

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد د حلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Lachemat Mohamed

&

Bouziane Daoud

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électronique option machines électriques  
(électrotechnique)

---

Thème

---

# Simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents

---

Proposé par : N.Brahimi & L.Khemici

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude à :

Ma cher mère, Mon cher père Mes frères et Mes  
sœurs et toute la famille, à mes grand père

Mes collègues de la promotion

Tous mes amis

Tous ceux qui me sont chers

/



## Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Ce mémoire traite de la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents destiné à un site isolé. Dans un premier temps, un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est proposée. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

## Abstract:

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy.

This memory calls the simulation of a wind energy conversion chains to basis a generator synchronous of permanent magnets for an isolated site. In a first time, a model of every floor constituting the chain of conversion is proposed. The different constituent of the chains of conversion are then connected between them in order to form the complete model that is implement in the Matlab environment. The results of simulation gotten permit to analyze the behavior of the wind device and provide some information capable to be useful to the setting in work of a system of order and appropriate control.

# REMERCIEMENTS

---

Notre reconnaissance éternelle et nos vifs remerciements à notre Grand Créateur pour nous avoir donné le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail. Notre sincère reconnaissance et remerciements à notre promotrice Madame brahimi et notre co-promotrice Madame khemici. Aux jurys qui vont nous assister.

A toute la famille Bouziane et la famille Lachemat sans exception.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

En fin, nous remercions l'ensemble des professeurs du département d'électronique pour leurs Assistances pédagogiques et leurs conseils, en espérant être digne du savoir qu'ils nous ont transmis et le transmettre aux autres.

DAOUD ET MOUHAMED

## **Introduction générale**

### **Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne**

<b>I-1-Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I-2-Définition et principe de l'énergie éolienne</b>	<b>1</b>
a. Conservation de l'énergie mécanique	1
b. Transformation en énergie électrique (aérogénérateur)	2
<b>I-3-Principaux et éléments Constitutifs de l'éolienne</b>	<b>2</b>
<b>I-4-Le Principe De Fonctionnement D'une Eolienne</b>	<b>5</b>
<b>I-5-Les Différents Types D'éoliennes</b>	<b>5</b>
I-5-1 : classement selon la puissance délivrée	5
I-5-2 : Classement selon la structure	7
1- Eolienne à Axe Vertical	7
2- Eoliennes à Axe Horizontal	7
<b>I-6 : Evaluation de l'énergie éolienne en Algérie</b>	<b>7</b>
<b>I-7-Avantages et Inconvénients de L'énergie éolienne</b>	<b>8</b>
• LES AVANTAGES	8
• LES INCONVENIENTS	9
<b>I-8-Conclusion</b>	<b>10</b>

### **chapitre II : Modélisation de la turbine**

<b>II.1 Introduction</b>	<b>11</b>
<b>II.2 Modélisation de la vitesse du vent</b>	<b>11</b>
<b>II.3 Modélisation de la turbine</b>	<b>12</b>

• LOI DE BETZ	12
<b>II.4 Multiplicateur</b>	<b>15</b>
<b>II.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission</b>	<b>16</b>
<b>II.6 Conclusion</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre III : Modélisation de la GSAP-Redresseur Commandé</b>	
III-1 Introduction	18
III-2 généralités sur la machines à aimants permanents(MSAP)	18
III-3-Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)	20
<b>III-3-1 Hypothèses simplificatrices</b>	<b>20</b>
<b>III-3-2 Mise en équation de la MSAP</b>	<b>21</b>
III-3-2 -1 Equations électriques	22
III-3-2-2 Passage au repère de Park	22
III-3-2-3 Modèle de la MSAP dans le repère de Park	24
<b>III-4-Modélisation de l'association GSAP – Redresseur Commandé</b>	<b>26</b>
III-4-1-Introduction	26
III-4-2-Modèle mathématique du redresseur commandé	27
III-5- Conclusion	30
<b>Chapitre IIII : Résultats de simulations et interprétations</b>	
IIII -1 Introduction	31

<b>IIII-2 Turbine</b>	<b>31</b>
<b>IIII-3 Génératrice Synchrone à Aimant Permanent</b>	<b>31</b>
<b>IIII-3 Redresseur</b>	<b>32</b>
<b>IIII-4 Onduleur</b>	<b>33</b>
<b>IIII-5 La commande MLI</b>	<b>34</b>
<b>IIII-6 RESULTATS DE SIMULATION</b>	<b>35</b>
<b>IIII-7 CONCLUSION</b>	<b>40</b>

# Liste des figures et des tableaux

---

## Liste des figures

<b>Figure-I-1 :L'énergie éolienne</b>	<b>1</b>
<b>Figure-I-2: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur</b>	<b>2</b>
<b>Figure-I-3 : Tour d'une turbine</b>	<b>3</b>
<b>Figure I- 3: Rotor d'une turbine</b>	<b>4</b>
<b>Figure I-5 : Constitution d'une nacelle</b>	<b>4</b>
<b>Figure-I -6 : Différents types d'éoliennes</b>	<b>6</b>
<b>Figure-I -7 : Carte préliminaire des vents de l'Algérie</b>	<b>8</b>
<b>Figure II-1 : Architecture globale de la chaîne éolienne « passive »</b>	<b>11</b>
<b>Fig. II. 1 : Vitesse de vent - modèle analytique</b>	<b>12</b>
<b>Fig. II. 2 : Turbine tripale (<math>R_v=1.25m</math>)</b>	<b>13</b>
<b>Fig. II.3: Interpolation du facteur de puissance en fonction de la vitesse réduit</b>	<b>14</b>
<b>Fig. II .4: Schéma de la turbine éolienne</b>	<b>15</b>
<b>Figure .III.1 : courbes caractéristiques des aimants</b>	<b>19</b>
<b>Figure .III.2 Quelques configurations du placement des aimants</b>	<b>20</b>
<b>Figure .III.3. a- machine asynchrone</b>	<b>21</b>
<b>                  b-machine synchrone à aimants permanents (MSAP)</b>	<b>21</b>
<b>Figure .III.4. Schéma représentatif de la MSAP à modéliser</b>	<b>22</b>
<b>Figure 5.III : Transformation triphasée- diphasée</b>	<b>23</b>
<b>Figure (6.III) : Schéma de l'association GSAP – redresseur commandé</b>	<b>27</b>
<b>Figure (7-III) : Modélisation du redresseur dans un repère fixe lié aux axes abc</b>	<b>29</b>

# Liste des figures et des tableaux

---

Figure (8-III) : Modélisation du redresseur dans un repère lié aux axes dq	30
Figure III-1 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).	31
Figure III-2 : Génératrice synchrone à aimant permanent	32
Figure III-3: Le schéma fonctionnel de redresseur dans le repère abc	33
Figure III-4 : Modèle de l'onduleur de tension.	34
Figure III-5 : Modèle de la commande MLI à porteuse triangulaire	35
Figure III-6 : Fonction de vent	35
Figure III-7 : Puissance de vent	36
Figure III-8 : Puissance éolien	36
Figure III-9 : Couple éolien	37
Figure III-10 : Vitesse mécanique	37
Figure III-11 : Les tension généré avec le GSAP	38
Figure III-12 : Tension aux bornes de la charge $V_{ch}$ (V)	39
Figure III-13 : Courant de la charge $i_{ch}$ (A).	39
<b>Liste des tableaux</b>	
Tableau –I-1 : classification des turbines éoliennes	5

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

## I-1-Introduction :

Face à une demande croissante d'énergie, et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien.

- Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

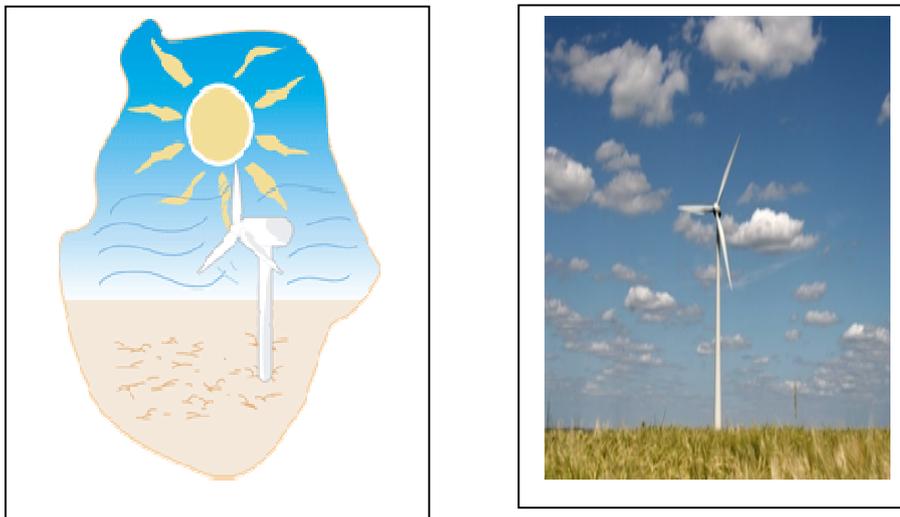


Figure-I-1 :L'énergie éolienne

## I-2-Définition et principe de l'énergie éolienne [1] :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent (Eole : Dieu grec du vent). C'est une énergie renouvelable, elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie est totalement propre. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet.

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

**a. Conservation de l'énergie mécanique:** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (bateau à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éolienne de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin à vent.

**b. Transformation en énergie électrique (aérogénérateur) :** l'éolienne est couplée à un générateur (aérogénérateur) électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batterie ou un autre dispositif de stockage d'énergie ; cette application se retrouve essentiellement dans les régions isolées. (Voir Figure-I-2)

Depuis les années 90, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW.

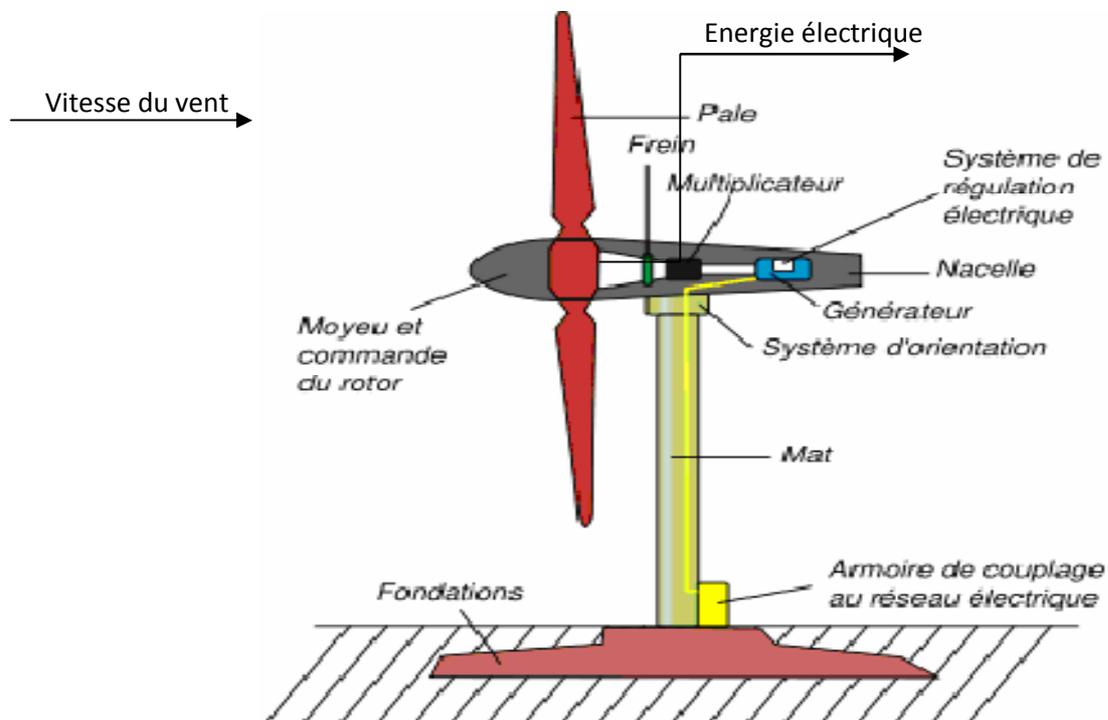


Figure-I-2: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur. [1]

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

## I-3-Principaux et éléments Constitutifs de l'éolienne : [1]

Une éolienne (ou aérogénérateur) est une machine qui transforme l'énergie cinétique du Vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie électrique.

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins une « éolienne » classique est généralement constituée de :

- **le mât** : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont si haut perchées car vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...



