



## MEMOIRE

En vue de l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Energies renouvelables**

**Spécialité :** Energies renouvelables en électrotechnique

### Intitulé

## Conception d'une machine asynchrone à cage

### Présenté Par :

- Rezzougui Amal
- Bouzidi Soumya

Soutenu le 22/06/2021 devant le jury composé de :

<b>Président</b>	Grade
<b>Encadreur: Rekkal</b>	Grade
<b>Co-encadreur</b>	Grade
<b>Examineur</b>	Grade
<b>Examineur</b>	Grade

Session : (Juin 2021)  
Promotion : 2020 / 2021

## إهداء

الحمد لله الذي وفقنا و لم نكن  
لنصل إليه لولا فضل الله علينا  
أهدي ثمرة جهدي هذا العمل  
المتواضع إلى

إلى أعز إنسان إلى  
قلبي..... إلى روح أمي الطاهرة  
نزيهة

إلى من يعجز اللسان عن وصف  
فضلهما و تقف الكلمات جامدة  
أمام كلمتهما

أمي حبيبتي و أبي مأمني  
إلى زوجي الغالي و أبنائي عبد



## إهداء

إلى من زرعتني في أرض  
طيبة و سقاني بمكارم  
الأخلاق

إلى الذي تعب لأرتاح أنا  
إلى من علمني النجاح أبي  
حبيبي و أمي رفيقة دربي  
في الحياة

إلى كل من دعائه سر  
نجاحي زوجي الغالي  
إلى أغلى الحبايب أبنائي  
محمد و أبو بكر عبد  
الرحمان



# Remerciement

## Remerciement

D'abord nous devons remercier Dieu le puissant qui nous a donné la volonté, la patience et la force durant la réalisation de ce présent mémoire.

Notre second remerciement ira à madame REKAL Kahina. Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de Jury qui nous font l'honneur d'examiner ce travail. Enfin, nous tenons à remercier tous ce qui ont contribué à la réalisation de notre recherche.



## **Résumé**

La machine asynchrone a une variété d'utilisations qui l'ont rendue importante dans l'industrie et les transports. Sa solidité, ses faibles coûts d'achat et d'entretien et sa seule et unique source d'énergie en font son importance. Dans ce contexte, notre travail décrit l'étude et la modélisation d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE), une machine à induction asynchrone qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le rotor est généralement une cage d'écureuil ; Il profite donc de la robustesse et de la simplicité de l'entraînement à cage et des mêmes installations de fabrication. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée Cette dernière équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

**Mots clés** : Énergies renouvelables, énergie éolienne, vent, éolienne à cage d'écureuil, génératrices synchrones, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA),

## Table des matières

<b>Introduction general</b> .....	1
<b>Chapitre01: état de l'art des systèmes éoliens</b>	
I. Introduction.....	4
II. Etat de l'art des systèmes éoliens.....	5
II.1 Historique.....	5
II.2 Estimation des ressources éoliennes en Algérie .	6
II.3 Gisement éolien en Algérie.....	7
II.4 Le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama: .....	8
II.5 Chiffres clés de l'éolien dans le monde .....	8
III. Système éolienne .....	10
III.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne .	10
III.2 Constitution d'une éolienne .	12
III.3 Caractéristiques d'une éolienne (aérogénérateur) .	14
III.4 Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie .....	15
1) Production du courant.....	155
2) Redresser le courant.....	16
3) Réguler le courant.....	16
4) Stocker le courant .....	16
5) Onduleur .....	16
IV. Critères de choix de sites éoliens .....	17
IV.1 Comment faire de l'électricité avec du vent ?.....	17
IV.2 D'où vient le vent ? .....	18
IV.3 Énergie fournie par le vent .	18
IV.3.1 Énergie cinétique .....	18
IV.3.2 La masse de l'air .....	18
IV.3.3 Énergie théoriquement récupérable .....	19

*Puissance théoriquement récupérable .....	19
*Puissance récupérable .....	19
IV.4 Les éoliennes détournent le vent .....	19
Variation de la masse volumique de l'air .....	20
IV.5 Limite de Betz/Formule de Betz .....	20
Rendements.....	21
Le potentiel éolien.....	22
IV.6 La distribution de Weibull.....	22
Construction.....	22
Fonction de probabilité de densité de Weibull.....	22
IV.7 La distribution de Rayleigh .....	23
La puissance moyenne .....	23
La puissance du vent .....	23
VI. Les différents types d'éolienne.....	23
VI.1 L'éolienne verticale : principe et fonctionnement.....	23
□ L'éolienne Darrieus .....	23
□ L'éolienne Savonius .....	24
□ L'éolienne à voilure tournante .....	24
VI.2 L'éolienne horizontale : principe et fonctionnement.....	25
VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. ....	27
VII.1 Avantages.....	27
VII.2 Inconvénients .....	28
VIII. Conclusion.....	299
<b>Chapitre02 état de l'art des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens</b>	
I. Introduction.....	30
II. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones.....	30
II.1 Définition .....	30
II.2 Constitution d'un moteur asynchrone .....	32

a. Stator (inducteur).....	32
b. Rotor (Induit) .....	32
II.3 Les organes mécaniques: .....	34
II.4 Les types de moteur asynchrone. ....	34
II.5 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE). ....	34
II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage .....	37
Equation de tension:.....	37
Equation de flux:.....	37
II.7 schéma bloc de simulation:.....	38
Equation mécanique.....	38
II.8 Avantages et inconvénients.....	39
III. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones à aimant permanent (GSAP) .....	39
III.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents .....	39
III.2 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP).....	40
III.3 Constitution . ....	41
III.4 Modélisation d'un GSAP .....	41
III.4.1 Equations magnétiques .....	41
III.4.2 Equations électriques .....	44
III.4.3 Equations mécaniques.....	44
III.5 Avantages et inconvénients de la MSAP . ....	46
III.5.1 Avantages de la MSAP.....	46
III.5.2 Inconvénients de la MSAP .....	46
IV. systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) .....	47
IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Principe de fonctionnement d'une GADA.....	49
IV.3 Modèle mathématique de la GADA .....	50
IV.4 Avantages et inconvénients de la GADA.....	52
IV.4.1 Avantages .....	52



IV.4.2 inconvénients .....	52
V.Conclusion.....	52

**Chapitre 03 Simulation du système éolien utilisant les génératrices asynchrones à cage d'écureuil (GACE).**

I. Introduction.....	53
II. Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1 .....	53
II.1 Description.....	54
II.2 Objectif pédagogique .....	55
II.3 Identification des composants formant EOLYP .....	55
II.3.1 composition.....	55
II.3.2 caractéristiques de la génératrice .....	55
II.3.3 l'armoire électrique.....	55
III.Schema fonctionnel .....	57
IV. Fonctionnement .....	57
V. Outils de simulation Matlab/ Simulink.....	58
V.1 Matlab .....	58
V.2 Simulink.....	59
VI. Partie pratique.....	61
VI.1 les tableaux et les courbes .....	61
IV2. Développement du modèle SIMULINK du moteur asynchrone.....	64
IV.3 Résultats de la simulation.....	65
V. Conclusion.....	66
Conclusion generale.....	68
Bibliographie.....	70

## Liste des figures

Fig I.1: Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s) .....	07
Fig I.2: Capacité éolienne de 1996 à 2018 dans le monde (donnée GWEC) .....	09
Fig I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	10
Fig I.4: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.....	11
Fig I.5: Constitution d'une centrale éolienne.....	12
Fig I.6: Constitution de la nacelle.....	13
Fig I.7: Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie.....	14
Fig I.8: Limite de Betz.....	20
Fig I.9: Éoliennes type Darrieus.....	23
Fig I.10: Éolienne type Savonius.....	23
Fig I.11: L'éolienne à voile tournante.....	24
Fig I.12 : Éolienne à axe horizontal.....	25
Fig II.1: Stator d'un moteur asynchrone.....	32
Fig II.2: rotor bobiné.....	33
Fig II.3: rotor à cage d'écureuil.....	33
Fig II.4: Schéma d'un système de production éolienne avec GACE.....	35
Fig II.5- Caractéristiques d'une machine à induction typique.....	36
Fig II.6 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne.....	36
Fig II.7 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) industriel (TheSwitch).....	40
Fig II.8 GADA industriel pour éolienne.....	46
Fig II.9 Schéma d'un système de production éolienne avec GADA.....	47
Fig II.10 Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse.....	48
Fig II.11 schéma de principe de la double alimentation.....	48
Fig II.12 Passage de système triphasé au système biphasé.....	49
Fig III.1 Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1.....	53
FigIII.2 shéma fonctionnel de l'EOLYP.....	54
Fig III.3 l'armoire électrique.....	55
Fig III.4 Pupitre de commande.....	56
FigIII.5 moteur asynchrone.....	56
FigIII.6 les composant de schéma fonctionnel .....	57
Fig III.7 mode de fonctionnement moteur/ génératrice .....	58
Fig III.8 Librairie SIMULINK.....	60

Fig III.9 courbe de tension pour rotation rotorique 40Hz .....	61
Fig III.10 courbe de tension pour rotation rotorique 43Hz.....	62
FigIII.11 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz.....	62
FigIII.12 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz.....	63
Fig III.13 courbe de tension pour rotation rotorique 54.3Hz.....	64
Fig III.14 Modèle SIMULINK d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS).....	64
Fig III.15 Bloc de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	65
Fig III.16 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (Courant statorique).....	65
FigIII.17 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (la vitesse).....	66

### Liste des tableaux

Tableau I.1 vitesse du vent dans la wilaya de naama.....	08
Tableau I.2 Constitution de la nacelle .....	13
Tableau I.3 caractéristiques des éoliennes horizontales et verticale.....	25
Tableau II.1 des Avantages et inconvénients d'une GACE.....	38
Tableau III.1 Les principales librairies SIMULINK.....	60
Tableau III.2 (rotation du rotor 40Hz) .....	61
Tableau III .3(rotation du rotor 43Hz).....	61
Tableau III.4 (vitesse de rotation rotorique 45.5Hz) .....	62
Tableau III.5 (vitesse de rotation 47Hz).....	63
Tableau III.6 (vitesse de rotation de rotor 54.3Hz).....	63

## Acronyme

BC (Before Christ)

HQ (hydro Québec)

CDER (centre de développement des énergies renouvelables)

GWEC le Global Wind Energy Council

EWEA (European Wind Energy Association)

EDF: électricité de France

GAC: génératrices asynchrones à cage

GSAP: génératrices synchrones a aimant permanent

MSAP: moteur synchrones a aimant permanent

GADA: génératrice asynchrone à double alimentation

GACE: Générateur asynchrone à cage d'écreuil

Ec: Énergie cinétique

$\rho$  : masse du volume d'air (en kg)

v : volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>)

m : masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>)

p: puissance récupérable (Watt)

m : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

$\rho_0$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

v : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m<sup>2</sup>)

V<sub>S</sub> : débit volumique d'air (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>f</sub> : vitesse du fluide au niveau de la turbine (en m/s)

$\rho$  : masse volumique de l'air

$S$  : surface projetée du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

$\eta$ : le rendement

$k$  : le facteur de forme de Weibull

$c$  : le facteur d'échelle de Weibull m/s

$S$ : le glissement (Slip)

$N_s$  : la vitesse de synchronisation

$P$  : le nombre de pôles

$\Phi$ : le flux

$\omega_{ss}$ : le vecteur flux propre produit dans les enroulements statoriques.

$L_{aa}L_{bb}L_{cc}$ : Inductances propres des enroulements statoriques.

$(\theta_r)$ : la position angulaire électrique

$\omega_s$ : Vecteur flux total des enroulements statoriques.

$\omega_{sf}$  : Amplitude du vecteur flux de l'aimant permanent.

$[i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]$ : vecteur courant des enroulements statoriques

$L_a$ : Inductance de fuite

$L_{aa0}$ : Inductance de magnétisation.

$L_{aa2}$  : Amplitude de première harmonique de l'inductance propre d'une phase

$Te$  : Couple électromagnétique de la machine ;

$Tm$ : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ;

$B$  : Coefficient de frottement visqueux ;

$J$ : Moment d'inertie total ramené sur l'arbre du rotor.

$P$  : Nombre de pôles.

$W_m$  : Vitesse mécanique du rotor.

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## **Introduction générale**

Actuellement, la demande en énergie électrique est en constante augmentation. Diverses centrales électriques conventionnelles (nucléaires, hydrauliques, thermiques) utilisent des sources fossiles et naturelles telles que : l'uranium, les hydrocarbures et l'eau.

Les centrales thermiques sont responsables du rejet des gaz atmosphériques. L'un des avantages de l'énergie nucléaire est qu'elle ne pollue pas l'environnement, ce qui est indéniable, mais il existe toujours un risque d'accident nucléaire. Parmi les vrais problèmes qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures, il y a la difficulté de traiter et d'enfouir ces déchets. Pour faire face à ces nombreux problèmes, divers pays à travers le monde se précipitent pour utiliser des sources d'énergie propres et renouvelables. Elle s'est en effet engagée, à moyen terme, à augmenter la part des énergies renouvelables dans sa production d'électricité.

L'énergie éolienne a le plus grand potentiel énergétique après l'hydroélectricité. La puissance des éoliennes installées dans le monde est en constante augmentation au fil des années.

En 1889, avec l'invention de la machine asynchrone, qui ne cesse de progresser, et qui occupe une place importante dans l'industrie de la conversion de puissance (près de 80%), de par sa solidité, sa grande fiabilité, sa quasi absence de maintenance, sa facilité de mise en œuvre, sa simplicité de construction et à faible coût.

Parmi les domaines d'utilisation large de cette machine, on peut citer : les moteurs électriques, divers domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse variable, et même dans des applications de haute précision telles que l'aéronautique et la robotique et dans certains mécanismes industriels de haute précision. Il peut également être utilisé dans des systèmes tels que les machines-outils et en particulier les éoliennes.

Cependant, une machine asynchrone, contrairement à une machine à courant continu et à une machine synchrone où les grandeurs sont séparées, reste fortement connectée. Pour effectuer une formation fiable, une parfaite connaissance de ses normes est nécessaire. Dans ce thème, s'inscrit notre travail du projet de fin d'études « Conception d'une machine asynchrone à cage pour l'utilisation dans un système éolienne ».

Pour bien présenter notre travail nous l'avons organisé comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est un aperçu général sur l'état de l'art des systèmes éoliens.
- ✓ Dans le deuxième chapitre nous exposons un rappel de la machine synchrone, particulièrement la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), et la machine asynchrone spécialement la machine asynchrone à cage d'écureuil.



- ✓ Le troisième chapitre est consacré à une étude pratique sur le EOLIENNE / EOLYP V1.1, qui a été réalisée dans le laboratoire d'énergie renouvelable dans le centre universitaire SALHI AHMED NAAMA
- ✓ Nous terminons le travail par une conclusion générale.

*Chapitre 01*  
*état de l'art*  
*des systèmes*  
*éoliens*

## I. Introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Les sources d'énergies renouvelables ont fait l'objet, au cours des dernières années, d'une attention accrue en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles, pour atténuer les effets des changements climatiques et pour répondre à la croissance globale des besoins énergétiques. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde.

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

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

Le présent chapitre entame des généralités sur l'état de l'art des systèmes éoliens, en traitant son historique, les chiffres clés de l'éolien dans le monde, le principe de fonctionnement d'une éolienne, la constitution d'une éolienne, schéma électrique d'un générateur éolien, comment

faire de l'électricité avec du vent ?, La puissance du vent, Les différents types d'éoliennes passant par le gisement éolien en Algérie sa carte des vents et le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama et nous concluons avec les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

## II. Etat de l'art des systèmes éoliens

### II.1 Historique [01]

**BC (Before Christ):** Première utilisation du vent par l'homme; par l'aération et le séchage

**4000 BC:** Découverte du bateau à voile; exploration du monde, développement du commerce en facilitant les échanges mondiaux.

**600 BC:** Invention du moulin à vent en Iran (Perse ou Égypte ancienne).

**6<sup>ème</sup> siècle:** Généralisation du moulin à vent en Europe

**12<sup>ème</sup> siècle:** Moulin à vent servant à pomper l'eau, moudre le grain, produire de l'huile végétale.

**12<sup>ème</sup> -18<sup>ème</sup> siècle:** Amélioration continue des modèles existants, meilleure portance aérodynamique.

Apparition des turbines éoliennes au Canada au 18<sup>ème</sup> siècle.

**1800 :** "American water pumping windmills" pour pomper l'eau des puits sur les ranchs américain;

**1887-1888:** L'américain Charles F. Brush, construit la première éolienne entièrement automatisée qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filaments, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs, haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 KW.

**Jusqu'en 1920:** la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.

**1939:** L'éolienne Smith-Putnam fut la première éolienne au monde de la taille de 1 MW. Construite en 1939 et connectée au réseau en 1941. Dans Castleton, Vermont (une ville de la Nouvelle-Angleterre); dont les caractéristiques suivantes:

- 1,25 MW, 53 m diamètre, 36 m hauteur;
- Pales de 2,4 m x 20 m, 8 tonnes;
- Surface en inox;
- 1100 heures avant la rupture d'une aube en un point faible connu, qui n'avait pas été renforcé en raison des pénuries de matériaux en temps de guerre.

---

1. Daniel R. Rouse /Énergies renouvelables/L'énergie éolienne/19/10/2019//http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1251

- Plus grande éolienne jamais construite jusqu'en 1979.

**20 siècle:** Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'évolution des pales commence lorsque plusieurs ingénieurs (en aéronautique) cherchent une amélioration de l'efficacité, de la portance, de la production.

**1955:** Éolienne expérimentale de 800 KVA installée en France de 1955 à 1963

**1971:** Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance de 5MW

**1973:** Crise pétrolière, plusieurs pays financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables.

**1988:** Au Québec –Cap-Chat : «Éole» diamètre = 64 m, longueur de corde = 2,4 m, puissance= 4 Mw. La plus grande au monde à son époque

**2008:** ENERCONE-126: diamètre = 127 m, hauteur = 135 m, puissance = 7,5 MW

**2001:** Au Québec; plan HQ (hydro Québec)

- ✓ 2002-2006: 100 MW / an
- ✓ 2001 à 2004: 500 MW
- ✓ 2012: Puissance 1348 MW (13 parcs opérationnels, 20 parcs en construction ou autorisation, 40 parcs en projets.

**2012:** C'est au Royaume-Uni que le plus important parc éolien en mer installé dans le monde était situé, avec 175 éoliennes implanté à plus de 20 km des côtes sud-est du pays (entre Kent et Essex) London Array, inauguré le 4 juillet 2012 avec puissance de 630 MW installés.

## II.2 Estimation des ressources éoliennes en Algérie

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (centre de développement des énergies renouvelables) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes : [02]

- Deux zones sur le littoral
- Trois zones sur les hauts plateaux
- Quatre zones en sites sahariens.

Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

---

[02]: Dr Nachida Kasbadji Merzouk Directrice de Recherche/Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?/le 1er séminaire méditerranéenne sur l'énergie éolienne/ 10 et 11 avril 2010 /pdf [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_014\\_04.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_014_04.pdf)

Les trois régions situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWH/an.

En effet, Le climat saharien possède des caractéristiques climatiques propres telles que les températures élevées et les tempêtes de sable qui sont en phase avec l'augmentation de la vitesse du vent.

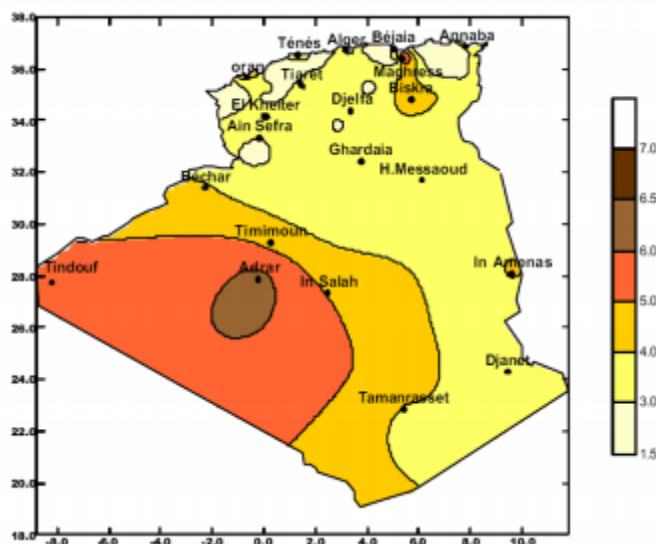


Fig I.1: Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s)

### II.3 Gisement éolien en Algérie

En Algérie [03], la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes.

[03] Lakhdar Walid ARABI, Samia SAÏDI , Pr Chems Eddine Chitour/Thème : De la Bougie à l'Electricité Durable : les Défis de 2030/Sujet : Le Souffle d'Eole pour produire de l'électricité /16ème journée de l'énergie, 50ème Anniversaire de l'Indépendance Centre de conférences SONELGAZ, 16 Avril 2012  
<https://developpementhumaindurablealgerie.files.wordpress.com/2016/03/exposc3a9-11.pdf>

Mais après le premier choc pétrolier, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. En ce qui concerne le pompage de l'eau, La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.

#### II.4 Le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama:

D'après le météo la moyenne de la vitesse du vent dans les dernières dis ans dans la wilaya de naama est indiqué dans le tableau suivant:

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	decembre
Vitesse du vent	1.4	1.5	1.8	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4

Tableau I.1 vitesse du vent dans la wilaya de naama

#### II.5 Chiffres clés de l'éolien dans le monde

D'après le Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité installée du parc éolien mondial a été multipliée par 3 entre fin 2007 et fin 2012. [04]

En 2012, elle atteint près de 282 GW, l'équivalent de la puissance cumulée de près de 280 réacteurs nucléaires. Près de 44,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde. L'éolien a produit près de 460 TWh en 2011, soit approximativement 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde. Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien qui va atteindre environ 3 000 TWh à l'horizon de 2020.

[04]: L'éolien en Europe et dans le monde en 2017 /<https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>

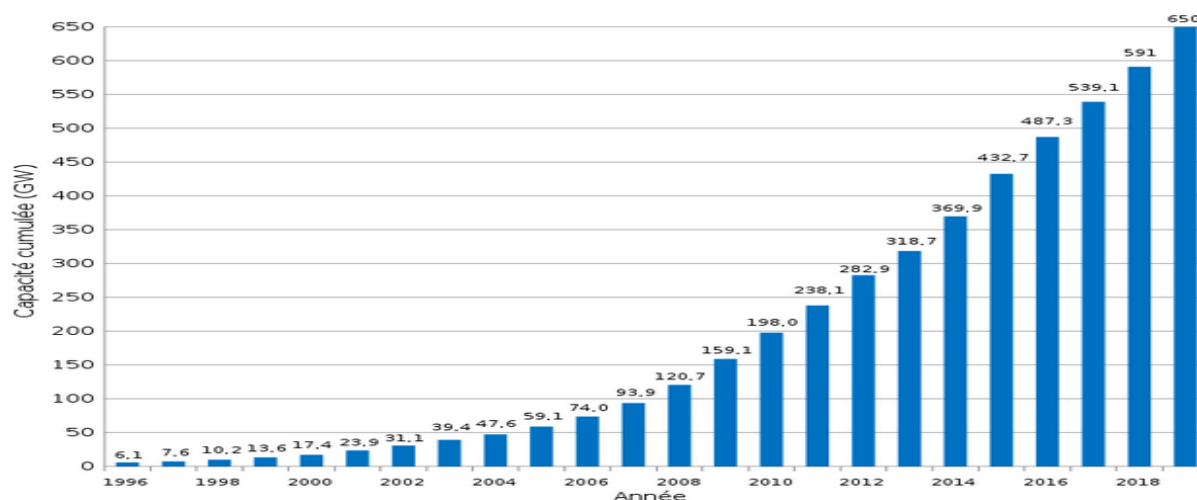


Fig I.2: Capacité éolienne de 1996 à 2018 dans le monde (donnée GWEC)

Actuellement, environ 75 pays dans le monde possèdent des installations éoliennes d'ordre commerciales, dont 22 dépassent déjà le seuil de 1 GW. De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États-Unis par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques émergentes, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir lourdement dans l'énergie éolienne.

De nouvelles fermes éoliennes en mer (éolien offshore) sont envisagées partout dans le monde. Le Danemark est l'un des acteurs les plus importants, avec son laboratoire très renommé ; le pays produit environ 20 % de son électricité avec des éoliennes. Ces dernières produisent 2 % de la production de l'électricité dans le monde. La taille la plus rentable et la plus pratique pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être autour de 600 kW à 3 MW, groupées dans de grandes fermes éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de «puissance rentable ».

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90.

Les perspectives sont toutes spectaculaires. EWEA est l'acronyme pour Européenne Wind Energy Association, l'Association Européenne de l'Energie Eolienne estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% pour 2040.



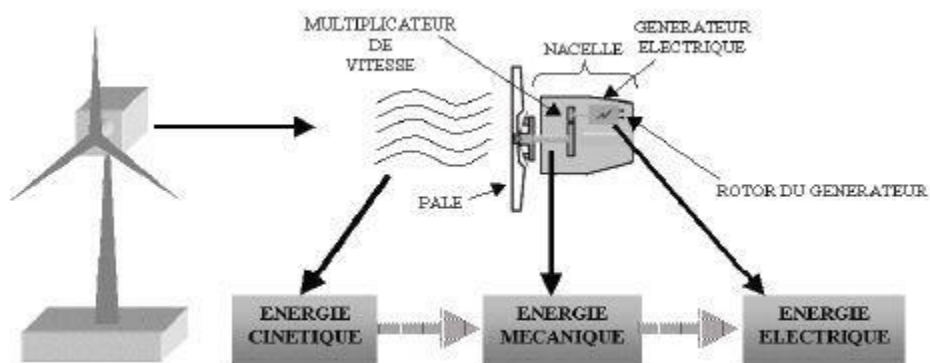


Fig I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [04]

### III. Système éolienne

#### III.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [05]

Les pales de l'éolienne balayent le champ des vitesses du vent qui varie dans le temps et autour du disque rotorique, modifiant ainsi localement la pression et la vitesse de l'air.

Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

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 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur.

[05]: Guediri, Abdel Karim (2017) Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/3959>

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 en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

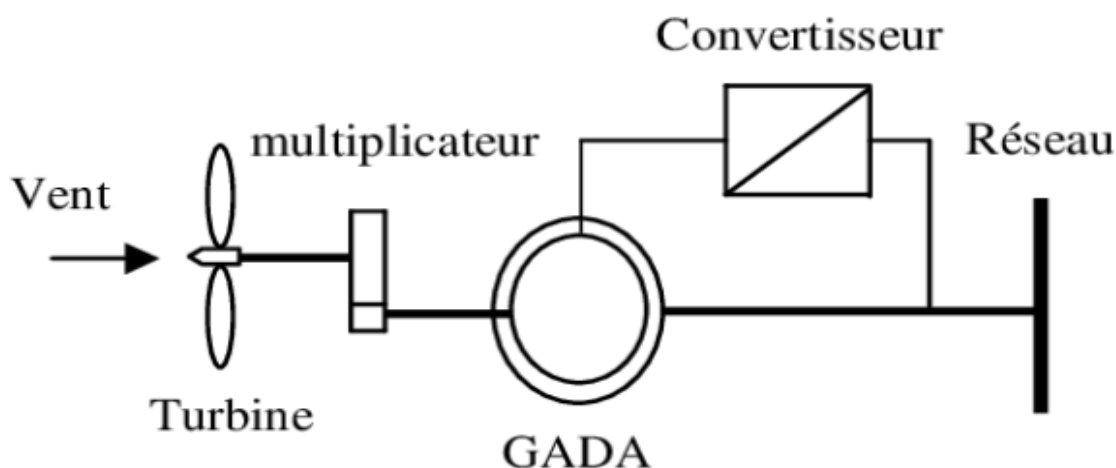


Fig I.4: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Sur la figure I.4 la turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, mais seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'éolienne.

### III.2 Constitution d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes comme illustre la figure I.5: [06]

\***Le mat** : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

---

[06]:MOKRANE SMAILI /MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION/ <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/572/1/Mokrane-Smaili.pdf>

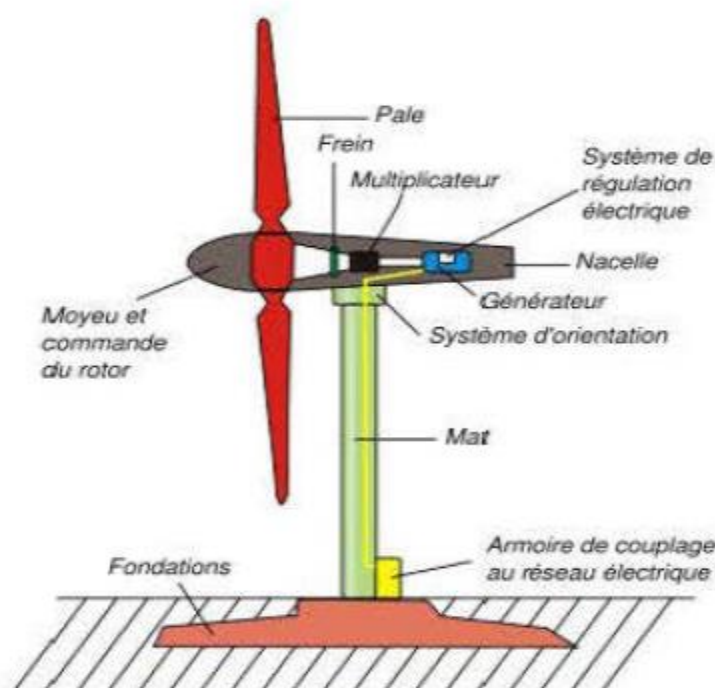


Fig I.5: Constitution d'une centrale éolienne.

**\*Les pales** : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient 10% en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires

**\*La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.

**\*La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne.

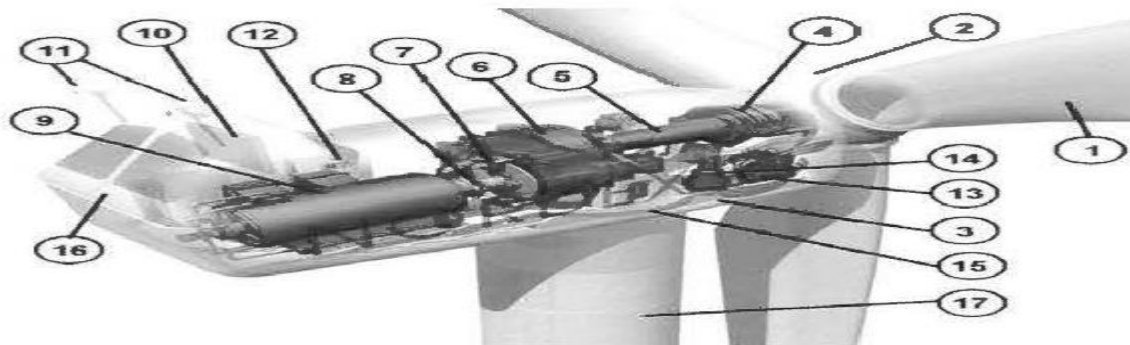


Fig I.6: Constitution de la nacelle

N	Composant
01	- Pales
02	- Moyeu rotor
03	-Nacelle
04	-Cardan
05	- Transmission
06	-Multiplieur de vitesse
07	-Frein à disque
08	- Accouplement
09	-Génératrice
10	-Radiateur de refroidissement
11	-Centrale de mesures du vent
12	-Contrôle
13	-Centrale hydraulique
14	-Mécanisme d'orientation face au vent
15	-Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
16	-Capot
17	-Tour

Tableau I.2 Constitution de la nacelle

### III.3 Caractéristiques d'une éolienne (aérogénérateur)

La principale caractéristique technique d'une éolienne est sa puissance de production, exprimée en Kilowatts (kW). La puissance d'une éolienne (en kW, kilowatts) mesure sa capacité de production d'électricité. C'est une caractéristique technique qui ne dépend que

de l'éolienne en elle-même, et non de l'endroit où elle est posée. Autrement dit, une éolienne de 1 kW de puissance ne pourra pas fournir plus d'énergie en 1 heure qu'1 kWh même si elle est alimentée en vent par un ouragan. [07]

### III.4 Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie

L'installation électrique d'une éolienne peut-être schématisée simplement. L'infographie suivante représente les éléments importants permettant de passer d'un courant alternatif « sale » à un courant électrique de fréquence et de tension stable utilisable par nos appareils électriques. [08]

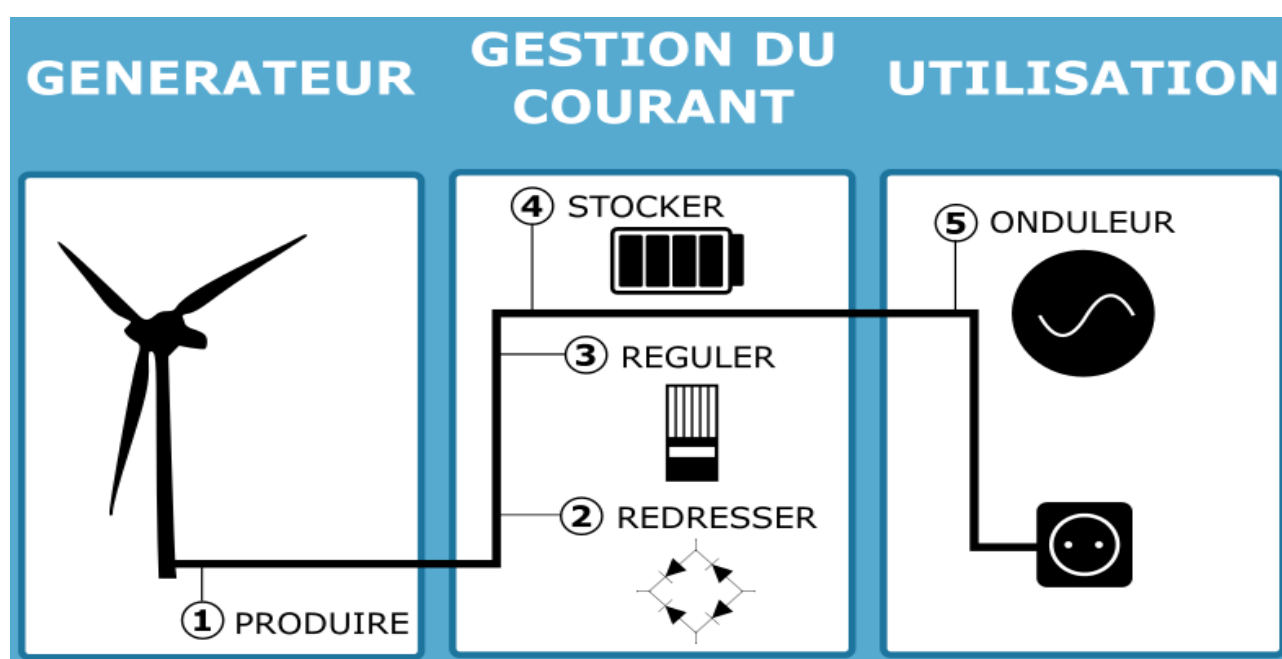


Fig I.7: Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie

#### 1) Production du courant

La production du courant se fait via l'éolienne grâce au générateur. C'est un courant alternatif mais celui-ci ne peut pas être utilisé tel quel. En effet, bien que les appareils électriques fonctionnent avec du courant alternatif, ceux-ci requièrent une fréquence et une tension stables au risque d'être dégradés instantanément, et le courant directement produit par l'éolienne ne possède pas ces caractéristiques.

