



FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département D'électrotechnique

***Mémoire de fin d'étude***

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en génie électrique**

**Spécialité : commande électrique**

**Thème**

Étude par simulation et expérimentation de deux éoliennes de petite puissance à axes horizontal et vertical

Réalisé par :

Encadré par :

Devant les membres du jury :

•Mahmoudi Rayane

•Chekkal Samira

•Mokrani Zahra

•Laib Lounis

•Aouzellag Djamal

•Saou Rachid

Année universitaire : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : MAHMOUDI  
Prénom : RAYANE  
Matricule : 181833001027  
Spécialité et/ou Option : Commande électrique  
Département : génie électrique  
Faculté : Technologie  
Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : MASTER

Intitulé : Étude par simulation et expérimentation de deux  
schémas de petite puissance à cras horizontal et vertical

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,  
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans  
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : LAIB  
Prénom : LOUVIS  
Matricule : 181833003892  
Spécialité et/ou Option : Commande électrique  
Département : génie électrique  
Faculté : Technologie  
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Etude par simulation et expérimentation de deux  
colonnes de petite puissance à axes horizontal et vertical

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,  
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans  
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes réglementaires)

## **Remerciement**

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur Djamel aouzllague et Madame Samira Chekkal, nos encadrants, pour leur disponibilité, leur accompagnement, ainsi que la qualité des conseils données tout au long de ce travail. Leur rigueur scientifique et orientations précieuses ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également à l'entreprise Cevital, qui nous a accueillis dans le cadre de notre stage de fin d'études. Nous remercions tout particulièrement le personnel du service technique pour leur accueil chaleureux, leur encadrement sur le terrain, et leur disponibilité durant toute la période du stage.*

*Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants et responsables pédagogiques du département d'électrotechnique, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée tout au long de notre parcours universitaire.*

*Enfin, nous adressons notre profonde reconnaissance à nos familles et nos proches pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur patience, sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir.*

*Ce mémoire est le fruit de notre collaboration, que nous, Mahmoudi Rayane et LaibLounis, avons menée avec sérieux, engagement et esprit d'équipe.*

## *Dédicace*

*Tout d'abord, je tiens à remercier le bon DIEU de  
m'avoir donné le*

*courage de mener à compléter ce modeste travail*

*Je dédie ce travail avec amour et fierté :*

*A ma chère famille mes parents*

*et ma sœur Roumaïssa*

*A ma tante Nassima*

*A tous mes amis (mohamed)*

*Que ce travail soit l'aboutissement de vos souhaits les  
plus chers et*

*le reflet de votre soutien constant.*

*Rayane*

## *Dédicace*

*Tout d'abord, je tiens à remercier le bon DIEU de  
m'avoir donné le*

*courage de mener à compléter ce modeste travail*

*Je dédie ce travail avec amour et fierté :*

*A ma chère famille mes parents*

*A tous mes amis (Said, Riad )*

*Que ce travail soit l'aboutissement de vos souhaits les  
plus chers et*

*le reflet de votre soutien constant.*

*Lounis*

## **Table des matières**

Introduction générale .....	1
Chapitre I .....	2
Présentation générale des systèmes de production éolienne .....	2
I.1 Introduction .....	2
I.2 Principe de fonctionnement des systèmes éoliens .....	2
I.3 Classification des éoliennes .....	4
I.3.1 Éoliennes à axe horizontal .....	4
I.3.2 Éoliennes à axe vertical .....	5
<i>a) Eoliennes de type Savonius</i> .....	6
I.4 Classification des éoliennes selon la puissance délivrée .....	8
I.4.1 Éoliennes de faible puissance (ou petit éolien) .....	8
I.4.2 Éoliennes de grande puissance (ou éolien industriel) .....	8
I.5 Typologie des systèmes éoliens selon leur architecture de raccordement .....	9
I.6 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens .....	9
I.6.1 Machines synchrones .....	9
I.6.2 Machine asynchrone à cage .....	10
I.6.3 Machine asynchrone à double alimentation .....	11
I.7 Conclusion .....	11
Chapitre II .....	14
<i>Modélisation des différentes parties du système à étudier</i> .....	14
II.1 Introduction .....	14
II.2 Modélisation de la turbine éolienne .....	14
II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	15
II.3.1 Hypothèses de modélisation .....	15
II.3.2 Équations de la machine dans le référentiel abc .....	16

II.3.3	Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq).....	18
II.3.4	Système avec redresseur à diodes .....	20
II.4	Résultats de simulation et interprétations .....	22
II.5	Conclusion.....	27
Chapitre III.....		29
Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne.....		29
III.1	Introduction .....	29
III.2	Présentation de deux bancs d'essai .....	29
III.3	Dispositif de mesure .....	31
III.4	Description des machines .....	32
III.5	Détermination du flux des AP .....	34
III.6	Détermination d'impédance de la MSAP .....	37
III.7	Analyse expérimentale des performances de deux éoliennes .....	38
III.8	Conclusion.....	41
Conclusion générale .....		42



## **Liste des figures**

**Figure I.1:** Schéma de principe d'un aérogénérateur

**Figure I.2:** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie

**Figure I.3:** Éolienne à axe horizontal

**Figure I.4:** Évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport de vitesses spécifiques  $\lambda$  pour des éoliennes différentes

**Figure I.5:** Éoliennes à axe vertical

**Figure I.6:** Modèle d'éolienne Savonius auto-construite pour petite production d'énergie

**Figure 7:** Éoliennes de type Darrieus

**Figure I.8:** Système de Conversion d'Énergie Éolienne à base de la GSAP

**Figure I.9:** Schéma de commande électrique d'un système basé sur une machine asynchrone à cage

**Figure I.10:** Schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation dans un système éolien

**Figure II.1:** Représentation de la MSAP dans le repère abc

**Figure II.2:** Représentation de la transformation

**Figure II.3:** Chaîne de conversion d'énergie éolienne à étudier

**Figure II.4:** Redresseur triphasé à diode

**Figure II.5:** Représentations du filtre LC

**Figure II.7:** Évolution temporelle du couple électromagnétique

**Figure II.8a :** Comportement de la tension et du courant

**Figure II.8b :** Zoom temporel sur la tension entre phases

**Figure II.9:** Profil temporel de la tension et du courant de charge

**Figure II.10:** Variation de la vitesse de rotation en fonction du temps

**Figure II.11:** Évolution temporelle du couple électromagnétique

**Figure II.12a :** Comportement de la tension entre phase et du courant

**Figure II.12:b** Zoom temporel sur la tension entre phases

**Figure II.13:** Profil temporel de la tension et du courant de charge

**Figure III.1:** Éolienne étudiée à axe vertical

**Figure III.2:** Éolienne étudiée à axe horizontal

**Figure III.3:**Autotransformateur triphasé

**Figure III.4:** soufflerie

**Figure III.5:**Représentations des différents appareils de mesure utilisés

**Figure III.6 :** Différentes parties de l'éolienne étudiée à axe horizontal

**Figure III.7:**Différentes parties de l'éolienne étudiée à axe vertical

**Figure III.8:** Banc essai

**Figure III.9:**Forme d'onde de la f.e.m pour l'éolienne à axe vertical

**Figure III.10:**Forme d'onde de la f.e.m l'éolienne à axe horizontal

**Figure III.11:**Montage aval

**Figure II.12a :** Comportement de la tension entre phase et du courant

**Figure II.12:b** Zoom temporel sur la tension entre phases

**Figure II.13:** Profil temporel de la tension et du courant de charge

**Figure III.14:** Allures de la tension de charge en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne pour les vitesses de vent

**Figure III.15:** Allure de la tension de charge en fonction de courant de charge pour les vitesses de vent

## **Liste des tableaux**

**Tableau III.1 :** Valeurs mesurées et calculées

**Tableau III.2 :** Valeurs mesurées et calculées

**Tableau III.3:** Valeurs mesurées des tensions et courants et des résistances calculées pour l'entre phase AB

**Tableau III.4 :** Valeurs mesurées des tensions et courants et des résistances calculées pour l'entre phase et neutre

**Tableau III.5 :** Valeurs mesurées des tensions et courants et des inductances calculées pour l'entre phase et neutre

**Tableau III.6:** Valeurs mesurées des tensions et courants et des inductances calculées pour l'entre phase AB

## Liste des abréviations

$R$ : Rayon de l'arbre

$\tau$ : Contrainte de torsion

$\sigma_{\text{eq}}$ : Contrainte équivalente

$d$ : Diamètre de l'arbre

$\sigma_{\text{adm}}$ : Contrainte admissible par le matériau

$R_C$  et  $R_D$  : les réactions aux points C et D respectivement

$V_{a.b.c}$  : sont les tensions statoriques de chaque phase

$I_{a.b.c}$  : sont les courants statoriques de chaque phase

$R_S$  : est la résistance du bobinage statorique par phase

$\varphi_{a.b.c}$  : sont les flux de chaque phase

$L_S$  : est l'inductance propre par phase

$\varphi_{f.a.b.c}$  : sont les flux induits par les aimants permanents dans chaque phase

$f$  : est le coefficient de frottement visqueux

$J$  : est le moment d'inertie du rotor

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

$m_{ab}m_{ac}m_{bc}$  : Inductances mutuelles entre phases statoriques

$\varphi_{AP_{abc}}$  : Flux des aimants permanents dans l'enroulement statorique

$p$  : Nombre de paires de pôles

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant

$[P(\theta)], [P(\theta)]^{-1}$  : Matrices de passage directe et inverse

$\Omega_r$  : Vitesse mécanique de rotor

$v_{red}$  : Tension à sortie de redresseur

### Liste des abréviations

$v_{DC}$  : Tension continu à la sortie de filtre LC

$v_{eff}$  : Tension efficace

$v_{max}$  : Tension redressé maximal

$I_{red}$  : Courant à la sortie de redresseur

$L_d L_q$  : Inductances mutuelles cycliques directe, quadrature

## **Introduction générale**

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles, à l'augmentation des besoins énergétiques et à l'urgence climatique, le recours aux énergies renouvelables s'imposera comme une nécessité incontournable. Parmi elles, l'énergie éolienne continuera de se distinguer par sa disponibilité abondante, son faible impact environnemental et ses performances technologiques en constante amélioration. Selon le Global Wind Energy Council, la puissance éolienne installée dans le monde dépassera probablement les 837 GW atteints en 2023, confirmant le rôle stratégique de cette filière dans la transition énergétique [1].

Le fonctionnement d'un système éolien reposera sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, à l'aide d'un aérogénérateur. Celui-ci sera généralement constitué d'une turbine (à axe horizontal ou vertical), d'un système de transmission (direct ou avec multiplicateur) et d'une machine électrique, la plupart des cas une machine synchrone à aimants permanents, choisie pour ses performances en termes de rendement, de compacité et de facilité de commande.

Dans ce contexte, la présente étude visera à approfondir la compréhension et l'analyse des systèmes éoliens à petite échelle, en combinant une modélisation mathématique et des expérimentations en laboratoire. L'objectif sera d'évaluer le comportement électromécanique de systèmes complets dans différentes conditions de fonctionnement.

Ce travail s'articulera autour de trois chapitres principaux :

- ✓ Le premier chapitre présentera les principes fondamentaux de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes (à axe horizontal ou vertical), les machines électriques associées, ainsi qu'une étude du potentiel de développement éolien en Algérie ;
- ✓ Le deuxième chapitre traitera de la modélisation des principaux composants d'un système éolien, incluant une MSAP, un redresseur triphasé à diodes et un filtre LC. Cette modélisation sera effectuée dans le repère de Park afin de faciliter l'analyse dynamique et permettra la simulation du système sous MATLAB/Simulink ;
- ✓ Le troisième chapitre décrira les essais expérimentaux qui seront réalisés sur deux éoliennes de petite puissance, l'une à axe horizontal, l'autre de type Savonius à axe vertical. Ces tests permettront de mesurer des grandeurs caractéristiques comme la tension, le courant, la vitesse de rotation, le flux magnétique et l'impédance, dans le but de comparer les performances réelles avec les résultats de simulation.

À travers cette étude, nous chercherons à contribuer à une meilleure compréhension des systèmes de conversion éolienne, en adoptant une approche à la fois théorique, numérique et expérimentale, dans une perspective de développement durable et d'optimisation énergétique adaptée aux besoins futurs.

## **Chapitre I**

### **Présentation générale des systèmes de production éolienne**

#### **I.1 Introduction**

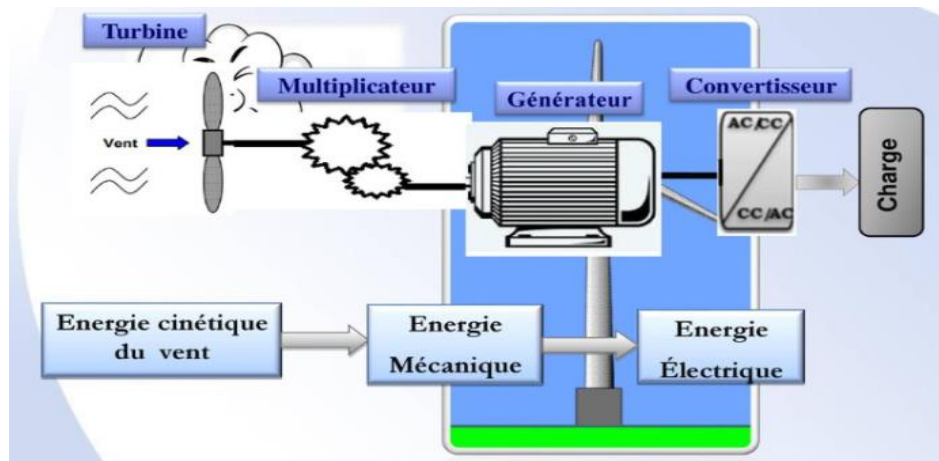
Dans un contexte mondial marqué par l'épuisement progressif des ressources fossiles, les préoccupations environnementales croissantes et les objectifs de transition énergétique, l'énergie éolienne s'impose comme une alternative durable, propre et techniquement mature pour la production d'électricité. Exploitée de manière rudimentaire depuis l'Antiquité pour moulinier le grain ou pomper l'eau, elle connaît aujourd'hui un essor considérable, porté par les avancées en aérodynamique, en électronique de puissance et en matériaux composites, ainsi que par des politiques de soutien aux énergies renouvelables [2].