Figure-I-3 : Tour d'une turbine

- **Un rotor** : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

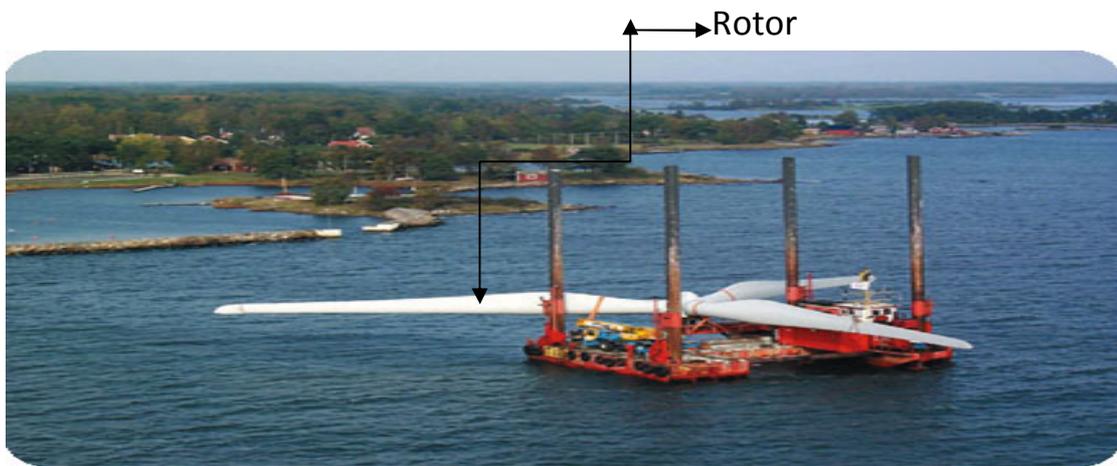


Figure I- 3: Rotor d'un turbine [1]

- **Une nacelle :** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au bon fonctionnement de l'éolienne. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

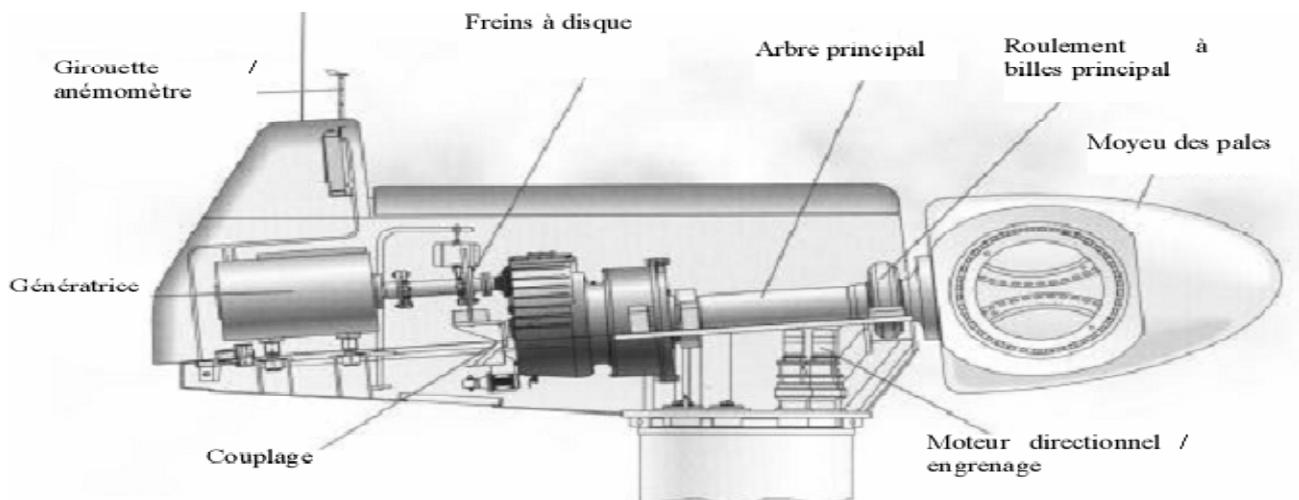


Figure I-5 : Constitution d'une nacelle [1]

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

Les différents composants d'une nacelle:

- **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **Frein** : 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.
- **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Convertisseur électronique de puissance** : il permet le traitement des signaux générés par la génératrice.
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

## I-4-Le Principe De Fonctionnement D'une Eolienne [1]

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor de l'éolienne doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à une vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

## I-5-Les Différents Types D'éoliennes : [1]

Les turbines éoliennes sont classées selon leur puissance délivrée et aussi selon leur structure

### I-5-1 : classement selon la puissance délivrée :

Les turbines éoliennes sont classées en 3 catégories : les petites éoliennes, les moyennes et puis les grandes éoliennes.

Le tableau-I-1 présente une classification des turbines éoliennes selon leur taille ainsi que leur puissance délivrée.

ECHELLE	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40KW
Moyenne	12m à 45m	De 40KW à 1MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

---

Tableau –I-1 : classification des turbines éoliennes.

- **Les raisons pour lesquelles une grande éolienne est choisit sont : [1]**

1. Le principe des économies d'échelle vaut, évidemment, également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

- **Les raisons pour lesquelles une éolienne moins grande est choisit sont : [1]**

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.



Les 2 types d'éoliennes (Axe Vertical, Axe Horizontal)

**Figure-I -6 : Différents types d'éoliennes.**

## **I-5-2 : Classement selon la structure :**

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

### **1- Eolienne a Axe Vertical : [1]**

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

Faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts.

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

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

### **2-Eoliennes a Axe Horizontal:[1]**

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

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

## I-6 : Evaluation de l'énergie éolienne en Algérie : [4]

Le potentiel diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1à4m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau, particulièrement, sur les hauts plateaux.

Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.

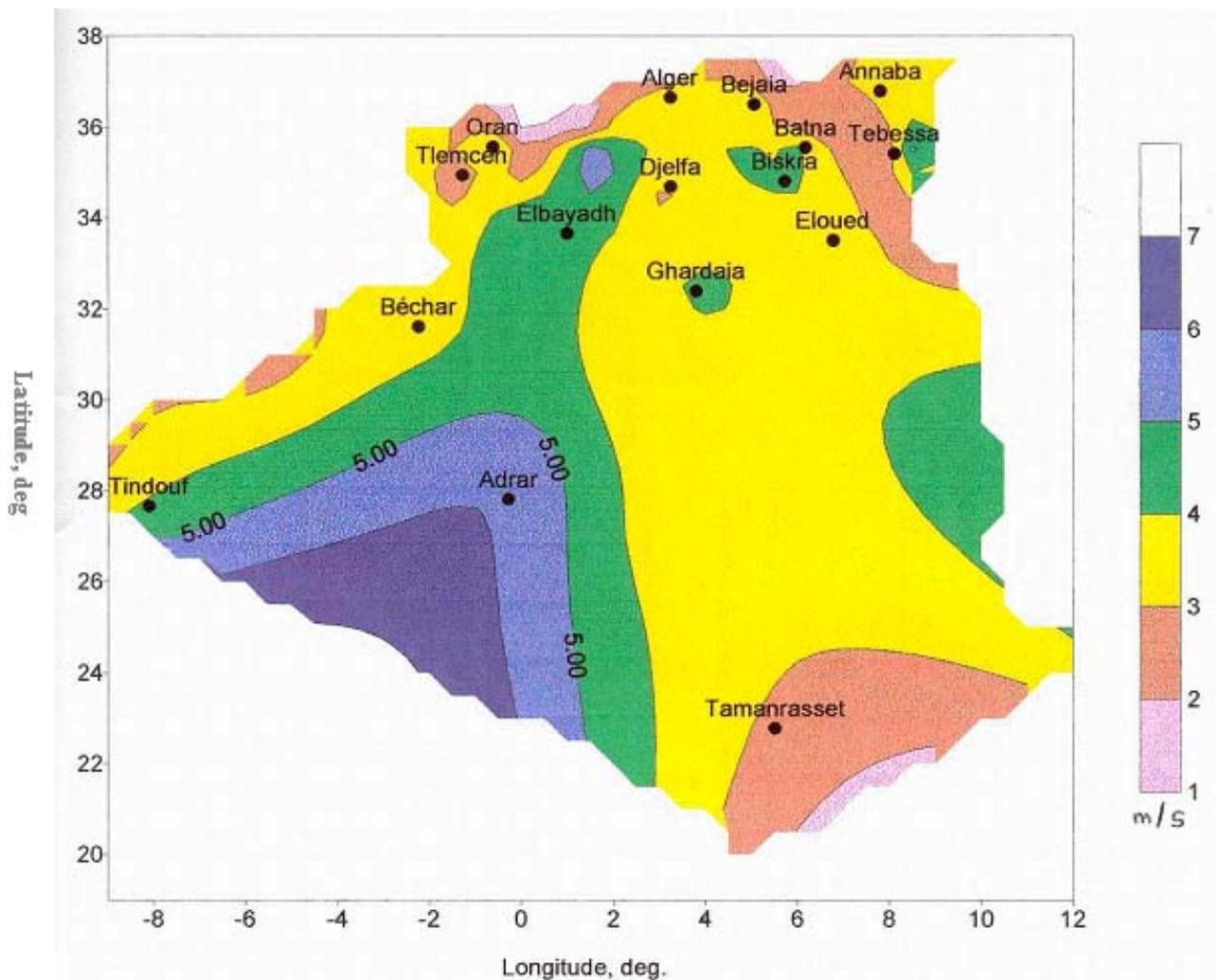


Figure-I -7 : Carte préliminaire des vents de l'Algérie

## I-7-Avantages et Inconvénients de L'énergie L'éolienne : [1]

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

---

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

- **LES AVANTAGES :**

1- L'énergie éolienne est propre, fiable, économique et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.

2- Bien qu'on ne peut envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, etc. ... Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.

3- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont les ressources sont gratuites, et inépuisables.

4- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.

5- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.

6- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

7- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

8- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

9- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.

# Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne

---

10- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

- **LES INCONVENIENTS :**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

1- L'impact visuel :

2- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.

3- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien n'est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger.

4- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

## **I-8-Conclusion :**

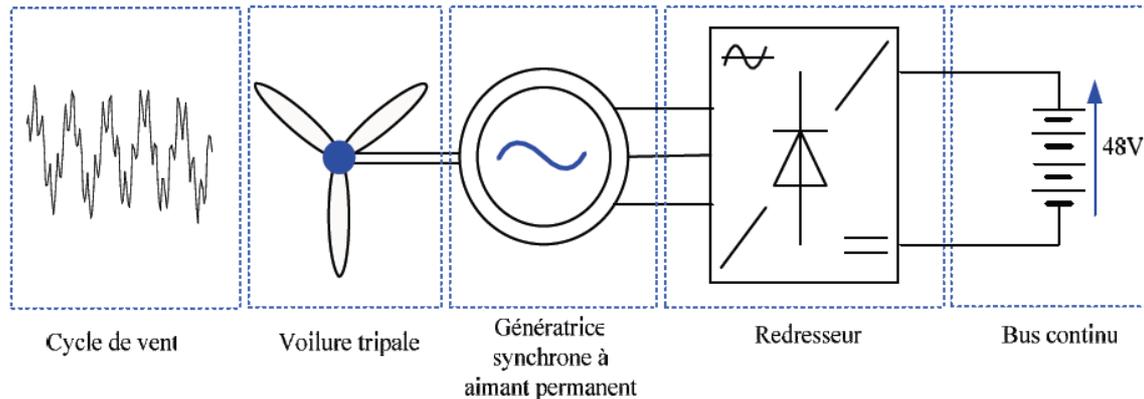
Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre.

On peut dire que l'éolienne est une source de production d'énergie qui présente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées.

Dans le chapitre suivant nous présentons la modélisation de la turbine éolienne qui constitue le premier élément de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.1 Introduction : [1]

La chaîne de conversion d'énergie d'éolienne proposée est constituée principalement d'une turbine éolienne, d'une génératrice synchrone à aimants permanents et d'un convertisseur à commande MLI. (Voir figure II-1).



**Figure II-1 : Architecture globale de la chaîne éolienne « passive »**

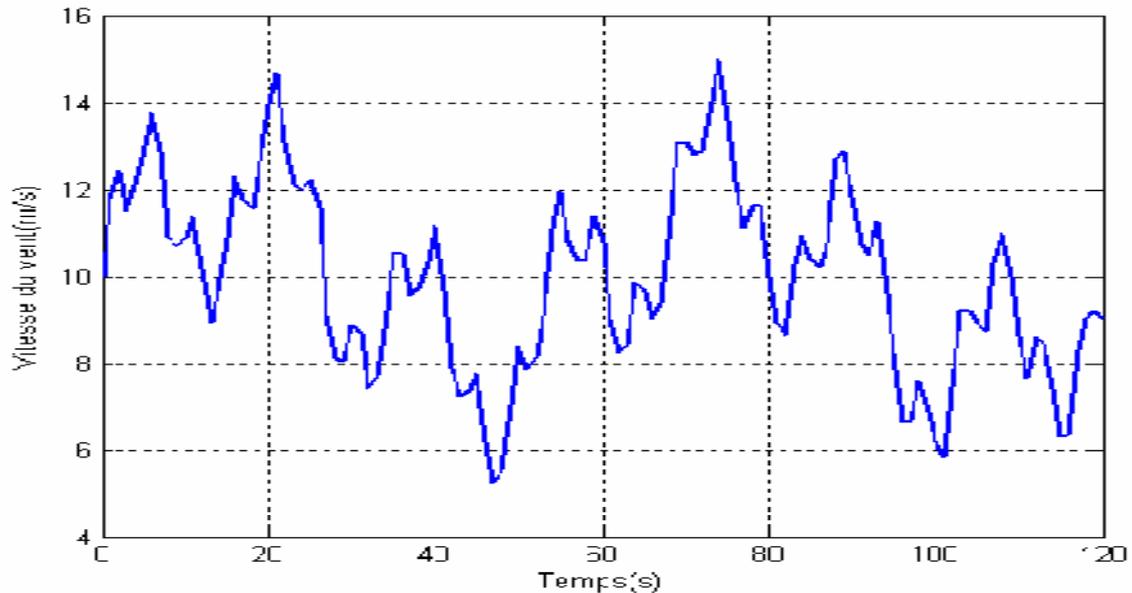
Dans ce chapitre, nous présentons le modèle de la turbine éolienne type tripale à calage fixe.

