroulement de cette étude.*

*Lina et Salim.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma très chère mère...*

*À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que Dieu les garde et les protège.*

*À ma sœur Ines A qui je lui souhaite un avenir radieux et plein de réussite*

*A ma sœur de cœur Sandra à qui je souhaite tout le bonheur du monde*

*A mon Amie proche : Yousra m'est chère et ainsi à toute ma famille.*

*Amrani Meriem Lina.*

*Je remercie mes parents qui m'ont soutenu,*

*Encouragé et qui ont toujours répondu présent, et sans eux je n'aurai jamais pu arriver à ce stade.*

*Je ne manquerais pas de remercier mes proches amis : Rachad, Walid et Abdallah. Ainsi, toute personne ayant participé à l'élaboration de ce mémoire.*

*Boulebtateche Salim*

## Résumé :

Ce mémoire a pour objectif l'étude de la production énergétique d'un système éolien avec une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Après avoir présenté des généralités sur les énergies renouvelables, ainsi la conversion de l'énergie par un système éolien, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrices utilisées, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation à travers deux convertisseurs statiques triphasés : un redresseur et un onduleur à MLI. L'énergie récoltée est injecté dans le réseau électrique à travers un convertisseur de puissance, pour une meilleure intégration et une qualité de courant optimale.

## Mots clés:

Turbine Eolienne, GADA, Convertisseur de puissance.

## Summary:

The objective of this manuscript is to study the energy production of a wind power system with an asynchronous machine with dual power supply (MADA). After presenting general information on renewable energies, as well as the conversion of energy by a wind power system, the different power supply structures and the type of generators used, we opted for the asynchronous machine with double a power supply consisting of two converters. three-phase static: one rectifier and one PWM inverter. The collected energy is injected into the electrical network through a power converter, for better integration and optimum current quality.

## Keywords:

Wind Turbine, GADA, Power converter.

## ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة إنتاج الطاقة في نظام طاقة الرياح باستخدام آلة غير متزامنة ذات مصدر طاقة مزدوج (MADA) بعد تقديم معلومات عامة عن الطاقات المتجددة، وكذلك تحويل الطاقة عن طريق نظام طاقة الرياح ، وهياكل إمداد الطاقة المختلفة ونوع المولدات المستخدمة ، اخترنا الآلة غير المتزامنة مع مصدر طاقة مزدوج يتكون من محولين. ثلاث مراحل ثابتة: مقوم واحد وعاكس واحد PWM. يتم حقن الطاقة المجمعة في الشبكة الكهربائية من خلال محول طاقة ، من أجل تكامل أفضل وجودة تيار مثالية.

الكلمات الدالة:

توربينات الرياح ، GADA ، محول الطاقة.

## Sommaire :

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I :

### Généralités sur les énergies renouvelables.

I. 1. Introduction.....	3
I. 2. Les énergies renouvelables.....	3
I. 3. Différentes sources d'énergies renouvelables.....	4
I. 3.1. Source d'énergie hydraulique .....	4
I. 3.2. Source d'énergie solaire.....	5
I. 3.3. Source d'énergie à la biomasse.....	7
I. 3.4. Source d'énergie géothermique.....	9
I. 3.5. Source d'énergie éolienne.....	10
I. 4. L'énergie dans le monde.....	11
I. 5 L'énergie éolienne en Algérie.....	13
I. 4. Conclusion .....	14

## Chapitre II :

### Conversion de l'énergie par un système éolien.

II. 1. Introduction.....	15
II. 2. Quelques notions sur le vent.....	15
II. 3. la vitesse et la direction du vent.....	15
II. 4. Descriptif d'énergie éolienne.....	17
II. 5. Conversion de l'énergie dans un système éolien.....	17
II. 6. Principaux composants d'une éolienne.....	19
II. 7. Classification des éoliennes selon la taille.....	20
II. 8. Classification selon le principe de fonctionnement.....	21
II. 9. Stratégie de fonctionnement d'une éolienne.....	24
II. 9.1. Bilan des forces sur une pale.....	24
II. 10. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	24

II. 10.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" .....	24
II. 11. Les générateurs utilisés dans les éoliennes.....	25
II. 11.1. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	26
II. 11.1.1. Les alternateurs synchrones à rotor bobinés ou à aimant permanent.....	26
II. 11.2. Systèmes utilisant la machine Asynchrone.....	27
II. 11.2.1. Les alternateurs asynchrones à cage d'écureuil.....	28
II. 11.2.2. Les alternateurs asynchrones à double alimentation.....	28
II. 11.2.2.1. Structure de kramer.....	28
II. 11.2.2.2. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	29
II. 11.2.2.3. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	30
II. 12. Conclusion.....	31

### Chapitre III :

#### Modélisation de l'association turbines éoliennes - générateur asynchrone.

III. 1. Introduction.....	32
III. 2. Modélisation de la turbine éolienne.....	32
III. 3.1. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	33
III. 3.2 Le multiplicateur de vitesse.....	37
III. 3.3. Modélisation de l'arbre de la machine.....	37
III. 3.3.1. Schéma bloc de la turbine.....	38
III. 3.3.2.. Région d'exploitation de turbine.....	39
III. 3.3.3. Bloc de simulation de la turbine éolienne.....	40
III. 4. Modélisation de la génératrice asynchrone.....	45
III. 4.1. Fonctionnement d'une génératrice asynchrone.....	45
III. 4.1.1. Modélisation Mathématique de la Génératrice.....	45
III. 5. Conclusion.....	52

### Chapitre IV : Modèle de simulation de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau

IV. 1. Introduction.....	53
IV. 2. Modélisation du système complet.....	53
IV. 3. Bloc de simulation du système complet.....	54
IV. 4. Résultats de la simulation du système complet.....	55
IV. 4.1. Influence du profil du vent sur les paramètres mécaniques de la chaîne.....	55
IV. 4.2. Influence de la variation de l'indice de modulation $m$ sur les paramètres énergétiques de la chaîne.....	57
IV. 4.3 Influence de la variation de l'indice de modulation sur les paramètres électriques de la chaîne.....	58
IV. 5. Mesures des harmoniques.....	60
IV. 6. Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

**Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables.**

<b><u>Figure I.1</u> : principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire.....</b>	<b>3</b>
<b><u>Figure I.2</u> : conversion de l'énergie solaire.....</b>	<b>5</b>
<b><u>Figure I.3</u> : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....</b>	<b>6</b>
<b><u>Figure I.4</u> : schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque.....</b>	<b>7</b>
<b><u>Figure I.5</u> : principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse.....</b>	<b>8</b>
<b><u>Figure I.6</u> : principe de fonctionnement de l'énergie géothermique.....</b>	<b>9</b>
<b><u>Figure I.7</u>:Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2018.....</b>	<b>12</b>
<b><u>Figure I.8</u>: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) à 10m du sol en Algérie.....</b>	<b>13</b>

**Chapitre II : États de l'art de la conversion d'un système éolien.**

<b><u>Figure II.1</u> : Girouette et nanomètre.....</b>	<b>15</b>
<b><u>Figure II.2</u> : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....</b>	<b>18</b>
<b><u>Figure II.3</u>: Principaux organes du système de conversion éolien.....</b>	<b>18</b>
<b><u>Figure II.4</u> : Principaux composants d'une éolienne.....</b>	<b>20</b>
<b><u>Figure II.5</u> : les éoliennes à axe horizontale .....</b>	<b>22</b>
<b><u>Figure II.6</u> : les éoliennes à axe verticale.....</b>	<b>22</b>
<b><u>Figure II.7</u>:bilan des forces sur la pale.....</b>	<b>24</b>
<b><u>Figure II.8</u> : Flux d'air sur une pale " stall " .....</b>	<b>24</b>
<b><u>Figure II.9</u> : Variation de l'angle de calage d'une pale.....</b>	<b>25</b>
<b><u>Figure II.10</u> : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.....</b>	<b>27</b>
<b><u>Figure II.11</u> : Machine asynchrone connectée sur e réseau.....</b>	<b>28</b>
<b><u>Figure II.12</u> : structure de kramer.....</b>	<b>29</b>
<b><u>Figure II.13</u> : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....</b>	<b>29</b>
<b><u>Figure II.14</u> : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....</b>	<b>30</b>



**Chapitre III : Modélisation de l'association turbines éoliennes - générateur asynchrone.**

<b><u>Figure III.1</u> : modélisation d'une turbine éolienne.....</b>	<b>32</b>
<b><u>Figure III.2</u> : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....</b>	<b>33</b>
<b><u>Figure III.3</u> : Schéma d'une éolienne Adaptée de Singh.....</b>	<b>34</b>
<b><u>Figure III.4</u> : Coefficient de puissance.....</b>	<b>35</b>
<b><u>Figure III.5</u> : Caractéristique <math>C_p=f(\lambda)</math>.....</b>	<b>36</b>
<b><u>Figure III.6</u> : modèle mécanique du multiplicateur.....</b>	<b>37</b>
<b><u>Figure III.7</u> : Schéma bloc du modèle de la turbine.....</b>	<b>38</b>
<b><u>Figure III.8</u> : Région d'exploitation de turbine.....</b>	<b>39</b>
<b><u>Figure III.9</u> : bloc de simulation de la turbine éolienne.....</b>	<b>40</b>
<b><u>Figure III.10</u> : vitesse du vent constant (m/s).....</b>	<b>41</b>
<b><u>Figure III.11</u> : coefficient de puissance pour différentes valeurs de vent.....</b>	<b>41</b>
<b><u>Figure III.12</u> : coefficient <math>\lambda</math> de la turbine avec un vent constant.....</b>	<b>42</b>
<b><u>Figure III.13</u> : vitesse de rotation de la turbine (tr/min) avec un vent constant.....</b>	<b>42</b>
<b><u>Figure III.14</u> : puissance mécanique de la turbine (watt) avec un vent constant.....</b>	<b>43</b>
<b><u>Figure III.15</u> : coefficient de puissance <math>C_p</math> avec différentes valeurs de beta.....</b>	<b>43</b>
<b><u>Figure III.16</u> : coefficient de puissance <math>C_p</math> avec différentes valeurs de beta et un vent constant.....</b>	<b>44</b>
<b><u>Figure III.17</u> : la puissance mécanique de la turbine (watt) avec différentes valeurs de beta et un vent constant.....</b>	<b>44</b>
<b><u>Figure III.18</u> : Représentation schématique des enroulements de la MAS..</b>	<b>46</b>

Chapitre IV : Modèle de simulation de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau

<b><u>Figure IV.1</u></b> : Représentation de caractère multi physique.....	<b>53</b>
<b><u>Figure IV.2</u></b> : chaîne de conversion éolienne.....	<b>54</b>
<b><u>Figure IV.3</u></b> : Schéma block du model avec turbine et aves redressement par Matlab/Simulink.....	<b>55</b>
<b><u>Figure IV.3</u></b> : Schéma block du model de la GADA avec redressement par Matlab/Simulink.....	<b>54</b>
<b><u>Figure IV.4</u></b> : Variation de la vitesse du vent et de beta.....	<b>56</b>
<b><u>Figure IV.5</u></b> : Evolution du couple mécanique de la turbine (N.m).....	<b>56</b>
<b><u>Figure IV.6</u></b> : Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min).....	<b>57</b>
<b><u>Figure IV.7</u></b> : évolution du coefficient de puissance maximale.....	<b>57</b>
<b><u>Figure IV.8</u></b> : Puissance active envoyée au réseau.....	<b>58</b>
<b><u>Figure IV.9</u></b> : Puissance réactive échangée avec le réseau (kvar).....	<b>58</b>
<b><u>Figure IV.10</u></b> :Tension envoyée au réseau.....	<b>59</b>
<b><u>Figure IV.11</u></b> : Courant envoyé au réseau.....	<b>59</b>
<b><u>Figure IV.12</u></b> : Taux de distorsion harmonique du courant.....	<b>60</b>
<b><u>Figure IV.13</u></b> : Taux de distorsion harmonique de la tension.....	<b>60</b>

LISTE DES TABLEAUX :

<b><u>Tableau II.1</u></b> : échelle de beaufort.....	<b>16</b>
<b><u>Tableau II.2</u></b> : Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.....	<b>20</b>

# INTRODUCTON GÉNÉRALE

Depuis la prise de conscience mondiale concernant le réchauffement climatique et la protection de l'environnement. Le développement durable est devenu un concept qui accompagne avec fermeté toutes les filières industrielles et économiques et marque tous les nouveaux projets.

Dans le secteur de l'énergie électrique, tout le monde cherche à réduire considérablement sa dépendance aux énergies de source fossile, se caractérisant à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables. Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique veulent se convertir à une énergie plus propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé, même si l'Algérie reste « à la traîne » dans ce secteur.

Pour les applications dans le domaine de l'éolienne, la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) est devenue une solution persévérante grâce à l'accessibilité au stator et au rotor qui offre l'opportunité d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de 30% autour de la vitesse de synchronisme, en plus le contrôle des tensions rotoriques nous permet de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

Notre travail consiste à l'étude et la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à base de génératrice MADA, où nous essayerons de montrer l'impact de l'indice de modulation de l'onduleur M.L.I sur la conversion de l'énergie éolienne.

Le mémoire présenté est composé de quatre chapitres :

- Dans le chapitre I : on a abordé sur les différents types d'énergies renouvelables ainsi, leurs avantages et inconvénients, l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie.
- Dans le chapitre II : on s'intéresse essentiellement à l'énergie du vent, ainsi qu'aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions, leurs principes de fonctionnement, leurs classification, ainsi les machines alternatives synchrone et asynchrone.
- Dans le chapitre III : on le consacre à la turbine, par la Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique « Loi de BETZ » et les différents Stratégies de fonctionnement d'une éolienne et leurs Systèmes de régulation et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement génératrice, une simulation sera présentée pour mettre en évidence les performances de notre turbine qui devra être utilisé dans le chapitre suivant.

# INTRODUCTON GÉNÉRALE

- Dans le chapitre IV : on a présenter l'influence de la variation du vent et de beta ainsi, l'Influence de la variation de l'indice de modulation m sur les paramètres électriques et énergétiques de l'éolienne.

Le mémoire se termine par une conclusion qui situe la valeur du travail effectué, et présente les projections et les perspectives futures de notre travail.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les énergies renouvelables**

### I. 1. Introduction :

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Débutant avec les moulins à eau et à vent, les bateaux à voile ou encore la traction animale qui ont apportés un surcroit au développement de l'humanité. [1]

Les énergies renouvelables sont en plein essor, car l'innovation réduit les coûts et commence à tenir la promesse d'un avenir énergétique propre. La production solaire et éolienne bat des records et est intégrée au réseau électrique national sans compromettre la fiabilité.

Cela signifie que les énergies renouvelables remplacent de plus en plus les combustibles fossiles «sales» dans le secteur de l'électricité, offrant ainsi l'avantage de réduire les émissions de carbone et d'autres types de pollution. Elles constituent une très bonne alternative aux énergies fossiles car elles :

- Génèrent une énergie qui ne produit aucune émission de gaz à effet de serre à partir de combustibles fossiles et réduit certains types de pollution atmosphérique
- Diversifient l'approvisionnement énergétique et réduisent la dépendance aux combustibles importés
- Créent du développement économique et des emplois dans la fabrication, l'installation et plus encore
- Sont inépuisables.

### I. 2. Les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des moyens de générer de l'énergie à partir de ressources naturelles renouvelables. Provenant, des rayons solaires, du vent ou des cycles de l'eau tous théoriquement illimités à l'échelle humaine. Ces ressources sont soit disponibles sans limite de temps, soit se reconstituent plus rapidement que la vitesse à laquelle elles sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies fossiles. Les stocks de combustibles fossiles sont limités et non renouvelables à l'échelle humaine. [2]

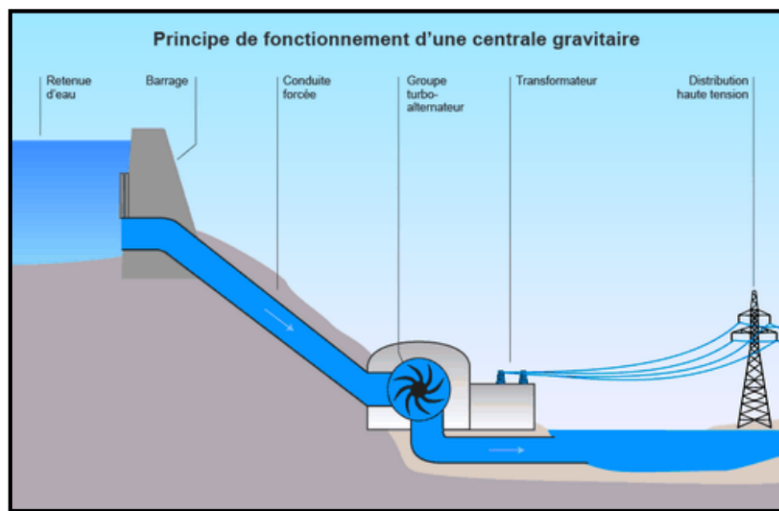
Elles sont aussi souvent appelées «énergies vertes» ou «énergies propres». Cela ne signifie pas pour autant que ces énergies ne sont pas nocives pour l'environnement et n'ont aucun impact. Néanmoins, ils ont un faible impact environnemental par rapport aux combustibles fossiles.

### I. 3. Différentes sources d'énergie renouvelables :

#### I. 3.1. L'énergie hydraulique :

Le principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique est basé sur des techniques ancestrales qui remontent aux origines de l'histoire de l'électricité. En effet, le moulin à eau de jadis fonctionnait sur le principe de se servir de la force intrinsèque de l'eau pour faire tourner des hélices et produire, grâce à ce mouvement une énergie exploitable.

Aujourd'hui Les centrales hydrauliques sont construites sur le même principe consistant à capter la force de l'eau pour faire tourner une turbine, qui elle-même entraîne un générateur électrique produisant de l'électricité injectable sur le réseau. [3]



**Figure I. 1 :** Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire.

#### ❖ Les avantages :

- Une flexibilité de production.
- Un bon rendement.
- Création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations.
- Production d'énergie locale

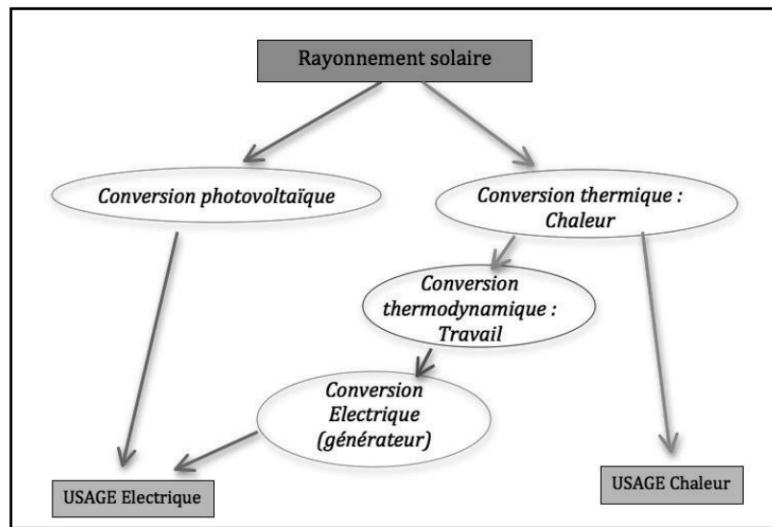
#### ❖ Les inconvénients :

- Des investissements lourds.
- Des impacts environnementaux.
- Risque de sécheresse.
- La nécessité d'avoir un terrain propice.

### I. 3.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie est convertie en électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Alors on distingue deux types d'énergie solaire : l'énergie à effet thermique, et à effet photovoltaïque.



