

I-1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie, tout en préservant l'environnement. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne[1]. Il y'a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux.

La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19^{ème} siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, **Johannes Juul** (élève de **Paul La Cour**) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif [2].

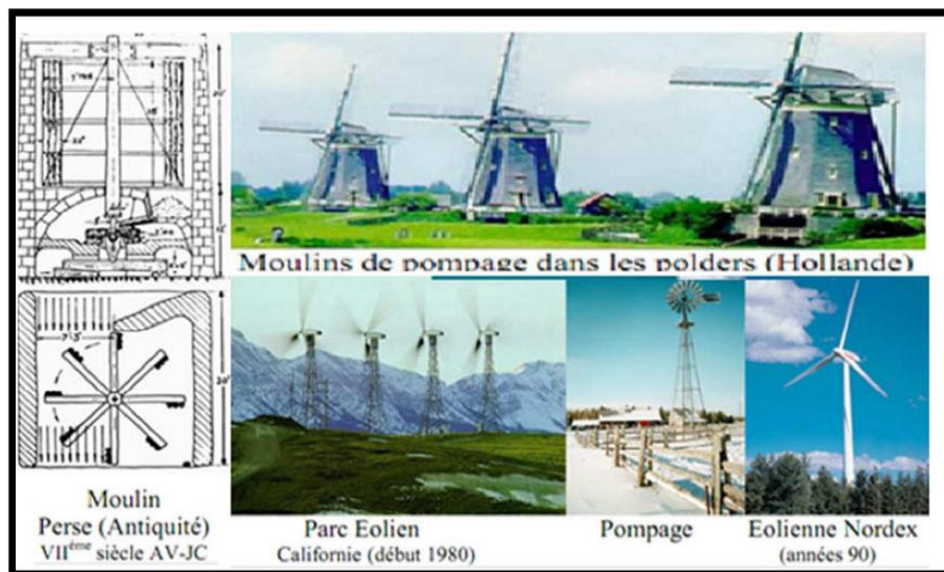


Figure I 1 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985.

En Algérie, le premier pas a été fait par le groupe SonelGaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français

Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui a été opérationnelle en 2012 et injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar[3].

L'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Leurs stratégies de commande permettent de capter un maximum d'énergie sur une grande plage de variation de vitesse de vent afin d'améliorer la rentabilité des systèmes éoliens[4].

Ce premier chapitre présente une description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie. Les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées.

I-2 Énergie Éolienne

I-2-1 Définition

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[5].

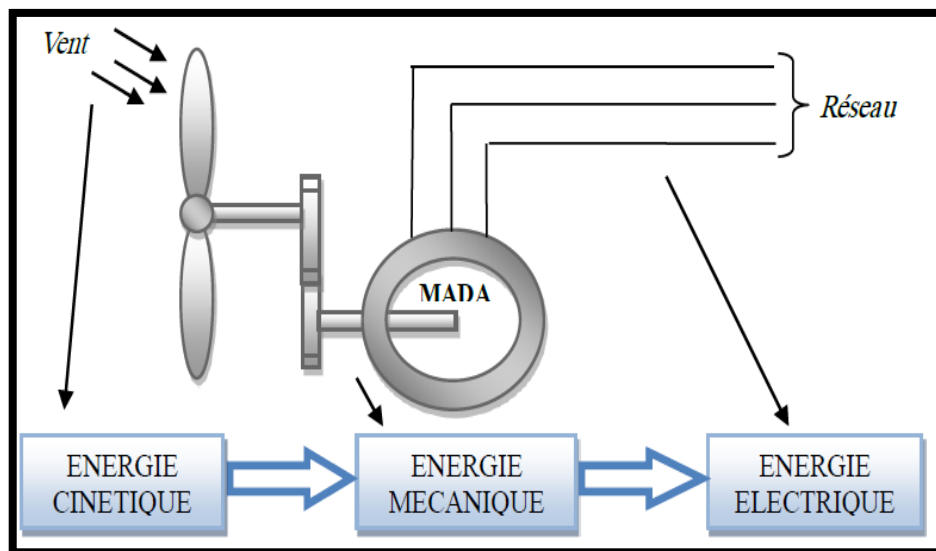


Figure I 2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Le SCE (Système de Conversion Éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique, selon la Figure (I-3)[6].