[07]:Eolienne domestique Technique /<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique>

[08]: 2021 Fabriquer Eolienne/expériences et tutoriels de fabrication autour de l'auto-construction d'éoliennes pour produire soi-même du courant électrique/ <http://www.fabriquer-eolienne.com/installation-electrique-eolienne-infographie/>

on dit qu'il s'agit d'un courant « sale » car sa fréquence et sa tension sont très variables au court du temps et en plus n'est produit que de façon intermittente car dépendante du vent, C'est pourquoi il faut passer par une série d'étapes permettant de rendre ce courant propre et utilisable par nos appareils.

## **2) Redresser le courant**

La première étape consiste à redresser le courant. Pour cela on utilise un pont de diodes qui va permettre de passer du courant alternatif au courant continu. Mais attention, ce courant bien qu'appelé continu, ne possède pas une tension stable.

## **3) Réguler le courant**

Le régulateur ou contrôleur de charge a deux fonctions. D'une part il va lisser le signal du courant, c'est à dire qu'il va permettre d'obtenir un courant continu de tension plus stable, les pics de tensions venant compenser les creux. Et d'autre part il va dissiper le courant superflu pour fournir un courant de sortie ne dépassant pas une tension voulue. A partir de ce moment, nous obtenons un courant continu propre cependant, en cas de ralentissement ou d'arrêt de l'éolienne, la tension chutera et nous n'aurons plus de courant.

## **4) Stocker le courant**

Cette étape permet de pallier au problème cité juste au-dessus. Quand l'éolienne produit du courant, le surplus est stocké dans des batteries d'accumulateurs et sera restitué lorsque l'éolienne ne produira pas suffisamment pour alimenter l'installation.

## **5) Onduleur**

L'onduleur est l'appareil qui permet de passer du courant continu au courant alternatif tout en étant capable de changer la tension. Cette étape permet donc d'exploiter notre courant par des appareils qui fonctionnent avec le courant.

Pourtant, il est possible de se passer de l'onduleur si l'on souhaite uniquement utiliser le courant continu. En effet, notre installation sans onduleur permet déjà d'exploiter notre courant en utilisant des appareils adaptés à la tension comme des lampes, des chargeurs par exemple de téléphones portables, etc...

## IV. Critères de choix de sites éoliens

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc. [09]

Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes :

1. site venté
2. peu de turbulences
3. une bonne facilité d'accès
4. proche du réseau électrique

### IV.1 Comment faire de l'électricité avec du vent ?

On utilise un aérogénérateur, plus communément appelé « éolienne ». Son fonctionnement est simple et s'inspire des moulins à vent. [09]

La machine se compose de trois pales (en général) portées par un moyeu constituant le rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter le rotor afin qu'il soit toujours face au vent.

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) en énergie mécanique (mouvement mécanique des pales). Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales dépend de leur taille: plus elles sont grandes, moins elles tournent rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement de l'arbre lent de transmission, couplé aux pales, à l'arbre rapide couplé à la génératrice. L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, et sa tension est augmentée à 20 000 volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut être distribuée aux consommateurs.

---

[09]: Parc éolien/Critères de choix de sites éoliens

[/https://eolienne.f4jr.org/parc\\_eolien#criteres\\_de\\_choix\\_de\\_sites\\_eoliens](https://eolienne.f4jr.org/parc_eolien#criteres_de_choix_de_sites_eoliens)



## IV.2 D'où vient le vent ?

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent. [10]

## IV.3 Énergie fournie par le vent

### IV.3.1 Énergie cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique, elle est en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse : [11]

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1.1)$$

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E<sub>c</sub> : énergie cinétique (en joules)

### IV.3.2 La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air possède une masse volumique d'environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la masse volumique de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$m = \rho * v \quad (1.2)$$

ρ : masse du volume d'air (en kg)

v : volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>)

m : masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>)

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

---

[10]: EOL 87/L'énergie éolienne/ <http://eol87.fr/lenergie-eolienne/>

### IV.3.3 Énergie théoriquement récupérable

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface  $S$  et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égal à  $V_s$ . [11]

### IV.3.4 Puissance théoriquement récupérable

$$p = EC/S = 1/2 * m * v^2 = 1/2 * \rho_0 * v * S * V_S^2 \quad (1.3)$$

$p$ : puissance récupérable (Watt)

$m$  : débit massique du volume d'air traversant la surface  $S$  en 1 seconde (kg/s)

$\rho_0$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

$S$  : surface du dispositif de récupération (m<sup>2</sup>)

$V_s$  : débit volumique d'air (m<sup>3</sup>/s)

Ce qui revient à la formule qui suit.

### IV.3.5 Puissance récupérable

Puissance du vent contenue dans un cylindre de section

$$P_{\text{cinétique}} = 1/2 * \rho * a * S * V^3 \quad (1.4)$$

$V_{\text{turbine}} = a * V_f$ :

$V_f$  : vitesse du fluide au niveau de la turbine (en m/s)

$\rho$  : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

$S$  : surface projetée du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

Cette puissance (en Watt) est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

## IV.4 Les éoliennes détournent le vent

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent, en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent (voir loi de Betz).

---

[11]: Étude théorique d'une éolienne/ [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)

Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

#### IV.4.1 Variation de la masse volumique de l'air

La masse volumique ( $\rho$ ) varie avec différents paramètres :

**L'altitude (pression de l'air) :** plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent

**La température :** plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible

**L'humidité relative de l'air :** plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera faible mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible

#### IV.5 Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho S V^3 \quad (1.5)$$

$$\text{Avec } P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \text{ lorsque } V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (1.6)$$

$\rho$ : masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression

$S$  : surface du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

$V$  : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à 16/27, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Dans le cas d'une hélice de diamètre  $D$ , la limite de Betz est égale à :

$$P=0.37*\pi/4*D^2*V^3 \quad (1.7)$$

$$P=0.29*D^2*V^3 \quad (1.8)$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au carré des dimensions du rotor, et au cube de la vitesse du vent

La courbe suivante pour une hélice de diamètre  $D = 1\text{m}$ .

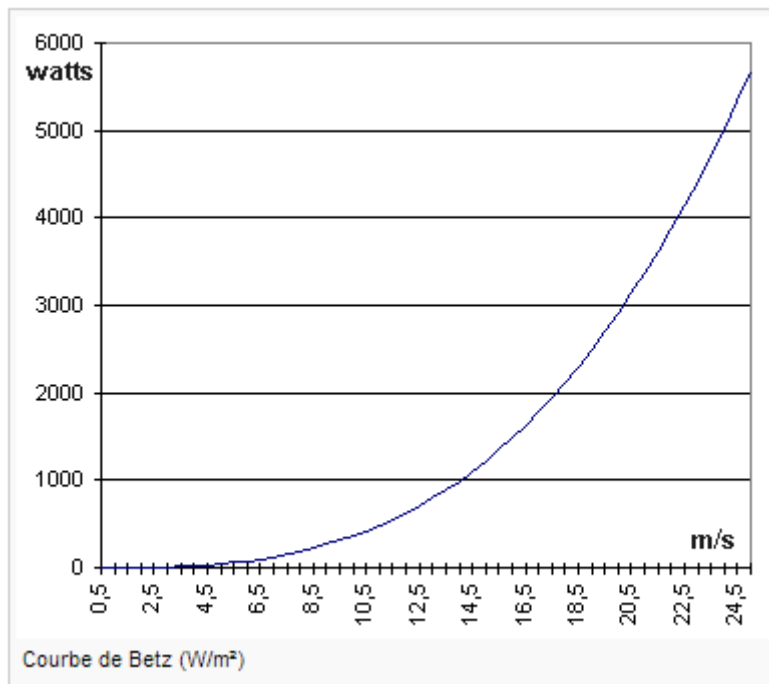


Fig I.8: Limite de Betz

#### IV.5.1 Rendements

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertie d'une forme à une autre, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- $0.20 < \eta < 0.85$
- Le multiplicateur ou le réducteur :  $0.7 < \eta < 0.98$
- L'alternateur ou la génératrice continue :  $0.8 < \eta < 0.98$
- Le transformateur :  $0.85 < \eta < 0.98$
- Le redresseur :  $0.9 < \eta < 0.98$
- Les batteries :  $0.7 < \eta < 0.8$
- Les pertes de lignes :  $0.9 < \eta < 0.99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.

#### IV.5.2 Le potentiel éolien

Le potentiel éolien théorique mondial est de  $10^6$  TWh/an. La production mondiale (2011) s'élève à 460TWh/an. La consommation mondiale d'électricité (2011) est de 20 000 TWh/an.

### IV.6 La distribution de Weibull

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull. C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du vent. Ce modèle permet d'optimiser la conception des éoliennes pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité.

Le coefficient de Weibull traduit la distribution des vitesses du vent et est déterminé par la courbe de distribution Weibull. Pour un facteur de forme égale 2 on parle de la distribution de Rayleigh

#### IV.6.1 Construction

On mesure la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes au moyen d'un anémomètre. Les valeurs obtenues sont alors réparties en différentes vitesses de vent. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse.

#### IV.6.2 Fonction de probabilité de densité de Weibull

$$F(v)=(k/c)*(v/c)^{(k-1)}*\exp*[-(v/c)]^k \quad (1.7)$$

$$F(v)=k/c^{-k} *v^{k-1}*\exp^{-(v/c]k} \quad (1.8)$$

La fonction de probabilité de densité de Weibull est destinée à refléter la probabilité qu'un événement se produise entre deux points. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent supérieures à zéro sera égale à la probabilité que le vent souffle quelque part entre ces deux vitesses. Sur la courbe de puissance ci-contre, nous pouvons déterminer les constantes des paramètres de Weibull :

**k** est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de la distribution et prend une valeur comprise entre 1 et 3. Plus la valeur est faible et plus la vitesse du vent est variable tandis-qu'une valeur de k élevée indique une vitesse de vent constante.

**c** est le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. **c** est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

## IV.7 La distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2. Les fabricants fournissent souvent les calculs de performance en utilisant la distribution de Rayleigh.

$$F(v)=2*(v/c^2)*\exp[-(v/c)]^2 \quad (1.9)$$

### IV.7.1 La puissance moyenne

La puissance moyenne du vent est déterminée grâce à la distribution de Weibull, connaître la vitesse moyenne du vent ne suffit pas à calculer la puissance moyenne. Il faudra prendre en compte la probabilité de l'occurrence de chaque vitesse de vent et la puissance correspondante, car la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. Les vents forts contenant le plus d'énergie influenceront d'autant plus sur la puissance moyenne, bien qu'ils aient une faible probabilité.

### IV.7.2 La puissance du vent

En multipliant la puissance de chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon la répartition de Weibull, nous pouvons calculer la distribution de l'énergie éolienne (en kWh/m<sup>2</sup>/an ou en W/m<sup>2</sup>) à des vitesses de vent différentes, cette distribution est appelée la densité de puissance.

## VI. Les différents types d'éolienne

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [11].

### VI.1 L'éolienne verticale : principe et fonctionnement

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus légère. Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

- **L'éolienne Darrieus** L'éolienne Darrieus est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché.

L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

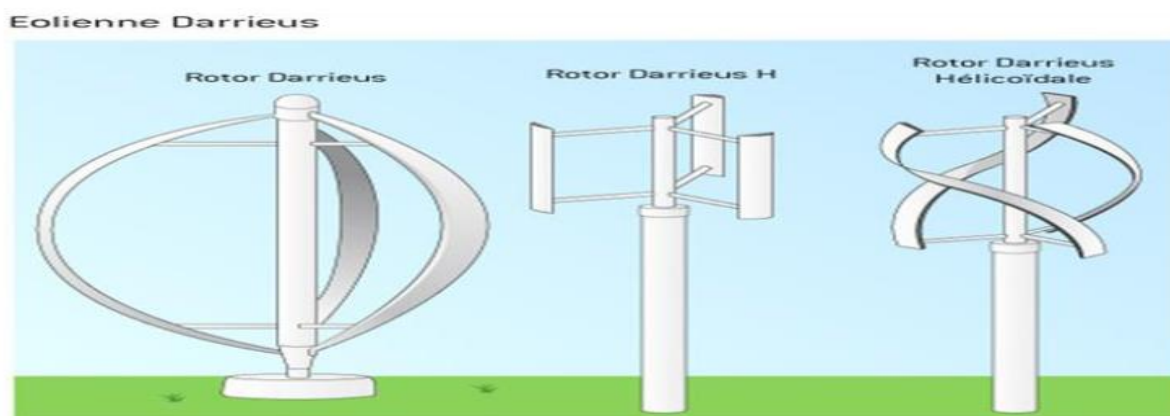


Fig I.9: Éoliennes type Darrieus

- **L'éolienne Savonius** Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, l'éolienne Savonius peut très bien fonctionner avec de très faibles vents, ce qui n'est pas le cas avec l'éolienne Darrieus.

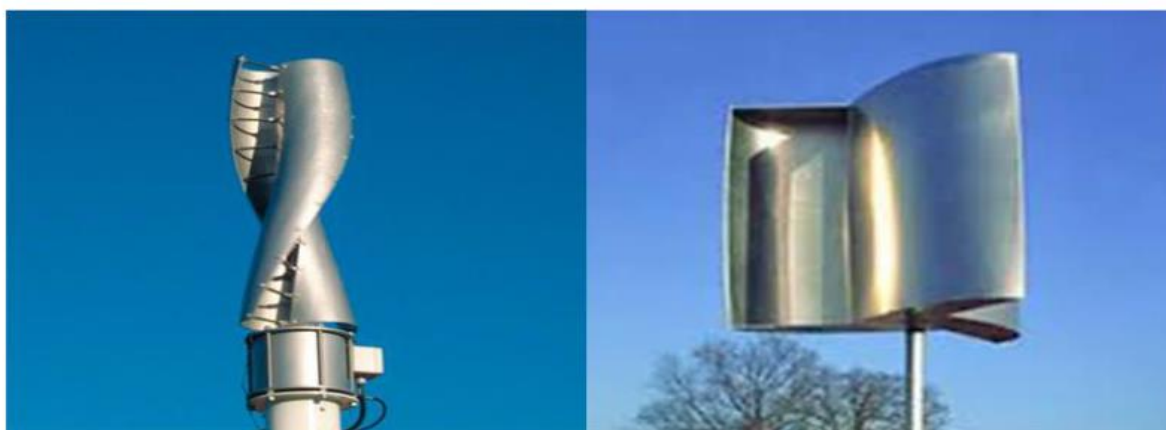


Fig I.10: Éolienne type Savonius

- **L'éolienne à voile tournante** inventée par Pierre Dieudonné en 2006, consiste en quatre pales verticales reliées à des bras horizontaux. L'ensemble pivote sous l'effet du vent et, à la manière d'une voile de bateau, s'adapte à son orientation. L'éolienne à

voilure tournante présente des pales qui s'orientent constamment par rapport à la direction du vent et ont, de ce fait, une grande efficacité et un meilleur rendement. Ce fonctionnement réduit aussi considérablement les nuisances sonores, tout en offrant un modèle peu encombrant. Toutefois, elle ne bénéficie pas de protection contre les tempêtes et nécessite une girouette pour être actionnée.



Fig I.11: L'éolienne à voilure tournante

## VI.2 L'éolienne horizontale : principe et fonctionnement

L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus « classique », celui que l'on aperçoit le plus souvent au bord des routes et qui incarne parfaitement l'image de cette énergie renouvelable. Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pâles tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne. Dans ce type d'éolienne, la force des hélices en rotation permet d'actionner un générateur qui est situé sur le haut de l'éolienne. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pâles en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. L'inconvénient principal de ces éoliennes est le bruit qu'elles engendrent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât est à prendre en compte au moment d'opter pour ce mécanisme.



Fig I.12 : Éolienne à axe horizontal



Le tableau ci-dessous détaille chacune de ces caractéristiques selon le modèle, horizontal ou vertical, de l'éolienne.[12]

Eolien domestique		Rendement	Force de vent	Résistance aux vents violents	Installation sur le bâti	Zone
Éolienne horizontale		Bon: entre 100W et 20kW selon le modèle	Élevée	Faible: nécessite l'installation de freins et d'un mât haubané	sauf très petite (éolienne), car elle crée des vibrations	Zone dégagée
Éolienne verticale	Modèle Darrieus	Moyen: au maximum 10kWh, mais peut être amélioré grâce à un démultiplicateur	Moyenne, à cause du poids du rotor	Bonne	✓	Zone dégagée ou urbaine
	Modèle Savonius	Bon, sur le moyen terme	Faible	Bonne	sous réserve que la toiture puisse soutenir le poids de l'éolienne	Zone dégagée ou urbaine, ou installation moins haute
	Modèle à voile (à voilure tournante)	Bon	Faible	Bonne	taille réduite	Zone dégagée ou urbaine

Tableau I.3 caractéristiques des éoliennes horizontales et verticale

[12]: total énergies/ quels sont les différents types d'éolienne <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes>

## VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après. [13]

### VII.1 Avantages

1- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

\* L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

2- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub>:

\* L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

\* Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Nox. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.

3- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

---

[13]: Le guide de l'éolienne/Le guide de l'éolienne/<https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/eolien/le-guide-de-l-eolienne-ooreka.pdf>

- 4- 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.
- 5- 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.
- 6- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- 7- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- 8- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- 9- ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- 10- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- 11- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- 12- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours.

## VII.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

1. L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
2. Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
3. L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

4. La qualité de la puissance électrique : 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.
5. Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

## VIII. Conclusion

Le fort mouvement actuel en faveur des énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne permet aujourd'hui au consommateur de pouvoir bénéficier d'une énergie renouvelable au meilleur tarif. En effet, grâce au panachage des sources de production, entre solaire, hydraulique ou éolien, les fournisseurs d'énergie ont aujourd'hui accès à une réelle quantité d'énergie verte disponible.

*Chapitre 02*  
*état de l'art des*  
*génératrices*  
*utilisées dans les*  
*systèmes éoliens*

## I. Introduction

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie, dans le cas d'une éolienne ce sera l'énergie mécanique transmise par le rotor à partir de l'énergie cinétique du vent.

Par définition, un alternateur est un "moteur" synchrone utilisé en génératrice. C'est une machine constituée d'un rotor ; (partie mobile) et d'un stator (partie fixe) générant un courant alternatif. Le rotor est constitué d'aimants permanents ou de bobinages.

Pour des raisons de coût et de rendement, l'alternateur est désormais utilisé dans la majorité des éoliennes. L'alternateur peut être une machine synchrone ou asynchrone, utilisée en vitesse fixe ou en vitesse variable.

Le suivant chapitre est organisé en trois parties:

1. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones à cage (GAC)
2. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones a aimant permanent (GSAP)
3. Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

## II. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones

### II.1 Définition

La machine asynchrone connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique et un dispositif mécanique. [14]

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse:

---

[14]: Pr. BENAMROUCHE Nacereddine/IDENTIFICATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL/2011-2012/  
[https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8558/LouniAmar\\_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8558/LouniAmar_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- en fonctionnement « moteur », dans deux quadrants du plan couple-vitesse, l'énergie électrique apportée par la source est transformée en énergie mécanique vers la charge.
- en fonctionnement « générateur », dans les deux autres quadrants, l'énergie mécanique de la charge est transformée en énergie électrique vers la source (la machine se comporte comme un frein).

Comme ce fonctionnement est sans discontinuité et ne dépend pas de la machine elle-même mais de l'ensemble source d'alimentation/machine/charge, la distinction moteur/générateur est « communément » faite par rapport à la finalité d'usage de la machine. C'est ainsi que dans le langage commun l'utilisation de « moteur asynchrone » pour désigner cette machine est fréquent.

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs :

- en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets ;
- pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur la machine asynchrone en avril 1888;
- en 1889, Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente la première machine asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construite industriellement à partir de 1891.

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot.

## II.2 Constitution d'un moteur asynchrone:

Un moteur asynchrone comporte deux parties principales : un stator ou inducteur et un rotor ou induit séparés par un entrefer de faible épaisseur. [15]

**a. Stator (inducteur):** Le stator de la machine asynchrone est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer un champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes des bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique



Fig II.1: Stator d'un moteur asynchrone

**b. Rotor (Induit)** C'est l'élément mobile du moteur. Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone peut être de deux types : bobiné ou à cage d'écureuil.

---

[15]: METROUH Mohamed MOUSSI Rafik/Identification d'une machine asynchrone à

Cage/ 11 juillet 2017/ [https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8588/MetrouhMohamed\\_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8588/MetrouhMohamed_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



**Le rotor bobiné** : est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans leurs encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors accessibles grâce à un système de bague- balais positionné sur l'arbre de la machine.

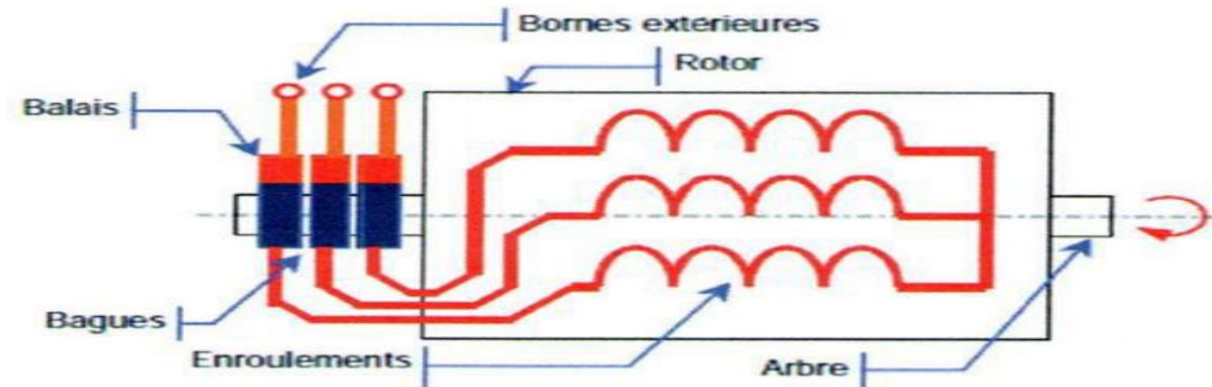


Fig II.2: rotor bobiné

**Le rotor à cage** : est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

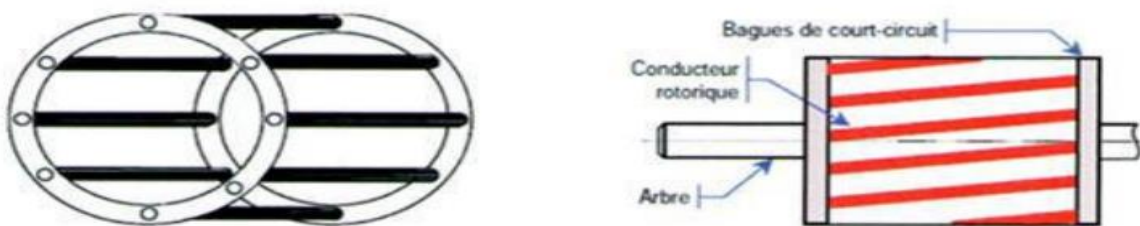


Fig II.3: rotor à cage d'écureuil

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Le rotor à cage d'écureuil peut aussi être considéré comme un enroulement polyphasé fermé.

**II.3 Les organes mécaniques:** permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur le quel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réductances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulement pour les machines de petite et moyenne puissance.

#### **II.4 Les types de moteur asynchrone:**

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor, dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même : il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse. Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine. [16]

#### **II.5 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE)**

La cage d'écureuil est un enroulement dans sa forme la plus simple. Au moment de la mise en circuit, un champ tournant est généré dans le stator. Le rotor à l'arrêt est traversé par le champ tournant, engendrant dans la cage d'écureuil une tension d'induction en raison du changement de flux. [17]

---

[16] Maxime DESSOUDE/Différents types de moteurs asynchrones Moteurs asynchrones - Choix et problèmes connexes/10 juin 1996

/ <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/moteurs-asynchrones-d3490/differents-types-de-moteurs-asynchrones-d3490niv10002.html>

[17] : Daniel FODOREAN /Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) /19/11/2009/<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/dimensionnement-rapide-des-machines-synchrones-a-aimants-permanents-msap-d3554/>

Le courant d'induction dans la cage d'écuréuil génère à son tour un champ magnétique autour des barres du rotor. Celui-ci est orienté de sorte qu'il souhaite bloquer le champ tournant. Mais comme le rotor peut tourner, il est entraîné par le champ tournant du stator. Le champ tournant génère donc un couple de rotation qui agit sur le rotor.

Plus le régime du rotor augmente, plus le rotor se rapproche du régime du champ tournant. La vitesse de changement de flux diminue, ainsi que la tension qui est induite dans l'enroulement rotorique. De ce fait, le couple, qui entraîne le rotor, diminue également. Si le régime du rotor atteignait la valeur du champ tournant, il n'y aurait aucun autre changement de flux dans le rotor. La tension d'induction et le courant d'induction dans le rotor ainsi que le couple seraient alors nuls. Le moteur serait à l'arrêt. C'est pourquoi le régime du rotor n'est toujours inférieur à la valeur du champ tournant  $n_s$ . La différence entre  $n$  et  $n_s$  est le régime de glissement  $\Delta n$ .

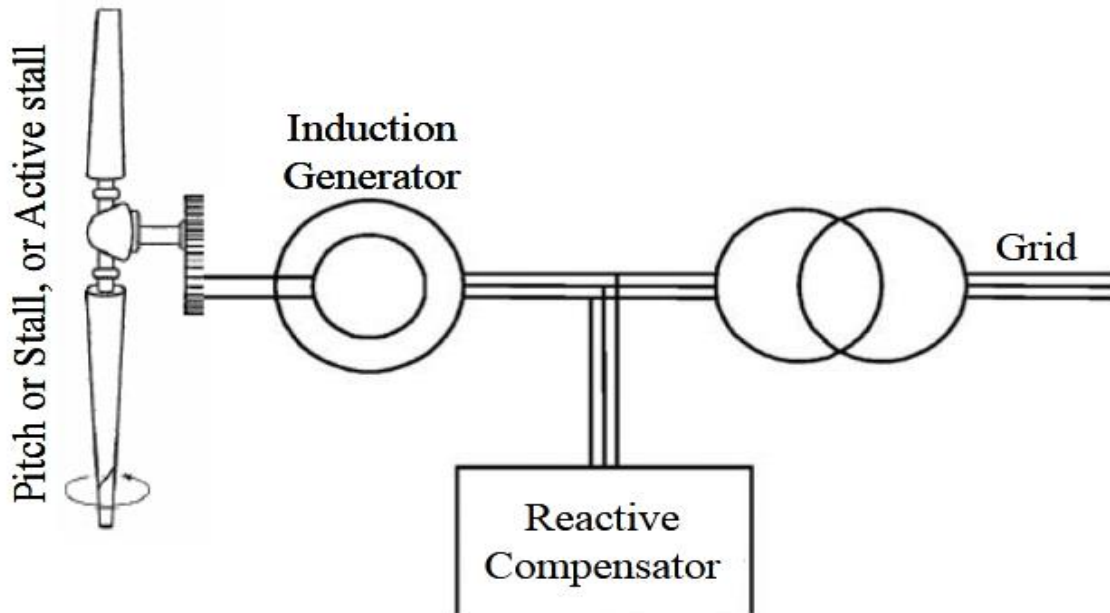


Fig II. 4: Schéma d'un système de production éolienne avec GACE.

La figure II.4 représente la courbe typique de couple-vitesse. La différence entre la vitesse de synchronisme  $N_s$  et la vitesse du rotor  $N_r$  est nommée glissement du moteur. Ainsi, le glissement (Slip) est donné par:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.1)$$

La vitesse de synchronisme du moteur à induction est donnée par:

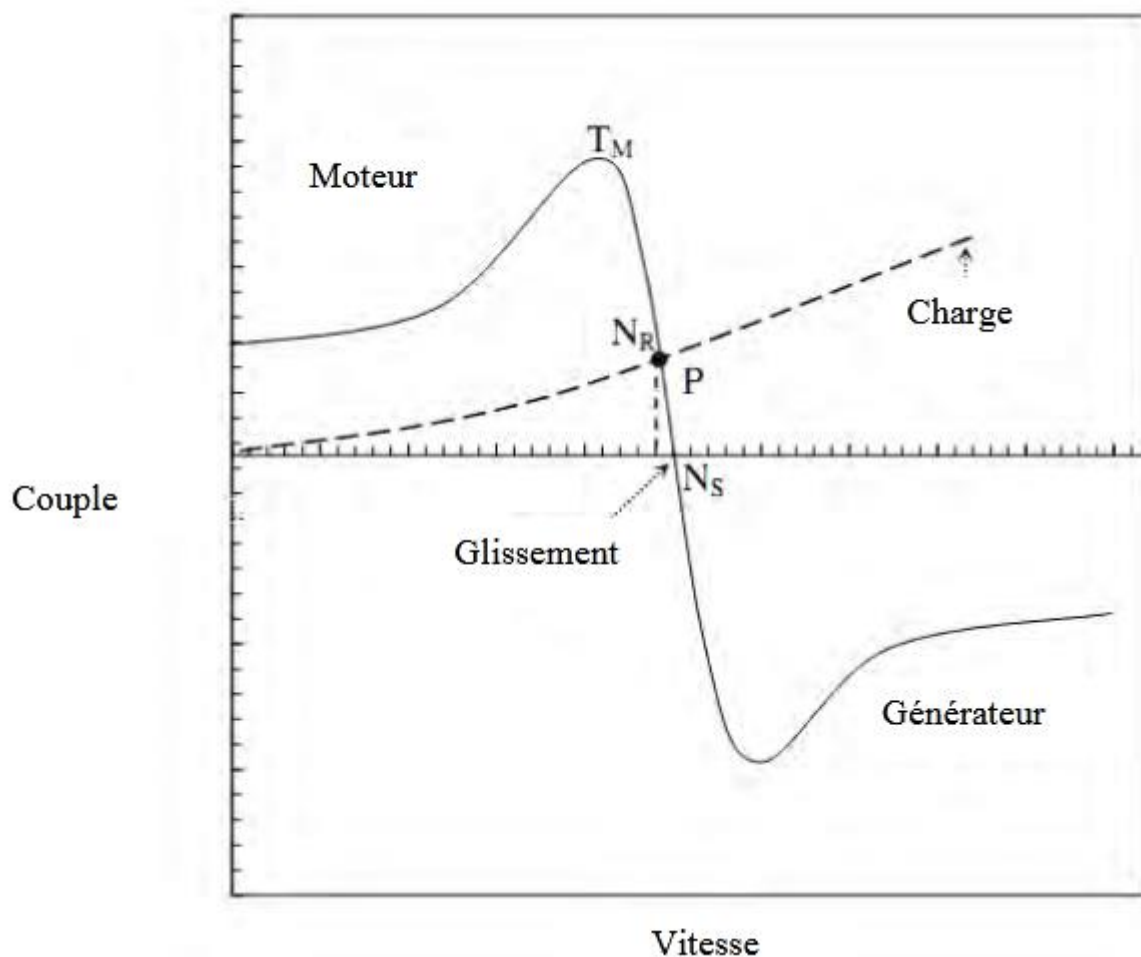
$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Où:  $f$  est la fréquence

$P$  est le nombre de pôles.

Quand on couple cette machine avec un réseau d'éolienne intégrée, initialement, il absorbe le courant à partir de réseau dans le cas d'un moteur. La vitesse augmente et la rotation de l'éolienne provoque le système à dépasser la vitesse de synchronisme  $N_s$ .

Ainsi, le rotor tournera plus vite que le champ magnétique tournant à  $N_s$  d'où inversion du couple qui devient négatif comme indiqué dans la Figure 2.5 Le courant circulera en sens inverse depuis le système vers le réseau et la machine fonctionnera en générateur



FigII.5- Caractéristiques d'une machine à induction typique.



Fig II.6 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne

## II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage

Après l'application de la transformation de Park aux équations des tensions des flux, le repère choisi est de champ tournant. [18]

### II.6.1 Equation de tension:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & \omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} \\ L_m \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_r \\ (\omega_s - \omega_r) L_m & L_m \frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

### II.6.2 Equation de flux:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le modèle de la machine asynchrone développé sous la forme d'équation d'état est:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (2.5)$$

$$\text{Ou } A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$x = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Phi_{L_s}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Phi_{L_s}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

## II.7 schéma bloc de simulation:

$$A = A1 + A2 + A3 \quad (2.8)$$

$$\frac{dx}{dt} = A_1 x + A_2 x + A_3 x + Bu \quad (2.9)$$

$$A1 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} & 0 \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & 0 & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (1-\sigma) \\ 0 & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} & \sigma L_m \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega_r; A3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} (\omega_s - \omega_r) \quad (2.11)$$

$$\frac{dx}{dt} = A_1 x + A_2 x \omega_r + A_3 x (\omega_s - \omega_r) + Bu \quad (2.12)$$

### II.7.1 Equation mécanique

$$J = \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_r \quad (2.13)$$

Tel que le couple peut prendre toute une nuance de formule:

$$C_{em} = \frac{P L_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (2.14)$$

$$C_{em} = P (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (2.15)$$

## II.8 Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• fabrication assez simple</li> <li>• machine robuste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rendement relativement faible (nécessité d'avoir des pertes au rotor pour produire du couple)</li> <li>• difficulté d'évacuer les pertes joules au rotor (refroidissement difficile).</li> <li>• Mauvais facteur de puissance</li> </ul>

Tableau II.1 des Avantages et inconvénients d'une GACE

## III. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones à aimant permanent (GSAP)

### III.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

Le vocable " machine synchrone" comme le mentionne, regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour une machine synchrone à aimants permanents, un tel fonctionnement est obtenu grâce au champ magnétique rotorique généré par des aimants. [19]

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

[19]: GUILLAUME PONGO NYOUMEA/ MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/Avril2018/https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf

Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse

En réalité, une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible. Elle peut fonctionner en mode moteur tout comme en mode générateur.