Ce chapitre propose une présentation complète des systèmes de production éolienne. Il débute par une explication des principes physiques à l'origine de l'énergie éolienne et du fonctionnement des aérogénérateurs. Une classification des différentes technologies d'éoliennes est ensuite établie, selon des critères tels que l'orientation de l'axe de rotation, la puissance nominale délivrée ou encore le mode de raccordement au réseau. Un panorama des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens, incluant les machines synchrones et asynchrones dans leurs différentes configurations, est également proposé. Enfin, une attention particulière est accordée au potentiel éolien de l'Algérie, mettant en lumière ses atouts géographiques et climatiques pour le développement de la filière éolienne.

Ce socle théorique a pour objectif d'apporter une compréhension globale et structurée du domaine, constituant ainsi un préalable essentiel à l'analyse, la modélisation et l'étude détaillée des différentes composantes du système éolien, telles qu'elles seront développées dans les chapitres suivants.

#### **I.2 Principe de fonctionnement des systèmes éoliens**

L'énergie éolienne repose sur le mouvement des masses d'air, lui-même provoqué indirectement par l'ensoleillement de la surface terrestre. En effet, le réchauffement différentiel entre les régions provoque des variations de pression atmosphérique, à l'origine des déplacements constants de l'air [3]. Un aérogénérateur, communément appelé éolienne, est un dispositif conçu pour convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, à l'aide d'un arbre de transmission. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique au moyen d'une génératrice, comme illustré à la figure I.1.

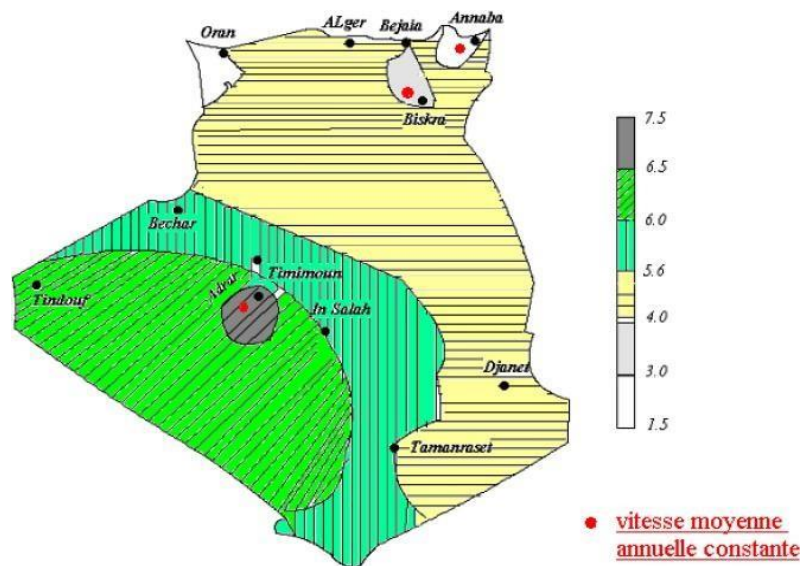


**Figure I.1:** Schéma de principe d'un aérogénérateur

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable, propre et abondamment disponible à l'échelle mondiale. Elle présente une forte variabilité saisonnière, avec une production généralement plus importante en hiver, période qui coïncide avec une demande accrue en électricité en raison des besoins de chauffage.

### Potentiel et répartition géographique du vent en Algérie

L'Algérie dispose d'un important potentiel éolien, largement exploitable pour la production d'électricité. Sur l'ensemble du territoire national, les vitesses moyennes du vent dépassent généralement les 4 m/s, ce qui rend envisageable l'implantation de parcs éoliens dans de nombreuses régions. Le sud algérien, en particulier, se distingue par des vitesses de vent significativement plus élevées, notamment dans les wilayas de Tindouf et d'Adrar, où les vitesses peuvent atteindre jusqu'à 7,5 m/s. La figure I.2 ci-après illustre la répartition du potentiel éolien à l'échelle nationale, telle qu'établie par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), à travers son laboratoire dédié à l'énergie éolienne [4].



**Figure I.2:** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie [4]



## **I.3 Classification des éoliennes**

Il existe une grande diversité de solutions techniques pour capter et convertir l'énergie du vent. Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories, selon l'orientation de l'axe de rotation de leur rotor :

- ✓ Les éoliennes à axe horizontal, dont l'arbre est parallèle au sol, sont les plus répandues dans les applications industrielles et de production à grande échelle ;
- ✓ Les éoliennes à axe vertical, dont l'arbre est perpendiculaire au sol, sont généralement utilisées pour des applications spécifiques ou en milieu urbain.

Cette classification repose essentiellement sur la disposition géométrique de l'arbre de transmission sur lequel est montée l'hélice.

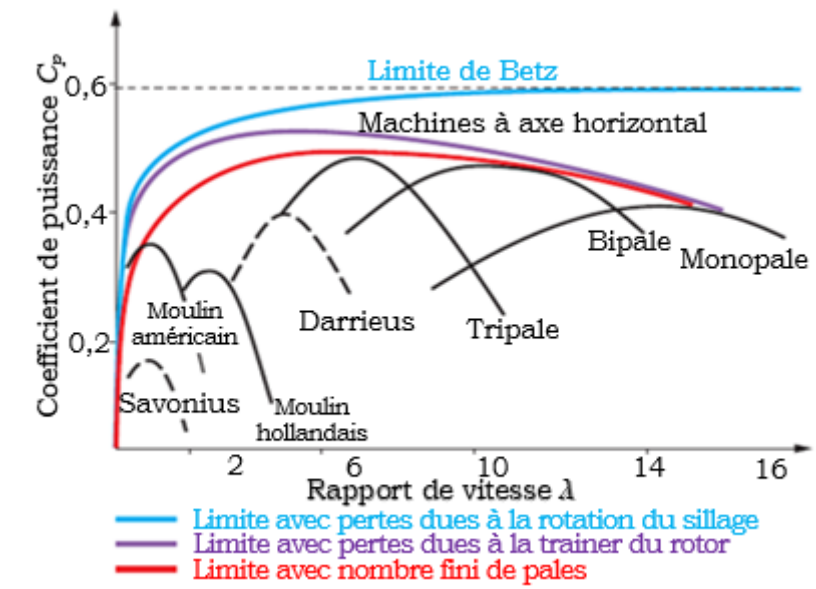
### **I.3.1 Éoliennes à axe horizontal**

Inspirées des moulins à vent traditionnels, les éoliennes à axe horizontal sont équipées de pales au profil aérodynamique similaire à celui des ailes d'avion. Contrairement à l'aviation, où la portance permet de maintenir un appareil en vol, elle est ici utilisée pour générer un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor [5]. Le nombre de pales varie généralement entre une et trois, le rotor tripale étant le plus courant. Ce dernier offre un bon compromis entre rendement énergétique, coût de fabrication et vitesse de rotation. Ce type d'éolienne s'est progressivement imposé par rapport aux modèles à axe vertical, en raison de sa meilleure efficacité, de son coût de production plus faible, de sa résistance accrue aux contraintes mécaniques et de sa position en hauteur, qui permet de capter un vent plus stable et plus puissant. La figure I.3 illustre cette configuration.



**Figure I.3:**Eolienne à axe horizontal

La figure I.4 présente l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des différents types d'éoliennes. On observe que chaque configuration possède une vitesse spécifique (appelée vitesse normalisée) pour laquelle le rendement aérodynamique est maximal. Ainsi, un fonctionnement à vitesse de rotation variable, en fonction de la vitesse du vent, permet de maintenir l'éolienne dans la zone optimale de sa courbe de performance. Plus la courbe caractéristique  $C_p(\lambda)$  est étroite (en forme de cloche), plus il est avantageux d'adapter dynamiquement la vitesse de rotation du rotor à celle du vent, afin d'exploiter au mieux le potentiel énergétique disponible [6].



**Figure I.4:** Évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport de vitesses spécifiques  $\lambda$  pour des éoliennes différentes [6].

### I.3.2 Éoliennes à axe vertical

De nos jours, les éoliennes à axe vertical sont relativement peu utilisées, car elles présentent un rendement inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal. Leur principe de fonctionnement s'apparente à celui des roues hydrauliques, avec un vent agissant perpendiculairement à l'axe de rotation. L'un de leurs principaux avantages réside dans la possibilité d'installer l'ensemble de la machinerie (génératrice, multiplicateur, etc.) au sol, ce qui facilite considérablement l'entretien. Cependant, cette configuration implique que l'éolienne capte le vent à une hauteur plus faible, où celui-ci est généralement moins stable et moins puissant, en raison des perturbations dues au relief et aux obstacles environnants.

Grâce à leur symétrie de révolution, ces éoliennes n'ont pas besoin d'être orientées face au vent, ce qui leur permet de fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions. Toutefois, elles présentent l'inconvénient de ne pas démarrer automatiquement : une mise en mouvement initiale est souvent nécessaire lorsque la vitesse du vent dépasse un certain seuil.

Enfin, leur implantation au sol exige une emprise importante. En effet, elles doivent être haubanées sur de longues distances, les câbles d'haubanage devant passer au-dessus des

pales, ce dispositif constitue un inconvénient majeur, notamment pour les installations en zones agricoles où l'espace est contraint (voir figure I.5) .



**Figure I.5:** Eoliennes à axe vertical

#### ***a) Eoliennes de type Savonius***

L'éolienne Savonius se distingue par sa simplicité de conception et son faible coût de fabrication, ce qui en fait un modèle particulièrement adapté aux débutants. Elle est fréquemment utilisée à des fins visuelles ou promotionnelles, comme en témoignent les petits dispositifs en tôle tournant sous l'effet du vent. Bien que certains considèrent qu'elle n'est pas adaptée à la production d'électricité, cette affirmation mérite d'être nuancée. En effet, des prototypes récents, y compris ceux réalisés par des amateurs expérimentés, ont démontré des performances remarquables. Ses principaux avantages sont les suivants :

- ✓ Capacité à démarrer avec des vents de faible intensité ;
- ✓ Excellente tenue face aux vents violents ;
- ✓ Couple moteur important ;
- ✓ Fonctionnement silencieux.

Son principal inconvénient réside dans sa vitesse de rotation et son  $C_p$  relativement faibles.



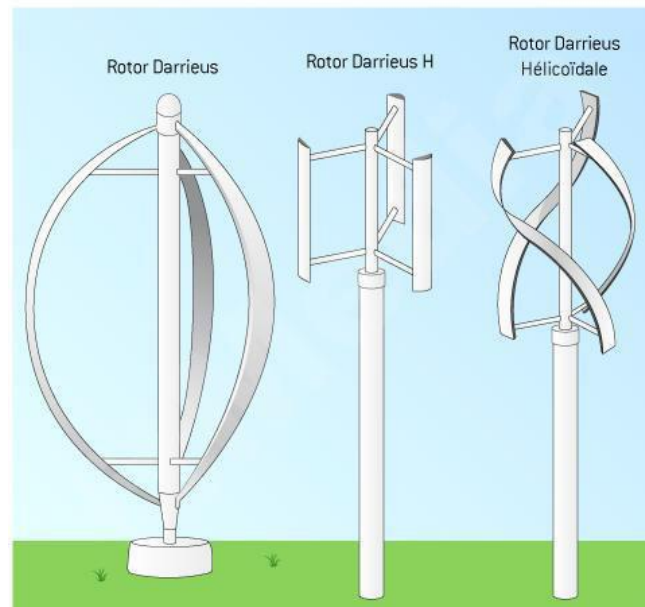
**Figure I.6:** Modèle d'éolienne Savonius auto-construite pour petite production d'énergie

Toutefois, ces limitations peuvent être partiellement compensées par un allongement des pales et une optimisation du système de démultiplication. Traditionnellement utilisée pour des applications telles que le pompage de l'eau, domaine dans lequel elle excelle, l'éolienne Savonius bénéficie aujourd'hui d'un regain d'intérêt grâce aux progrès en aérodynamique et à l'implication croissante des auto-constructeurs. Elle constitue ainsi une option pertinente pour une première réalisation dans le domaine des énergies renouvelables (voir figure I.6) [7].

### ***b) Eoliennes de type Darrieus***

Les éoliennes de ce type ont été inventées par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935. Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique qu'une petite turbine Savonius est très souvent présente sur son axe pour rendre possible le démarrage [3].