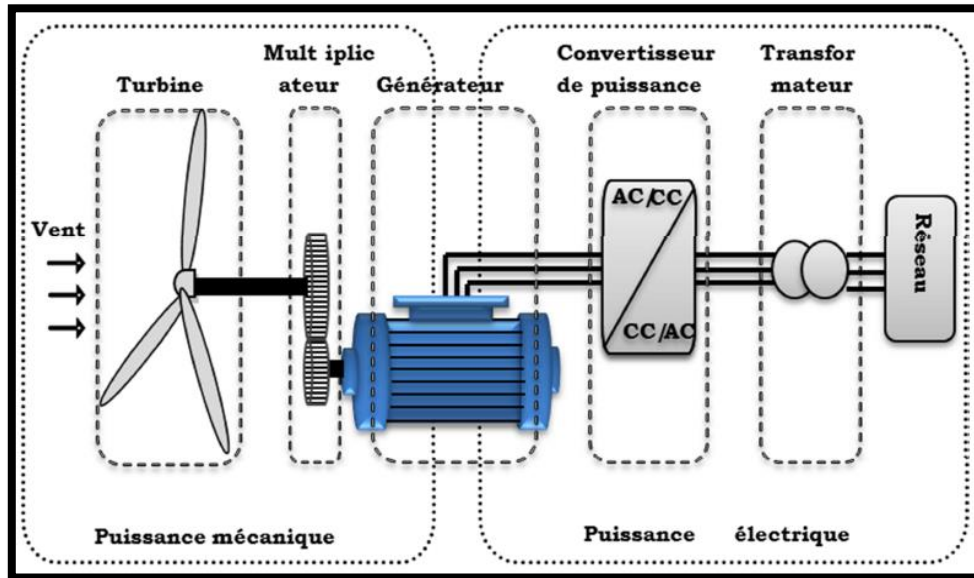


Figure I 3 : Principaux organes du système de conversion éolien

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 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[5].

I-2-2 L'énergie éolienne dans le monde

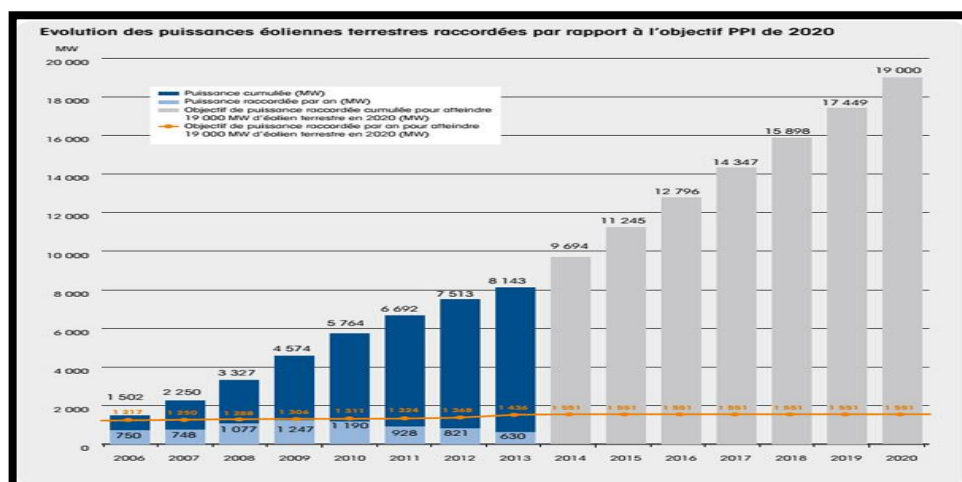


Figure I 4 : capacité totale installée (MW) et prévision 2006-2020

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences, le marché mondial de l'éolien a pu résister. En effet, selon les premières estimations, 37 GW, soit près de 10 GW de puissance supplémentaire par rapport à l'année 2008 ont été installées[7].

A cet égard, la Chine a doublé en 2009 sa capacité de production (+ 13 GW) devançant ainsi la progression des Etats-Unis (+ 10 GW). L'Europe, qui est traditionnellement le plus gros marché en terme d'énergie éolienne, a installé dans la même année 10,5 GW (dont 2,5 en Espagne et 1,9 en Allemagne), elle dispose désormais d'un parc éolien de 74,7 GW qui a produit 163 TWh en 2009, ce qui représente 4,8% des besoins en électricité[8] Selon un rapport commandé par GWEC, la capacité installée mondiale actuelle (157,9 GW) permet de produire 340 TWh d'électricité propre et d'économiser 204 millions de tonnes de CO₂ par an.