Sa particularité par rapport aux autres machines conventionnelles, réside au niveau du champ magnétique produit par les aimants permanents au rotor. Mais son bobinage statorique reste identique à celui des autres machines.

### **III.2 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP)[20]**

Un Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP) se compose d'un rotor et d'un stator triphasé comme un générateur asynchrone représenté. Ces générateurs sont les plus aptes à rivaliser avec les générateurs asynchrones pour les applications éoliennes. En fait, ils sont adaptés pour les petites éoliennes et ont un certain nombre d'avantages, à savoir:

- 1- simple et configuration plus efficace dans le rotor avec l'aimant permanent (auto-excitation)
- 2- densité de puissance élevée
- 3- rendement élevé
- 4- chaleur dissipée de manière efficace

---

[20] LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/ <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>





Fig II.7 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) industriel (TheSwitch).

### III.3 Constitution

Comme tout actionneur électrique, la machine synchrone à aimants permanents est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le stator renferme un bobinage alimenté en triphasé, et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation. Quant au rotor, son champ magnétique produit est généré par des aimants permanents.

Le stator de structure ordinairement lisse, porte des encoches à l'intérieur desquels sont disposés des enroulements de phases. En mode générateur la machine fournit de l'énergie au réseau, tandis qu'en mode moteur elle en consomme plutôt. Le rotor est généralement à pôles lisses ou à pôles saillants. [21]

### III.4 Modélisation d'un GSAP: la modélisation d'un GSAP ce fait comme suit [22]

#### III.4.1 Equations magnétiques

Par hypothèse, le circuit magnétique de la machine est non saturé. Ce postulat entraîne l'additivité des flux et donc, les flux totalisés sont fonction des courants qui circulent dans les enroulements statoriques. Les équations de flux pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents sont les suivantes :

---

[21]: Cours machine synchrone/ Lycée P. Mendès France Epinal/ [http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours\\_TD\\_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf](http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf).

[22] : GUILLAUME PONGO NYOUMEA/MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>

$$\omega_{as} = \varepsilon(L_{aa} * i_a + L_{ab} * i_b + L_{ac} * i_c) \quad (2.22)$$

$$\omega_{bs} = \varepsilon(L_{ba} * i_a + L_{bb} * i_b + L_{bc} * i_c) \quad (2.23)$$

$$\omega_{cs} = \varepsilon(L_{ca} * i_a + L_{cb} * i_b + L_{cc} * i_c) \quad (2.24)$$

$$\omega_{ss} = \begin{bmatrix} \omega_{as} \\ \omega_{bs} \\ \omega_{cs} \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Où:

$\omega_{ss}$ : est le vecteur flux propre produit dans les enroulements statoriques.

$L_{aa}L_{bb}L_{cc}$ : Inductances propres des enroulements statoriques.

$L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$  Inductances mutuelles des enroulements statoriques.

Le flux total produit est la somme du flux propre créé au stator par les courants traversant les enroulements, et du flux produit par les aimants permanents au rotor. Nous considérons une variation sinusoïdale du vecteur flux de l'aimant permanent en fonction de la position angulaire électrique  $(\theta_r)$  les trois phases au stator.

$$[\omega_s] = [\omega_{ss}] + [\omega_{sf}] = \varepsilon[L_s][i_s] + [\omega_{sf}] \quad (2.26)$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$[\omega_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Où:

$\omega_s$ : Vecteur flux total des enroulements statoriques.

$\omega_{sf} = [\omega_{asf} \quad \omega_{bsf} \quad \omega_{csf}]$ : vecteur flux de l'aimant permanent projeté sur les trois enroulements statoriques.

$\omega_{sf}$  : Amplitude du vecteur flux de l'aimant permanent.

$[L_s]$  : Matrice des inductances statoriques

$[i_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]$ : vecteur courant des enroulements statoriques

$\theta_r$  : Position angulaire électrique du rotor.

Avec l'hypothèse de la répartition sinusoïdale de la force magnétomotrice dans les enroulements statoriques, la matrice des inductances statoriques se réduit à deux termes dont l'un est constant et l'autre qui varie en fonction de la position angulaire électrique du rotor.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta_r)] \quad (2.29)$$

Avec:

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{aa0} & -\frac{1}{2}L_{aa0} & -\frac{1}{2}L_{aa0} \\ -\frac{1}{2}L_{aa0} & L_{aa0} + L_a & -\frac{1}{2}L_{aa0} \\ -\frac{1}{2}L_{aa0} & L_{aa0} & L_{aa0} + L_a \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$[L_{s2}(\theta_r)] = L_{aa2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_r) & \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_r) \\ \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(2\theta_r) & \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Où:

$L_a$ : Inductance de fuite

$L_{aa0}$ : Inductance de magnétisation.

$L_{aa2}$  : Amplitude de première harmonique de l'inductance propre d'une phase

### III.4.2 Equations électriques

Les équations électriques générales de la machine synchrone à aimants permanents dans un référentiel fixe (as, bs, cs) lié au stator s'expriment de la façon suivante.

$$[\mathbf{v}_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}[\omega_s] \quad (2.32)$$

Avec:

$$[\mathbf{v}_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T: \text{Vecteur des tensions statoriques} \quad (2.33)$$

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}: \text{Matrice des résistances statoriques} \quad (2.34)$$

En remplaçant l'équation de flux dans  $[\mathbf{v}_s]$  on obtient finalement l'équation des tensions  $v_s = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}(\varepsilon[\mathbf{L}_s][\mathbf{i}_s] + [\omega_{sf}])$  (2.35)

$$v_s = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + (\varepsilon[L_{S0}] \frac{d}{dt} [\mathbf{i}_s] + \omega_r \frac{d(L_{s2}(\theta_r))}{d\theta_r} [\mathbf{i}_s] + \omega_r \frac{d[\omega_{sf}]}{d\theta_r}) \quad (2.36)$$

### III.4.3 Equations mécaniques

Selon la deuxième loi de Newton appliquée à un corps en mouvement, l'équation fondamentale de la mécanique peut s'écrire:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - B\omega_m \quad (2.37)$$

$$\text{Ou: } \omega_r = P\omega_t \quad (2.38)$$

Avec:

$T_e$  : Couple électromagnétique de la machine ;

$T_m$ : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ;

$B$  : Coefficient de frottement visqueux ;

$J$ : Moment d'inertie total ramené sur l'arbre du rotor.

$P$  : Nombre de pôles.

$W_m$  : Vitesse mécanique du rotor.

Le couple électromagnétique produit pour un actionneur électrique en rotation, est due par l'interaction des flux statoriques et rotoriques. Il est obtenu à partir de la dérivée de la co-énergie magnétique par rapport à la position électrique du rotor.

$$T_e = \frac{\partial W_m}{\partial \theta_r} \quad (2.39)$$

Où:

$W_m$  est la co-énergie magnétique.

En régime non saturé, cette co-énergie magnétique est exprimée par la relation:

$$W_m = \frac{1}{2} [i_s]^T [L_s] [i_s] + W_{ma} \quad (2.40)$$

Avec  $W_{ma}$ , la co-énergie constante des aimants.

En substituant les dernières équations on aboutit à l'équation:

$$T_e = p \left( \frac{1}{2} [i_s]^T \frac{\partial [L_s]}{\partial \theta_r} [i_s] + [i_s]^T \frac{\partial [W_{ma}]}{\partial \theta_r} \right) \quad (2.41)$$

Nous venons d'établir des équations électromécaniques en grandeurs de phase qui déterminent le fonctionnement de la MSAP dans le référentiel fixe lié au stator. On observe que les équations établies ne sont pas linéaires, puisque les inductances statoriques dépendent de la position relative du rotor par rapport au stator. Vu cette difficulté qui se présente pour la résolution analytique de ces équations, nous faisons recours aux formalismes mathématiques qui viendront faciliter leurs déterminations.

Pour rechercher les modèles adaptés à l'identification des paramètres de la MSAP, on utilise souvent le modèle de l'actionneur dans un repère lié au rotor, à l'aide de la transformation de Park

## III.5 Avantages et inconvénients de la MSAP

### III.5.1 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents sont devenues attractives et concurrentes de la machine à induction dans le domaine des systèmes d'entraînement électriques, sont de plus en plus utilisés pour des entraînements de haute technologie, de par leur présence grandissante dans des domaines applicatifs toujours plus diversifiés.

A titre d'illustration, quelques avantages de la MASAP, sont cités ci-dessous: [23]

- Couple volumique et puissance massique importants permettant l'utilisation de machines au design plus compact : caractéristiques très recherchées pour des applications embarquées.
- Rendement plus élevé grâce à l'utilisation d'aimants permanents en remplacement des enroulements rotoriques. Ainsi, le rotor n'a pas besoin d'être alimenté ce qui diminue les pertes (absence de pertes joules).
- Fiabilité de la machine en raison de l'absence de bagues et de balais.
- Simplicité de conception et d'entretien due également à l'absence de bagues et de balais.
- Performance dynamique élevée grâce à une densité de flux importante dans l'entrefer.
- Simplicité de contrôle en fonctionnement générateur avec notamment l'absence de régulation de vitesse et de tension.

### III.5.2 Inconvénients de la MSAP [23]

- Coût élevé à cause du prix des aimants.
- Problème de tenue en température des aimants permanents (250°C pour le samariumcobalt).
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).
- Impossibilité de régler l'excitation.

---

[23]: Sonia MOUZAOUI/Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de défauts de courts-Circuits et de désaimantations par la méthode des éléments Finis/<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8610/MouzaouiSonia.pdf?sequence=1>

- Pour atteindre des vitesses élevées. Il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser le courant statorique afin de démagnétiser la machine.

## IV. Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

### IV.1 Introduction[24]

Aujourd'hui, plus de 70% des éoliennes sont construites avec un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Beaucoup de fabricants, tels que Vestas, Gamesa, GE et REpower ont fourni le système d'éolienne avec ce concept comme représenté dans la Figure 2.7. En fait, la GADA a connu un grand progrès si on la compare avec la GACE

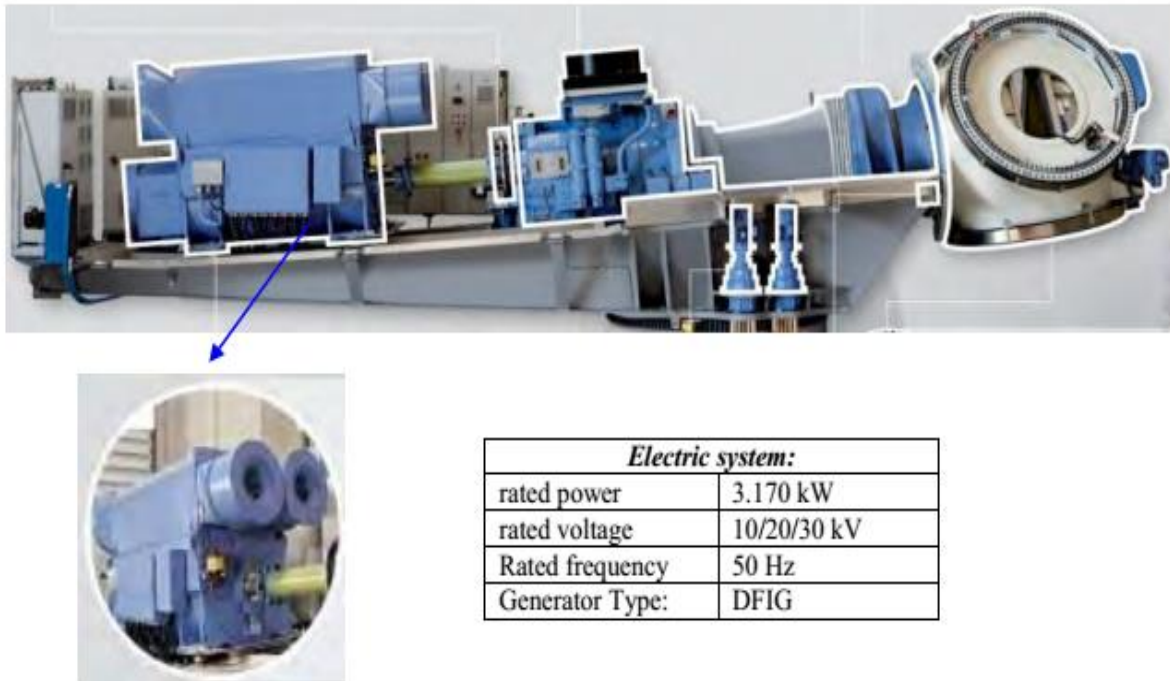


Fig II.8 GADA industriel pour éolienne

Le système représenté dans la Figure II.8- est constitué d'une éolienne avec GADA où le stator est relié directement au réseau tandis que le bobinage rotorique est relié via un système bagues-balais au convertisseur statique. Comme indiqué dans la Figure 2.9 la GADA peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur avec une plage de vitesses de rotor  $\pm \Delta w_r^{max}$  de l'ordre de la vitesse de synchronisme  $w_1$ .

[24]: <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>

De plus, de nouveaux types de générateurs qui peuvent changer la configuration de l'énergie éolienne sont en cours de développement où la nouvelle conception élimine la plupart des organes mécaniques, comme le système bagues-balais et la boîte de vitesses (gearbox) qui sont considérés comme des inconvénients à ce concept. L'objectif recherché est la réduction de la masse et du coût du système, une haute fiabilité et disponibilité. Dans cette perspective, il faut remarquer que la plupart des travaux de recherche ont tendance à utiliser les GADAs dans l'application éolienne car ils ont d'excellentes performances . Le fonctionnement à vitesse variable de la GADA offre de nombreux avantages pour réduire les coûts et a le potentiel pour être construite économiquement au-dessus des niveaux de puissance de 1,5 MW pour les applications off-shore.

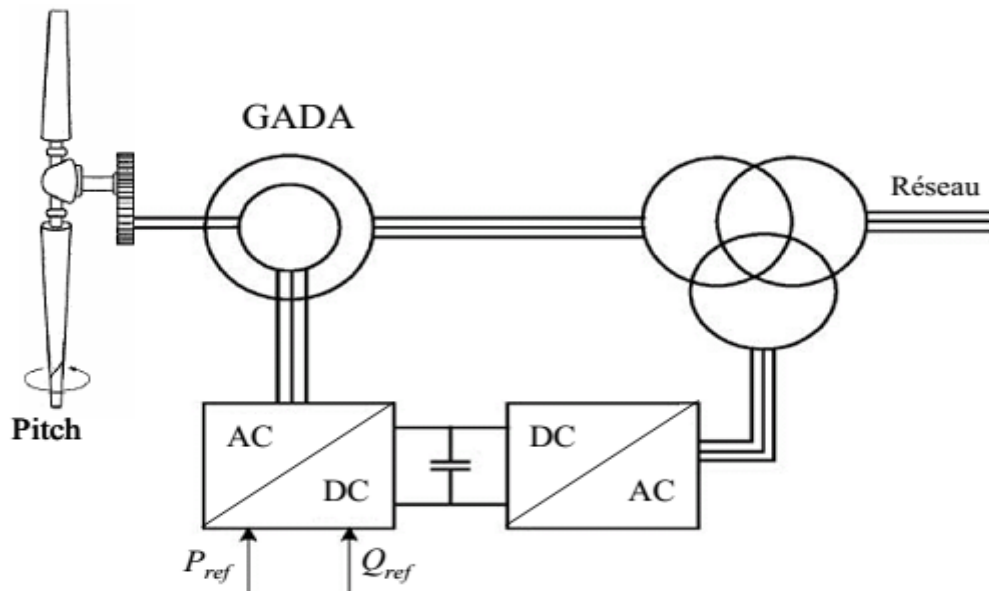


Fig II.9 Schéma d'un système de production éolienne avec GADA.

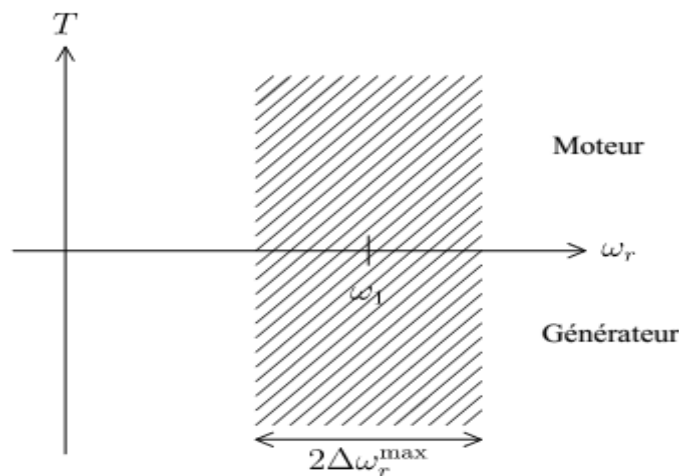


Fig II.10 Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse.



## IV.2 Principe de fonctionnement d'une GADA

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage. [25]

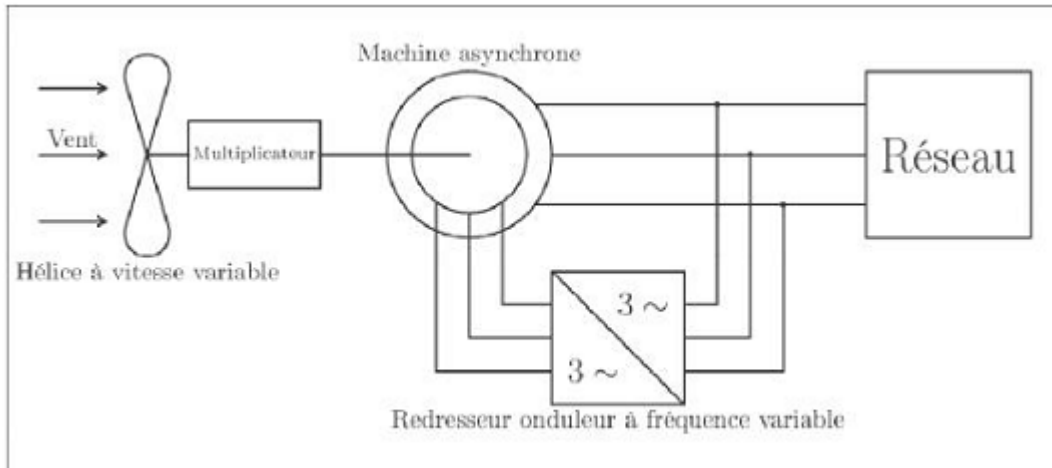


Fig II.11 schéma de principe de la double alimentation.

On connecte toujours le stator au réseaux mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotorique, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de taille réduite (figII-11) la puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc de glissement  $g$ .

[25]: LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/[https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid\\_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

### IV.3 Modèle mathématique de la GADA

Comme tous les systèmes physiques qui nécessitent une modélisation, celle-ci permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations. On distingue deux modèles mathématiques qui représentent la machine, à savoir le modèle élaboré dans le référentiel abc (modèle triphasé) découlant des équations différentielles qui régissent le fonctionnement de la machine et le modèle issu de la transformation de Park ou de Concordia (modèle biphasé) utilisé couramment pour étudier les machines électriques. [26]

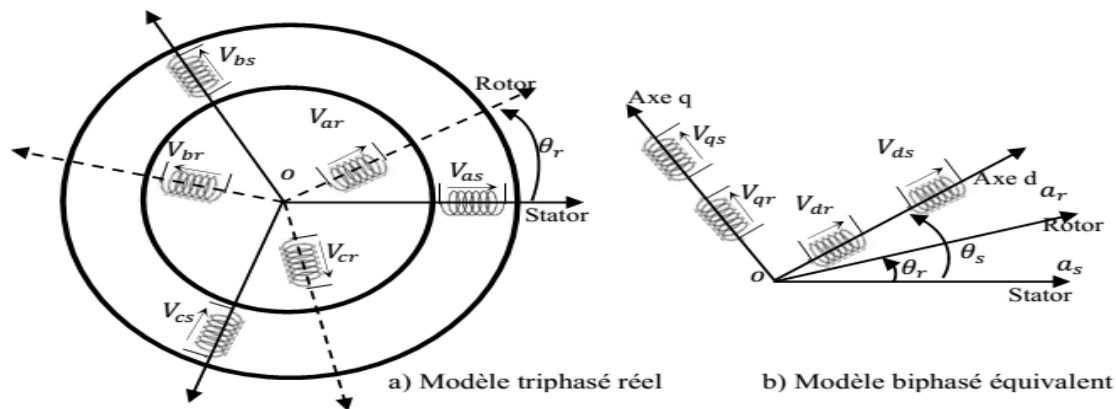


Fig II.12 Passage de système triphasé au système biphasé

La figure II.12 a représente l'enroulement statorique et l'enroulement rotorique triphasé de la GADA.

Dans un repère triphasé, la GADA est représentée par les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques suivantes:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (2.42)$$

Or, les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants, en faisant intervenir les différentes inductances comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \end{cases} \quad (2.43)$$

où  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  et  $[M_{sr}]$  sont les matrices d'inductances statoriques, rotoriques et mutuelles, respectivement. En remplaçant les expressions des flux de (2.43) dans les équations des tensions (2.42), les équations des tensions sous forme explicite deviennent :

[26]: Djilali Kairous/Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne/2019/

[https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous\\_uqac\\_0862D\\_10605.pdf](https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous_uqac_0862D_10605.pdf)

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} [M_{sr}][I_r] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} [M_{sr}]^T [I_s] \end{cases} \quad (2.44)$$

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés d'axes  $abc$  en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes  $dq$  créant la même force magnétomotrice (fmm). Puisque la composante homopolaire est choisie orthogonale au plan ( $dq$ ), elle intervient uniquement pour équilibrer le système transformé. Comme le montre la figure (2.10), les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans le même repère biphasé tournant  $dq$ . L'angle utilisé par la transformation de Park, appliqué aux grandeurs rotoriques, correspond à la différence :  $\theta_e = \theta_s - \theta_r$ . Cet angle peut s'écrire sous la forme intégrale suivante :

$$\theta_e = \int \omega_s dt - N_p \Omega \quad (2.45)$$

où la pulsation  $\omega_s$  est issue d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) calée sur les tensions statoriques, alors que  $N_p$  et  $\Omega$  représentent le nombre de paires des pôles et la vitesse mécanique de rotation, respectivement. Une erreur dans le calcul ou dans la mesure de l'une de ces deux pulsations peut constamment s'intégrer, ce qui va faire que la commande n'est plus envisageable.

En appliquant la transformation de Park aux tensions et aux flux, nous obtenons le modèle électrique biphasé suivant:

$$\begin{cases} [V_{dqs}] = [R_s][I_{dqs}] + \frac{d}{dt} [\psi_{dqs}] + \omega_s J [\psi_{dqs}] \\ [V_{dqr}] = [R_r][I_{dqr}] + \frac{d}{dt} [\psi_{dqr}] + (\omega_s - \omega_r) J [\psi_{dqr}] \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\text{Avec } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Par ailleurs, la puissance mécanique convertie par la GADA conduisant à la réaction d'un couple électromécanique  $c_e$  s'écrit comme suit :

$$c_e = N_p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \omega_{qs} - I_{qr} \omega_{ds}) \quad (2.49)$$

Or, l'équation dynamique qui lie le couple électromagnétique à la vitesse mécanique de rotation s'écrit :

$$J_G \frac{d\Omega}{dt} = C_r - C_e - C_{frt} \Omega \quad (2.50)$$

Où  $J_G$  est l'inertie de la machine, alors que  $C_r$  et  $C_{frt}$  représentent couple résistant et le coefficient de frottement, respectivement.

#### **IV.4 Avantages et inconvénients de la GADA**

##### **IV.4.1 Avantages**

- fonctionnement avec vitesse variable.
- Puissance extraite optimisée
- Electronique de puissance dimensionnement 30% de la puissance nominale
- Machine standard
- Connexion de la machine facile à gérer
- Une magnétisation facile a gérée en cas de défauts sur le réseau

##### **IV.4.2 inconvénients**

- Maintenance de la boîte de vitesse
- Pris de l'électronique de puissance
- Contrôle et commande complexe
- Contact glissant bagues-balais

#### **V. Conclusion**

Chacune des technologies dont nous avons parlé dans ce chapitre a ses avantages et ses inconvénients qui guident notre choix d'applications dans le monde industriel.

*Chapitre 3*  
*Simulation du*  
*système éolien utilisant les*  
*génératrices asynchrones à*  
*cage d'écureuil (GACE).*

## I. Introduction

Notre partie expérimentale a été réalisée au niveau de laboratoire d'énergie renouvelable en utilisant le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1. On a pris cinq vitesses différentes de l'air pour obtenir des tensions, puis on a fait la simulation d'un moteur a cage par MATLAB/SIMULINK 2016.

## II. Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1



Fig III.1 Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1

## II.1 Description

EOLYP est un banc d'essais abordant l'étude d'une éolienne en hypersynchrone dans ses aspects production électrique, à l'exclusion des aspects mécaniques. En raison des nuisances sonores et des courants d'air incompatibles avec une ambiance de salle de classe, l'hélice a été remplacée par un moteur entraînant, à vitesse variable.

Le schéma fonctionnel présente le principe de fonctionnement. [27]

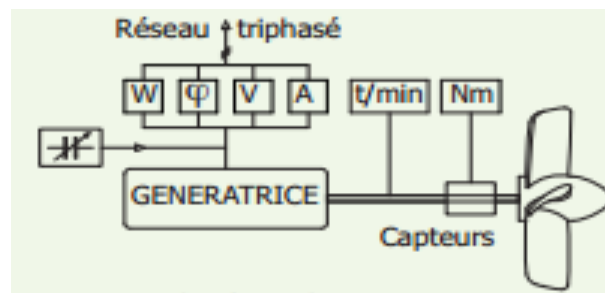


Fig III.2 schéma fonctionnel de l'EOLYP

Les composants de sécurité, placés dans l'armoire électrique, n'y sont pas représentés afin de simplifier la lecture.

L'hélice dont l'opérateur règle la vitesse, entraîne la génératrice de 0 à 1800 t/min.

Deux capteurs placés sur la ligne d'arbres, renvoient vers le pupitre qui les affiche, les informations vitesse de rotation et couple.

La génératrice est couplée au réseau triphasé public, à travers un banc de mesures électriques, indiquant :

- puissance active renvoyée vers le réseau
- tension entre phases
- intensité
- facteur de puissance

Le wattmètre à zéro central montre que selon la vitesse d'entraînement, la génératrice consomme ou produit de l'énergie mettant ainsi en évidence les fonctionnements en hypersynchrone et hyposynchrone. Le déphasage tension/courant évolue lui aussi avec la vitesse de rotation ainsi que l'indique le cosmètre à zéro central. La batterie de condensateurs réglable permet d'ajuster le  $\cos\phi$  au voisinage de 1 selon la vitesse et la puissance produite.

---

[27]: SIMULATEUR D'UNE EOLIENNE - RESTITUTION RESEAU/FABRICATION  
 LANGLOIS/info@langlois-france.com/https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id\_attachment=2389

## II.2 Objectif pédagogique

- Comprendre les principes mécaniques et électriques d'une éolienne
- Etudier les différents modes de fonctionnements hyposynchrone et hypersynchrone d'un moteur asynchrone.
- Etudier la synchronisation sur le réseau national.
- Calculer les rendements d'une chaîne de production d'énergie.
- Utiliser une pince ampèremétrique.

## II.3 Identification des composants formant EOLYP

### II.3.1 composition

- 1 Bâti sur roulettes, dim. 1200 x 750mm haut : 1820mm. Poids : 143kg
- 1 Moteur asynchrone 1,5 kVA
- 1 Génératrice
- 1 Dynamo tachymétrique / 1 capteur de couple
- 1 Pupitre de commande
- 1 Armoire électrique
- 1 boîtier de couplage sur le réseau

### II.3.2 caractéristiques de la génératrice

- moteur asynchrone 3 x 400VAC
- puissance active renvoyée sur le réseau : 0 à 1,2kVA
- rendement de la génératrice : 78%
- variation vitesse : 0 à 1800t/min

### II.3.3 l'armoire électrique



Fig III.3 l'armoire électrique

- 1) Voyant Marche
- 2) Voyant Présence tension



- 3) Armoire Technique
- 4) Bouton Arrêt d'Urgence
- 5) Sectionneur
- 6) Boutons M/A avec voyant
- 7) Commutateurs pour la batterie de condensateurs
- 8) Voyants défauts thermiques (voir Annexe)
- 9) Boitier de connexion au réseau électrique
- 10) Fiche triphasée pour alimentation 400V-50hz de l'EOLYP

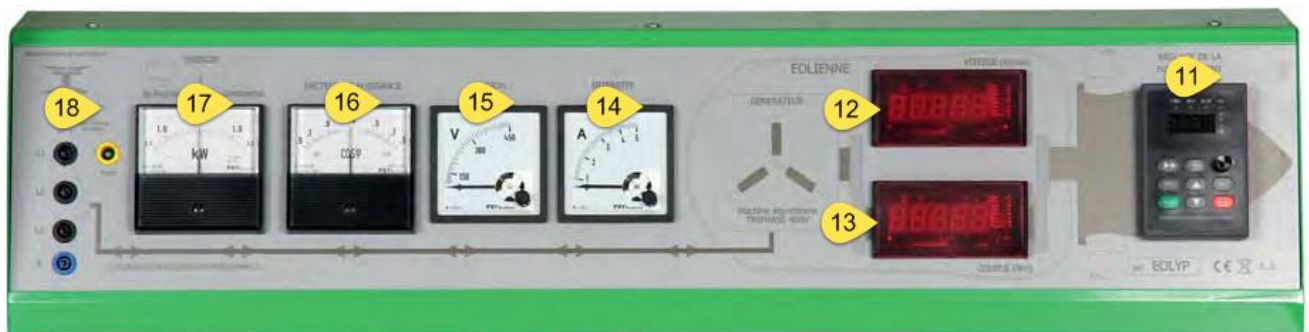


Fig III.4 Pupitre de commande

- 11) Interface du variateur de vitesse permettant la variation de la vitesse du vent donc du rotor de l'éolienne.
- 12) Afficheur en trs/min de la vitesse de rotation du rotor de l'Eolienne.
- 13) Afficheur en Nm du couple sur le rotor.
- 14) Afficheur de l'intensité I en ampères fournie par la génératrice de l'éolienne.
- 15) Afficheur de la tension U en volts fournie par la génératrice de l'éolienne
- 16) Afficheur du Cos Phi.
- 17) Afficheur de la puissance en KW de la génératrice de l'éolienne.

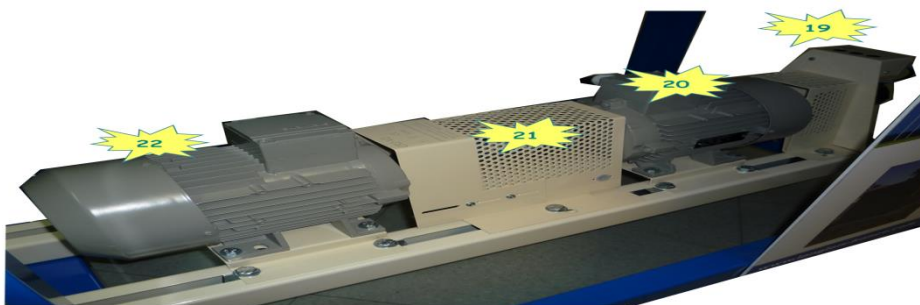


Fig III.5 moteur asynchrone

- 18) Bornes de raccordement au réseau électrique. 3x400V+Neutre-50Hz + Terre.
- 19) Dynamo tachymétrique 10V/1000trs/min permettant la mesure de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne.

- 20) Moteur asynchrone permettant l'entraînement en rotation de la génératrice de l'éolienne. (Simule les pales de l'éolienne)
- 21) Capteur de couple permet la mesure du couple sur le rotor
- 22) Génératrice asynchrone de l'éolienne. 1800W/400V/4,1A triphasée

**III. Schéma fonctionnel** Insérer les différents numéros des composants trouvés précédemment.

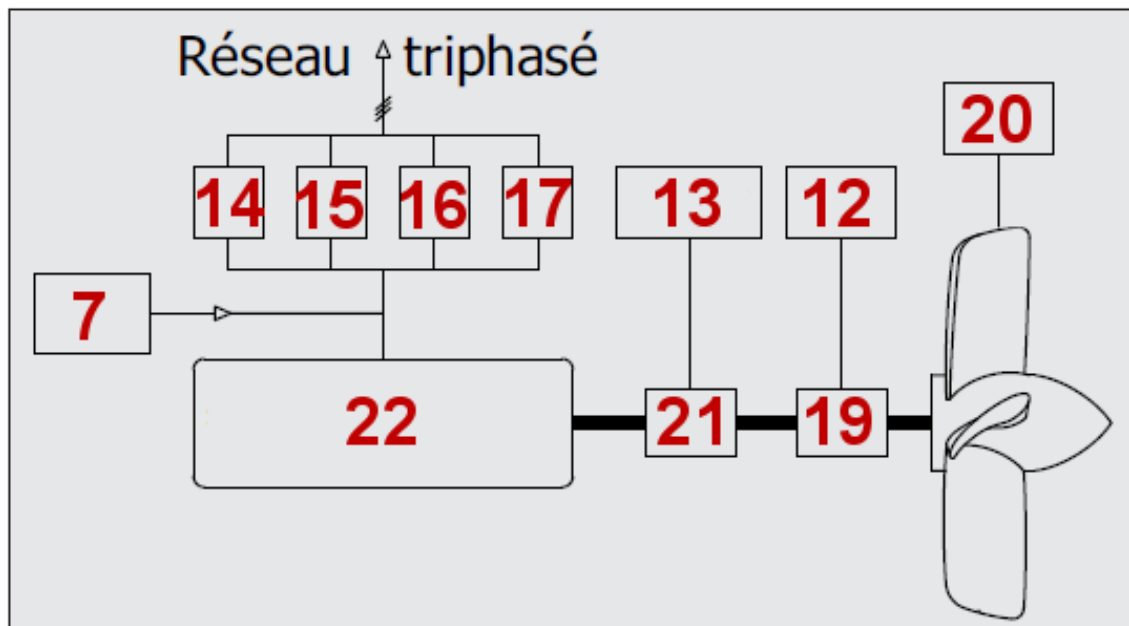


Fig III.6 les composants de schéma fonctionnel

#### IV. Fonctionnement

Les 3 bobines, de notre machine triphasée, sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  les unes des autres, un champ magnétique tournant est alors créé. Sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Ce champ balaye le rotor, les conducteurs qui composent ce dernier sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. Le rotor tourne alors dans le même sens de rotation que le champ magnétique mais à une vitesse légèrement inférieure donc légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.