**Figure I. 2 :** Conversion de l'énergie solaire.

#### a. L'énergie solaire à effet thermique :

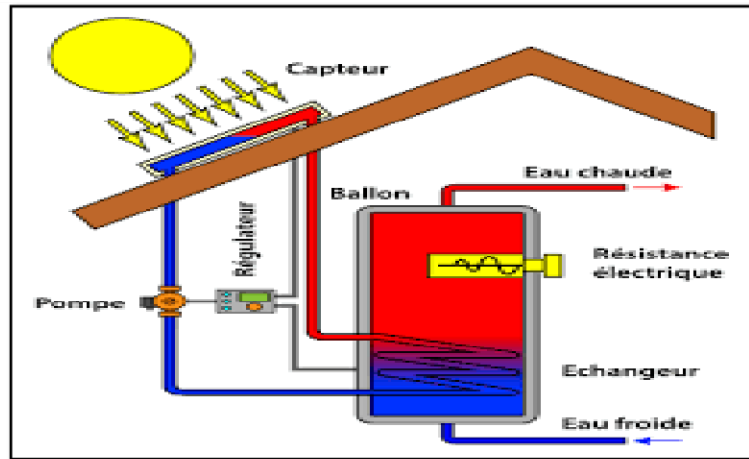
Un système solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique). [4]

Les types de panneaux solaires thermiques diffèrent selon la nature du fluide caloporteur qui transporte la chaleur : de l'eau ou de l'air. Les capteurs solaires peuvent également se différencier par leur structure (les **capteurs plans non vitrés, vitrés, tubes sous vides**)

On distingue trois types de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire thermique :

- À basse température : (30 à 100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- À moyenne température : (100 à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation.
- À haute température : (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques.



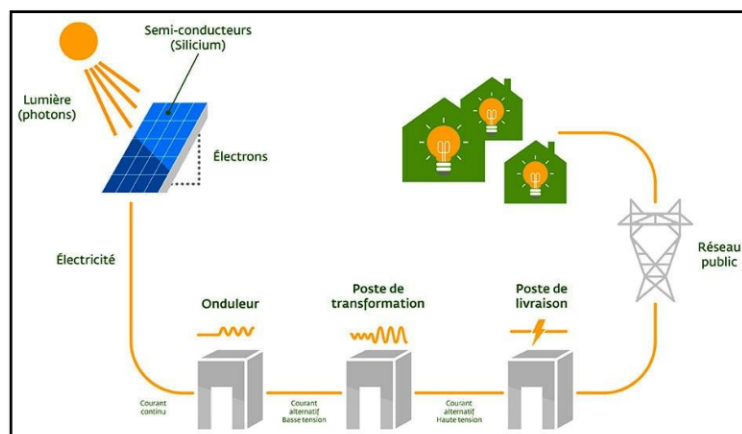


**Figure I.3 :** Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

b. L'énergie solaire à effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » désigne un phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839). L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.



**Figure I.4 :** Schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque.

### ❖ Avantages :

- Montage simple et rapide.
- Robuste et nécessite peu de maintenance une ou deux fois annuelles.
- Une durée de vie des modules photovoltaïque qui dépasse les 20 ans.
- Résistance aux intempéries, aux rayonnements uv et aux variations de température.

### ❖ Inconvénients :

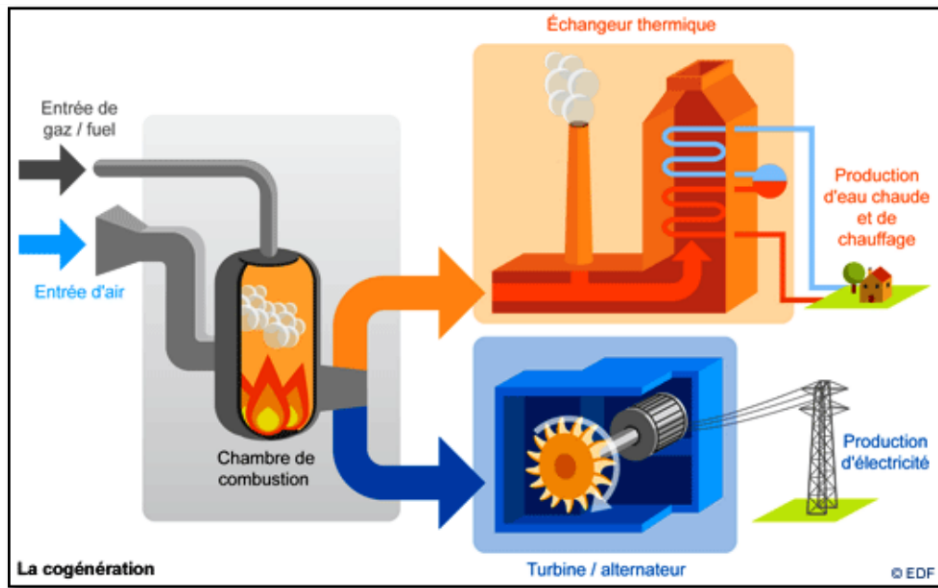
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé
- Les panneaux doivent être orientés en direction de l'équateur.
- Leur inclinaison par rapport à l'horizontale doit être adaptée à la saison d'utilisation la plus défavorable pour les systèmes autonomes (elle a moins d'importance sur les systèmes connectés au réseau, c'est pourquoi on peut trouver des capteurs en façade ou en toiture à faible pente). [5]

### I. 3.3. L'énergie à la biomasse :

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides: paille, copeaux, bûches.
- les liquides : huiles végétales, bioalcools.
- les gazeux : biogaz.



**Figure I.5:** Principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse.

❖ Avantages :

- Type d'énergie fait appel à des ressources peu coûteuses, qui sont disponibles en grandes quantités.
- Les déchets étant produits par chaque espèce vivante, leur disponibilité est donc illimitée.
- Fabriquée à partir de déchets, résidus et autres matières biodégradables.

❖ Inconvénients :

- Un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie)
- L'érosion des sols.
- Pollution des sols et de l'eau (en cas de production intensive de biocarburant).

### I. 3.4. L'énergie géothermique :

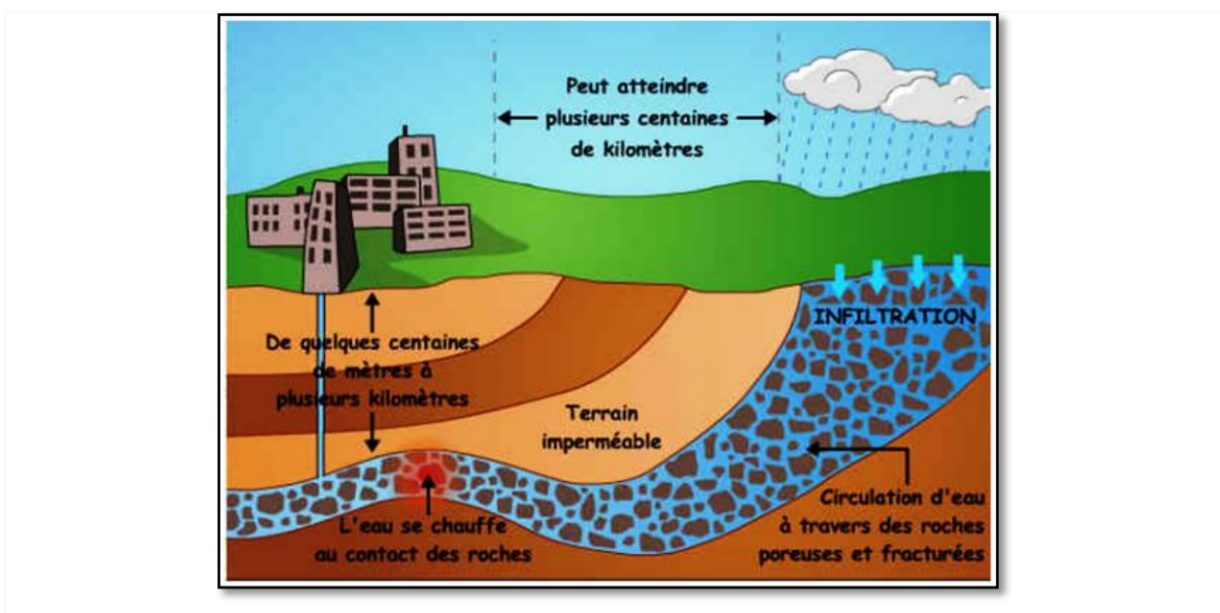
La géothermie est une forme d'énergie interne du globe qui traverse la croûte terrestre sous forme d'un flux de chaleur naturelle. La température des roches augmente en moyenne de  $1^{\circ}\text{C}$  tous les 30 mètres (m) de profondeur : L'eau des précipitations qui traverse les roches s'échauffe de plus en plus en profondeur. [6]

Suivant la température de l'eau, on distingue 3 types d'énergie géothermique :

-La géothermie peu profonde à basse température : température de l'eau comprise entre  $30$  et  $100^{\circ}\text{C}$ . La profondeur des réservoirs atteint  $1\ 000$  à  $2\ 500$  m. Elle est utilisée pour le chauffage

-La géothermie moyenne énergie : température de l'eau comprise entre  $100$  et  $180^{\circ}\text{C}$ . On l'utilise pour produire de l'électricité. On la rencontre dans les zones volcaniques, dans des réservoirs à moins de  $1\ 000$  m de profondeur.

- La géothermie haute énergie : température de l'eau comprise entre  $180$  et  $350^{\circ}\text{C}$ . L'eau est utilisée sous forme de vapeur pour produire de l'électricité. On la trouve dans les zones volcaniques et à la frontière des plaques tectoniques en collision ou en formation (tous les archipels volcaniques bordant le Pacifique – la « Ceinture de feu » –, l'Islande...)



**Figure I.6 :** Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique.

### ❖ Avantages :

- L'exploitation ne coûte pas cher.
- Les installations qui utilisent la géothermie ne polluent pas l'atmosphère.
- La cogénération, c'est-à-dire la production d'électricité en même temps que la chaleur peut encore augmenter l'intérêt de la géothermie.

### ❖ Inconvénients :

- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.
- Les investissements pour pomper l'eau chaude peuvent parfois être importants.

## I. 3.5. L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne consiste à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle se compose généralement de trois pales en forme d'hélices appelées rotors. Celui-ci est attaché à une haute tour. En moyenne, les tours à vent dans les environnements résidentiels ont une hauteur d'environ 20 m. La raison pour laquelle la tour est si haute est que les vents sont plus forts à partir du sol et qu'il y a moins d'effet de secousse.[7]

Le vent provient des changements atmosphériques: les changements de température et de pression font circuler l'air autour de la surface de la terre. Tout cela est déclenché par le soleil. Donc, d'une certaine manière, l'énergie éolienne est une autre forme d'énergie solaire.

En principe, l'éolienne capte le vent, qui produit alors une source d'énergie renouvelable. Le vent fait tourner le rotor; lorsque le rotor tourne, le mouvement des pales entraîne un générateur qui crée de l'énergie. Le mouvement de rotation des lames est une énergie cinétique. C'est cette puissance que nous convertissons en électricité.

### ❖ Avantages :

- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le

changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

-Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

-La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

-L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

### ❖ Inconvénients :

-L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.

-Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.

-L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

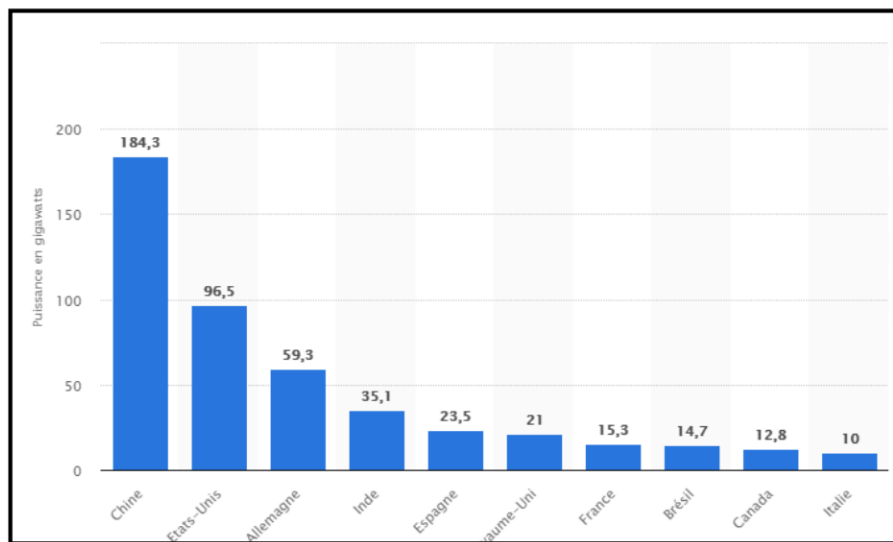
## I. 4. L'énergie éolienne dans le monde :

L'énergie éolienne offre une option durable dans la recherche d'énergie renouvelable. Le vent est le mouvement de l'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. La production de vent est le résultat de l'action du soleil qui chauffe inégalement la surface de la Terre. Au fur et à mesure que l'air chaud monte, de l'air plus frais entre pour remplir le vide. Tant que le soleil brillera, le vent soufflera. Les Américains développent de plus en plus cette énergie.

Le vent sert depuis longtemps de source d'énergie aux humains. Les marins utilisaient – et utilisent toujours – des voiles pour capturer le vent. Autrefois, les agriculteurs utilisaient des moulins à vent pour moulinier leur grain et pomper l'eau. Aujourd'hui, de plus en plus d'éoliennes tirent l'électricité de la brise. On assiste également au développement des installations d'éoliennes chez les particuliers mais le rendement n'est pas encore satisfaisant par rapport à l'investissement.

Cette technique est de plus en plus utilisée et sans cesse améliorée. Au cours de la dernière décennie, l'utilisation des éoliennes a augmenté de plus de 25 % par année aux États Unis. Pourtant, elle ne fournit toujours qu'une petite fraction de l'énergie mondiale.

L'industrie de l'énergie éolienne est en plein essor. Grâce aux efforts mondiaux de lutte contre le changement climatique, tels que l'Accord de Paris, les énergies renouvelables connaissent une forte croissance, l'énergie éolienne en tête.



**Figure I.7:** Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2018.

Ce graphique représente la capacité en énergie éolienne dans le monde en 2018, selon le pays et en gigawatts. On peut ainsi constater que la capacité en énergie éolienne de la Chine s'établissait à environ 184 gigawatts en 2018, plus que dans tout autre pays du monde à ce temps-là. Les États-Unis obtenaient la deuxième place du classement, disposant d'une capacité en énergie éolienne de près de 100 gigawatts en 2018.

La capacité mondiale en énergie éolienne a augmenté de 19 % en 2019, selon le dernier rapport du Conseil Mondial de l'Énergie Éolienne. La capacité de production électrique éolienne a augmenté de 60,4 gigawatts, soit une progression de 19 %, par rapport à 2018. Il s'agit d'une des augmentations les plus fortes enregistrées par l'industrie éolienne mondiale. Cette croissance s'explique principalement par le développement de parcs éoliens en mer couplés avec un boom des projets terrestres aux États-Unis et en Chine. Permettant ainsi à ces deux pays de maintenir leurs positions de plus grands marchés mondiaux pour le développement de l'énergie éolienne terrestre. Ensemble, les États-Unis et la Chine représentent près de deux tiers de la croissance mondiale du secteur de l'éolien. [11]

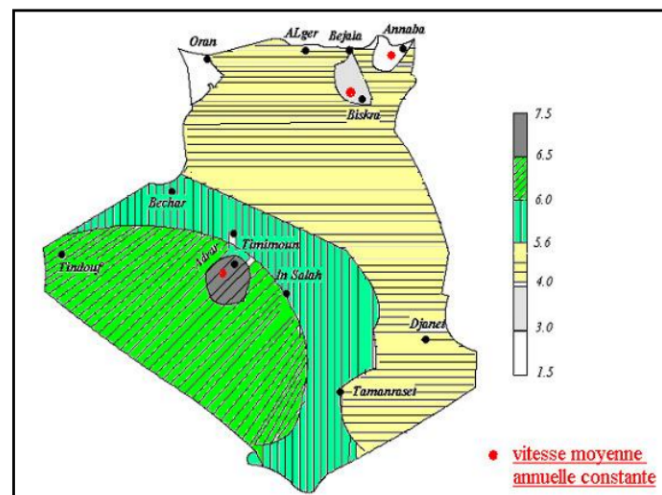
### I. 5. L'énergie éolienne en Algérie :

L'Algérie ayant un gisement éolien important, dont le régime du vent est modéré entre **2 et 6 m/s** selon la carte des vents établie par le Centre de Développement Des Énergies Renouvelables (**CDER**)

En raison que l'Algérie possède une surface géographique importante, le potentiel éolien se Diverge selon chaque région. Au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne du vent modérée (**1 à 4 m/s**) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Le potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux.

Au Sud de pays, la vitesse moyenne du vent dépasse **4m/s**, plus particulièrement au sud-ouest, avec un vent qui dépasse le **6 m/s** dans la région d'Adrar .

A ce jour, une première et 'unique' ferme éolienne de 10MW a été installée dans la région de Kaberten dans la wilaya d'Adrar. Il est cependant à noter que les tentatives de l'exploitation de l'énergie éolienne dans le territoire national ne datent pas d'hier. En effet, l'analyse d'un ensemble de comptes rendu et d'archives provenant du comité d'énergie du vent du service d'Hydraulique a montré que plusieurs essais ont été menés entre 1930 et 1974 dans l'objectif de promouvoir l'utilisation de l'énergie éolienne et ce pour la production électrique ou pour le pompage.[12]



**Figure I.9 :** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) à 10m du sol en Algérie.



**I. 6. Conclusion :**

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables, réutilisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux..., contrairement aux énergies fossiles, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets ou encore d'émissions polluantes .ce sont des énergies de l'avenir pour une planète plus verte. Seul petit bémol, les installations utilisées sont onéreuses à l'achat mais avec des couts de maintenance et d'entretien réduit, et surtout une matière première totalement gratuite.

## **Chapitre II :**

# **Conversion de l'énergie par un système éolien**

### I. 1. Introduction :

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires ou encore actionner les meules des moulins. Elle fut aussi utilisée pour abreuver les bêtes dans les champs par des pompes à eau. Cela même après plus d'une décennie qu'elle produit de l'électricité qui est devenue une source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, l'électricité est utilisée dans les domaines domestique ou industriel. En ce moment présent, plusieurs technologies sont devenues de plus en plus performantes pour capter l'énergie du vent. En outre leurs caractéristiques mécaniques, mais aussi l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

### II. 2. Quelques notions sur le vent :

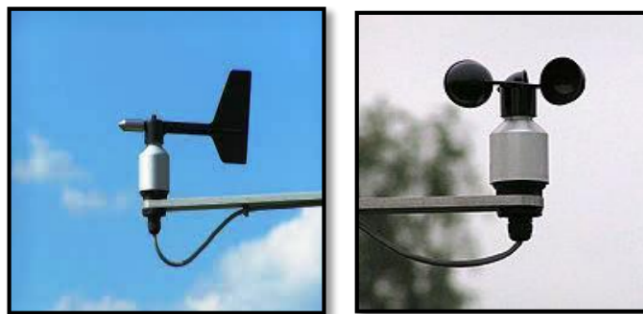
Le vent est de l'air en mouvement. Il est produit par le réchauffement inégal de la surface de la terre par le soleil. Étant donné que la surface de la terre est constituée de diverses formations terrestres et aquatiques, elle absorbe le rayonnement solaire de manière inégale. Deux facteurs sont nécessaires pour spécifier le vent: la vitesse et la direction [8].

### II. 3. la vitesse et la direction du vent :

La direction du vent est déterminée par divers facteurs, y compris le frottement ou le manque de frottement que la surface de la terre place dessus. Le vent passant au-dessus d'une étendue d'eau peut changer de direction en raison d'une diminution de la quantité de frottement qu'il subit. De manière très générale, l'air chaud de l'équateur monte, se déplace vers les pôles, tombe puis revient à l'équateur, aidant à créer des modèles de vent [9].