L'éolien représente désormais 340 millions de MWh de production électrique par an, soit 2% de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 63 milliards de dollars[9].

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées. Au Moyen Orient, l'Iran a installé 17 MW de nouvelle capacité. Le total de la puissance éolienne installé jusqu'en 2008, était de 669 MW[10].

I-2-3 L'énergie éolienne dans l'Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à l'autre. Ce qui est dû principalement, à la diversité de la topographie et du climat. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen qui est caractérisé par un littoral de 1200km et un relief, représenté par deux grandes chaînes de montagnes : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, surtout du côté Sud-ouest où les vitesses sont supérieures à 4m/s, et dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'il ne faut pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures I-5 (Eté, Printemps, Hiver et Automne). On remarque en général, que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année[11].

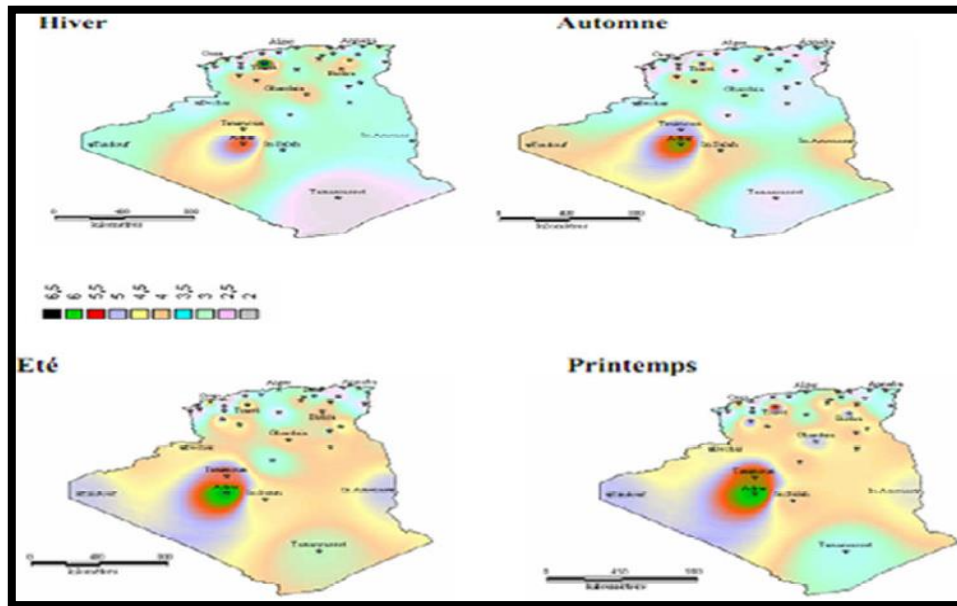


Figure I 5 : Atlas saisonnier de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (Sud-Ouest), a été confiée le 21/01/2010 au groupe Français **VERGNET**. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ[12].

I-3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I-3-1 Avantage

Le vent est inépuisable, il constitue donc une véritable ressource renouvelable particulièrement pour la production de l'électricité. De plus, l'énergie éolienne :

- Est une énergie abondante, géographiquement diffusée, 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).

- Est une énergie qui respecte l'environnement : elle ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif et [13]elle n'est pas une énergie à risque.
- Son exploitation n'est pas un procédé continu.
- Est une énergie locale qui peut donc stimuler l'économie locale notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère de toutes les énergies renouvelables[5].
- Est une source très intéressante pour les pays en voie de développement, étant donné qu'elle répond au besoin urgent d'énergie et l'installation d'un parc éolien est relativement simple, et le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit exploité pour l'agriculture, l'élevage des animaux, etc.

I-3-2 Inconvénients

- La qualité de la puissance électrique : la source de l'énergie éolienne est stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas donc constante et sa qualité n'est pas toujours très bonne. Et compte tenu de la constante augmentation de la pénétration éolienne dans les réseaux de puissance, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le vent est intermittent, et des périodes de grand froid se traduisant par une demande accrue d'énergie s'accompagnent fréquemment de vent faible, voire nul. Ce qui nécessite l'association au système éolien d'autres sources d'énergie renouvelable moins aléatoire ou des sources conventionnelles, on parle donc de « **Système Hybride** », ou encore des systèmes de stockage.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en termes de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés. – 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'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- 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.
- 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.
- Les interférences électromagnétiques avec les équipements électriques et électroniques de la nacelle de l'éolienne[14].