## II.2 Modélisation de la vitesse du vent : [2]

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne. Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensellement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que :

- la situation géographique.
- l'altitude.
- la température.

On considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m.



**Fig. II. 1 : Vitesse de vent - modèle analytique**

L'évolution de la vitesse de vent en fonction du temps est modélisée par une fonction analytique ou générée par une loi statistique à partir des données de mesure pour un site donné. Dans un contexte de la modélisation théorique, le profil de vent doit satisfaire 2 critères :

- La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation
- Le profil de vent doit être représentatif des caractéristiques du gisement (intensité, Variabilité, distribution statistique...).

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent de façon Déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [MIR05] :

$$V(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (\text{II.1})$$

L'évolution temporelle du vent est tracée dans la figure *Fig. II. 1*

### II.3 Modélisation de la turbine :

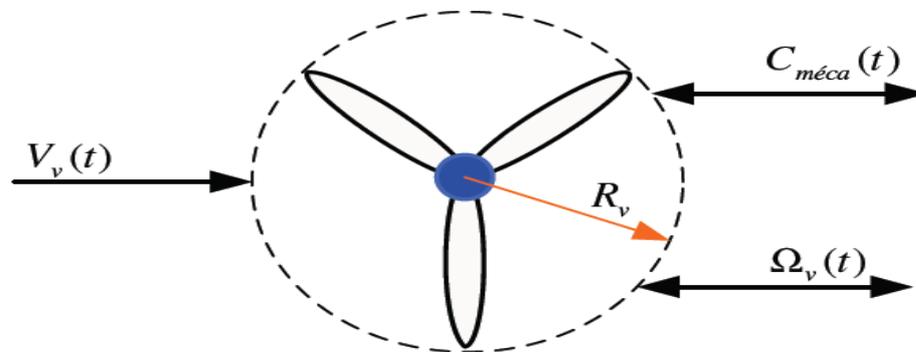
La turbine éolienne choisie pour notre étude est une turbine tripale en fibre de verre. Ses caractéristiques sont données dans le tableau. Tab II-1.

Selon le paragraphe précédent, nous avons proposé une modélisation de la vitesse du vent  $V_p$  sous forme d'une fonction scalaire (eq II-1) d'une seule variable d'entrée du modèle de la turbine.

TAB. II. 1: Paramètres de la turbine [WWB] [2]

Paramètres	Valeurs
Rayon du rotor	$R_v=1.25$ [m]
Masse de la turbine	$M_t=34$ [kg]
Inertie de la turbine	$J_v=1.5$ [kg.m <sup>2</sup> ]
Coefficient de frottement	$F_m=0.025$ [N.m.s.rad <sup>-1</sup> ]

Paramètres de la turbine  $P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \rho V_v^3$  (II. 1)

Fig. II. 2 : Turbine tripale ( $R_v=1.25$ m) [2]

Avec :

$S_{éolienne}$  : La surface balayée par éolienne.

$\rho$  : La masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ Kg/m}^3$ ).

$V$  : La vitesse du vent.

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

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

Avec  $R$  est le rayon des pales de la turbine tripale voir figure II-2

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance extraite par l'éolienne  $P_{éolienne}$  peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  $C_p$  :

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

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \text{ (II.4)}$$

Avec :

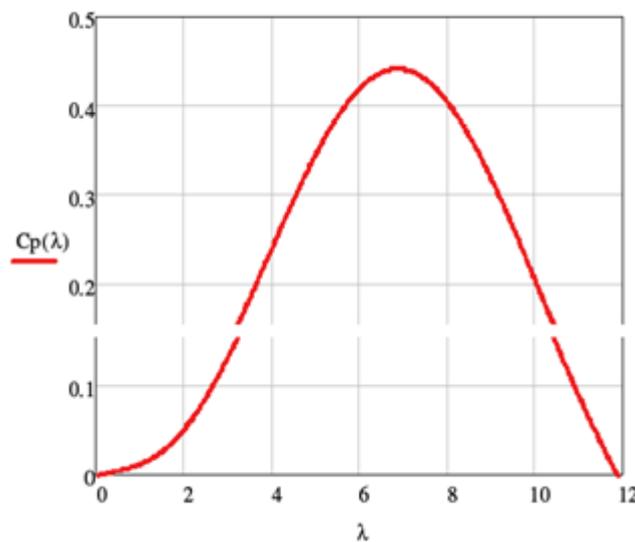
$R$  : Rayon des pales de l'éolienne.

$\Omega$  : Rotation de l'éolienne.

$V$  : vitesse de vent.

Le coefficient de puissance  $C_p$  est souvent issu de mesures pratiques. L'étude de l'éolienne proposée (tripale à calage fixe) a permis de déduire la formule empirique du coefficient  $C_p$  la suivante : (voir fig. II-3).

$$C_p(\lambda) = -3.89 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^7 - 4.21 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^6 + 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^5 - 3.1 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^4 + 1.64 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda^3 - 1.67 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda^2 + 1.74 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda - 1.93 \cdot 10^{-3} \text{ (II.5)}$$



**Fig. II.3: Interpolation du facteur de puissance en fonction de la vitesse réduit**

**[2]**

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

$$C_{opt}=0.442$$

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

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

Le couple éolien est déterminé par :

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

### II.4 Multiplicateur : [1]

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice

Fig. II .4. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

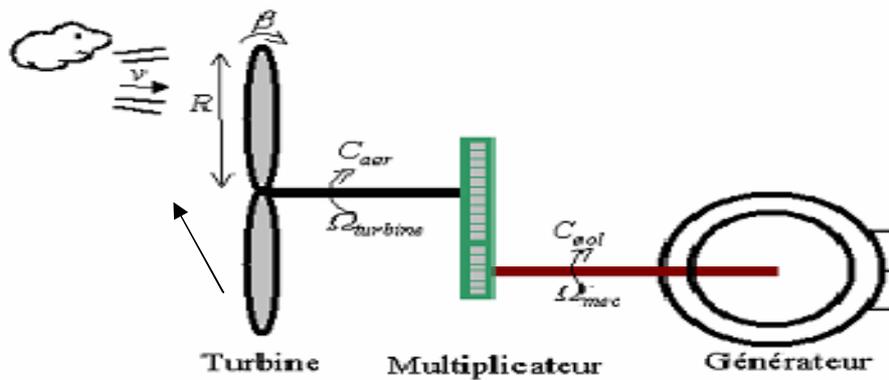


Fig. II .4: Schéma de la turbine éolienne.

Avec :

- $\Omega_{\text{turbine}}$  : est la vitesse avant le multiplicateur issue de la turbine éolienne.
- $C_g$  : est Le couple éolien après multiplicateur.

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

Avec :

$G$  : Le coefficient de multiplication.

- $\Omega_{\text{mécanique}}$  : est la vitesse mécanique qui va entrainer la génératrice. Nous avons :

$$\Omega_{\text{mécanique}} = G \Omega_{\text{turbine}} \quad (\text{II. 9})$$

## II.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission : [4]

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

Nous avons :

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

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

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

Nous avons :

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

Avec :

- $C_g$  : le couple issu du multiplicateur. (voir II. 8)
- $C_{em}$  : le couple électromagnétique développé par la génératrice.
- $C_f$  : le couple résistant dû aux frottements.

Nous avons :

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

Avec :

- $f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

## II.6 Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre la modélisation du premier élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne qui est la turbine.

L'énergie mécanique issue de la turbine serait appliquée à l'arbre de la génératrice afin de produire de l'énergie électrique.

Dans le chapitre suivant nous allons voir la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi que celle du convertisseur MLI.

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

---

## III-1 Introduction : [3] »

Dans ce chapitre nous allons modéliser la génératrice à aimants permanents.

## III-2 généralités sur la machines à aimants permanents(MSAP) : [3]

La très grande majorité des machines électriques utilisées dans l'industrie fait appel à des technologies connues depuis très longtemps: moteur asynchrone à cage d'écurueil et alternateur synchrone .Depuis quelques décennies, les concepteurs de machines électriques étudient de nouvelles structures (machines à aimants permanents ou reluctance variable, avec flux axial, radial ou transverse).Ces innovations sont possibles grâce aux avancées technologiques dans l'électronique de puissance ,les matériaux et les calculs numériques.

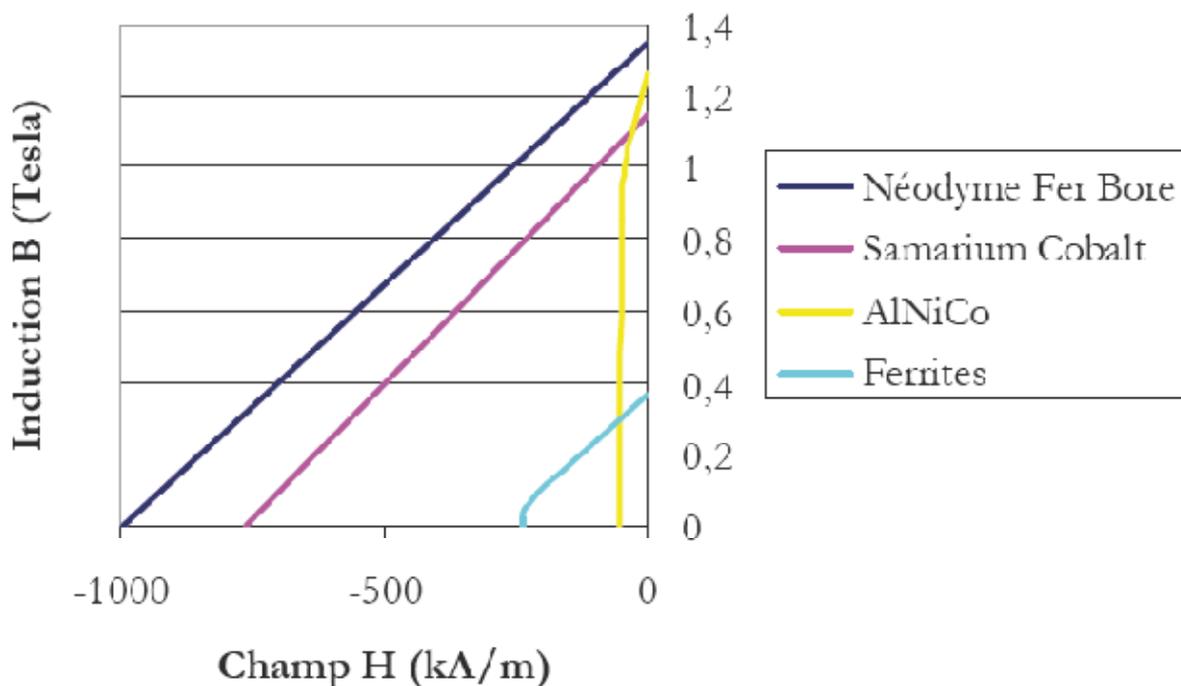
Pour l'excitation rotorique, les aimants permanents ont remplacé le bobinage rotorique depuis une vingtaine d'années. Pourtant connus à l'époque des grecs, les aimants permanents n'ont connu leurs réels développements que depuis les années 1930.A l'heure actuelle, il existe quatre familles d'aimants permanents. Ce sont les Alnico (ou Ticonal), les ferrites dures, les aimants permanents Samarium –Cobalt et les aimants permanents Néodyme –Fer-Bore. Au cours des années 1930, les Alnico furent les premiers permanents industrialisés. Composés d'aluminium, de nickel et de cobalt, ils sont très peu utilisés de nos jours du fait de la présence de cobalt (très couteux) et de leurs modestes propriétés magnétiques. Néanmoins, des applications de niches telles que les appareils de mesure et le domaine de la haute température utilisent ces aimants dotés d'une très bonne stabilité thermique.