La direction du vent est mesurée en fonction du nombre de degrés du nord, ou 360 degrés sur la boussole et est décrite en fonction de la direction d'où il provient.

Par exemple, un vent d'Est signifie que le vent vient de l'Est et ne se déplace pas vers l'est. Le vent se déplace généralement horizontalement sur la Terre et est mesuré en surface à l'aide d'anémomètres et de girouettes et dans la haute atmosphère à l'aide de rapports d'aéronefs.



**Figure II.1 :** Girouette et nanomètre.

## Chapitre II : Conversion de l'énergie par un système éolien

Selon l'échelle de beaufort qui devise les vents en fonctions de leurs vitesses en 12 catégories, comme le monte le tableau ci-dessous :

Degré	Vitesse en (km/h)	Qualification	Description sur terre	Description sur mer	Hauteur des vagues.
0	<1	Calme	Fumée verticale	Mer d'huile	0
1	1 à 5	Très légère brise	La fumée indique la direction du vent, les girouettes ne s'orientent pas	Ridée	<10cm
2	6 à 11	Légère brise	Vent senti au large. bruissement des feuilles	Belle	10 à 50cm
3	12 à 19	Petite brise	Drapeaux flottants	Peu agitée	50 cm à 1m
4	20 à 28	Jolie brise	Branches agitées, cheveux dérangés	Peu agitée à agitée	1 à 1.7 m
5	29 à 38	Bonne brise	Yeux gênés par la poussière. petits arbres balancés	Agitée	1.7 à 2.5m
6	39 à 49	Vent frais	Les fils électriques sifflent . les grosses branches bougent	Forte	2.5 à 3.5m
7	50 à 61	Grand frais	Marche gênée. arbres entiers se balançant	Très forte	3.5 à 5 m
8	62 à 74	Coup de vent	Marche difficile	Très forte à grosse	5 à 7 m
9	75 à 88	Fort coup de vent	Tuiles envolées, branches cassées	Grosse à très grosse	7 à 10 m
10	89 à 102	Tempête	Adultes renversés, maisons endommagées, arbres abattus	Très grosse	10 à 13 m
11	103 à 117	Violente tempête	Bâtiment sérieusement endommagés	Très grosse, énorme	13 à 16 m
12	>118	Ouragan	Dégâts importants	Énorme	>16m

**Tableau II.1 :** Échelle de beaufort.

### II. 4. Descriptif d'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

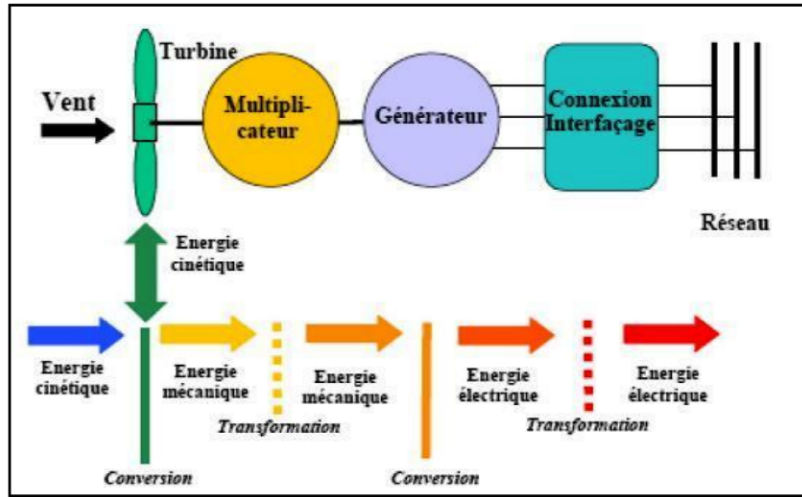
- La transformation en énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- La production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne :

- Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.
- ❖ On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :
  - Industrielles : les grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique ;
  - Domestiques : des petites éoliennes installées chez les particuliers.

### II. 5. Conversion de l'énergie dans un système éolien :

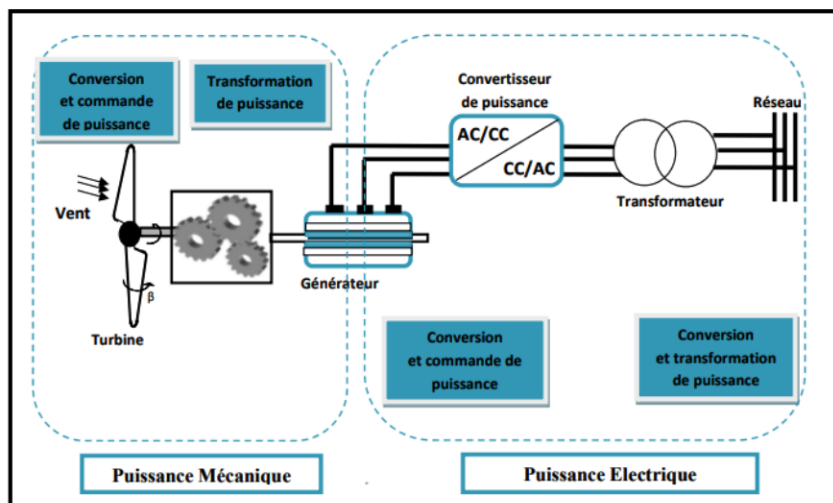
Un aérogénérateur (Eolienne), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.



**Figure II.2 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent

La production de l'énergie éolienne {travers l'aérogénérateur est basée sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées au rotor d'un générateur. Lorsque le vent est suffisamment fort, environs 3m/s, les pales tournent et entraînent à travers un multiplicateur un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable, ce qui explique l'engouement fort pour cette nouvelle technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser encore, pendant de nombreuses années, cette confortable avancée.

Le Système de Conversion Eolien (SCE) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et d'un réseau électrique.



**Figure II.3:** Principaux organes du système de conversion éolien.

### II. 6. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour.

- Les pales : Elles sont directement exposées au vent ce qui provoque leur rotation.
- Le rotor : C'est la partie tournante dans une éolienne. Il capte et transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- La nacelle : Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques, différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine.
- Le multiplicateur de vitesse : Il sert à augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre primaire mu par le vent, et l'arbre secondaire entraînant le générateur électrique.
- L'arbre secondaire : Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- Le générateur : C'est la machine constituée d'un stator et d'un rotor tournant qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Le contrôleur électronique : Son rôle est 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 pour son fonctionnement, gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble du rotor et nacelle face au vent et assure également la gestion des différentes pannes qui peuvent survenir.
- Divers dispositifs de refroidissement : Le refroidissement des composants situés { l'intérieur de la nacelle est assuré par des ventilateurs ou bien par des radiateurs d'eau ou d'huile.

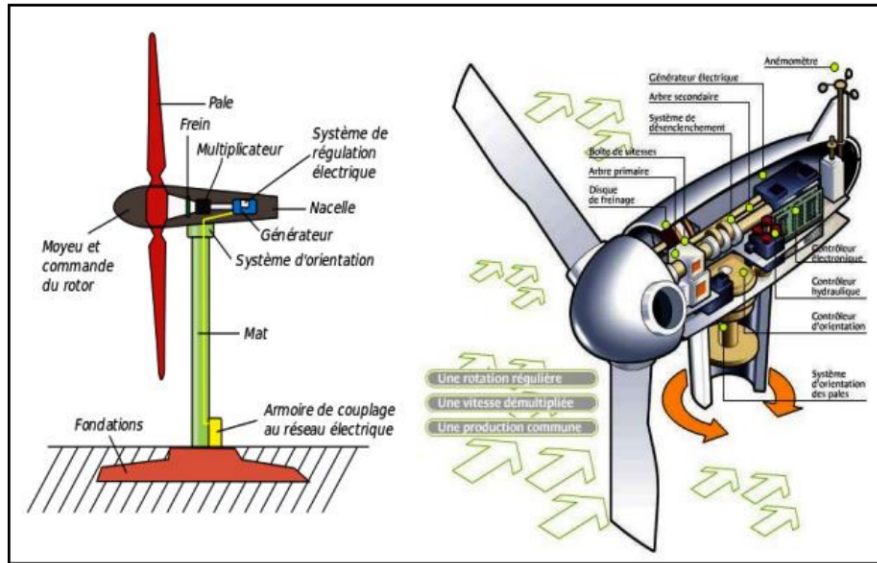


Figure II.4 : Principaux composants d'une éolienne

## II. 7. Classification des éoliennes selon la taille :

En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât,  $L$ , soit égale au diamètre du rotor,  $D$ . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées [9].

Dénomination	Diamètre du rotor	Aire balayée [m <sup>2</sup> ]	Puissance [KW]
Micro	0.5 à 1.25	0.2 à 1.2	0.1 à 0.4
Mini	1.25 à 3	1.2 à 7.1	0.4 à 2
domestique	3 à 10	7 à 79	2 à 30
Petite commerciale	10 à 20	79 à 314	30 à 120
Moyenne commerciale	20 à 50	314 à 1963	120 à 750
Grande commerciale	50 à 100	1963 à 7854	750 à 3000
Géante commerciale	100 à 170	7854 à 22686	3000 à 8000

Tableau II.2 : Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.



Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- **Micro-éoliennes** : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- **Mini-éoliennes** : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- **Eoliennes domestiques** : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- **Petites éoliennes commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Moyennes éoliennes commerciales** : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- **Eoliennes grands commerciales** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.
- **Eoliennes commerciales géantes** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes et également en offshore, elles sont très efficaces et issues des dernières générations technologiques

### II. 8. Classification selon le principe de fonctionnement :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale

#### ➤ Les éoliennes à axe horizontale :

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales. Ce sont celles les plus courantes. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place [10].

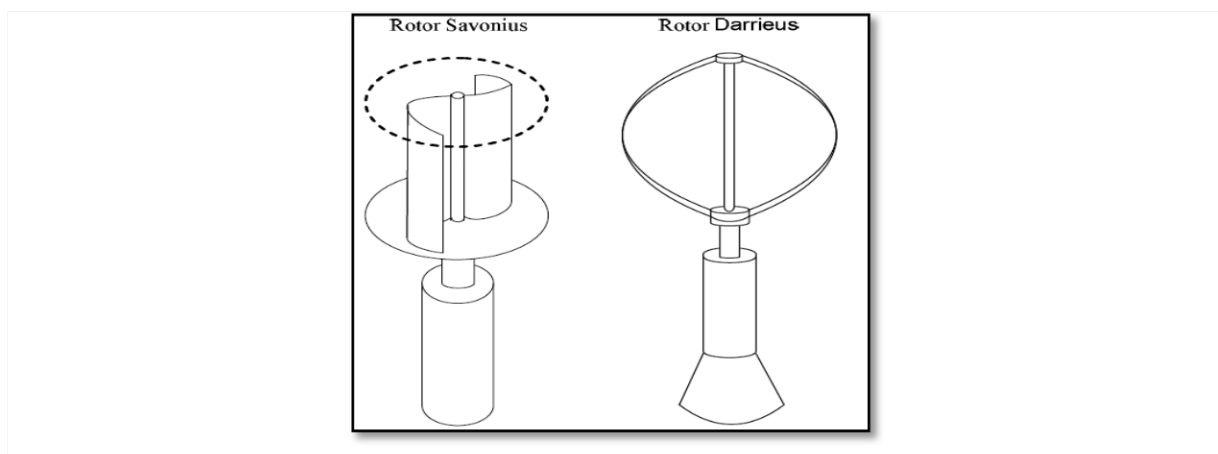


**Figure II.5 :** les éoliennes à axe horizontale.

➤ Les éoliennes à axe vertical :

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles n'ont besoin d'aucun système pour les orienter dans la direction du vent, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent. Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes "classiques" à pôle. Eolienne à axe vertical de type Savonius Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pôle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions de vent. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

L'implantation d'éolienne verticale sur un bâtiment n'est pas une opération anodine car les vibrations peuvent endommager le bâti.



**Figure II.6 :** les éoliennes à axe verticale.

### ❖ Avantages :

- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

### ❖ Inconvénients :

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

II. 9. Stratégie de fonctionnement d'une éolienne :

II. 9.1. Bilan des forces sur une pale :

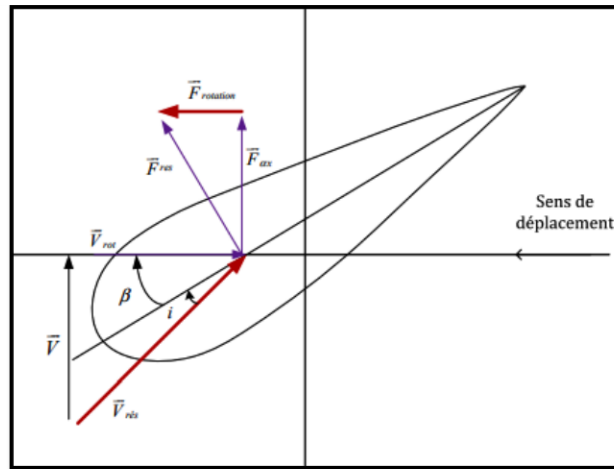


Figure II.7: Bilan des forces sur la pale.

C'est la représentation en longueur d'une pale (Berlu, 1996). Le sens et la vitesse de vent sont caractérisés par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  modélise le vent engendré par la rotation de l'éolienne. La somme des deux vecteurs donne  $\vec{V}_{res}$ . La force du vent sur la pale est notée  $\vec{F}_{res}$  qui est constitué de  $\vec{F}_{ax}$  lié à la résistance du mat et  $\vec{F}_{rot}$  qui produira le mouvement désiré.

Lorsque le vent est trop puissant, L'angle calage  $\beta$  est alors ajusté pour restreindre l'extraction de la puissance nominale.

II. 10. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

II. 10.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" :

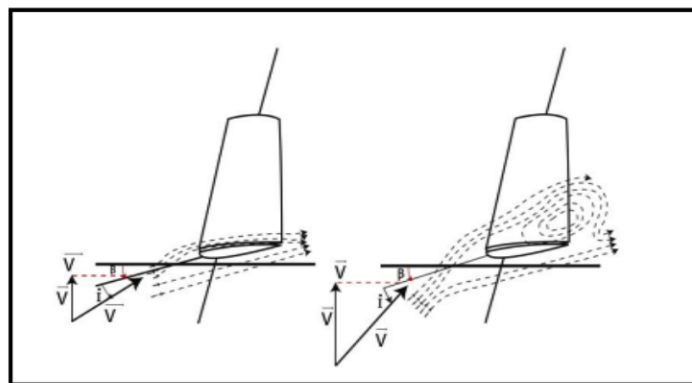
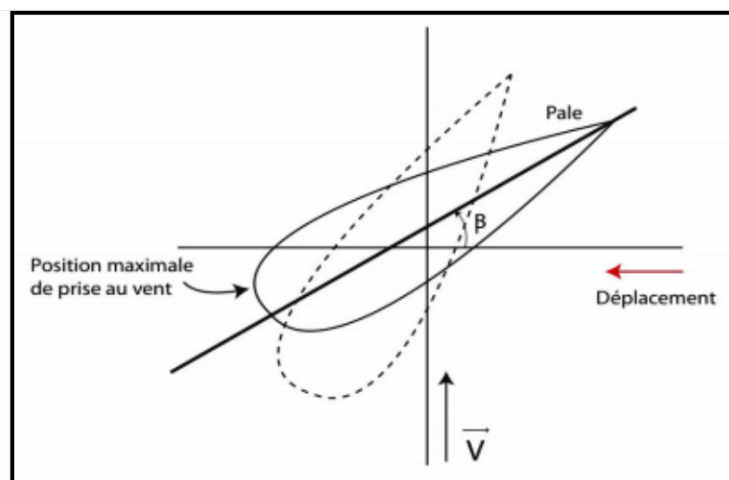


Figure II.8 : Flux d'air sur une pale " stall ".

Des éoliennes reliées directement au réseau électrique fonctionnaient à vitesse de rotation fixe. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins cher est un principe inhérent à la forme de la pale dit "stall". Lorsque l'angle d'incidence  $i$  atteint une valeur trop

élevée, l'aspiration créée par la topologie de cette même pale n'est plus optimale, ce qui induit des turbulences à la surface de celle-ci et le coefficient de puissance s'en voit réduit. Ceci bloque alors une possible accélération de la vitesse de rotation de l'éolienne.

Ce système est assez fiable, mais est fonction de la masse volumique de l'air et de la saleté des pales. Ce système peut être amélioré en permettant une rotation de la pale sur elle-même (ce concept est appelé « stall actif »), (Poitiers, 2003)[15], maximisant ainsi l'énergie captée pour des vitesses de vent faibles. De même pour les vitesses de vent trop élevées, la pale est inclinée et diminue ainsi l'angle de calage  $\beta$ . Le couple mécanique se voit ainsi épargné par les fluctuations de vents. (Heier et Waddington, 1998)[26].



**Figure II.9 :** Variation de l'angle de calage d'une pale.

### II. 11. Les générateurs utilisés dans les éoliennes :

L'évolution de la technologie des aérogénérateurs n'a pas cessé de s'accroître au fil de ces 20 dernières années. Entraînant divers types d'éolienne. Et de même occasion Différents types de machines électriques qui peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne.

Le type de machine dépend essentiellement des facteurs techniques et économiques pour chaque application. [13]

- Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance.
- Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW le générateur asynchrone est plus courant et économique.

### II. 11.1. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Le moteur synchrone est devenu compétitif par rapport au moteur à induction dans le domaine des variateurs de vitesses. Le moteur synchrone est analogue au moteur à induction sauf que l'excitation dans une machine synchrone est produite séparément par une source de tension continue, donc la machine peut être réalisée avec un grand entrefer sans dégradation des performances. De plus ce moteur peut fonctionner avec un facteur de puissance unitaire, en avance ou en retard. Le fonctionnement à un facteur de puissance à la proximité de l'unité, réduit les pertes cuivres satirique d'une part et permet d'autre part de réduire la taille de l'onduleur avec simplicité de commutation. Le cout d'une machine synchrone est relativement élevé par rapport à d'autre machine, d'autre part, la détection de la position du rotor est nécessaire pour avoir des performance élevées.[14]

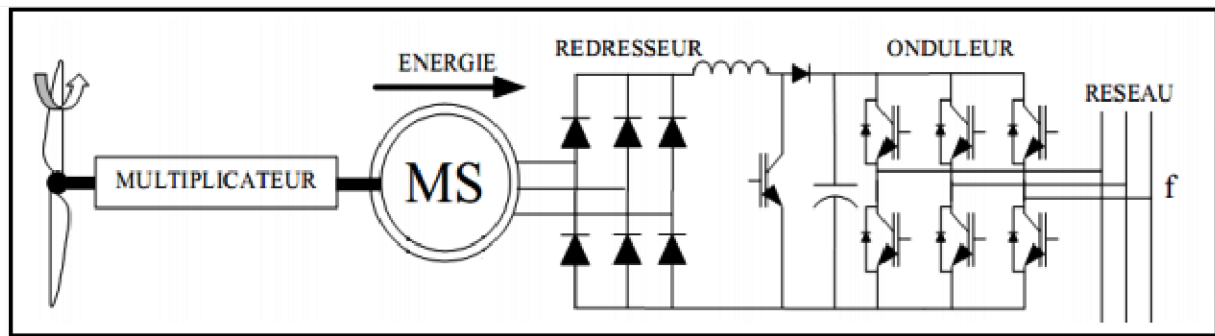
#### II. 11.1.1. Les alternateurs synchrones à rotor bobinés ou à aimant permanent :

L'utilisation d'une machine synchrone courante, où le rotor et le stator tourne à la même vitesse(en synchronisme). L'alternateur étant connecté au réseau, la vitesse de rotation doit être un multiple des pulsations de courant statoriques (Poitiers, 2003)[15].