I-4 Types des turbines éoliennes

Une turbines éolienne, plus couramment appelé aérogénérateur, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

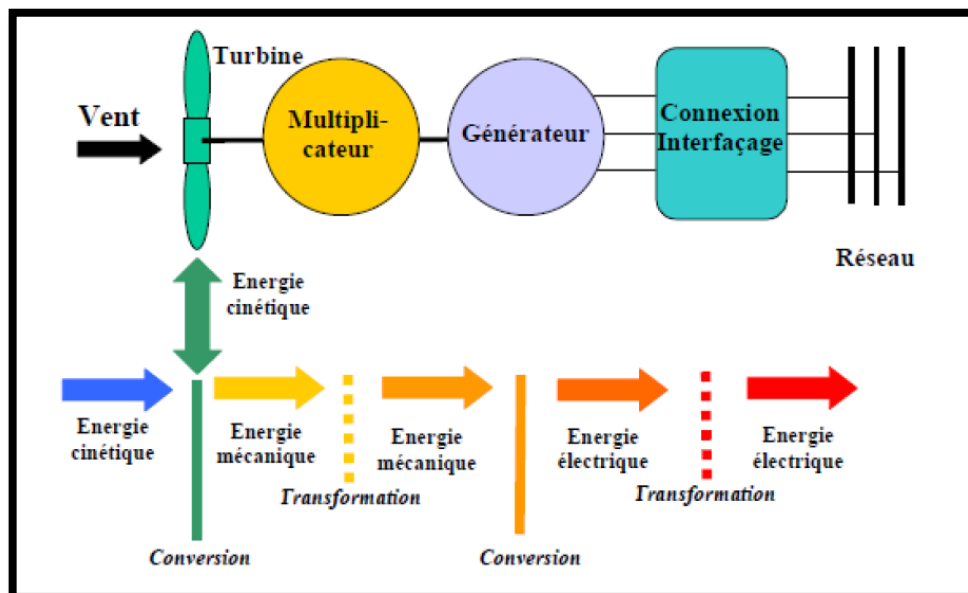


Figure I 6 : Conversion de l'énergie éolienne

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [15]:

Tableau I 1 : Classification des turbines éoliennes (à axe vertical et à axe horizontal)

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

La classification des éoliennes peut se faire selon d'autres critères qui influencent beaucoup le procédé de conversion et qui aboutissent à des éoliennes totalement différentes que ce soit au niveau de la conception mécanique (axe horizontal ou vertical) ou leur technologie (vitesse fixe ou variable) pour la connexion au réseau.

I-4-1 Eolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de savonnais et le rotor de Darrieux[16].

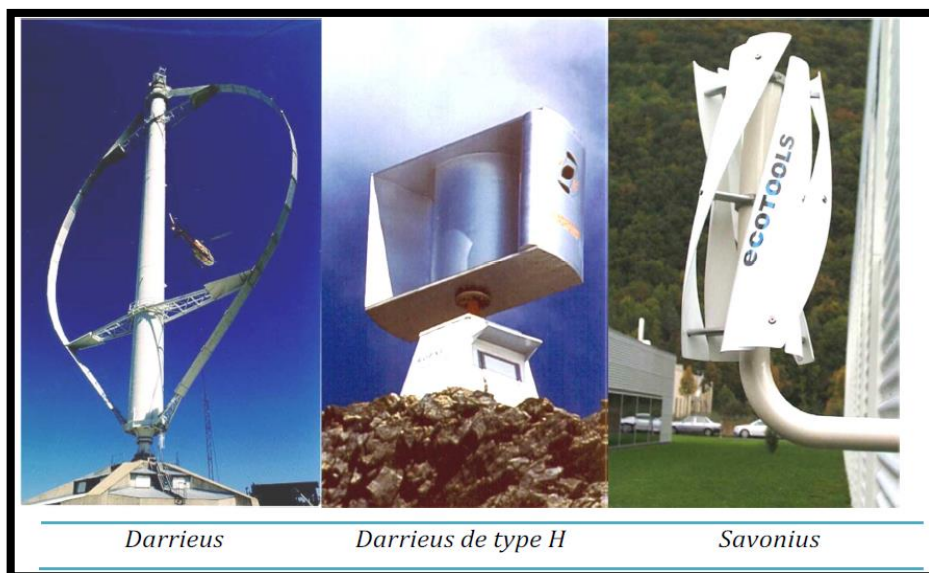


Figure I 7 : technologie éolienne à axe vertical

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit[17]:

I-4-1-a Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I-4-1-b Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I-4-2 Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent[18].