Le rotor ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme car sinon la cage ne serait plus balayé par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des force de Laplace et du couple.

Maintenant si nous faisons tourner manuellement le rotor à la vitesse de synchronisme, le champ magnétique tourne alors à exactement la même vitesse que le rotor. De ce fait aucun

phénomène d'induction ne se produira dans le rotor et il n'y aura aucune interaction entre le rotor et le stator, le couple sera alors nul.

Mais, si nous faisons tourner manuellement le rotor à une vitesse supérieure au synchronisme (appelé alors fonctionnement en hyper synchrone) le rotor tournera donc plus vite que le champ magnétique, ce qui signifie que le stator commence à induire un fort courant dans le rotor.

Plus nous allons faire tourner vite le rotor plus grande sera la force électromagnétique qui sera convertie par le stator en électricité.

Lorsque la machine Asynchrone fonctionne en hyper synchrone elle devient donc Génératrice Hyper synchrone (voir FigIII.7).

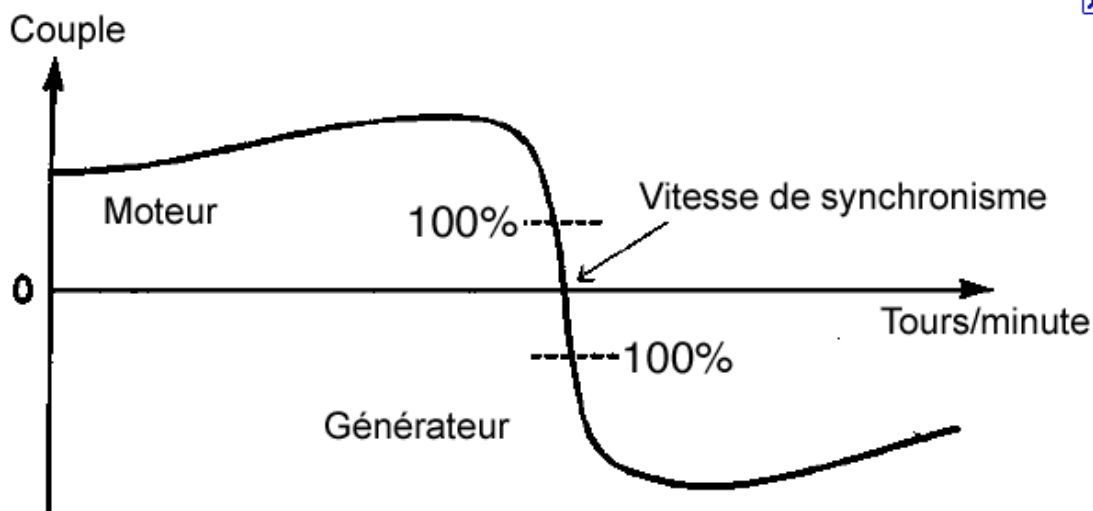


Fig III.7 mode de fonctionnement moteur/ génératrice

## V. Outils de simulation MATLAB/SIMULINK[28]

### V.1 Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique de calcul matriciel de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc

[28]: Mamadou Lamine Doumbia/ Mamadou Lamine Doumbia/ MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK/07/2002/file:///C:/Users/Admin/AppData/Local/Temp/MODELISATION\_ET\_SIMULATION\_DUNE\_MACHINE\_ASYNCHRON.pdf

Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice.

L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaires et industriels comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK.

## V.2 Simulink

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être

modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

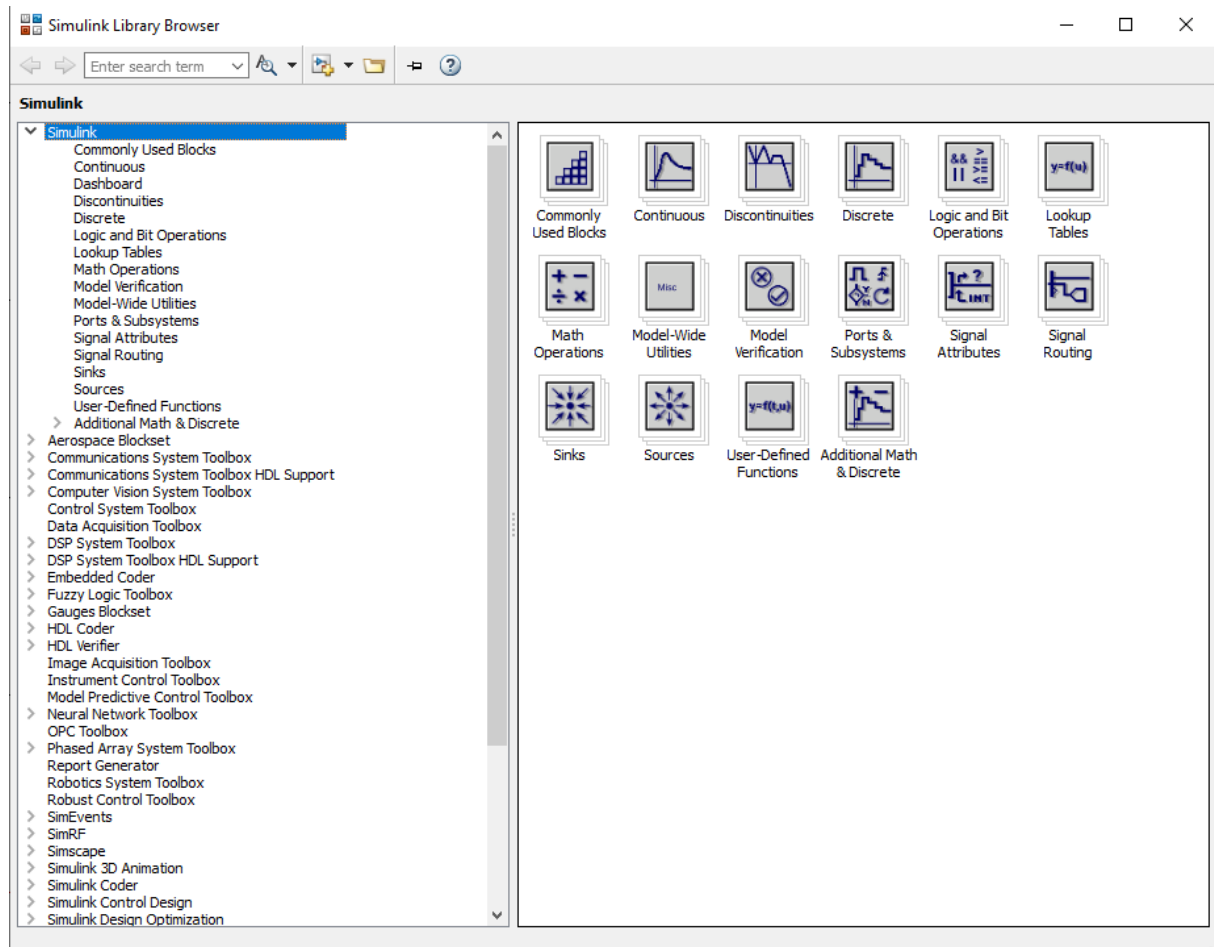


Fig III.8 Librairie SIMULINK

SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau 1.

Tableau 1

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete Blocs	Représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions & Tables	Fonctionset tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals & Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

Tableau III.1 Les principales librairies SIMULINK

## VI. Partie pratique

### VI.1 les tableaux et les courbes

**Tableau III.2 (rotation du rotor 40Hz)**

Rotation du rotor 40Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1187.5trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	450
	75	1	1	1	0	/
	100	1	1	1	1	/

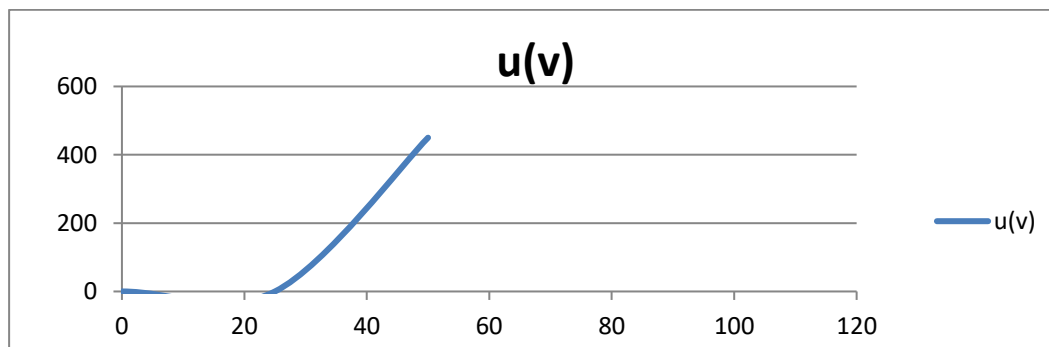


Fig III.9 courbe de tension pour rotation rotorique 40Hz

On remarque que la génératrice s'amorce seulement à 50% du plan de charge, ce qui correspond à une tension de 450v. pour 25% du plan du charge la tension est nulle mais pour les valeurs 75% et 100% la tension est supérieure de 450v la valeur maximale du simulateur.

**Tableau III.3(rotation du rotor 43Hz)**

Rotation du rotor 43Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1275trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	0
	75	1	1	1	0	350
	100	1	1	1	1	400

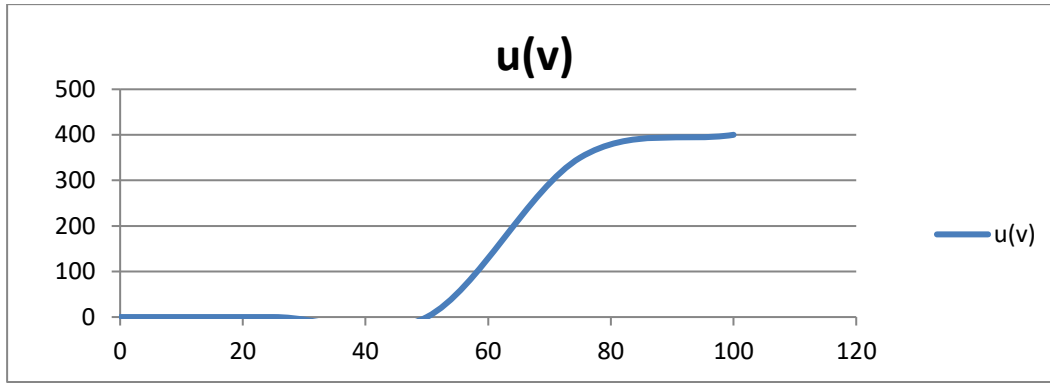


Fig III.10 courbe de tension pour rotation rotorique 43Hz

Nous constatons que pour la vitesse de rotation rotorique 43Hz la génératrice s’amorce véritablement à partir de 75% du plan de charge, ce qui correspond à une tension de 350v.

Par analogie avec la machine synchrone, on peut dire que la capacité joue un rôle analogue au courant d’excitation La capacité est donc la grandeur de réglage de la tension aux bornes de la génératrice asynchrone

Tableau III.4 (vitesse de rotation rotorique 45.5Hz)

Rotation du rotor 45.5Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1357.4trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	0
	75	1	1	1	0	400
	100	1	1	1	1	450

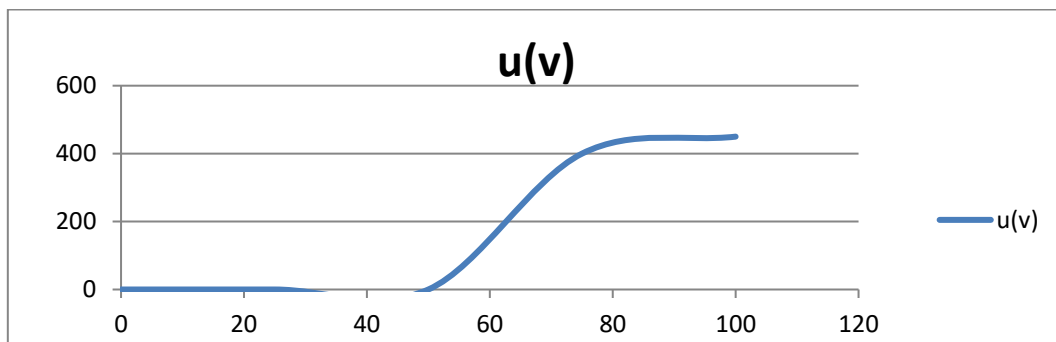


Fig III.11 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz

Pour la vitesse de rotor 45.5 Hz, on remarque que la génératrice s'amorce avec valeur maximale de tension à 75 % et 100%. Pour 25% du plan de la charge la tension est égale à zéro.

**Tableau III.5 (vitesse de rotation 47Hz)**

Rotation du rotor 47Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1402.5trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	0	1	0	230
	75	1	0	1	1	440
	100	1	1	1	1	/

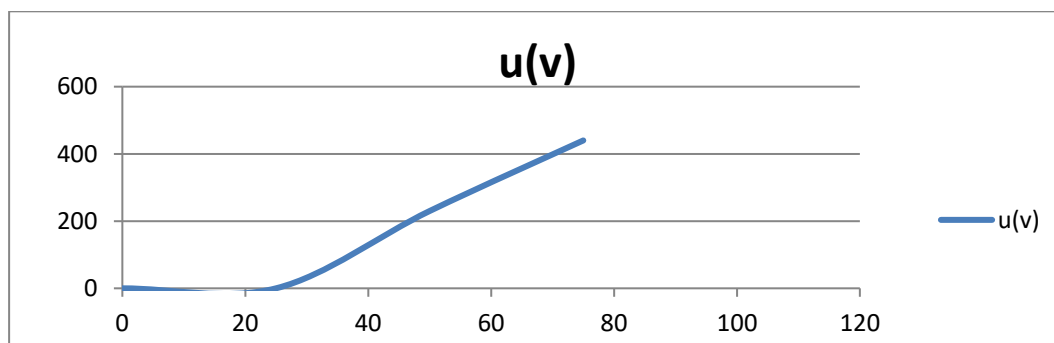


Fig III.12 courbe de tension pour rotation rotorique 47Hz

La génératrice s'amorce à partir de 50% du plan de charge à une tension de 450v, à 75% du plan de charge la tension atteint 440v. Pour 25% du plan de la charge la tension est nulle mais pour les valeurs et 100% la tension est supérieure de 450v la valeur maximale du simulateur.

**Tableau III.6 (vitesse de rotation de rotor 54.3Hz)**

Rotation du rotor 54.3Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1620trs/min	0	0	0	0	0	
	25	1	0	0	0	
	50	1	1	0	0	450
	75	1	1	1	0	0
	100	1	1	1	1	



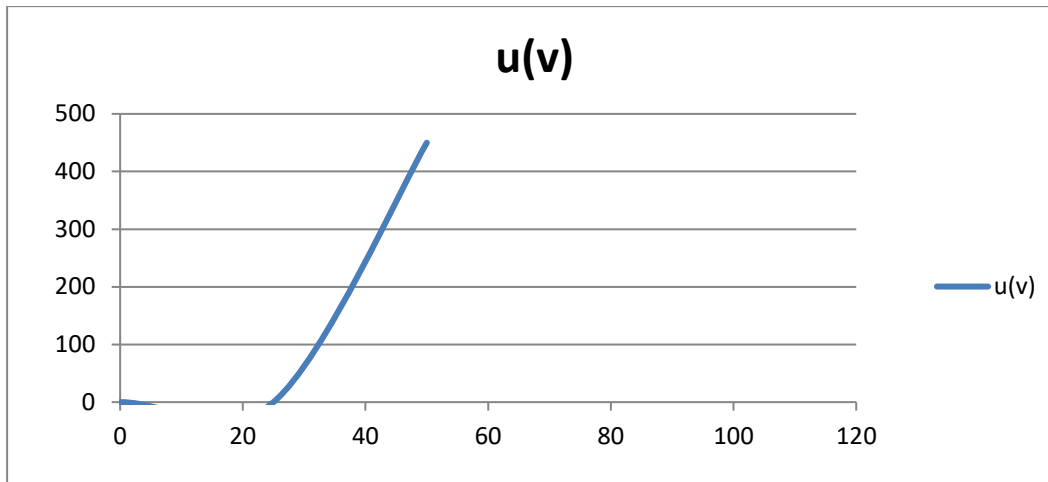


Fig III.13 courbe de tension pour rotation rotorique 54.3Hz

### Remarque

Les cases vides signifiait que la tension obtenue est supérieure a 450v la tension maximale de notre simulateur.

D'autre part notre simulateur fonctionne seulement dans l'intervalle de rotation de rotor de 40 à 50Hz.

Par analogie avec la machine synchrone, on peut dire que la capacité joue un rôle analogue au courant d'excitation La capacité est donc la grandeur de réglage de la tension aux bornes de la génératrice asynchrone.

## IV2. Développement du modèle SIMULINK du moteur asynchrone

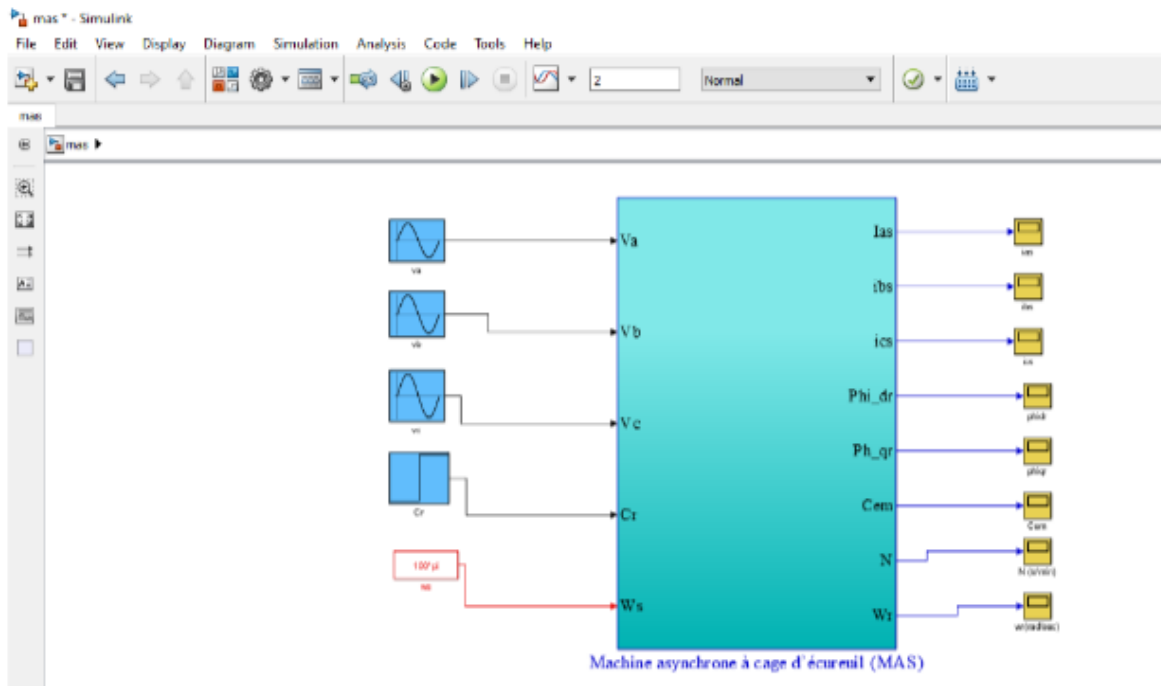


Fig III.14 Modèle SIMULINK d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil (MAS).

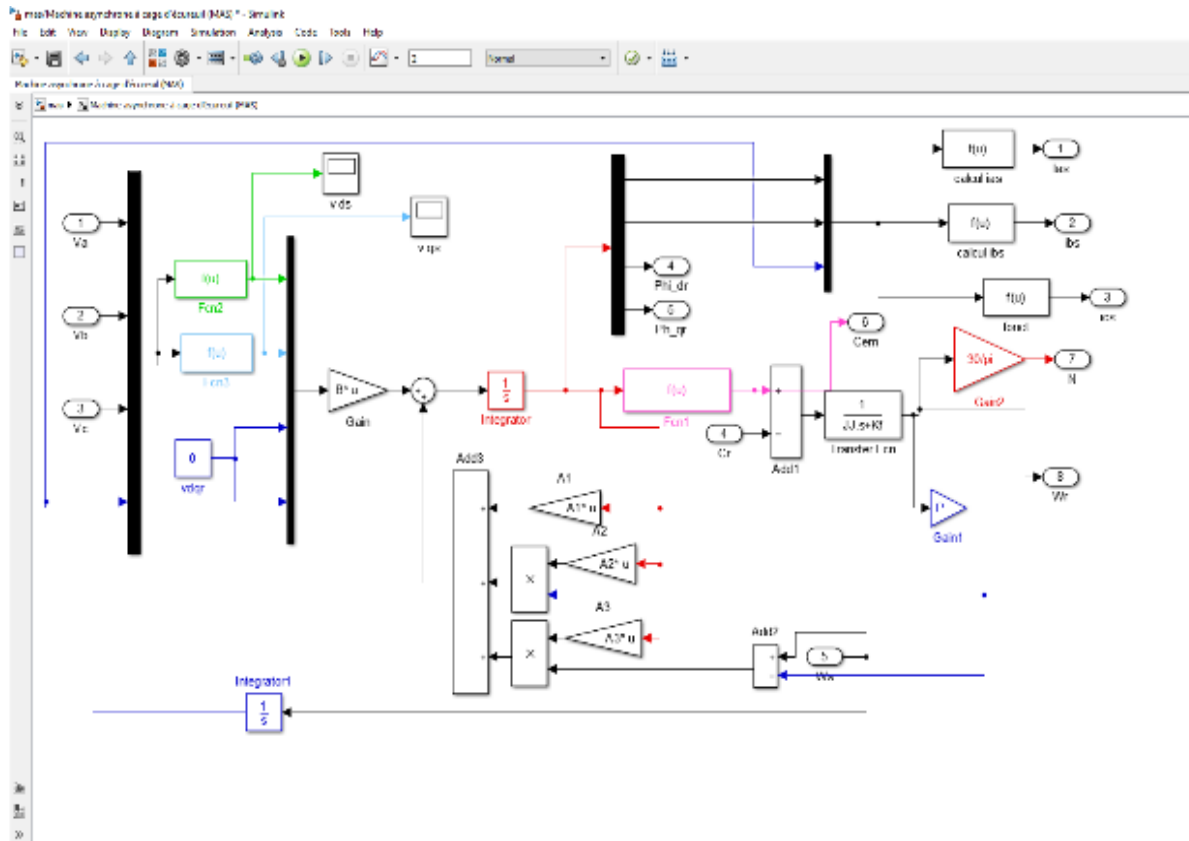
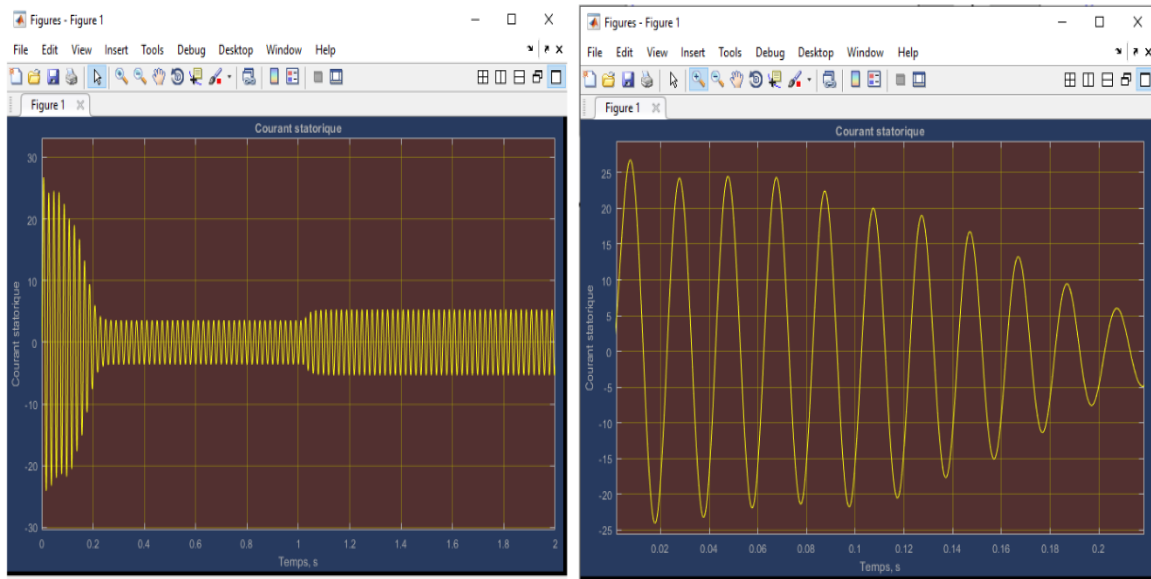


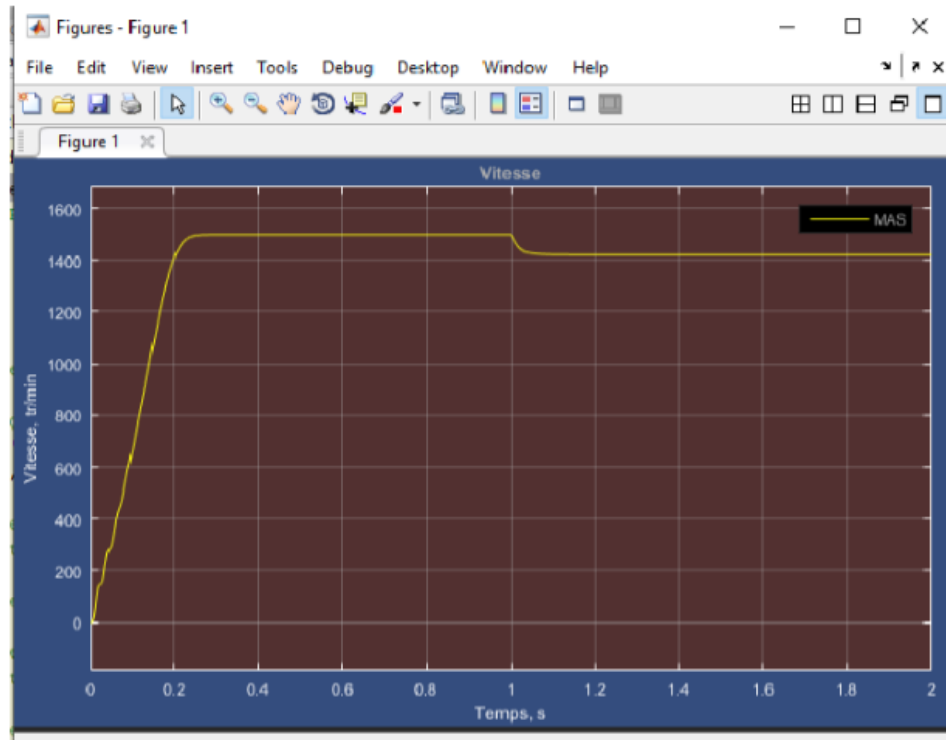
Fig III.15 Bloc de la machine asynchrone à cage d'écurieil.

### IV.3 Résultats de la simulation

Les figures III.10, III.11 montre les résultats représentent respectivement les courbes du courant statorique et de la vitesse.



FigIII.16 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (Courant statorique)



FigIII.17 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (vitesse)

### Interprétation des courbes:

Le courant dans le démarrage est très grand mais il se réduit et se stabilise, le couple électromagnétique est le responsable de la tension. Pour la vitesse on remarque qu'elle atteint une valeur maximale c'est la vitesse de synchronisation puis elle se réduit et devient stable.

### V. Conclusion

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa facilité de construction et sa robustesse; mais sa simulation est difficile, parce que son modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de dépasser cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

*CONCLUSION  
GENERALE*

## **Conclusion générale**

La simulation est une méthode efficace et économique en ingénierie et est couramment utilisée pour mener des études préliminaires et/ou comparatives, à la fois dans la phase de développement (conception) et pendant le fonctionnement normal des systèmes. Dans l'industrie et le milieu universitaire.

Plusieurs outils de simulation sont actuellement utilisés, parmi lesquelles on trouve MATLAB / SIMULINK. Dans ce travail, nous avons conçu un moteur asynchrone à cage d'écureuil, qui a fait ses preuves dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction; autrement, il est difficile à simuler, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité d'outils informatiques puissants permet de surmonter cette difficulté. La modélisation et la simulation du processus de démarrage du moteur sont suivies de l'application de la charge entraînée. Les résultats obtenus prouvent la justesse du modèle développé. D'autres vitesses peuvent être facilement vérifiées, analysées et étudiées pendant le fonctionnement du moteur.

On espère que l'implantation des machines asynchrone dans notre vie s'améliore surtout dans le domaine d'énergie renouvelable pour faciliter notre besoin d'électricité et éviter le manque et les problèmes fournis par l'énergie fossile.

# *BIBLIOGRAPHIE*

**[01]:** Daniel R. Rousse /Énergies renouvelables/L'énergie éolienne /19/10/2019//<http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1251/>

**[02]:** Dr Nachida Kasbadji Merzouk Directrice de Recherche/Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?/le 1er séminaire méditerranéenne sur l'énergie éolienne/ 10 et 11 avril 2010 /pdf [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_014\\_04.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_014_04.pdf)

**[03]** Lakhdar Walid ARABI, Samia SAÏDI , Pr Chems Eddine Chitour/Thème : De la Bougie à l'Electricité Durable : les Défis de 2030/Sujet : Le Souffle d'Eole pour produire de l'électricité /16ème journée de l'énergie, 50ème Anniversaire de l'Indépendance Centre de conférences SONELGAZ, 16 Avril 2012  
<https://developpementhumaindurabledealgerie.files.wordpress.com/2016/03/exposc3a9-11.pdf>

**[04]:** L'éolien en Europe et dans le monde en 2017 /<https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>

**[05]:** Guediri, Abdel Karim (2017) Etude et commande d'une chaine de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/3959>

**[06]:**MOKRANE SMAILI /MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION/  
<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/572/1/Mokrane-Smaili.pdf>

**[07]:**Eolienne domestique Technique /<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique>

**[08]:** 2021 Fabriquer Eolienne/expériences et tutoriels de fabrication autour de l'auto-construction d'éoliennes pour produire soi-même du courant électrique/ <http://www.fabriquer-eolienne.com/installation-electrique-eolienne-infographie/>

**[09]:** Parc éolien/Critères de choix de sites éoliens  
[/https://eolienne.f4jr.org/parc\\_eolien#criteres\\_de\\_choix\\_de\\_sites\\_eoliens](https://eolienne.f4jr.org/parc_eolien#criteres_de_choix_de_sites_eoliens)

**[10]:** EOL 87/L'énergie éolienne/ <http://eol87.fr/lenergie-eolienne/>

**[11]:** Étude théorique d'une éolienne/ [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)

- [12]: total énergies/ quels sont les différents types d'éolienne  
<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes>
- [13]: Le guide de l'éolienne/Le guide de l'éolienne/<https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/eolien/le-guide-de-l-eolienne-ooreka.pdf>
- [14]: Pr. BENAMROUCHE Nacereddine/IDENTIFICATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL/2011-2012/  
[https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8558/LouniAmar\\_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8558/LouniAmar_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [15]: METROUH Mohamed MOUSSI Rafik/Identification d'une machine asynchrone à Cage/ 11 juillet 2017/ [https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8588/MetrouhMohamed\\_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8588/MetrouhMohamed_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [16] Maxime DESSOUDE/Différents types de moteurs asynchrones Moteurs asynchrones - Choix et problèmes connexes/10 juin 1996  
 / <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/moteurs-asynchrones-d3490/differents-types-de-moteurs-asynchrones-d3490niv10002.html>
- [17] : Daniel FODOREAN /Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) /19/11/2009/<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/dimensionnement-rapide-des-machines-synchrones-a-aimants-permanents-msap-d3554/>
- [18]: Mamadou Doumbia/MODELISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRON/January 2002/ <https://www.researchgate.net/publication/237508249>
- [19]: GUILLAUME PONGO NYOUMEA/ MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/Avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>
- [20] LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/ <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>
- [21]: Cours machine synchrone/ Lycée P. Mendès France Epinal/ [http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours\\_TD\\_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf.\\_](http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf._)



- [22] : GUILLAUME PONGO NYOUMEA/MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONNE À AIMANTS PERMANENTS/avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>
- [23]: Sonia MOUZAOUI/Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de défauts de courts-Circuits et de désaimantations par la méthode des éléments Finis/<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8610/MouzaouiSonia.pdf?sequence=1>
- [24]: <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>
- [25]: LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/[https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid\\_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26]: Djilali Kairous/Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne/2019/  
[https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous\\_uqac\\_0862D\\_10605.pdf](https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous_uqac_0862D_10605.pdf)
- [27]: SIMULATEUR D'UNE EOLIENNE - RESTITUTION RESEAU/FABRICATION LANGLOIS/info@langlois-france.com/[https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=2389](https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id_attachment=2389)
- [28]: Mamadou Lamine Doumbia/ Mamadou Lamine Doumbia/ MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONNE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK/07/2002/file:///C:/Users/Admin/AppData/Local/Temp/MODELISATION\_ET\_SIMULATION\_DUNE\_MACHINE\_ASYNCHRON.pdf



## MEMOIRE

En vue de l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Energies renouvelables**

**Spécialité** : Energies renouvelables en électrotechnique

### Intitulé

## Conception d'une machine asynchrone à cage

### Présenté Par :

- Rezzougui Amal
- Bouzidi Soumya

Soutenu le 22/06/2021 devant le jury composé de :

<b>Président</b>	Grade
<b>Encadreur: Rekkal</b>	Grade
<b>Co-encadreur</b>	Grade
<b>Examineur</b>	Grade
<b>Examineur</b>	Grade

Session : (Juin 2021)  
Promotion : 2020 / 2021

## إهداء

الحمد لله الذي وفقنا و لم نكن  
لنصل إليه لولا فضل الله علينا  
أهدي ثمرة جهدي هذا العمل  
المتواضع إلى

إلى أعز إنسان إلى  
قلبي..... إلى روح أمي الطاهرة  
نزيهة

إلى من يعجز اللسان عن وصف  
فضلهما و تقف الكلمات جامدة  
أمام كلمتهما

أمي حبيبتي و أبي مأمني  
إلى زوجي الغالي و أبنائي عبد



## إهداء

إلى من زرعتني في أرض  
طيبة و سقاني بمكارم  
الأخلاق

إلى الذي تعب لأرتاح أنا  
إلى من علمني النجاح أبي  
حبيبي و أمي رفيقة دربي  
في الحياة

إلى كل من دعائه سر  
نجاحي زوجي الغالي  
إلى أغلى الحبايب أبنائي  
محمد و أبو بكر عبد  
الرحمان



# Remerciement Remerciement

D'abord nous devons remercier Dieu le puissant qui nous a donné la volonté, la patience et la force durant la réalisation de ce présent mémoire.