L'implantation d'un tel système à une éolienne marque un désagrément pour le maintien de la vitesse de rotation fixe, ainsi que du synchronisme de la génératrice avec le réseau. Afin d'éviter ces problèmes, on insère une interface d'électronique de puissance. On peut ainsi se permettre de fonctionner à vitesse variable (Neris, Vovos, et Giannakopoulos, 1999)[16].

Plusieurs modes d'excitation peuvent être utilisés pour ce type de machine :

- la roue polaire : c'est le principe de bobines alimentées en courant continu grâce à un redresseur lui-même connecté au réseau. Ce mode là induit des « contacts glissants au rotor » Les aimants permanents sont donc souvent privilégiés au bobinage évoqué précédemment. C'est un système couteux mais son utilisation reste de plus en plus fréquente de ce type de machine cela la rend de plus en plus accessible financièrement. Néanmoins, les variations fortes de couple électromagnétique inhérent au cas de l'éolien peuvent démagnétiser les aimants classiques. Le temps de vie s'en voit clairement raccourci (Weigel, 1997)[17]



**Figure II.10 :** Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.

La figure ci-dessus représente une interface connectant la machine synchrone avec le réseau. En présence d'un redresseur simple (il n'y a pas de puissance réactive consommée avec cette machine). Peut être raccordé avec un boost, pour permettre de fournir une tension assez importante à l'onduleur lorsque la vitesse de rotation est basse. L'onduleur MLI quant à lui, régule le facteur de puissance sur le réseau améliorant ainsi la qualité du courant fourni au réseau. Le boost est souvent remplacé par un redresseur commandé : Le transfert étant fait intégralement par l'intermédiaire du stator, le dimensionnement des convertisseurs est fait pour la puissance nominale totale. Pour des faibles vitesses, le fait d'utiliser la machine synchrone pour des vitesses de vents faibles nous autorise à enlever le multiplicateur qui, usuellement, provoque pertes et bris. Mais un nombre de pôles important implique une grande envergure de l'éolienne, la rendant plus incommode. [18]

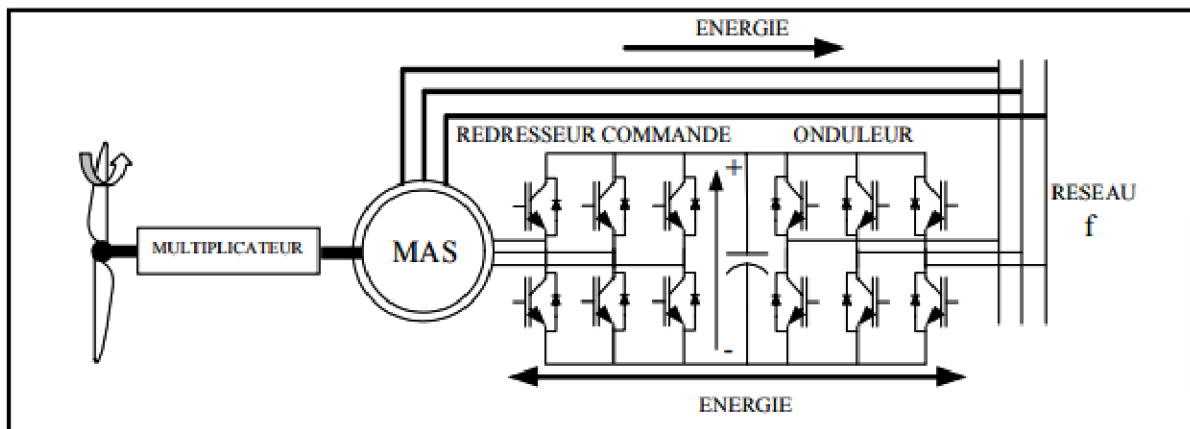
### II. 11.2. Systèmes utilisant la machine Asynchrone :

Les éoliennes installées dans le monde sont en majorité équipées par des génératrices asynchrones. Car elles sont toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant. Pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point  $g = 0$ )). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%) [15].

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau. De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau [15]

### II. 11.2.1. Les alternateurs asynchrones à cage d'écureuil:

C'est un cas de figure pouvant fonctionner à vitesse variable. Peu importe la rotation du rotor, le redresseur permet la conversion alternatif en continu de même que l'onduleur la conversion de continu à alternatif. Le redresseur permet la variation de la vitesse de la machine asynchrone tandis que l'onduleur s'occupe de la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive. Les convertisseurs sont coûteux et provoquent des problèmes vis-à-vis de l'énergie fournie sur le réseau. Le redresseur ci-présent est unidirectionnel ; de ce fait la puissance réactive est néfaste aux capacités car elle ne peut être délivrée par le réseau. Le redresseur simple peut être remplacé par un redresseur commandé par M.L.I. rendant ainsi la puissance réactive contrôlable mais ceci rendrait ce dispositif encore plus cher et compliqué (Schreiber)[19]. La production de ce dispositif a été longtemps enrayée par ces inconvénients.



**Figure II.11 :** Machine asynchrone connectée sur le réseau.

### II. 11.2.2. Les alternateurs asynchrones à double alimentation :

#### II. 11.2.2.1. Structure de Kramer :

Ce système permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs vis-à-vis de la puissance nominale. Il convient seulement de limiter le glissement à 30% maximum. Néanmoins, les « thyristors » utilisés au niveau de l'onduleur détériorent le facteur de puissance et le redresseur unilatéral ne permet au système de générer de l'énergie que pour une vitesse de rotation supérieure à la vitesse de synchronisme. [20]



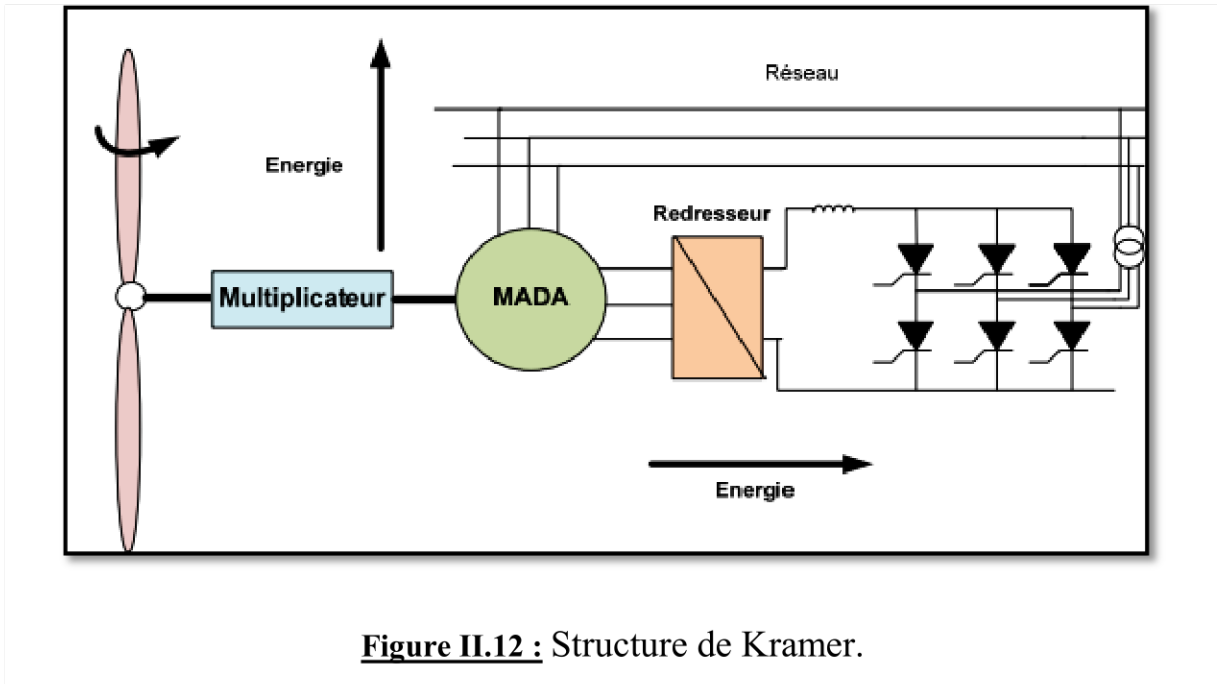


Figure II.12 : Structure de Kramer.

II. 11.2.2.2. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur :

Un cycloconvertisseur permet un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de KRAMER. la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour préserver le bon rendement du système, si c'est une variation positive ça sera un fonctionnement hyposynchrone ,si c'est une variation négative ça sera un fonctionnement hypersynchrone) [15].

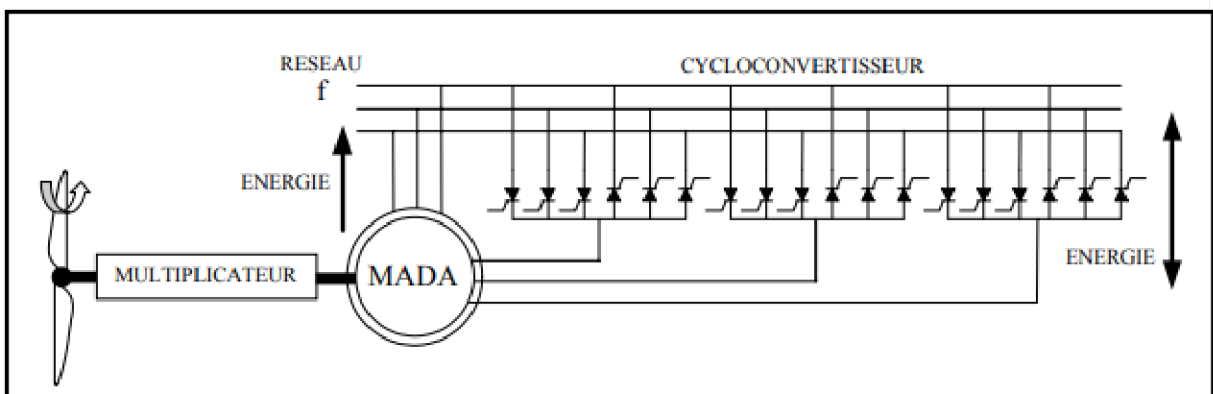


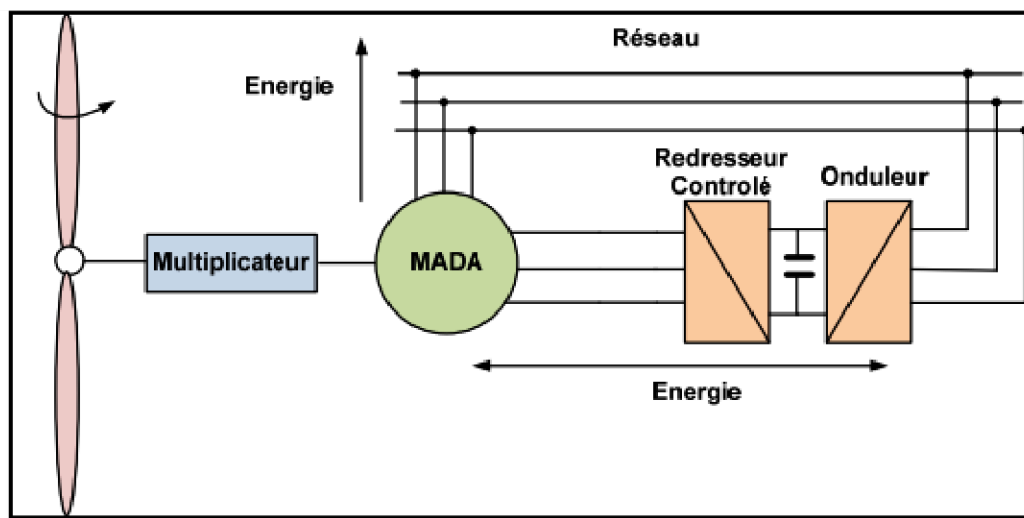
Figure II.13 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Son principe est de fractionner des tensions sinusoïdales du réseau pour reproduire une onde de fréquence inférieure. par conséquent, il génère des perturbations harmoniques importantes

qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Grâce au progrès de l'électronique de puissance les cycloconvertisseurs ont été substitués par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [21]

### II.11.2.2.3. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Une configuration similaire aux cycloconvertisseurs, quoique les interrupteurs GTO sont remplacés par des (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO, permettant de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [22].



**Figure II.14 :** Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Ce dispositif peut fonctionner à vitesse variable dans le cadre éolien. La bilatéralité du redresseur/onduleur offre une accessibilité au mode hypo-synchrone ainsi que hyper-synchrone et rend possible le contrôle du facteur de puissance. Lorsque  $g$  avoisine les trente pour cent du synchronisme, alors la chaîne de conversion peut être dimensionnée à un tiers de la puissance nominale, ce qui réduit considérablement le coût. D'autre part lorsque la machine fonctionne en mode hyper-synchrone la puissance créée fournie par le stator perdure et le rotor fournit également une puissance allant jusqu'à trente pour cent de la puissance totale. Ainsi la puissance extraite peut être supérieure à la puissance nominale. La qualité de tension au point de raccordement ne s'en voit pas perturbée. D'un point de vue industriel, cette topologie est la plus susceptible d'être utilisée malgré une large marge d'amélioration [23].

### II. 12. Conclusion :

La production de l'énergie éolienne intéresse de plus en plus de pays afin de produire une énergie propre et durable. Les éoliennes ont connu une évolution entraînant la spécialisation dans plusieurs domaines de compétences Utilisant des matériaux et des technologies les plus novateurs. L'industrie éolienne devrait pouvoir produire des aérogénérateurs permettant de limiter, voir même de supprimer les centrale thermique . Les grandes fermes de production s'améliorent de plus en plus avec des éoliennes plus puissantes. Afin de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capable de capter au mieux la puissance disponible dans le vent. [24]

## **Chapitre III :**

### **Modélisation de l'association turbines éoliennes - générateur asynchrone**

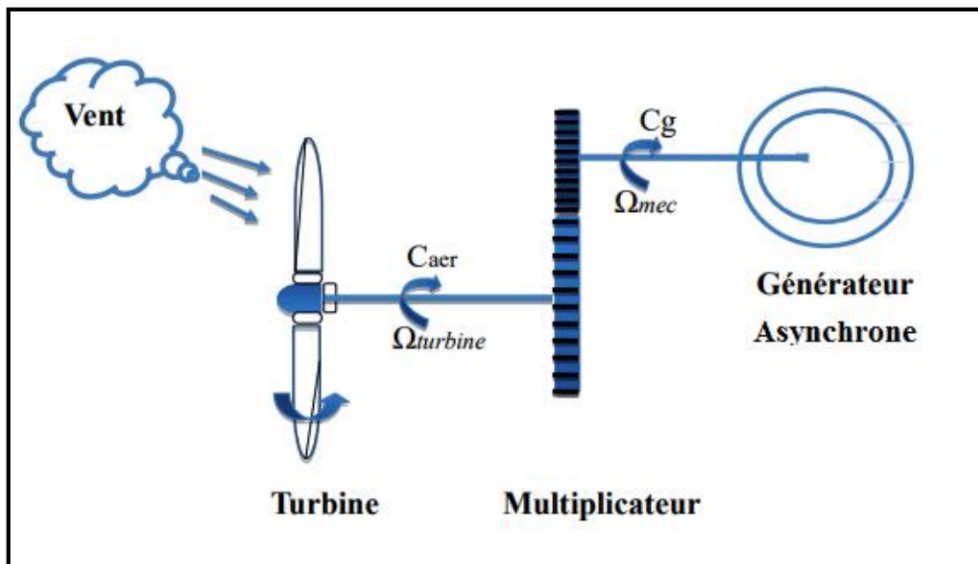
### III. 1. Introduction :

L'étude d'un ensemble turbine éolienne assimilé à une machine et un convertisseur s'appuie sur un modèle de représentation. C'est pour cela que la modélisation est importante pour l'étude et la commande de ce système suivant les résultats convoités, cette dernière pourra être plus ou moins complexe et précise. La recherche d'une très bonne précision mène souvent à des Systèmes mathématiques relativement difficiles a résoudre, ce qui nécessite des temps de Calculs conséquents. Par contre, un modèle basé sur un nombre d'hypothèses Simplificatrices requiert certes des temps de calculs limités mais aboutit dans la plupart des Cas d'une précision limitée.

### III. 2. Modélisation de la turbine éolienne :

Dans cette partie, il y à la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice :

- la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables;
- le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relis la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur



**Figure III.1 :** modélisation d'une turbine éolienne.

**III. 3.1. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :**

**a) Loi de BETZ:**

Une éolienne traite de la transformation d'énergie cinétique en énergie électrique. afin d'avoir l'efficacité d'une telle conversion, il faut connaître la quantité d'énergie dans le vent. Les particules d'air ayant une masse « m » et ayant un déplacement a une vitesse « V » et postulant que la vitesse est la même au moment de frapper le rotor. On a alors :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^3 \quad (III.1)$$

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 :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (III.2)$$

La masse des particules est notée :

$$m = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \quad (III.3)$$

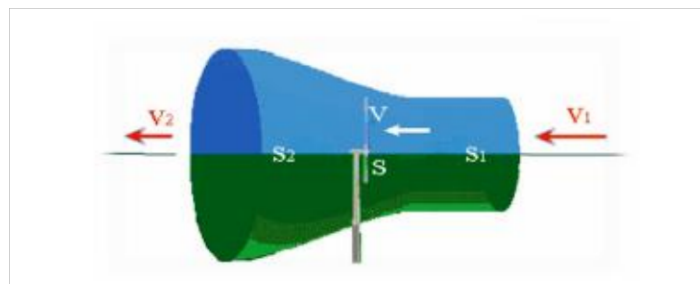
Ainsi :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (III.4)$$

D'après le théorie le système éolien à axe horizontal de Betz la puissance de vent est :

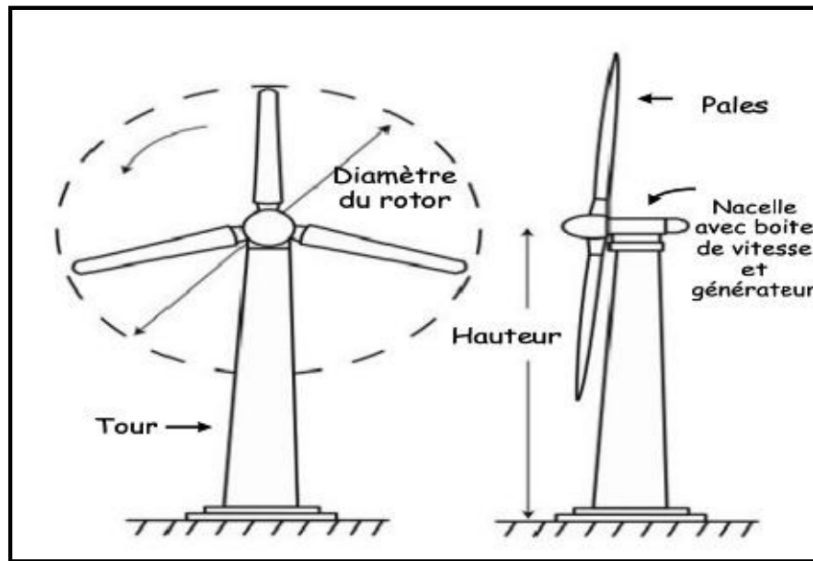
$$P_{vent} = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (III.5)$$

Avec :  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  : masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer.