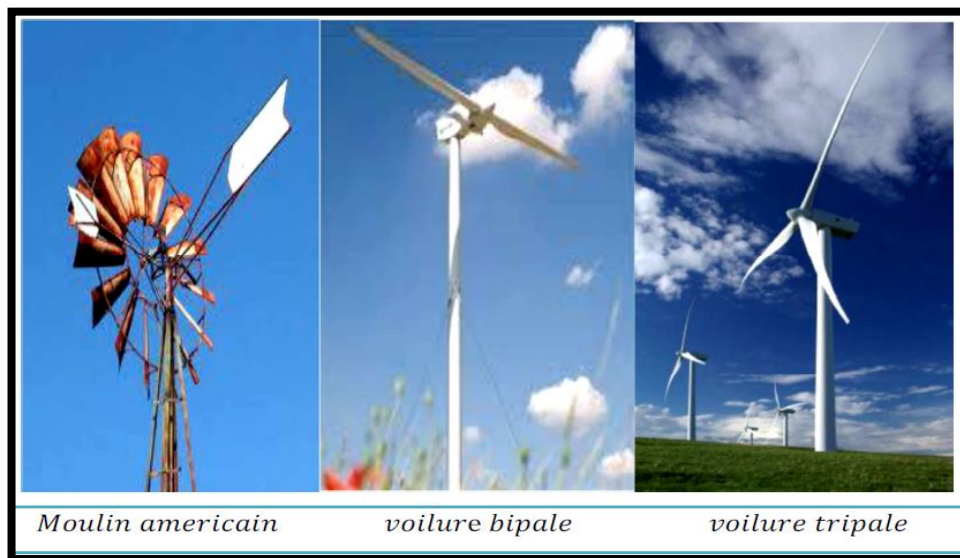


Figure I 8 : technologie éolienne à axe horizontale

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (figure I-8) :

Amont : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée, car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances (pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité). Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction[19].

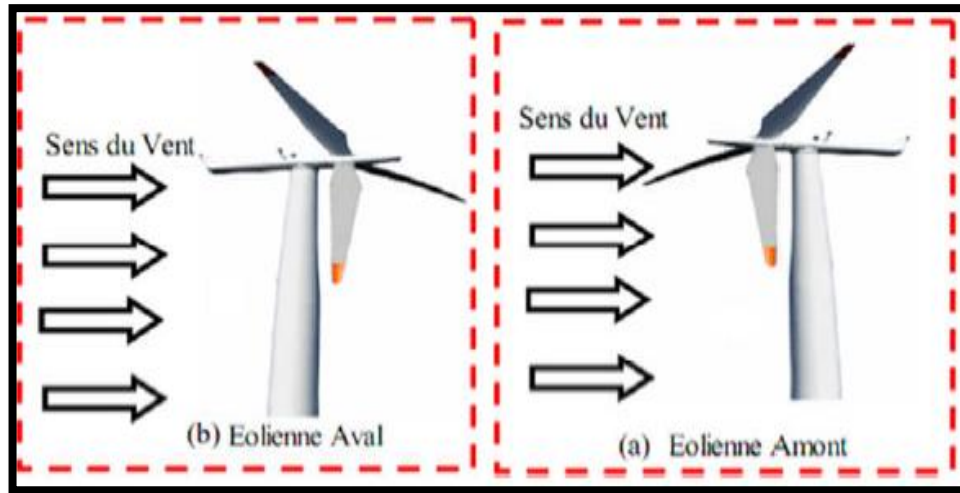


Figure I 9 : Eoliennes en amont et en aval

I-4-2-a Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I-4-2-b Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [16].

I-4-2-1 Structure d'une éolienne à axe horizontal

La Figure I-9 représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [05].