Apparus dans les aimants années 50, les ferrites (hexaferrites de baryum ou de strontium) sont parmi les aimants les plus utilisés a l'heure actuelle. Malgré des performances magnétiques limitées, ils restent compétitifs grâce à leur très faible cout de production. Les aimants permanents samarium cobalt(SmCo), apparus dans les années 60, sont dotés de performances magnétiques très élevées supplantant dans ce domaine les deux familles précédentes. Résistants a la corrosion et stables en température, ils sont en revanche chers (présence de coblat). Leur applications sont limitées à des domaines ou le cout n'est pas un critère majeur (en particulier les hautes températures). Enfin les plus récents, les aimants

## Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

permanents néodyme fer bore (NdFeB), découverts dans les années 80, sont les aimants les plus utilisés dans l'industrie. En effet, ils combinent d'excellentes propriétés magnétiques et un faible coût d'exploitation (le néodyme est une terre rare plus répandue que le samarium). Très sensibles à la corrosion, ils ne peuvent être utilisés seulement qu'après avoir été recouverts d'une couche protectrice. Leur température de Curie, comprise entre 310 et 330 °C contre 700 à 850 °C pour les SmCo, handicap majeur de ces aimants, limite leurs domaines d'application.

Pour la suite, le choix s'est porté naturellement vers les aimants permanents néodyme fer bore qui offrent des performances magnétiques élevées pour un coût d'exploitation abordable.



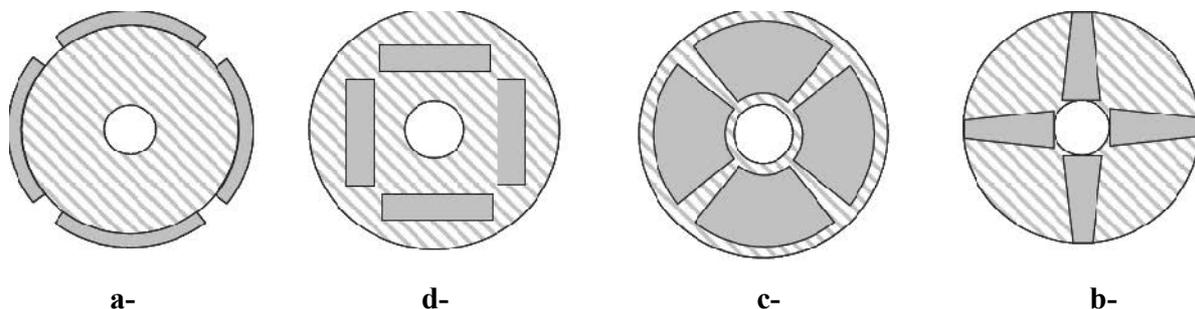
**Figure .III.1 : courbes caractéristiques des aimants.**

Emplacement des aimants :

Différentes configurations d'emplacement des aimants sont possibles (Figure ). Chacune a ses avantages et ses inconvénients. En règle générale, les aimants en surface ont l'avantage d'être simples à mettre en place (un simple collage sur la surface du rotor suffit).

## Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

A haute vitesse, cette configuration n'est pas adaptée car avec la force centrifuge, les aimants vont se décoller. Pour remédier à ce problème, il est préconisé de recourir soit à un rotor extérieur avec aimants en surface (les aimants étant plaqués à la surface grâce à la force centrifuge) soit à frotter les aimants. En plus de supprimer les problèmes de décollement à haute vitesse, les aimants enterrés peuvent être utilisés en concentration de flux. Ainsi, leur utilisation est optimisée. A noter qu'en plaçant les aimants de cette manière, les courants de Foucault dans les aimants sont diminués.



a-

d-

c-

b-

**Figure .III.2 Quelques configurations du placement des aimants**

a- Aimants en surface pour machine à flux radial.

b- Aimants enterrés pour machine à flux radial.

c- Aimants en surface pour machine à flux axial.

d- Aimants enterrés pour machine à flux axial.

### III-3-Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :[3]

#### III-3-1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices

- L'absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (fmm), créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés.
- L'effet des encoches est négligé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

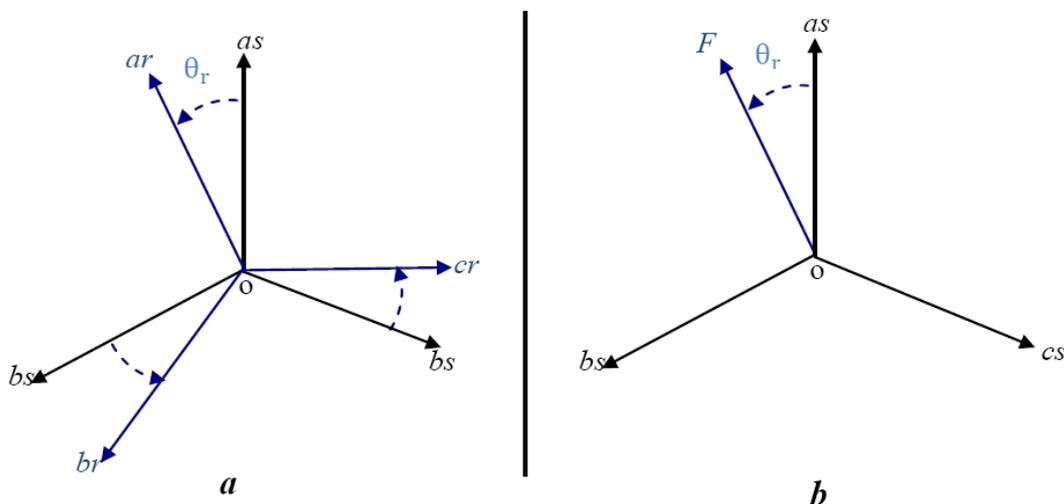
# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air.

## III-3-2 Mise en équation de la MSAP

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes,  $d$  et  $q$ .

Dans le repère classique il y a trois axes ( $as, bs, cs$ ) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe  $as$  est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Comme les stators des machines asynchrones et synchrones sont pareils, les repères statoriques pour les deux types de machine sont identiques. Quant aux rotors, on a toujours trois axes ( $ar, br, cr$  – correspondant aux trois enroulements rotoriques) pour la machine asynchrone (MAS), mais un seul axe ( $F$  – correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). L'angle  $\theta_r$  donne la position du rotor par rapport au stator.



**Figure .III.3. a- machine asynchrone  
b-machine synchrone à aimants permanents (MSAP)**

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante :

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

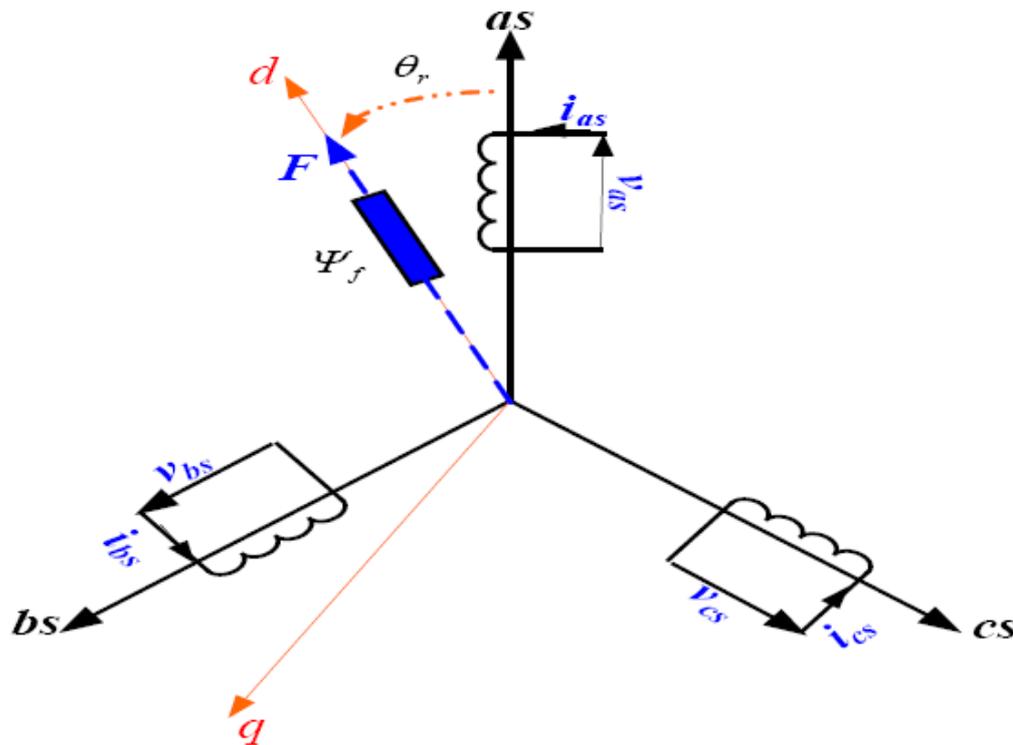


Figure .III.4. Schéma représentatif de la MSAP à modéliser

## III-3-2 -1 Equations électriques

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{III} - 1)$$

$[V_a \ V_b \ V_c]^T$ : Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$ : Vecteur courant de phases statoriques

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statorique.

$R_s$  : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

## III-3-2-2 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

déphasées de  $2\frac{\pi}{3}$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\frac{\pi}{3}$  et situées sur le rotor

Figure 5.III

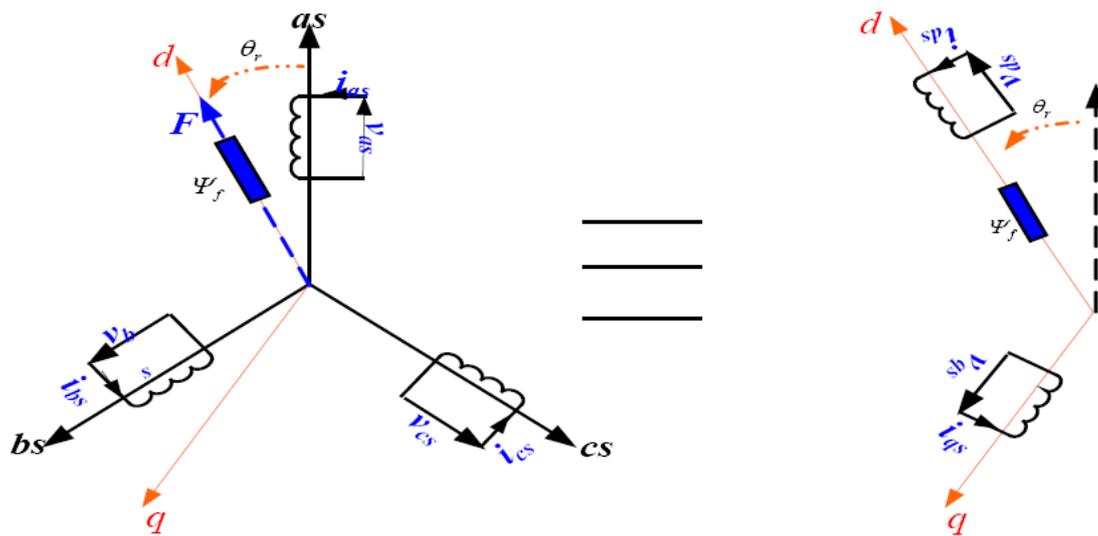


Figure 5.III : Transformation triphasée- diphasée

La transformation de Park ( $P(\theta)$ ) est définie par la matrice suivante :

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

$P(\theta)$  définit le passage du repère  $a, b, c$  vers  $d, q, o$

$$P^{-1}(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 1 \\ \cos \left( \theta_e - 2\frac{\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_e - 2\frac{\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta_e - 4\frac{\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_e - 4\frac{\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-3})$$

$P^{-1}(\theta)$  définit le passage du repère  $d, q, o$  vers  $a, b, c$

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs  $\beta$  et  $\alpha$  tel que l'axe  $\alpha$  est confondu avec l'axe  $as$  ce qui revient à poser  $\theta_r = \theta$  dans la transformation de Park (équation III-2) :

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

---

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-4})$$

### III-3-2-3 Modèle de la MSAP dans le repère de Park

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure 5.III, le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

Equations électriques :

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_{qs} = +R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_r \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ V_{qs} = -R_s i_{qs} - L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_r \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

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

Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_d i_{ds} + \Psi_s \\ \Psi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases}$$

(III-7)

## Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

---

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct ( $\Psi_{ds}$ ) et de quadrature ( $\Psi_{qs}$ ) sont fonction linéaire des courants ( $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ ) respectivement d'axe direct et de quadrature

Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{de}{d\theta_{geo}} \rho \frac{de}{d\theta_r} \quad (III-8)$$

$e$ : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$ : Ecart angulaire de la partie mobile par rapport à la partie fixe (rotor par rapport au stator) :

$\rho$  : Nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (III-9)$$

En remplaçant  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - (i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt}) + \frac{d\theta_r}{dt} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds})] \quad (III - 10)$$

$\frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2)$  : Représente la puissance dissipée par effet Joule

$\frac{3}{2} (i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt})$  : La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta_r}{dt} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds})$  : La puissance électromagnétique.

Sachant que  $P = C_{em} \Omega = P \Omega$  ( $\Omega$ : vitesse mécanique) alors:

$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds})$  Et après l'affectation des valeurs de flux on aura :

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

---

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} + i_{qs} \Psi_f] \quad (\text{III-11})$$

Dans le cas machine à pole lisse ( $L_d = L_q = L_s$ ) :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_{qs} \Psi_f \quad (\text{III-12})$$

Equations mécaniques :

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III-13})$$

Tel que :

- $C_m$  : Couple moteur.
- $f\Omega$  : Couple de frottements visqueux.
- $f$  : Coefficient des frottements visqueux.
- $J$  : Moment d'inertie de la machine.