**Figure III.2 :** Tube de courant d'air autour d'une éolienne

En analysant l'équation de la puissance du vent (III.5), on constate que le paramètre prédominant est la vitesse du vent. Il apparaît nettement que l'énergie est bien plus élevée à haute vitesse de vent. Et aussi, le fait que la puissance soit proportionnelle à la surface balayée, doubler le diamètre du rotor va quadrupler la puissance potentiellement disponible. La densité de l'air tient également un certain rôle dans la quantité de puissance mécanique disponible, un schéma caractérisant ces différents facteurs ci-après`



**Figure III.3 :** Schéma d'une éolienne Adaptée de Singh [25].

### **b) Coefficient de Puissance $C_p$ :**

La puissance disponible dans le vent peut être transformée en énergie électrique utile de la façon la plus optimale possible pour cela, il faut dépendre de la conception des pales du rotor, et de ce fait, de leurs capacités à récupérer l'énergie du vent

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance  $C_p$  dans le calcul de la puissance aérodynamique. Ainsi, la puissance récupérée par la turbine peut s'identifier à la puissance cinétique du vent exprimée précédemment mais dotée d'un coefficient  $C_p(\lambda, \beta)$  propre à l'éolienne tel que :

$$P_{\text{turbine}} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{\text{vent}} \quad (\text{III.6})$$

Dés alors on obtient :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{III.7})$$

### Chapitre III : Modélisation de l'association turbines éoliennes - générateur asynchrone.

Le coefficient de puissance adapté à la loi de Betz :

$$C_p = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left( 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \quad (\text{III.8})$$

L'équation théorique de  $C_p$  peut nous donner tout au plus le maximum théorique .en introduisant:

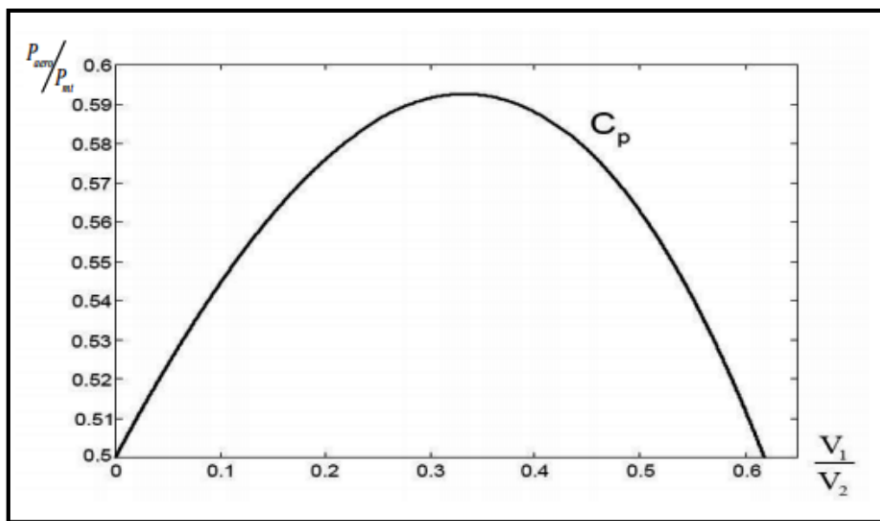
$$x = \frac{v_2}{v_1} \quad (\text{III.9})$$

On introduit cette dernière dans (III.8) :

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + x)(1 - (x)^2) \quad (\text{III.10})$$

En résolvant l'équation avec l'action du freinage minime :  $x=1/3$

On obtient :  $C_p \text{ max} = 0.593$



**Figure III.4 :** Coefficient de puissance.

Cela indique que la puissance maximale qu'on peut exploiter est 59,3%. Par conséquent, le vent sera réduit à 1 / 3 de sa vitesse originale. Mais en pratique, la valeur maximale du coefficient de puissance efficace sera généralement comprise entre 0,4 à 0,54.

Ce coefficient varie avec le ratio de vitesse de rotation ( $\lambda$ ) et l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ )



**c) La vitesse de rotation  $\lambda$  :**

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V} \quad (III.11)$$

$\Omega_{turbine}$  : vitesse de la turbine.

R : rayon de l'aérogénérateur.

Le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III.12)$$

Le coefficient  $C_p$  caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne.

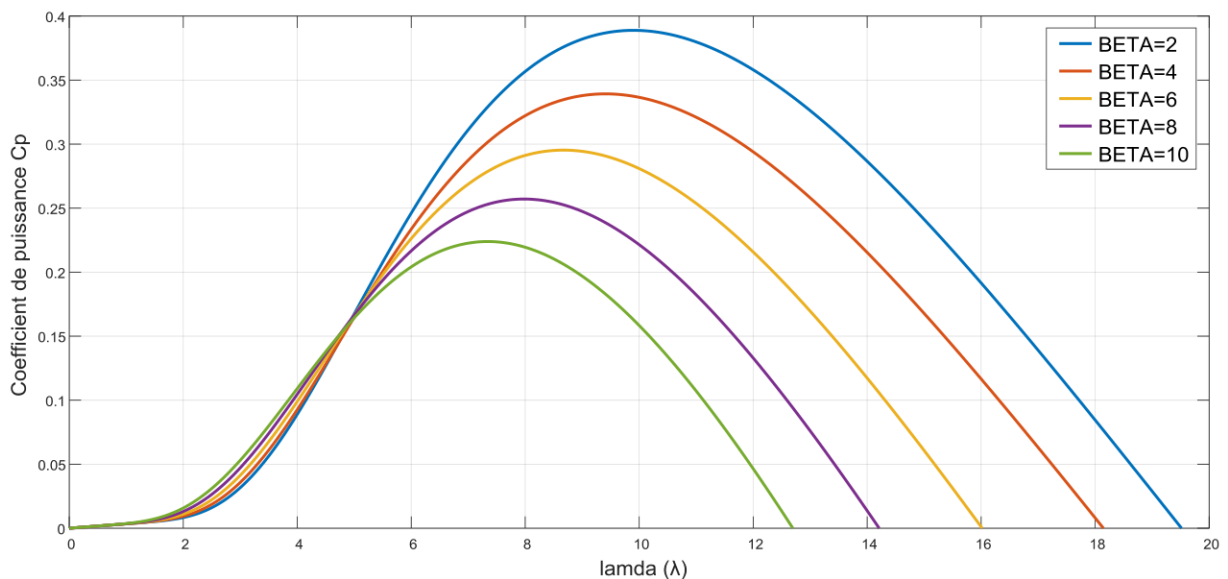
$$C_p = [0.5 - 0.00167 \cdot (\beta - 2)] \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (III.13)$$

$\lambda$  : Vitesse de rotation.

$\beta$  : Angle de calage des pales (en degrés).

On peut le définir comme étant le rapport :

$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)})$



**Figure III.5 :** Caractéristique  $C_p=f(\lambda)$

### III. 3.2 Le multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$ , assez lente à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_g$



**Figure III.6 :** modèle mécanique du multiplicateur.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (III.14)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III.15)$$

### III. 3.3. Modélisation de l'arbre de la machine :

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

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{éol} - C_{em} - (f_m - f_t)\Omega_{mec} \quad (III.16)$$

Où:

$J_t$  : l'inertie de la turbine

$J_m$  : l'inertie la machine utilisée,

$f_m$  : le coefficient de frottement de la machine.

$F_t$  : le coefficient de frottement des pâles.

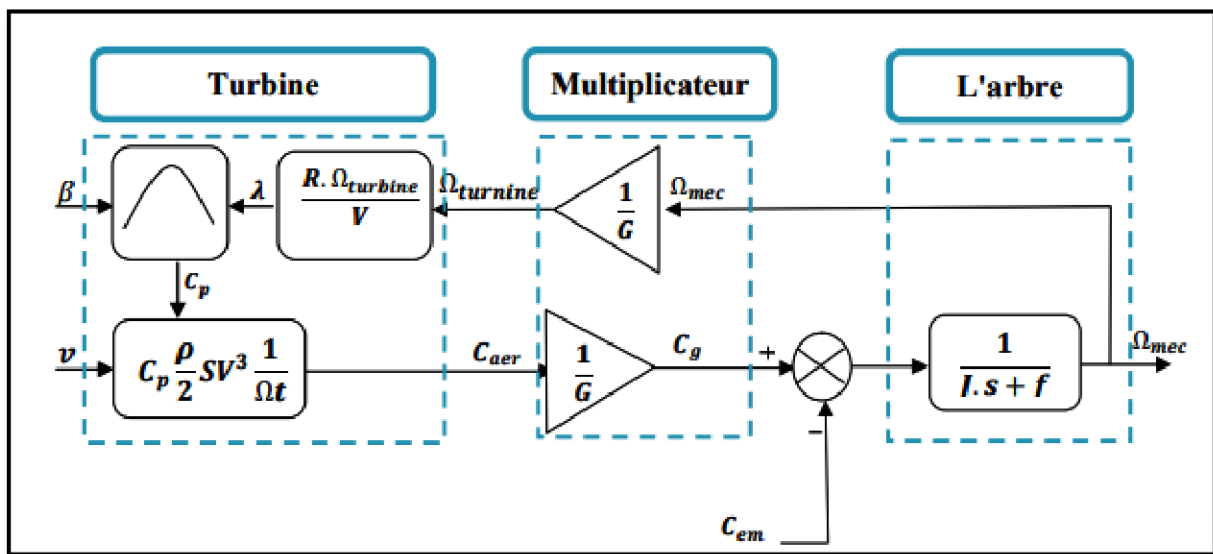
$C_{éol}$  : le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante:

$$C_{éol} = Jt \frac{d\Omega}{dt} + C_{em} + f_m \Omega \quad (III.17)$$

### III. 3.3.1. Schéma bloc de la turbine :

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure



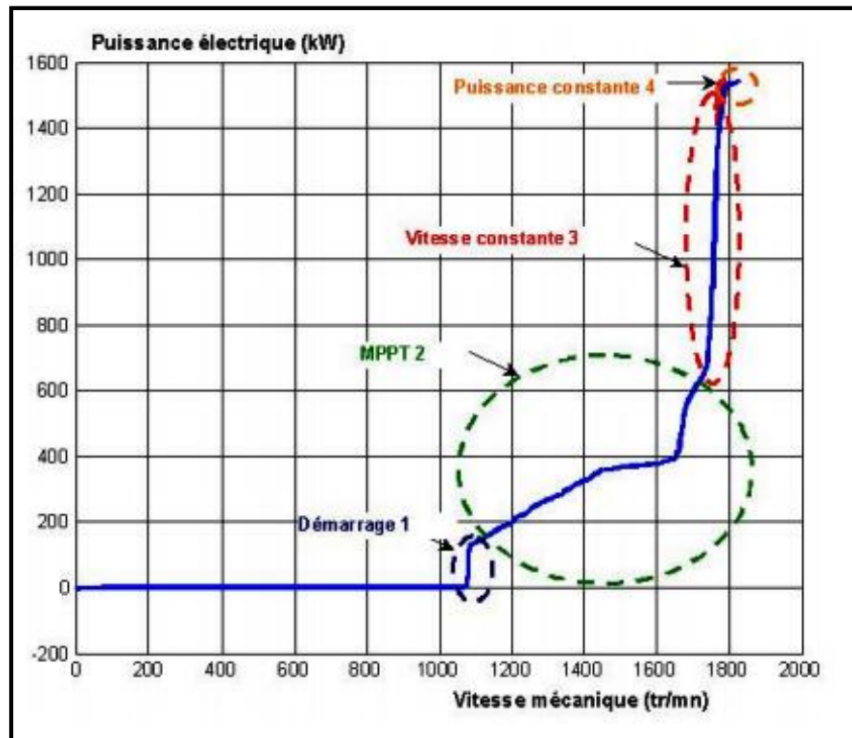
**Figure III.7 :** Schéma bloc du modèle de la turbine.

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle d'orientation de la pale,
- Le couple électromagnétique la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système

### III. 3.3.2.. Région d'exploitation de turbine :



**Figure III.8** : Région d'exploitation de turbine.[27]

Quatre zones principales peuvent être distinguées :

- 1) zone de démarrage : La puissance du vent doit être suffisante pour vaincre les frottements et l'inertie de l'éolienne. Elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse.
- 2) Fonctionnement normal (inférieur à la vitesse du vent moyen): à partir de la vitesse de départ la turbine suit la courbe de puissance si la régulation fonctionne correctement. Idéalement, l'éolienne doit être exploitée au maximum de  $C_p$

Pour des vitesses de vent faible, lorsque la puissance aérodynamique produite par l'éolienne est inférieure à la puissance maximale du convertisseur de puissance, l'éolienne est exploitée au  $C_{pmax}$ . L'angle de tangage de l'éolienne est contrôlé pour avoir la valeur maximale possible de. Comme le tour par minute change, l'angle de tangage est maintenu à sa valeur optimale.

- 3) Zone vitesse constante :, éolienne fonctionne à vitesse constante. dans cette zone, la puissance de la génératrices atteint des valeurs importantes.
- 4) Fonctionnement établi (haute vitesse de vents): la puissance captée par les pales est maintenue dans la limite, à l'aide du mécanisme de régulation d'angle de tangage. Comme la vitesse du vent augmente, la puissance générée par l'éolienne augmente également. Une fois le maximum du convertisseur de puissance atteint, l'angle de tangage doit être augmenté pour apporter la puissance aérodynamique. Comme l'angle de tangage est augmenté, l'éolienne fonctionne à faible rendement. Grâce à cela, la puissance mécanique d'entrée entraînant le générateur peut être facilement contrôlée. En supposant que le contrôle du pitch peut être fait instantanément, l'accélération et la décélération peuvent être faites à zéro et la vitesse peut être maintenue constante en contrôlant le  $P_{mec}$  le rendant exactement égale à  $P_{elec}$ . [27]

### III.3.3.3. Bloc de simulation de la turbine éolienne :

La simulation de la turbine éolienne se fait par l'implémentation du modèle mathématique de la turbine sous l'environnement Matlab/Simulink..

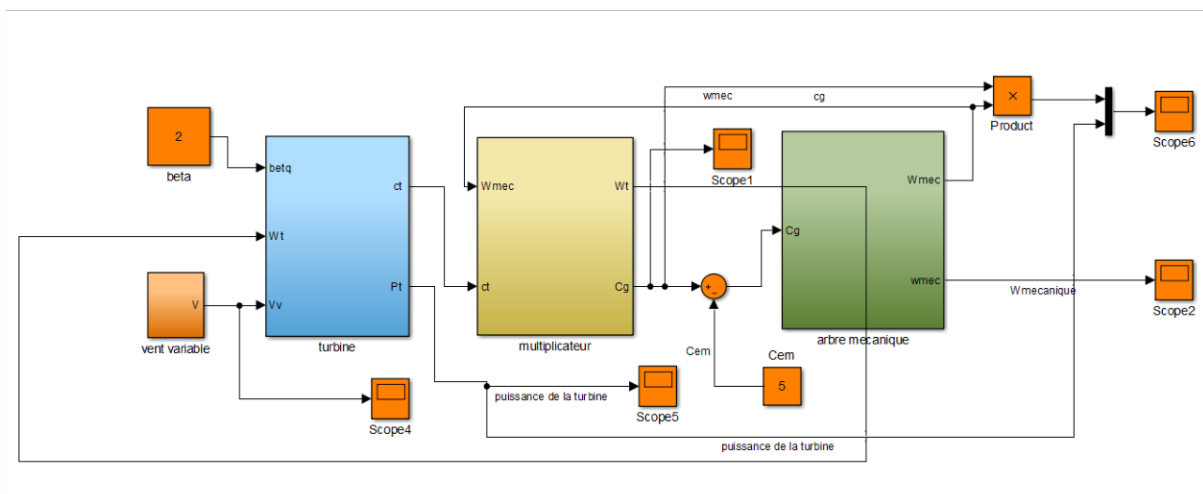
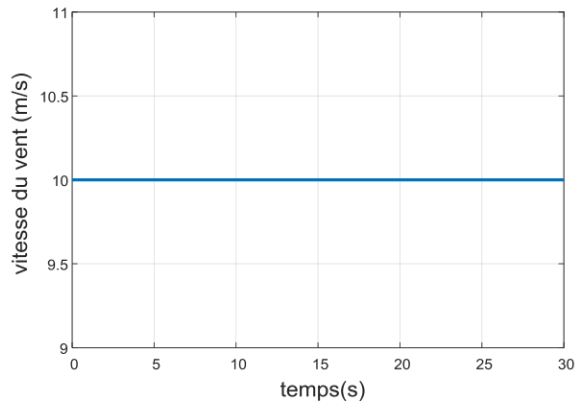


Figure III.9 : bloc de simulation de la turbine éolienne.

#### ❖ Paramètres utilisés dans la simulation :

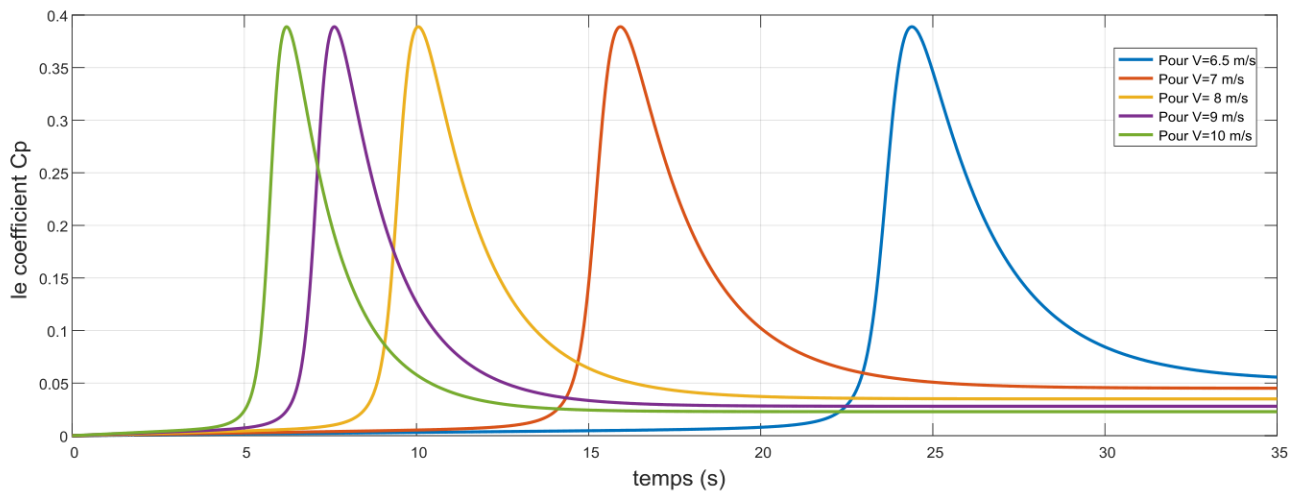
- Rayon de la turbine :  $R=3m$ .
- La masse volumique de l'air :  $\rho = 1.23kg/m^3$ .
- Inertie de la turbine :  $J=0.21kg.m^3$ .
- Coefficient de frottement de la turbine :  $f=0.0001N.m.s/rad$ .
- Temps de simulation : 30s.

### ❖ Résultats de la simulation :



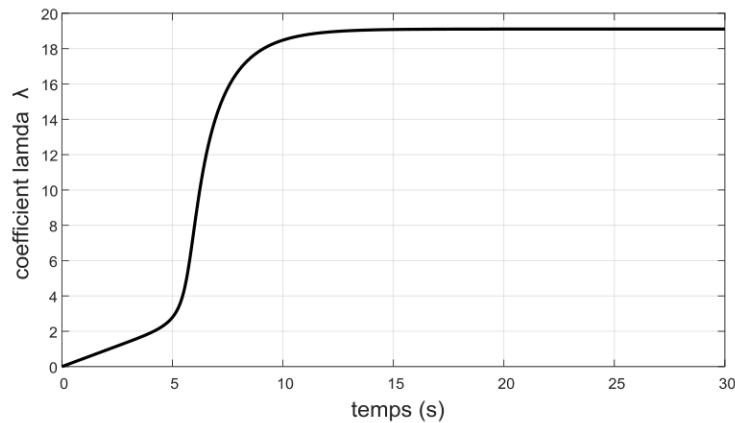
**Figure III.10 :** Vitesse du vent constant (m/s).

La figure III.10 montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, et comme on a supposé que la vitesse du vent est constante de valeur 10 m / s, on a délivré un signal invariant et constant à la valeur précisée.