Eolienne Darrieus



**Figure 7:** Eoliennes de type Darrieus

## **I.4 Classification des éoliennes selon la puissance délivrée**

La classification des éoliennes peut se faire selon plusieurs critères, dont l'architecture, l'emplacement ou encore le mode de fonctionnement. L'un des critères fondamentaux reste la puissance nominale délivrée, qui permet de distinguer les applications domestiques des projets industriels à grande échelle. On distingue ainsi deux grandes catégories : les éoliennes de faible puissance et les éoliennes de grande puissance.

### **I.4.1 Éoliennes de faible puissance (ou petit éolien)**

Le petit éolien, également désigné sous les termes d'éolien domestique, individuel ou urbain, regroupe les éoliennes dont la puissance est généralement inférieure à 36 kW, voire jusqu'à 100 kW selon certaines classifications. Ce type de générateur est destiné principalement à l'autoconsommation électrique, que ce soit dans des zones isolées (habitations rurales, refuges de montagne, exploitations agricoles) ou connectées au réseau (avec revente partielle ou totale de l'électricité produite). Ces éoliennes sont particulièrement adaptées à [7] :

- ✓ L'alimentation de sites isolés non raccordés au réseau électrique ;
- ✓ Des applications maritimes, comme l'alimentation de voiliers ou de bateaux de plaisance ;
- ✓ Des installations urbaines, pour répondre à une partie des besoins énergétiques d'un bâtiment.

Elles se caractérisent par une conception plus compacte, un mât de faible hauteur (généralement entre 5 et 20 mètres) et des rotors de quelques mètres de diamètre. Leur faible impact visuel et sonore favorise leur intégration en milieu résidentiel.

### **I.4.2 Éoliennes de grande puissance (ou éolien industriel)**

L'éolien industriel, ou grand éolien, regroupe les éoliennes de forte puissance (plusieurs centaines de kilowatts à plusieurs mégawatts), principalement utilisées pour la production d'électricité à grande échelle. Le développement de cette technologie s'est fortement accéléré depuis les années 1980, avec les premières implantations de parcs éoliens en Allemagne, aux États-Unis (Californie), puis dans d'autres pays européens et asiatiques[8].

Les grandes éoliennes modernes présentent les caractéristiques suivantes :

- ✓ Orientation horizontale (axe horizontal) : c'est le design le plus courant, optimisé pour capter efficacement l'énergie cinétique du vent ;
- ✓ Hauteur imposante : les mâts dépassent souvent 120 mètres pour les modèles terrestres, permettant un meilleur accès aux vents réguliers d'altitude ;
- ✓ Rotors géants : les diamètres atteignent 160 mètres à terre et jusqu'à 280 mètres en mer (offshore) ;

- ✓ Technologie avancée : matériaux composites, pales à géométrie optimisée, contrôle actif du pas, nacelle intelligente.

Un exemple emblématique de l'éolien offshore de nouvelle génération est la Ming Yang MySE 18.X-28X, qui atteint près de 280 mètres de hauteur totale, avec un rotor de 280 mètres de diamètre, capable de produire plus de 80 000 MWh/an, soit la consommation de près de 20 000 foyers européens [9].

Ces éoliennes sont installées dans des parcs éoliens terrestres ou offshores, et raccordées au réseau électrique via des sous-stations et des lignes à haute tension. Elles constituent un pilier de la transition énergétique dans de nombreux pays.

## **I.5 Typologie des systèmes éoliens selon leur architecture de raccordement**

Les systèmes éoliens peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur mode de fonctionnement :

- ✓ Systèmes autonomes, qui fonctionnent indépendamment du réseau électrique, avec stockage local de l'énergie ;
- ✓ Systèmes connectés au réseau, qui injectent directement l'électricité produite dans le réseau national et nécessitent une synchronisation stricte en fréquence et en tension.

## **I.6 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens**

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

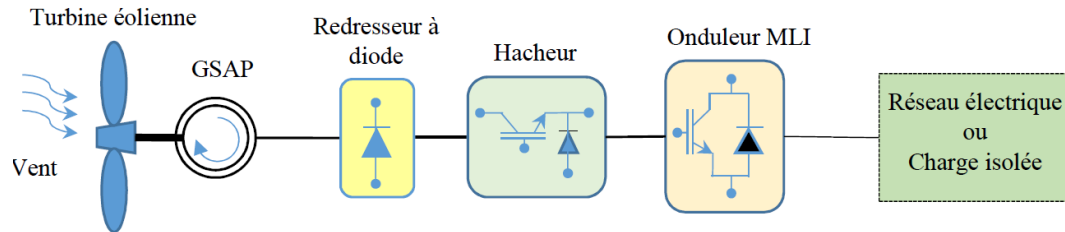
- ✓ La puissance à délivrer à la charge ou au réseau ;
- ✓ L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- ✓ Le mode de fonctionnement visé (autonome ou connecté au réseau).

### **I.6.1 Machines synchrones**

Les machines synchrones à rotor bobiné sont couramment utilisées dans les systèmes éoliens connectés au réseau (SCEE), notamment pour les applications de grande puissance. Toutefois, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) présentent plusieurs avantages significatifs par rapport aux machines à rotor bobiné. Parmi ces avantages, on peut citer [10] :

- ✓ Une meilleure exploitation de l'énergie primaire disponible ;
- ✓ Un rendement global plus élevé ;
- ✓ L'absence de source auxiliaire d'excitation et de balais (contacts glissants) ;
- ✓ Une fiabilité accrue ;
- ✓ Un meilleur rapport puissance/poids.

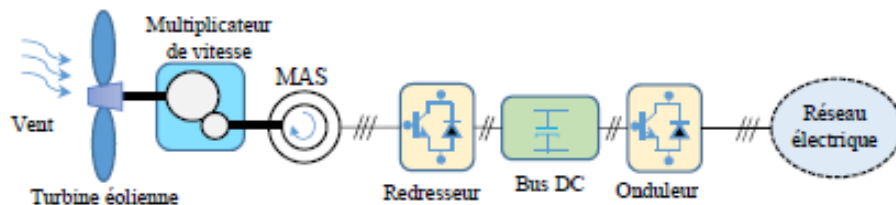
Il convient de noter que les génératrices synchrones à rotor bobiné ou à aimants permanents (GSAP) ne peuvent pas être connectées directement au réseau ou à une charge isolée, car leur tension et leur fréquence de sortie varient en fonction des conditions de fonctionnement. L'intégration de convertisseurs d'électronique de puissance est donc indispensable pour assurer l'adaptation au réseau ou à la charge (voir figure I.8).



**Figure I.8:** Système de Conversion d'Énergie Éolienne à base de la GSAP[11].

## I.6.2 Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage d'écureuil est utilisée dans les systèmes éoliens en raison de sa robustesse, de sa simplicité de construction et de son faible coût [10-12]. La puissance réactive nécessaire à sa magnétisation peut être fournie localement par un groupe de condensateurs connectés en parallèle avec la machine [13]. Lorsqu'elle est directement couplée au réseau, cette machine fonctionne à vitesse fixe, ce qui limite l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne et peut affecter la stabilité et le rendement global du système [14]. Toutefois, l'intégration d'un convertisseur de puissance de type AC-DC-AC, dimensionné pour supporter la totalité de la puissance générée, permet d'assurer un fonctionnement à vitesse variable. Cela offre une meilleure adaptation aux variations de la vitesse du vent et permet ainsi une optimisation de la production électrique (voir figure I.9) [14-15].



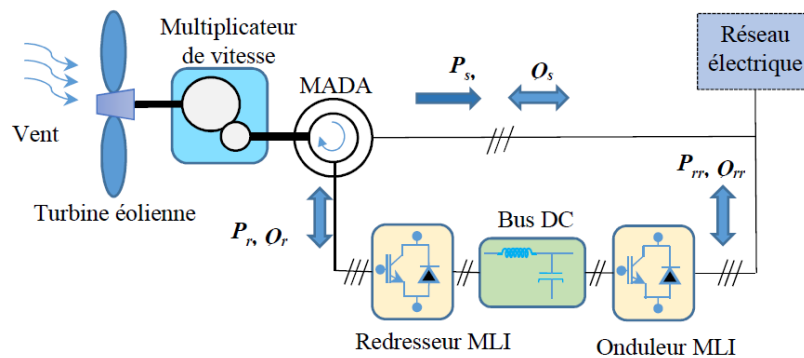
**Figure I.9:** Schéma de commande électrique d'un système basé sur une machine asynchrone à cage[11].

### I.6.3 Machine asynchrone à double alimentation

Dans cette configuration, le stator de la génératrice est directement raccordé au réseau, tandis que le rotor est alimenté via un convertisseur électronique de puissance de type source de tension (Voltage Source Converter (VSC)), qui agit comme un variateur de fréquence.

Ce dispositif permet un fonctionnement à vitesse variable dans une plage définie autour de la vitesse synchronisme, ce qui améliore la flexibilité d'exploitation et l'efficacité énergétique.

L'un des principaux avantages de cette architecture réside dans sa capacité à contrôler la puissance réactive, permettant ainsi des échanges d'énergie réactive avec le réseau. Cette caractéristique rend possible un réglage dynamique de la tension au point de couplage, ce qui est particulièrement bénéfique pour la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique [16].



**Figure I.10:** Schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation dans un système éolien [11].

## I.7 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases fondamentales nécessaires à la compréhension des systèmes de production éolienne. L'étude du principe de fonctionnement des aérogénérateurs a mis en évidence les mécanismes de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ainsi que les facteurs influençant leur rendement. La classification des éoliennes selon leur axe de rotation, leur puissance ou leur mode de raccordement montre la richesse technologique et l'adaptabilité de cette filière à des contextes variés, allant de l'autoconsommation domestique aux installations industrielles de grande envergure.

L'analyse des différents types de machines électriques (synchrones, asynchrones à cage, ou à double alimentation) a permis de souligner les critères de choix selon les contraintes d'exploitation et les performances recherchées. En parallèle, l'étude du potentiel éolien en Algérie met en lumière les nombreuses opportunités offertes par certaines régions du territoire, notamment dans le Sud, où les conditions climatiques sont particulièrement favorables à l'implantation de parcs éoliens.

Les éléments présentés dans ce chapitre constituent un socle de connaissances indispensable pour aborder, dans le chapitre suivant, les aspects liés à la modélisation, à la



simulation et à des composants d'un système éolien à base de la GSAP, avec pour objectif l'amélioration de ses performances électriques et mécaniques.



## Chapitre II

### *Modélisation des différentes parties du système à étudier*

#### II.1 Introduction

Dans le prolongement de la présentation générale des systèmes de production éolienne, ce chapitre s'intéresse à la modélisation des différentes parties d'un système de production éolienne. L'objectif principal est de construire une représentation rigoureuse et exploitable du comportement dynamique du système afin d'analyser ses performances.

Le système à étudier est composé d'une GSAP munie d'un redresseur triphasé à diodes et à un filtre LC et une turbine. Les équations électriques et électromécaniques sont établies dans le référentiel triphasé et transformées dans le repère de Park pour en faciliter l'analyse.

Ce chapitre constitue ainsi une étape fondamentale dans la compréhension et l'analyse du système étudié, en vue de sa simulation sous MATLAB/Simulink et de l'interprétation des résultats.

#### II.2 Modélisation de la turbine éolienne

La modélisation de la turbine éolienne vise à décrire mathématiquement son fonctionnement mécanique et sa capacité à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie exploitable.

La turbine éolienne est un dispositif conçu pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. En considérant l'énergie cinétique des particules d'air en mouvement traversant la surface active  $S$  des pales, on peut exprimer la puissance du flux d'air passant par cette surface équivalente à celle de l'éolienne de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v_v^3 \quad (\text{II.1})$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_v = 0.59 P_v \quad (\text{II.2})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite  $\lambda$ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R_r \Omega}{v_v} \quad (\text{II.3})$$

### **II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents**

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les MSAP ont connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques, etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles. A titre d'illustration, quelques avantages et inconvénients des MSAP [17], sont cités ci-dessous:

#### **➤ Avantages**

On citera quelques avantages principaux comme :

- Moins de pertes de cuivre (absence d'enroulement au rotor), d'où le rendement de la machine est amélioré;
- Une faible inertie et un couple massique élevé ;
- L'absence des balais-collecteur et des balais-bagues simplifie la construction et l'entretien ;
- Fonctionnement à attaque direct (absence de multiplicateur/réducteur de vitesse).

#### **➤ Inconvénients**

- Cout élevé à cause des aimants à terres rares ;
- Impossibilité de régler l'excitation ;
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique pour démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.

#### **II.3.1 Hypothèses de modélisation**

L'étude de tout système électrique nécessite une modélisation. Ce qui nous permet d'étudier le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et comprendre ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. La modélisation de la MSAP fait l'objet de nombreuses études en moyenne et grande puissances. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP facilite largement son étude. Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre des hypothèses est grand, plus le modèle nous permet à une étude et une exploitation plus aisée même si l'on affecte la précision du modèle.

Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs. Pour cela, on suppose que [18] :

- Le circuit magnétique est supposé non saturé ;
- La répartition de la force électromotrice (f.e.m.) est considérée sinusoïdale ;
- L'effet de la température sur les résistances est négligé ;
- Les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont également négligées ;
- L'effet de peau, qui tend à augmenter la résistance et à diminuer l'inductance, est ignoré ;
- L'effet d'encoches est négligé

### II.3.2 Équations de la machine dans le référentiel abc

La MSAPest constituée, au niveau du stator, d'un enroulement triphasé réparti selon trois axes (a, b, c) déphasés de  $120^\circ$  électriques. Le rotor, quant à lui, est équipé d'aimants permanents assurant l'excitation magnétique de la machine.