## III-4-Modélisation de l'association GSAP – Redresseur commandé : [4]

### III-4-1-Introduction

Après avoir présenté le modèle de la génératrice, nous exposerons le système d'entraînement complet où la génératrice synchrone est associée au redresseur commandé.

La figure (5.III) illustre le schéma de principe de cette association.

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

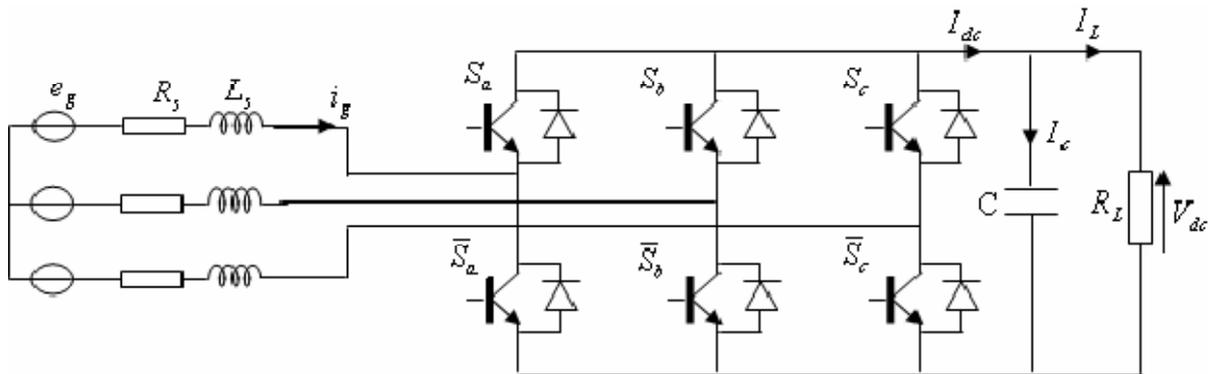


Figure (6.III) : Schéma de l'association GSAP – redresseur commandé

## III-4-2-Modèle mathématique du redresseur commandé :

Dans l'étude de l'ensemble commande – génératrice – redresseur - charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le cote continu. Ensuite la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteurs ; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [62-63] :

$$S_j = \begin{cases} +1; S'_{j=-1} \\ -1; S'_{j=+1} \end{cases} \quad \text{pour } j=a,b,c \quad (\text{III-14})$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de  $S_j$ ,  $V_{ac}$  et les courant d'entrée  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{III-15})$$

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

## Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

---

$$u_{Sab} = (S_a - S_b)V_{dc}$$

$$u_{Sbc} = (S_b - S_c)V_{dc} \quad (III-16)$$

$$u_{Sca} = (S_c - S_a)V_{dc}$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (III-17)$$

Avec:

$$U_{sa} = \frac{2S_a + S_b + S_c}{3} V_{dc}$$

$$U_{sb} = \frac{2S_b + S_a + S_c}{3} V_{dc} \quad (III-18)$$

$$U_{sc} = \frac{2S_c + S_a + S_b}{3} V_{dc}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des cotés alternatif et continu:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - I_L \quad (III-19)$$

## Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

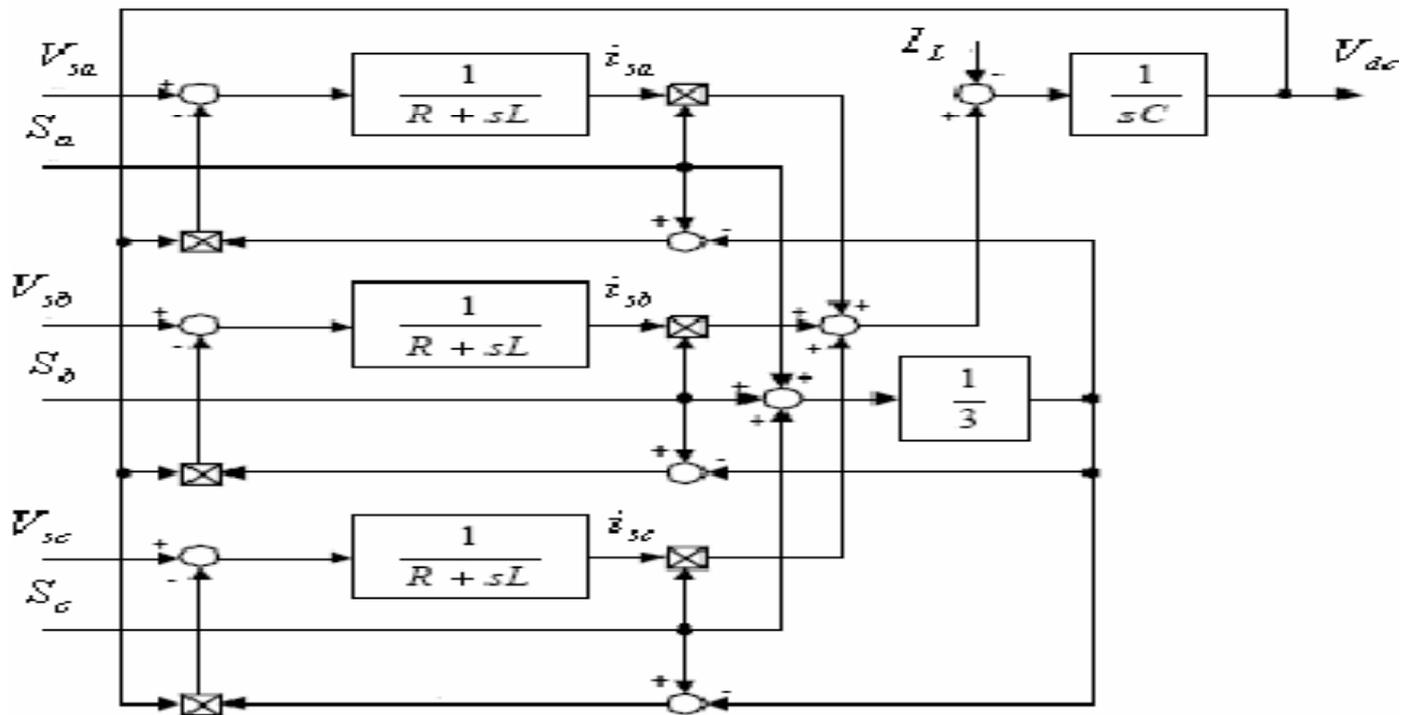


Figure (7-III) : Modélisation du redresseur dans un repère fixe lié aux axes abc

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones  $dq$  sont:

$$V_{sd} = R_S i_{sd} + L_S \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_S i_{sq} + U_{sd} \quad (\text{III-20})$$

$$V_{sq} = R_S i_{sq} + L_S \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_S i_{sd} + U_{sq} \quad (\text{III-21})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_d i_{sd} + S_q i_{sq}) - I_L \quad (\text{III-22})$$

Avec:

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\sin(\omega t)$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\sin(\omega t)$$

# Chapitre- III : Modélisation de la GSAP -Redresseur commandé

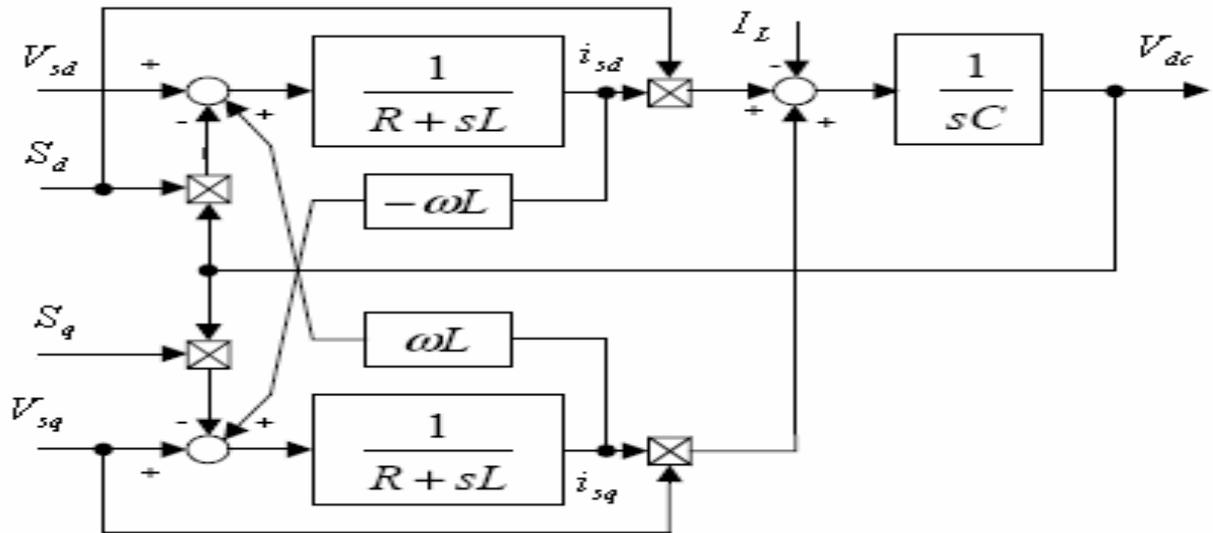


Figure (8-III) : Modélisation du redresseur dans un repère lié aux axes dq

## III-5- Conclusion

Dans ce 3ème chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la voileure, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur commandé). La loi commande du système a été aussi détaillée.

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

L'électricité est aujourd'hui produite, à près de 80%, à partir de combustible fossile (pétrole et gaz) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois [bel]. Les énergies renouvelables sont par contre propres et inépuisables et peuvent, à long terme, répondre à la majorité des besoins d'une société quelconque.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuse avec un taux de croissance très élevée.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Selon le type de génératrice et le type de convertisseur plusieurs structures de chaîne de conversion d'énergie éolienne ont été. Étudiée.

Le but de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne, pour ce faire notre choix s'est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, et à commande MLI. Ce choix est justifié par l'intérêt que la recherche consacre à ce type de structure vu qu'elles sont décrites comme étant les éoliennes de l'avenir. En effet le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques a fait que l'inconvénient majeur de ces structures à savoir le prix des aimants permanents. Ne soit plus un obstacle pour construire des éoliennes gigantesques à base de génératrice synchrone à aimants permanents, un objectif qui, des années avant, était impossible vu l'énorme prix des aimants permanents.

Notre travail est structuré de la manière suivante :

- Une généralité sur le système éolienne est présentée dans le premier chapitre.
- Le second chapitre comporte la modélisation de la turbine éolienne.
- La modélisation de génératrice synchrone à aimants permanents ainsi que celle de convertisseur MLI sera présentée dans le troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats de simulation. Enfin, nous terminons par une conclusion générale suivie de quelques perspectives.

$S_{\text{éolienne}}$  : La surface balayée par éolienne.

$\rho$  : La masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ Kg/m}^3$ ).

$V$  : La vitesse du vent.

$R$  : Rayon des pales de l'éolienne.

$\Omega$  : Rotation de l'éolienne.

$C_p$ : Coefficient de puissance

$\Omega_{\text{turbine}}$  : est la vitesse avant le multiplicateur issue de la turbine éolienne.

$C_g$  : est le couple éolien après multiplicateur.

$G$  : Le coefficient de multiplication.

$\Omega_{\text{mécanique}}$  : est la vitesse mécanique qui va entraîner la génératrice.

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

$C_g$  : Le couple issu du multiplicateur.

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

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements.

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

$[V_a \ V_b \ V_c]^T$ : Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$ : Vecteur courant de phases statoriques

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statorique.

$R_s$  : la résistance des phases statoriques.

$e$ : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$p$  : Nombre de paires de pôles.

$C_m$  : Couple moteur.

$f\Omega$  : Couple de frottements visqueux.

$f$  : Coefficient des frottements visqueux.

$J$  : Moment d'inertie de la machine.

# Conclusion générale

---

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne pour un site isolé.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'est intéressé dans nos chapitres à la modélisation et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

Dans un second temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéressant à la machine synchrone à aimants permanents), on a passé en revue les différentes machines synchrones et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et le filtre.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion pour voir le comportement du modèle face à un vent de vitesse variable et aussi l'influence de la charge sur la chaîne de conversion (Commenté les résultats de simulation).

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque -diesel)...etc.
- Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.

## Conclusion générale

---

- Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d réalisé des optimisations sur des critères de minimisation du coût.
- Appliquer des techniques de commande intelligents tels que la logique floue et les réseaux de neurones.