Notre second remerciement ira à madame REKAL Kahina. Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de Jury qui nous font l'honneur d'examiner ce travail. Enfin, nous tenons à remercier tous ce qui ont contribué à la réalisation de notre recherche.



## **Résumé**

La machine asynchrone a une variété d'utilisations qui l'ont rendue importante dans l'industrie et les transports. Sa solidité, ses faibles coûts d'achat et d'entretien et sa seule et unique source d'énergie en font son importance. Dans ce contexte, notre travail décrit l'étude et la modélisation d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE), une machine à induction asynchrone qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le rotor est généralement une cage d'écureuil ; Il profite donc de la robustesse et de la simplicité de l'entraînement à cage et des mêmes installations de fabrication. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée Cette dernière équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

**Mots clés** : Énergies renouvelables, énergie éolienne, vent, éolienne à cage d'écureuil, génératrices synchrones, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA),

## Table des matières

<b>Introduction general</b> .....	1
<b>Chapitre01: état de l'art des systèmes éoliens</b>	
I. Introduction.....	4
II. Etat de l'art des systèmes éoliens.....	5
II.1 Historique.....	5
II.2 Estimation des ressources éoliennes en Algérie .	6
II.3 Gisement éolien en Algérie.....	7
II.4 Le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama: .....	8
II.5 Chiffres clés de l'éolien dans le monde .....	8
III. Système éolienne .....	10
III.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne .	10
III.2 Constitution d'une éolienne .	12
III.3 Caractéristiques d'une éolienne (aérogénérateur) .	14
III.4 Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie .....	15
1) Production du courant.....	155
2) Redresser le courant.....	16
3) Réguler le courant.....	16
4) Stocker le courant .....	16
5) Onduleur .....	16
IV. Critères de choix de sites éoliens .....	17
IV.1 Comment faire de l'électricité avec du vent ?.....	17
IV.2 D'où vient le vent ? .....	18
IV.3 Énergie fournie par le vent .	18
IV.3.1 Énergie cinétique .....	18
IV.3.2 La masse de l'air .....	18
IV.3.3 Énergie théoriquement récupérable .....	19

*Puissance théoriquement récupérable .....	19
*Puissance récupérable .....	19
IV.4 Les éoliennes détournent le vent .....	19
Variation de la masse volumique de l'air .....	20
IV.5 Limite de Betz/Formule de Betz .....	20
Rendements.....	21
Le potentiel éolien.....	22
IV.6 La distribution de Weibull.....	22
Construction.....	22
Fonction de probabilité de densité de Weibull.....	22
IV.7 La distribution de Rayleigh .....	23
La puissance moyenne .....	23
La puissance du vent .....	23
VI. Les différents types d'éolienne.....	23
VI.1 L'éolienne verticale : principe et fonctionnement.....	23
□ L'éolienne Darrieus .....	23
□ L'éolienne Savonius .....	24
□ L'éolienne à voilure tournante .....	24
VI.2 L'éolienne horizontale : principe et fonctionnement.....	25
VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. ....	27
VII.1 Avantages.....	27
VII.2 Inconvénients .....	28
VIII. Conclusion.....	299
<b>Chapitre02 état de l'art des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens</b>	
I. Introduction.....	30
II. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones.....	30
II.1 Définition .....	30
II.2 Constitution d'un moteur asynchrone .....	32



a. Stator (inducteur).....	32
b. Rotor (Induit) .....	32
II.3 Les organes mécaniques: .....	34
II.4 Les types de moteur asynchrone. ....	34
II.5 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE). ....	34
II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage .....	37
Equation de tension:.....	37
Equation de flux:.....	37
II.7 schéma bloc de simulation:.....	38
Equation mécanique.....	38
II.8 Avantages et inconvénients.....	39
III. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones à aimant permanent (GSAP) .....	39
III.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents .....	39
III.2 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP).....	40
III.3 Constitution . ....	41
III.4 Modélisation d'un GSAP .....	41
III.4.1 Equations magnétiques .....	41
III.4.2 Equations électriques .....	44
III.4.3 Equations mécaniques.....	44
III.5 Avantages et inconvénients de la MSAP . ....	46
III.5.1 Avantages de la MSAP.....	46
III.5.2 Inconvénients de la MSAP .....	46
IV. systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) .....	47
IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Principe de fonctionnement d'une GADA.....	49
IV.3 Modèle mathématique de la GADA .....	50
IV.4 Avantages et inconvénients de la GADA.....	52
IV.4.1 Avantages .....	52

IV.4.2 inconvénients .....	52
V.Conclusion.....	52

**Chapitre 03 Simulation du système éolien utilisant les génératrices asynchrones à cage d'écureuil (GACE).**

I. Introduction.....	53
II. Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1 .....	53
II.1 Description.....	54
II.2 Objectif pédagogique .....	55
II.3 Identification des composants formant EOLYP .....	55
II.3.1 composition.....	55
II.3.2 caractéristiques de la génératrice .....	55
II.3.3 l'armoire électrique.....	55
III.Schema fonctionnel .....	57
IV. Fonctionnement .....	57
V. Outils de simulation Matlab/ Simulink.....	58
V.1 Matlab .....	58
V.2 Simulink.....	59
VI. Partie pratique.....	61
VI.1 les tableaux et les courbes .....	61
IV2. Développement du modèle SIMULINK du moteur asynchrone.....	64
IV.3 Résultats de la simulation.....	65
V. Conclusion.....	66
Conclusion generale.....	68
Bibliographie.....	70

## Liste des figures

Fig I.1: Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s) .....	07
Fig I.2: Capacité éolienne de 1996 à 2018 dans le monde (donnée GWEC) .....	09
Fig I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	10
Fig I.4: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.....	11
Fig I.5: Constitution d'une centrale éolienne.....	12
Fig I.6: Constitution de la nacelle.....	13
Fig I.7: Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie.....	14
Fig I.8: Limite de Betz.....	20
Fig I.9: Éoliennes type Darrieus.....	23
Fig I.10: Éolienne type Savonius.....	23
Fig I.11: L'éolienne à voile tournante.....	24
Fig I.12 : Éolienne à axe horizontal.....	25
Fig II.1: Stator d'un moteur asynchrone.....	32
Fig II.2: rotor bobiné.....	33
Fig II.3: rotor à cage d'écureuil.....	33
Fig II.4: Schéma d'un système de production éolienne avec GACE.....	35
Fig II.5- Caractéristiques d'une machine à induction typique.....	36
Fig II.6 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne.....	36
Fig II.7 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) industriel (TheSwitch).....	40
Fig II.8 GADA industriel pour éolienne.....	46
Fig II.9 Schéma d'un système de production éolienne avec GADA.....	47
Fig II.10 Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse.....	48
Fig II.11 schéma de principe de la double alimentation.....	48
Fig II.12 Passage de système triphasé au système biphasé.....	49
Fig III.1 Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1.....	53
FigIII.2 shéma fonctionnel de l'EOLYP.....	54
Fig III.3 l'armoire électrique.....	55
Fig III.4 Pupitre de commande.....	56
FigIII.5 moteur asynchrone.....	56
FigIII.6 les composant de schéma fonctionnel .....	57
Fig III.7 mode de fonctionnement moteur/ génératrice .....	58
Fig III.8 Librairie SIMULINK.....	60

Fig III.9 courbe de tension pour rotation rotorique 40Hz .....	61
Fig III.10 courbe de tension pour rotation rotorique 43Hz.....	62
FigIII.11 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz.....	62
FigIII.12 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz.....	63
Fig III.13 courbe de tension pour rotation rotorique 54.3Hz.....	64
Fig III.14 Modèle SIMULINK d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS).....	64
Fig III.15 Bloc de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	65
Fig III.16 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (Courant statorique).....	65
FigIII.17 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (la vitesse).....	66

### Liste des tableaux

Tableau I.1 vitesse du vent dans la wilaya de naama.....	08
Tableau I.2 Constitution de la nacelle .....	13
Tableau I.3 caractéristiques des éoliennes horizontales et verticale.....	25
Tableau II.1 des Avantages et inconvénients d'une GACE.....	38
Tableau III.1 Les principales librairies SIMULINK.....	60
Tableau III.2 (rotation du rotor 40Hz) .....	61
Tableau III .3(rotation du rotor 43Hz).....	61
Tableau III.4 (vitesse de rotation rotorique 45.5Hz) .....	62
Tableau III.5 (vitesse de rotation 47Hz).....	63
Tableau III.6 (vitesse de rotation de rotor 54.3Hz).....	63

## Acronyme

BC (Before Christ)

HQ (hydro Québec)

CDER (centre de développement des énergies renouvelables)

GWEC le Global Wind Energy Council

EWEA (European Wind Energy Association)

EDF: électricité de France

GAC: génératrices asynchrones à cage

GSAP: génératrices synchrones a aimant permanent

MSAP: moteur synchrones a aimant permanent

GADA: génératrice asynchrone à double alimentation

GACE: Générateur asynchrone à cage d'écureuil

Ec: Énergie cinétique

$\rho$  : masse du volume d'air (en kg)

v : volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>)

m : masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>)

p: puissance récupérable (Watt)

m : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

$\rho_0$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

v : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m<sup>2</sup>)

V<sub>S</sub> : débit volumique d'air (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>f</sub> : vitesse du fluide au niveau de la turbine (en m/s)

$\rho$  : masse volumique de l'air

$S$  : surface projetée du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

$\eta$ : le rendement

$k$  : le facteur de forme de Weibull

$c$  : le facteur d'échelle de Weibull m/s

$S$ : le glissement (Slip)

$N_s$  : la vitesse de synchronisation

$P$  : le nombre de pôles

$\Phi$ : le flux

$\omega_{ss}$ : le vecteur flux propre produit dans les enroulements statoriques.

$L_{aa}L_{bb}L_{cc}$ : Inductances propres des enroulements statoriques.

$(\theta_r)$ : la position angulaire électrique

$\omega_s$ : Vecteur flux total des enroulements statoriques.

$\omega_{sf}$  : Amplitude du vecteur flux de l'aimant permanent.

$[i_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]$ : vecteur courant des enroulements statoriques

$L_a$ : Inductance de fuite

$L_{aa0}$ : Inductance de magnétisation.

$L_{aa2}$  : Amplitude de première harmonique de l'inductance propre d'une phase

$T_e$  : Couple électromagnétique de la machine ;

$T_m$ : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ;

$B$  : Coefficient de frottement visqueux ;

$J$ : Moment d'inertie total ramené sur l'arbre du rotor.

$P$  : Nombre de pôles.

$W_m$  : Vitesse mécanique du rotor.

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*



## **Introduction générale**

Actuellement, la demande en énergie électrique est en constante augmentation. Diverses centrales électriques conventionnelles (nucléaires, hydrauliques, thermiques) utilisent des sources fossiles et naturelles telles que : l'uranium, les hydrocarbures et l'eau.

Les centrales thermiques sont responsables du rejet des gaz atmosphériques. L'un des avantages de l'énergie nucléaire est qu'elle ne pollue pas l'environnement, ce qui est indéniable, mais il existe toujours un risque d'accident nucléaire. Parmi les vrais problèmes qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures, il y a la difficulté de traiter et d'enfouir ces déchets. Pour faire face à ces nombreux problèmes, divers pays à travers le monde se précipitent pour utiliser des sources d'énergie propres et renouvelables. Elle s'est en effet engagée, à moyen terme, à augmenter la part des énergies renouvelables dans sa production d'électricité.

L'énergie éolienne a le plus grand potentiel énergétique après l'hydroélectricité. La puissance des éoliennes installées dans le monde est en constante augmentation au fil des années.

En 1889, avec l'invention de la machine asynchrone, qui ne cesse de progresser, et qui occupe une place importante dans l'industrie de la conversion de puissance (près de 80%), de par sa solidité, sa grande fiabilité, sa quasi absence de maintenance, sa facilité de mise en œuvre, sa simplicité de construction et à faible coût.

Parmi les domaines d'utilisation large de cette machine, on peut citer : les moteurs électriques, divers domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse variable, et même dans des applications de haute précision telles que l'aéronautique et la robotique et dans certains mécanismes industriels de haute précision. Il peut également être utilisé dans des systèmes tels que les machines-outils et en particulier les éoliennes.

Cependant, une machine asynchrone, contrairement à une machine à courant continu et à une machine synchrone où les grandeurs sont séparées, reste fortement connectée. Pour effectuer une formation fiable, une parfaite connaissance de ses normes est nécessaire. Dans ce thème, s'inscrit notre travail du projet de fin d'études « Conception d'une machine asynchrone à cage pour l'utilisation dans un système éolienne ».

Pour bien présenter notre travail nous l'avons organisé comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est un aperçu général sur l'état de l'art des systèmes éoliens.
- ✓ Dans le deuxième chapitre nous exposons un rappel de la machine synchrone, particulièrement la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), et la machine asynchrone spécialement la machine asynchrone à cage d'écureuil.

- ✓ Le troisième chapitre est consacré à une étude pratique sur le EOLIENNE / EOLYP V1.1, qui a été réalisée dans le laboratoire d'énergie renouvelable dans le centre universitaire SALHI AHMED NAAMA
- ✓ Nous terminons le travail par une conclusion générale.

*Chapitre 01*  
*état de l'art*  
*des systèmes*  
*éoliens*

## I. Introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Les sources d'énergies renouvelables ont fait l'objet, au cours des dernières années, d'une attention accrue en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles, pour atténuer les effets des changements climatiques et pour répondre à la croissance globale des besoins énergétiques. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde.

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

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

Le présent chapitre entame des généralités sur l'état de l'art des systèmes éoliens, en traitant son historique, les chiffres clés de l'éolien dans le monde, le principe de fonctionnement d'une éolienne, la constitution d'une éolienne, schéma électrique d'un générateur éolien, comment

faire de l'électricité avec du vent ?, La puissance du vent, Les différents types d'éoliennes passant par le gisement éolien en Algérie sa carte des vents et le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama et nous concluons avec les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

## II. Etat de l'art des systèmes éoliens

### II.1 Historique [01]

**BC (Before Christ):** Première utilisation du vent par l'homme; par l'aération et le séchage

**4000 BC:** Découverte du bateau à voile; exploration du monde, développement du commerce en facilitant les échanges mondiaux.

**600 BC:** Invention du moulin à vent en Iran (Perse ou Égypte ancienne).

**6<sup>ème</sup> siècle:** Généralisation du moulin à vent en Europe

**12<sup>ème</sup> siècle:** Moulin à vent servant à pomper l'eau, moudre le grain, produire de l'huile végétale.

**12<sup>ème</sup> -18<sup>ème</sup> siècle:** Amélioration continue des modèles existants, meilleure portance aérodynamique.

Apparition des turbines éoliennes au Canada au 18<sup>ème</sup> siècle.

**1800 :** "American water pumping windmills" pour pomper l'eau des puits sur les ranchs américain;

**1887-1888:** L'américain Charles F. Brush, construit la première éolienne entièrement automatisée qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filaments, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs, haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 KW.

**Jusqu'en 1920:** la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.

**1939:** L'éolienne Smith-Putnam fut la première éolienne au monde de la taille de 1 MW. Construite en 1939 et connectée au réseau en 1941. Dans Castleton, Vermont (une ville de la Nouvelle-Angleterre); dont les caractéristiques suivantes:

- 1,25 MW, 53 m diamètre, 36 m hauteur;
- Pales de 2,4 m x 20 m, 8 tonnes;
- Surface en inox;
- 1100 heures avant la rupture d'une aube en un point faible connu, qui n'avait pas été renforcé en raison des pénuries de matériaux en temps de guerre.

---

1. Daniel R. Rousse /Énergies renouvelables/L'énergie éolienne/19/10/2019//http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1251

- Plus grande éolienne jamais construite jusqu'en 1979.

**20 siècle:** Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'évolution des pales commence lorsque plusieurs ingénieurs (en aéronautique) cherchent une amélioration de l'efficacité, de la portance, de la production.

**1955:** Éolienne expérimentale de 800 KVA installée en France de 1955 à 1963

**1971:** Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance de 5MW

**1973:** Crise pétrolière, plusieurs pays financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables.

**1988:** Au Québec –Cap-Chat : «Éole» diamètre = 64 m, longueur de corde = 2,4 m, puissance= 4 Mw. La plus grande au monde à son époque

**2008:** ENERCONE-126: diamètre = 127 m, hauteur = 135 m, puissance = 7,5 MW

**2001:** Au Québec; plan HQ (hydro Québec)

- ✓ 2002-2006: 100 MW / an
- ✓ 2001 à 2004: 500 MW
- ✓ 2012: Puissance 1348 MW (13 parcs opérationnels, 20 parcs en construction ou autorisation, 40 parcs en projets.

**2012:** C'est au Royaume-Uni que le plus important parc éolien en mer installé dans le monde était situé, avec 175 éoliennes implanté à plus de 20 km des côtes sud-est du pays (entre Kent et Essex) London Array, inauguré le 4 juillet 2012 avec puissance de 630 MW installés.

## II.2 Estimation des ressources éoliennes en Algérie

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (centre de développement des énergies renouvelables) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes : [02]

- Deux zones sur le littoral
- Trois zones sur les hauts plateaux
- Quatre zones en sites sahariens.

Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

---

[02]: Dr Nachida Kasbadji Merzouk Directrice de Recherche/Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?/le 1er séminaire méditerranéenne sur l'énergie éolienne/ 10 et 11 avril 2010 /pdf [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_014\\_04.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_014_04.pdf)

Les trois régions situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWH/an.

En effet, Le climat saharien possède des caractéristiques climatiques propres telles que les températures élevées et les tempêtes de sable qui sont en phase avec l'augmentation de la vitesse du vent.

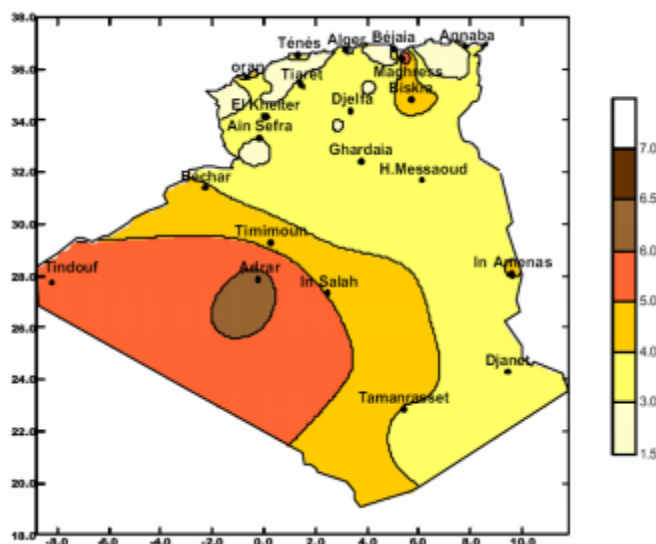


Fig I.1: Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s)

### II.3 Gisement éolien en Algérie

En Algérie [03], la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes.

[03] Lakhdar Walid ARABI, Samia SAÏDI , Pr Chems Eddine Chitour/Thème : De la Bougie à l'Electricité Durable : les Défis de 2030/Sujet : Le Souffle d'Eole pour produire de l'électricité /16ème journée de l'énergie, 50ème Anniversaire de l'Indépendance Centre de conférences SONELGAZ, 16 Avril 2012  
<https://developpementhumaindurablealgerie.files.wordpress.com/2016/03/exposc3a9-11.pdf>

Mais après le premier choc pétrolier, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. En ce qui concerne le pompage de l'eau, La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.

#### II.4 Le potentiel de vents dans la Wilaya de Naama:

D'après le météo la moyenne de la vitesse du vent dans les dernières dis ans dans la wilaya de naama est indiqué dans le tableau suivant:

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	decembre
Vitesse du vent	1.4	1.5	1.8	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4

Tableau I.1 vitesse du vent dans la wilaya de naama

#### II.5 Chiffres clés de l'éolien dans le monde

D'après le Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité installée du parc éolien mondial a été multipliée par 3 entre fin 2007 et fin 2012. [04]

En 2012, elle atteint près de 282 GW, l'équivalent de la puissance cumulée de près de 280 réacteurs nucléaires. Près de 44,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde. L'éolien a produit près de 460 TWh en 2011, soit approximativement 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde. Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien qui va atteindre environ 3 000 TWh à l'horizon de 2020.

[04]: L'éolien en Europe et dans le monde en 2017 /<https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>



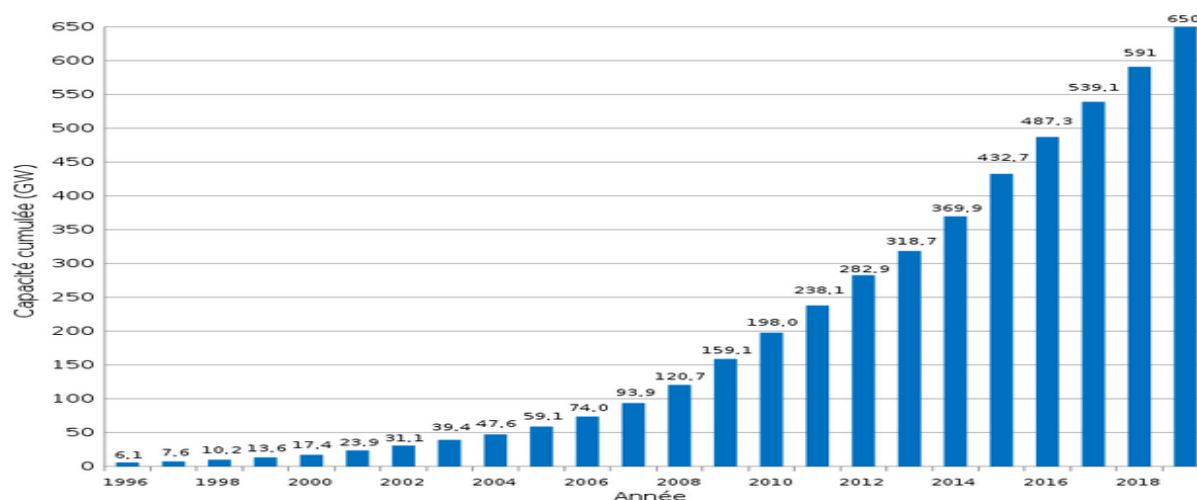


Fig I.2: Capacité éolienne de 1996 à 2018 dans le monde (donnée GWEC)

Actuellement, environ 75 pays dans le monde possèdent des installations éoliennes d'ordre commerciales, dont 22 dépassent déjà le seuil de 1 GW. De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États-Unis par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques émergentes, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir lourdement dans l'énergie éolienne.

De nouvelles fermes éoliennes en mer (éolien offshore) sont envisagées partout dans le monde. Le Danemark est l'un des acteurs les plus importants, avec son laboratoire très renommé ; le pays produit environ 20 % de son électricité avec des éoliennes. Ces dernières produisent 2 % de la production de l'électricité dans le monde. La taille la plus rentable et la plus pratique pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être autour de 600 kW à 3 MW, groupées dans de grandes fermes éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de «puissance rentable ».

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90.

Les perspectives sont toutes spectaculaires. EWEA est l'acronyme pour Européenne Wind Energy Association, l'Association Européenne de l'Energie Eolienne estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% pour 2040.

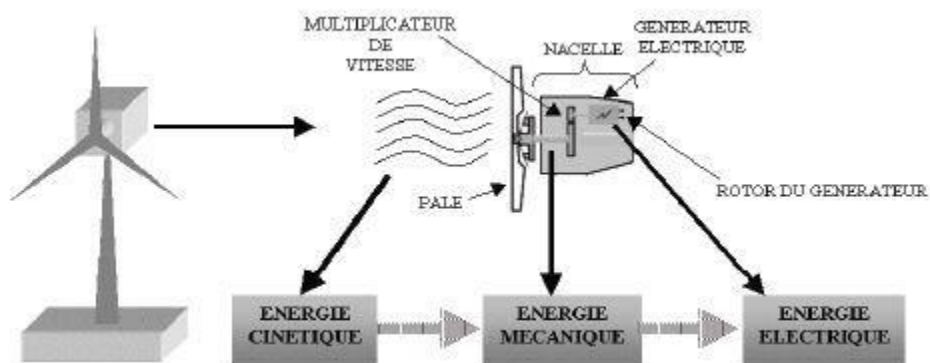


Fig I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [04]

### III. Système éolienne

#### III.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [05]

Les pales de l'éolienne balayent le champ des vitesses du vent qui varie dans le temps et autour du disque rotorique, modifiant ainsi localement la pression et la vitesse de l'air.

Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

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 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur.

[05]: Guediri, Abdel Karim (2017) Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/3959>

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 en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

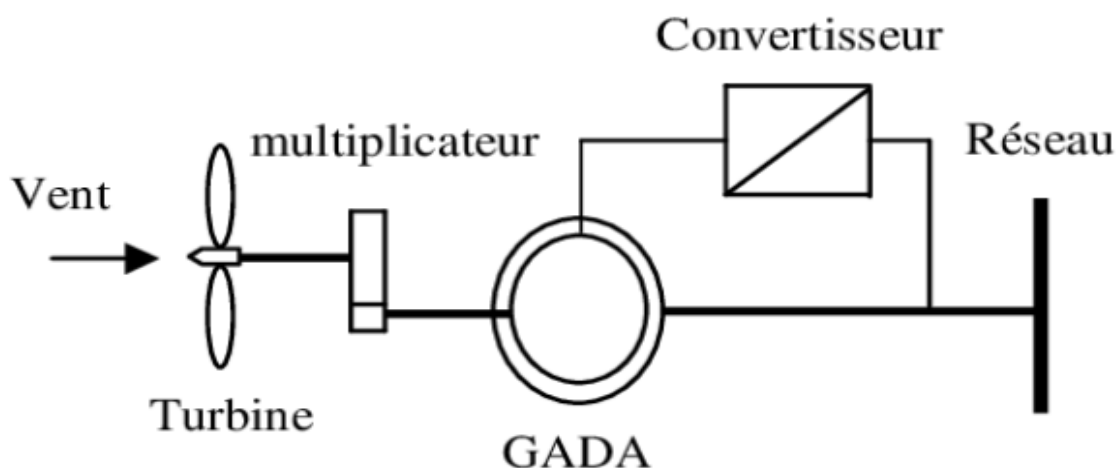


Fig I.4: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Sur la figure I.4 la turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, mais seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'éolienne.

### III.2 Constitution d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes comme illustre la figure I.5: [06]

\***Le mat** : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

---

[06]:MOKRANE SMAILI /MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION/ <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/572/1/Mokrane-Smaili.pdf>

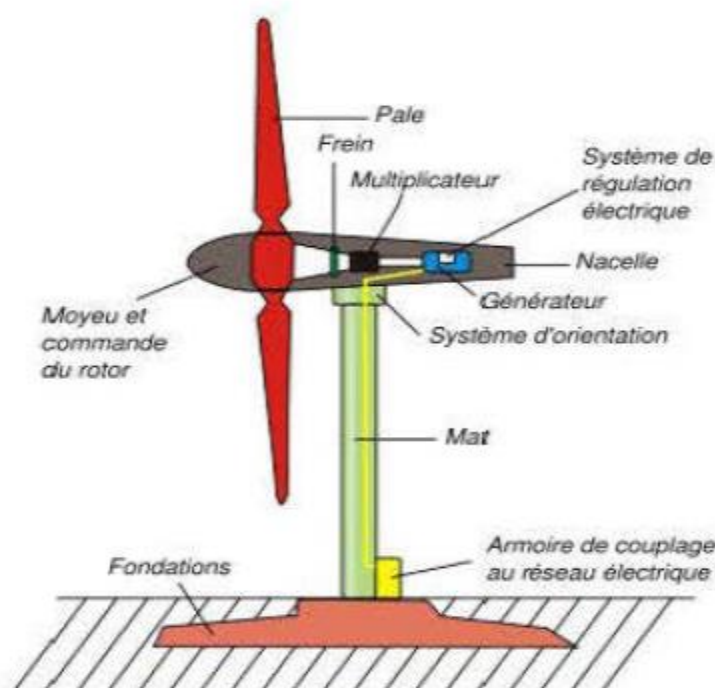


Fig I.5: Constitution d'une centrale éolienne.

**\*Les pales** : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient 10% en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires

**\*La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.

**\*La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne.

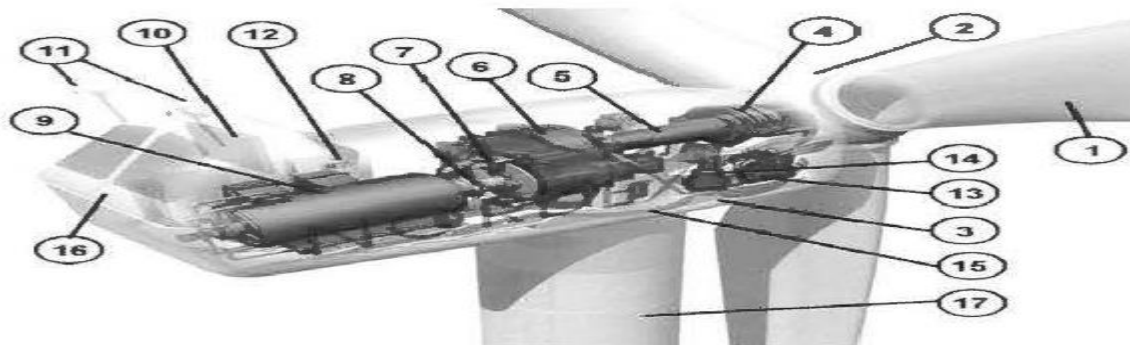


Fig I.6: Constitution de la nacelle

N	Composant
01	- Pales
02	- Moyeu rotor
03	-Nacelle
04	-Cardan
05	- Transmission
06	-Multiplieur de vitesse
07	-Frein à disque
08	- Accouplement
09	-Génératrice
10	-Radiateur de refroidissement
11	-Centrale de mesures du vent
12	-Contrôle
13	-Centrale hydraulique
14	-Mécanisme d'orientation face au vent
15	-Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
16	-Capot
17	-Tour

Tableau I.2 Constitution de la nacelle

### III.3 Caractéristiques d'une éolienne (aérogénérateur)

La principale caractéristique technique d'une éolienne est sa puissance de production, exprimée en Kilowatts (kW). La puissance d'une éolienne (en kW, kilowatts) mesure sa capacité de production d'électricité. C'est une caractéristique technique qui ne dépend que

de l'éolienne en elle-même, et non de l'endroit où elle est posée. Autrement dit, une éolienne de 1 kW de puissance ne pourra pas fournir plus d'énergie en 1 heure qu'1 kWh même si elle est alimentée en vent par un ouragan. [07]

### III.4 Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie

L'installation électrique d'une éolienne peut-être schématisée simplement. L'infographie suivante représente les éléments importants permettant de passer d'un courant alternatif « sale » à un courant électrique de fréquence et de tension stable utilisable par nos appareils électriques. [08]

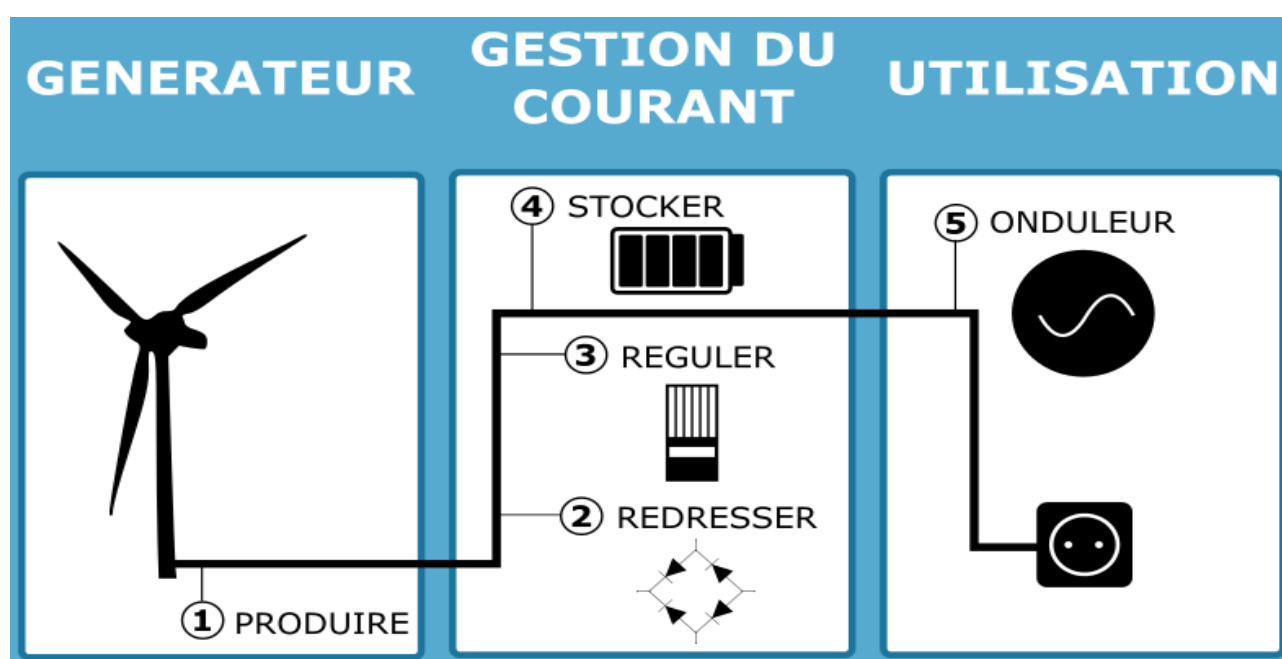


Fig I.7: Schéma d'une installation électrique éolienne – infographie

#### 1) Production du courant

La production du courant se fait via l'éolienne grâce au générateur. C'est un courant alternatif mais celui-ci ne peut pas être utilisé tel quel. En effet, bien que les appareils électriques fonctionnent avec du courant alternatif, ceux-ci requièrent une fréquence et une tension stables au risque d'être dégradés instantanément, et le courant directement produit par l'éolienne ne possède pas ces caractéristiques.