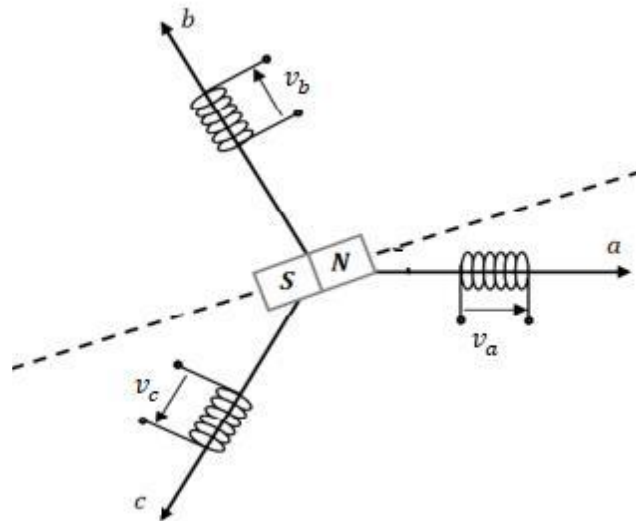


Figure II.11: Représentation de la MSAP dans le repère abc

Sous les hypothèses simplificatrices et en supposant que la machine est équilibrée, les équations électriques de la machine peuvent s'écrire comme suit :

#### II.3.2.1 Équations électriques

Les équations des tensions statoriques dans le référentiel a-b-c s'écrivent pour chaque phase comme suit :

$$\begin{cases} v_a = r_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = r_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = r_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Le système d'équations (II.4) s'écrit sous la forme matricielle :

$$[v_{a,b,c}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.5})$$

### II.3.2.2 Équations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_{aa}i_a + m_{ab}i_b + m_{ac}i_c + \varphi_{APa} \\ \varphi_b = m_{ba}i_a + L_{bb}i_b + m_{bc}i_c + \varphi_{APb} \\ \varphi_c = m_{ca}i_a + m_{cb}i_b + L_{cc}i_c + \varphi_{APc} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Sous la forme matricielle, on a :

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [\varphi_{APabc}] \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & L_{bb} & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les flux dû aux aimants permanents avec la position du rotor:

$$\begin{cases} \varphi_{APa} = \varphi_{AP} \cos(\theta) \\ \varphi_{APb} = \varphi_{AP} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_{APc} = \varphi_{AP} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Sous la forme matricielle, on a :

$$\varphi_{APabc} = \varphi_{AP} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\theta = \int_0^t p\Omega_r dt = \int_0^t \omega_r dt \quad (\text{II.11})$$

L'étude des caractéristiques de la MSAP implique la prise en compte de la variation à la fois des grandeurs électriques (tension, courant, flux) et des grandeurs mécaniques (couple, vitesse). Dans ce contexte, l'équation fondamentale de la dynamique mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.12})$$

### II.3.2.3 Équation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime de la manière suivante :

$$C_{em} = p[i_{abc}]^t \left\{ \frac{1}{2} \frac{[L_s]}{d\theta} [i_{abc}] + \frac{d[\varphi^{APabc}]}{d\theta} \right\} \quad (\text{II.13})$$

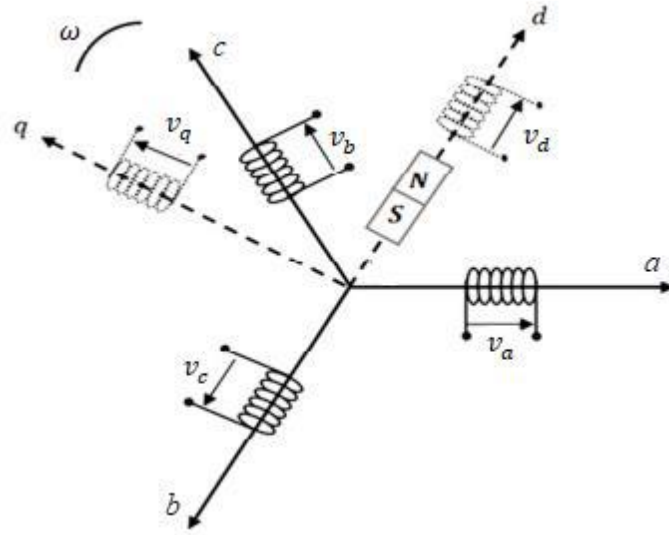
### II.3.3 Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq)

Les équations obtenues dans le repère  $(a, b, c)$  sont non –linéaires et couplées. Elles sont en fonctions de la position du rotor  $\theta$ . Ceci fait apparaitre des difficultés pour la résolution du système. Pour simplifier ce problème, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park. Cette transformation, appliquée aux variables réelles (tension, courant, flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes d-q ou de Park, ce changement de repère rend les équations dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse [19].

#### II.3.3.1 Principe de transformation (dq)

La transformation de Concordia suivit par la rotation de Park est un outil mathématique qui consiste à transformer le système triphasé en système diphasé tournant. Ce passage mathématique transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor. L'aimant se situe sur l'axe d [17].

Les grandeurs électriques et magnétiques de la machine sont représentées dans un référentiel tournant à deux axes orthogonaux : l'axe direct (d) et l'axe en quadrature (q). L'angle  $\theta$  entre le repère fixe (abc) et le repère tournant (dq) est appelé *angle de Park*. La figure (II.3) illustre le principe de cette transformation de Park, permettant de passer du système triphasé au système biphasé (dq) pour simplifier l'analyse dynamique de la machine.



**Figure 12:** Représentation de la transformation

La transformation de Park modifiée est définie par :

Transformation de Park directe

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{II.14})$$

Sachant que  $[(\theta)]$  est la matrice de passage direct, qui est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Transformation de Park inverse:

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{abc}] \quad (\text{II.16})$$

### II.3.3.2 Equations de la tension et du flux dans le repère dq

Après la transformation dans le repère dq et en négligeant la composante homopolaire, les équations de la tension et du flux se sont données, respectivement

$$\begin{cases} v_{sd} = r_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_r L_q i_{sq} \\ v_{sq} = r_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_r L_d i_{sd} + \sqrt{\frac{3}{2}} \phi_f \omega_r \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

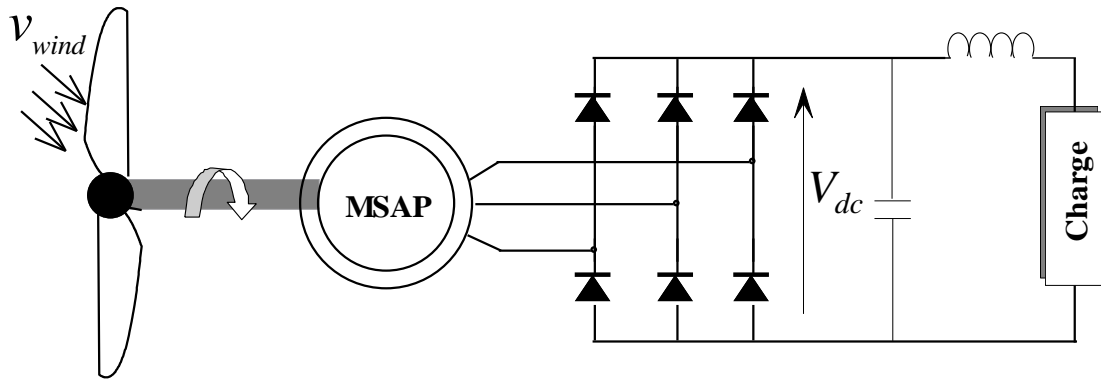
Le modèle complet de la MSAP est donné par le système d'équations différentielles (Sous la forme Cauchy) :



$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_d} & \frac{p\Omega_r L_q}{L_d} \\ -\frac{p\Omega_r L_d}{L_q} & -\frac{r_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p\Omega_r}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ \varphi_f \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \Omega_r = \frac{1}{J} \left\{ p \underbrace{\left[ (L_d - L_q) i_{sd} + \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_f \right] i_{sq}}_{\hat{C}_e} - f \Omega_r - C_r \right\} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

### II.3.4 Système avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association d'une charge en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (II.4).



**Figure 13:** Chaîne de conversion d'énergie éolienne à étudier

#### II.3.4.1 Modélisation de redresseur

Le schéma de principe d'un redresseur triphasé à double alternance à diode est illustré sur la Figure II.5

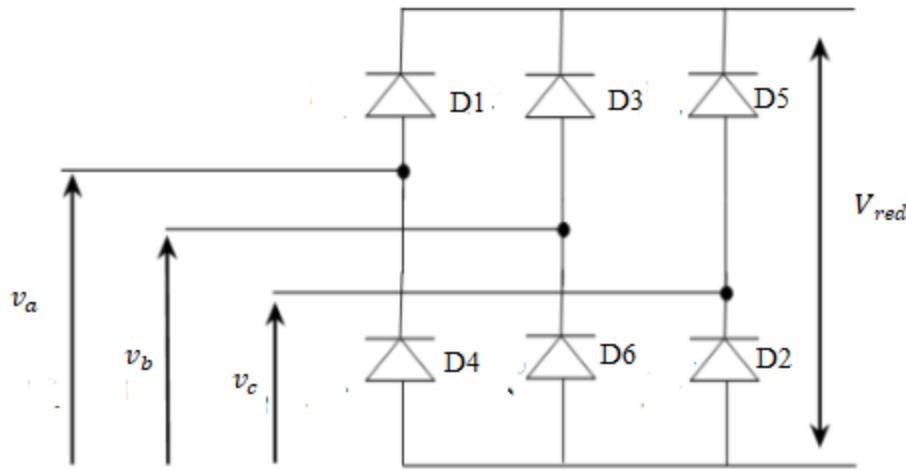


Figure 14: Redresseur triphasé à diode

Les tensions  $v_a, v_b, v_c$  sont des tensions entre phases et neutre (tensions simples) de valeur efficace  $v_{eff}$ . Les fonctions Max et Min assurent que parmi les diodes D1, D3 et D5, celle qui a la tension sur son anode la plus positive conduit et parmi les diodes D2, D4, et D6, celle qui a la tension sur sa cathode la plus négative conduit.

Supposons que nous avons le système triphasé suivant :

$$\begin{cases} v_a = v_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ v_b = v_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = v_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.19)$$

La tension redressée repend aux équations suivantes pendant une période :

$$D_{1.3.5} \text{ Passante si } v_{abc} = v_{max}(t)$$

$$D_{2.6.4} \text{ Passante si } v_{abc} = v_{min}(t)$$

Ou  $v_{red}$  est définie comme suit :

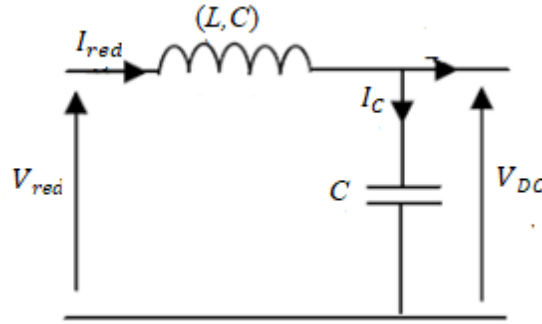
$$v_{red} = \text{Max}(v_{abc}) - \text{Min}(v_{abc}) \quad (II.20)$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$v_{red \text{ moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} v_{max} \quad (II.21)$$

### II.3.4.2 Modélisation du filtre

La tension de sortie du redresseur présente des ondulations importantes, pour les minimiser, il est nécessaire d'insérer un filtre entre le pont redresseur et la charge. Le filtre est constitué d'une inductance ( $L$ ) montée en série avec un condensateur parallèle ( $C$ ) comme illustré sur la figure II.6.



**Figure 15:** Représentations du filtre LC

Les équations de filtre se sont données comme suit :

$$\frac{dI_{red}}{dt} = \frac{1}{L} (v_{red} - v_{DC} - RI_{red}) \quad (II.22)$$

$$\frac{dv_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} I_C = \frac{1}{C} (I_{red} - I) \quad (II.23)$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante :

$$F(s) = \frac{v_{dc}(s)}{v_{red}(s)} = \frac{1}{(LCS^2 + RCS + 1)} \quad (II.24)$$

Sa pulsation est définie par la relation suivante :

$$\omega(s) = \sqrt{\frac{2}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad (II.25)$$

## II.4 Résultats de simulation et interprétations

Le modèle représenté par le système d'équation II.18 a été implanté sous Simulink/MATLAB, ce qui permet d'observer l'évolution des grandeurs caractéristiques telles que le courant, la tension, le couple et la vitesse. Plusieurs scénarios ont été simulés afin d'évaluer la réponse de la machine en régime transitoire et en régime permanent.

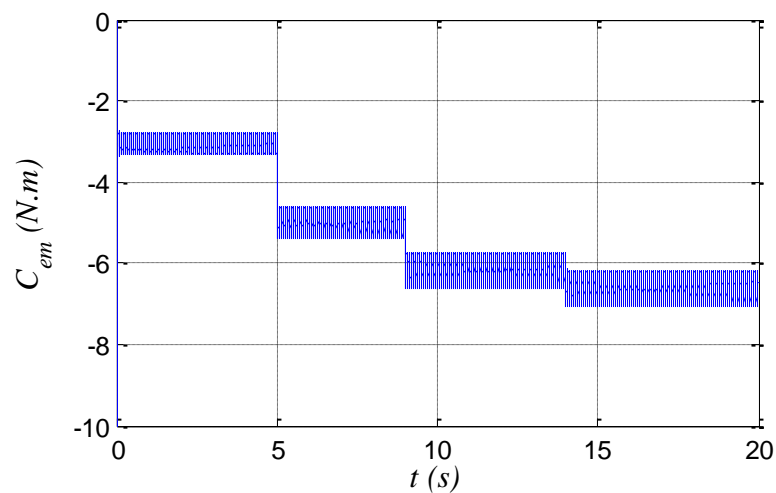
### Étude du premier cas : Vitesse fixe et évolution de la charge

Dans ce premier cas la GSAP est entraînée à une vitesse fixe de 146,6 rad/s tout en alimentant une charge variable. Les paramètres de système qu'on a simulé est dans l'annexe1.