**Paramètres de l'éolienne :****1. Turbine :**

Paramètres	Valeurs
Rayon du rotor	$R_v=1.25$ [m]
Masse de la turbine	$M_t = 34$ [kg]
Inertie de la turbine	$J_v = 1.5$ [kg.m <sup>2</sup> ]
Coefficient de frottement	$f_m = 0.025$ [N.m.s.rad <sup>-1</sup> ]

**Tableau 1.** Paramètres de la turbine. [2]**2. Paramètres de la GSAP :**

Tension nominale	$V_n = 90V$
Puissance nominale	$P_n = 600W$
Courant nominale	$I_n = 4.8A$
Nombre de paires de pôles	$2P=4$
Résistance des enroulements	$R_s = 1.4\Omega$
Inductance synchrone	$L_s = 0.0263H$
Flux efficace	$\varphi_{eff} = 0.15Wb$

**Tableau 2.** Paramètres de la GSAP. [4]**3. Paramètres du filtre LC :**

Inductance du filtre	$L_f = 0.9mH$
Condensateur du filtre	$C_f = 900\mu F$

**Tableau 3.** Paramètres du filtre LC. [4]**4. Paramètres de la charge :**

Résistance de la charge	$R_{ch} = 40\Omega$
Inductance de la charge	$L_{ch} = 16mH$

**Tableau 4.** Paramètres de la charge. [4]

# Bibliographie

---

- [1] **Redjem Radia** : 'Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne', thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 04 /07/2009.
- [2] **Duc-Hoan TRAN** : ' Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive »', thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse Discipline ou spécialité : Génie Electrique, 27 septembre 2010.
- [3] **BOUHEDDA ALI** : 'Contribution à étude de systèmes de commande d'une éolienne', thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 07/07 /2011.
- [4] **Soltane BELAKEHAL** : 'Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables', thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE,10/06/2010.

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

## III -1 Introduction : [1]

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide des logiciels Matlab-Simulink.

Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande. A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

## III-2 Turbine :

La turbine est entraînée par une MSAP, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la figure III-1.

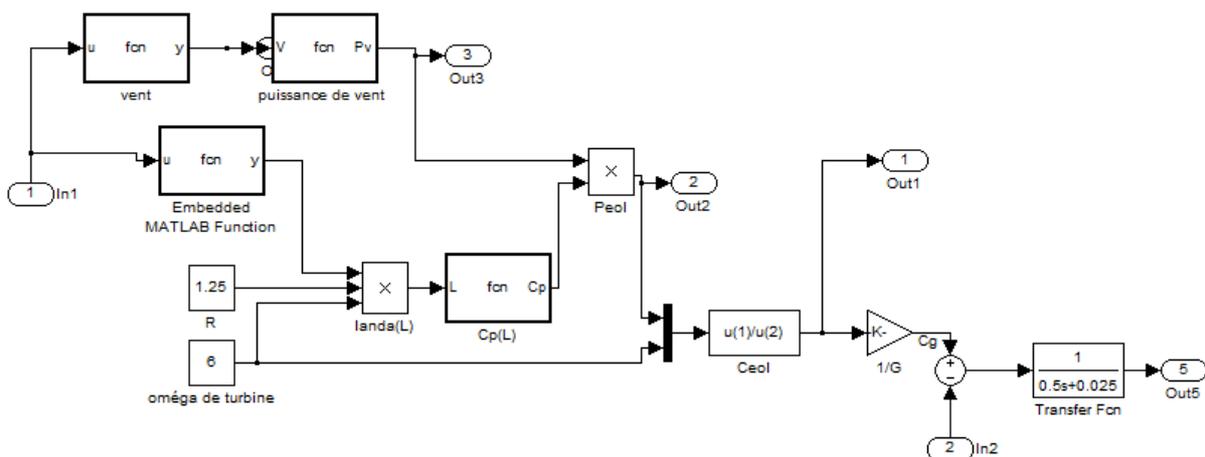


Figure III-1 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).

## III-3 Génératrice Synchrones à Aimant Permanent :

La génératrice synchrone à aimant permanent est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. On utilise une MSAP pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de 3.82 KW. Son schéma bloc est représenté dans la figure III-2.

## Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

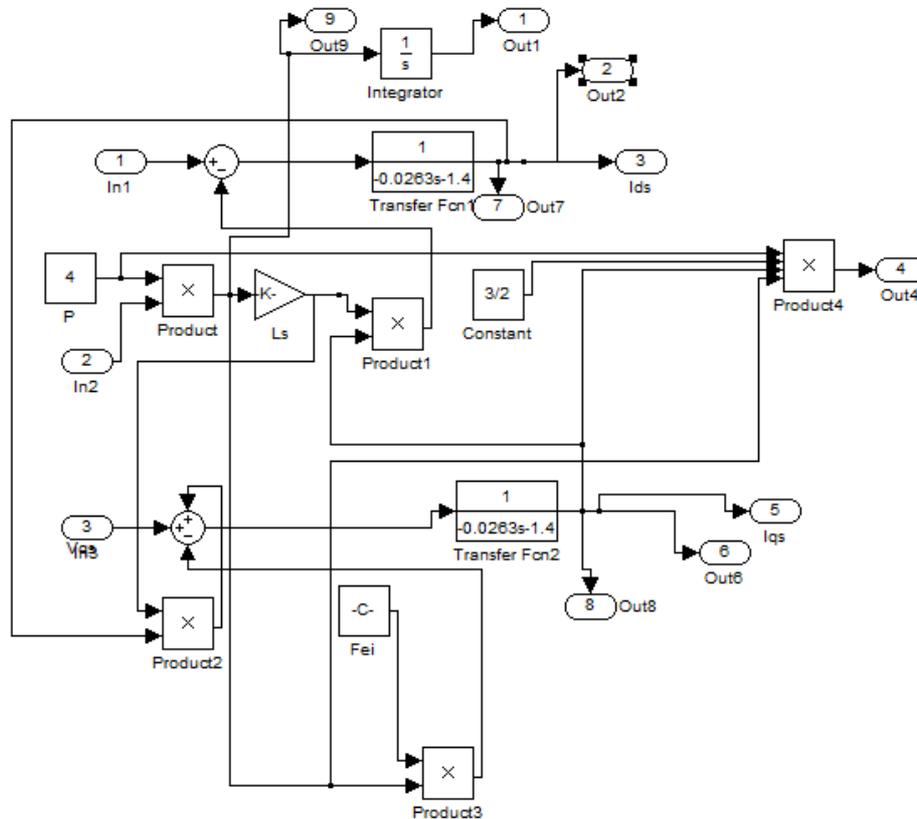


Figure III-2 : Génératrice synchrone à aimant permanent

### III-3 Redresseur :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Le schéma bloc est représenté dans la figure III-3.

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

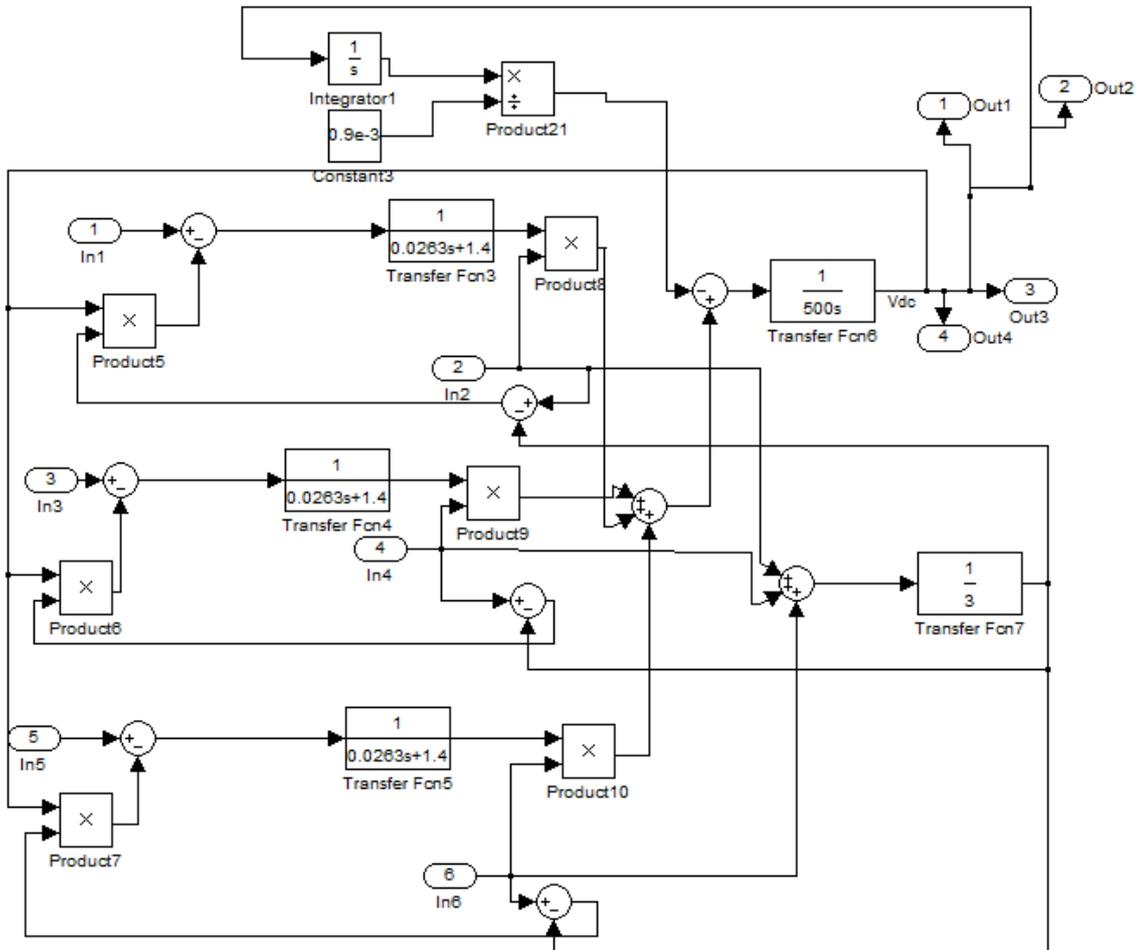


Figure III-3: Le schéma fonctionnel de redresseur dans le repère abc

## III-4 Onduleur :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. La séquence imposée aux interrupteurs statiques permet de réaliser un choix précis du vecteur de tension à appliquées à la charge. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération.

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

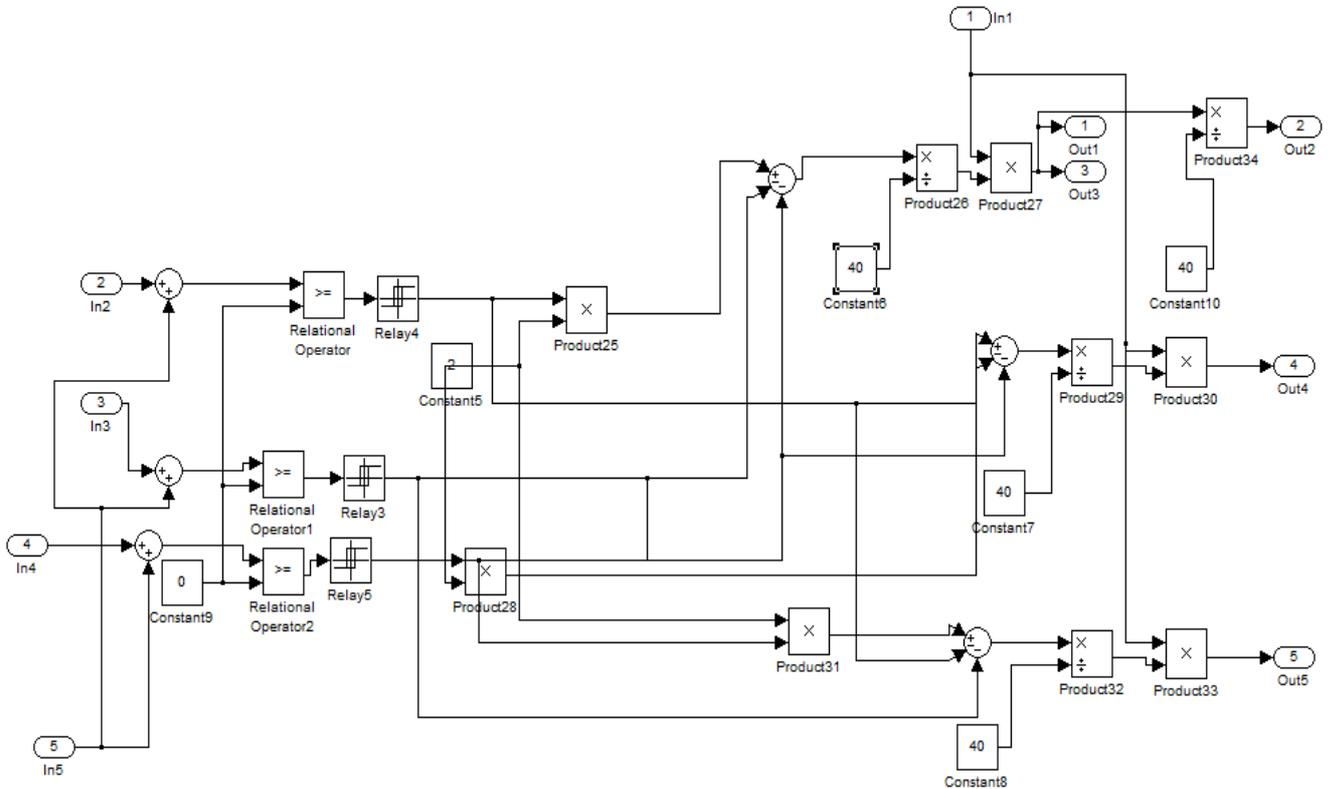


Figure III-4 : Modèle de l'onduleur de tension.