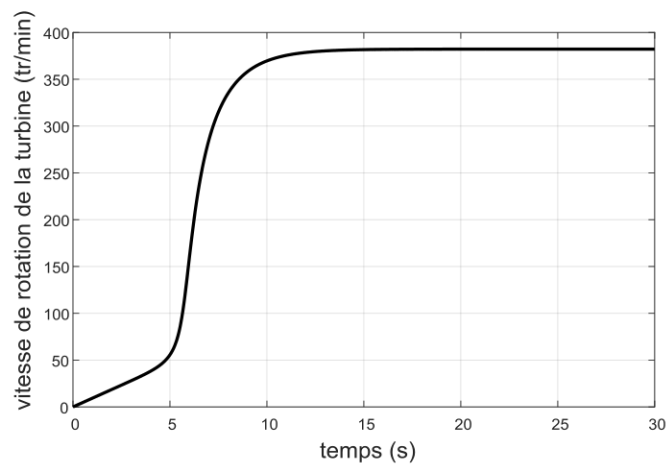
**Figure III.11 :** Coefficient de puissance pour différentes valeurs de vent.

La figure III.11 montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps pour différentes valeurs de vent de vitesse entre 6,5 m/s et 10 m/s, l'allure des courbes prennent une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine, plus la vitesse du vent augmente et plus le temps d'atteindre le  $C_{pmax}$  est réduit, puis il se stabilise à la valeur ( $C_p \approx 0,38$ ). On peut conclure que la turbine récupère 38 % de la puissance du vent.



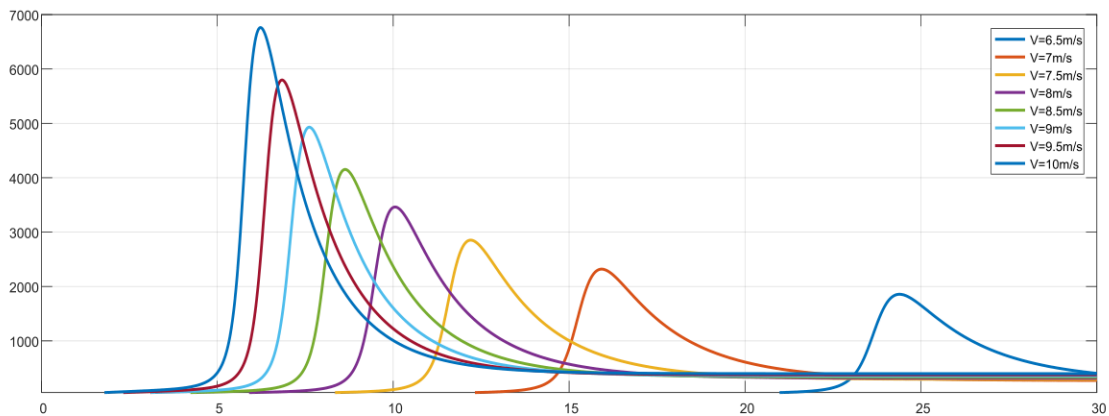
**Figure III.12 :** Coefficient  $\lambda$  de la turbine avec un vent constant.

La figure III.12 montre l'évolution du coefficient  $\lambda$  en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ( $V_v=10\text{m/s}$ ), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ( $t_d=5.8\text{s}$ ), puis il se stabilise à la valeur ( $\lambda=19.1$ ). On peut conclure que la vitesse de la turbine égale à 19 fois la vitesse du vent.



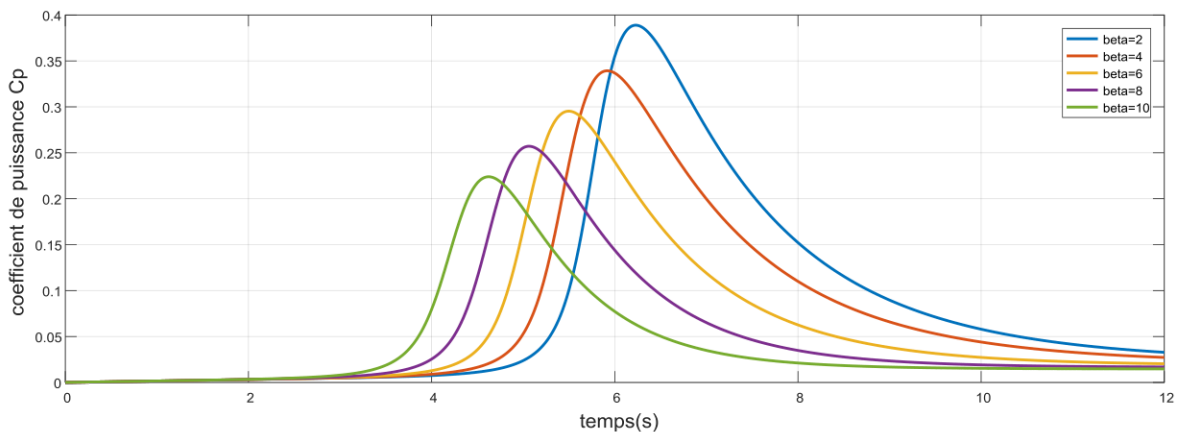
**Figure III.13 :** Vitesse de rotation de la turbine (tr/min) avec un vent constant.

La figure III.13 montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ( $V_v=10\text{m/s}$ ), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ( $t_d=5.8\text{s}$ ) puis il se stabilise à la valeur ( $\Omega=382\text{tr/min}$ ).



**Figure III.14 :** variation de la puissance mécanique de la turbine (watt) avec différentes valeurs de vent.

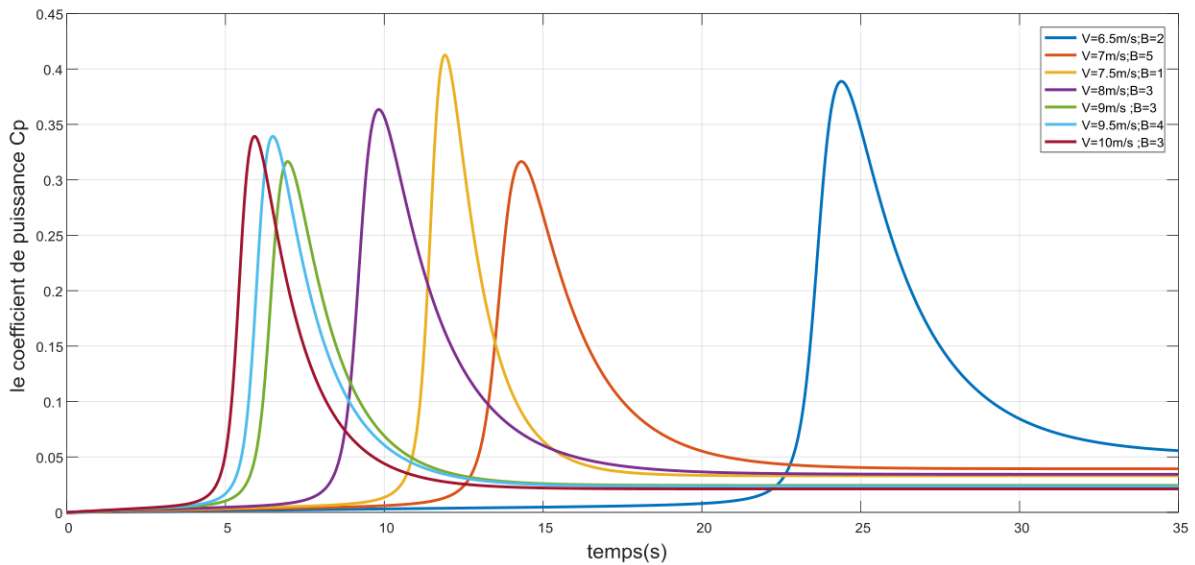
La figure III.14 montre l'évolution de la puissance de la turbine en fonction du temps pour différentes valeurs de vent de vitesse entre 6.5m/s et 10m/s, l'allure des courbes prennent une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine, plus la vitesse du vent augmente et plus le temps d'atteindre la puissance maximale est réduit et d'obtenir une puissance de plus en plus grande jusqu'à atteindre  $P_{max}=6760$  watt.



**Figure III.15 :** Coefficient de puissance  $C_p$  avec différentes valeurs de beta.

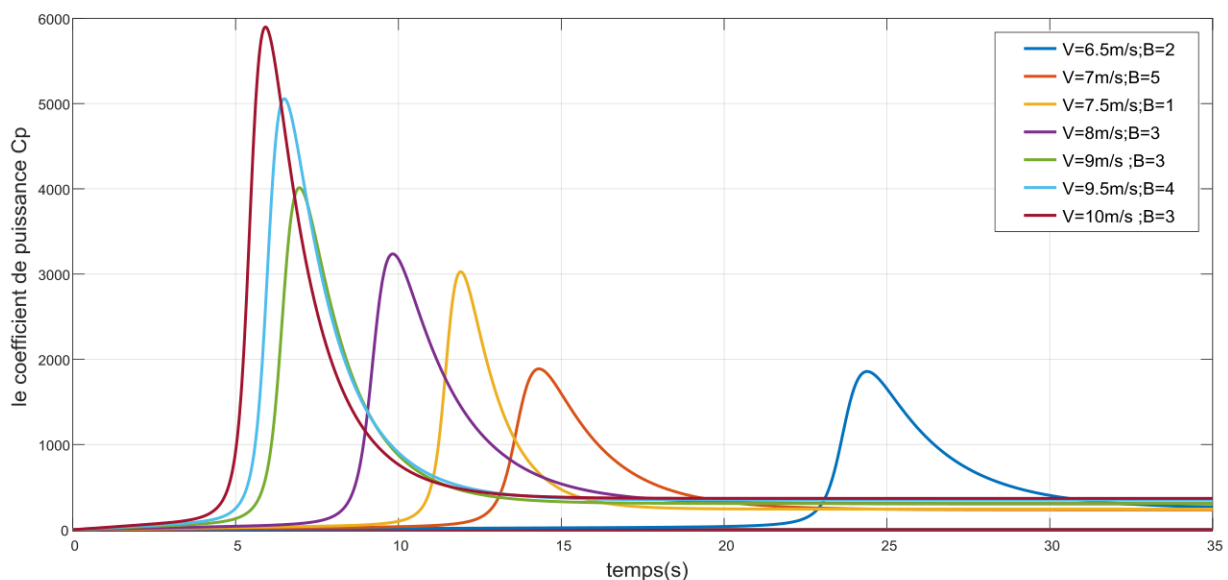
La figure III.15 montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps pour différentes valeurs de beta (entre 2 et 10 degrés) et de vent de vitesse de 10m/s, l'allure des courbes prennent une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine, Plus on augmente le degré de calage de beta moins on récupère de puissance de la puissance du vent.





**Figure III.16 :** Coefficient de puissance  $C_p$  avec différentes valeurs de beta et du vent.

La figure III.16 montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps pour différentes valeurs de beta ( entre 1 et 5 degrés ) et vent de vitesse qui varie progressivement de 6.5 m/s à 10m/s , l'allure des courbes prennent une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine, Plus le degrés de calage de beta diminue plus on récupère de puissance de la puissance du vent pour beta= 1 la turbine récupère 42 % de la puissance du vent . Plus la vitesse du vent augmente et plus le temps de démarrage est réduit.



**Figure III.17 :** La puissance mécanique de la turbine (watt) avec différentes valeurs de beta et du vent.

La figure III.17 montre l'évolution de la puissance de la turbine en fonction du temps pour différentes valeurs de vent de vitesse entre 6.5m/s et 10m/s, l'allure des courbes prennent une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine, plus la vitesse du vent augmente et plus le temps d'atteindre la puissance maximale est réduit avec une puissance de plus en plus grande jusqu'à atteindre  $P_{max}=6321$  watt. Plus l'angle beta est grand plus il réduit la puissance de la turbine.

### III. 4. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée a trouvé la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien ; travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidement) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

#### III. 4.1. Fonctionnement d'une génératrice asynchrone :

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à « p » paire de pôle ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$ . Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et a amplitude réglables [29].

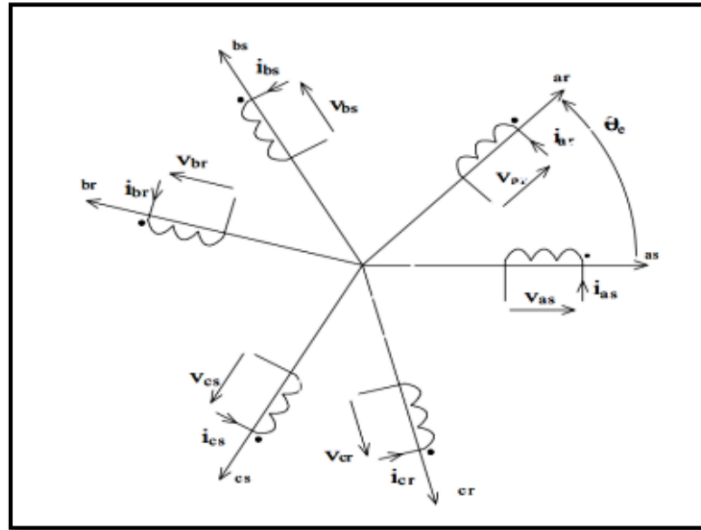
##### III. 4.1.1. Modélisation Mathématique de la Génératrice :

###### ❖ Hypothèses simplificatrices :

La machine électrique étant un système très complexe. Pour simplifier l'étude, nous allons prendre en considération les hypothèses suivantes :

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement ne sont pas prises en compte.

❖ **Modèle de la Génératrice Asynchrone dans le repère à axes (a.b.c) :**



**Figure III.18 :** Représentation schématique des enroulements de la MAS.

-  $\theta_e$  : L'angle électrique entre l'axe de la phase « a » statorique et la phase « a » Rotorique.

La loi de Faraday permet d'obtenir l'écriture matricielle condensée pour les 3 phases statoriques:

$$[V_{abcs}] = -[R_s]. [I_{abcs}] - \frac{d}{dt} [\phi_{abcs}] \quad (III.18)$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = -[R_s]. \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

Pour le rotor :

$$[V_{abcr}] = [R_r]. [I_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abcr}] \quad (III.20)$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = [R_r]. \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

- $v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$  :Sont les tensions simples triphasées au stator de la machine.
- $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  :Sont les courants au stator de la machine.
- $\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$  :Sont les flux propres circulants au stator de la machine.
- $v_{ar}, v_{br}, v_{cr}$  :Sont les tensions simples triphasées au rotor de la machine.
- $i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$  :Sont les courants au rotor de la machine.
- $\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$  :Sont les flux propres circulants au rotor de la machine.

Sous forme matricielle, les équations de la machine deviennent :

$$\frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] = [-v_{sabc}] - [Rs]. [Isabc] \quad (III.22)$$

$$\frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = [v_{rabc}] - [Rr]. [Irabc] \quad (III.23)$$

$$[Rs] = Rs. [I]$$

$$[Rr] = Rr. [I] \quad (III.24)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

❖ **Modèle Génératrice Asynchrone dans le Repère de Park (d q) :**

➤ **Transformation de Park :**

La transformée de Park est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé d'axes magnétiques à un système à deux axes orthogonaux.[30]

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations comme le montre Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par :

$$[Xdqo] = [p(\theta)]. [Xabc] \quad (III.26)$$

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (III.27)$$

Les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont reliés par la relation :  $\theta = \theta_s - \theta_r$

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (Equations 26et 27), un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires.

- Au stator :

$$[Vdqos] = -[Rs]. [Idqos] - \frac{d}{dt} [\phi dqos] + [\lambda]. [\phi dqos]. \theta_s \quad (III.28)$$

- Au rotor :

$$[Vdqor] = [Rr]. [Idqor] + \frac{d}{dt} [\phi dqor] + [\lambda]. [\phi dqor]. \theta_r \quad (III.29)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques sont respectivement :

➤ Le vecteur de tension statorique  $[vdqos]$ :

$$\begin{cases} V_{sq} = -R_s I_{sq} - \frac{d}{dt} \phi_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \\ V_{sd} = R_s I_{sd} - \frac{d}{dt} \phi_{sd} + \omega_s \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

➤ Le vecteur flux statorique  $[\Phi dqos]$  :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = -L_s I_{sd} - M I_{rd} \\ \Phi_{sq} = -L_s I_{sq} - M I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

➤ Le vecteur tension rotorique  $[vdqor]$ :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

➤ Le vecteur courant rotorique  $[i dqor]$  :

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{\phi_{rd} - M I_{sd}}{L_r} \\ I_{rq} = -\frac{M}{L_r} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

➤ Le vecteur flux rotorique  $[\Phi dqor]$  :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

En prenant l'axe d du repère de Park selon l'orientation du flux rotorique:  $\Phi_{rq}=0$

### ❖ Expression du couple :

Le couple électromécanique synchrone développé par champ tournant est donné par la formule :

$$C_e = \left(\frac{3P_s}{2}\right) \cdot [\psi_{ds} \cdot I_{ds} - \psi_{qs} \cdot I_{qs}] = \left(\frac{3P_s}{2}\right) \cdot [\psi_{qr} \cdot i_{dr} - \psi_{dr} \cdot i_{qr}] \quad (\text{III.36})$$

$$C_e = \frac{dW_{méc}}{\Omega_s} \cdot dt \quad (\text{III.37})$$

❖ **Modélisation des convertisseurs statiques :**

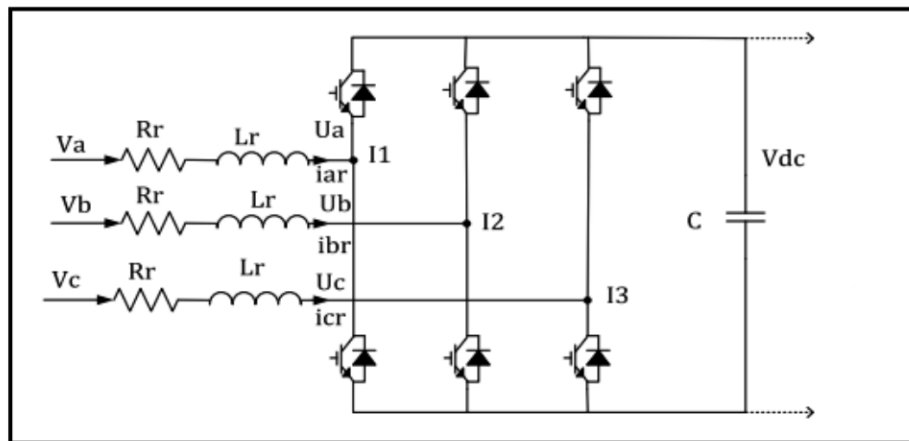
L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

❖ **Modélisation et commande du redresseur :**

Les convertisseurs les plus utilisés sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes en antiparallèle commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Modifier le contenu harmonique de la tension de sortie (qui conserve sa période T) de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs (donc les fréquences) élevés, ainsi le filtrage de la tension se trouvera facilité.
- Permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension. C'est indispensable dans le cas de l'alimentation d'une machine à fréquence (vitesse) variable pour pouvoir fonctionner à flux constant. [31]

Le redresseur permet de convertir l'énergie alternative venant de la turbine en une énergie continue. Voici le schéma général du redresseur.