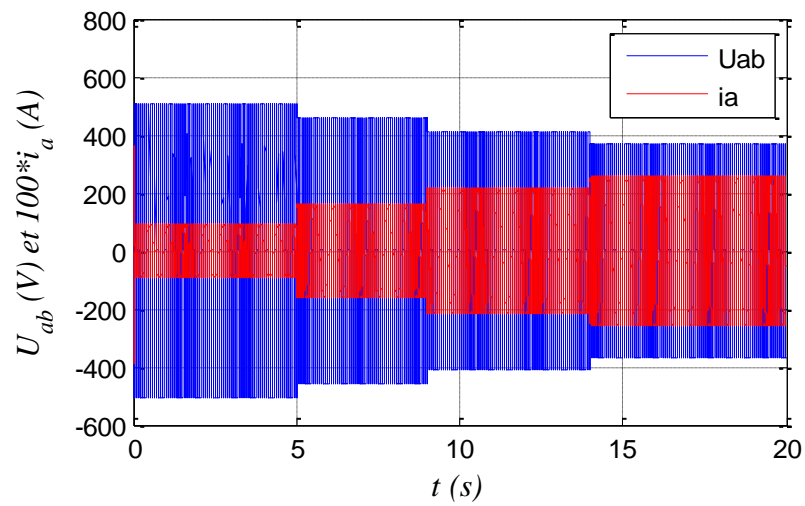
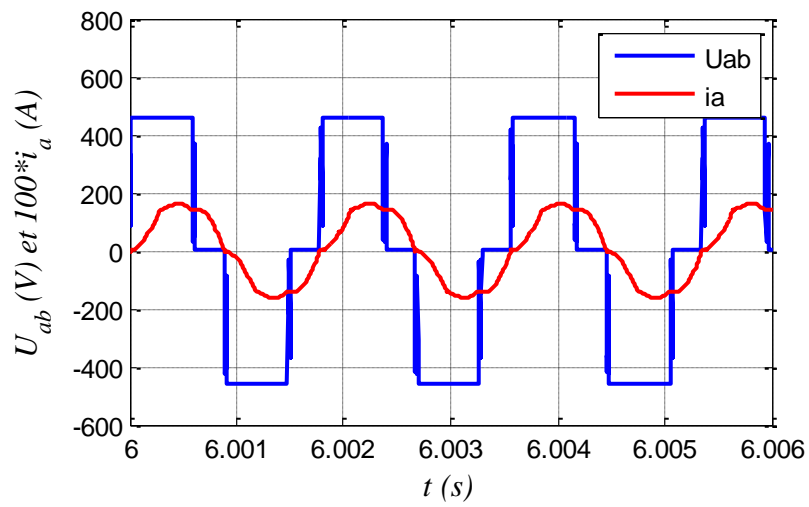
La figure II.7 montre comment le couple électromagnétique évolue au cours du temps, dans un cas où la vitesse reste constante et la charge augmente progressivement. On remarque que le couple augmente avec le temps, car le système doit fournir plus d'effort pour répondre à la charge croissante. Cela montre que la machine s'adapte bien aux besoins sans modifier sa vitesse de rotation.

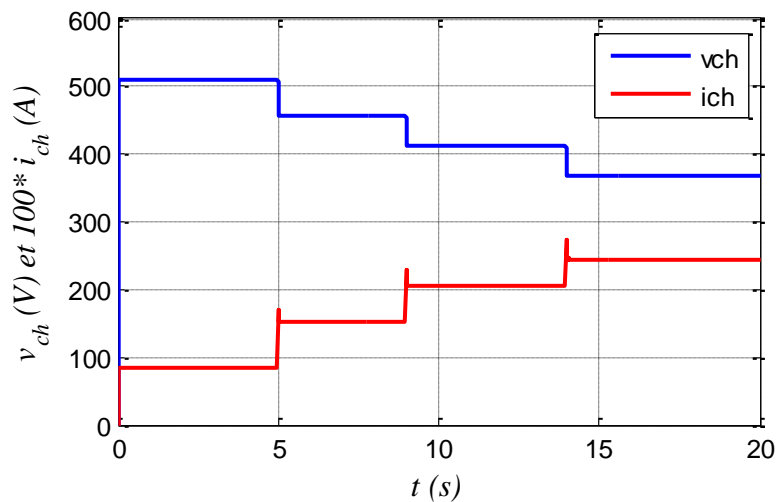
Les figures II.8.a et II.8.b illustrent respectivement l'évolution temporelle de la tension et du courant de la machine, ainsi qu'un zoom sur leur comportement instantané. Cette évolution est analysée dans le cas d'une vitesse constante et d'une charge variable. On observe que le courant augmente logiquement avec la charge, tandis qu'une chute de tension apparaît aux charges élevées. La Figure II.8.b, quant à elle, met en évidence plus précisément la tension entre phases et le courant de phase. Elle permet d'observer un léger déphasage entre la tension et le courant : un décalage angulaire d'environ  $30^\circ$  est présent, dû à la nature de la tension entre phases.

La figure II.9 présente l'évolution de la tension et du courant de charge en fonction du temps, lorsque la vitesse est maintenue constante et que la charge augmente progressivement. On observe une chute de tension en raison de l'augmentation du courant demandé.



**Figure 167:**Évolution temporelle du couple électromagnétique

**Figure II.8a :** Comportement de la tension et du courant**Figure II.8b :** Zoom temporel sur la tension entre phases



**Figure II.9:** Profil temporel de la tension et du courant de charge

### Étude du deuxième cas : Variation de la vitesse pour une charge constante

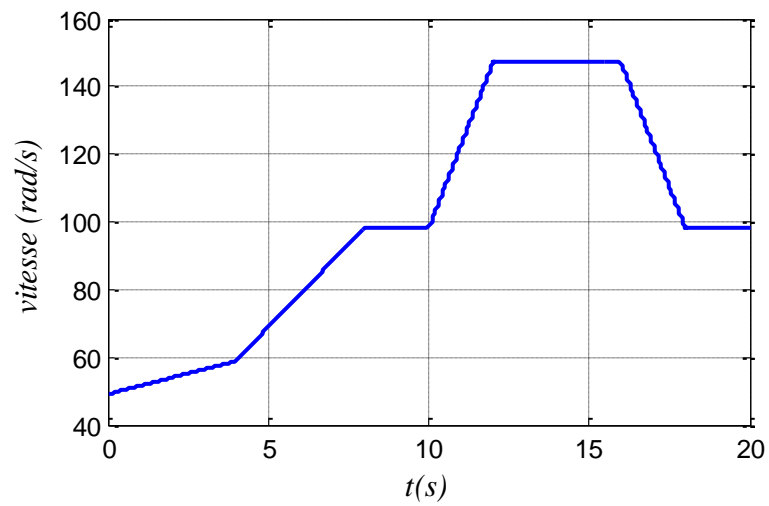
Dans ce second scénario, la génératrice fonctionne à une vitesse variable tout en étant connectée à une charge constante.

La Figure II.10 montre l'évolution de la vitesse de rotation de la génératrice dans le cas d'une charge constante. La vitesse varie au cours du temps, révélant la réponse dynamique de la machine. Ces variations permettent d'analyser la stabilité et la performance de la génératrice face à ces changements.

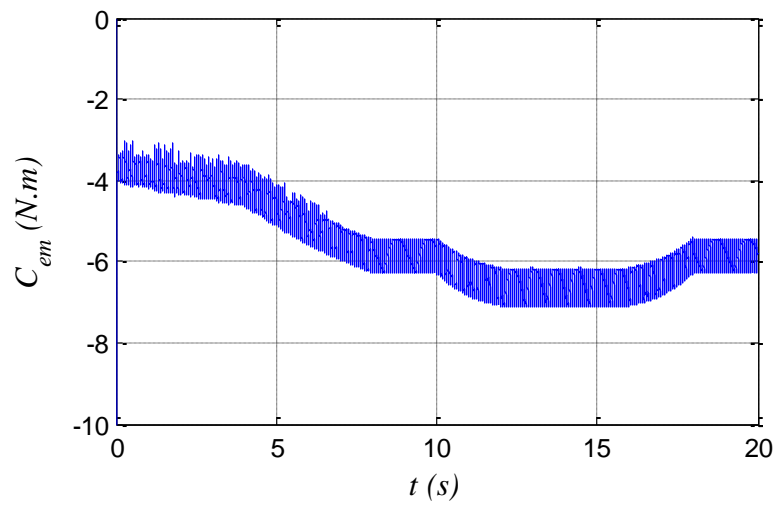
La Figure II.11 illustre l'évolution du couple électromagnétique au cours du temps dans le cadre du deuxième cas, où la vitesse varie tandis que la charge reste constante. Cette évolution permet d'observer la réponse du couple aux fluctuations de vitesse. On peut mieux comprendre la stabilité et la capacité de la machine à maintenir un fonctionnement régulier malgré les fluctuations de vitesse.

Les figures II.12.a et II.12.b présentent respectivement l'évolution de la tension et du courant de la machine au cours du temps, ainsi qu'un zoom permettant d'observer leur comportement instantané. Ces analyses sont effectuées dans le cadre d'une vitesse variable avec une charge constante. On remarque que la tension reste globalement stable malgré les variations de vitesse, tandis que le courant suit les fluctuations de la charge et de la vitesse. Le zoom met en évidence les détails du signal, notamment un déphasage angulaire d'environ  $30^\circ$  est présent entre la tension et le courant, dû à la nature de la tension entre phases.

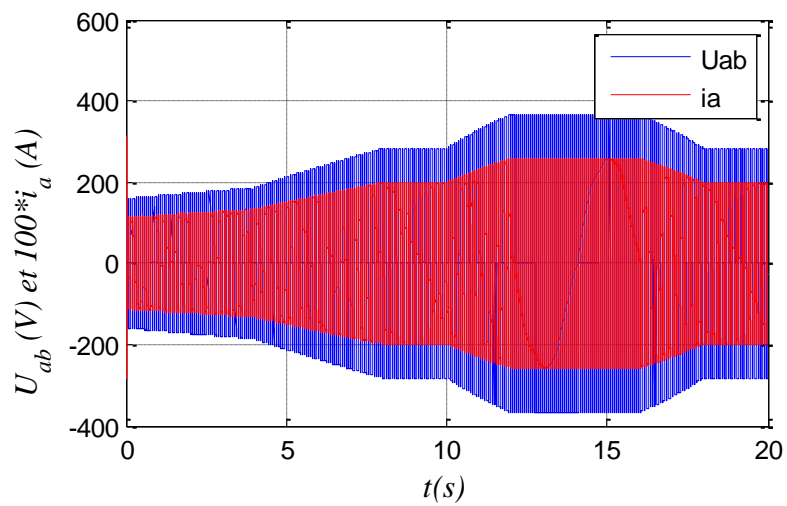
La Figure II.13 illustre le profil temporel de la tension et du courant de charge dans le cadre du deuxième cas, où la vitesse de la génératrice varie tandis que la charge reste constante. On observe que les variations de vitesse influencent principalement le comportement de la tension et du courant, qui peut fluctuer en réponse aux changements de la vitesse de rotation.



**Figure II.10:** Variation de la vitesse de rotation en fonction du temps



**Figure II.11:** Évolution temporelle du couple électromagnétique



**Figure II.12a :** Comportement de la tension entre phase et du courant

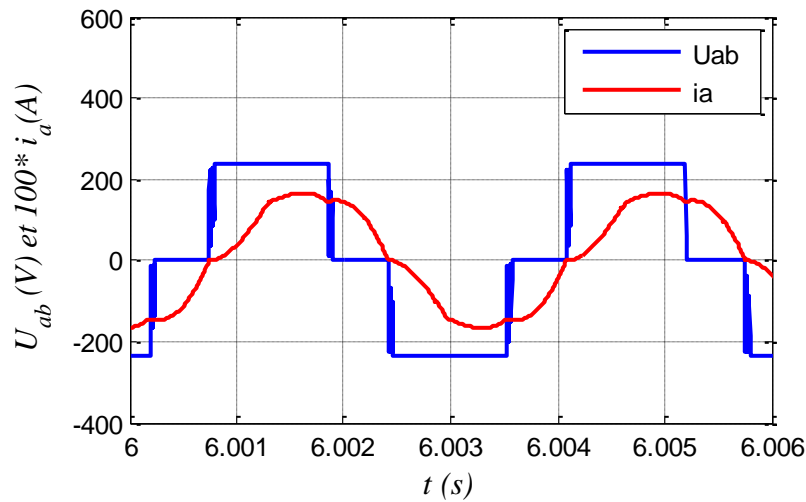


Figure II.12:b Zoom temporel sur la tension entre phases

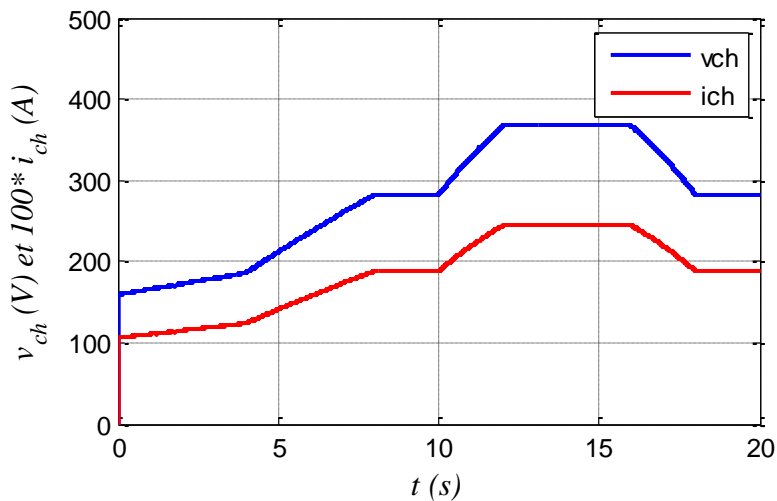


Figure II.13: Profil temporel de la tension et du courant de charge

## II.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une modélisation complète d'un système de conversion d'énergie éolienne, en intégrant les aspects mécaniques de la turbine et les aspects électriques de la chaîne de conversion (MSAP, redresseur à diodes, filtre LC et charge résistive). L'utilisation du repère de Park a permis de simplifier les équations pour une meilleure analyse dynamique.