## III-5 La commande MLI :

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire compare trois modulatrices sinusoïdales décalées de  $120^\circ$  entre elles avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. Le modèle mathématique de la commande MLI présentée en utilisant le logiciel Matlab/Simulink est illustré par la figure III-5.

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

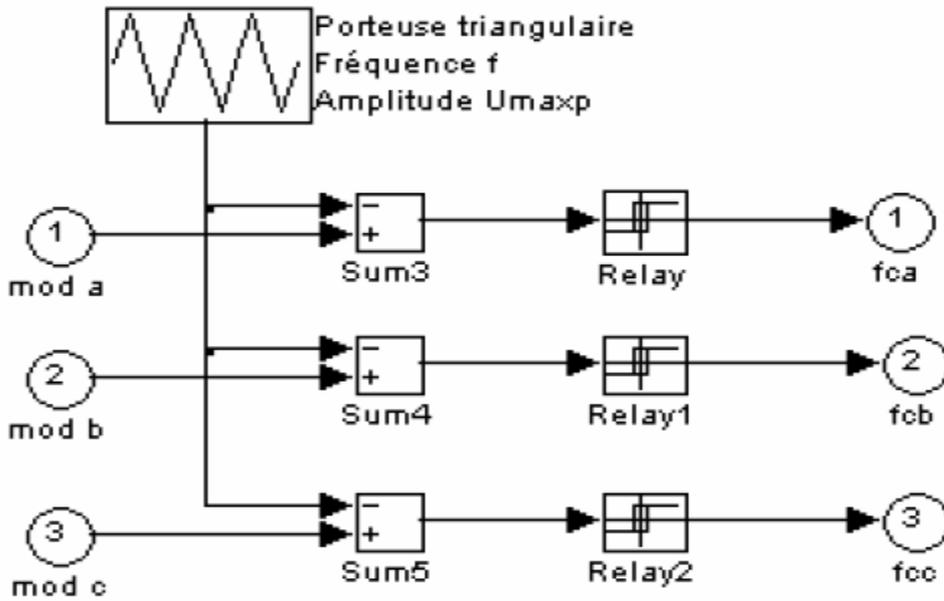


Figure III-5 : Modèle de la commande MLI à porteuse triangulaire

## III-6 RESULTATS DE SIMULATION :

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne reposant sur la machine synchrone à aimant permanent obtenus sous Matlab/Simulink sont présentés, (à partir des paramètres fournis en annexe).