[07]:Eolienne domestique Technique /<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique>

[08]: 2021 Fabriquer Eolienne/expériences et tutoriels de fabrication autour de l'auto-construction d'éoliennes pour produire soi-même du courant électrique/ <http://www.fabriquer-eolienne.com/installation-electrique-eolienne-infographie/>

on dit qu'il s'agit d'un courant « sale » car sa fréquence et sa tension sont très variables au court du temps et en plus n'est produit que de façon intermittente car dépendante du vent, C'est pourquoi il faut passer par une série d'étapes permettant de rendre ce courant propre et utilisable par nos appareils.

## **2) Redresser le courant**

La première étape consiste à redresser le courant. Pour cela on utilise un pont de diodes qui va permettre de passer du courant alternatif au courant continu. Mais attention, ce courant bien qu'appelé continu, ne possède pas une tension stable.

## **3) Réguler le courant**

Le régulateur ou contrôleur de charge a deux fonctions. D'une part il va lisser le signal du courant, c'est à dire qu'il va permettre d'obtenir un courant continu de tension plus stable, les pics de tensions venant compenser les creux. Et d'autre part il va dissiper le courant superflu pour fournir un courant de sortie ne dépassant pas une tension voulue. A partir de ce moment, nous obtenons un courant continu propre cependant, en cas de ralentissement ou d'arrêt de l'éolienne, la tension chutera et nous n'aurons plus de courant.

## **4) Stocker le courant**

Cette étape permet de pallier au problème cité juste au-dessus. Quand l'éolienne produit du courant, le surplus est stocké dans des batteries d'accumulateurs et sera restitué lorsque l'éolienne ne produira pas suffisamment pour alimenter l'installation.

## **5) Onduleur**

L'onduleur est l'appareil qui permet de passer du courant continu au courant alternatif tout en étant capable de changer la tension. Cette étape permet donc d'exploiter notre courant par des appareils qui fonctionnent avec le courant.

Pourtant, il est possible de se passer de l'onduleur si l'on souhaite uniquement utiliser le courant continu. En effet, notre installation sans onduleur permet déjà d'exploiter notre courant en utilisant des appareils adaptés à la tension comme des lampes, des chargeurs par exemple de téléphones portables, etc...



## IV. Critères de choix de sites éoliens

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc. [09]

Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes :

1. site venté
2. peu de turbulences
3. une bonne facilité d'accès
4. proche du réseau électrique

### IV.1 Comment faire de l'électricité avec du vent ?

On utilise un aérogénérateur, plus communément appelé « éolienne ». Son fonctionnement est simple et s'inspire des moulins à vent. [09]

La machine se compose de trois pales (en général) portées par un moyeu constituant le rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter le rotor afin qu'il soit toujours face au vent.

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) en énergie mécanique (mouvement mécanique des pales). Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales dépend de leur taille: plus elles sont grandes, moins elles tournent rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement de l'arbre lent de transmission, couplé aux pales, à l'arbre rapide couplé à la génératrice. L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, et sa tension est augmentée à 20 000 volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut être distribuée aux consommateurs.

---

[09]: Parc éolien/Critères de choix de sites éoliens

[/https://eolienne.f4jr.org/parc\\_eolien#criteres\\_de\\_choix\\_de\\_sites\\_eoliens](https://eolienne.f4jr.org/parc_eolien#criteres_de_choix_de_sites_eoliens)

## IV.2 D'où vient le vent ?

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent. [10]

## IV.3 Énergie fournie par le vent

### IV.3.1 Énergie cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique, elle est en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse : [11]

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1.1)$$

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

$E_c$  : énergie cinétique (en joules)

### IV.3.2 La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air possède une masse volumique d'environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la masse volumique de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$m = \rho * v \quad (1.2)$$

$\rho$  : masse du volume d'air (en kg)

v : volume d'air occupé (en m<sup>3</sup>)

m : masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>)

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

---

[10]: EOL 87/L'énergie éolienne/ <http://eol87.fr/lenergie-eolienne/>

### IV.3.3 Énergie théoriquement récupérable

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface  $S$  et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égal à  $V_s$ . [11]

### IV.3.4 Puissance théoriquement récupérable

$$p = EC/S = 1/2 * m * v^2 = 1/2 * \rho_0 * v * S * V_S^2 \quad (1.3)$$

$p$ : puissance récupérable (Watt)

$m$  : débit massique du volume d'air traversant la surface  $S$  en 1 seconde (kg/s)

$\rho_0$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

$S$  : surface du dispositif de récupération (m<sup>2</sup>)

$V_s$  : débit volumique d'air (m<sup>3</sup>/s)

Ce qui revient à la formule qui suit.

### IV.3.5 Puissance récupérable

Puissance du vent contenue dans un cylindre de section

$$P_{\text{cinétique}} = 1/2 * \rho * a * S * V^3 \quad (1.4)$$

$V_{\text{turbine}} = a * V_f$ :

$V_f$  : vitesse du fluide au niveau de la turbine (en m/s)

$\rho$  : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

$S$  : surface projetée du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

Cette puissance (en Watt) est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

## IV.4 Les éoliennes détournent le vent

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent, en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent (voir loi de Betz).

---

[11]: Étude théorique d'une éolienne/ [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)

Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

#### IV.4.1 Variation de la masse volumique de l'air

La masse volumique ( $\rho$ ) varie avec différents paramètres :

**L'altitude (pression de l'air) :** plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent

**La température :** plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible

**L'humidité relative de l'air :** plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera faible mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible

#### IV.5 Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho S V^3 \quad (1.5)$$

$$\text{Avec } P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \text{ lorsque } V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (1.6)$$

$\rho$ : masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression

$S$  : surface du capteur éolien (en m<sup>2</sup>)

$V$  : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à 16/27, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Dans le cas d'une hélice de diamètre  $D$ , la limite de Betz est égale à :

$$P=0.37*\pi/4*D^2*V^3 \quad (1.7)$$

$$P=0.29*D^2*V^3 \quad (1.8)$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au carré des dimensions du rotor, et au cube de la vitesse du vent

La courbe suivante pour une hélice de diamètre  $D = 1\text{m}$ .

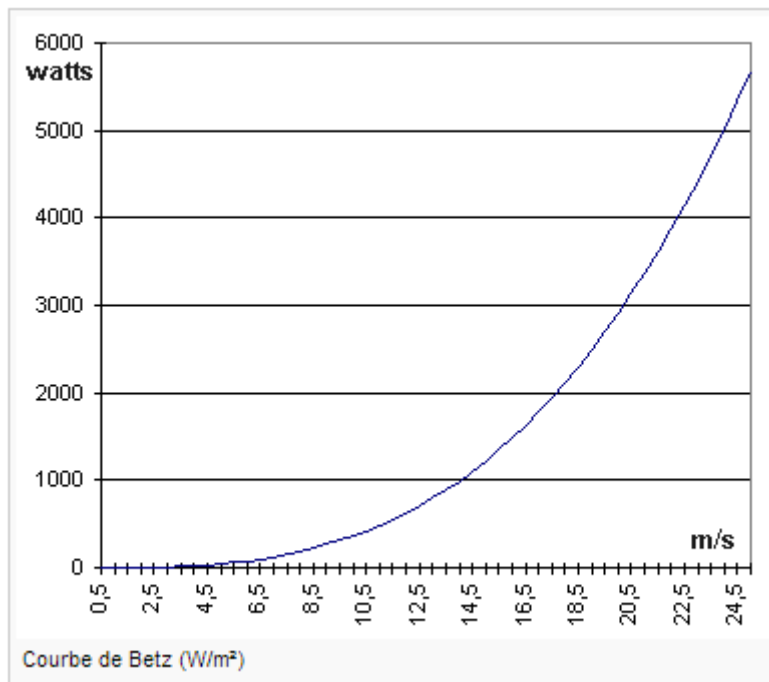


Fig I.8: Limite de Betz

#### IV.5.1 Rendements

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertie d'une forme à une autre, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- $0.20 < \eta < 0.85$
- Le multiplicateur ou le réducteur :  $0.7 < \eta < 0.98$
- L'alternateur ou la génératrice continue :  $0.8 < \eta < 0.98$
- Le transformateur :  $0.85 < \eta < 0.98$
- Le redresseur :  $0.9 < \eta < 0.98$
- Les batteries :  $0.7 < \eta < 0.8$
- Les pertes de lignes :  $0.9 < \eta < 0.99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.

#### IV.5.2 Le potentiel éolien

Le potentiel éolien théorique mondial est de  $10^6$  TWh/an. La production mondiale (2011) s'élève à 460TWh/an. La consommation mondiale d'électricité (2011) est de 20 000 TWh/an.

### IV.6 La distribution de Weibull

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull. C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du vent. Ce modèle permet d'optimiser la conception des éoliennes pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité.

Le coefficient de Weibull traduit la distribution des vitesses du vent et est déterminé par la courbe de distribution Weibull. Pour un facteur de forme égale 2 on parle de la distribution de Rayleigh

#### IV.6.1 Construction

On mesure la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes au moyen d'un anémomètre. Les valeurs obtenues sont alors réparties en différentes vitesses de vent. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse.

#### IV.6.2 Fonction de probabilité de densité de Weibull

$$F(v)=(k/c)*(v/c)^{(k-1)}*\exp*[-(v/c)]^k \quad (1.7)$$

$$F(v)=k/c^{-k} *v^{k-1}*\exp^{-(v/c]k} \quad (1.8)$$

La fonction de probabilité de densité de Weibull est destinée à refléter la probabilité qu'un événement se produise entre deux points. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent supérieures à zéro sera égale à la probabilité que le vent souffle quelque part entre ces deux vitesses. Sur la courbe de puissance ci-contre, nous pouvons déterminer les constantes des paramètres de Weibull :

**k** est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de la distribution et prend une valeur comprise entre 1 et 3. Plus la valeur est faible et plus la vitesse du vent est variable tandis-qu'une valeur de k élevée indique une vitesse de vent constante.

**c** est le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. **c** est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

## IV.7 La distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2. Les fabricants fournissent souvent les calculs de performance en utilisant la distribution de Rayleigh.

$$F(v)=2*(v/c^2)*\exp[-(v/c)]^2 \quad (1.9)$$

### IV.7.1 La puissance moyenne

La puissance moyenne du vent est déterminée grâce à la distribution de Weibull, connaître la vitesse moyenne du vent ne suffit pas à calculer la puissance moyenne. Il faudra prendre en compte la probabilité de l'occurrence de chaque vitesse de vent et la puissance correspondante, car la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. Les vents forts contenant le plus d'énergie influenceront d'autant plus sur la puissance moyenne, bien qu'ils aient une faible probabilité.

### IV.7.2 La puissance du vent

En multipliant la puissance de chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon la répartition de Weibull, nous pouvons calculer la distribution de l'énergie éolienne (en kWh/m<sup>2</sup>/an ou en W/m<sup>2</sup>) à des vitesses de vent différentes, cette distribution est appelée la densité de puissance.

## VI. Les différents types d'éolienne

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [11].

### VI.1 L'éolienne verticale : principe et fonctionnement

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus légère. Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

- **L'éolienne Darrieus** L'éolienne Darrieus est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché.

L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

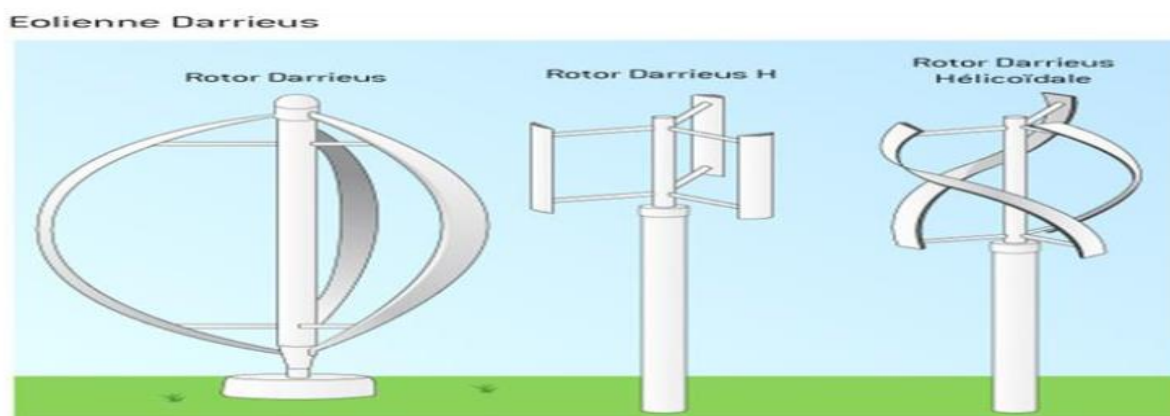


Fig I.9: Éoliennes type Darrieus

- **L'éolienne Savonius** Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, l'éolienne Savonius peut très bien fonctionner avec de très faibles vents, ce qui n'est pas le cas avec l'éolienne Darrieus.

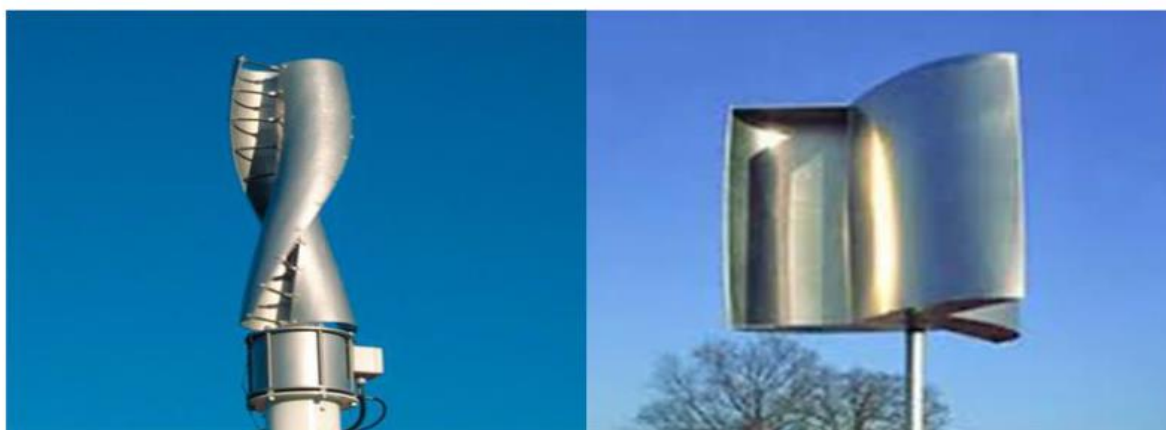


Fig I.10: Éolienne type Savonius

- **L'éolienne à voile tournante** inventée par Pierre Dieudonné en 2006, consiste en quatre pales verticales reliées à des bras horizontaux. L'ensemble pivote sous l'effet du vent et, à la manière d'une voile de bateau, s'adapte à son orientation. L'éolienne à



voilure tournante présente des pales qui s'orientent constamment par rapport à la direction du vent et ont, de ce fait, une grande efficacité et un meilleur rendement. Ce fonctionnement réduit aussi considérablement les nuisances sonores, tout en offrant un modèle peu encombrant. Toutefois, elle ne bénéficie pas de protection contre les tempêtes et nécessite une girouette pour être actionnée.



Fig I.11: L'éolienne à voilure tournante

## VI.2 L'éolienne horizontale : principe et fonctionnement

L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus « classique », celui que l'on aperçoit le plus souvent au bord des routes et qui incarne parfaitement l'image de cette énergie renouvelable. Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pâles tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne. Dans ce type d'éolienne, la force des hélices en rotation permet d'actionner un générateur qui est situé sur le haut de l'éolienne. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pâles en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. L'inconvénient principal de ces éoliennes est le bruit qu'elles engendrent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât est à prendre en compte au moment d'opter pour ce mécanisme.



Fig I.12 : Éolienne à axe horizontal

Le tableau ci-dessous détaille chacune de ces caractéristiques selon le modèle, horizontal ou vertical, de l'éolienne.[12]

Eolien domestique		Rendement	Force de vent	Résistance aux vents violents	Installation sur le bâti	Zone
Éolienne horizontale		Bon: entre 100W et 20kW selon le modèle	Élevée	Faible: nécessite l'installation de freins et d'un mât haubané	sauf très petite (éolienne), car elle crée des vibrations	Zone dégagée
Éolienne verticale	Modèle Darrieus	Moyen: au maximum 10kWh, mais peut être amélioré grâce à un démultiplicateur	Moyenne, à cause du poids du rotor	Bonne	✓	Zone dégagée ou urbaine
	Modèle Savonius	Bon, sur le moyen terme	Faible	Bonne	sous réserve que la toiture puisse soutenir le poids de l'éolienne	Zone dégagée ou urbaine, ou installation moins haute
	Modèle à voile (à voilure tournante)	Bon	Faible	Bonne	taille réduite	Zone dégagée ou urbaine

Tableau I.3 caractéristiques des éoliennes horizontales et verticale

[12]: total énergies/ quels sont les différents types d'éolienne <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes>

## VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après. [13]

### VII.1 Avantages

1- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

\* L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

2- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub>:

\* L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

\* Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Nox. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.

3- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

---

[13]: Le guide de l'éolienne/Le guide de l'éolienne/<https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/eolien/le-guide-de-l-eolienne-ooreka.pdf>

- 4- 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.
- 5- 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.
- 6- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- 7- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- 8- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- 9- ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- 10- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- 11- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- 12- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours.

## VII.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

1. L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
2. Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
3. L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

4. La qualité de la puissance électrique : 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.
5. Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

## VIII. Conclusion

Le fort mouvement actuel en faveur des énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne permet aujourd'hui au consommateur de pouvoir bénéficier d'une énergie renouvelable au meilleur tarif. En effet, grâce au panachage des sources de production, entre solaire, hydraulique ou éolien, les fournisseurs d'énergie ont aujourd'hui accès à une réelle quantité d'énergie verte disponible.

*Chapitre 02*  
*état de l'art des*  
*génératrices*  
*utilisées dans les*  
*systèmes éoliens*

## I. Introduction

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie, dans le cas d'une éolienne ce sera l'énergie mécanique transmise par le rotor à partir de l'énergie cinétique du vent.

Par définition, un alternateur est un "moteur" synchrone utilisé en génératrice. C'est une machine constituée d'un rotor ; (partie mobile) et d'un stator (partie fixe) générant un courant alternatif. Le rotor est constitué d'aimants permanents ou de bobinages.

Pour des raisons de coût et de rendement, l'alternateur est désormais utilisé dans la majorité des éoliennes. L'alternateur peut être une machine synchrone ou asynchrone, utilisée en vitesse fixe ou en vitesse variable.

Le suivant chapitre est organisé en trois parties:

1. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones à cage (GAC)
2. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones a aimant permanant (GSAP)
3. Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

## II. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones

### II.1 Définition

La machine asynchrone connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique et un dispositif mécanique. [14]

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse:

---

[14]: Pr. BENAMROUCHE Nacereddine/IDENTIFICATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL/2011-2012/  
[https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8558/LouniAmar\\_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8558/LouniAmar_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- en fonctionnement « moteur », dans deux quadrants du plan couple-vitesse, l'énergie électrique apportée par la source est transformée en énergie mécanique vers la charge.
- en fonctionnement « générateur », dans les deux autres quadrants, l'énergie mécanique de la charge est transformée en énergie électrique vers la source (la machine se comporte comme un frein).

Comme ce fonctionnement est sans discontinuité et ne dépend pas de la machine elle-même mais de l'ensemble source d'alimentation/machine/charge, la distinction moteur/générateur est « communément » faite par rapport à la finalité d'usage de la machine. C'est ainsi que dans le langage commun l'utilisation de « moteur asynchrone » pour désigner cette machine est fréquent.

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs :

- en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets ;
- pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur la machine asynchrone en avril 1888;
- en 1889, Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente la première machine asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construite industriellement à partir de 1891.

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot.



## II.2 Constitution d'un moteur asynchrone:

Un moteur asynchrone comporte deux parties principales : un stator ou inducteur et un rotor ou induit séparés par un entrefer de faible épaisseur. [15]

**a. Stator (inducteur):** Le stator de la machine asynchrone est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer un champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes des bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique



Fig II.1: Stator d'un moteur asynchrone

**b. Rotor (Induit)** C'est l'élément mobile du moteur. Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone peut être de deux types : bobiné ou à cage d'écureuil.

---

[15]: METROUH Mohamed MOUSSI Rafik/Identification d'une machine asynchrone à

Cage/ 11 juillet 2017/ [https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8588/MetrouhMohamed\\_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8588/MetrouhMohamed_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Le rotor bobiné** : est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans leurs encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors accessibles grâce à un système de bague- balais positionné sur l'arbre de la machine.

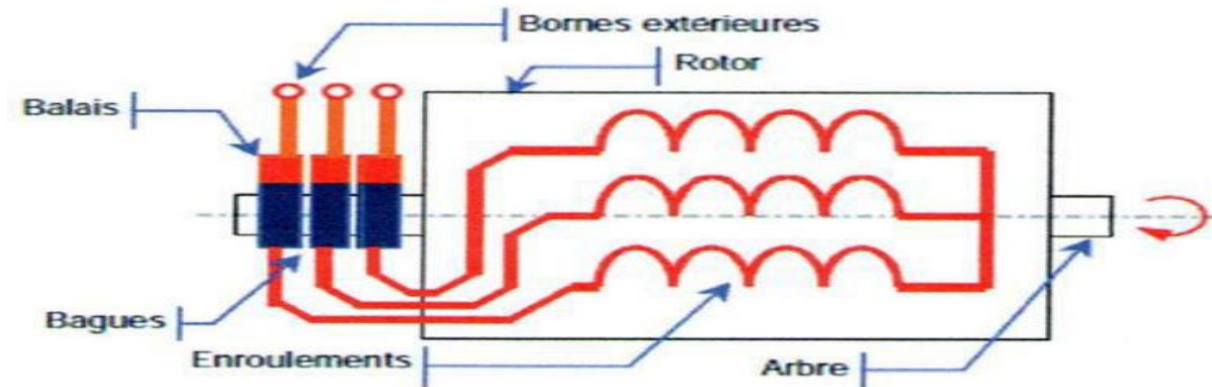


Fig II.2: rotor bobiné

**Le rotor à cage** : est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

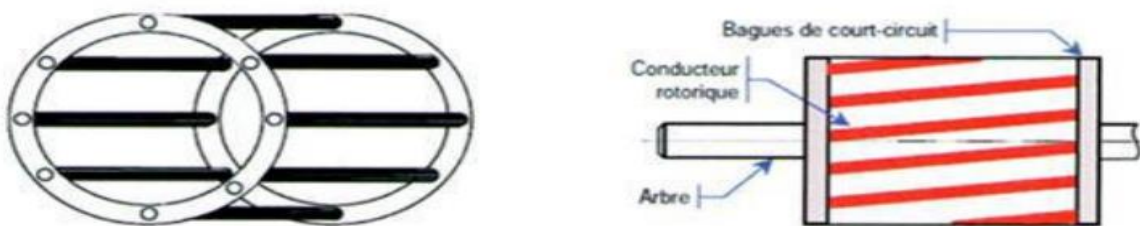


Fig II.3: rotor à cage d'écureuil

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Le rotor à cage d'écureuil peut aussi être considéré comme un enroulement polyphasé fermé.

**II.3 Les organes mécaniques:** permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur le quel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réductances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulement pour les machines de petite et moyenne puissance.

#### **II.4 Les types de moteur asynchrone:**

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor, dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même : il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse. Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine. [16]

#### **II.5 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE)**

La cage d'écureuil est un enroulement dans sa forme la plus simple. Au moment de la mise en circuit, un champ tournant est généré dans le stator. Le rotor à l'arrêt est traversé par le champ tournant, engendrant dans la cage d'écureuil une tension d'induction en raison du changement de flux. [17]

---

[16] Maxime DESSOUDE/Différents types de moteurs asynchrones Moteurs asynchrones - Choix et problèmes connexes/10 juin 1996

/ <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/moteurs-asynchrones-d3490/differents-types-de-moteurs-asynchrones-d3490niv10002.html>

[17] : Daniel FODOREAN /Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) /19/11/2009/<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/dimensionnement-rapide-des-machines-synchrones-a-aimants-permanents-msap-d3554/>

Le courant d'induction dans la cage d'écuréuil génère à son tour un champ magnétique autour des barres du rotor. Celui-ci est orienté de sorte qu'il souhaite bloquer le champ tournant. Mais comme le rotor peut tourner, il est entraîné par le champ tournant du stator. Le champ tournant génère donc un couple de rotation qui agit sur le rotor.

Plus le régime du rotor augmente, plus le rotor se rapproche du régime du champ tournant. La vitesse de changement de flux diminue, ainsi que la tension qui est induite dans l'enroulement rotorique. De ce fait, le couple, qui entraîne le rotor, diminue également. Si le régime du rotor atteignait la valeur du champ tournant, il n'y aurait aucun autre changement de flux dans le rotor. La tension d'induction et le courant d'induction dans le rotor ainsi que le couple seraient alors nuls. Le moteur serait à l'arrêt. C'est pourquoi le régime du rotor n'est toujours inférieur à la valeur du champ tournant  $n_s$ . La différence entre  $n$  et  $n_s$  est le régime de glissement  $\Delta n$ .

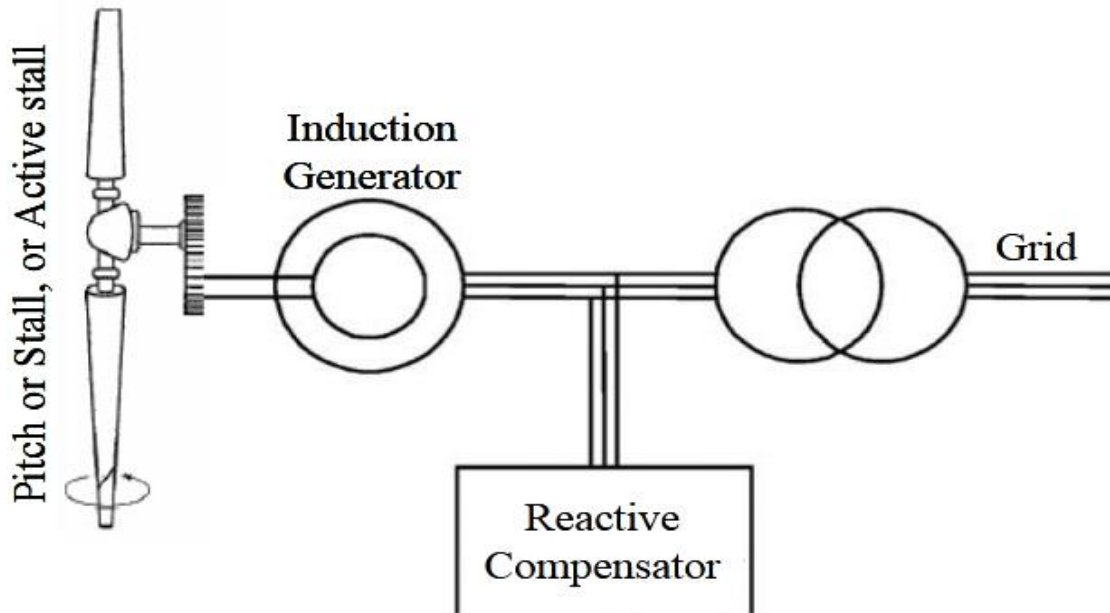


Fig II. 4: Schéma d'un système de production éolienne avec GACE.

La figure II.4 représente la courbe typique de couple-vitesse. La différence entre la vitesse de synchronisme  $N_s$  et la vitesse du rotor  $N_r$  est nommée glissement du moteur. Ainsi, le glissement (Slip) est donné par:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.1)$$

La vitesse de synchronisme du moteur à induction est donnée par:

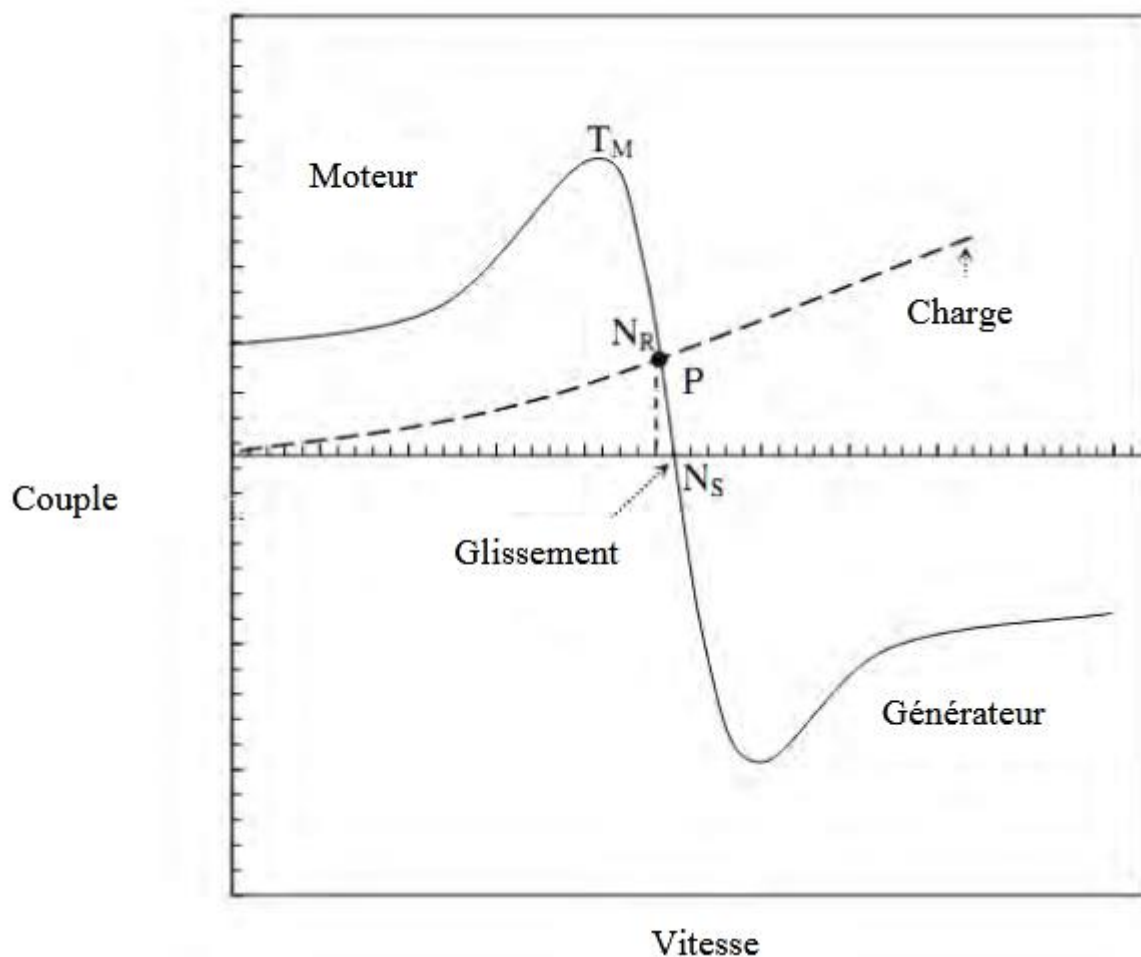
$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Où:  $f$  est la fréquence

$P$  est le nombre de pôles.

Quand on couple cette machine avec un réseau d'éolienne intégrée, initialement, il absorbe le courant à partir de réseau dans le cas d'un moteur. La vitesse augmente et la rotation de l'éolienne provoque le système à dépasser la vitesse de synchronisme  $N_s$ .

Ainsi, le rotor tournera plus vite que le champ magnétique tournant à  $N_s$  d'où inversion du couple qui devient négatif comme indiqué dans la Figure 2.5 Le courant circulera en sens inverse depuis le système vers le réseau et la machine fonctionnera en générateur



FigII.5- Caractéristiques d'une machine à induction typique.



Fig II.6 Générateur asynchrone à cage d'écureuil (GACE) industriel pour éolienne

## II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage

Après l'application de la transformation de Park aux équations des tensions des flux, le repère choisi est de champ tournant. [18]

### II.6.1 Equation de tension:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & \omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} \\ L_m \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_r \\ (\omega_s - \omega_r) L_m & L_m \frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

### II.6.2 Equation de flux:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le modèle de la machine asynchrone développé sous la forme d'équation d'état est:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (2.5)$$

$$\text{Ou } A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$x = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Phi_{L_s}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Phi_{L_s}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

## II.7 schéma bloc de simulation:

$$A = A1 + A2 + A3 \quad (2.8)$$

$$\frac{dx}{dt} = A_1 x + A_2 x + A_3 x + Bu \quad (2.9)$$

$$A1 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} & 0 \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) & 0 & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (1-\sigma) \\ 0 & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} & \sigma L_m \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega_r; A3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} (\omega_s - \omega_r) \quad (2.11)$$

$$\frac{dx}{dt} = A_1 x + A_2 x \omega_r + A_3 x (\omega_s - \omega_r) + Bu \quad (2.12)$$

### II.7.1 Equation mécanique

$$J = \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_r \quad (2.13)$$

Tel que le couple peut prendre toute une nuance de formule:

$$C_{em} = \frac{P L_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (2.14)$$

$$C_{em} = P (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (2.15)$$

## II.8 Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• fabrication assez simple</li> <li>• machine robuste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rendement relativement faible (nécessité d'avoir des pertes au rotor pour produire du couple)</li> <li>• difficulté d'évacuer les pertes joules au rotor (refroidissement difficile).</li> <li>• Mauvais facteur de puissance</li> </ul>

Tableau II.1 des Avantages et inconvénients d'une GACE

## III. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones à aimant permanent (GSAP)

### III.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

Le vocable " machine synchrone" comme le mentionne, regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour une machine synchrone à aimants permanents, un tel fonctionnement est obtenu grâce au champ magnétique rotorique généré par des aimants. [19]

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

[19]: GUILLAUME PONGO NYOUMEA/ MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/Avril2018/https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf



Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse

En réalité, une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible. Elle peut fonctionner en mode moteur tout comme en mode générateur.