Les simulations réalisées dans MATLAB/Simulink/PowerSys ont permis de tester le comportement du système dans deux scénarios : vitesse constante avec charge variable, puis vitesse variable avec charge constante ont confirmé la validité du modèle proposé, en montrant un comportement cohérent des grandeurs physiques (couple, courant, tension, vitesse). Cette modélisation constitue une base solide pour la suite de l'étude.



Le troisième chapitre sera dédié aux essais pratiques sur deux éoliennes à axes vertical et horizontal de petites puissances.

## **Chapitre III**

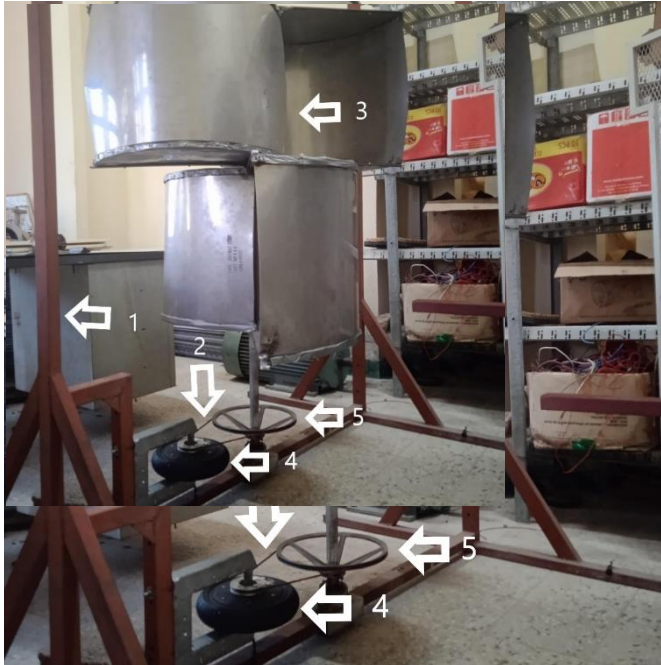
### **Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne**

#### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les essais expérimentaux réalisés sur deux types d'éoliennes l'une à axe horizontal et l'autre à axe vertical au laboratoire de maîtrise des énergies renouvelables à l'université de Bejaia afin d'évaluer leur comportement électromécanique et de déterminer certains paramètres caractéristiques. Ces essais ont été menés à l'aide d'un banc d'essai spécialement conçu, intégrant des instruments de mesure adaptés pour observer les tensions, courants, vitesses de rotation, ainsi que pour déduire des grandeurs fondamentales comme le nombre de paires de pôles, le flux magnétique, la résistance et l'impédance statoriques. L'objectif principal est de valider expérimentalement le fonctionnement de la MSAP couplées à ces éoliennes, et de mieux comprendre les effets de la variation de la vitesse du vent et de la charge électrique sur leurs performances.

#### **III.2 Présentation de deux bancs d'essai**

Pour réaliser les essais expérimentaux, deux bancs d'essai ont été mis en place. Ils ont permis de reproduire le fonctionnement de l'éolienne dans différentes situations, en faisant varier la vitesse du vent et la charge électrique. Ce système permet de mesurer les performances électriques des machines et d'observer leur comportement. Dans notre étude, nous avons utilisé deux types d'éoliennes : une à axe horizontal et une à axe vertical. Chaque éolienne est couplée à une MSAP, mais les deux machines sont différentes. Cela nous a permis de visualiser le fonctionnement de chaque système dans des conditions variées. Concernant l'éolienne à axe vertical, elle a fait l'objet d'un projet de fin d'études déjà réalisé. Ce travail portait sur une éolienne de type Savonius couplée à un alternateur à rotor bobiné à griffe d'une voiture. Cette installation est brièvement citée par [20]. Nous avons remplacé cet alternateur par une MSAP (trottinette électrique de 350 W) sans aucun contact glissant. En ce qui concerne l'éolienne à axe horizontal, les détails techniques sont présentés en annexe 1.



**Figure III.1:**Eolienne étudiée à axe vertical

1. Pale
2. Cadre
3. Queue de l'éolien
4. Support

1. Support
2. Courroie
3. Pale
4. génératrice
5. Poulie



**Figure III.2:**Eolienne étudiée à axe horizontal

### **Générateur de vent**

Le générateur de vent utilisé est un ventilateur industriel à vitesse variable. Il permet de générer un vent artificiel dont l'intensité est ajustée manuellement à l'aide d'une auto transformatrice triphasé comme illustré sur la figure (III.3), afin de tester la réponse des machines à différentes vitesses de vent. Comme illustré sur la figure(III.4)



**Figure III.3:**Autotransformateur triphasé



**Figure III.4:** soufflerie

### **III.3 Dispositif de mesure**

Pour effectuer les mesures nécessaires, plusieurs instruments ont été utilisés :

- Ampèremètre : pour mesurer l'intensité des courants
- Voltmètre : pour la mesure des tensions
- Stroboscope : utilisé pour déterminer la vitesse de rotation
- Oscilloscope : pour visualiser les formes d'onde des tensions et courants.



**Figure III.5:**Représentations des différents appareils de mesure utilisés

### III.4 Description des machines

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques techniques des deux éoliennes utilisées dans le cadre de notre étude expérimentale : l'éolienne à axe horizontal et l'éolienne à axe vertical.

#### *a) Eolienne à axe horizontal*

La MSAP utilisée dans l'éolienne à axe horizontal à attaque direct. Elle a un rotor intérieur avec six aimants permanents. Son stator a 48 encoches à double faisceaux avec un bobinage triphasé distribué. Sa puissance est 400W. Les différentes parties de cette éolienne sont illustrées sur la figure (III.6).



**Figure III.6** : Différentes parties de l'éolienne étudiée à axe horizontal

#### *b) Eolienne étudiée à axe vertical*

L'éolienne à axe vertical utilisée dans cette étude est équipée d'un multiplicateur de vitesse.

Elle possède un rotor extérieur avec trente (30) aimants permanents surfaciques. Son stator est composé de 27 bobines formant un enroulement triphasé de type concentré (moteur d'une trottinette). Sa puissance est de 350 W. Les différentes parties de cette éolienne sont illustrées sur la figure (III.7).





**Figure III.7:**Différentes parties de l'éolienne étudiée à axe vertical

#### **III.4.1.1 Vérification du nombre de paires de pôles et type de rotor**

Pour vérifier la saillance des pôles, nous avons utilisé une méthode simple : on alimente le stator avec une faible tension alternative, puis on fait tourner lentement le rotor à la main. Ensuite, on observe le courant statorique.

Dans notre cas, le courant reste quasiment constant pendant la rotation. Cela indique qu'il n'y a pas de variation d'inductance en fonction de la position du rotor, ce qui confirme que les deux machines sont à pôles lisses (non saillants). La figure III.8 illustre le banc d'essai utilisé pour cette vérification



**Figure III.8:** Banc essai

Parmi les paramètres essentiels d'une machine synchrone, le nombre de paires de pôles joue un rôle fondamental dans la caractérisation de son comportement électromécanique. Pour le déterminer, nous avons fait appel à deux méthodes expérimentales distinctes, chacune appliquée à une des deux MSAP étudiées. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un générateur de vent entraînant la rotation des éoliennes. Dans cette méthode, nous

### Chapitre III :Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne

avons utilisé un oscilloscope pour visualiser la force électromotrice (FEM) générée par la machine. À partir de la forme d'onde observée, nous avons extrait la période, ce qui nous a permis de calculer la fréquence électrique  $f$ , nous avons mesuré la vitesse de rotation mécanique  $N$  de l'éolienne à l'aide d'un stroboscope (exprimée en tr/min).

Le nombre de paires de pôle alors été calculé en appliquant la relation suivante :

$$p = \frac{60f}{N_r} \text{ (III.1)}$$

$$f = \frac{1}{T} \text{ (III.2)}$$

a) *Eolien axe horizontal*

Les résultats des différentes mesures sont reportés dans le tableau III.1

**Tableau III.1** : Valeurs mesurées et calculées

Valeurs mesurées		Valeurs calculées	
$T$ (ms)	$N_r$ (tr/min)	$f$ (Hz)	$p$
30	320	33.33	6.25
22.5	450	44.44	5.92
15.1	630	66.23	6.30
12	830	83.33	6.02
5	270	200	6.17

À partir du tableau III.1, on constate que la valeur de nombre de paires de pôles égale à  $p=6$

b) *Eolien axe vertical*

**Tableau III.2** : Valeurs mesurées et calculées

Valeurs mesurées		Valeurs calculées	
$T$ (ms)	$N_r$ (tr/min)	$f$ (Hz)	$p$
17	240	58.8	14.7
7.2	553.3	138.8	15.06
21	187.2	47.6	15.26

À partir du tableau III.2, on constate que la valeur de nombre de paires de pôles égale à  $p=15$ .

## III.5 Détermination du flux des AP

Dans cette section, nous allons déterminer le flux magnétique des aimants permanents à partir de la force électromotrice (f.e.m.) mesurée expérimentalement. A titre d'exemple, nous

### Chapitre III :Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne

considérons un cas pour lequel le nombre de paires de pôles a déjà été identifié au préalable. Ensuite, nous avons visualisé la f.e.m. induite à l'aide de l'oscilloscope, ce qui nous permet de procéder au calcul du flux magnétique à partir des équations suivantes. La relation de base reliant la f.e.m. au flux est :

$$e = \frac{d\varphi}{dt} \text{ (III.3)}$$

Tel que :  $\sqrt{2}E = \omega_e \varphi_{AB}$

Pour convertir la vitesse de tr/min en rad/s on utilise l'équation (III.3) :

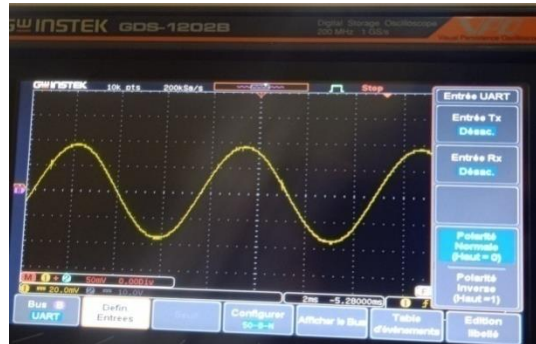
$$\Omega = \frac{2\pi}{60} N_r \text{ (III.4)}$$

La relation suivante permet d'obtenir l'équation permettant de calculer le flux des aimants permanents

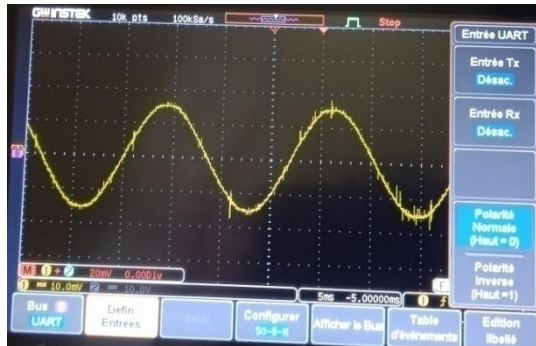
$$\varphi_{AB} = \frac{\sqrt{2}E}{p\Omega} \text{ (III.5)}$$

a) *Eolien à axe vertical*

La f.e.m. a été visualisée à l'aide d'un oscilloscope dans deux configurations différentes :



**Figure III.9:**Forme d'onde de la f.e.m pour l'éolienne à axe vertical



**Figure III.10:**Forme d'onde de la f.e.m. l'éolienne à axe horizontal

Le couplage étant supposé étoile car il y a l'absence de quatrième fil, la tension de phase est obtenue par la relation :

$$E_{eff} = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \text{ (III.6)}$$



### Chapitre III :Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne

À partir de deux figures (Figure III.9, Figure III.10), nous avons extrait la valeur efficace de la tension (f.e.m.), ainsi que la période du signal et la vitesse de rotation étant déjà connue, nous avons ensuite pu calculer le flux magnétique des aimants permanents tel que  $f=138 \text{ Hz}$ ,  $p=15$ ,  $\Omega = 57.94 \text{ rd/s}$ ,  $E_{eff} = 3.10 \text{ V}$  et  $f_1 = 83.33 \text{ Hz}$ ,  $p_1 = 6$ ,  $\Omega_1 = 86.91 \text{ rd/s}$ ,  $E_{eff1} = 9.89 \text{ V}$ .