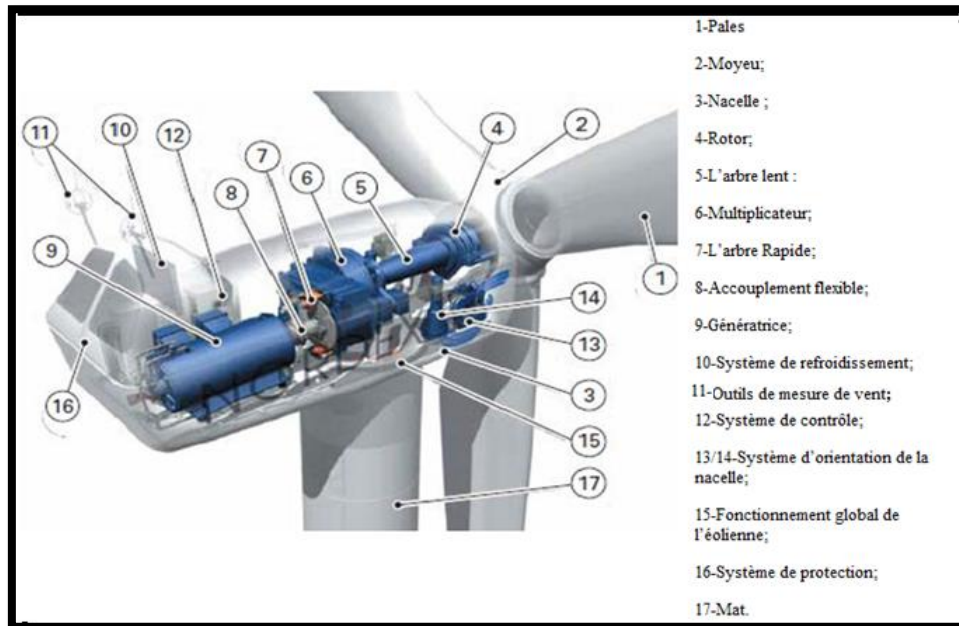


Figure I 10 : L'éolienne à l'intérieur

I-4-2-2 Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal

A la hauteur de la nacelle, souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée et est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit que l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit qu'elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques[20].

Pour des vitesses de vent égales au seuil de la vitesse de la turbine, la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements.

Lorsque la vitesse du vent dépasse le seuil, les pales sont mises en drapeau (parallèles à la direction du vent), leur portance devient quasiment nulle et l'éolienne cesse alors de tourner (Arrêt de production d'électricité). Tant que la vitesse du vent reste supérieure à celle du seuil, le rotor tourne « en roue libre » et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en production.

Toutes ces opérations sont automatisées. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque placé sur l'axe rapide permet de mettre l'éolienne en sécurité. Au pied de chaque éolienne, un transformateur convertit la tension produite en tension du réseau sur lequel toute l'électricité produite est déversée.

I-4-3 Eolienne à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure I-10). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage[12].

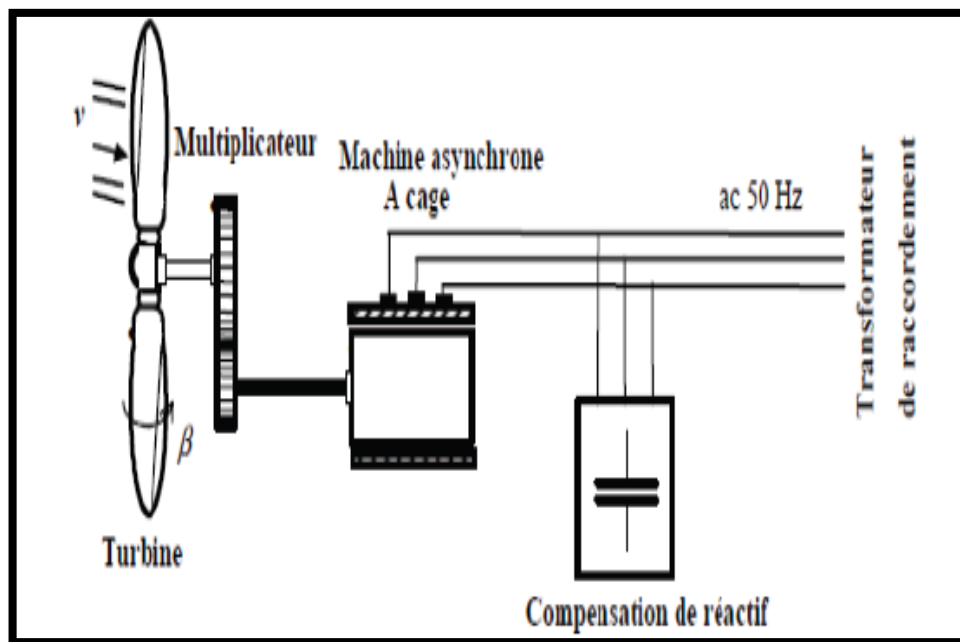


Figure I 11 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes[21]