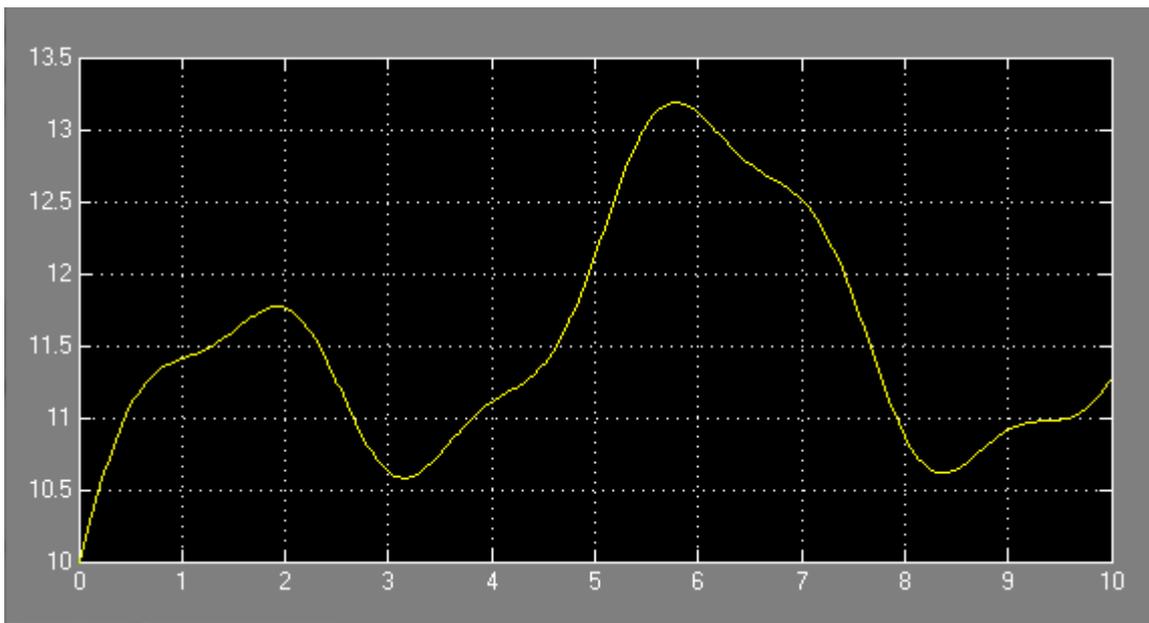


Figure III-6 : vitesse de vent

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

---

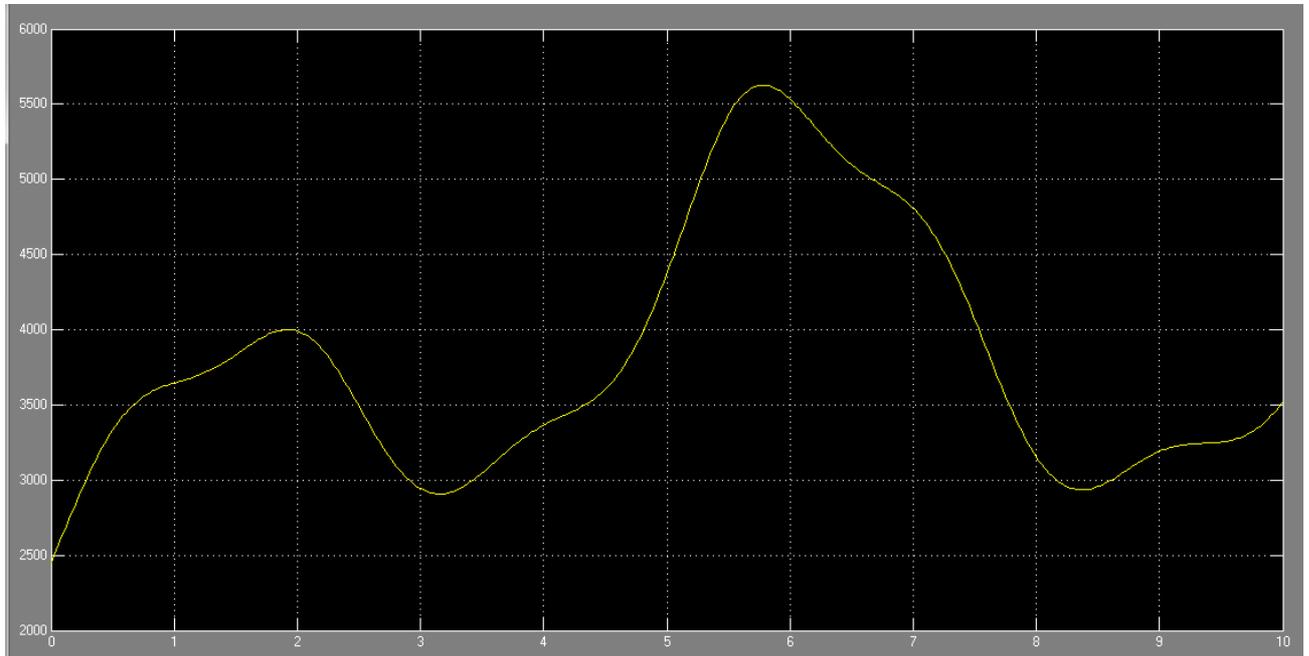


Figure III-7 : Puissance de vent

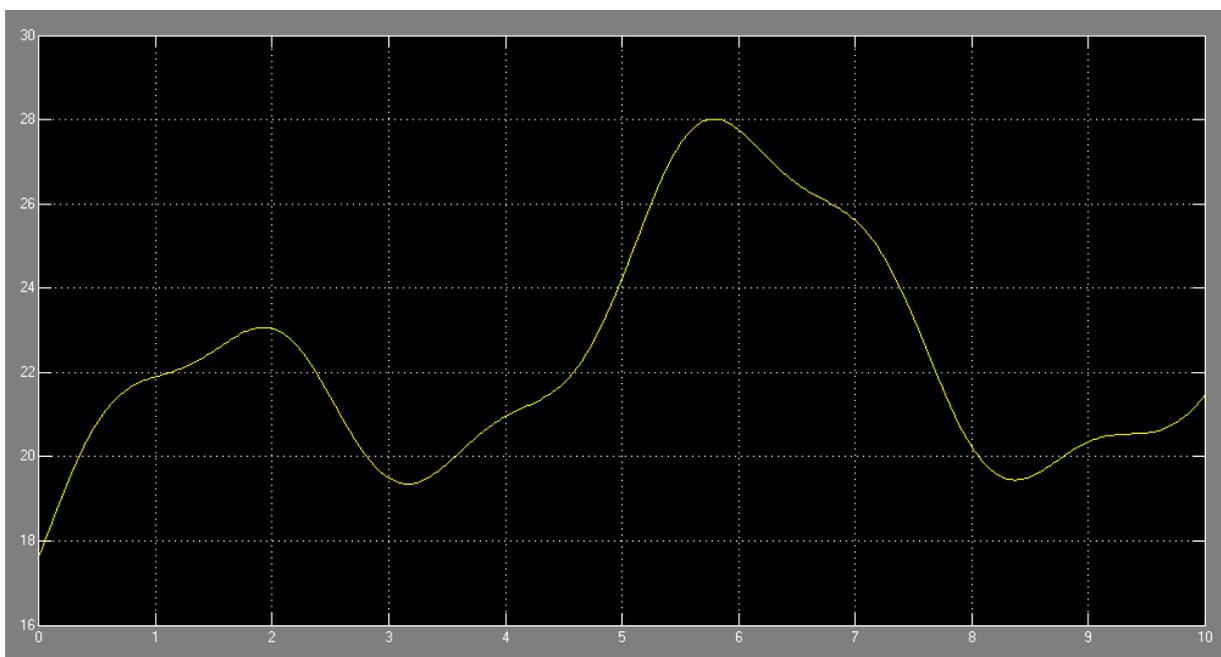


Figure III-8 : Puissance éolien

## Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

---

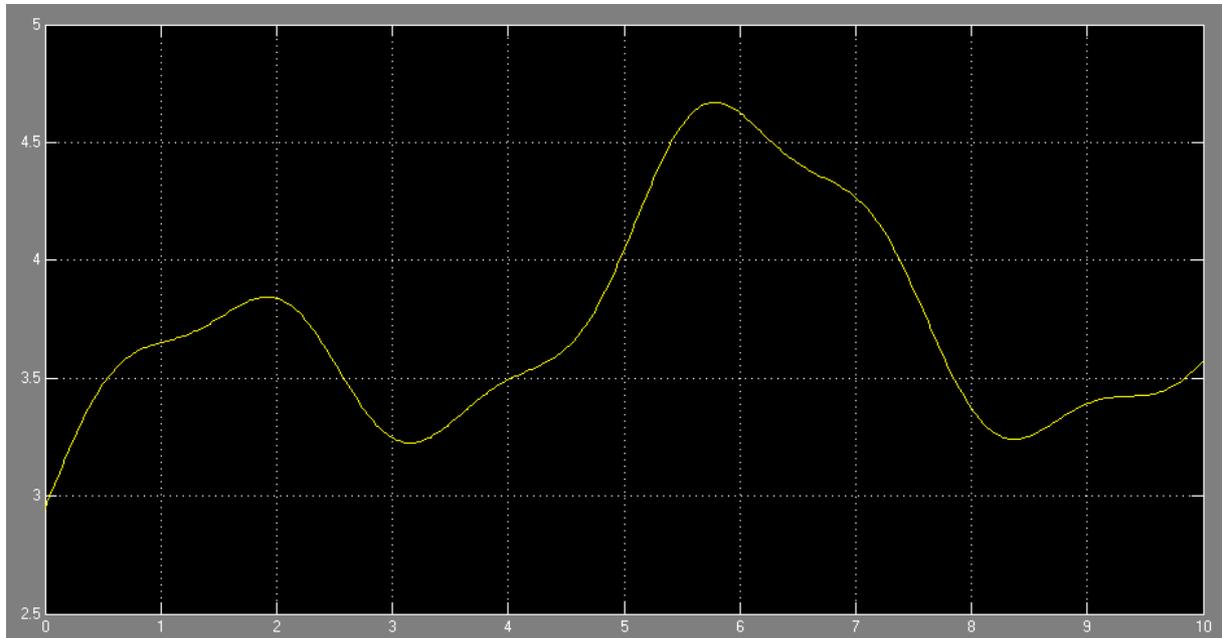


Figure III-9 : Couple éolien

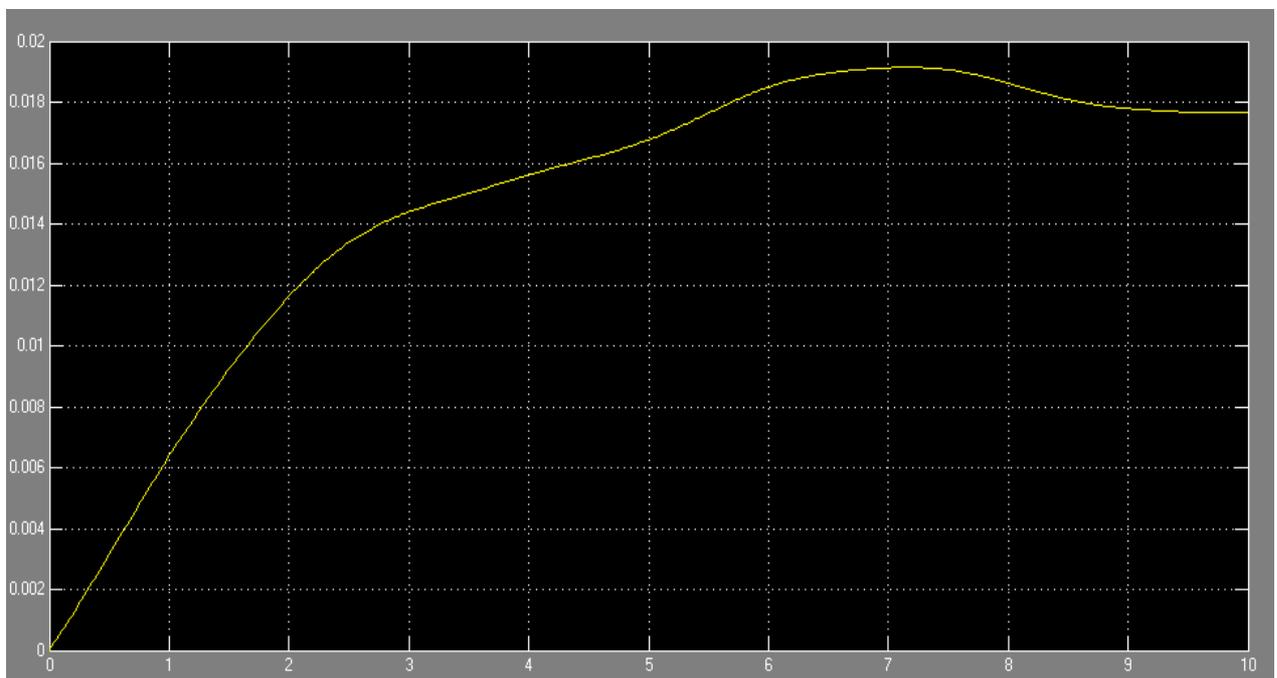


Figure III-10 : Vitesse mécanique

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

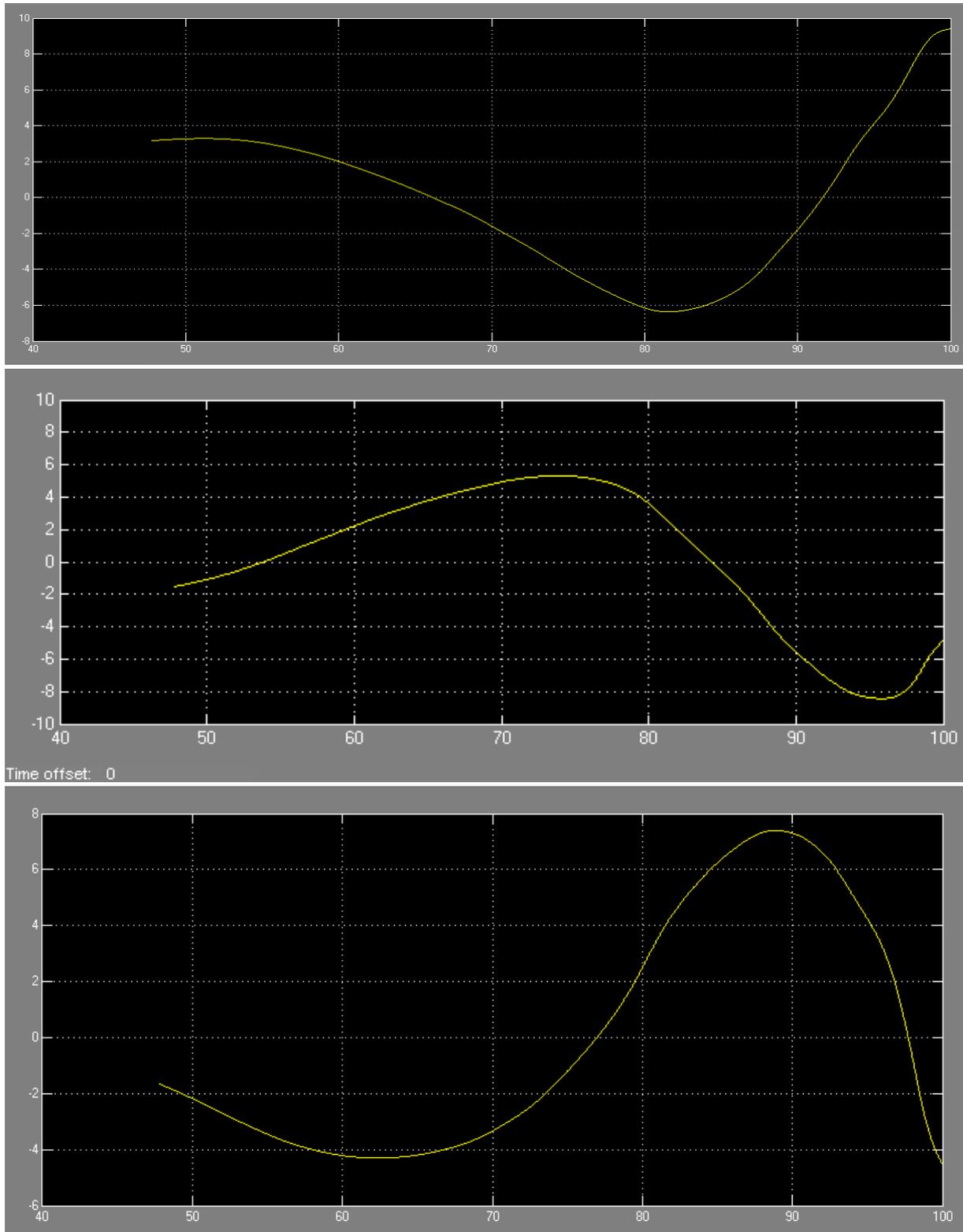


Figure III-11 : Les tension générée avec le GSAP

## Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

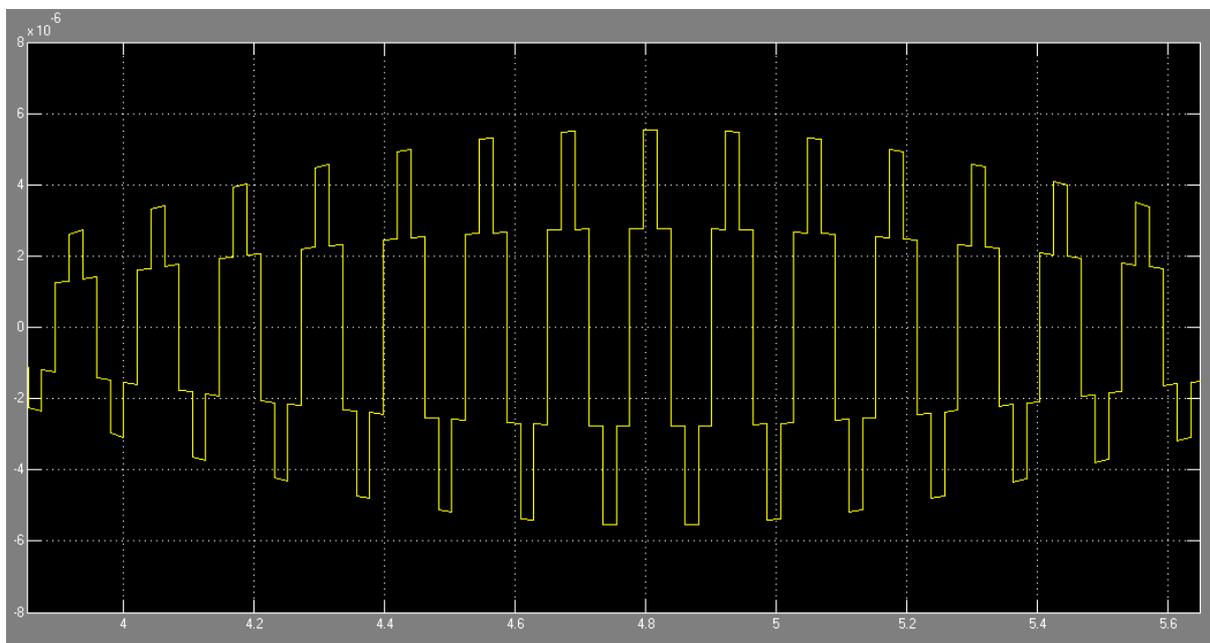


Figure III-12 : Tension aux bornes de la charge  $V_{ch}$  (V)

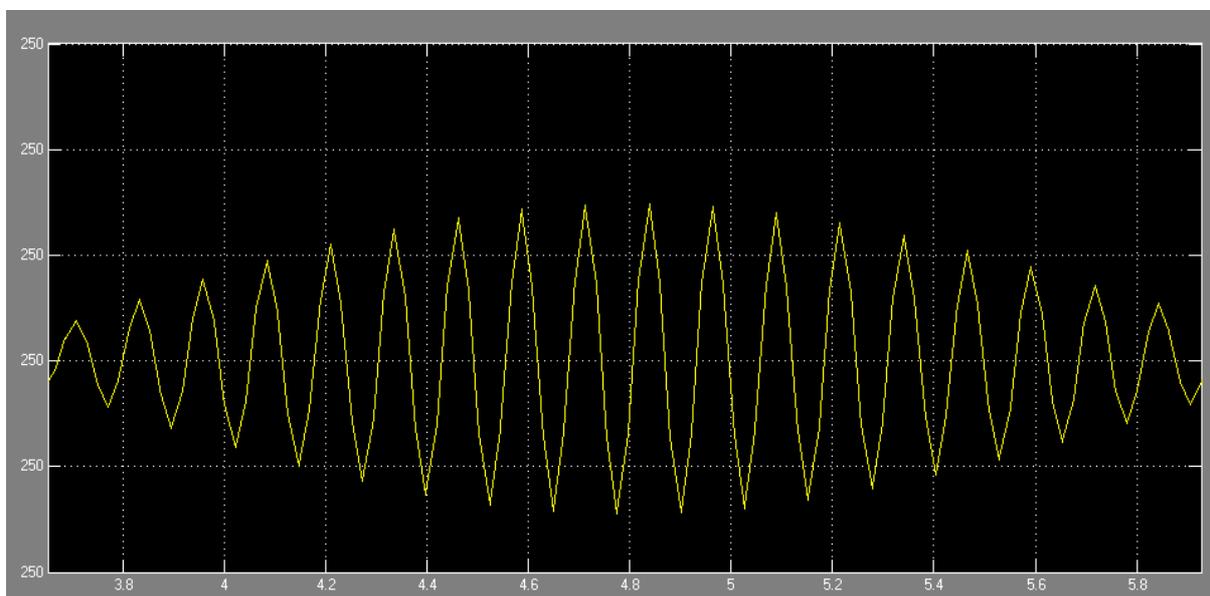


Figure III-13 : Courant de la charge  $i_{ch}$  (A).

### Les interprétations :

- **vitesse de vent** : cette figure c'est la forme de vitesse de vent entré dans la chaîne éolienne
- **Puissance de vent et Puissance éolien, Couple éolien** ne change pas la forme de vitesse de vent presque si une multiple fois une des consentante.

# Chapitre-III : Résultats de simulations et interprétations

---

- Nous avons connecté notre GSAP à une turbine à vitesse mécanique constante, après un régime transitoire de 0.1 s
- La tension générée avec GSAP : Elle est de forme sinusoïdale avec une amplitude de  $\pm 120$  V avec une période 40 ms (100 Hz) et la même chose avec le courant
- La tension aux bornes de la charge : C'est une tension alternative variant, avec une période de 20 ms (50 Hz).
- Le courant aux bornes de la charge : C'est un courant variable sinusoïdal avec une période de 20 ms (50Hz).

## III-7 CONCLUSION :

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier.

Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne et décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie éolienne en présentant les résultats de simulation