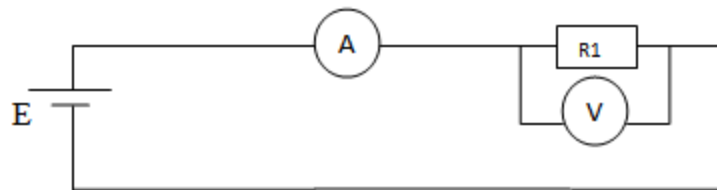
Après les calculs, on trouve :

Eoliennes	A axe vertical	A axe horizontal
Flux des aimants permanents	$0.00504 \text{ Wb}$	$0.0268 \text{ Wb}$

#### *Mesure de la résistance d'une phase statorique*

Le montage aval a été réalisé pour effectuer la mesure des résistances en utilisant la méthode voltampère-métrique, il est souvent utilisé pour mesurer des résistances de faibles valeurs. On alimente deux bornes de la MSAP en courant continu en prenant compte de ne pas dépasser le courant nominal. En appliquant la loi d'Ohm, on peut déterminer la valeur de la résistance après avoir obtenu les différentes valeurs des tensions et des courants à chaud.

La figure (III.11) illustre le schéma de montage effectué :



**Figure III.11:**Montage aval

Les tableaux présentent les résultats des calculs effectués de la résistance statorique, source continue avec les mesures des tensions composées pour chaque entre phase AB.

a) Eolien à axe vertical

**Tableau III.3:** Valeurs mesurées des tensions et courants et des résistances calculées pour l'entre phase AB

$I(A)$	0.45	0.72	0.99
$V(v)$	0.2	0.3	0.4
$R_s(\Omega)/2$	0.22	0.205	0.202

D'après la relation III.7, on calcule la résistance statorique:

$$R_s = \frac{V}{I} \text{ (III.7)}$$

On obtient la valeur moyenne de la résistance d'une phase Statorique

$$R_{smoy} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 R_s = 0.209 \Omega.$$

**b) Eolien axe horizontal**

**Tableau III.4:** Valeurs mesurées des tensions et courants et des résistances calculées pour l'entre phase et neutre

$I(A)$	0.35	0.7	0.75
$V(v)$	0.7	1.2	1.4
$R_s(\Omega)$	0.5	0.58	0.53

$$R_{smoy} = 0.53(\Omega)$$

### III.6 Détermination d'impédance de la MSAP

Pour mesurer l'impédance de la MSAP, un montage en aval a été mis en œuvre afin de réaliser la mesure en alternatif, en utilisant la méthode volt-ampérométrique. Le courant injecté a été limité afin de ne pas dépasser la valeur nominale. L'impédance est ensuite déterminée en appliquant la loi d'Ohm, à partir des mesures de tension et de courant. Les mesures ont été réalisées dans le but de déterminer la résistance de l'induit  $R_{AB}$ . Pour cette phase, la valeur finale retenue correspond à la moyenne des résultats obtenus sur quatre essais successifs

$$\bar{Z}_s = R_s + j\omega L_s \Rightarrow L_s = \frac{Im(\bar{Z}_s)}{\omega} \text{ (III.8)}$$

Le module de l'impédance  $\bar{Z}_s$  est :

$$|Z_s| = \frac{V_A}{I_A} = \sqrt{(R_s)^2 + (\omega L_s)^2} \text{ (III.9)}$$

On peut calculer l'inductance propre statorique comme suit :

$$L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{(|Z_s|^2 - R_s^2)} \text{ (III.10)}$$

En réalisant quatre essais, on calcule l'impédance moyenne comme suit :

$$|Z_{s\_moy}| = \frac{\sum_{i=1}^4 |Z_{si}|}{4}$$

**a) Eolien axe horizontal**

**Tableau III.5 :** Valeurs mesurées des tensions et courants et des inductances calculées pour l'entre phase et neutre

$V(V)$	0.250	0.400	0.523	0.2
$I(A)$	0.4	0.6	0.8	0.3
$Z(\Omega)$	0.625	0.666	0.653	0.66

### Chapitre III :Essais pratiques de deux systèmes de production d'énergie éolienne

On obtient la valeur moyenne de l'impédance et la valeur de l'inductance propre :  $Z_{moy}=0.651 \Omega$  et  $L_s=1.2\text{mH}$

#### ***b) Eolien axe vertical***

**Tableau III.6:** Valeurs mesurées des tensions et courants et des inductances calculées pour l'entre phase AB

V(V)	0.137	0.214	0.308	0.392
I(A)	0.3	0.5	0.7	0.9
Z( $\Omega$ )/2	0.23	0.214	0.22	0.435

On obtient la valeur moyenne de l'impédance et la valeur de l'inductance propre :

$$Z_{moy} = 0.221\Omega \text{ et } L_s= 0.229 \text{ mH}$$

## **III.7 Analyse expérimentale des performances de deux éoliennes**

L'expérience consiste à fixer successivement différentes vitesses de vent à l'aide d'un générateur de vent. Pour chaque vitesse imposée, nous avons mesuré les grandeurs suivantes la vitesse de rotation de l'éolienne, la tension aux bornes de la charge, ainsi que le courant absorbé par celle-ci. À chaque vitesse de vent fixée, la charge a été progressivement variée afin d'observer la réponse du système dans différentes conditions de fonctionnement. Cette procédure a été répétée pour plusieurs niveaux de vitesse, dans le but d'analyser l'impact conjoint de la vitesse du vent et de la charge électrique sur les performances de l'éolienne.

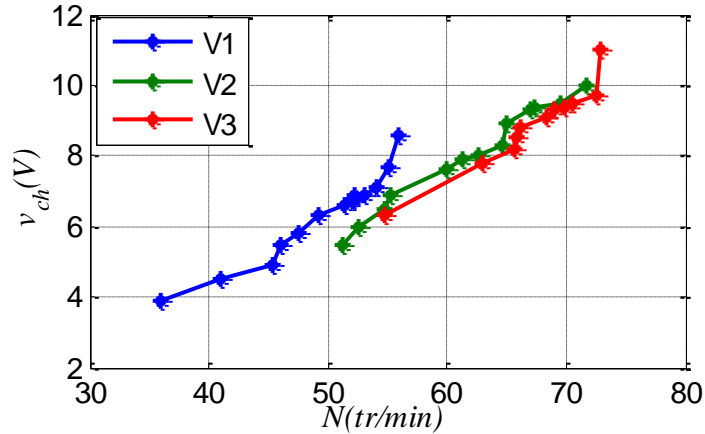
#### ***a) Essais sur l'éolien à axe vertical***

Dans ce premier essai, l'éolienne testée est de type à axe vertical. Elle fonctionne sous différentes vitesses de vent fixes (notées V1, V2 et V3), tandis que la charge électrique est progressivement variée. La Figure III.12 illustre l'évolution de la tension de charge en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne, pour chacune des vitesses de vent.

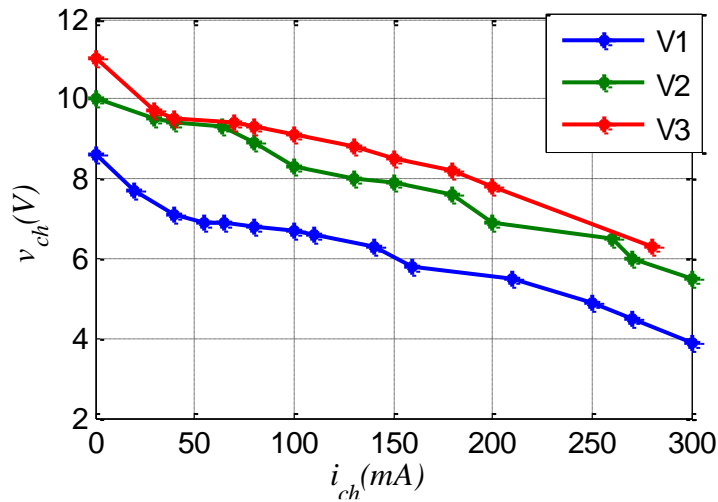
On observe que, pour les trois cas (vitesses V1, V2 et V3), la tension augmente globalement avec la vitesse de rotation. Ce comportement est conforme au fonctionnement d'une génératrice, où la tension induite est proportionnelle à la vitesse. Cela montre que l'éolienne s'adapte efficacement aux conditions de fonctionnement imposées par la variation de charge.

La Figure III.13 illustre l'évolution de la tension de charge  $v_{ch}$  en fonction du courant  $i_{ch}$  pour trois vitesses de vent constantes ( $V1 < V2 < V3$ ). Ces courbes permettent le comportement électrique de l'éolienne à axe vertical lorsqu'elle est soumise à des charges croissantes. On observe que, pour chaque vitesse de vent, la tension diminue progressivement à mesure que le courant augmente. Cette tendance est parfaitement cohérente avec le fonctionnement d'une génératrice alimentant une charge résistive : en effet, lorsque la charge devient plus faible (résistance diminue), le courant augmente, ce qui

engendre une chute de tension due aux pertes internes de la génératrice, notamment à cause de sa résistance ou impédance interne.



**Figure III.12:** Allure de la tension de charge en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne pour les vitesses de vent



**Figure III.13:** Allure de la tension de charge en fonction du courant de charge pour les vitesses de vent

#### **b) Essais sur l'éolienne à axe horizontal**

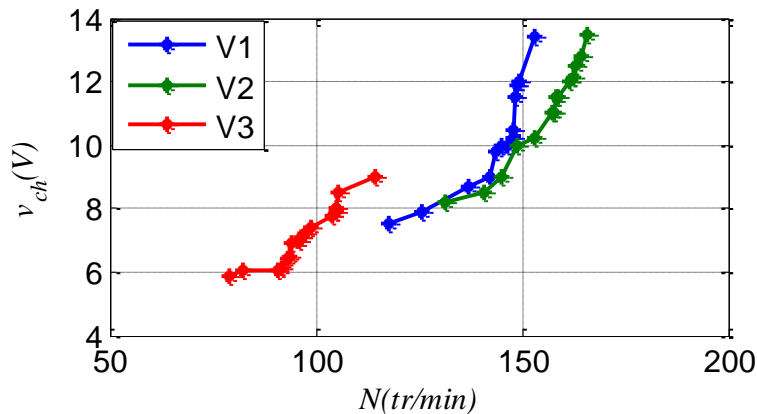
Dans ce premier essai, l'éolienne testée est de type à axe horizontal

La Figure III.14 montre l'évolution de la tension de charge en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne pour différentes vitesses de vent. On constate que, pour les trois cas étudiés (V1, V2 et V3), la tension augmente de manière générale avec la vitesse de rotation. Ce phénomène est en accord avec le fonctionnement d'une génératrice, où la tension induite est directement liée à la vitesse de rotation. Cela souligne la capacité de l'éolienne à

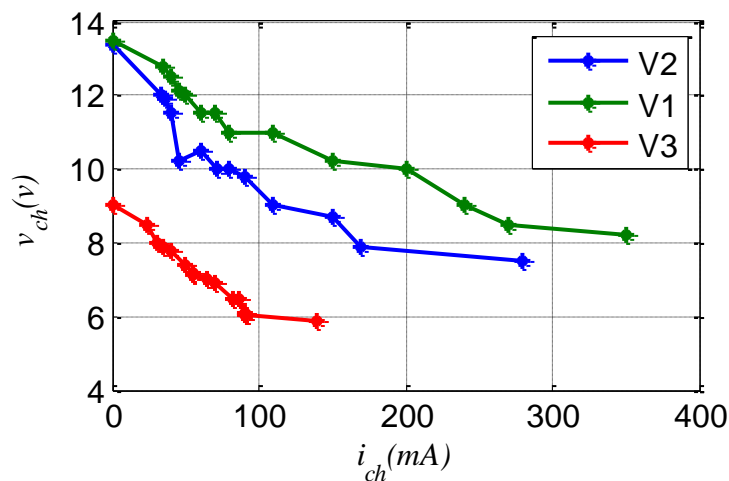
s'adapter efficacement aux variations de charge imposées par les conditions de fonctionnement.

La Figure III.15 présente l'évolution de la tension de charge ( $v_{ch}$ ) en fonction du courant ( $i_{ch}$ ) pour trois vitesses de vent constantes ( $V1 > V2 > V3$ ). Ces courbes permettent d'étudier le comportement électrique de l'éolienne à axe vertical lorsqu'elle est soumise à des charges croissantes.

Il est observé que, pour chaque vitesse de vent, la tension décroît progressivement à mesure que le courant augmente. Ce comportement est en accord avec le principe de fonctionnement d'une génératrice alimentant une charge résistive : lorsque la charge diminue (réduction de la résistance), le courant augmente, entraînant une chute de tension due aux pertes internes de la génératrice, principalement causées par sa résistance ou impédance interne.