En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée. Le Tableau I-2 illustre un comparatif simple entre les différents avantages/inconvénients de système éolien à vitesse fixe.

Tableau I 2 : Comparaison entre les avantages et les inconvénients d'un éolien à vitesse fixe

Avantages du fonctionnement à vitesse fixe	Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe
<ul style="list-style-type: none"> - Un système électrique plus simple. - Une plus grande fiabilité. - Une faible probabilité d'excitation des - Fréquences de résonance des éléments de l'éolienne. - L'absence de système électronique de commande. - Un cout moins cher. 	<ul style="list-style-type: none"> - La puissance extraite n'est pas optimisée. - la maintenance de la boite à vitesse. - L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur. - la magnétisation de la machine non gérée.

I-4-4 Eolienne à vitesse variable

Des systèmes éoliens, à vitesse de rotation variable, vont permettre d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine. Trois structures différentes sont proposées :

- Le premier est l'utilisation d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance permettant le fonctionnement à vitesse variable.
- La deuxième utilise une machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant ;
- La troisième est l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée au rotor par un convertisseur électronique[22].

I-4-4-1 Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne[17]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par

un convertisseur statique AC/AC de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. (Figure I-11).

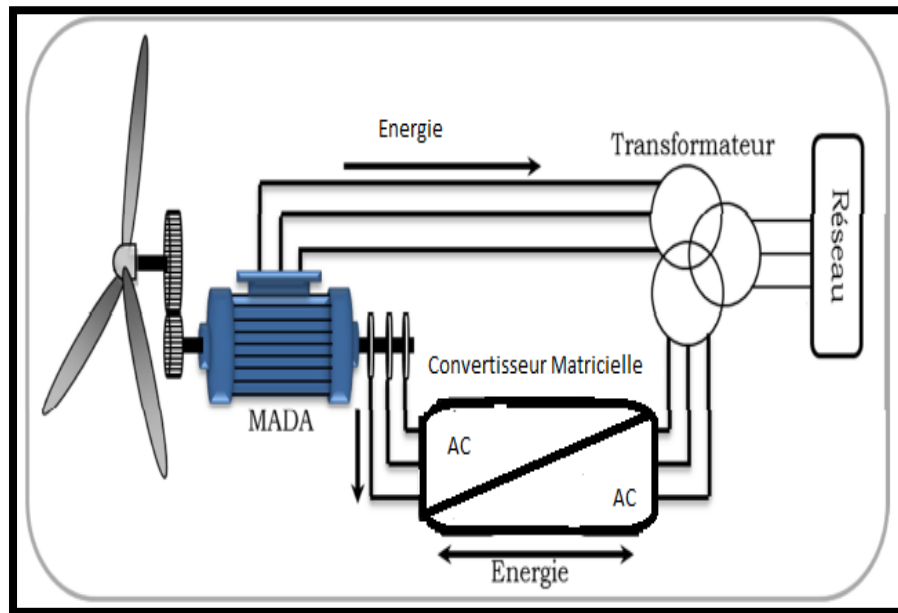


Figure I 12 : SCEE basé sur la MADA

La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor[23].

I-4-4-2 Intérêts de la vitesse variable

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants[21]:

Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti,

- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale,
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie,

- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure I.8. Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées. La zone A correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance. La zone B correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. La zone C correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale[14].