**Figure III.19 :** Schéma du redresseur.

Le système d'équation peut s'écrire :

$$\begin{cases} Va = Ri \cdot iar + Lr \cdot \frac{d iar}{dt} + Ua = Ri \cdot iar + Lr \cdot \frac{d iar}{dt} + Vdc \cdot \frac{2ia - Ib - Ic}{3} \\ Vb = Ri \cdot ibr + Lr \cdot \frac{d ibr}{dt} + Ub = Ri \cdot ibr + Lr \cdot \frac{d ibr}{dt} + Vdc \cdot \frac{-Ia + 2Ib - Ic}{3} \\ Vc = Ri \cdot icr + Lr \cdot \frac{d icr}{dt} + Uc = Ri \cdot icr + Lr \cdot \frac{d icr}{dt} + Vdc \cdot \frac{-Ia - Ib + 2Ic}{3} \end{cases} \quad (III.36)$$

$I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  sont les positions de commutation de chaque phase, ainsi  $I_a$  peut être égale à 1 ou 0. On applique ensuite la transformée de Park, on obtient ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{ar} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r & 0 \\ \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{ar} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_0 \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (III.38)$$

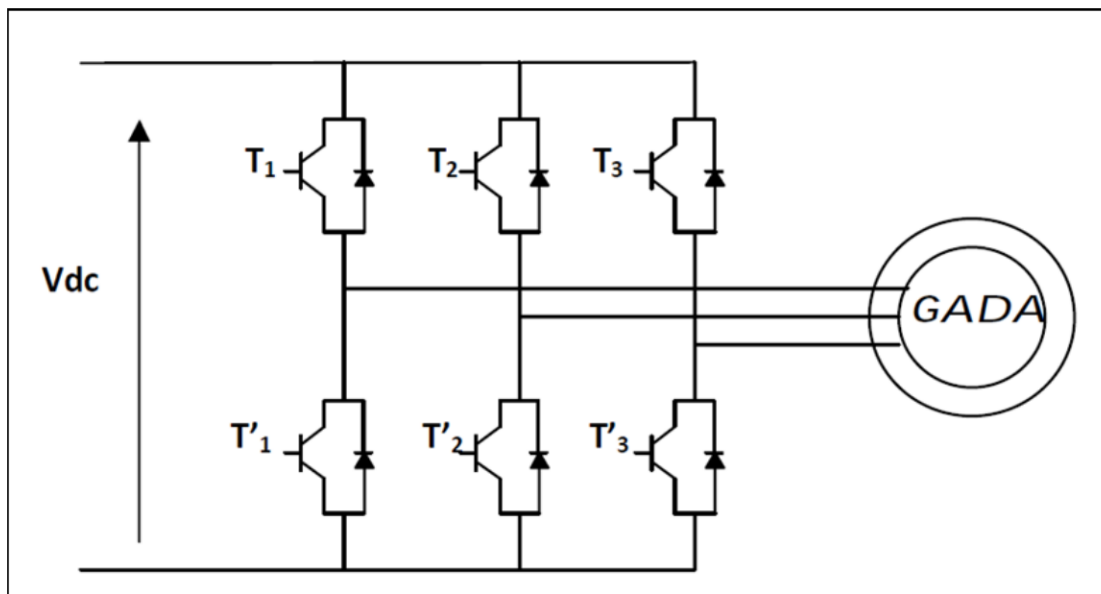
En simplifiant l'équation précédente et en enlevant la séquence zéro on obtient :

$$\begin{cases} V_d = L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} + U_d \\ V_q = L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + R_r I_{qr} - \omega_r L_r I_{dr} + U_q \end{cases} \quad (III.39)$$

$$\begin{cases} V_d + \omega_r L_r I_{qr} - U_d = L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + R_r I_{dr} \\ V_q + \omega_r L_r I_{dr} - U_q = L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + R_r I_{qr} \end{cases} \quad (III.40)$$

❖ **Modèle et commande de l'onduleur :**

L'onduleur assure la conversion de la tension ou courant continu en une tension ou courant variable. Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.



**Figure III.20 :** Schéma du coté onduleur

La commande telle qu'elle a été décrite dans [32] l'équation du courant de charge de la forme :

$$I_l = \sum_{n=1}^{\infty} (I_{lam} \cdot \sin(n\omega t + \theta)) \quad (\text{III.41})$$

Il est possible de décomposer ce courant en une composante active et réactive a une fréquence fondamentale et en composantes harmoniques. On peut ainsi écrire :

$$I_l(t) = I_{l\text{actif}}(t) + I_{l\text{reactif}}(t) + I_{l\text{harmonique}}(t) \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$$I_{l\text{actif}}(t) = I_l \cos \theta_l f \sin \omega t \quad (\text{III.43})$$

$$I_{l\text{reactif}}(t) = I_l \sin \theta_l f \sin \omega t \quad (\text{III.44})$$

$$I_{l\text{harmonique}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (I_{lam} \cdot \sin(n\omega t + \theta)) \quad (\text{III.45})$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \cdot s$$

$f_s$  : fréquence au réseau

$\theta_{lan}$ : Déphasage.

Il apparait ainsi clairement que le courant de compensation que le filtre doit générer vaut :

$$I_{\text{compensation}}(t) = -(I_{l\text{reactif}}(t) + I_{l\text{harmonique}}(t)) \quad (\text{III.46})$$

### ❖ Commande MLI des convertisseurs:

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamentale est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [33]. Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :



$$\begin{cases} V_{aref} = \sqrt{2}V_{eff} \cdot \sin(2\pi ft) \\ V_{bref} = \sqrt{2}V_{eff} \cdot \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cref} = \sqrt{2}V_{eff} \cdot \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.45)$$

L'équation de la porteuse :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pn} \left[ 4 \left( \frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pn} \left[ -4 \left( \frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (III.46)$$

Cette technique est caractérisée par deux paramètres sont les suivants :

1. L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation ( $F_p$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ).
2. Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m = \sqrt{2}V_{eff}$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ )

### III. 5. Conclusion :

Ce chapitre présente une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pale utilisé et l'angle de calage de celle-ci. Et la Modélisation l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne.

## **Chapitre IV :**

### **Modèle de simulation de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau**

**IV. 1. Introduction :**

Différentes architectures peuvent être proposées pour l'utilisation de l'énergie éolienne pour la génération de l'électricité ; elles peuvent être hybride et intégrer d'autres sources d'énergie, ou des moyens de stockage électrochimique ou mécanique. Nous allons nous intéresser dans cette étude à une architecture très utilisée dans les moyennes et grandes puissances, elle permet d'injecter l'énergie électrique produite directement dans le réseau électrique de distribution, à travers l'utilisation d'une machine électrique de type asynchrone à double alimentation. L'utilisation d'une MADA permet :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.

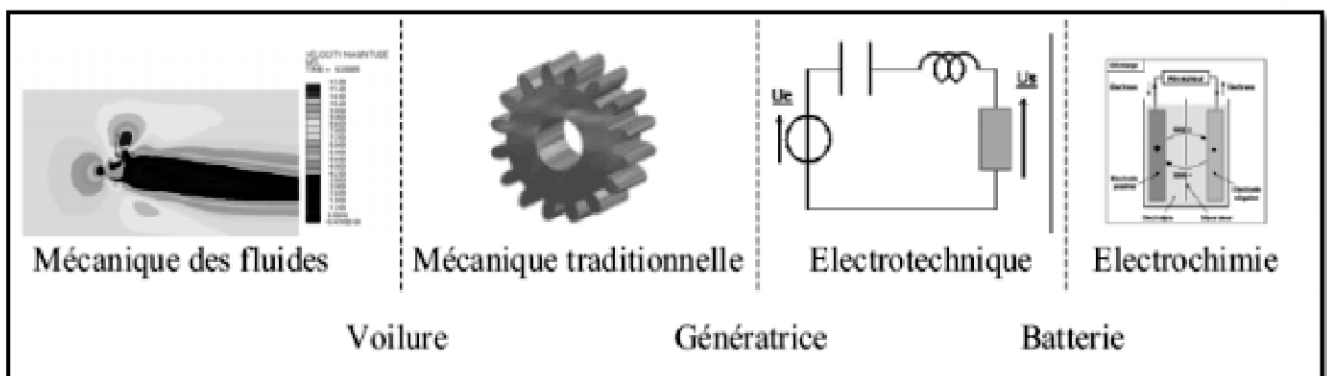
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements.

Le modèle présenté a pour finalité la simulation comportementale du système complet sur le plan mécanique électrique et énergétique. Les simulations à caractère « système » sont présentées dans ce chapitre.

**IV. 2. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne :**

Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques très différents



**Figure IV.1 :** Représentation de caractère multi physique.

L'énergie en provenance du vent traverse la voilure qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La voilure est directement accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que convertisseurs statiques et éléments de filtrage disposés en aval de la génératrice ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale.

L'énergie électrique récupérée par la turbine peut être stockée ou utilisée directement (comme dans notre cas) où elle alimente un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge dans un site isolé, ou même assurer l'éclairage dans les maisons en site isolé comme le montre la figure IV.2.

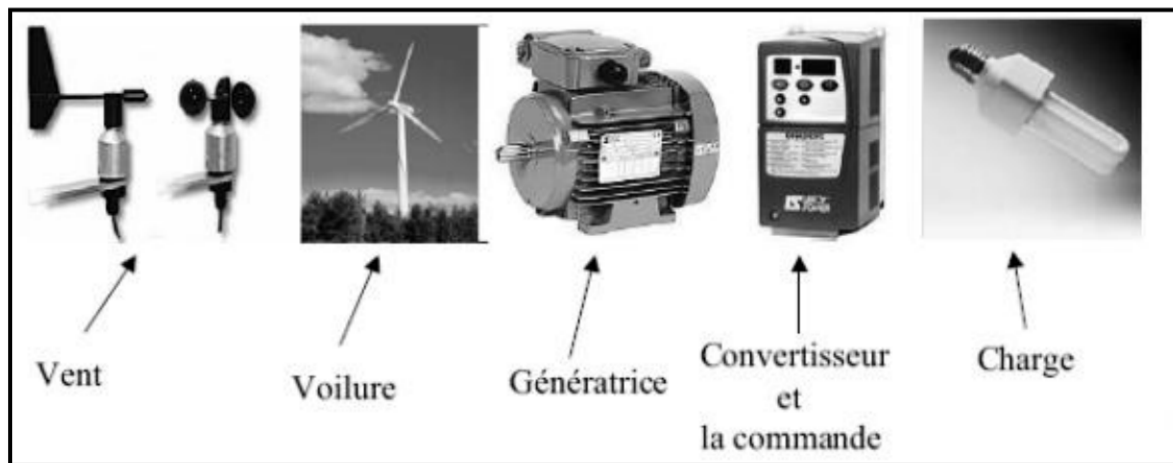


Figure IV.2 : chaîne de conversion éolienne.

### IV. 3. Bloc de simulation du système complet:

Le but de la simulation est de vérifier les performances de notre système en terme de puissance active et de puissance réactive tirées produites par la MADA et connaître l'influence de la nature du vent sur les paramètres mécaniques, énergétiques et électriques de la chaîne, en considérant que la vitesse du vent est variable entre 6.5 m/s et 10 m/s..

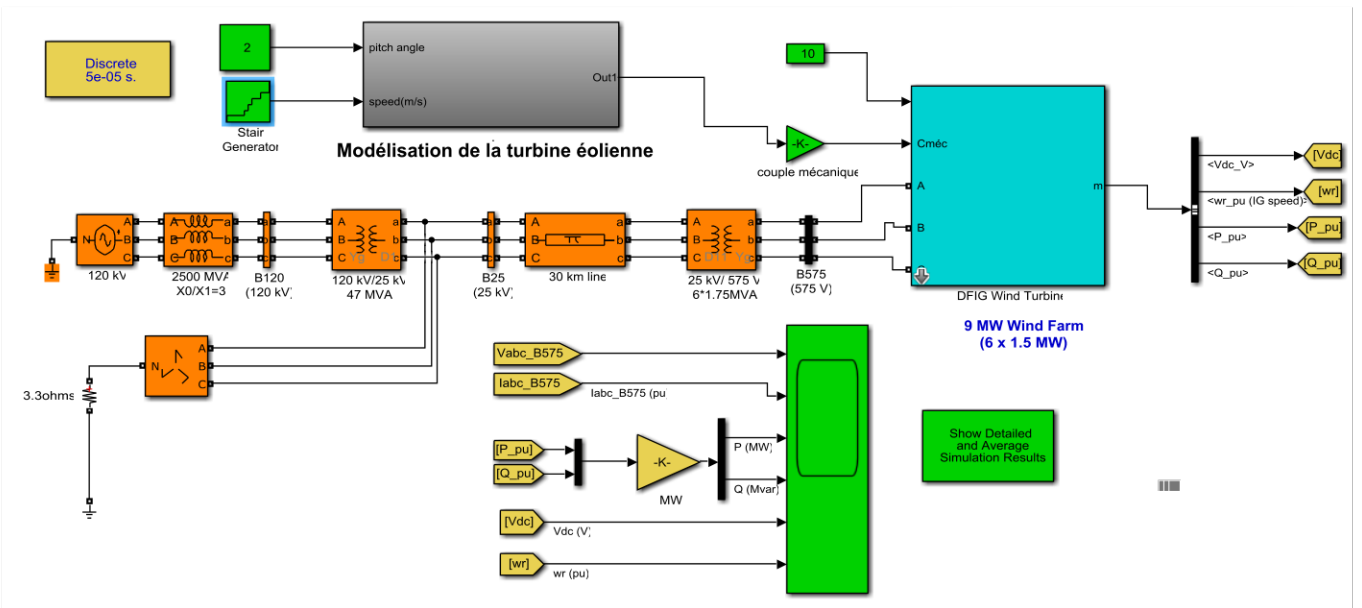


Figure IV.2: Schéma block du modèle avec turbine et avec redressement par Matlab/Simulink

#### IV. 4. Résultats de la simulation du système complet:

##### IV. 4.1. Influence du profil du vent sur les paramètres mécaniques de la chaîne :

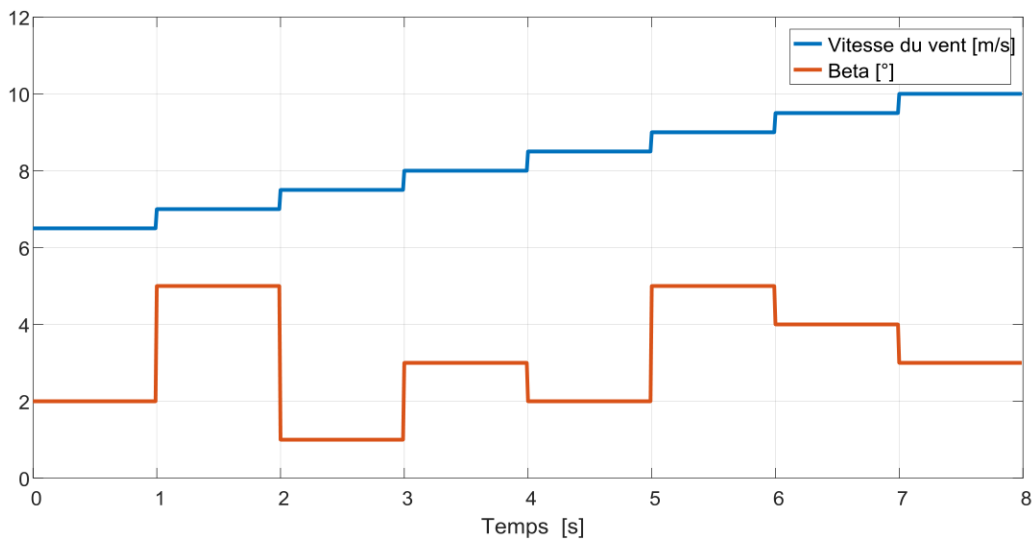


Figure IV.4 : Variation de la vitesse du vent et de beta.

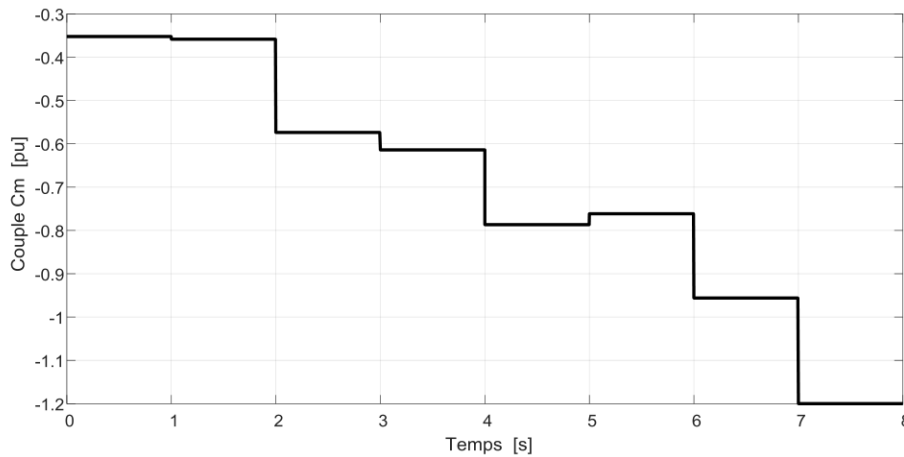


Figure IV.5 : Evolution du couple mécanique de la turbine (N.m)

La figure IV.4 montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps. Il est clair que le profil du vent influe beaucoup sur le couple mécanique de la turbine, Pour un vent variable (entre 6.5 et 10m/s) le couple varie, plus le vent augmente plus on remarque que le couple augmente. Cette variation n'influe pas beaucoup sur les autres paramètres de la chaîne, la vitesse et la tension ne seront pas trop altérées, le couple est négative.

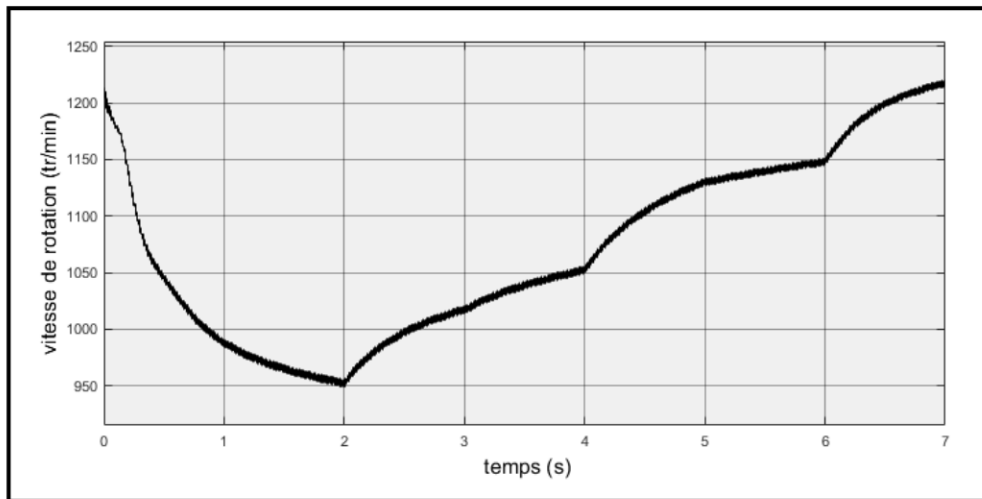


Figure IV.6 : Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min)

Pour un vent variable (entre 6.5 et 10m/s) la vitesse de rotation de la turbine varie, elle est limitée entre (950 et 1220tr/min) cette variation n'influe pas beaucoup sur les autres paramètres de la chaîne telle que la valeur de la tension

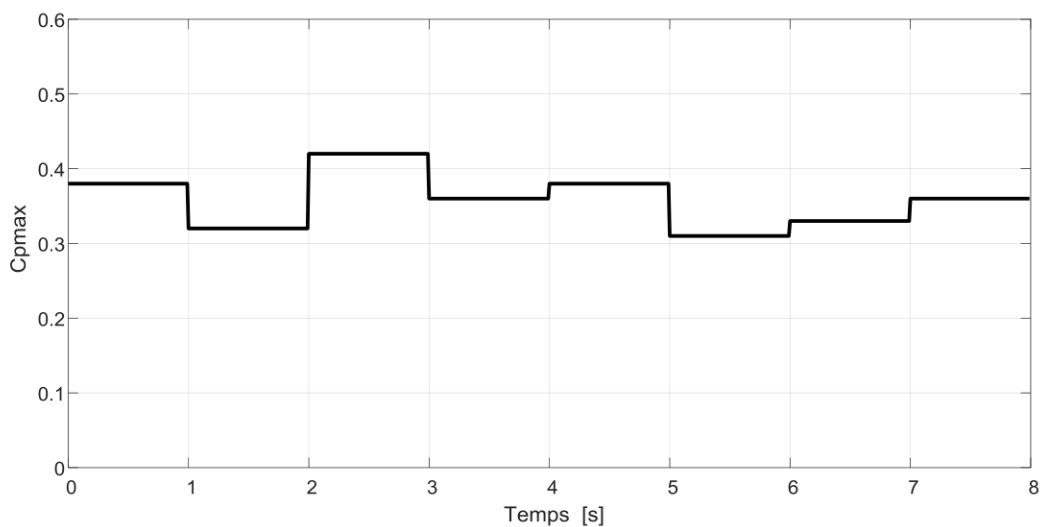


Figure IV.7 : évolution du coefficient de puissance maximale.