**Figure III.14:** Allures de la tension de charge en fonction de la vitesse de rotation de rotation de l'éolienne pour les vitesses de vent



**Figure III.15:** Allure de la tension de charge en fonction de courant de charge pour les vitesses de vent

## **III.8 Conclusion**

Les essais expérimentaux réalisés dans ce chapitre ont permis de vérifier les performances électriques et électromécaniques des deux systèmes éoliens testés. Les mesures ont mis en évidence des différences notables entre les éoliennes à axe horizontal et vertical, notamment au niveau du nombre de pôles, de l'impédance, et du comportement face à différentes vitesses de vent. Les résultats obtenus confirment la fiabilité du banc d'essai ainsi que la pertinence des instruments de mesure utilisés.

## Conclusion générale

Dans un contexte énergétique en évolution, cette étude vise à mieux comprendre, modéliser et expérimenter les systèmes de production éolienne. Elle suit une démarche progressive qui commence par les bases théoriques, se poursuit par la modélisation mathématique, et se termine par des essais expérimentaux sur deux types d'éoliennes de petite puissance.

Le premier chapitre présente les bases nécessaires pour comprendre les systèmes éoliens. Il explique comment l'énergie du vent est transformée en électricité, décrit les différents types d'éoliennes et les machines électriques utilisées. Il met aussi en avant le potentiel de l'Algérie pour l'énergie éolienne grâce à ses conditions géographiques favorables.

Le deuxième chapitre présente la modélisation d'un système éolien utilisant une machine synchrone à aimants permanents, une turbine, un redresseur à diodes et un filtre LC. L'analyse a été faite dans le repère de Park pour mieux étudier le comportement électrique et mécanique du système. Les simulations sous MATLAB/Simulink ont confirmé la validité du modèle, en montrant la stabilité du couple, de la tension, du courant et de la vitesse.

Enfin, le troisième chapitre a apporté une dimension expérimentale essentielle à cette étude. Des essais ont été menés sur deux systèmes réels d'éoliennes de petite puissance, à axes horizontal et vertical, dans un environnement contrôlé. L'ensemble des mesures réalisées (tension, courant, vitesse, flux, impédance) a permis de caractériser de manière précise les performances électromécaniques des deux machines. Les résultats obtenus ont révélé des différences notables entre les deux configurations, tant au niveau de leur comportement dynamique que de leur réponse aux variations de charge et de vent.

À la suite de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- ✓ Validation des résultats obtenus par les essais pratiques avec celles trouvés par la simulation ;
- ✓ Optimiser les performances des systèmes éoliens étudiés en améliorant le contrôle de la vitesse ou de la tension de sortie ;
- ✓ Intégrer des systèmes de stockage (batteries ou super condensateurs) pour mieux gérer la variabilité du vent et assurer une alimentation plus continue ;
- ✓ Mettre en place un système de commande pour améliorer le rendement global ;
- ✓ Développer un prototype en conditions réelles sur site pour valider les résultats obtenus en laboratoire à plus grande échelle.

## ***Bibliographies***

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC), *Global Wind Report 2023*.
- [2] Agence Internationale de l'Énergie (AIE). *Renewable 2023: Analysis and forecast to 2028*. IEA, 2023. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/renewables2023>.
- [3] MIREKI Adam ; « Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » ; thèse de doctorat ; l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) ; 2005.
- [4] Publications du Centre de Développement des Energies Rénouvelables [www.cder.dz](http://www.cder.dz)
- [5] REDJEM Radia ; « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne » ; mémoire de Fin d'étude ; université mentouri de Constantine ; 2009.
- [6] Corinne Dubois, *Leguide de l'éolienne techniques et pratique* éditeur :groupe eyrolles, 2009.
- [7] RIOLET Emmanuel ; « Le mini-éolien » ; livre ; 2010.
- [8] S.Aitmeziane ; « modélisation et simulation d'une centrale éolienne » ; Mémoire de fin d'étude 2009.
- [9] offshore wind.biz. mingyang goes beyond 18 mw with new offshore wind turbine, 2023.
- [10] K. T. Chau, W. L. Li, and C. H. T. Lee, Challenges and opportunities of electric machines for renewable energy, *Progress Electromagnetic Research.*, vol. 42, pp. 45-74, 2012.
- [11] R.Aziz, étude commande et supervision d'un parc de sources d'énergie décentralises, thèse doctorat de l'université de Béjaïa, 2017
- [12] T. Senjyu, Y. Ochi, Y. Kikunaga, M. Tokudome, A. Yona, E. Billy, N. Urasaki, and T. Funabashi, Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation System with squirrel cage induction generator, *Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 994–999, 2009.
- [13] S. A. Deraz and F. E. A. Kader, “A new control strategy for a stand-alone self-excited induction generator driven by a variable speed wind turbine,” *Renew. Energy*, vol. 51, pp. 263–273, 2013.
- [14] M. Quan, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, and E. Ogliari, “Pitch angle control using hybrid controller for all operating regions of SCIG wind turbine system,” *Renew. Energy*, vol. 70, pp. 197–203, 2014.
- [15] M. Karrari, W. Rosehart, and O. P. Malik, “Comprehensive control strategy for variable



Speed Cage Machine Wind Generation Unit,” IEEE Trans. Energy Conv., vol. 20, no. 2, pp. 415–423, 2005.

[16] T. Ghennam, K. Aliouane, F. Akel, B. Francois, and E. M. Berkouk, “Advanced control system of DFIG based wind generators for reactive power production and integration in a wind farm dispatching,” Energy Conv. Manag, vol. 105, pp. 240–250, 2015.

[17] : D. AOUZLLAGE « cours construction de machines électriques», université de Bejaia, 2019.

[18] : M.T. LATRECHE « commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Magister en électrotechnique, université de Sétif, 2012.

[19] : S. SAMIR « Modélisation d’une centrale hybride photovoltaïque-éolien » mémoire de magister de l’université de Sétif, 2011.

[20] Y.Kachebi, S.Hatem, Étude énergétique, réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance , mémoire de fin d'études de l'université de Béjaïa, 2013.

## Annexe 1

la résistance statorique=5.28(ohm)

Inductances directe=0.0265(H)

Inductances quadrature=0.0265(H)

Flux des aimants=0.1022 (wb)

le moment d'inertie=0.0008 (kg. $m^2$ )

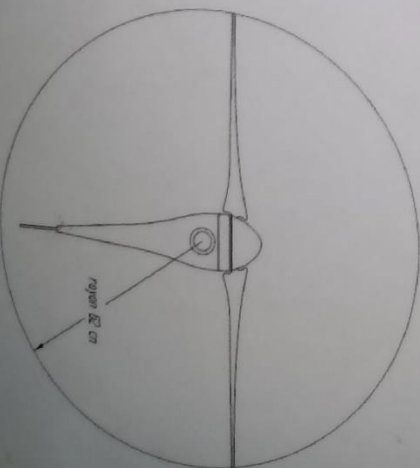
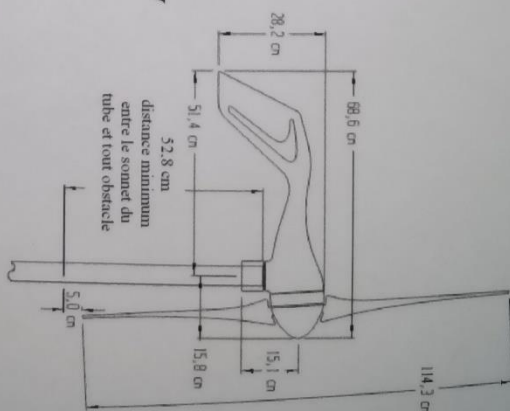
Nombre de paires de pôles=24

le coefficient de frottement=0.001(N.m.s)

## Annexe 2

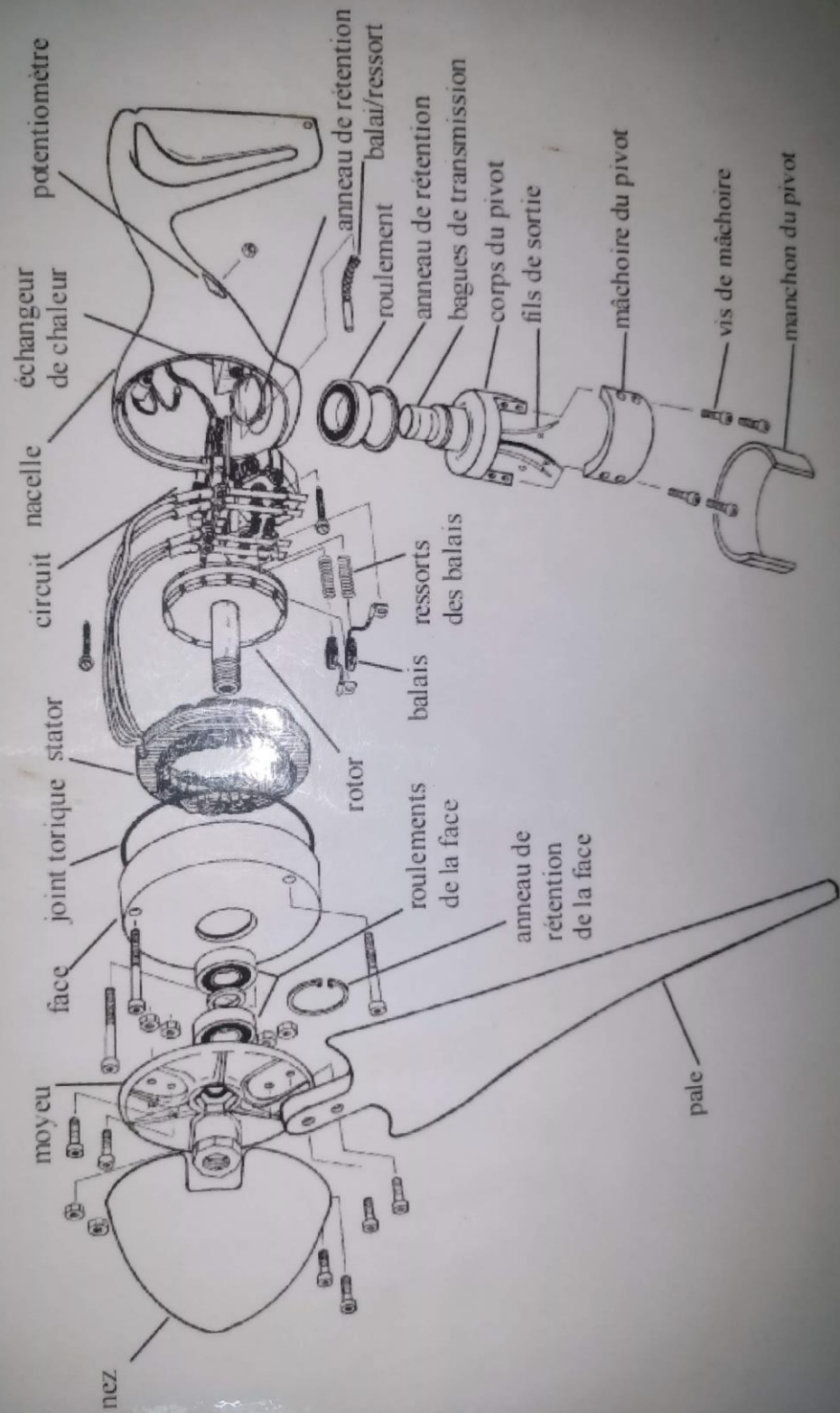
### Caractéristiques Technique et Dimensions de l'Aérogénérateur

Diamètre de l'hélice :	1,17 m
Masse :	6,0 kg
Vitesse de démarrage (seuil):	3,0 m/s
Puissance nominale :	400 W à 12,5 m/s
Fourchette de réglage du régulateur :	12 V : 13,6 à 17,0 V pré - réglé à 14,1 V
Taille de fusible conseillée :	12 V : 50 A « slow - blow »
Taille des fils de sortie (torsadé):	5,26 mm <sup>2</sup>
Diamètre extérieur du tube de mât:	48 mm
Couleurs des fils de sortie :	
ROUGE = positif	
NOIR = négatif	
VERT = terre	



## Annexe 3

### Vue Eclatée de l'Aérogénérateur



## الملخص

في إطار التحول الطاقوي، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل، نمذجة، وتجريب أنظمة طاقة الرياح صغيرة القدرة. تقدم الأسس النظرية للطاقة الريحية، وتقوم بنمذجة نظام يستخدم آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم، ثم تُجرى تجارب عملية على نوعين من العنفات الريحية:

**الكلمات المفتاحية:** طاقة الرياح، قدرة صغيرة، النمذجة، آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم، عفة أفقية، عفة عمودية، المحاكاة، التجربة

**Résumé :** Dans le cadre de la transition énergétique, cette étude vise à analyser, modéliser et expérimenter des systèmes éoliens de petite puissance. Elle présente les bases théoriques de l'énergie éolienne, modélise un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents, puis valide les résultats par des essais expérimentaux sur deux types d'éoliennes : à axe horizontal et vertical. Les résultats révèlent des différences de performances et ouvrent des perspectives d'optimisation et de développement en conditions réelles.

**Mots-clés :** Énergie éolienne, petite puissance, modélisation, machine synchrone à aimants permanents, éolienne horizontale, éolienne verticale, simulation, expérimentation.

**Abstract :** In the context of energy transition, this study aims to analyze, model, and experimentally validate small-scale wind energy systems. It presents the theoretical foundations of wind energy, models a system using a permanent magnet synchronous machine, and verifies results through experimental tests on two types of wind turbines: horizontal and vertical axis. The results highlight performance differences and offer perspectives for optimization and real-world application.

**Keywords :** Wind energy, small-scale, modeling, permanent magnet synchronous machine, horizontal wind turbine, vertical wind turbine, simulation, experimentation.