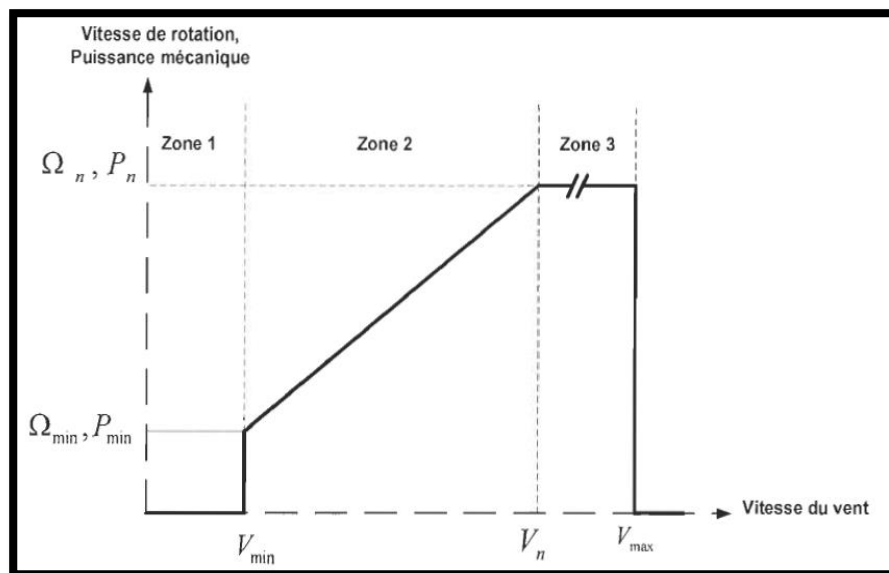


Figure I 13 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

I-5 Développement des éoliennes à différentes machines

Ces dernières années, la conception des éoliennes s'est orientée vers la conception de prototypes d'éoliennes qui dépassent 1MW.

Cette tendance s'est concrétisée avec la conception et l'installation de plusieurs prototypes d'éoliennes à savoir l'E112 d'Enercon (4,5MW en 2002) , la M5000 de Repower et Multibrid (5 MW en 2004) et l'E126d'Enercon (6 MW) en 2007 [24].

Au tableau 1-3 sont présentés quelques prototypes disponibles ou en cours de développement d'éoliennes de grande puissance, destinées principalement aux applications offshore[11](le prototype de 10-MW fabriqué par « Clipper Wind Power » sera utilisé dans les fermes offshore au Royaume Uni en 2011. Les prototypes de 6 MW sont déjà disponibles

sur le marché, alors que des modèles de 10MW vont être commercialisés dans un futur proche.

Tableau I 3 : Eoliennes de grande puissance pour les applications offshore

Puissance nominale	Générateur	Fabricant	Etat
10MW	MADA	Windtec	En-développement
10MW	MSAP	Clipper	En-développement
7.5MW	MS	Enercon	En-développement
6MW	MS	Enercon	Disponible
5MW	MASP	Areva	Disponible
5MW	MASP	Windtec	En-développement
5MW	MSAP	Xeme-cDarwind	En-développement

I-6 Comparaison entre les différents fonctionnements et types d'éoliens

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Avec la meilleure qualité et la baisse des coûts de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées[25].

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne[26], différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne.

Tableau I 4 : Table Comparatif entre la vitesse fixe et la vitesse variable

Fonctionnement a vitesse fixe	Fonctionnement a vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité du système électrique - Plus grande fiabilité. - Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. - Moins cher. - Fonctionnement a vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale). 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation du rendement énergétique. - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. - Réduction des efforts subis par le train de puissance. - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Tableau I 5 : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine standard - Robuste - Faible coût - Pas d'EP pour l'interfaçage 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée - Maintenance boîte de vitesse - Pas de gestion de l'énergie réactive par générateur - Magnétisation de la machine non gérée
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale - Machine standard - Connexion de la machine plus facile à gérer - Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boîte de vitesse - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle – commande complexe - Contact glissant bagues – Balais
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - Possibilité d'absence de boîte de Vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance - Machine spécifique - Grand diamètre de machine - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

I-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu les types des aérogénérateurs ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie. Ensuite, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

La dernière partie de ce chapitre présente les avantages et les inconvénients des machines électriques adaptables à un système éolien et les puissances fournies par eux.

Donc, d'après cette étude, nous avons choisi d'étudier une éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la commande de la turbine éolienne en zone de l'extraction maximale de la puissance (Zone 2). Cette commande permet de développer la puissance mécanique produite en fonction de la variation de la vitesse du vent et la vitesse mécanique de l'éolienne, qui nous allons présenter dans le chapitre suivant.