IV. 4.2. Influence de la variation de l'indice de modulation m sur les paramètres énergétiques de la chaîne :

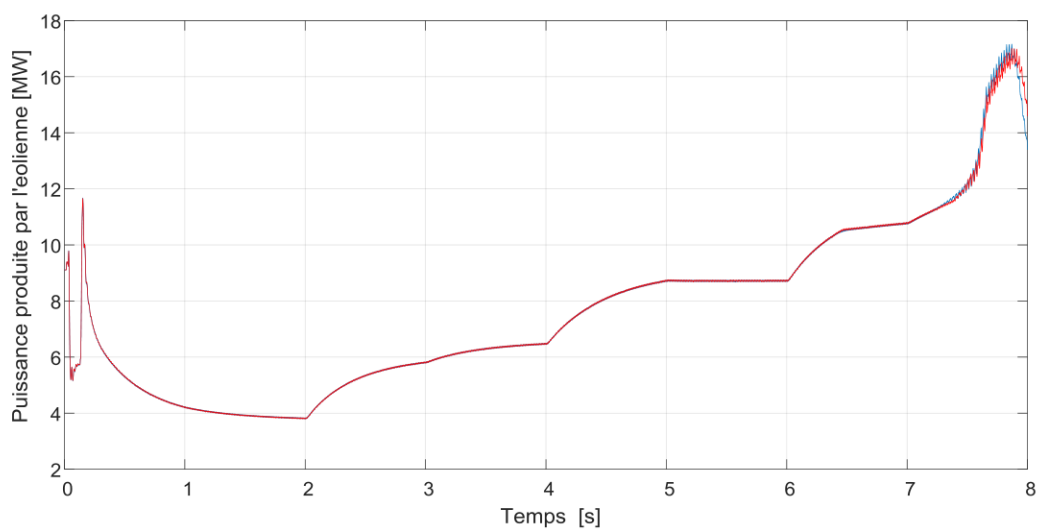


Figure IV.8 : Puissance active envoyée au réseau.

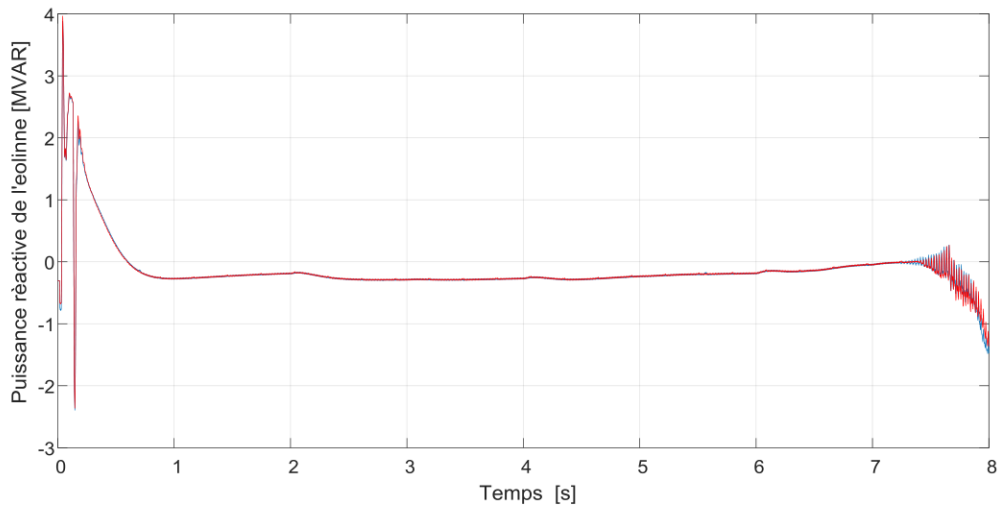


Figure IV.9 : Puissance réactive échangée avec le réseau (kvar)

Figure IV.8 montre l'évolution de la puissance active en fonction du temps pour un vent de vitesse variable entre 6.5m/s et 10m/s, plus la vitesse du vent augmente et plus la production de la puissance active devient de plus en plus grande jusqu'à atteindre  $P=11$ Mwatt. La figure IV.9 montre La puissance réactive envoyée au réseau est maintenue proche à la valeur de zéro.

IV. 4.3. Influence de la variation de l'indice de modulation  $m$  sur les paramètres électriques de la chaîne :

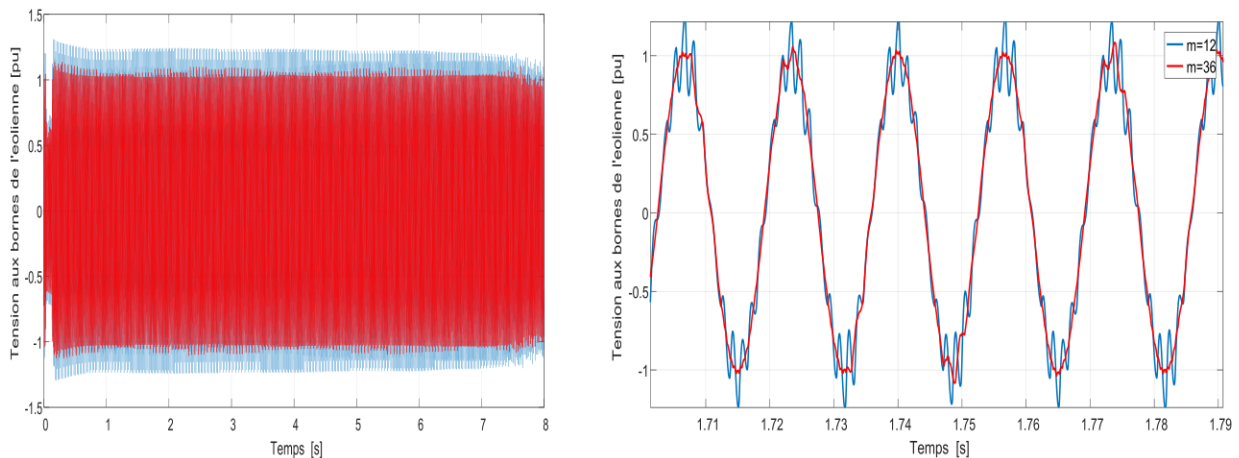


Figure IV.10: Tension envoyé au réseau.



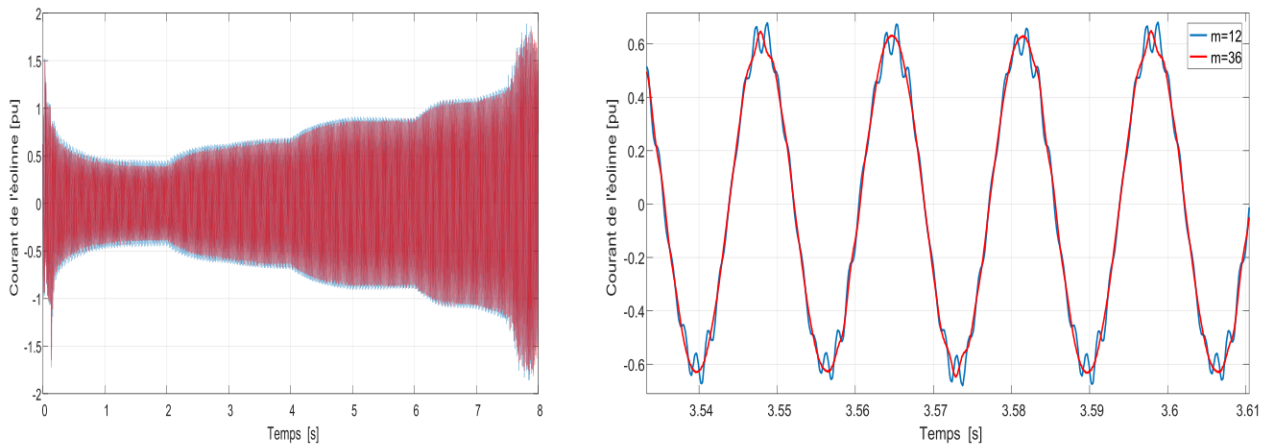


Figure IV.11: Courant envoyé au réseau.

La tension envoyée au réseau (Figure IV.10) est bien régulée même après avoir appliqué un vent variable entre 6.5m/s et 10 m/s . On remarque un faible dépassement qui est dû au changement dans la vitesse du vent. Le courant envoyé au réseau suit la variation du vent (Figure IV.11) .

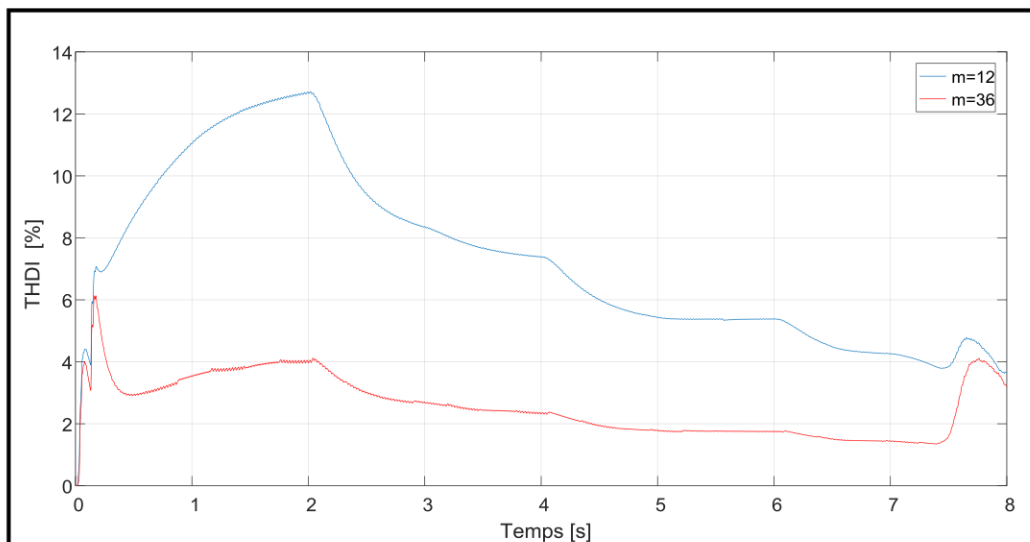


Figure IV.12 : Taux de distorsion harmonique du courant.

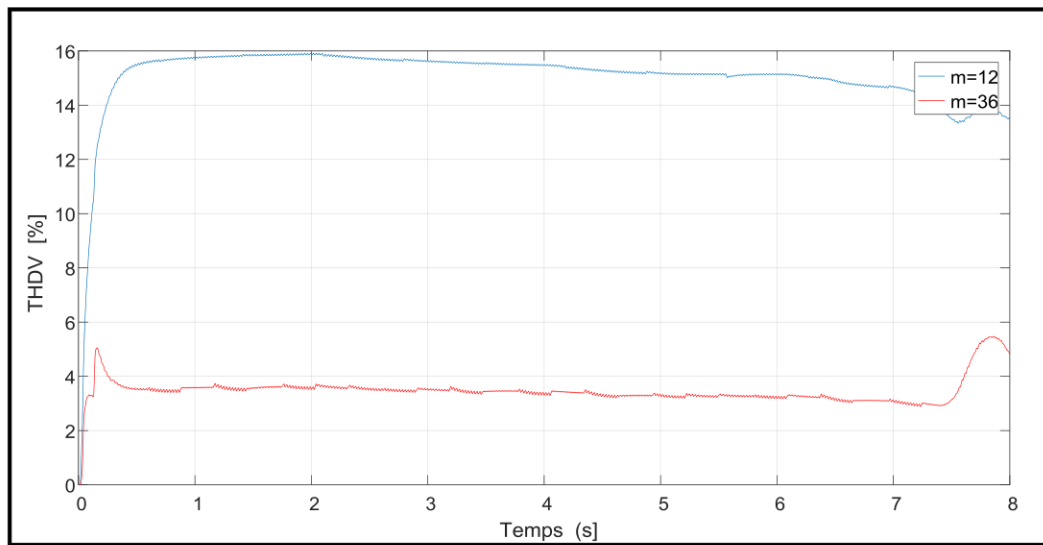


Figure IV.13 : Taux de distorsion harmonique de la tension.

#### IV. 5. Taux d'harmoniques :

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonic Distortion, THD) qui est le plus couramment utilisé [36].

L'équation (4.5) peut être écrite sous la forme suivante [36] :

Le courant : 
$$i(t) = \sqrt{2}I_t \sin(\omega t + \varphi_i) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \varphi_{ih})$$

Avec :

$I_t$  : la valeur efficace du courant du fondamental

$I_h$  : la valeur efficace du courant harmonique de rang h

$\varphi_i$  : Déphasage du courant fondamental

$\varphi_{ih}$  : Déphasage de l'harmonique de rang h

La tension: 
$$v(t) = \sqrt{2}v_t \sin(\omega t + \varphi_v) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}v_h \sin(h\omega t + \varphi_{vh})$$

Avec :

$v_t$  : la valeur efficace de la tension du fondamental

$v_h$  : la valeur efficace de la tension harmonique de rang  $h$

$\varphi_v$  : Déphasage de la tension du fondamental

$\varphi_{vh}$ : Déphasage de l'harmonique de rang  $h$

Le THD étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composante harmonique ( $h > 2$ ) et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculer comme suit :

$$THDi = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{I_h}{I_1}$$

$I$  : valeur efficace du courant de  $i(t)$ .

$I_h$  : résultante de la composante harmonique.

Les distributeurs d'énergie fixent un taux admissible aux points de raccordement de leurs réseaux,  
Si  $THD \leq 1.6\%$

Le fondamental de la tension peut être exprimé en pourcentage et calculer comme suit :

$$THDv = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} = \frac{V_h}{V_1}$$

$V$  : valeur efficace de la tension de  $v(t)$ .

$V_h$  : résultante de la composante harmonique.

#### **IV. 6. Conclusion :**

Ce chapitre présente une modélisation de la chaîne de conversion éolienne connecté au réseau tout en présentant l'influence de la variation du vent et de  $\beta$  ainsi ,l'Influence de la variation de l'indice de modulation  $m$  sur les paramètres électriques et énergétiques , de là on remarque la réduction du taux de distorsion du courant et de la tension à chaque fois qu'on augmente l'indice de modulation  $m$  ,tout en n'influant pas sur les paramètres énergétiques .

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail nous a permis de faire l'étude d'un système de production d'énergie éolienne avec une génératrice asynchrone à double alimentation ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : le système de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement.

La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux modèles mathématiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple, l'angle Beta et l'énergie produite. Tout cela a été conçu autour d'une GADA.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce aux énergies renouvelables qui existent et plus précisément sur l'énergie éolienne et son impact dans le monde et en Algérie.

Le deuxième chapitre, on a présenté un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones. Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau améliore le rendement global de l'installation.

Dans le troisième chapitre nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations

## CONCLUSION GÉNÉRALE

différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Et dans la dernière partie nous avons présenté le modèle du convertisseur statique, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI .

Pour le quatrième chapitre, nous avons simulés sur MATLAB/SIMULINK une chaîne éolienne avec la GADA à base d'onduleur coté rotor coté réseau où on a varié l'indice de modulation pour minimiser le taux de distorsion du courant et de la tension.

## Références bibliographiques

---

- [1] <https://youmatter.world>
- [2] <https://total.direct-energie.com>
- [3] : <https://total.direct-energie.com>
- [4] : <https://www.connaissancedesenergies.org>, l'énergie thermique .
- [5]: <https://www.les-energies-renouvelables.eu> , articles : avantages et inconvénients des panneaux solaire.
- [6] : <http://tperama-energies-renouvelables.e-monsite.com>, la géothermie
- [7] : <https://www.les-energies-renouvelables.eu>, Avantages et inconvénients de l'éolien en 2021.
- [8] : <https://www.weatherwizkids.com> , wind .
- [9] : <https://sciencing.com>, Updated November 22, 2019 , By Somer Taylor ,how wind direction is determined ?
- [10] : <https://www.energymatters.com>
- [11] : <https://fr.statista.com>, Capacité d'énergie éolienne dans le monde en 2018.
- [12] : <https://www.cder.dz>
- [13] : Bouaraki Mouloud, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine Éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamed bougara-boumerdes, 2012.
- [14] : Amar Golea, « Contribution au développement d'une méthodologie de conception des associations convertisseurs-machines »`, thèse de magistère, institut méditerranéen de technologie à Marseille ,1994.
- [15] : Poitiers, F. 2003. « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat en génie électrique, France, École polytechnique.
- [16] : Neris, A. S., N. A. Vovos, et G. B. Giannakopoulos. 1999. « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems ». Energy Conversion, IEEE Transactions on 14 (1): p 122–127
- [17] : Weigel. T, "Demagnetization effect in synchronous machine with permanent magnets", Proceedings of the 33rd International Symposium on Electrical Machines, 1997, p. 99-104.
- [18] : Colas cellier , «étude et simulation d'un système éolien connecté au réseau monophasé». Montréal, le 28 juillet 2012.

## Références bibliographiques

---

- [19] : Schreiber, D. 2001. « State of the art of variable speed wind turbines ». In 11th International Symposium on Power Electronics.
- [20] : Refoufi, L., B. A. T. Al Zahawi, et A. G. Jack. 1999. « Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator ». Energy Conversion, IEEE Transactions on 14 (3): p 333–339.
- [21] : M. Machmoum, "Contribution à l'Etude et la Commande Numérique de l'Ensemble Cyclonconvertisseur Triphasé - Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
- [22] : N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [23]: COLAS CELLIER , «ÉTUDE ET SIMULATION D'UN SYSTÈME ÉOLIEN CONNECTÉ AU RÉSEAU MONOPHASÉ». MONTRÉAL, LE 28 JUILLET 2012. P40-42.
- [24] : R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison With Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002, pp 414-421.
- [25] : Singh, M. 2010. « Adaptive network-based fuzzy inference systems for sensorless control of PMSG based wind turbine with power quality improvement features ». Thèse de doctorat en génie électrique, Montréal, École de technologie supérieure,
- Berlu, P. 1996. « «Calcul des efforts subis par les éoliennes de moyenne et forte puissance» 2eme rapport d'avancement de thèse ». ONERA Lille.
- [26 ] Heier, S., et R. Waddington. 1998. « Grid integration of wind energy conversion systems ».
- [27] : S.El Aimani (modélisation de différents technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension) thèse de doctorat, L2EP de l'école centrale de Lille [2004].
- [28] : B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherche dans le domaine de la génération éolienne, Actes des journées de jeunes chercheurs en génie électrique, Saint-Nazaire, pp 287- 297, 2003.
- [29] : N.Benbaha-"commande robuste tolérante aux défauts : application à la machine à courant alternatif " Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'université Batna, algerie,2009.
- [30] : Home - TEL - Thèses en ligne (archives-ouvertes.fr)
- [31] : Armand Boyette (contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne) thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I [2006]

## *Références bibliographiques*

---

[32] : Hamadi, Abdelhamid. 2011. Chapitre4 Filtres Actifs. [Notes du cours ENR-830 Convertisseurs d'énergie]. Montréal : École de Technologie Supérieure.

[33] : K. Amei, Y. Igekayasu, T. Ohji and M. Sakui, 'A Maximum Power Control of Wind Generator System Using a Permanent Magnet Synchronous Generator and a Boost Chopper Circuit', 0-7803-7156-9, IEEE, 2002.