Sa particularité par rapport aux autres machines conventionnelles, réside au niveau du champ magnétique produit par les aimants permanents au rotor. Mais son bobinage statorique reste identique à celui des autres machines.

### **III.2 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP)[20]**

Un Générateur Synchrone à Aimant Permanent (GSAP) se compose d'un rotor et d'un stator triphasé comme un générateur asynchrone représenté. Ces générateurs sont les plus aptes à rivaliser avec les générateurs asynchrones pour les applications éoliennes. En fait, ils sont adaptés pour les petites éoliennes et ont un certain nombre d'avantages, à savoir:

- 1- simple et configuration plus efficace dans le rotor avec l'aimant permanent (auto-excitation)
- 2- densité de puissance élevée
- 3- rendement élevé
- 4- chaleur dissipée de manière efficace

---

[20] LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/ <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>



Fig II.7 Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) industriel (TheSwitch).

### III.3 Constitution

Comme tout actionneur électrique, la machine synchrone à aimants permanents est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le stator renferme un bobinage alimenté en triphasé, et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation. Quant au rotor, son champ magnétique produit est généré par des aimants permanents.

Le stator de structure ordinairement lisse, porte des encoches à l'intérieur desquels sont disposés des enroulements de phases. En mode générateur la machine fournit de l'énergie au réseau, tandis qu'en mode moteur elle en consomme plutôt. Le rotor est généralement à pôles lisses ou à pôles saillants. [21]

### III.4 Modélisation d'un GSAP: la modélisation d'un GSAP ce fait comme suit [22]

#### III.4.1 Equations magnétiques

Par hypothèse, le circuit magnétique de la machine est non saturé. Ce postulat entraîne l'additivité des flux et donc, les flux totalisés sont fonction des courants qui circulent dans les enroulements statoriques. Les équations de flux pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents sont les suivantes :

---

[21]: Cours machine synchrone/ Lycée P. Mendès France Epinal/ [http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours\\_TD\\_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf](http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf).

[22] : GUILLAUME PONGO NYOUMEA/MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>

$$\omega_{as} = \varepsilon(L_{aa} * i_a + L_{ab} * i_b + L_{ac} * i_c) \quad (2.22)$$

$$\omega_{bs} = \varepsilon(L_{ba} * i_a + L_{bb} * i_b + L_{bc} * i_c) \quad (2.23)$$

$$\omega_{cs} = \varepsilon(L_{ca} * i_a + L_{cb} * i_b + L_{cc} * i_c) \quad (2.24)$$

$$\omega_{ss} = \begin{bmatrix} \omega_{as} \\ \omega_{bs} \\ \omega_{cs} \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Où:

$\omega_{ss}$ : est le vecteur flux propre produit dans les enroulements statoriques.

$L_{aa}L_{bb}L_{cc}$ : Inductances propres des enroulements statoriques.

$L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$  Inductances mutuelles des enroulements statoriques.

Le flux total produit est la somme du flux propre créé au stator par les courants traversant les enroulements, et du flux produit par les aimants permanents au rotor. Nous considérons une variation sinusoïdale du vecteur flux de l'aimant permanent en fonction de la position angulaire électrique  $(\theta_r)$  les trois phases au stator.

$$[\omega_s] = [\omega_{ss}] + [\omega_{sf}] = \varepsilon[L_s][i_s] + [\omega_{sf}] \quad (2.26)$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$[\omega_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Où:

$\omega_s$ : Vecteur flux total des enroulements statoriques.

$\omega_{sf} = [\omega_{asf} \quad \omega_{bsf} \quad \omega_{csf}]$ : vecteur flux de l'aimant permanent projeté sur les trois enroulements statoriques.

$\omega_{sf}$  : Amplitude du vecteur flux de l'aimant permanent.

$[L_s]$  : Matrice des inductances statoriques

$[i_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]$ : vecteur courant des enroulements statoriques

$\theta_r$  : Position angulaire électrique du rotor.

Avec l'hypothèse de la répartition sinusoïdale de la force magnétomotrice dans les enroulements statoriques, la matrice des inductances statoriques se réduit à deux termes dont l'un est constant et l'autre qui varie en fonction de la position angulaire électrique du rotor.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta_r)] \quad (2.29)$$

Avec:

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{aa0} & -\frac{1}{2}L_{aa0} & -\frac{1}{2}L_{aa0} \\ -\frac{1}{2}L_{aa0} & L_{aa0} + L_a & -\frac{1}{2}L_{aa0} \\ -\frac{1}{2}L_{aa0} & L_{aa0} & L_{aa0} + L_a \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$[L_{s2}(\theta_r)] = L_{aa2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_r) & \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_r) \\ \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(2\theta_r) & \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Où:

$L_a$ : Inductance de fuite

$L_{aa0}$ : Inductance de magnétisation.

$L_{aa2}$  : Amplitude de première harmonique de l'inductance propre d'une phase

### III.4.2 Equations électriques

Les équations électriques générales de la machine synchrone à aimants permanents dans un référentiel fixe (as, bs, cs) lié au stator s'expriment de la façon suivante.

$$[\mathbf{v}_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}[\omega_s] \quad (2.32)$$

Avec:

$$[\mathbf{v}_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T: \text{Vecteur des tensions statoriques} \quad (2.33)$$

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}: \text{Matrice des résistances statoriques} \quad (2.34)$$

En remplaçant l'équation de flux dans  $[\mathbf{v}_s]$  on obtient finalement l'équation des tensions  $v_s = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}(\varepsilon[L_S][\mathbf{i}_s] + [\omega_{sf}])$  (2.35)

$$v_s = \varepsilon[\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_s] + (\varepsilon[L_{S0}] \frac{d}{dt} [\mathbf{i}_s] + \omega_r \frac{d(L_{s2}(\theta_r))}{d\theta_r} [\mathbf{i}_s] + \omega_r \frac{d[\omega_{sf}]}{d\theta_r}) \quad (2.36)$$

### III.4.3 Equations mécaniques

Selon la deuxième loi de Newton appliquée à un corps en mouvement, l'équation fondamentale de la mécanique peut s'écrire:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - B\omega_m \quad (2.37)$$

$$\text{Ou: } \omega_r = P\omega_t \quad (2.38)$$

Avec:

$T_e$  : Couple électromagnétique de la machine ;

$T_m$ : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ;

$B$  : Coefficient de frottement visqueux ;

$J$ : Moment d'inertie total ramené sur l'arbre du rotor.

$P$  : Nombre de pôles.

$W_m$  : Vitesse mécanique du rotor.

Le couple électromagnétique produit pour un actionneur électrique en rotation, est due par l'interaction des flux statoriques et rotoriques. Il est obtenu à partir de la dérivée de la co-énergie magnétique par rapport à la position électrique du rotor.

$$T_e = \frac{\partial W_m}{\partial \theta_r} \quad (2.39)$$

Où:

$W_m$  est la co-énergie magnétique.

En régime non saturé, cette co-énergie magnétique est exprimée par la relation:

$$W_m = \frac{1}{2} [i_s]^T [L_s] [i_s] + W_{ma} \quad (2.40)$$

Avec  $W_{ma}$ , la co-énergie constante des aimants.

En substituant les dernières équations on aboutit à l'équation:

$$T_e = p \left( \frac{1}{2} [i_s]^T \frac{\partial [L_s]}{\partial \theta_r} [i_s] + [i_s]^T \frac{\partial [W_{ma}]}{\partial \theta_r} \right) \quad (2.41)$$

Nous venons d'établir des équations électromécaniques en grandeurs de phase qui déterminent le fonctionnement de la MSAP dans le référentiel fixe lié au stator. On observe que les équations établies ne sont pas linéaires, puisque les inductances statoriques dépendent de la position relative du rotor par rapport au stator. Vu cette difficulté qui se présente pour la résolution analytique de ces équations, nous faisons recours aux formalismes mathématiques qui viendront faciliter leurs déterminations.

Pour rechercher les modèles adaptés à l'identification des paramètres de la MSAP, on utilise souvent le modèle de l'actionneur dans un repère lié au rotor, à l'aide de la transformation de Park

## III.5 Avantages et inconvénients de la MSAP

### III.5.1 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents sont devenues attractives et concurrentes de la machine à induction dans le domaine des systèmes d'entraînement électriques, sont de plus en plus utilisés pour des entraînements de haute technologie, de par leur présence grandissante dans des domaines applicatifs toujours plus diversifiés.

A titre d'illustration, quelques avantages de la MASAP, sont cités ci-dessous: [23]

- Couple volumique et puissance massique importants permettant l'utilisation de machines au design plus compact : caractéristiques très recherchées pour des applications embarquées.
- Rendement plus élevé grâce à l'utilisation d'aimants permanents en remplacement des enroulements rotoriques. Ainsi, le rotor n'a pas besoin d'être alimenté ce qui diminue les pertes (absence de pertes joules).
- Fiabilité de la machine en raison de l'absence de bagues et de balais.
- Simplicité de conception et d'entretien due également à l'absence de bagues et de balais.
- Performance dynamique élevée grâce à une densité de flux importante dans l'entrefer.
- Simplicité de contrôle en fonctionnement générateur avec notamment l'absence de régulation de vitesse et de tension.

### III.5.2 Inconvénients de la MSAP [23]

- Coût élevé à cause du prix des aimants.
- Problème de tenue en température des aimants permanents (250°C pour le samariumcobalt).
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).
- Impossibilité de régler l'excitation.

---

[23]: Sonia MOUZAOUI/Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de défauts de courts-Circuits et de désaimantations par la méthode des éléments Finis/<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8610/MouzaouiSonia.pdf?sequence=1>

- Pour atteindre des vitesses élevées. Il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser le courant statorique afin de démagnétiser la machine.

## IV. Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

### IV.1 Introduction[24]

Aujourd'hui, plus de 70% des éoliennes sont construites avec un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Beaucoup de fabricants, tels que Vestas, Gamesa, GE et REpower ont fourni le système d'éolienne avec ce concept comme représenté dans la Figure 2.7. En fait, la GADA a connu un grand progrès si on la compare avec la GACE

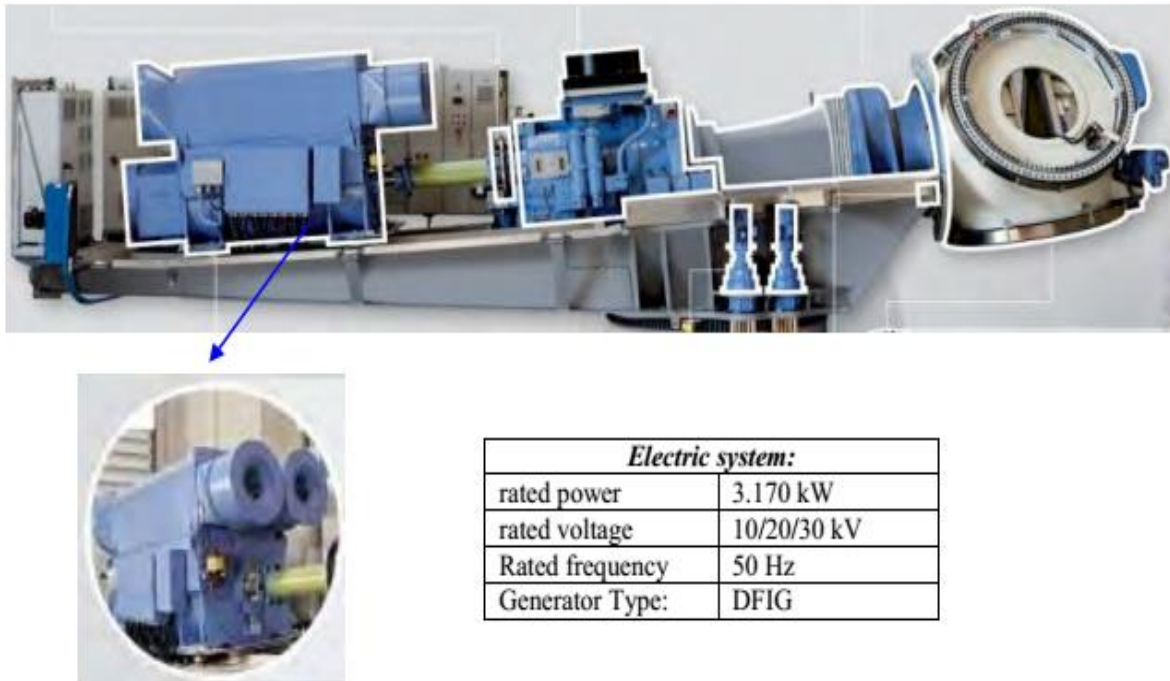


Fig II.8 GADA industriel pour éolienne

Le système représenté dans la Figure II.8- est constitué d'une éolienne avec GADA où le stator est relié directement au réseau tandis que le bobinage rotorique est relié via un système bagues-balais au convertisseur statique. Comme indiqué dans la Figure 2.9 la GADA peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur avec une plage de vitesses de rotor  $\pm \Delta w_r^{max}$  de l'ordre de la vitesse de synchronisme  $w_1$ .

[24]: <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>



De plus, de nouveaux types de générateurs qui peuvent changer la configuration de l'énergie éolienne sont en cours de développement où la nouvelle conception élimine la plupart des organes mécaniques, comme le système bagues-balais et la boîte de vitesses (gearbox) qui sont considérés comme des inconvénients à ce concept. L'objectif recherché est la réduction de la masse et du coût du système, une haute fiabilité et disponibilité. Dans cette perspective, il faut remarquer que la plupart des travaux de recherche ont tendance à utiliser les GADAs dans l'application éolienne car ils ont d'excellentes performances . Le fonctionnement à vitesse variable de la GADA offre de nombreux avantages pour réduire les coûts et a le potentiel pour être construite économiquement au-dessus des niveaux de puissance de 1,5 MW pour les applications off-shore.

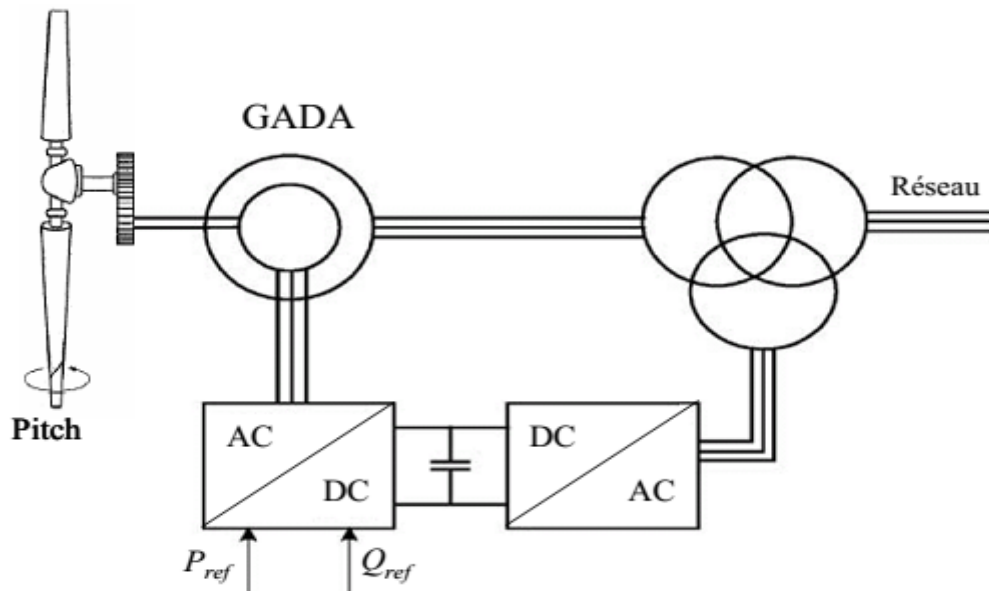


Fig II.9 Schéma d'un système de production éolienne avec GADA.

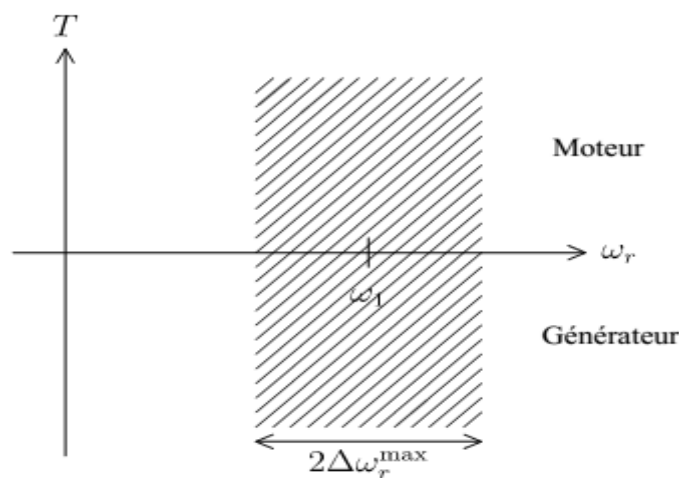


Fig II.10 Caractéristiques d'une GADA couple-vitesse.

## IV.2 Principe de fonctionnement d'une GADA

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage. [25]

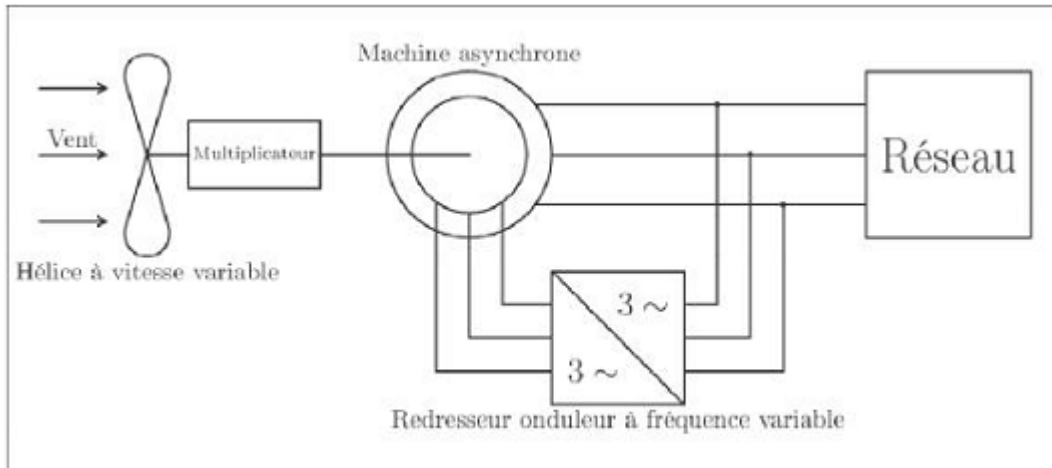


Fig II.11 schéma de principe de la double alimentation.

On connecte toujours le stator au réseaux mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotorique, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de taille réduite (figII-11) la puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc de glissement  $g$ .

[25]: LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/[https://fs.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/9113/LakrouzMadjid\\_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://fs.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/9113/LakrouzMadjid_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

### IV.3 Modèle mathématique de la GADA

Comme tous les systèmes physiques qui nécessitent une modélisation, celle-ci permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations. On distingue deux modèles mathématiques qui représentent la machine, à savoir le modèle élaboré dans le référentiel abc (modèle triphasé) découlant des équations différentielles qui régissent le fonctionnement de la machine et le modèle issu de la transformation de Park ou de Concordia (modèle biphasé) utilisé couramment pour étudier les machines électriques. [26]

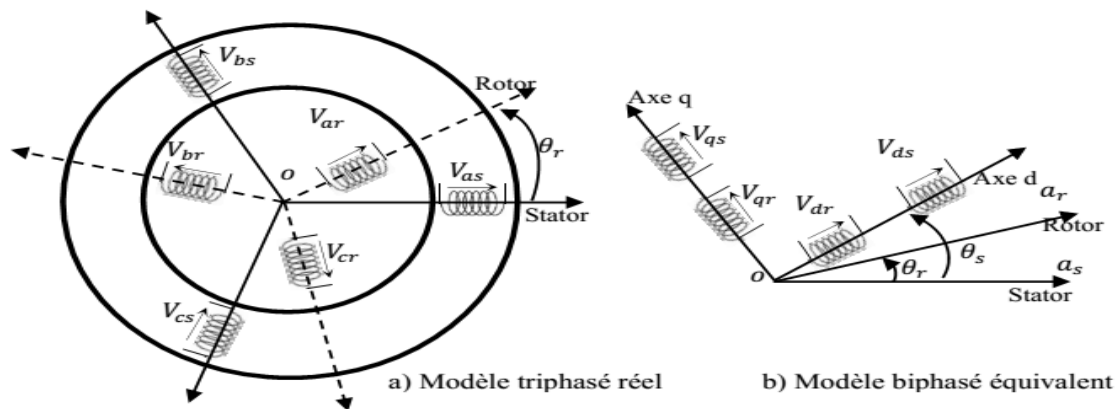


Fig II.12 Passage de système triphasé au système biphasé

La figure II.12 a représente l'enroulement statorique et l'enroulement rotorique triphasé de la GADA.

Dans un repère triphasé, la GADA est représentée par les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques suivantes:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (2.42)$$

Or, les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants, en faisant intervenir les différentes inductances comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \end{cases} \quad (2.43)$$

où  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  et  $[M_{sr}]$  sont les matrices d'inductances statoriques, rotoriques et mutuelles, respectivement. En remplaçant les expressions des flux de (2.43) dans les équations des tensions (2.42), les équations des tensions sous forme explicite deviennent :

[26]: Djilali Kairous/Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne/2019/

[https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous\\_uqac\\_0862D\\_10605.pdf](https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous_uqac_0862D_10605.pdf)

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}]\frac{d}{dt}[I_s] + \frac{d}{dt}[M_{sr}][I_r] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + [L_{rr}]\frac{d}{dt}[I_r] + \frac{d}{dt}[M_{sr}]^T[I_s] \end{cases} \quad (2.44)$$

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés d'axes  $abc$  en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes  $dq$  créant la même force magnétomotrice (fmm). Puisque la composante homopolaire est choisie orthogonale au plan ( $dq$ ), elle intervient uniquement pour équilibrer le système transformé. Comme le montre la figure (2.10), les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans le même repère biphasé tournant  $dq$ . L'angle utilisé par la transformation de Park, appliqué aux grandeurs rotoriques, correspond à la différence :  $\theta_e = \theta_s - \theta_r$ . Cet angle peut s'écrire sous la forme intégrale suivante :

$$\theta_e = \int \omega_s dt - N_p \Omega \quad (2.45)$$

où la pulsation  $\omega_s$  est issue d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) calée sur les tensions statoriques, alors que  $N_p$  et  $\Omega$  représentent le nombre de paires des pôles et la vitesse mécanique de rotation, respectivement. Une erreur dans le calcul ou dans la mesure de l'une de ces deux pulsations peut constamment s'intégrer, ce qui va faire que la commande n'est plus envisageable.

En appliquant la transformation de Park aux tensions et aux flux, nous obtenons le modèle électrique biphasé suivant:

$$\begin{cases} [V_{dqs}] = [R_s][I_{dqs}] + \frac{d}{dt}[\psi_{dqs}] + \omega_s J[\psi_{dqs}] \\ [V_{dqr}] = [R_r][I_{dqr}] + \frac{d}{dt}[\psi_{dqr}] + (\omega_s - \omega_r)J[\psi_{dqr}] \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\text{Avec } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Par ailleurs, la puissance mécanique convertie par la GADA conduisant à la réaction d'un couple électromécanique  $c_e$  s'écrit comme suit :

$$c_e = N_p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \omega_{qs} - I_{qr} \omega_{ds}) \quad (2.49)$$

Or, l'équation dynamique qui lie le couple électromagnétique à la vitesse mécanique de rotation s'écrit :

$$J_G \frac{d\Omega}{dt} = C_r - C_e - C_{frt} \Omega \quad (2.50)$$

Où  $J_G$  est l'inertie de la machine, alors que  $C_r$  et  $C_{f_{rt}}$  représentent couple résistant et le coefficient de frottement, respectivement.

#### **IV.4 Avantages et inconvénients de la GADA**

##### **IV.4.1 Avantages**

- fonctionnement avec vitesse variable.
- Puissance extraite optimisée
- Electronique de puissance dimensionnement 30% de la puissance nominale
- Machine standard
- Connexion de la machine facile à gérer
- Une magnétisation facile a gérée en cas de défauts sur le réseau

##### **IV.4.2 inconvénients**

- Maintenance de la boîte de vitesse
- Pris de l'électronique de puissance
- Contrôle et commande complexe
- Contact glissant bagues-balais

#### **V. Conclusion**

Chacune des technologies dont nous avons parlé dans ce chapitre a ses avantages et ses inconvénients qui guident notre choix d'applications dans le monde industriel.

*Chapitre 3*  
*Simulation du*  
*système éolien utilisant les*  
*génératrices asynchrones à*  
*cage d'écureuil (GACE).*

## I. Introduction

Notre partie expérimentale a été réalisée au niveau de laboratoire d'énergie renouvelable en utilisant le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1. On a pris cinq vitesses différentes de l'air pour obtenir des tensions, puis on a fait la simulation d'un moteur à cage par MATLAB/SIMULINK 2016.

## II. Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1



Fig III.1 Le simulateur EOLIENNE / EOLYP V1.1

## II.1 Description

EOLYP est un banc d'essais abordant l'étude d'une éolienne en hypersynchrone dans ses aspects production électrique, à l'exclusion des aspects mécaniques. En raison des nuisances sonores et des courants d'air incompatibles avec une ambiance de salle de classe, l'hélice a été remplacée par un moteur entraînant, à vitesse variable.

Le schéma fonctionnel présente le principe de fonctionnement. [27]

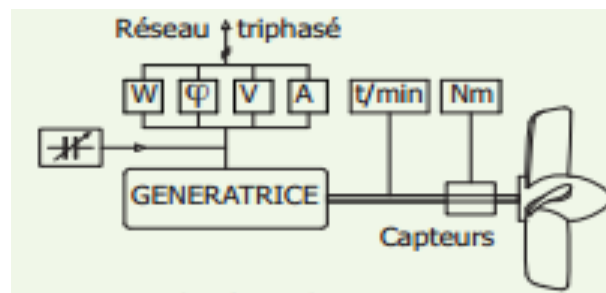


Fig III.2 schéma fonctionnel de l'EOLYP

Les composants de sécurité, placés dans l'armoire électrique, n'y sont pas représentés afin de simplifier la lecture.

L'hélice dont l'opérateur règle la vitesse, entraîne la génératrice de 0 à 1800 t/min.

Deux capteurs placés sur la ligne d'arbres, renvoient vers le pupitre qui les affiche, les informations vitesse de rotation et couple.

La génératrice est couplée au réseau triphasé public, à travers un banc de mesures électriques, indiquant :

- puissance active renvoyée vers le réseau
- tension entre phases
- intensité
- facteur de puissance

Le wattmètre à zéro central montre que selon la vitesse d'entraînement, la génératrice consomme ou produit de l'énergie mettant ainsi en évidence les fonctionnements en hypersynchrone et hyposynchrone. Le déphasage tension/courant évolue lui aussi avec la vitesse de rotation ainsi que l'indique le cosmètre à zéro central. La batterie de condensateurs réglable permet d'ajuster le  $\cos\phi$  au voisinage de 1 selon la vitesse et la puissance produite.

---

[27]: SIMULATEUR D'UNE EOLIENNE - RESTITUTION RESEAU/FABRICATION  
 LANGLOIS/info@langlois-france.com/https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id\_attachment=2389



## II.2 Objectif pédagogique

- Comprendre les principes mécaniques et électriques d'une éolienne
- Etudier les différents modes de fonctionnements hyposynchrone et hypersynchrone d'un moteur asynchrone.
- Etudier la synchronisation sur le réseau national.
- Calculer les rendements d'une chaîne de production d'énergie.
- Utiliser une pince ampèremétrique.

## II.3 Identification des composants formant EOLYP

### II.3.1 composition

- 1 Bâti sur roulettes, dim. 1200 x 750mm haut : 1820mm. Poids : 143kg
- 1 Moteur asynchrone 1,5 kVA
- 1 Génératrice
- 1 Dynamo tachymétrique / 1 capteur de couple
- 1 Pupitre de commande
- 1 Armoire électrique
- 1 boîtier de couplage sur le réseau

### II.3.2 caractéristiques de la génératrice

- moteur asynchrone 3 x 400VAC
- puissance active renvoyée sur le réseau : 0 à 1,2kVA
- rendement de la génératrice : 78%
- variation vitesse : 0 à 1800t/min

### II.3.3 l'armoire électrique



Fig III.3 l'armoire électrique

- 1) Voyant Marche
- 2) Voyant Présence tension

- 3) Armoire Technique
- 4) Bouton Arrêt d'Urgence
- 5) Sectionneur
- 6) Boutons M/A avec voyant
- 7) Commutateurs pour la batterie de condensateurs
- 8) Voyants défauts thermiques (voir Annexe)
- 9) Boîtier de connexion au réseau électrique
- 10) Fiche triphasée pour alimentation 400V-50hz de l'EOLYP

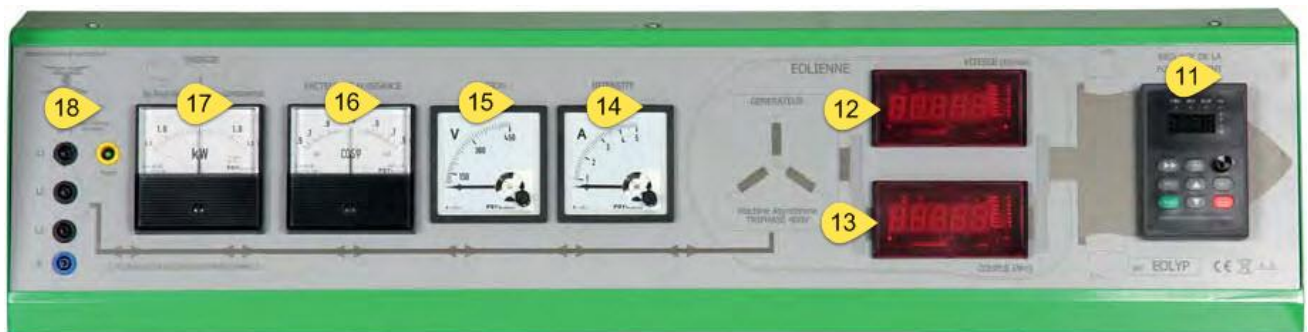


Fig III.4 Pupitre de commande

- 11) Interface du variateur de vitesse permettant la variation de la vitesse du vent donc du rotor de l'éolienne.
- 12) Afficheur en trs/min de la vitesse de rotation du rotor de l'Eolienne.
- 13) Afficheur en Nm du couple sur le rotor.
- 14) Afficheur de l'intensité  $I$  en ampères fournie par la génératrice de l'éolienne.
- 15) Afficheur de la tension  $U$  en volts fournie par la génératrice de l'éolienne
- 16) Afficheur du  $\cos \Phi$ .
- 17) Afficheur de la puissance en KW de la génératrice de l'éolienne.



Fig III.5 moteur asynchrone

- 18) Bornes de raccordement au réseau électrique.  $3 \times 400V + \text{Neutre} - 50\text{Hz} + \text{Terre}$ .
- 19) Dynamo tachymétrique  $10V/1000\text{trs/min}$  permettant la mesure de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne.

- 20) Moteur asynchrone permettant l'entraînement en rotation de la génératrice de l'éolienne. (Simule les pales de l'éolienne)
- 21) Capteur de couple permet la mesure du couple sur le rotor
- 22) Génératrice asynchrone de l'éolienne. 1800W/400V/4,1A triphasée

**III. Schéma fonctionnel** Insérer les différents numéros des composants trouvés précédemment.

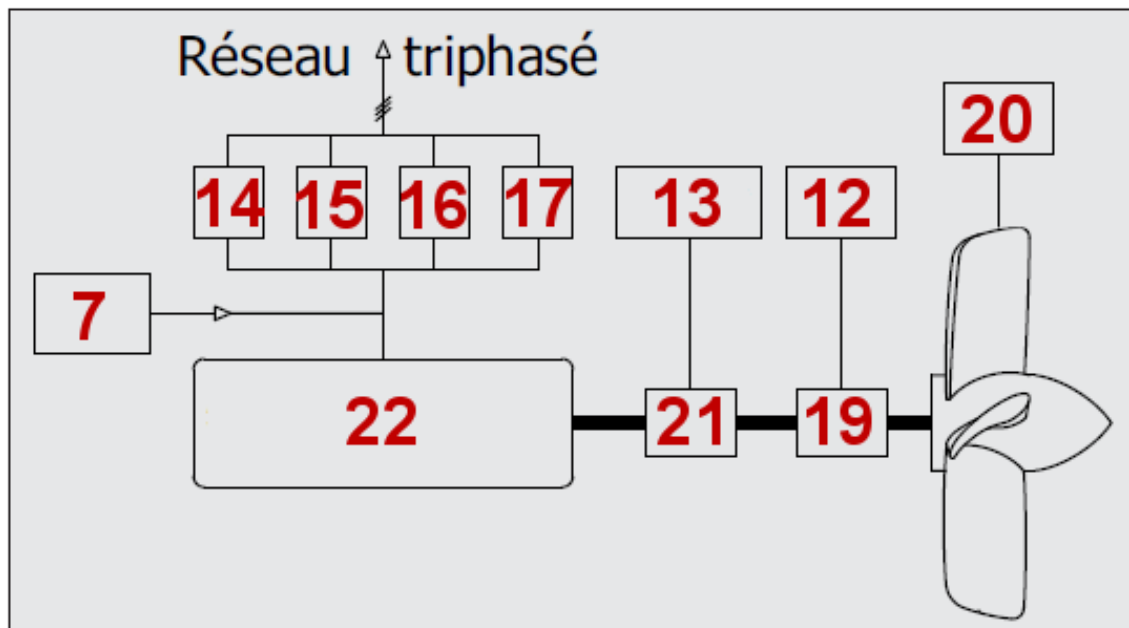


Fig III.6 les composants de schéma fonctionnel

#### IV. Fonctionnement

Les 3 bobines, de notre machine triphasée, sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  les unes des autres, un champ magnétique tournant est alors créé. Sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Ce champ balaye le rotor, les conducteurs qui composent ce dernier sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. Le rotor tourne alors dans le même sens de rotation que le champ magnétique mais à une vitesse légèrement inférieure donc légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.

Le rotor ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme car sinon la cage ne serait plus balayé par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des force de Laplace et du couple.

Maintenant si nous faisons tourner manuellement le rotor à la vitesse de synchronisme, le champ magnétique tourne alors à exactement la même vitesse que le rotor. De ce fait aucun

phénomène d'induction ne se produira dans le rotor et il n'y aura aucune interaction entre le rotor et le stator, le couple sera alors nul.

Mais, si nous faisons tourner manuellement le rotor à une vitesse supérieure au synchronisme (appelé alors fonctionnement en hyper synchrone) le rotor tournera donc plus vite que le champ magnétique, ce qui signifie que le stator commence à induire un fort courant dans le rotor.

Plus nous allons faire tourner vite le rotor plus grande sera la force électromagnétique qui sera convertie par le stator en électricité.

Lorsque la machine Asynchrone fonctionne en hyper synchrone elle devient donc Génératrice Hyper synchrone (voir FigIII.7).

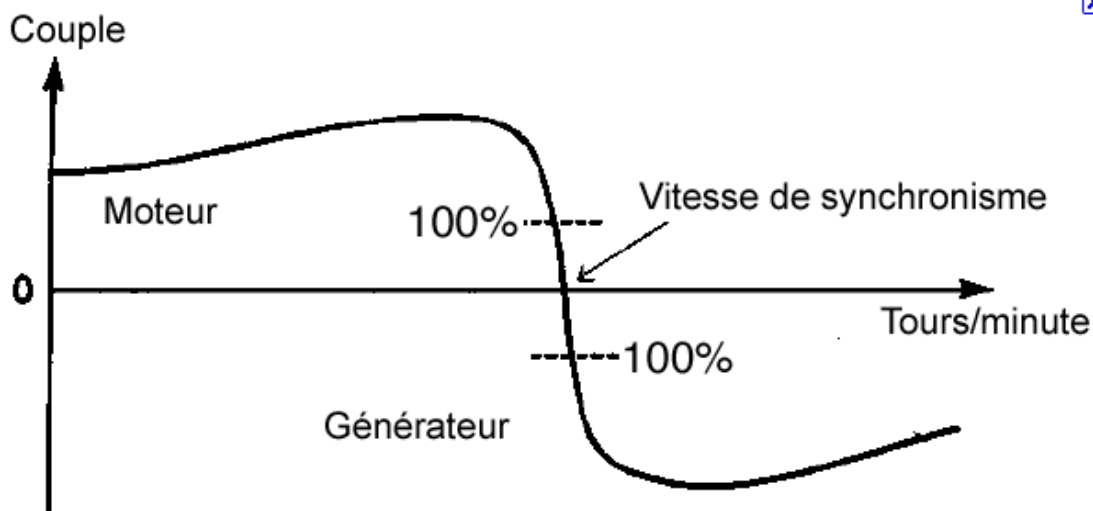


Fig III.7 mode de fonctionnement moteur/ génératrice

## V. Outils de simulation MATLAB/SIMULINK[28]

### V.1 Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique de calcul matriciel de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc

[28]: Mamadou Lamine Doumbia/ Mamadou Lamine Doumbia/ MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK/07/2002/file:///C:/Users/Admin/AppData/Local/Temp/MODELISATION\_ET\_SIMULATION\_DUNE\_MACHINE\_ASYNCHRON.pdf

Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice.

L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaires et industriels comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK.

## V.2 Simulink

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être

modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

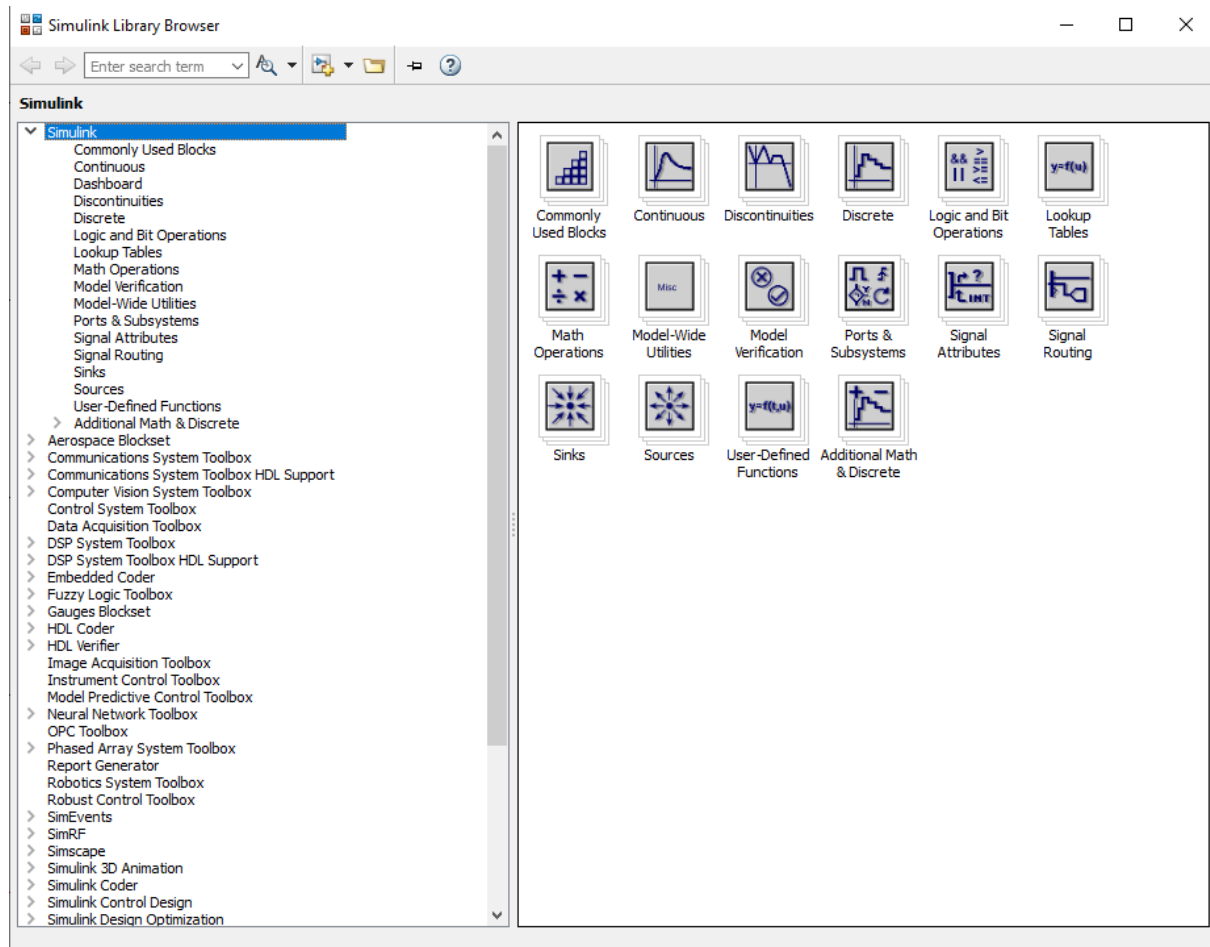


Fig III.8 Librairie SIMULINK

SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau 1.

Tableau 1

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete Blocs	Représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions & Tables	Fonctionset tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals & Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

Tableau III.1 Les principales librairies SIMULINK

## VI. Partie pratique

### VI.1 les tableaux et les courbes

**Tableau III.2 (rotation du rotor 40Hz)**

Rotation du rotor 40Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1187.5trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	450
	75	1	1	1	0	/
	100	1	1	1	1	/

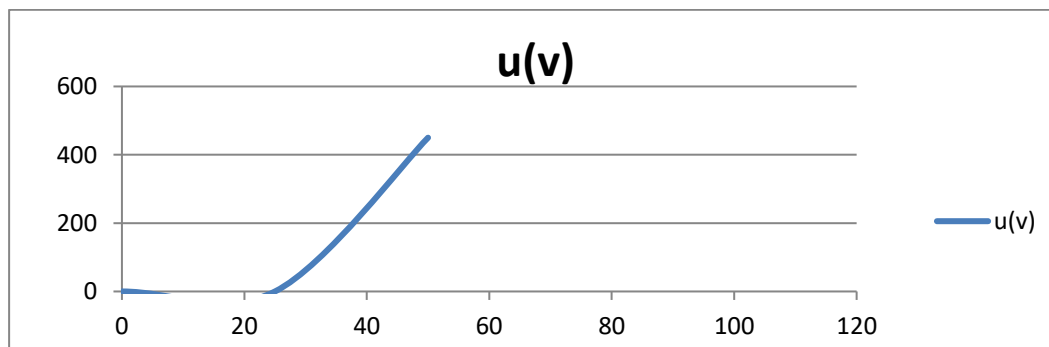


Fig III.9 courbe de tension pour rotation rotorique 40Hz

On remarque que la génératrice s'amorce seulement à 50% du plan de charge, ce qui correspond à une tension de 450v. pour 25% du plan du charge la tension est nulle mais pour les valeurs 75% et 100% la tension est supérieure de 450v la valeur maximale du simulateur.

**Tableau III.3(rotation du rotor 43Hz)**

Rotation du rotor 43Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1275trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	0
	75	1	1	1	0	350
	100	1	1	1	1	400

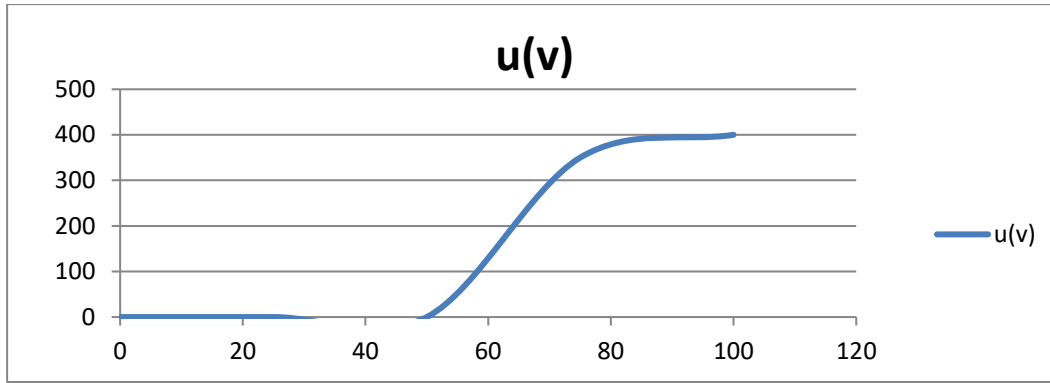


Fig III.10 courbe de tension pour rotation rotorique 43Hz

Nous constatons que pour la vitesse de rotation rotorique 43Hz la génératrice s’amorce véritablement à partir de 75% du plan de charge, ce qui correspond à une tension de 350v.

Par analogie avec la machine synchrone, on peut dire que la capacité joue un rôle analogue au courant d’excitation La capacité est donc la grandeur de réglage de la tension aux bornes de la génératrice asynchrone

Tableau III.4 (vitesse de rotation rotorique 45.5Hz)

Rotation du rotor 45.5Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1357.4trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	1	0	0	0
	75	1	1	1	0	400
	100	1	1	1	1	450

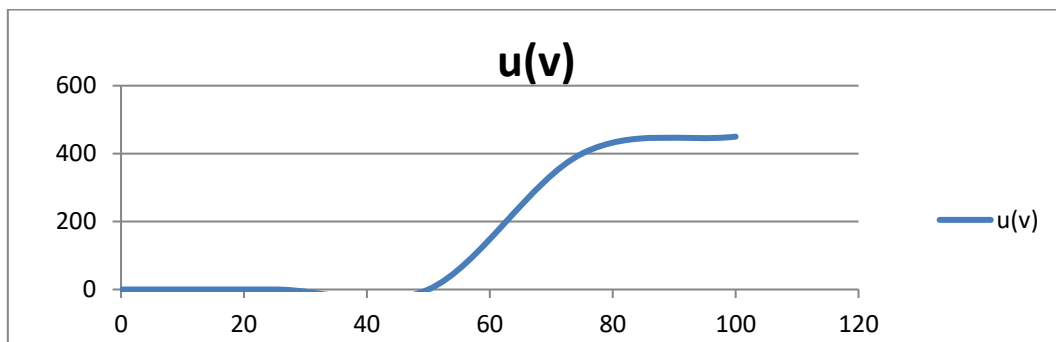


Fig III.11 courbe de tension pour rotation rotorique 45.5Hz



Pour la vitesse de rotor 45.5 Hz, on remarque que la génératrice s'amorce avec valeur maximale de tension à 75 % et 100%. Pour 25% du plan de la charge la tension est égale à zéro.

**Tableau III.5 (vitesse de rotation 47Hz)**

Rotation du rotor 47Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1402.5trs/min	0	0	0	0	0	0
	25	1	0	0	0	0
	50	1	0	1	0	230
	75	1	0	1	1	440
	100	1	1	1	1	/

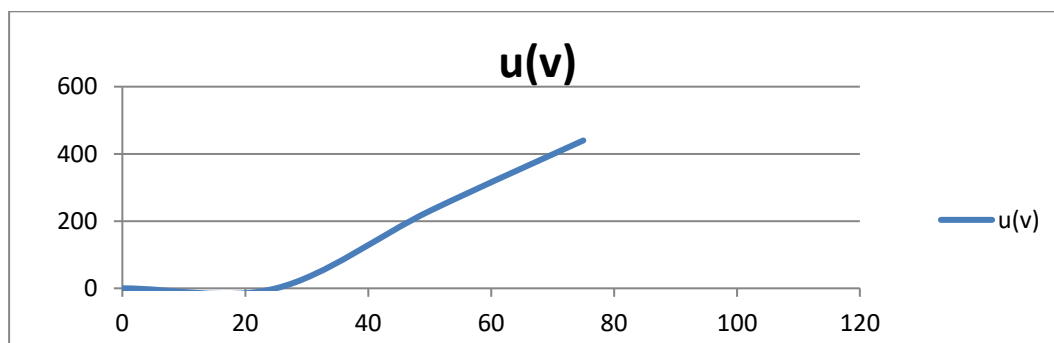


Fig III.12 courbe de tension pour rotation rotorique 47Hz

La génératrice s'amorce à partir de 50% du plan de charge à une tension de 450v, à 75% du plan de charge la tension atteint 440v. Pour 25% du plan de la charge la tension est nulle mais pour les valeurs et 100% la tension est supérieure de 450v la valeur maximale du simulateur.

**Tableau III.6 (vitesse de rotation de rotor 54.3Hz)**

Rotation du rotor 54.3Hz	% Banc de condensateurs	Commutateur 1	Commutateur 2	Commutateur 3	Commutateur 4	U (V)
n = 1620trs/min	0	0	0	0	0	
	25	1	0	0	0	
	50	1	1	0	0	450
	75	1	1	1	0	0
	100	1	1	1	1	

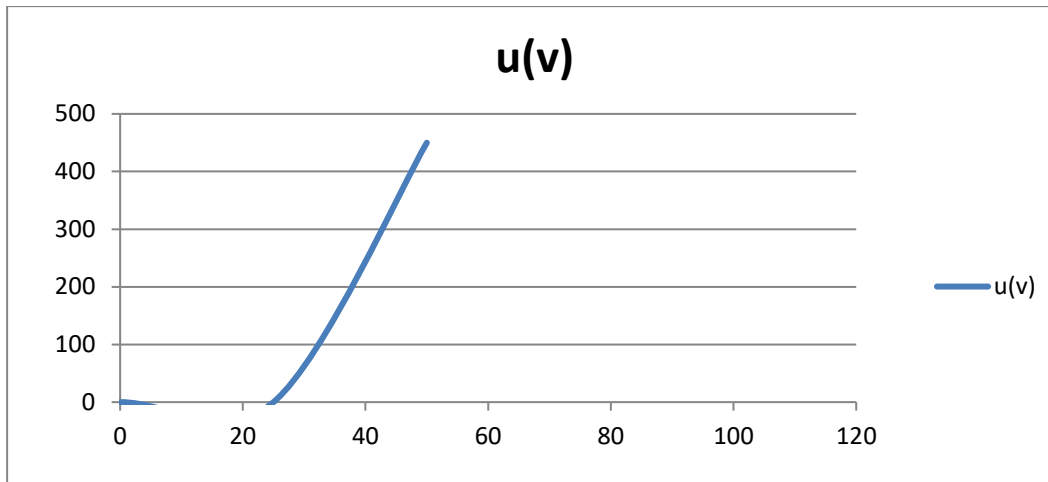


Fig III.13 courbe de tension pour rotation rotorique 54.3Hz

### Remarque

Les cases vides signifiait que la tension obtenue est supérieure a 450v la tension maximale de notre simulateur.

D'autre part notre simulateur fonctionne seulement dans l'intervalle de rotation de rotor de 40 à 50Hz.

Par analogie avec la machine synchrone, on peut dire que la capacité joue un rôle analogue au courant d'excitation La capacité est donc la grandeur de réglage de la tension aux bornes de la génératrice asynchrone.

## IV2. Développement du modèle SIMULINK du moteur asynchrone

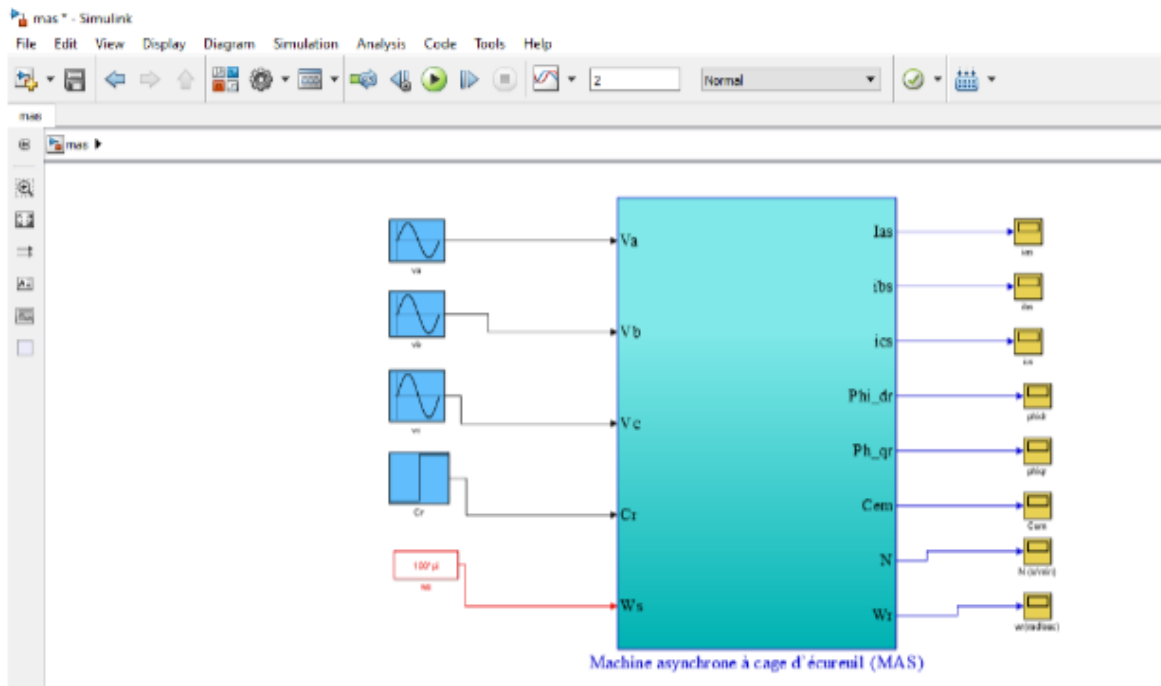


Fig III.14 Modèle SIMULINK d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS).

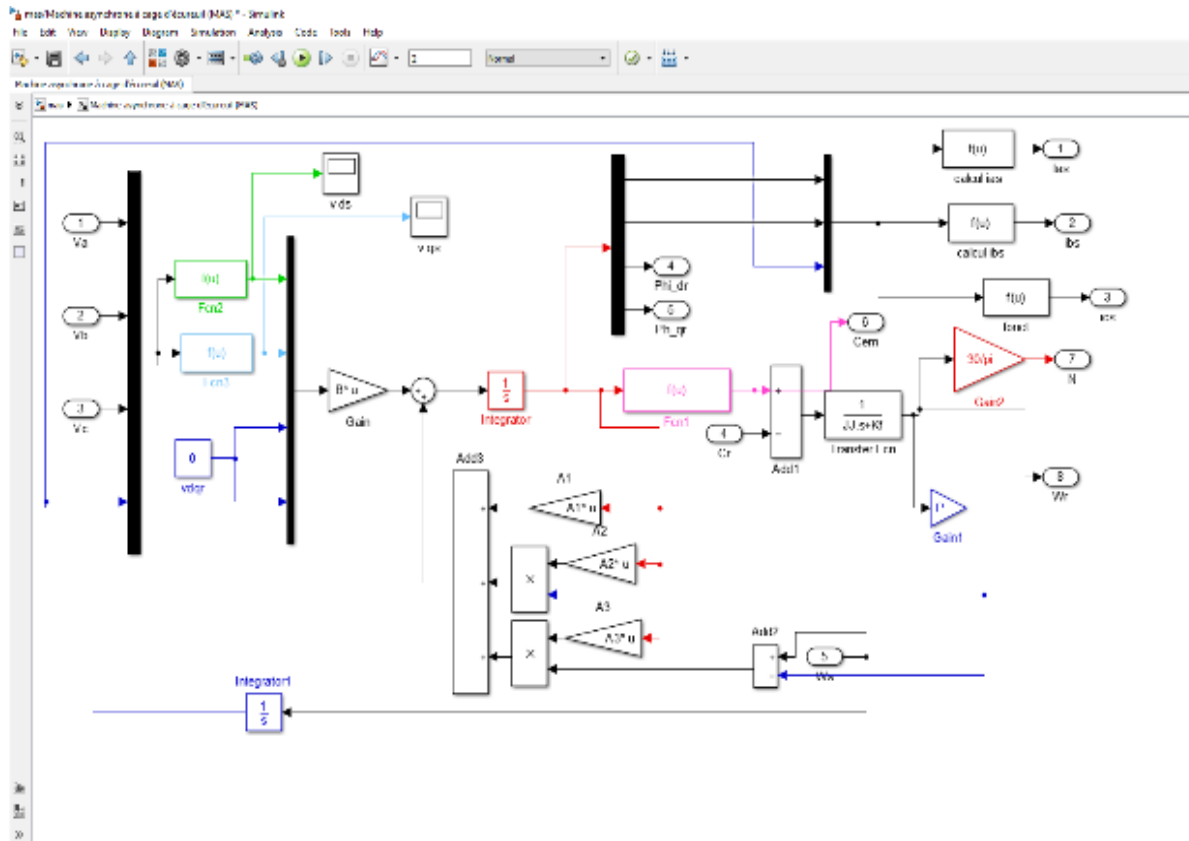
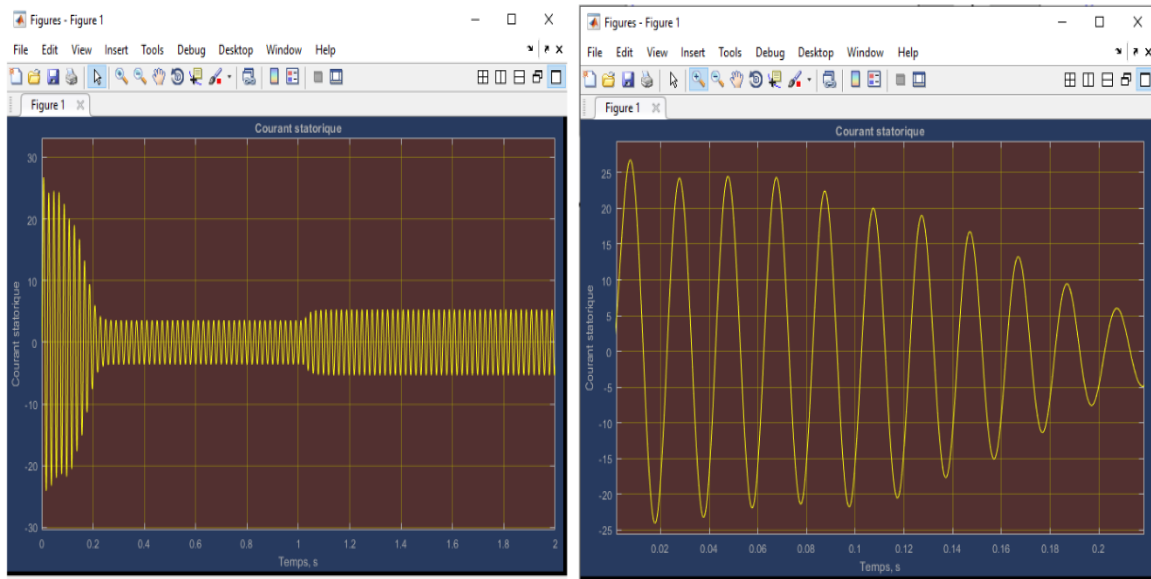


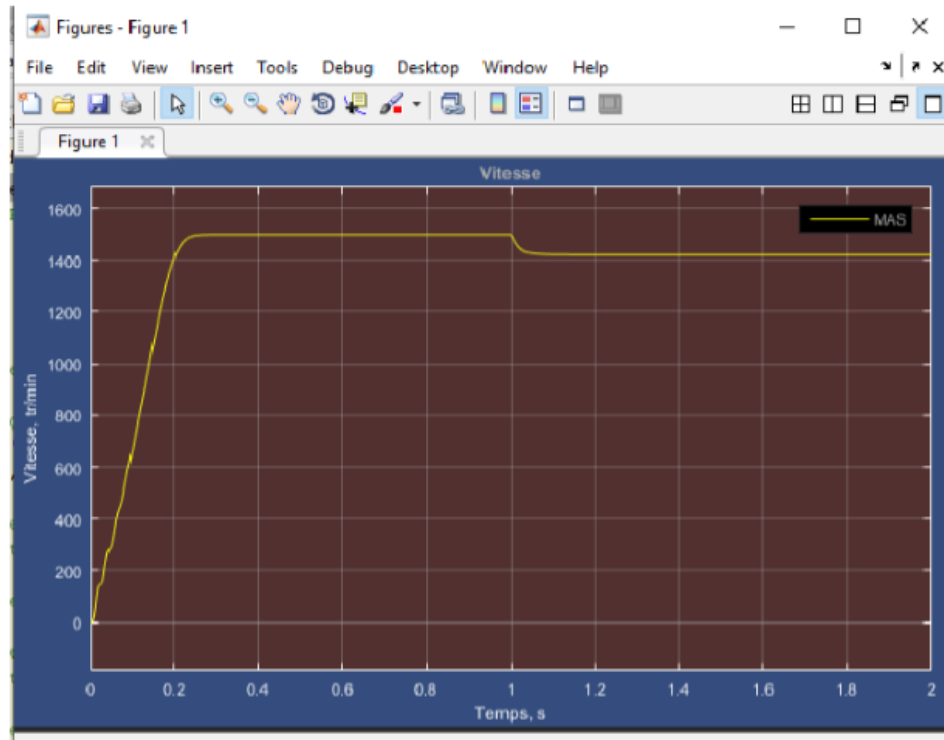
Fig III.15 Bloc de la machine asynchrone à cage d'écuréuil.

### IV.3 Résultats de la simulation

Les figures III.10, III.11 montre les résultats représentent respectivement les courbes du courant statorique et de la vitesse.



FigIII.16 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (Courant statorique)



FigIII.17 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone (vitesse)

### Interprétation des courbes:

Le courant dans le démarrage est très grand mais il se réduit et se stabilise, le couple électromagnétique est le responsable de la tension. Pour la vitesse on remarque qu'elle atteint une valeur maximale c'est la vitesse de synchronisation puis elle se réduit et devient stable.

### V. Conclusion

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa facilité de construction et sa robustesse; mais sa simulation est difficile, parce que son modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de dépasser cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

*CONCLUSION  
GENERALE*

## **Conclusion générale**

La simulation est une méthode efficace et économique en ingénierie et est couramment utilisée pour mener des études préliminaires et/ou comparatives, à la fois dans la phase de développement (conception) et pendant le fonctionnement normal des systèmes. Dans l'industrie et le milieu universitaire.

Plusieurs outils de simulation sont actuellement utilisés, parmi lesquelles on trouve MATLAB / SIMULINK. Dans ce travail, nous avons conçu un moteur asynchrone à cage d'écureuil, qui a fait ses preuves dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction; autrement, il est difficile à simuler, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité d'outils informatiques puissants permet de surmonter cette difficulté. La modélisation et la simulation du processus de démarrage du moteur sont suivies de l'application de la charge entraînée. Les résultats obtenus prouvent la justesse du modèle développé. D'autres vitesses peuvent être facilement vérifiées, analysées et étudiées pendant le fonctionnement du moteur.

On espère que l'implantation des machines asynchrone dans notre vie s'améliore surtout dans le domaine d'énergie renouvelable pour faciliter notre besoin d'électricité et éviter le manque et les problèmes fournis par l'énergie fossile.

# *BIBLIOGRAPHIE*

**[01]:** Daniel R. Rousse /Énergies renouvelables/L'énergie éolienne /19/10/2019//<http://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1251/>

**[02]:** Dr Nachida Kasbadji Merzouk Directrice de Recherche/Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?/le 1er séminaire méditerranéenne sur l'énergie éolienne/ 10 et 11 avril 2010 /pdf [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_014\\_04.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_014_04.pdf)

**[03]** Lakhdar Walid ARABI, Samia SAÏDI , Pr Chems Eddine Chitour/Thème : De la Bougie à l'Electricité Durable : les Défis de 2030/Sujet : Le Souffle d'Eole pour produire de l'électricité /16ème journée de l'énergie, 50ème Anniversaire de l'Indépendance Centre de conférences SONELGAZ, 16 Avril 2012  
<https://developpementhumaindurabledealgerie.files.wordpress.com/2016/03/exposc3a9-11.pdf>

**[04]:** L'éolien en Europe et dans le monde en 2017 /<https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>

**[05]:** Guediri, Abdel Karim (2017) Etude et commande d'une chaine de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/3959>

**[06]:**MOKRANE SMAILI /MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION/  
<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/572/1/Mokrane-Smaili.pdf>

**[07]:**Eolienne domestique Technique /<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique>

**[08]:** 2021 Fabriquer Eolienne/expériences et tutoriels de fabrication autour de l'auto-construction d'éoliennes pour produire soi-même du courant électrique/ <http://www.fabriquer-eolienne.com/installation-electrique-eolienne-infographie/>

**[09]:** Parc éolien/Critères de choix de sites éoliens  
[/https://eolienne.f4jr.org/parc\\_eolien#criteres\\_de\\_choix\\_de\\_sites\\_eoliens](https://eolienne.f4jr.org/parc_eolien#criteres_de_choix_de_sites_eoliens)

**[10]:** EOL 87/L'énergie éolienne/ <http://eol87.fr/lenergie-eolienne/>

**[11]:** Étude théorique d'une éolienne/ [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)



- [12]: total énergies/ quels sont les différents types d'éolienne  
<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes>
- [13]: Le guide de l'éolienne/Le guide de l'éolienne/<https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/eolien/le-guide-de-l-eolienne-ooreka.pdf>
- [14]: Pr. BENAMROUCHE Nacereddine/IDENTIFICATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL/2011-2012/  
[https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8558/LouniAmar\\_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8558/LouniAmar_AlloucheneM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [15]: METROUH Mohamed MOUSSI Rafik/Identification d'une machine asynchrone à Cage/ 11 juillet 2017/ [https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8588/MetrouhMohamed\\_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8588/MetrouhMohamed_MoussiRafik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [16] Maxime DESSOUDE/Différents types de moteurs asynchrones Moteurs asynchrones - Choix et problèmes connexes/10 juin 1996  
 / <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/moteurs-asynchrones-d3490/differents-types-de-moteurs-asynchrones-d3490niv10002.html>
- [17] : Daniel FODOREAN /Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) /19/11/2009/<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/differents-types-de-machines-electriques-tournantes-42249210/dimensionnement-rapide-des-machines-synchrones-a-aimants-permanents-msap-d3554/>
- [18]: Mamadou Doumbia/MODELISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRON/January 2002/ <https://www.researchgate.net/publication/237508249>
- [19]: GUILLAUME PONGO NYOUMEA/ MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/Avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>
- [20] LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/ <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>
- [21]: Cours machine synchrone/ Lycée P. Mendès France Epinal/ [http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours\\_TD\\_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf.\\_](http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmf-epinal/Cours_TD_SII/Elec/machine%20synchrone.pdf._)

- [22] : GUILLAUME PONGO NYOUMEA/MODÈLES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS/avril2018/<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/786/1/GuillaumePongo.tmp.pdf>
- [23]: Sonia MOUZAOUI/Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de défauts de courts-Circuits et de désaimantations par la méthode des éléments Finis/<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/8610/MouzaouiSonia.pdf?sequence=1>
- [24]: <https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/LEB6905.pdf>
- [25]: LEBSIR Abdelkadir/Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable/29/05/2016/[https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid\\_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://fs.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/9113/LakrouzMadjid_SadiTarik.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26]: Djilali Kairous/Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne/2019/  
[https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous\\_uqac\\_0862D\\_10605.pdf](https://constellation.uqac.ca/5357/1/Kairous_uqac_0862D_10605.pdf)
- [27]: SIMULATEUR D'UNE EOLIENNE - RESTITUTION RESEAU/FABRICATION LANGLOIS/info@langlois-france.com/[https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=2389](https://langlois-france.com/fr/index.php?controller=attachment&id_attachment=2389)
- [28]: Mamadou Lamine Doumbia/ Mamadou Lamine Doumbia/ MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK/07/2002/file:///C:/Users/Admin/AppData/Local/Temp/MODELISATION\_ET\_SIMULATION\_DUNE\_MACHINE\_ASYNCHRON.pdf